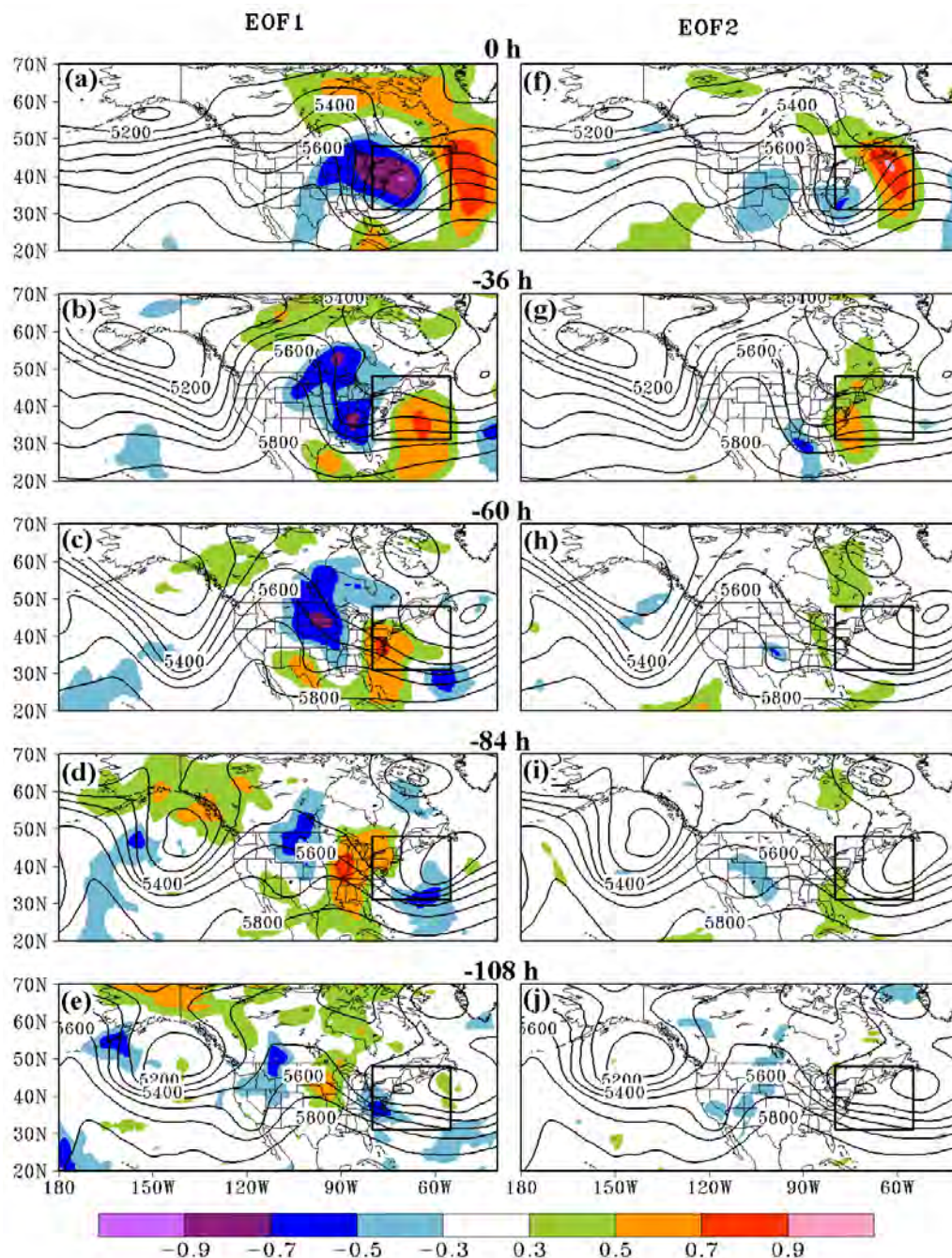




集合预报研究与业务

气象科技 **进展**  
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院  
中国气象学会

主办

**主管** 中国气象局  
**主办** 中国气象局气象干部培训学院  
中国气象学会  
**出版** 《气象科技进展》(英文) 编辑部

**名誉主编** 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院  
**主编** 许小峰 中国气象局

#### 副主编

王志强 中国气象局气象干部培训学院  
王金星 中国气象学会  
肖子牛 中国科学院大气物理研究所  
翟盘茂 中国气象科学研究院  
姚学祥 中国气象局  
李维京 国家气候中心  
胡永云 北京大学  
谈哲敏 北京大学  
孙健 中国气象局公共气象服务中心  
费建芳 国防科技大学  
赵立成 国家气象信息中心  
张鹏 国家卫星气象中心  
管兆勇 南京信息工程大学  
何建新 成都信息工程大学  
黄建平 兰州大学  
廖小罕 中国科学院地理科学与资源研究所  
贾朋群 (专职) 中国气象局气象干部培训学院

#### 常务编委 (按音序排名)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 陈金阳 | 成秀虎 | 龚建东 | 郭虎  | 郭学良 |
| 李柏  | 李国平 | 罗云峰 | 倪允琪 | 曲晓波 |
| 任国玉 | 任小波 | 沈文海 | 王存忠 | 王怀刚 |
| 武炳义 | 杨修群 | 俞小鼎 | 张朝林 | 张庆云 |
| 赵平  |     |     |     |     |

#### 编委 (按音序排名)

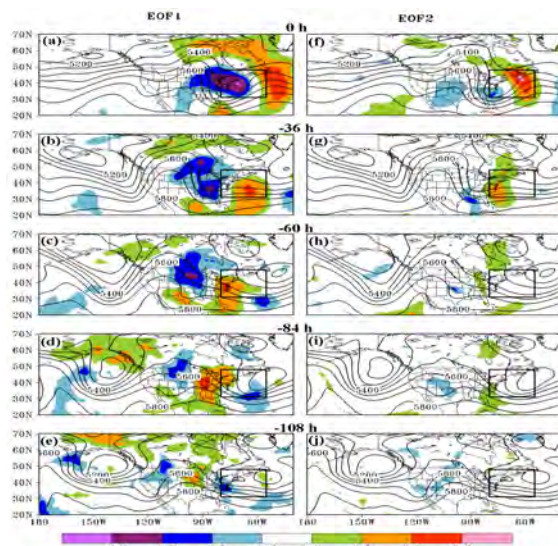
|     |     |        |     |     |
|-----|-----|--------|-----|-----|
| 毕宝贵 | 陈镜明 | 陈云峰    | 陈振林 | 崔春光 |
| 崔讲  | 董胡欣 | 杜跃文    | 姜国彤 | 何金海 |
| 何清  | 李集明 | 李俊     | 李良福 | 李耀辉 |
| 雷小途 | 李忠  | 梁旭东    | 刘晶  | 刘黎平 |
| 李跃清 | 刘明  | 刘征     | 卢乃  | 彭宇  |
| 李立  | 刘亚  | 马舒庆    | 马耀  | 彭莹  |
| 罗兵  | 宋燕  | 索渺清    | 汤绪  | 田红  |
| 浦一芬 | 王王  | 王斌(海外) | 王东海 | 王建林 |
| 万齐林 | 王卫  | 王延     | 王迎春 | 元广  |
| 王式功 | 卫晓  | 温敏     | 翁富  | 吴立  |
| 王自发 | 闫冠  | 延冬     | 杨萍  | 杨松  |
| 谢志辉 | 伊兰  | 于斌     | 翟武全 | 张大林 |
| 杨昭明 | 张立  | 张玲     | 张跃  | 赵广忠 |
| 张广俊 | 周建  | 周凌     | 张信  | 朱定  |
| 周定文 | 朱玉洁 | 祝燕德    | 邹立  | 邹晓  |
| 朱小祥 |     |        |     |     |

#### 编辑部

张萌 侯美亭 李莉 冀文彬 江剑民  
崔晓军  
地址: 北京市中关村南大街46号,  
中国气象局气象干部培训学院 100081  
电话: (010) 68409927/68409933  
邮箱: amst@cma.gov.cn  
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA  
网址: http://cmalibrary.cn/amst  
投稿系统: http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx  
官方微博: http://weibo.com/2115232930/profile  
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 张萌 侯美亭

ISSN 2095-1973  
CN 10-1000/P  
定价: 30元



本刊已被万方数据、《中国学术期刊网络出版总库》和CNKI系列数据库以及《中文科技期刊》(维普网)全文收录, 相关著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为(除事先声明外)视为同意文章被上述数据库收录。

## 目次

第10卷 第2期 2020年4月20日

### 1 许小峰: 主编语

## 科学观察

- 2 许小峰: 低层垂直大气廓线遥感探测技术进展
- 6 贾朋群, 李攀, 邓京勉: 研究型业务: 来自2020年AMS百年年会的3个解读

## 封面报道: 集合预报研究与业务

### 研究进展

- 9 陈静, 李晓莉: GRAPES全球/区域集合预报系统10年发展回顾及展望
- 19 陈超辉, 王勇, 杜钧, 何宏让, 刘宇迪, 姜勇强: 欧洲业务集合预报系统进展
- 30 苏翔, 袁慧玲: 集合预报统计学后处理技术研究进展
- 42 郑明华, 杜钧, Brian A. Colle: 集合敏感性分析在北半球中纬度高影响天气中的应用
- 58 王毅, 代刊, 张晓美, 唐健, 周非凡, 马杰: 集合敏感性在预报误差及可预报性研究中的应用进展综述

### 论坛

- 65 陈圣劼, 孙泓川, 康志明: 集合预报产品在省、市、县天气预报中的应用情况调查

### 特写

- 75 杜钧, 邓国: “预报挑战度”和“可预报性演变指数”简介

## 主编语

大气运动具有复杂的非线性混沌性质,对初值的微小误差表现出高度敏感性,导致天气过程的演变呈现出难以准确预测的随机动力特征,从而难以消除单一数值模式的预报结果与真实大气运动状态之间存在的确定性偏差。为了解决这一问题,气象学家提出了“集合预报”的概念,并随之发展了具体技术方法,取得了显著效果。

集合预报是新一代随机动力概率预报技术,既能给出单一的最佳可能预报,也能提供概率预报产品,其在天气预报业务系统中的重要地位和作用已获得广泛认可。本期“封面报道”特别邀请杜钧研究员(NOAA)、王勇研究员(奥地利气象局),陈静研究员(国家气象中心)组织了“集合预报研究与业务”主题专栏(P9起),就我国GRAPES全球/区域集合预报系统、欧洲业务集合预报系统、集合预报统计学后处理技术等研究进展,以及集合敏感性应用、集合预报产品在我国应用情况的调查等方面进行了综合阐述,以期能使读者全面了解这一技术的发展现状。

气象事业是科技型、基础性社会公益事业,人才历来是推动气象科技创新的第一驱动力,在促进气象事业高质量发展中发挥的作用尤为突出。中国气象局人才交流中心致力于气象人才队伍建设,密切跟踪气象人才发展趋势,探索气象人才发展规律。本期刊发的“气象人才建设”专栏(P78起)得到了中国气象局人才交流中心的大力支持。专栏汇总了人才交流

中心及相关部门近期在人才工作方面的部分研究成果,包括气象人才准入、选拔、队伍建设等不同方面,对人才招聘需求和招聘策略、人才评价机制体制改革和人才评价指标体系构建、高层次人才和企业人才队伍建设等进行了深入分析。另外,专栏也包括了面向预报员的培训需求(P92)、气象科普工作(P125)等文章,进一步丰富了专栏内容。专栏文章可为持续优化人才发展环境、建设系统科学的气象人才政策体系提供有益参考。

新冠肺炎疫情在全球的蔓延,让人们逐步认识到了社交距离在预防传染病传播中的作用。本期阅读栏目介绍了从空气动力学角度计算得出2米社交距离的依据(P132)。

经国家新闻出版主管部门批准,自本期开始,中国气象学会成为本刊主办单位之一,我们期待与气象学会紧密合作,提升期刊的质量和影响力。

本期编辑期间,惊闻本刊原编委高学浩老师因病去世,为纪念其一生对中国气象继续教育事业做出的贡献,以及一直以来对本刊的呵护,特节选学浩老师与夫人王卫群2005年共同发表于《继续教育》上的对美国气象继续教育的分析文章(P136),与读者一道缅怀逝者。

许小峰

## 研究进展

- 79 王梅华,刘蕊:气象部门高层次人才评价研究
- 83 蔡金玲,林巧,乐青:大气科学类专业毕业生就业意向对气象部门人才招聘工作的启示
- 87 乐青,林巧,蔡金玲:气象部门事业单位公开招聘工作现状及问题分析
- 92 钟琦,薛童,朱禾,叶梦姝:面向预报员的精细化数值预报产品应用培训需求研究
- 100 刘蕊,刘艺,杜净译:气象部门高层次人才队伍发展趋势研究
- 104 孙天蕊,蔡金玲,杜净译,周倩:中国气象局直属机关青年人才队伍建设研究
- 108 邢亚争,孙天蕊,周倩:气象部门人事管理岗位培训需求研究
- 112 林巧,乐青,张龙伯,邢亚争:微信公众号“气象人才”

## 往事钩沉

### 人物/事件

- 129 李冬梅:近代外国人历险记中的新疆天气——以《帕米尔历险记》为例

## 阅读

- 132 贾朋群,孙梦晗:飞沫传播与社交距离

## 气象人才建设

的宣传策略研究

- 115 刘艺,刘蕊,杜净译:气象部门国有企业职称工作浅析

## 论坛

- 118 姚秀萍,叶梦姝:浅析气象继续教育教案的编写
- 120 周倩,邢亚争,孙天蕊:气象部门国有企业人才队伍建设问题及对策研究——以华云和华风集团为例
- 123 杜净译,刘蕊,刘艺,孙天蕊:气象直属单位青年绩优员工发展特征研究
- 125 康雯瑛,赵洪升,温晶,李陶陶:新时代气象科普工作的定位与可持续发展路径研究
- 127 刘琛钊,王小超,王红侠:气象部门政府购买人才服务需求探讨

- 136 高学浩,王卫群:他山之石:美国气象继续教育与培训——摘自《继续教育》

## 编辑选编

- 134 气候变化下苔原和稀树草原生物群落木本植物入侵加剧/朝鲜半岛附近东亚气旋的快速加强/高分辨率(30 m)土壤水分数据构建/冠层垂直变化的高分辨率激光观测

## AMS词汇

- 封3 张伊,贾朋群:平顶冰山(tabular iceberg或table iceberg)

# 低层垂直大气廓线遥感探测技术进展

■ 许小峰

不同探测方式的遥感设备针对各类目标物的探测能力有较大区别，靠单一设备难以承担综合信息的获取，较好的设计是通过多种设备协调探测，信息互补，综合分析，融合处理，最终得到可有效用于业务的完整信息。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.001

从当前气象预报业务发展的实际情况看，对于数百千米以上尺度天气系统的中短期预报，数值模式预报结果基本上已超越了预报员的能力，预报员虽还能做些订正改进，但多数情况下也只能仅此而已。对于月、季、年以上时间尺度的天气、气候预测，无论是传统方法还是数值模式方法，都还存在差距，仍有许多难点和问题尚未解决。但气候模式的进步也是显著的，已成为气候研究和预测的重要方法。而对于几十千米以下的中小尺度天气系统预报，存在不少尚待解决的问题，如地形影响、云物理过程、与大尺度系统的相互作用等，需要从机理上深入研究，而其中需要解决的一个重要问题是提高初始场信息的获取能力，特别是当数值预报水平网格加密到几千米甚至1 km以下时，现有业务探测系统显然就难以满足需求了，特别是地面以上数千米的垂直探测，差距更大。

尽管从全球视角来看，我国气象探空业务系统的水平不低，但从捕捉中小尺度系统天气角度看，多年来布设在全国的约120个气象探空站，平均水平间隔在数百千米以上，时间上每天探测两次，基本上体现了国际整体水平，但多数情况下无法完整刻画中小尺度天气系统的结构特征，难免出现大量漏网之鱼。而对于强对流系统发展过程中的云物

理结构变化，也难以通过目前的探空系统获取。且若想提高探空站的时空密度，从运行成本、环境制约等因素考虑，都难以承受。对于大尺度天气系统的预报，卫星资料提供了强有力的支撑，但对于云系发展较活跃的中小尺度天气，卫星在大气低层的探测能力受到较大制约。

世界气象组织(WMO)在《数值天气预报应用指南》特别强调了对风、温度和湿度垂直廓线信息的需求，特别是在多云地区，具有更重要的价值。在实践中，不少国家都在探索如何获取高时空分辨率的垂直基本气象要素场的方案选择，满足实际气象业务和科技发展需求。低空遥感综合探测被认为是可行的方案，前提是要解决好信息合理处理中的难点问题。不同探测方式的遥感设备针对各类目标物的探测能力有较大区别，靠单一设备难以承担综合信息的获取，较好的设计是通过多种设备协调探测，信息互补，综合分析，融合处理，最终得到可有效用于业务的完整信息。

从目前实际业务需求考虑，要重点针对以温度、湿度、气压、风向、风速、云水变化为主要特征的大气垂直探测要素，综合考虑所要获取的气象探测信息与各类探测设备性能特点的一致性，在不同的气象条件下，形成处理好不同探测设备信息的业务能力。

## 1 美国大气研究中心(NCAR)发展的低对流层观测系统(LOTOS)

为了获取大气对流层中下层和大气边界层的气象信息，NCAR的地球观测实验室(EOL)近年来发展了一个低对流层观测系统(LOTOS)，利用多种遥感设备进行综合观测，构成一个集成化平台，以解决在大气边界层和对流层中下部这一大气与陆面相互作用活跃及强对流系统发展旺盛的垂直高度场信息获取问题。其主要做法和特点是不同设备的探测能力进行分类，设计出了可以综合集成多种探测设备的系统平台，在不同条件下获取各类气象要素的垂直廓线及云水物理参数，解决了依靠单一设备难以满足的多样信息需求问题。用户可以根据实际任务选择设备，灵活构建不同性能的应用平台。

LOTOS集成平台可以进行温度、湿度、风、云、温室气体和气溶胶的遥感垂直剖面观测，湍流和地表通量观测，及自动无线电探空仪发射等，是一个可针对不同用户需求进行区别设计的灵活解决方案。图1列出了LOTOS不同设备选项的性能特征，包括设备、探测要素和探测高度等，从中可以看到获取不同要素和垂直分布所应选择的设备类型。在具体观测实施时，可以针对业务科研目标进行设计，解

资助信息：国家自然科学基金重点项目(91637211)

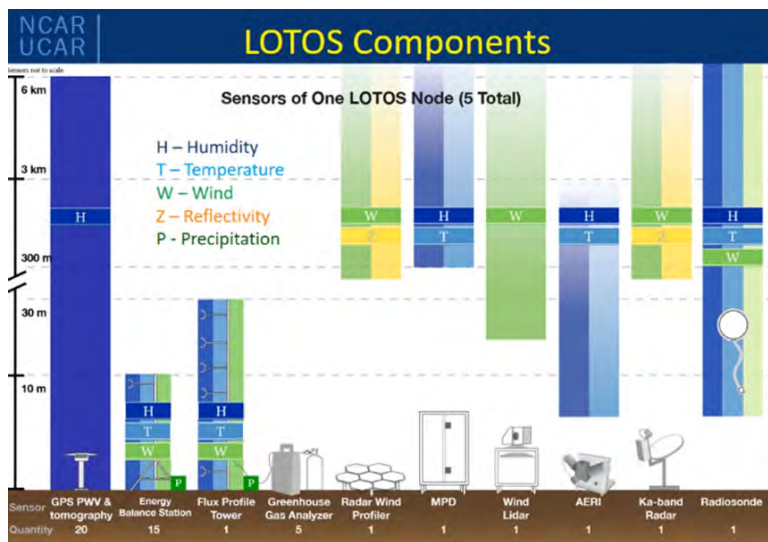


图1 低对流层观测系统 (LOTOS) 设备选项功能特征 (EOL报告)

决与大气表层、边界层和对流层中下层的各类信息获取问题,这一系统可以实现从局地到区域规模的观测,也可针对气候系统各圈层要素相互作用的需求选择仪器设备,进行观测站点设计。

从实际业务应用角度看,并不是有了这些综合设备就能有效获取所需要的要素测值了。如图1所示的激光测风雷达 (wind lidar) 和微脉冲激光测温湿雷达 (MPD) 在出现了云雨的条件下就难以发挥作用,这些遥感仪器在不同气象条件下及针对不同的探测目标物探测效果会有很大差异。如何根据具体条件综合应用各类仪器是必须考虑和解决的关键问题。

在每一个观测点建立组合观测

的基础上, LOTOS的另一个重要特点是可以对多达五个站点的观测进行集成 (图2), 建立区域观测网络, 这一组合网络很适合在复杂地形条件下针对业务、科研需求进行观测设计, 达到对中小尺度天气系统进行区域性精细化立体观测。

## 2 欧洲地基遥感廓线观测网建设

从全球气象业务发展水平看, 欧洲在气象资料处理和数值天气预报模式方面具有明显优势, 近年来在垂直遥感信息应用方面也取得明显成效, 特别是目前在一些欧洲国家已开始运行的分辨率达1 km的细网格数值模式, 已能够有效利用这些低层遥感数据提高预报时效。

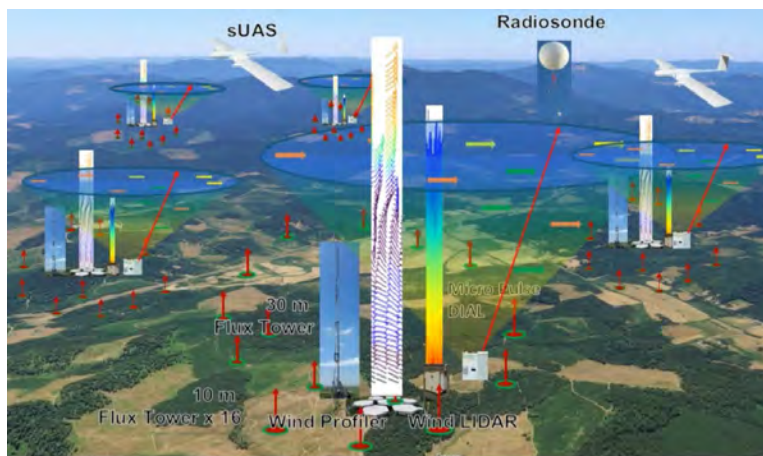


图2 LOTOS复杂地形下多站点观测 (EOL报告)

欧洲气象业务部门目前主要是通过已建成的由多普勒激光测风雷达 (DWL)、后向散射激光雷达/云高仪 (ALC)、微波辐射计 (MWRs) 等设备组成的欧洲地基廓线观测网获取对流层中下部温、湿、风、气溶胶、云等信息。云高仪最初的功能只是测量云底高度, 但现在这些仪器已有能力提供气溶胶和云的后向散射能量变化廓线。因此, 提出了激光雷达和云高探测结合的新概念, 即 ALC。在获取基本信息的基础上, 还可以推算出更多产品, 如湍流水平、边界层状况、低空急流变化等。这个地基观测网是由欧洲科技合作联盟 (COST) 与欧洲国家气象网 (EUMETNET) 合作建立, 其中包括了COST的为改进预报的地基遥感业务廓线观测项目 (TOPROF) 和EUMETNET的欧洲廓线 (E-PROFILE) 项目, 通过合作共同解决了经费支持、观测和信息处理技术、标准规范建立、会议交流、仪器性能比较、物理参数校正、软件开发、业务流程、信息分发、预报应用等问题。E-PROFILE项目原目标是建设风廓线雷达网, 现在通过与TOPROF项目合作, 扩充了垂直廓线信息种类, 在应用上也有了更多的技术选择, 形成综合产品, 供预报业务和数值模式使用。图3为欧洲廓线网的布局和进展情况。

在E-PROFILE网络中运行的激光/云高仪ALC发射波长为532、910和1064 nm的激光短脉冲, 并接收后向散射信号。原始数据的平均垂直分辨率为15~30 m, 时间为15~60 s, 可以获取云、气溶胶、灰尘、雾和火山灰的廓线特征。多普勒激光测风雷达发射波长为1.5  $\mu\text{m}$ , 通过获取气溶胶或云粒子在光束方向上后向散射信号的径向多普勒频移, 做出对风的垂直变化、风切变、湍流状况、最大阵风、低空急流和边界层状态的推算, 探测范围一般为几十米到10 km, 随着天气条

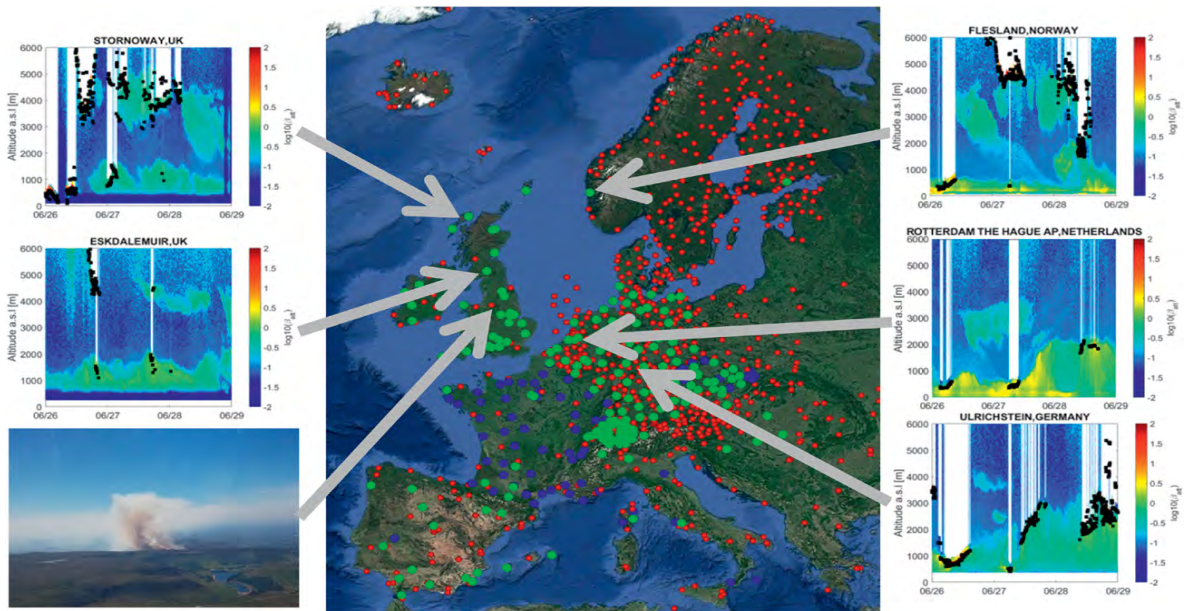


图3 欧洲廓线观测网布局和五个廓线剖面图 (绿色为已在业务中综合集成的站点; 蓝色和红色为近期和计划中集成的站点)

件不同会发生变化, 如在厚的云层或强降雨条件下, 激光探测则无能为力。地基微波辐射计MWR通过测量宇宙背景下的大气辐射频谱微波部分, 通常表现为等效亮温TB, 进而推算大气温度廓线和湿度廓线。在中等以下降水条件下, 这种测量都可以进行, 特别是在地表以上几千米范围, 较卫星等微波观测更为有效。

有了这些直接观测到的垂直观测资料, 就可以用来改进数值预报的初始场了, 包括模式中的云物理参数化方案。这些与应用相关的前期科研工作已开展多年了, 如在21世纪初, 欧盟就组织开展云监测网计划(Cloudnet), 在该计划中科技人员利用云雷达、ALCs和MWRs获得云观测资料, 并将它们与几个欧洲运行预测模式中的云参数进行比较, 形成对比统计数据, 改进预报模式。有些数据的应用相对简单, 如DWL的测风数据可以直接用到模式中。通过实际统计检验, 表明这些数据对预测都有积极影响。

在观测网中使用的设备型号有较大差别, 这也是在应用中需要关注的问题。如ALCs设备, 就有多种频段的仪器运行, 维萨拉公司生产的CL31和CL51测量频率为910 nm,

Lufft公司的CHM 15k测量频率为1064 nm, Sigma Space公司的微脉冲激光雷达(MiniMPL)测量频率为532 nm。遥感设备观测信号处理本身的复杂性与设备类型不同造成的信号差异, 增加了处理的难度, 但这也是业务运行过程中必须要面对并处理好的问题。TOPROF项目的主要任务之一就是要建立各类仪器的通用标校程序、数据质量的通用检验方法和数据准确性的独立验证流程, 包括与数值模式计算数据的比较分析方法, 只有对不同设备观测的数据进行严格的比较和技术处理, 才有可能获取有意义的可用信息。

ALCs发射的激光和接收的后向散射信息在低空会产生光学重叠, 且重叠状况除随高度变化外, 还与环境温度相关, 这使得重叠区域受到干扰的信号使用受到影响。这一问题已通过建立用于校正的重叠变化函数得到解决, 从而在重叠区也可以得到较为准确的信号。需要处理的问题很多, 如对某些天气条件下出现的探测虚假信息、提高远距离目标物探测信噪比、不同设备探测信息的标定及差异处理等, 这些工作都需要在不同天气条件下进行长期实测对比试验才能完成。对信息进行了合理的校正, 数据质量可

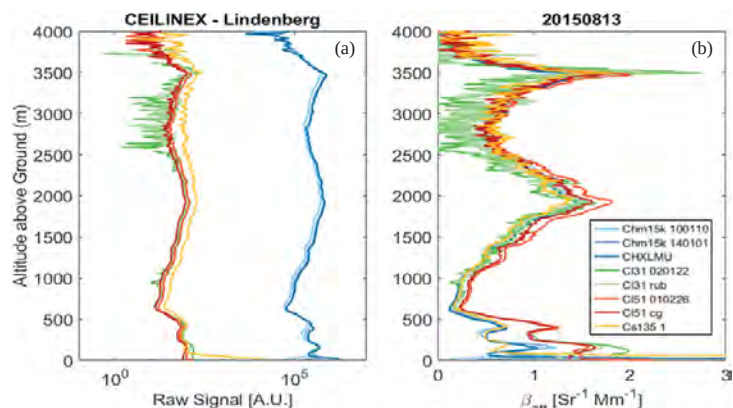


图4 2015年8月13日在德国林登伯格开展的云高仪/激光雷达试验 (CeilLinEx) 活动期间获取的8个ALC后向散射廓线对比数据, 包括坎贝尔、维萨拉公司和路赋德公司的产品

(a) 原始廓线信号; (b) 校准后的信号 (在500 m以上校正效果明显优于低层)

以得到显著提升, 如将激光雷达探测信噪比中值偏差有效降低后, 较低的信噪比阈值可使探测灵敏度提高5倍以上, 明显改进了数据质量。对灵敏度高低的处理还与要获取的目标物种类有密切关系, 若对近地面层的风场和湍流等更感兴趣, 则可以通过部分牺牲远距离灵敏度来实现。图4显示了在德国林登伯格气候观象台开展试验时对八台设备信号对比校正后的结果, 可以看出若不进行校正, 不同仪器的信号会有较大差异, 处理后有了较好的一致性。

在处理好ALCs信号质量的基础上, 一些气象变量便可直接用到数值模式当中, 如风、气溶胶、云信息等。图5显示在芬兰赫尔辛基站获取的风场等变量的垂直分布图。除此之外, 还可以在初始信息的基础上, 开发各类应用产品, 使这些自动化、连续性的摇杆设备发挥更大效用。如在TOPROF项目中, 利用ALC信息, 研发了大气边界层高度诊断, 雾形成预警, 灰尘、生物燃烧和火山灰的运输监测等业务服务产品, 供各国使用。

地基微波辐射计工作原理是通过被动接收大气亮温TB的向下辐射值, 然后转化为大气变量, 如温度、湿度等。原理并不复杂, 但难点也在信号处理上。TOPROF项目围绕获取更精确的TB观测值, 在MWR设备软硬件开发上取得了显著进展, 可以直接用于改进数值模式, 也可以转换为较准确的大气变量。所用的设备为22~31 GHz频段(用于湿度)和51~60 GHz频段(用于温度)的多通道温湿廓线仪, 这些仪器还提供总体水汽含量(IWV)和云液态水路径(LWP)。

在TOPROF项目中, 与仪器供应商一起进行了两次校准现场试验(JCAL), 消除了因反射波与驻波引起的测值不确定性, 使TB的绝对精度提高了0.1 K, 导致最终的观测精度提升了5倍, 温度剖面反演的不确定性降低0.3 K, 提高了边界层的温度反演准确性, 并使IWV和LWP

的精度提高了50%, 实现了新的标校目标及接收技术的改进。同时, 还开发了一个可以广泛用于现有卫星同化软件的快速计算模式, 用来计算地面接收到的亮温测值, 其雅可比背景矩阵可使用源于包括探空、数值模式等任何大气温湿廓线值, 并免费对外提供。经过1年的多站对比试验校正, 观测和反演结果都在可控制在预期误差范围内。

试验表明, 通过同化MWR资料有助于改进近地面2 km范围的数值模式温湿度场结果, 包括在对流和非常稳定的条件。图6显示了在稳定和对流条件下, 同化MWR亮温资料后对温度场的改进, 通过探空资料

进行了验证对比, 在低层效果十分显著。稳定的大气条件是近地面层污染物积累和扩散的关键因素, 而对流性天气则会导致强天气发生。

这些有效的改进从硬件和软件上都促进了探测设备的完善, 促使欧洲国家准备进一步拓展观测网络, 并将这些资料分享给更多国家, 包括欧洲中期数值预报中心(ECMWF)。

### 3 小结

综合以上介绍, 地基垂直探测信息在改进中小尺度预报业务方面具有很大潜力, 是未来大气探测业务发展的重要领域之一, 但要做好这项工作, 需要综合考虑和解决好

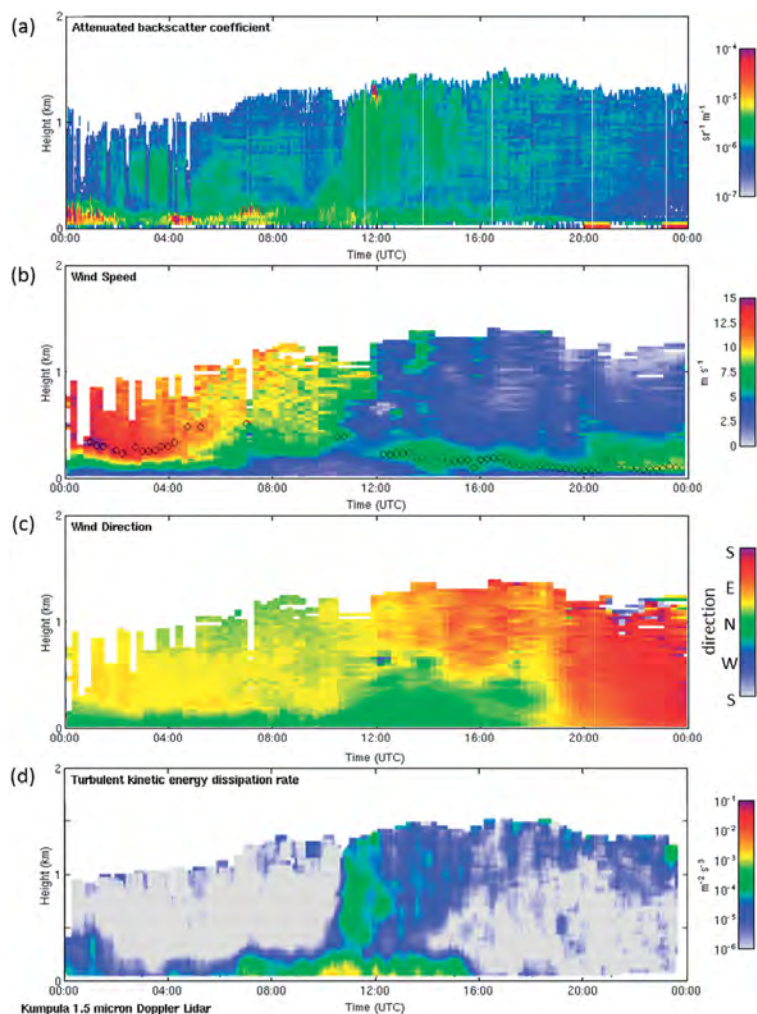


图5 2014年3月24日, 通过在芬兰赫尔辛基运行多普勒激光雷达获取的24小时风场变化高度图

(a) 雷达后向散射系数; (b) 包括低空急流分析(黑圈)的风速分布; (c) 风向; (d) 湍流动能耗散率

(下转8页)

# 研究型业务：来自2020年AMS百年年会的3个解读

■ 贾朋群 李攀 邓京勉

AMS年会展示的借助AI芯片（TPU）的更有效的模拟、借助统一编码规则（CCPP）研发各种物理过程的“芯片”并方便地耦合成与人体一样复杂的地球系统，再借助护栏式的“纠偏”机制，已然成为未来预报系统的关键节点。这3个解读单独看是发展动态，合力贡献却可能是未来气象预报全流程的变革和新方向。这些新年代出现的一些创新思想，释放出来的新理念和提示的研究型业务的有力抓手，值得我们关注、学习和在实际工作中思考及选择性借鉴。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.002

2020年初，美国气象学会（AMS）隆重召开了庆祝成立100年年会。会议除了常规年会内容以外，美国及国际上很多气象机构，都充分利用AMS搭建的“百年一遇”平台，展示21世纪初期20年过后气象科技发展的态势。AMS百年年会呈现很多值得记忆的特征。持续了一周的年会包括52个主题学术会和更多的交叉会议、边会、培训和展览等活动，给人留下深刻印象。

首先，会议交流科学报告的题目中，盛行“status, update, vision（现状、更新、展望）”等关键词。很多与会学者都希望借助这次里程碑式的会议，将自己、团队、所在机构或组织等的研究和业务开发等方面的成果、进步，在会议上给出一个全面的总结，并借机讨论本领域未来10年甚至更长时间的发展趋势、可能路线和预期成果及带来的能力提升。再有，会议的组织更加温馨。会议安排了3场以学者“Robert Dickinson、Wayne Schubert和Susan Solomon”命名的学术交流会。最令全球华人气象学者感到温暖的，是会议为了纪念会前刚刚逝去的美国华人科学家张福清，在相关的学术会议上，标出了纪念逝者做出特殊贡献的主题。最后，学术交叉成为常态。会议组织者为了

让不同领域的学者针对复杂的跨学科问题能在会议上“不期而遇”，在会议的主题和届次延续的情况下，通过细化设计每个会议的分节主题、更多的联合会议和讨论主题，让带着成果和问题来的学者，都能通过阅读会议材料，找到自己的“归宿”。尤其是，很多会议分节的提示语，展示了主办方和主持人、联络人的集体智慧，率先让会议生辉，也在一定程度上改变了学会会议的不同阶段，只是更换主持人的传统印象。

2020年是美国国家海洋和大气局（NOAA）成立50年和美国国家气象局（NWS）成立150年。年会上不仅来自NOAA和NWS的学者非常活跃，而且围绕气象业务的重要改进

方向之一——研究型业务，也呈现了一些新探索思路。本文基于会议上下相关信息，概要介绍其中或许具有引领性的理念和实践。

## 解读1 CCPP打通研究和业务模式编码的围墙

NCAR与NOAA是预报模式研发的重要部门，但多年来两个机构的模式独立发展，彼此模式编码各成体系。为了促进创新型研究业务化，全球模式测试平台（GMTB）协同NOAA和NCAR整合了物理参数和软件框架——通用社区物理包（Common Community Physics Package, CCPP, 图1）。2019年，NOAA和NCAR达成协议备忘录，将合作开发CCPP框架，促进模式和物

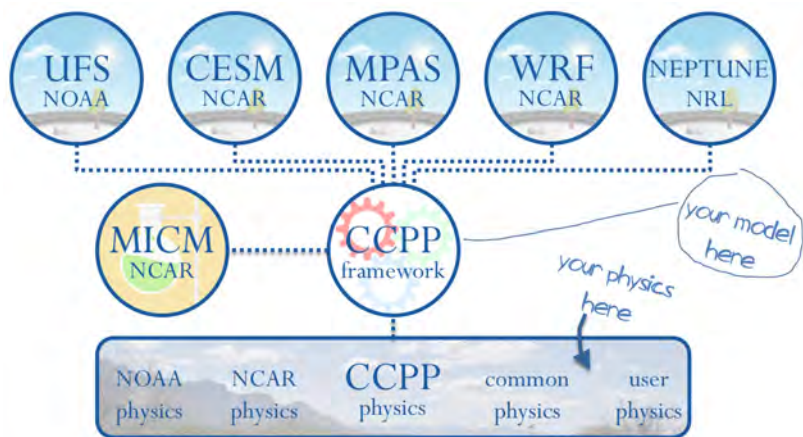


图1 CCPP的概念框架

资助信息：中国气象事业发展咨询委员会支持项目

理参数的互通性，作为两家统一预报系统（UFS）和大气集成模式系统（SIMA）的一部分。NCAR主要在SIMA系统中参与CCPP框架的开发工作，包括加强元数据标准、使物理组变量实现自动分配、对比元数据和实际Fortran编码，以及改善系统建设与代码生成器。这使得CCPP成为美国几个王牌模式的核心，以一种独立、标准化的方式将物理参数与大气模式（以及其他地球系统的组成部分）相结合，同时还降低了CCPP框架的研发和维护费用。

对于NWS的预报系统UFS来说，CCPP的出现是一次重大的转折。目前，CCPP的技术设计以及物理参数要求、CCPP与主模式的结合方式等都有了明确的规则。美国气象业务系统以外的模式系统或构建单元，可以通过CCPP转化为UFS的命令式代码，供NWS使用。

CCPP在引领NOAA与学界NWP模式的互通。AMS年会来自NCAR强调业务创新互操作性的CCPP平台的一个可期结果是，NCEP的预报系统因为今天的CCPP，其未来某个升级版将会是与NCAR、高校众多模式中最优部分的合成版本。这一迹象实际上早在FV3引领的业务模式系统升级时就已显现，而CCPP让这个统一模式互操作接口的思想落地。

### 解读2 张量处理芯片TPC助力

近年来掀起的AI和大数据理念，在天气预报方面提出了利用大数据而抛弃动力学的预报理念。然而，谷歌公司并没有跟风，而是将新技

术与经典的动力学原理结合起来。谷歌研究结构的学者，用公司为印度研发的洪水预报系统，系统阐述了谷歌的“大数据+动力”的预报理念。

演讲人详尽分析了谷歌发起的洪水预报项目（印度），开发的预报系统的整个过程，明确在不同过程中谷歌的优势所在：例如，从水文模式到直接预报洪水的水力模式过度时，需要对复杂地形的快速改变量化，作为重要变量输入系统中。谷歌可以用预报区域几乎完美的遥感图层，给出地形的改变。

实际上，谷歌代表的企业创新，不同于其他机构的特点是整个预报体系的全程创新，其中，更加适应预报系统中AI算法的新的芯片——TPU（Tensor Processing Unit，张量处理单元，图2）已经发展到第二代，TPU因为具有高速矩阵乘法单元（ $M \times U$ ），可以表示矩阵乘法的细微不同，性能远远超过目前其他机构所用的，例如我们熟悉的x86 CPU芯片。TPU这类基于机器学习的AI芯片，能够跳过传统模拟计算的繁琐，借助完整模拟的输出输入，寻找模式并学习猜测新输入对模拟产生的影响。

谷歌预报系统将控制方程组中代表平流的方程，更多通过AI技术模拟；而对其他热力和动力过程，仍以传统动力学方法为主。这样的预报系统应用于印度，使得当地暴雨预报的准确性从19.7%提升到75%，覆盖面积也从31.8%上升到94.8%。类似TPU这样的AI仿真器，

借助云技术，使得预报系统的计算速度得到大幅度的提升，甚至一些媒体报道称，提高数十亿倍。尽管或许有些夸张，但从根本上为改变气象预报系统越来越受到高速计算系统制约（包括计算系统能耗）提出了解决路径。

### 解读3 HOTL：自动预报时代预报员作为“护栏”管理人的新定位

来自IBM旗下天气公司的Jim Lidrbauch则带来了另一个平台HOTL：瞄准的是在气象公司里，围绕预报流程中的预报员的作用展开。报告人特意在报告首页提升了HOTL（Human Over The Loop，[预报]循环中人的作用）的念法：发音和英文单词“旅馆”相近（图3），似乎是在预示天气公司的气象员工需要下沉到不同的特别应用领域开展业务服务。

所谓HOTL，是介于自动预报系统和最终用户之间的一个图形化规则平台，在这个平台上，可以人工输入与自动预报不同步的时空变量的数值。公司员工用HOTL通过绘制地理多边形确定向客户提供服务的位置，然后应用规则修改某个时间范围内指定的一个或一组参数。当急需某地定时要素预报时，可启动HOTL规则得到比自动系统更好的预报。该系统最初的目的是进行质量控制，同时增加15 d定制预测的细节信息。目前的热L更像为预报产品增加了一个“护栏”，能防止自动预测过程中出现的明显错误。

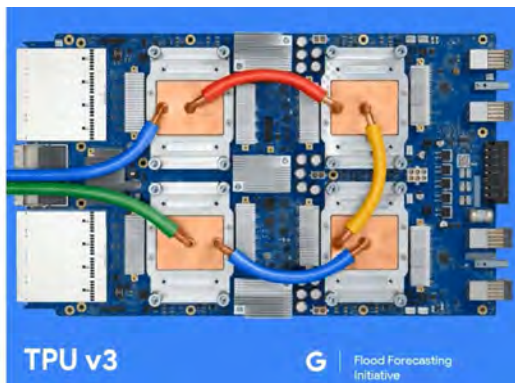
为什么要建立HOTL？主要有三方面原因。首先，尽管模式的预测能力不断提高，但是出现错误在所难免，模式出现重要天气错误预报时，预报员们往往要抱怨：

“GFS（NCEP的预报模式）怎么会这样？”此时，人的干预作用就变得很重要。第二，对于最终用户来说，预测（其全过程）的时空分辨率永远不够高。最后，传统的预报管理应该是[从预报到决策的]“一个

#### TPU-based Simulation



x86 CPU



TPU v3

图2 TPU和CPU芯片



图3 IBM天气公司提倡的HOTL平台

循环”，而预报员是这个“循环”中必不可少的一部分，没有他们的干预是不能发布预报的。而过度的干预让整个预报过程变慢，而且随着时空分辨率的提升，数据量和模式种类不断增加，越来越多的预报数据也对预报员如何干预预报提出了更高的要求。这时，HOTL无疑是优化预报员干预和显示预报员在循环中的价值所在的一个选择。

形，并通过配置属性来管理预测；将查询接口指向API，以查看表格和图形详细信息。此外，在平台上还可以与来自不同领域的预报员通过Slack进行交流。

自动化的预报需要“护栏”式的呵护，HOTL式的护栏则即可防止数值模式“跑偏”，更是在精细化气象服务中发挥预报员智慧的有力支撑。HOTL运行反馈和倒逼的对预

那么HOTL又是如何运作的呢？预报员首先登陆到工作站，在云上连接HOTL服务器，继而通过云获得其他服务器的“底层”天气数据；接着，预报员便可以利用这些数据绘制多边形图

报系统“后端”改进的研究，与会上NSF提出的“收敛性研究”有异曲同工之妙，其核心均体现在解决业务实践中的关键科学问题上。

在生物工程学领域，器官芯片已经研发出来，各种器官芯片耦合成的“芯片人”也浮出水面。AMS年会展示的借助AI芯片（TPU）的更有效的模拟、借助统一编码规则（CCPP）研发各种物理过程的“芯片”并方便地耦合合成与人体一样复杂的地球系统，再借助护栏式的“纠偏”机制，已然成为未来预报系统的关键节点。这3个解读单独看是发展动态，合力贡献却可能是未来气象预报全流程的变革和新方向。这些新年代出现的一些创新思想，释放出来的新理念和提示的研究型业务的有力抓手，值得我们关注、学习和在实际工作中思考及选择性借鉴。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

（上接5页）

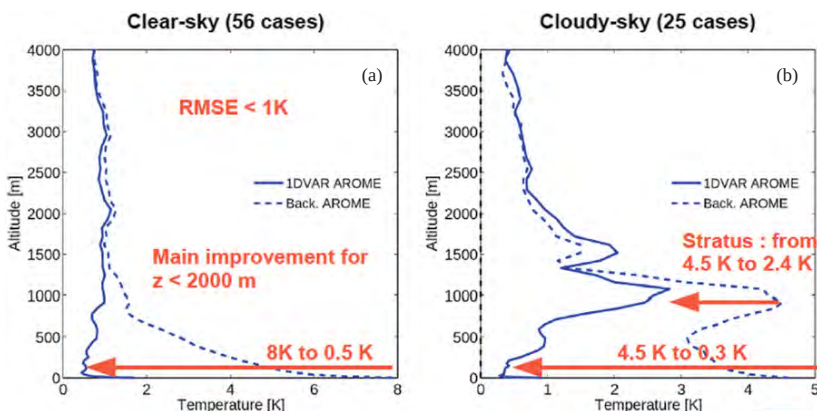


图6 在稳定(a)和对流(b)天气条件下同化WMR资料后对数值预报温度场的改进

一些问题和难点。

1) 综合性仪器配置。地基遥感垂直探测较传统探空业务在技术上要更为复杂，且不是单一设备可以解决所有要素的探测问题，需要针对需求综合考虑设备的选择，以达到最佳效果。

2) 多方协调解决信息质量和应用问题。用好这些仪器装备，需要生产厂商、探测业务人员、数据处理和预报应用人员共同协作，从设备的特

性、观测方法、标准的统一、数据处理分发、不同设备间的配合、观测试验、软件开发、同化应用等多个环节开展合作，才有可能做好。

3) 构建统一处理各类设备探测信息的综合平台。要建立统一的自动化信息处理平台，针对多种设备探测信息进行综合处理，形成标准化数据供业务使用。

4) 科研与培训是用好综合遥感仪器的重要前提。地基遥感仪器与传

统探空相比，在仪器合理使用和数据处理上要复杂得多，需要根据不同环境条件进行对比试验观测，确定信息的可靠性。探测人员对各类遥感仪器的技术与特点要提高理解程度，掌握各类设备在不同条件下的优势和局限，而不仅是简单操作。

#### 深入阅读

Illingworth A J, Cimini D, Haeferle A, et al. How Can Existing Ground-Based Profiling Instruments Improve European Weather Forecasts? Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(4): 605-619.

Illingworth A J, et al. Cloudnet: continuous evaluation of cloud profiles in seven operational models using ground-based observations. Bull Amer Meteor Soc, 2007, 88: 883-898. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-6-883>.

Weckwerth TM, Oncley S P, Stephens B B, et al. Planning for LOTOS: a new lower tropospheric observing system. <https://ams.confex.com/ams/2019Annual/webprogram/Paper350252.html>.

（作者单位：中国气象局）

# GRAPES全球/区域集合预报系统10年 发展回顾及展望

陈静 李晓莉

(中国气象局数值预报中心, 北京 100081)

**摘要:** 较系统地概述了中国气象局全球/区域集合预报系统及描述模式初值和模式自身不确定性的集合预报扰动技术发展历程, 回顾了GRAPES (Global/Regional Assimilation PrEdiction System) 全球集合预报的奇异向量初值扰动方法、GRAPES区域集合预报的集合变换卡尔曼滤波初值扰动方法和多尺度混合初值扰动方法、GRAPES全球/区域集合预报模式不确定性的随机物理过程倾向项扰动方法和动能后向散射随机补偿方法等研究成果, 介绍了GRAPES全球/区域集合预报业务系统构建参数设置和预报性能, 最后分析了GRAPES全球/区域集合预报中存在的问题, 展望了未来发展方向。

**关键词:** GRAPES模式, 集合预报, 初值扰动, 模式扰动, 回顾

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.003

## The Review of 10 Years Development of the GRAPES Global/Regional Ensemble Prediction

Chen Jing, Li Xiaoli

(The Numerical Weather Prediction Center, Chinese Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** Global/Regional Assimilation PrEdiction System (GRAPES) is an operational Numerical Weather Prediction (NWP) model which has been developed by Chinese scientists since 2000. This paper summarizes the history of development and the key technologies. To represent the uncertainty of initial conditions of GRAPES model, the Singular Vectors (SVs) has been applied to initial condition perturbation method of GRAPES Global Ensemble Prediction System (GRAPES-GEPS) and the ensemble transform of Kalman filter (ETKF) and ETKF-based multi-scale blending have been applied to initial condition perturbation methods of GRAPES Regional Ensemble Prediction System (GRAPES-REPS). To represent the uncertainty of GRAPES model itself, the stochastically perturbed parameterization tendencies (SPPT) and Stochastic Kinetic Energy Backscatter (SKEB) have been used to the both of GRAPES-GEPS and REPS. The challenges and future plans of GRAPES-GEPS and -REPS are analyzed.

**Keywords:** GRAPES model, ensemble forecast, initial condition perturbation, model perturbation, review

### 0 GRAPES全球和区域集合预报发展历程

数值预报是当代天气预报的基础, 但由于为数值模式提供初值的观测资料 and 同化方法具有误差, 造成模式初值不可避免地存在误差, 而非线性大气运动的复杂性和混沌特性, 导致预报结果对初值误差非常敏感, 由此初值获得的数值模式解仅是真实大气的一个可能解, 单一数值预报结果存在不确定性<sup>[1]</sup>。而集合预报技术则是通过一定的数学处理方法生成多个略有差异的初值或者略有差异的模式, 获得多个数值模式解, 进而通过计算大气运动状态概率密度函数来定量估计单一确定性数值预报的不确定性。近20年来, 利

用集合预报描述单一确定性数值预报的不确定性, 在各大业务数值预报中心获得广泛应用, 与资料同化、动力框架、物理过程一起构成了当代数值预报技术的四个发展方向, 成为数值预报业务核心系统<sup>[1]</sup>。

当前集合预报系统主要有三种: 全球中期集合预报、区域中尺度短期集合预报和对流尺度集合预报, 它们重点解决不同时空尺度的预报问题。全球中期天气集合预报 (Global Medium-range Ensemble Prediction system, GEPS, 预报时间为3~15 d) 通常设计用于3~15 d的中期天气预报, 水平分辨率通常在10~50 km, 是各大数值预报中心主要业务组成部分。区域集合预报系统 (Regional Ensemble Prediction System, REPS) 主要采用较小范围的区域模式, 具有较全球模式更高的分辨率, 通常在5~30 km, 主要着眼于1~3 d的短期天气预报, 因此可以用于预报天气

收稿日期: 2019年12月; 修回日期: 2020年2月24日

第一作者: 陈静 (1966—), Email: chenji@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点研发计划项目 (SQ2018YFC1507405, SQ2018YFC1506703)

系统中的一些局部细节,还能够更好判断一些强天气系统可预报性;通常区域集合预报系统需要从全球集合预报系统中获得侧边界条件(天气系统从有限区域范围以外移入有限区域内的边界)。对流尺度集合预报系统(Convective-Scale Ensemble, CSE)主要采用1~3 km对流尺度模式,主要目的提供对流运动细节的预报不确定性,预报时间通常是0~36 h,1~3 km对流尺度的区域集合预报在欧美发达国家已经成为核心业务,为提高强对流天气预报预警能力提供基础。

中国气象局国家气象中心早在20世纪90年代开始发展全球集合预报系统<sup>[2]</sup>,1996年建立了基于时间滞后方法的T63L16全球集合预报,集合预报成员12个,预报时效10~13 d,1999年升级为基于奇异向量方法的T106L19全球集合预报<sup>[3]</sup>,集合预报成员32个,预报时效10 d。2007年建立了基于增长模繁殖法的T213高分辨率数值集合预报系统<sup>[4]</sup>,集合预报成员15个,预报时效10 d,2014年,将T213集合预报升级为T639集合预报系统,在集合预报成员中增加了随机物理过程倾向项扰动方案<sup>[5]</sup>。中国气象局区域集合预报的发展始于2006年,在世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)北京奥运会研究示范项目<sup>[6]</sup>支持下,国家气象中心基于美国WRF模式,采用增长模繁殖法建立中国区域集合预报系统<sup>[7]</sup>,2010年11月15日实现业务化运行,模式不确定性采用多物理过程组合,系统水平分辨率15 km,侧边界来自T213全球中期集合预报系统,15个集合预报样本,每天运行4次。

GRAPES模式是中国气象局自主研发的新一代数值天气预报模式<sup>[8]</sup>。GRAPES集合预报技术发展始于区域集合预报研究,2005年,同样在WMO北京奥运会研究示范项目支持下,中国气象科学研究院采用增长模繁殖法建立多初值多物理GRAPES区域集合预报系统<sup>[9]</sup>,随后应用集合变换卡尔曼滤波初值扰动方法开展GRAPES区域集合预报试验<sup>[10]</sup>。2007年以来,通过中国气象局公益性行业专项“面向TIGGE的集合预报关键应用技术研究”(GYHY200706001)、“基于多模式集合预报的交互式应用技术研究”(GYHY200906007)、“GRAPES区域集合预报多尺度混合扰动关键技术研究”(GYHY201506005)以及中国气象局GRAPES专项经费支持,发展集合变换卡尔曼滤波(Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF)初值扰动技术<sup>[11-19]</sup>,研发与中国气象局全球集合预报系统数据耦合的GRAPES区域集合预报系统,2014年基于集合变换卡尔曼滤波初值扰动技术的中

国区域集合预报系统(GRAPES Regional Ensemble Prediction System, GRAPES-REPS)v1.0版本替代WRF区域集合预报系统,成为国家气象中心业务化区域集合预报系统,该系统水平分辨率15 km,集合预报成员15个;2015年该系统初值扰动技术更新为多尺度混合初值扰动方法<sup>[20]</sup>,中尺度初值扰动信息来自GRAPES区域集合预报系统的集合变换卡尔曼滤波方法,大尺度初值扰动信息来自T639全球集合预报系统的增长模繁殖方法,GRAPES-REPS区域集合预报系统升级为v2.0版本,2019年9月,随着基于奇异向量初值扰动方法的GRAPES全球中期集合预报业务化运行,GRAPES区域集合预报的侧边界扰动来源由T639全球集合预报更新为GRAPES全球集合预报系统,同时初值扰动技术和模式扰动技术均实现业务更新,业务系统升级为v3.0版本<sup>[21]</sup>。

GRAPES全球集合预报的研究始于2008年,最初采用全球集合变换卡尔曼滤波方法建立GRAPES全球集合预报<sup>[22]</sup>,随着GRAPES全球四维变分同化技术的发展,在中国气象局公益行业专项“GRAPES全球模式集合预报奇异向量初值扰动方法研究”(GYHY201006015)以及中国气象局GRAPES专项经费支持下,国家气象中心开始组织发展基于奇异向量初值扰动技术的GRAPES全球集合预报系统<sup>[23-27]</sup>,经过近10年的研究开发,基于奇异向量初值扰动方法的GRAPES全球中期集合预报于2018年12月实现业务运行,替代了T639全球集合预报系统,国家气象中心由此建立了一套完整的GRAPES数值预报业务体系<sup>[28]</sup>。

在代表GRAPES模式的不确定性方面,研究人员在国家气象中心T213和T639全球中期集合预报模式不确定性扰动研究基础上,利用GRAPES区域集合预报和全球集合预报开展了多种模式扰动方法研究,如多物理过程组合方法(Multi-Physics, MP)<sup>[21]</sup>,随机物理过程倾向扰动方法(Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies, SPPT)<sup>[29]</sup>,随机动能后向散射方法(Stochastic Kinetic Energy Backscatter, SKEB)<sup>[30]</sup>;随机参数扰动方法(Stochastically Perturbed Parameters, SPP)<sup>[31]</sup>。SPPT方案分别于2015年和2018年在GRAPES-REPS区域集合预报v2.0版本和GRAPES-GEPS v1.0版本中实现业务应用<sup>[21, 28]</sup>,SEKB方案于2018年在GRAPES-GEPS全球集合预报v1.0版本中实现业务应用<sup>[28]</sup>。

2019年,GRAPES全球集合预报系统v1.0和GRAPES区域集合预报系统v3.0实现一体化运行。与单一确定性预报业务系统相比,集合预报业务系统组

成更复杂, 系统更庞大, 不仅需要研究代表GRAPES模式初值和模式不确定性的初值扰动方法和模式扰动方法, 还需要进行集合预报系统后处理和产品开发。受篇幅限制, 本文将侧重介绍在GRAPES-GEPS v1.0业务版本和GRAPES-REPSv3.0业务版本中应用的初值扰动技术、模式扰动技术、业务系统参数和预报效果, 并分析存在的问题, 展望未来发展。

## 1 GRAPES全球模式奇异向量初值扰动技术

集合预报的核心问题是如何产生代表分析误差概率分布的初值样本集合。奇异向量法 (Singular Vectors, SVs) 是国际上常用的集合预报初值扰动方法, 其基本原理是利用非线性动力学理论中的有限时间不稳定理论, 计算切线性模式的奇异值和奇异向量, 利用最大奇异值对应的奇异向量就是增长最快的扰动原理, 获得一系列的初值扰动。奇异向量初值扰动方法首先成功应用于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 集合预报系统<sup>[32]</sup>, 随后在主流数值预报中心全球集合预报业务中获得了较广泛应用。GRAPES全球四维变分系统发展的切线性和伴随模式为GRAPES全球集合预报SVs扰动技术的研究和发展提供了条件。通过构建适合GRAEPS模式特点的SVs求解计算所需的总能量模, 开发SVs并行计算, 最终建立了基于奇异向量初值扰动技术的GRAPES全球集合预报系统<sup>[28]</sup>。

### 1.1 奇异向量数学计算方案

GRAPES全球集合预报奇异向量初值扰动技术包括计算奇异向量和构建初值扰动结构的数学处理方案两大部分。计算奇异向量的数学处理方案由全球热带外地区和热带气旋奇异向量计算两部分组成, 具体的数学处理方案简述如下。

#### 1.1.1 热带外奇异向量计算方案

GRAPES全球奇异向量求解可归结为演化扰动向量 $\mathbf{X}_L$ 模与初始扰动向量 $\mathbf{X}_0$ 模之间比值的最大化问题<sup>[25]</sup>, 如公式 (1):

$$(\mathbf{E}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{L}^T \mathbf{P}^T \mathbf{E} \mathbf{P} \mathbf{L} \mathbf{E}^{-\frac{1}{2}}) \mathbf{x}(t_0) = \lambda^2 \mathbf{x}(t_0), \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{L}$ 是GRAPES四维变分同化系统中的切线性模式 (Tangent Linear Model, TLM),  $\mathbf{L}^T$ 是伴随模式 (Adjoint model, ADM),  $\mathbf{E}$ 是衡量扰动大小权重模,  $\mathbf{x}$ 表示奇异向量,  $\lambda$ 为对应的奇异值。  $\mathbf{P}$ 是投影算子, 其作用是将目标区之外奇异向量扰动设置为零。由式 (1) 可见, 影响奇异向量结构的因素有三点: 1) 奇异向量扰动大小权重模 $\mathbf{E}$ 的定义; 2) 切线性模式 $\mathbf{L}$ 及伴随模式 $\mathbf{L}^T$ 的特点, 主要为线性化物理过程参

数化方案的使用; 3) 切线性模式 $\mathbf{L}$ 向前及伴随模式 $\mathbf{L}^T$ 向后的积分时间长度 (最优优化时间间隔)。

GRAPES全球奇异向量采用总能量定义权重模<sup>[26]</sup>, 设GRAPES全球TLM和ADM的预报量—水平风分量 ( $u, v$ ), 扰动位温 ( $\theta'$ ), 扰动无量纲气压 ( $\Pi'$ ) 对应的扰动量 (可表示为:  $(u', v', (\theta')', (\Pi')')$ ), 总能量模 $E$ 的计算如下:

$$E = \iiint_V \left( \frac{\rho_r \cos \varphi}{2} (u')^2 + \frac{\rho_r \cos \varphi}{2} (v')^2 + \frac{\rho_r \cos \varphi c_p T_r}{(\theta_r')^2} ((\theta')')^2 + \frac{\rho_r \cos \varphi c_p T_r}{(\Pi_r')^2} ((\Pi')')^2 \right) dV, \quad (2)$$

式中: 前面两项之和为扰动动能 (kinetic energy, KE) 模, 后两项之和表示扰动位能 (potential energy, PE) 模, 其中第三项和第四项分别表示位能中扰动位温 $(\theta')'$ 和扰动无量纲气压 $(\Pi')'$ 分量的贡献,  $dV = d\lambda d\varphi d\hat{z}$ ,  $\hat{z}$ 为地形追随坐标,  $\lambda$ 和 $\varphi$ 分别代表模式球面坐标系中的经度和纬度,  $c_p$ 为干空气的定压比热。  $T_r$ ,  $\theta_r$ ,  $\Pi_r$ 及 $\rho_r$ 分别表示参考温度、参考位温、参考无量纲气压及参考密度, 其计算公式分别  $\Pi_r = e^{-\frac{gz}{c_p T_r}}$ ,

$\theta_r = T_r^{\frac{g}{c_p}}$ ,  $\rho_r = \frac{\rho_r (\Pi_r)^{R_d}}{R_d T_r}$ , 式中,  $R_d$ 为干空气气体常数,  $\rho_r$ 为标准大气,  $T_r$ 为参考温度,  $g$ 为重力加速度。

表1是GRAPES全球奇异向量计算参数配置, GRAPES全球切线性模式 $\mathbf{L}$ 及伴随模式 $\mathbf{L}^T$ 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 垂直60层, 且在切线性模式及伴随模式采用了线性化边界层方案 (Planetary Boundary Layer, PBL) 和线性化阻塞流拖曳方案 (Mountain Blocking, MB)。GRAPES全球奇异向量的求解采用Lanczos迭代算法, 在迭代过程中需多次积分切线性模式 $\mathbf{L}$ 及伴随模式 $\mathbf{L}^T$ 。热带外奇异向量计算目标区分别为北半球中高纬度 ( $30^\circ - 80^\circ \text{N}$ ) 区域、南半球中高纬度 ( $80^\circ - 30^\circ \text{S}$ ) 区域, 计算精度为0.001, 通常迭代50次可以获得30个奇异向量; 此外, 还利用48 h前的初始奇异向量经过48 h的线性演化, 得到与初始奇异向量同时次的演化奇异向量。

表1 GRAPES全球奇异向量计算参数配置  
Tabel 1 Configuration of SVs scheme in GRAPES-GEPS

| 参数                      | 设置                                                                                                                       |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 切线性/伴随模式 (TLM/ ADM) 分辨率 | 水平分辨率: $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ; 垂直60层                                                                              |
| 线性化物理过程                 | 线性化边界层物理过程                                                                                                               |
| SVs计算目标区域               | 北半球: $30^\circ - 80^\circ \text{N}$ ;<br>南半球: $80^\circ - 30^\circ \text{S}$ ;<br>热带气旋: 气旋中心 $5^\circ \times 5^\circ$ 范围 |
| 迭代算法及优化时间               | Lanczos迭代算法, 48 h                                                                                                        |
| 奇异向量数                   | 30                                                                                                                       |

### 1.1.2 热带气旋奇异向量计算方案

副热带SVs和演化SVs在热带地区几乎为零，不能反映热带气旋（Tropic Cyclone, TC）的初始不确定性，造成TC集合预报技巧较低。考虑热带气旋系统的特殊性，在GRAPES全球集合预报中发展了热带气旋奇异向量计算方案<sup>[33]</sup>，即如果有热带气旋生成，则以热带气旋为中心10个经纬度区域为目标区计算奇异向量，最多可以计算6个热带气旋奇异向量。

从表1可见，加上热带外的南北半球区域，GRAPES奇异向量计算目标区域有三个，不仅生成了能体现南北半球中高纬度大气的斜压不稳定扰动发展

的奇异向量，还有在热带气旋生成考虑热带气旋发展的奇异向量。

### 1.1.3 奇异向量结构特征

图1是2013年5月8日00UTC北半球第1奇异向量扰动分布中比较显著的局地奇异向量扰动<sup>[25]</sup>，可见初始时刻位温扰动表现出随高度向西倾斜的特征，体现了大气对流层中下层常存在的、有利于天气系统发展的斜压结构。在最后演化时刻的位温扰动分布尺度变大，垂直结构演变成了随高度无明显倾斜的正压结构特征，扰动量值分布上也呈现出上传和下传的特征。此外，初始时刻和最后演化时刻奇异向量扰动能量模

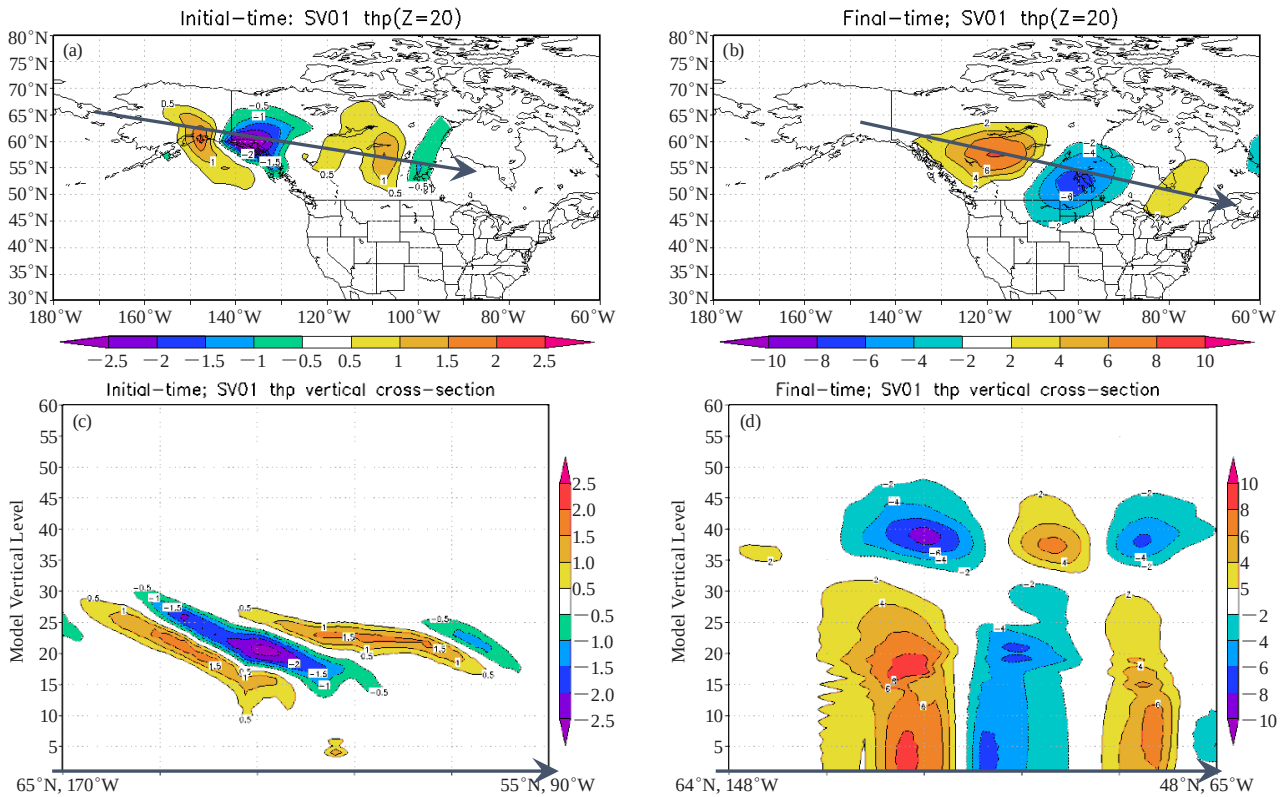


图1 北半球第1SV位温扰动(放大1000倍,单位:°C)在模式第20层的水平结构(a,b)及沿着箭头所示的径向垂直剖面(c,d)(a,c)初始时刻;(b,d)最后演化时刻<sup>[24]</sup>

Fig. 1 Horizontal structure at model level 20 (a, b) and vertical cross-section (along arrows shown (c, d) of potential temperature perturbation ( multiplying by 1000, unit: °C ) of 1st SV over NH at initial time (a, c) and final evolved time (b, d) <sup>[24]</sup>

垂直结构显示(图略), GRAPES奇异向量扰动能量的线性演变较好地体现了大气对流层中斜压不稳定及其能量垂直传播特征和升尺度的能量转移特征,体现天气尺度的大气斜压不稳定能量及演变。

## 1.2 基于奇异向量的集合预报初值扰动构建

基于上述计算产生的北半球初始奇异向量和演化奇异向量、南半球初始奇异向量和演化奇异向量、热带气旋初始奇异向量,采用高斯取样技术构造GRAPES全球集合预报初值扰动场<sup>[26,33]</sup>。

$$p_j = (1-a) \cdot \left( \sum_{k=1}^{N_s^N} a_{(j,k)} \cdot \mathbf{x}_k^N + \sum_{k=1}^{N_s^S} a_{(j,k)} \cdot \mathbf{x}_k^S + \sum_{i=1}^{N_T^T} \sum_{k=1}^{N_T^T} \lambda_{j,k} \cdot \mathbf{x}_{i,k}^T \right) + a \cdot \left( \sum_{k=1}^{N_y^N} \beta_{j,k} \cdot \mathbf{y}_k^N + \sum_{k=1}^{N_y^S} \beta_{j,k} \cdot \mathbf{y}_k^S \right) \quad (3)$$

其中,  $p_j$ 是第j个初值扰动,  $a$ 是演化奇异向量的权重,  $\mathbf{x}_k^N$ 是第k个北半球初始奇异向量,  $\mathbf{y}_k^N$ 是第k个北半球演化奇异向量,  $N_s^N$ 代表北半球初始奇异向量的个数,  $N_y^N$ 代表北半球演化奇异向量的个数,  $\mathbf{x}_k^S$ 是第k个南半球初始奇异向量,  $\mathbf{y}_k^S$ 是第k个南半球演化奇异向量,

$N_s^s$ 代表南半球初始奇异向量的个数,  $N_s^s$ 代表南半球演化奇异向量的个数。 $a_{j,k}, \lambda_{j,k} \sim N(0, \mu_k) \sigma_k = \gamma / \bar{L}$ , 其中 $\gamma$ 是可调经验系数, 可以控制初值扰动振幅,  $\bar{L}$ 是SV或演化SV的尺度化放大因子, 可通过式(4)计算得到:

$$\bar{L}^2 = \sum_{i,j,k} ((u_{i,j,k} / u_k^{err})^2 + (v_{i,j,k} / v_k^{err})^2 + (\theta_{i,j,k} / \theta_k^{err})^2 + (\Pi_{i,j,k} / \Pi_k^{err})^2), \quad (4)$$

式中:  $i, j, k$ 分别对应模式网格经度、纬度和垂直层数变量,  $u_{i,j,k}$ 是SV或演化SV的纬向风扰动分量,  $v_{i,j,k}$ 是SV或演化SV的经向风扰动分量,  $\theta_{i,j,k}$ 是SV或演化SV的扰动位温扰动分量,  $\Pi_{i,j,k}$ 是SV或演化SV的扰动Exner气压扰动分量,  $u_k^{err}$ 是纬向风标准差,  $v_k^{err}$ 是经向风标准差,  $\theta_k^{err}$ 是扰动位温标准差,  $\Pi_k^{err}$ 是扰动Exner气压标准差。通过大量参数敏感性试验, GRAPES-GEPS v1.0初值扰动计算方案, 通过敏感性试验确定可调参数 $\alpha=0.1$ ,  $\gamma=0.06$ 。

## 2 GRAPES区域集合预报初值扰动技术

区域集合预报中普遍采用两种初值扰动构造方法, 一种是采用全球集合预报初值扰动动力降尺度产生, 另一种是采用在全集合预报中应用较成熟的初值扰动方法(如BGM, SVs, ETKF等初值扰动方法)产生。对于降尺度方法而言, 由于全球集合的分辨率有限, 动力降尺度产生的扰动信息缺乏小尺度不确定性信息, 而这些小尺度不确定性信息对于局地性强天气过程很重要。GRAPES区域集合预报业务系统采用了集合变换卡尔曼滤波(ETKF)方法单独构造扰动初值。

### 2.1 集合变换卡尔曼滤波(ETKF)初值扰动方法

#### 2.1.1 ETKF初值扰动数学处理方案

集合变换卡尔曼滤波(ETKF)初值扰动方法是基于卡尔曼滤波理论发展而来, 由集合预报扰动方差和观测误差方差快速估计分析误差的一种初值扰动技术<sup>[34]</sup>。在GRAPES区域集合预报系统中, 将预报扰动向量 $\mathbf{X}^f = (x_2^f - x_1^f, x_3^f - x_1^f, \dots, x_K^f - x_1^f)$ 更新为分析扰动 $\mathbf{X}^a = (x_2^a - x_1^a, x_3^a - x_1^a, \dots, x_K^a - x_1^a)$ , 利用变换矩阵 $\mathbf{T}$ 来建立预报扰动和分析扰动的关系, 如公式(5), 即通过变换矩阵 $\mathbf{T}$ 对当前时刻预报扰动向量进行线性组合, 构造当前时刻的分析扰动<sup>[12-13]</sup>

$$\mathbf{X}^a = \mathbf{X}^f \mathbf{T}, \quad (5)$$

ETKF初值扰动方法的核心是如何获得变换矩阵 $\mathbf{T}$ , 在GRAPES区域集合预报ETKF方案中, 采用Wang等<sup>[34]</sup>方法, 假设预报扰动 $\mathbf{X}^f$ 的协方差能够代表预报误差协方差 $\mathbf{P}^f$ , 定义 $\mathbf{Z}^f = \mathbf{X}^f / \sqrt{K-1}$ , 则 $\mathbf{T}$ 的表达式为:

$$\mathbf{T} = \mathbf{C}(\mathbf{I} + \mathbf{I})^{-1/2}, \quad (6)$$

其中, 矩阵 $\mathbf{C}$ 的列包含了投影矩阵 $(\mathbf{Z}^f)^T \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{Z}^f$ 的特征向量, 而对角矩阵 $\mathbf{I}$ 的非零元素包含了相应的特征值, 其中,  $\mathbf{R}$ 为观测误差协方差矩阵,  $\mathbf{H}$ 为线性化观测算子,  $(\mathbf{I} + \mathbf{I})^{-1/2}$ 是特征向量矩阵 $\mathbf{C}$ 的尺度化因子。为了解决由于集合成员数 $K$ 远远小于模式预报相空间自由度所造成的集合预报分析扰动方差小于真实分析误差方差的问题, 在公式(5)中引入放大因子 $\Pi_n = \Pi_{n-1} \sqrt{\alpha_n}$ ,

$$\alpha_i = \frac{\mathbf{d}_i^T \mathbf{d}_i - N}{\text{trace}(\mathbf{H} \mathbf{P}_i^e \mathbf{H}^T)} = \frac{\mathbf{d}_i^T \mathbf{d}_i - N}{\sum_{i=1}^{K-1} \lambda_i}, \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{d}_i$ 为第 $i$ 时刻被 $\mathbf{R}^{-1/2}$ 标准化的更新向量(innovation),  $N$ 为观测数目,  $\lambda_i$ 为式(6)中 $\mathbf{I}$ 的对角元素,  $\alpha_i$ 将对集合扰动方差进行调整, 使预报扰动方差与控制预报误差方差在全球观测空间中保持一致。

同时, 为了使集合扰动成员相对于集合平均中心化, 采用球面单形中心化方案<sup>[34]</sup>, 即得ETKF的初值扰动的最终表达式:

$$\mathbf{X}_i^a = \mathbf{X}_i^f \mathbf{T}_i \mathbf{C}^T \Pi_i. \quad (8)$$

#### 2.1.2 ETKF初值扰动结构特征

ETKF方法的一个重要特征是能够吸收观测信息, 对扰动进行调整。GRAPES区域集合预报采用模拟观测资料<sup>[18]</sup>的方法, 将全球背景分析场插值到观测空间作为模拟观测资料。图2是观测空间水平分布以及连续40 d垂直平均的 $U$ 分量风扰动绝对值的分布。可以看出高原地区以及西太平洋海洋地区的观测较为稀疏, 因此这些地区初始分析场的不确定性较大, 青藏高原地区以及西太平洋海洋地区扰动量级较大, 最大值可达4 m/s, 而在观测分布较密集的中国大陆东部地区, 扰动量级较小。

在GRAPES区域集合预报业务系统v3.0版本中, 因侧边界扰动来自GRAPES全球非静力模式, 为保障业务系统积分稳定性, ETKF投影矩阵的计算变量为动量场变量 $(u, v)$ , 放大因子计算变量为动量场变量 $(u, v)$ 和比湿变量 $q$ , ETKF初值扰动计算采用6 h循环扰动计算方案, 每天运行4次, 分别为00Z、06Z、12Z、18Z, 其中00Z与12Z均作84 h预报, 06Z与18Z只做6 h预报, 为ETKF循环提供6 h预报扰动场。

### 2.2 基于ETKF的多尺度混合初值扰动方法

业务实践表明, 全球集合预报动力降尺度的区域集合预报扰动结构可以产生更多的大尺度不确定性信息。在GRAPES区域集合预报v2.0版本中, 应用了多尺度混合初值扰动技术(Multi-Scale Blending, MSB)<sup>[20]</sup>。该方法的原理是基于区域和全球集合预报初值扰动结构共同构建多尺度混合初值扰动场, 其中

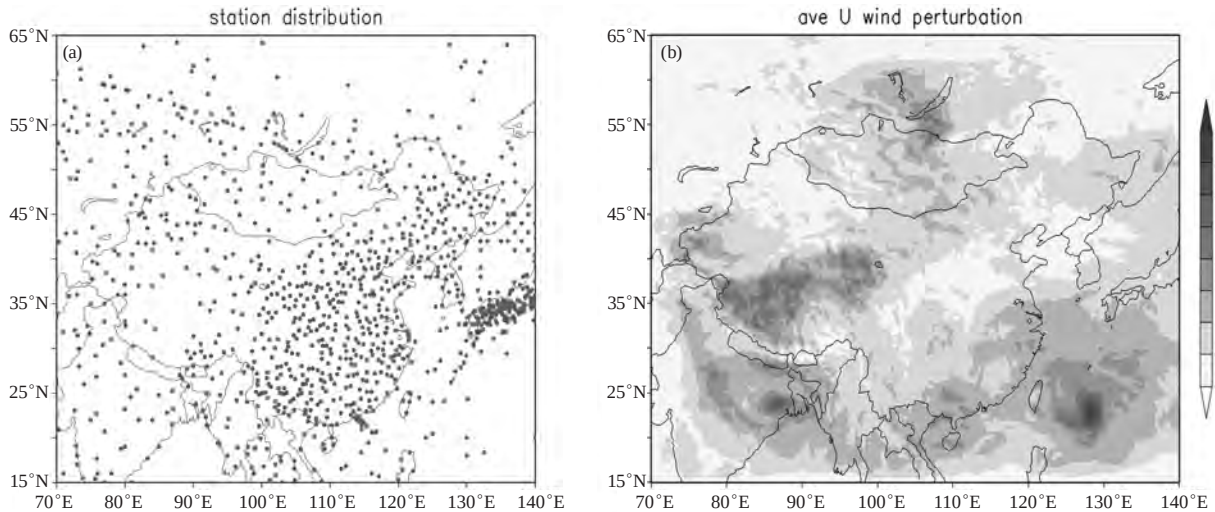


图2 观测站点及初始扰动水平分布<sup>[14]</sup>

(a) 观测站点分布图(黑点为测站位置); (b) 40 d垂直平均的 $U$ 分量风初值扰动(单位: m/s)

Fig. 2 Horizontal distribution of observation stations and initial perturbation (unit: m/s)<sup>[14]</sup>

distribution of observation stations (10cations of observation stations shown as black dots); (b) 40 d vertically averaged horizontal distribution of  $U$  wind perturbation

“小尺度”扰动来源于区域集合预报ETKF生成的初值扰动,“大尺度”扰动来源于国家气象中心T639全球集合降尺度扰动。通过一个数字滤波器2D-DCT<sup>[35]</sup>对全球集合预报和区域集合预报的扰动结构进行滤波,需要注意的是,对不同层次或者不同变量,滤波器的临界波长不同(如表2所示),还采用2D-DCT反变换重构来自全球集合预报的大尺度扰动和来自区域集合预报的小尺度扰动结构。该方法于2015年应用于GRAPES区域集合预报业务化系统v2.0版本中。

### 2.3 区域集合预报台风涡旋条件性重定位方案

通过对GRAPES-REPS台风路径集合预报的诊断分析发现,虽然部分集合成员的台风涡旋中心初始定位经过扰动后比较合理,台风涡旋中心围绕着台风观

测位置,但扰动后的某些集合成员台风涡旋中心远离观测位置,夸大了台风涡旋中心初始定位的不确定性,影响了台风路径集合概率预报的整体性能,因此发展了台风涡旋中心条件性重定位方案<sup>[36]</sup>。通过分析2009—2018年中国气象局和日本气象厅最佳台风涡旋中心定位差异,发现10年中年平均值最大为17.18 km(2009年),最小为12.44 km(2010年),结合集合预报模式分辨率,确定了以15 km为临界阈值,判别是否对集合预报成员台风涡旋中心进行重定位处理,即如果集合成员初值场中台风涡旋中心与最佳路径距离差值大于15 km,则判断该集合成员初始场中台风涡旋中心定位超出分析不确定性范围,需要对该成员进行涡旋条件性定位处理,否则认为该集合成员台风涡旋中心不确定性在分析误差范围之内,不进行涡旋重定位处理。重定位方法采用美国地球流体动力实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)发展的台风涡旋分离技术<sup>[37]</sup>,对需要进行重定位的台风集合预报成员进行台风初始场与台风涡旋的分离,将分离出的台风部分通过插值平移至观测位置。

### 3 GRAPES模式随机物理扰动方法

仅使用初值扰动的集合预报系统存在集合成员不够发散、集合预报系统可靠性不足的缺陷<sup>[28]</sup>,因而有必要在GRAPES-GEPS系统中引入模式扰动技术,以表征由于模式误差或模式本身缺陷而造成的不确定性。下面简要介绍应用于GRAPES全球和区域集合预报业务系统的SPPT和SKEB模式扰动方案。

表2 GRAPES-REPS和T639-GEPS初值扰动能量谱曲线的交叉尺度<sup>[20]</sup>

Table 2 Intersection scales of the IC perturbation power spectra for GRAPES-REPS and T639-GEPS<sup>[20]</sup>

| 层次/hPa | $u$ /km | $v$ /km | $\theta$ /km | $\pi$ /km | $q$ /km |
|--------|---------|---------|--------------|-----------|---------|
| 150    | 80      | 80      | 350          | 500       | 120     |
| 200    | 150     | 150     | 500          | 1360      | 180     |
| 300    | 230     | 230     | 800          | 1670      | 410     |
| 400    | 250     | 250     | 950          | 1810      | 540     |
| 500    | 540     | 540     | 1140         | 1990      | 720     |
| 600    | 770     | 770     | 1540         | 2380      | 610     |
| 700    | 850     | 850     | 1790         | 2500      | 760     |
| 800    | 950     | 950     | 1990         | 3100      | 1230    |
| 850    | 1150    | 1150    | 2500         | 3520      | 1120    |
| 925    | 1500    | 1500    | 2500         | 4300      | 1610    |

### 3.1 随机物理过程倾向项扰动方案 (SPPT)

随机物理过程倾向项扰动方案 (SPPT) 的基本思想是对模式物理过程参数化产生的总净倾向项进行随机扰动, 以体现模式物理过程参数化所造成的随机误差<sup>[39]</sup>。根据数值预报积分计算过程, 模式积分倾向项  $e_j(t)$  可分解为非参数化过程 (动力过程) 积分倾向项  $A(e_j, t)$  和参数化物理过程积分倾向项  $P(e_j, t)$ , 则应用 SPPT 方案扰动后的模式积分倾向项  $e_j(t)$  可表示为:

$$e_j(t) = \int_{t=0}^t (A(e_j, t) + \psi(\lambda, \phi, t) P(e_j, t)) dt, \quad (9)$$

式中  $\psi(\lambda, \phi, t)$  是具有空间、时间相关特征的三维随机场, 定义为:

$$\psi(\lambda, \phi, t) = \mu + \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l \alpha_{l,m}(t) Y_{l,m}(\lambda, \phi), \quad (10)$$

其中:  $\mu$  为随机场的平均值;  $\lambda, \phi, t$  分别表示模式格点经度、纬度和时间;  $Y_{l,m}$  为球谐函数;  $L$  为随机场的水平截断尺度;  $l$  和  $m$  分别为水平方向总波数、纬向波数;  $\alpha_{l,m}(t)$  为随机场谱系数。随机场谱系数  $\alpha_{l,m}(t)$  在时间维的相关变化特征是通过一阶 Markov 链随机过程 (也称一阶自回归随机过程) 来实现<sup>[29]</sup>。在 GRAPES 全球/区域集合预报中, 均只对位温、水平风分量和湿度预报变量的净倾向项进行扰动。

考虑到全球模式和区域模式积分时间和预报对象不同, SPPT 方案在 GRAPES 全球集合预报和区域集合预报的参数设置有差异。在 GRAPES-REPS 区域集合预报系统 v2.0 和 v3.0 版本中, SPPT 扰动幅度取值范围为 [0.2, 1.8], 扰动场均值为 1, 失相关时间尺度为 6 h, 最大波数 24。在 GRAPES 全球集合预报中, 为了运行稳定性, 将随机型函数的扰动幅度取值范围设置为 [0.7, 1.3], 在近地面层和大气层顶处引入倾向扰动垂直廓线, 对近地面层和大气层顶附近的物理倾向不进行扰动或者进行较小幅度的扰动。结果表明, 在 GRAPES 全球集合预报系统中引入 SPPT 方案能显著改进中高纬地区及热带地区的位势高度、温度及风场预报的离散度, 特别是对全球集合预报热带地区效果改进更为显著<sup>[26, 28]</sup>。

### 3.2 动能后向散射随机扰动方案 (SKEB)

SKEB 方案主要目的是代表模式中次网格尺度能量升尺度转换的随机过程和不确定性<sup>[40]</sup>。GRAPES 全球集合预报的 SKEB 方案是通过一定时空相关特征的随机型以及局地动能耗散率来构造随机流函数强迫的方式对上述过度耗散的能量进行补偿随机流函数强迫  $F_{\psi}$  定义如下<sup>[30]</sup>:

$$F_{\psi} = \frac{\alpha \Delta x}{\Delta t} \Psi(\lambda, \phi, t) \sqrt{\Delta t D_N(\lambda, \phi, \eta, t)}, \quad (11)$$

$\Psi(\lambda, \phi, t)$  为随机型, 其产生方法与 SPPT 的随机型

定义相同, 参见式 (10)。 $D_N(\lambda, \phi, \eta, t)$  为局地动能耗散率, 目前 GRAPES 全球集合预报模式中 SKEB 方案基于显式水平方案来构造局地动能耗散率:

$$D_N = -k \times u \times u', \quad (12)$$

式中,  $k$  是大于 1 的常数因子,  $u$  表示水平风速,  $u'$  表示水平扩散方案应用前、后水平风速的变化。基于流函数与水平风场的旋转分量之间的关系构建 GRAPES 模式的水平风场扰动强迫项 ( $S_u, S_v$ ), 即在模式水平风场倾向项中加入 ( $S_u, S_v$ ) 表示的倾向项随机强迫项。

$$S_u = -\frac{1}{\alpha} \frac{\partial F_{\psi}}{\partial \phi}, \quad (13)$$

$$S_v = \frac{1}{\alpha \cos \phi} \frac{\partial F_{\psi}}{\partial \lambda}. \quad (14)$$

在 GRAPES-GEPS v1.0 系统中, SKEB 方案  $\psi$  随机型最小截断波数  $L_{\min}$  为 10、最大截断波数  $L_{\max}$  为 80、失相关时间尺度  $\tau$  为 6 h、均值  $\mu$  为 0, 标准差  $\sigma$  为 0.27、最小值  $\psi_{\min}$  为 -0.8、最大值  $\psi_{\max}$  为 0.8。

## 4 GRAPES 全球和区域集合预报业务系统及预报性能

### 4.1 GRAPES 全球集合预报业务系统

表 3 是 GRAPES-GEPS 全球集合预报系统与 T639 全球集合预报参数设置对比。与 T639 全球集合预报系统相比, GRAPES-GEPS 全球集合预报系统主要的变化包括: 初值扰动方法从 BGM 方法改变为奇异向量方法, 模式扰动方法从 SPPT 改变为 SPPT 和 SKEB 方法, 台风涡旋处理方法从涡旋重定位和强度调整及时改变为热带气旋奇异向量扰动方法, 控制预报初值采用动力升尺度方法<sup>[27]</sup>, 集合预报成员数从 15 个增加为 31 个。

一般将 500 hPa 位势高度场距平相关系数 (ACC) 达到 0.6 的天数作为可用预报时效。表 4 是春 (2018 年 4 月)、夏 (2017 年 8 月)、秋 (2016 年 10 月) 和冬 (2017 年

表 3 GRAPES-GEPS 和 T639-GEPS 模式系统参数对比  
Table 3 Comparison of Configuration of GRAPES-GEPS and T639-GEPS

| 参数     | GRAPES-GEPS        | T639-GEPS    |
|--------|--------------------|--------------|
| 模式     | GRAPES_GFS_2-1-2-2 | T639L60      |
| 水平分辨率  | 50 km              | 30 km        |
| 垂直分辨率  | L60                | L60          |
| 模式层顶   | 3 hPa              | 0.1 hPa      |
| 同化分析系统 | GRAPES_4DVAR       | GSI          |
| 初值扰动技术 | SVs                | BGM          |
| 模式扰动技术 | SPPT, SKEB         | SPPT         |
| 台风处理   | TCSVs              | 涡旋重定位+强度调整技术 |
| 集合预报成员 | 31                 | 15           |
| 预报时效   | 15 d               | 15 d         |

表4 GRAPES-GEPS和T639-GEPS集合预报系统可用预报时效 (单位: d) <sup>[28]</sup>

Table 4 Available forecast time (days) of the GRAPES-GEPS and T639-GEPS ensemble forecast system (unit: d) <sup>[28]</sup>

| 评估量         | 北半球   |       |       | 南半球   |       |       | 东亚    |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 集合平均  | 控制预报  | 提高量   | 集合平均  | 控制预报  | 提高量   | 集合平均  | 控制预报  | 提高量   |
| GRAPES_GEPS | 8.275 | 7.219 | 1.056 | 7.670 | 6.652 | 1.018 | 8.872 | 7.543 | 1.329 |
| T639_GEPS   | 7.957 | 6.953 | 1.004 | 6.925 | 6.068 | 0.857 | 8.365 | 7.244 | 1.121 |

12月) 4个季节代表月逐日12 UTC预报试验可用预报天数对比, 可见, 与T639-GEPS相比, GRAPES-GEPS的可用预报时效明显增加, 北半球、南半球和东亚区域分别增加了0.3 d、0.8 d和0.5 d, GRAPES-GEPS系统预报效果整体优于T639-GEPS系统, 尤其是在南半球地区, 这种优势更加明显。

## 4.2 GRAPES 区域集合预报业务系统

基于GRAPES区域集合预报初值扰动、模式扰动技术研究基础及GRAPES-3km模式云分析技术, 开发了以GRAPES全球集合预报为侧边界条件扰动的0.1°水平分辨率GRAPES-REPS区域集合预报系统v3.0版本, 2019年9月实现业务化运行。GRAPES-REPS区域集合预报系统v3.0参数配置如表5所示, 与GRAPES-REPS v2.0相比, 主要变化包括: 1) 集合预报模式水平分辨率由0.15°升级为0.1°; 2) 初值扰动方法由多尺度混合更新为ETKF初值扰动方案; 3) 采用了台风涡旋条件性重定位方案; 4) 模式物理过程扰动方案由GRAPES-REPS v2.0的多物理过程组合+SPPT方案更新为单一物理过程+SPPT方案 (详见表6); 5) 侧边界扰动来自GRAPES-GEPS全球集合预报; 6) 每个集合成员增加云分析方案, 可同化雷达和卫星资料。

图3是2019年7月1日—9月30日GRAPES-REPS v3.0区域集合预报系统与ECMWF全球集合预报系统12 h累积降水的AROC评分对比图。从图可见, GRAPES区域集合预报的小雨、大雨、暴雨前36~48 h预报优

表5 GRAPES区域集合预报业务系统v3.0及v2.0参数对比  
Table 5 Comparison of configuration of GRAPES-REPS v3.0 and v2.0

| 集合预报系统  | GRAPES-REPS v3.0 | GRAPES-REPS v2.0  |
|---------|------------------|-------------------|
| 模式      | GRAPES-MESO4.3   | GRAPES-MESO4.0    |
| 水平分辨率   | 0.1°             | 0.15°             |
| 垂直层次    | 50层              | 50层               |
| 预报初值    | 同GRAPES-MESO-3km | 同GRAPES-MESO-10km |
| 同化系统    | 云分析              | 无                 |
| 初值扰动技术  | ETKF             | ETKF+多尺度混合        |
| 模式扰动技术  | 单一物理过程+SPPT      | 多物理组合+SPPT        |
| 侧边界扰动技术 | GRAPES-GEPS      | T639-GEPS         |
| 台风不确定性  | 台风涡旋条件性重定位       | 无                 |
| 集合成员数   | 15               | 15                |
| 预报区域    | 中国区域             | 中国区域              |
| 预报时效    | 84 h             | 84 h              |

表6 GRAPES区域集合预报业务系统v3.0及v2.0物理过程参数化方案对比

Table 6 Comparison of physics parameterization schemes of GRAPES-REPS v3.0 and v2.0

| 系统版本<br>物理过程 | GRAPES-REPS v3.0 |              | GRAPES-REPSv2.0 |              |
|--------------|------------------|--------------|-----------------|--------------|
|              | 对流参数化<br>方案      | 边界层参数化<br>方案 | 对流参数化<br>方案     | 边界层参数化<br>方案 |
| 000          | new_KF           | MRF          | new_KF          | MRF          |
| 001          | new_KF           | MRF          | new_KF          | MRF          |
| 002          | new_KF           | MRF          | BM              | MRF          |
| 003          | new_KF           | MRF          | new_KF          | MRF          |
| 004          | new_KF           | MRF          | new_KF          | MRF          |
| 005          | new_KF           | MRF          | BM              | MRF          |
| 006          | new_KF           | MRF          | new_KF          | MRF          |
| 007          | new_KF           | MRF          | new_KF          | YSU          |
| 008          | new_KF           | YSU          | SAS             | YSU          |
| 009          | new_KF           | YSU          | BM              | YSU          |
| 010          | new_KF           | YSU          | new_KF          | YSU          |
| 011          | new_KF           | YSU          | SAS             | YSU          |
| 012          | new_KF           | YSU          | BM              | YSU          |
| 013          | new_KF           | YSU          | new_KF          | YSU          |
| 014          | new_KF           | YSU          | SAS             | YSU          |

于ECMWF全球集合预报, 尤其是暴雨各时效均优于ECMWF集合预报, 究其原因, 可能是在GRAPES-REPS v3.0引入云分析方案后同化了雷达资料, 36~48 h降水预报较好, 而暴雨预报具有优势, 可能与GRAPES-REPS模式分辨率较高有关。但GRAPES-REPS v3.0中雨预报明显弱于ECMWF集合预报, 可能是ECMWF模式对天气尺度系统具有更好的预报能力, 雨区或者雨带预报优于GRAPES-REPS。体现了高分辨率区域集合预报描述强降水预报不确定性的优势。

## 5 总结及讨论

集合预报是当代数值预报的核心业务系统, 本文较系统地概述了中国气象局GRAPES全球/区域集合预报系统发展历程与核心技术方法, 回顾了GRAPES全球集合预报奇异向量初值扰动方法、GRAPES区域集合预报集合变换初值扰动方法和多尺度混合初值扰动方法、描述GRAPES全球/区域集合预报模式不确定性的随机物理过程倾向项扰动方法和动能后向散射随机补偿方法研究成果, 介绍了GRAPES全球/区域集合预报系统构建参数设置和预报性能, 总结如下:

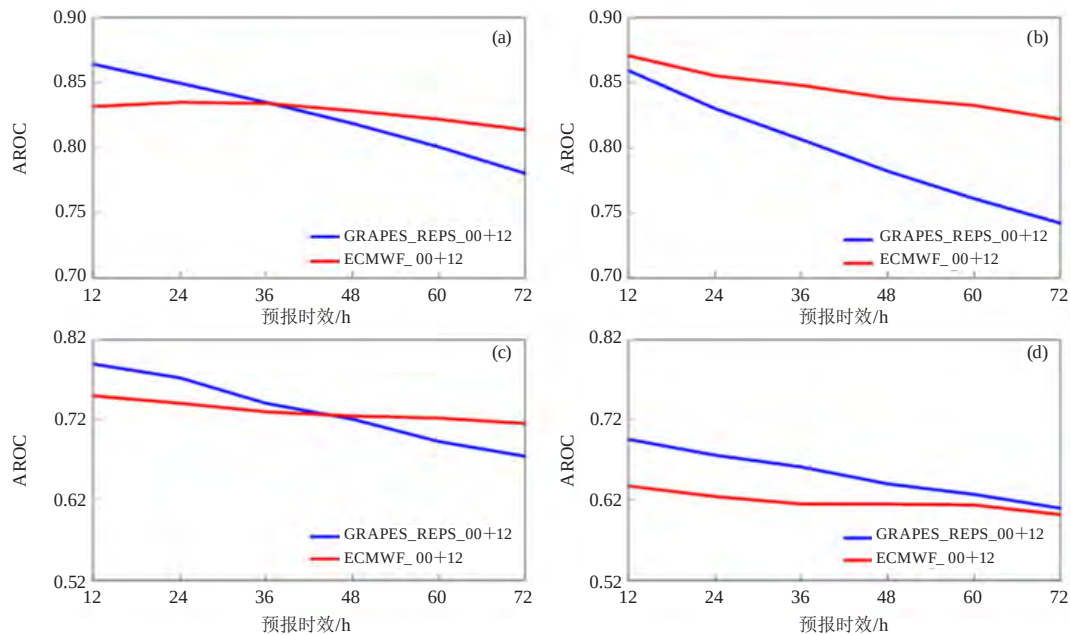


图3 GRAPES-REPS v3.0区域集合预报系统（蓝色），ECMWF全球集合预报系统（红色）12 h累积降水AROC评分  
(a) 小雨，(b) 中雨，(c) 大雨，(d) 暴雨

(统计时段为2019年7月1日—9月30日，每日两个起报时次：00 UTC和12 UTC，共计64时次)

Fig. 3 Comparison of the probabilistic precipitation forecast skills of the GRAPES-REPS v3.0 and ECMWF in terms of AROC  
(a) >0.1 mm, (b) >5 mm, (c) >15 mm, (d) >30 mm

(The 64 forecasts from 00:00 UTC 1 July 2019 to 12:00 UTC, 30 September 2019 totally are verified)

1) 在代表GRAPES全球集合预报初值不确定方面，发展了GRAPES全球集合预报奇异向量初值扰动技术，构建了热带外中高纬度奇异向量计算方案和热带气旋奇异计算方案。基于高斯分布线性组合奇异向量，构建集合预报初值扰动三维结构，并在初值扰动构造中引入演化奇异向量，使得初始扰动场包括更稳定和较大尺度的扰动信息。

2) 在代表GRAPES区域集合预报初值不确定方面，发展了GRAPES区域集合预报集合变换卡尔曼滤波初值扰动方法和多尺度混合初值扰动方法，发展了区域集合预报台风涡旋条件重定位方案，提升中尺度天气系统和台风中心定位初始不确定性的合理性。

3) 在代表GRAPES模式不确定性方面，基于一阶马尔科夫链随机过程，开发了GRAPES随机物理过程倾向项扰动方案SPPT和随机动能后向散射补偿方案SKEB，考虑到全球模式和区域模式积分时间和预报对象不同，确定了业务化应用的全球集合预报和区域集合预报的参数值。

4) 2018年11月28日，GRAPES全球集合预报系统（GRAPES-GEPS v1.0）实现业务运行，预报效果优于T639全球集合预报系统，北半球、南半球和东亚区域分别增加了0.3 d、0.8 d和0.5 d。2019年9月，基于GRAPES全球模式为侧边界条件扰动场的0.1°水平分

辨率的GRAPES区域集合预报系统（GRAPES-REPS v3.0）实现业务运行，该系统侧边界扰动不确定性由T639全球集合预报更新为GRAPES-GEPS全球集合预报，2019年主汛期检验表明，48 h预报时效的降水AROC评分优于ECMWF全球集合预报降水。

尽管GRAPES全球/区域集合预报取得了进步，但仍然存在诸多问题，对这些问题进行初步分析，主要包括：

1) GRAPES-GEPS和GRAPES-REPS的集合预报在预报后期存在离散度-技巧关系不足的问题，离散度低于均方根误差，其中一个可能原因是模式存在较强的系统性偏差<sup>[41-43]</sup>，这导致预报存在较大的均方根误差，需要对此进行深入的诊断分析，认识产生离散度-技巧关系不足的原因，更好地改进离散度-技巧关系不足。

2) 造成GRAPES-GEPS和GRAPES-REPS的离散度-技巧关系不足的另一个可能原因是模式随机物理过程随机型函数对不同尺度模式物理过程的随机性代表性不足，当前代表GRAPES模式不确定性的随机物理扰动方法的随机型函数采用的是单一尺度随机型函数，而天气过程是多尺度系统相互作用影响所致，需要增加扰动幅度和多尺度随机信息。

3) 在代表初值不确定性方面，当前的GRAPES

全球集合预报和区域集合预报与资料同化结合不够紧密, GRAPES全球/区域集合预报的SVs和ETKF初值扰动方法主要是寻找在大气相空间中增长最快的扰动, 但对观测误差结构考虑不足, 特别是对代表中小尺度信息观测资料的不确定性描述不足。

4) GRAPES全球集合预报在热带外地区的奇异向量采用干物理过程切线性模式, 不能很好地代表湿物理过程误差增长特征, 加之GRAPES全球和区域集合预报分别采用奇异向量初值扰动方法和集合变换初值扰动方法, 增加发展成本, 不利于在GRAPES初值扰动方面开展深入工作。

## 6 未来展望

未来GRAPES全球/区域集合预报未来将重点关注如下四个方面:

1) 发展GRAPES无缝隙集合预报 (Seamless ensemble)。无缝隙集合预报包括了两方面含义: 一方面, 各数值预报中心对流尺度短临数值预报、全球中期数值预报、延伸期和气候预测模式均采用集合预报技术, 构建从短临临近、中期和延伸期的GRAPES无时空缝隙集合预报; 另一方面, 集合预报系统与高分辨率模式采用统一分辨率并与资料同化系统耦合发展, 集合预报为同化系统提供“流依赖”的背景误差协方差, 同化系统为集合预报提供初值不确定信息和扰动场, 构建无缝隙数值预报模式体系。ECMWF计划2020年将18 km分辨率全球集合预报和9 km分辨率高分辨率模式统一为9 km全球集合预报系统, 采用集合变分资料同化方法 (EDA) 来估计“流依赖”背景误差协方差和初值扰动, 美国环境预报中心 (NCEP) 发展了集合卡尔曼变分同化系统。GRAPES全球/区域集合预报技术与同化系统耦合发展也将成为必然选择。

2) 发展GRAPES对流尺度集合预报技术。国际集合预报业务系统正走向对流尺度。一是为满足局地强对流突发灾害预报预警需求的百米—千米级有限区域集合预报在西方发达国家已经成为核心业务, 如美国的超级对流集合系统 (CLUE: Community Leveraged Unified Ensemble), 英国的MOGREPS-UK (2.2 km, 12个成员)、德国的COSMODE-EPS (2.8 km, 20个成员) 和法国气象局的AROME-EPS (2.5 km, 12个成员) 等, 二是全球集合预报系统对流尺度化也是未来发展趋势, ECMWF宣称2025年战略目标是建立5 km水平网格距的全球中期确定性和集合预报一体化系统。GRAPES区域集合预报将更侧重于描述对流系统的不确定性。

3) 发展GRAPES多尺度随机物理扰动方法。集合预报技术更加关注数值预报模式的随机误差代表性, 强调发展适用于不同时空尺度集合预报和同化分析的多尺度随机扰动技术, 尤其是热带地区, 如何预报和模拟热带对流系统的不确定性, 必须改善GRAPES物理过程扰动方法、海气耦合及相互作用的不确定性。

4) 发展集合预报误差诊断包, 检查离散度-技巧比率的空间分布, 以及点对点的误差-离散度关系散点图, 进一步理解分析具体系统性误差结构, 方便集合预报系统的离散度-技巧比率改进方法及模式随机物理扰动方案调试。

最后需要说明的是, 对于GRAPES全球/区域集合预报研究及应用方面的问题和未来展望, 是作者在GRAPES全球/区域集合预报研究开发和业务应用过程中的浅薄体会和一孔之见。同时, 受篇幅限制, GRAPES全球/区域集合预报尚有许多重要方面, 如随机参数扰动、概率预报后处理等未有涉及。

## 参考文献

- [1] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525(7567): 47-55.
- [2] 李小泉, 刘金达, 汪迎辉. 集合预报及其在中期天气预报中的应用. *气象*, 1997, 23(8): 3-9.
- [3] 李泽椿, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. *气象*, 2002, 13(1): 1-15.
- [4] 田华, 邓国, 胡江凯, 等. 全球T213数值集合预报业务系统简介. 广州: 中国气象学会2007年年会天气预报预警和影响评估技术分会场论文集, 2007: 237-241.
- [5] 谭宁, 陈静, 田华. 两种模式随机扰动方案比较及扰动传播分析. *气象*, 2013, 39(5): 543-555.
- [6] Duan Y, Gong J, Du J, et al. An overview of the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(3): 381-403.
- [7] 邓国, 龚建东, 邓莲堂, 等. 国家级区域集合预报系统研发和性能检验. *应用气象学报*, 2010, 21(5): 513-523.
- [8] 薛纪善, 陈德辉. 数值预报系统GRAPES的科学设计与应用. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] 谭燕, 陈德辉. 基于非静力模式物理扰动的中尺度集合预报试验. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 396-406.
- [10] 田伟红. ETKF方法在区域集合预报中的初步应用. *气象*, 2008, 34(8): 35-39.
- [11] 纪永明, 陈静, 矫梅燕. 基于多中心TIGGE资料的区域GRAPES集合预报初步试验. *气象*, 2011, 37(4): 392-402.
- [12] 龙柯吉, 陈静, 马旭林. 基于集合卡尔曼变换的区域集合预报初步研究. *成都信息工程学院学报*, 2011, 26(1): 37-46.
- [13] 陈浩, 陈静, 汪骄阳, 等. 观测误差对集合卡曼滤波集合预报初值扰动影响试验. *大气科学学报*, 2017, 40(2): 193-201.
- [14] 张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. GRAPES区域集合预报系统应用研究. *气象*, 2014, 40(9): 1076-1087.
- [15] 张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. 基于GRAPES\_Meso的集合预报扰动方案设计与比较. *大气科学学报*, 2014, 37(3): 276-284.
- [16] 王静, 陈静, 钟有亮, 等. GRAPES-REPS西南低涡预报检验评估. *气象*, 2017, 43(4): 385-401.
- [17] 钟有亮, 陈静, 王静. GRAPES区域集合预报系统对登陆台风预报的检验评估. *热带气象学报*, 2017, 33(6): 953-964.
- [18] 王婧卓, 陈静, 庄照荣, 等. GRAPES区域集合预报初值扰动增长

(下转29页)

# 欧洲业务集合预报系统进展

陈超辉<sup>1</sup> 王勇<sup>2</sup> 杜钧<sup>3</sup> 何宏让<sup>1</sup> 刘宇迪<sup>1</sup> 姜勇强<sup>1</sup>

(1 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101; 2 奥地利气象局, 维也纳 奥地利 1190;

3 美国国家海洋大气局国家环境预报中心, 美国 马里兰 20740)

**摘要:** 由于大气初值与数值模式中物理过程存在不确定性等客观事实, 集合预报无疑代表着数值天气预报未来前进与发展的方向, 它标志着天气预报的预报范式转变, 即用户不仅可以得到未来大气状态的单一现实, 还可得到未来大气可能出现的一系列场景。文中扼要地梳理了欧洲全球业务集合预报与有限区域模式高分辨业务集合预报的研究动态与技术发展、基本问题及其未来最新发展方向, 包括: 1) 欧洲中期天气预报中心的业务集合预报系统发展沿革及概况; 2) 欧洲国家主要业务高分辨率集合预报系统概况; 3) 当前业务集合预报存在的问题、挑战及未来前进的方向。文中除了关注欧洲中期天气预报中心的集合预报应用, 还梳理了目前欧洲高分辨业务集合预报取得的成就, 以引起有关研究人员的注意。总之, 借鉴欧洲业务集合预报的发展思路, 不仅有助于集合预报理论创新, 还对发展集合预报业务有重要指导意义。

**关键词:** 业务集合预报, 概率预报, 高分辨率集合预报, 不确定性, 对流可分辨尺度集合预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.004

## Overview of the European Operational Ensemble Prediction Systems

Chen Chaohui<sup>1</sup>, Wang Yong<sup>2</sup>, Du Jun<sup>3</sup>, He Hongrang<sup>1</sup>, Liu Yudi<sup>1</sup>, Jiang Yongqiang<sup>1</sup>

(1 Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

2 Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna 1190

3 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Maryland 20740)

**Abstract:** Due to the uncertainties in both initial condition and model physics, ensemble prediction has been becoming the norm of numerical weather prediction as supercomputers become increasingly powerful. It is a paradigm shift in weather prediction practice from a single forecast to an ensemble of forecasts, which allow forecasters and users see a range of possibilities instead of a single deterministic one. This paper briefly reviews the development of both global and regional ensemble prediction systems (EPS) in Europe, including their current status, issues and future plans. Specifically, the topics are (1) operational global EPS at ECMWF; (2) operational high resolution regional EPS in various European countries; and (3) a discussion about related issues, challenges and future plans. Since the storm scale is a future trend of EPS development, we have paid a particular attention to the development and application of high-resolution EPS besides the global ECMWF EPS. It is our hope that this review will not only shed lights on scientific and technical aspects of EPS development but also its operational application.

**Keywords:** operational ensemble prediction, probability forecast, high-resolution ensemble forecast, uncertainty, convection-permitting ensemble forecast

## 0 引言

天气预报能带来大量的社会效益, 无论是极端天气预警, 还是农业规划<sup>[1]</sup>。目前实现这一目标的主要手段是运用建立在复杂数理基础上的数值天气模式以及各种常规和遥感技术获取的大量观测资料通过大规

模超级计算机产生的数值天气预报。但由于高度非线性大气运动所具有的混沌特性, 数值预报模式初值的微小误差或者模式自身误差都可能导致单一确定性数值预报结果与实况天气之间存在较大偏差<sup>[2]</sup>。

为此, 27年前欧洲中期天气预报中心ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)<sup>[3-4]</sup>和美国国家环境预报中心NCEP (National Centers for Environmental Prediction)<sup>[5-6]</sup>发布了人类历史上首批业务集合预报。随后, 加拿大气象局MSC (Meteorological Service of Canada) 在1996

收稿日期: 2019年09月29日; 修回日期: 2019年12月29日

第一作者: 陈超辉 (1983—), Email: chenchao2001@163.com

资助信息: 国家重大基础研究计划 (2017YFC1501803);

国家自然科学基金项目 (41975128 和 41875060)

年也开始发布业务集合预报,随后世界上其他气象中心,如法国、英国、日本、澳大利亚、南非等国也先后进行了跟进,中国气象局国家气象中心也于1996年5月下旬开始着手并建立集合预报业务<sup>[7]</sup>。发展至今,集合预报不仅用于模式的预报过程,即为中短期、月尺度和季节性时间尺度提供预报预测,还用于模式的分析过程,为整个地球系统提供更好的初始状态估计。大量学者也针对其进展进行了详细梳理。例如,杜钧<sup>[8]</sup>综合论述了集合预报的概念、基本问题与集合预报应用及发展前景;孔凡铀<sup>[9]</sup>针对雷暴尺度天气集合数值预报所面临的科学问题、主要构造技术、研究现状及存在的问题等做了力所能及的探讨;李泽椿等<sup>[7]</sup>回顾了国家气象中心集合数值预报系统的开发过程、业务系统组成和集合预报产品的解释与应用等;陈静等<sup>[10]</sup>系统总结了集合预报概念、系统组成、初始扰动理论以及产品解释与应用方面的研究。此外,王晨稀<sup>[11]</sup>、段明铨等<sup>[12]</sup>、麻巨慧等<sup>[13]</sup>和张涵斌等<sup>[14]</sup>分别从热带气旋集合预报研究、集合预报方法研究、NCEP与ECMWF及CMC三家极具代表性的全球集合预报业务系统、区域集合预报扰动方法研究等不同视角梳理了集合预报的工作进展。

总体而言,这些文献主要聚焦集合预报初始扰动技术、模式扰动技术、多模式集合预报、集合预报产品与检验等方面,理论归纳相对较多,而专门针对业务系统发展与应用的相对较少;再者,对于欧洲业务集合预报,行业内注意力几乎全部集中在欧洲全球中期业务集合预报,而对于欧洲范围内的有限区域高分辨集合预报业务关注甚少;此外,还存在一个重要的事实,即欧洲业务集合预报相比世界其他气象中心的业务集合预报存在明显的优势,并将这种优势奇迹般地保持至今。基于上述背景分析,从业务发展与应用角度进行欧洲业务集合预报归纳并梳理(包括全球业务集合预报与有限区域高分辨业务集合预报)显得十分必要。作者认为研究与借鉴欧洲业务集合预报的发展思路,不仅对集合预报理论创新有帮助,还对开展集合预报业务有重要意义。

本文包括以下3部分内容:第1部分是关于ECMWF全球业务集合预报历史沿革及发展概况;第2部分描述欧洲主要国家的有限区域高分辨业务集合预报系统;最后一部分概要介绍欧洲集合预报的动态,仍存在的问题、挑战及未来方向。

## 1 ECMWF全球业务集合预报历史沿革及发展概况

ECMWF作为一个具有广泛影响力的世界气象中

心,如何客观看待其发展,十分重要。当前大部分的注意力主要集中于集合预报理论与方法总结,本节内容以一种全新的视角看待欧洲业务集合预报的发展,即从集合预报业务系统整体升级的角度进行探讨。欧洲业务集合预报狭义上是指欧洲中期天气预报中心提供的全球中期业务集合预报,它的出现使得预报员和用户不仅能够获得未来大气状态,还能针对未来大气可能出现的情况进行可靠性与准确性估计。其发展、实施与运维主要归功于ECMWF及其成员国许多人的工作,也归功于多年来与ECMWF一起工作以了解其性能并进一步提高集合预报业务水平的世界各国访问学者的工作。这里主要以业务系统配置升级为主线,讨论ECMWF如何从1992年第1次集合预报开始,发展到今天的水平,包括集合预报系统的五个关键特征,即用来模拟初始不确定性的方法、用来模拟模式不确定性或模式近似的方法、集合预报系统水平和垂直分辨率、预报时效、集合预报成员个数。

表1给出了从1992年11月至2019年6月的ECMWF全球业务集合预报系统的关键特征随时间的升级演变,易知ECMWF集合预报进行了数次升级。第1列表示配置升级时间,第2列表示系统升级特征的关键字描述,第3列至第8列分别为刻画初值不确定性的初始扰动关键特征:水平分辨率、垂直层数、用于计算奇异向量的最优时间间隔、优化区域、前区增长不确定性和后区增长不确定性的模拟方法。第9列至第15列代表预报阶段的系统关键特征:水平分辨率、垂直层数、预报时效(以d为单位)、集合成员个数、模式不确定性处理方法、与海洋模式耦合以及回报套件的规模(以成员和年份为度量单位)等。

由表1知,1992年12月ECMWF正式开展集合预报业务,集合预报一周运行3次,即每周五、周六、周日00时(世界时,下同)开始运行,初值扰动范围覆盖全球,初值不确定性仅采用初始奇异向量模拟,其水平与垂直分辨率分别为T21和L19,奇异向量计算优化时间间隔为36 h,初始扰动集合正负成对分布;在预报阶段,预报模式分辨率为T63L19(约320 km),预报长度为10 d,系统包括33个集合成员,不考虑模式不确定性、不考虑与海洋或海冰模式耦合,也不考虑回报套件。1993年2月,为了处理奇异向量主要集中在南半球的问题,ECMWF引入了局地投影运算算子(Local Projector Operator, LPO),使得奇异向量分布在北半球,这对北半球集合预报的可靠性有重大影响。1994年8月,ECMWF为了改善集合离散度,计算奇异向量的优化时间间

表1 ECMWF全球业务集合预报配置的主要变化  
Table 1 Time evolution of some key characteristics of the ECMWF operational global medium-range ensemble (OG-ENS) between inception (November 1992) and today (June 2019)

| 时间/年月  | 关键字描述                                  | 初始不确定性估计 (SVs和EDA) |      |      |             |        | 模式不确定性估计和预报系统配置 |                          |     |           |      |           |               |          |
|--------|----------------------------------------|--------------------|------|------|-------------|--------|-----------------|--------------------------|-----|-----------|------|-----------|---------------|----------|
|        |                                        | 水平分辨率              | 垂直层数 | 优化间隔 | 优化区域        | 前区不确定性 | 后区不确定性          | 水平格距                     | 垂直层 | 预报时效      | 成员个数 | 模式不确定性    | 是否耦合          | 回报套件     |
| 199212 | Oper Impl                              | T21                | L19  | 36 h | globe       | NO     | SVINI           | T63                      | L19 | 10 d      | 33   | NO        | NO            | NO       |
| 199302 | SV LPO                                 | T21                | L19  | 36 h | NHx         | NO     | SVINI           | T63                      | L19 | 10 d      | 33   | NO        | NO            | NO       |
| 199408 | SV OTI                                 | T21                | L19  | 48 h | NHx         | NO     | SVINI           | T63                      | L19 | 10 d      | 33   | NO        | NO            | NO       |
| 199503 | SV hor resol                           | T42                | L19  | 48 h | NHx         | NO     | SVINI           | T63                      | L19 | 10 d      | 33   | NO        | NO            | NO       |
| 199603 | NH+SH SV                               | T42                | L19  | 48 h | (NH+SH)x    | NO     | SVINI           | T63                      | L19 | 10 d      | 33   | NO        | NO            | NO       |
| 199612 | resol/mem                              | T42                | L31  | 48 h | (NH+SH)x    | SVEVO  | SVINI           | TL159                    | L31 | 10 d      | 51   | NO        | NO            | NO       |
| 199803 | EVO SV                                 | T42                | L31  | 48 h | (NH+SH)x    | SVEVO  | SVINI           | TL159                    | L31 | 10 d      | 51   | NO        | NO            | NO       |
| 199810 | Stoch sch SPPT                         | T42                | L31  | 48 h | (NH+SH)x    | SVEVO  | SVINI           | TL159                    | L31 | 10 d      | 51   | STP       | NO            | NO       |
| 199910 | vert resol                             | T42                | L40  | 48 h | (NH+SH)x    | SVEVO  | SVINI           | TL159                    | L40 | 10 d      | 51   | STP       | NO            | NO       |
| 200011 | FC hor resol                           | T42                | L40  | 48 h | (NH+SH)x    | SVEVO  | SVINI           | TL255                    | L40 | 10 d      | 51   | STP       | NO            | NO       |
| 200201 | TC SVs                                 | T42                | L40  | 48 h | (NH+SH)x+TC | SVEVO  | SVINI           | TL255                    | L40 | 10 d      | 51   | STP       | NO            | NO       |
| 200409 | sampling                               | T42                | L40  | 48 h | (NH+SH)x+TC | SVEVO  | SVINI           | TL255                    | L40 | 10 d      | 51   | STP       | NO            | NO       |
| 200506 | rev sampl                              | T42                | L40  | 48 h | (NH+SH)x+TC | SVEVO  | SVINI           | TL255                    | L40 | 10 d      | 51   | STP       | NO            | NO       |
| 200602 | resolution                             | T42                | L62  | 48 h | (NH+SH)x+TC | SVEVO  | SVINI           | TL399                    | L62 | 10 d      | 51   | STP       | NO            | NO       |
| 200609 | VAREPS                                 | T42                | L62  | 48 h | (NH+SH)x+TC | SVEVO  | SVINI           | TL399(0~10)/TL255(10~15) | L62 | 15 d      | 51   | STP       | NO            | NO       |
| 200803 | VAREPS mon                             | T42                | L62  | 48 h | (NH+SH)x+TC | SVEVO  | SVINI           | TL399(0~10)/TL255(10~15) | L62 | 15 d/32 d | 51   | STP       | HOPE from d10 | 1×5×18a  |
| 200909 | Rev SPPT                               | T42                | L62  | 48 h | (NH+SH)x+TC | SVEVO  | SVINI           | TL399(0~10)/TL255(10~15) | L62 | 15 d/32 d | 51   | STP       | HOPE from d10 | 1×5×18a  |
| 201001 | hor resol                              | T42                | L62  | 48 h | (NH+SH)x+TC | SVEVO  | SVINI           | TL639(0~10)/TL319(10~15) | L62 | 15 d/32 d | 51   | revSTP    | HOPE from d10 | 1×5×18a  |
| 201006 | EDA EPS                                | T42                | L62  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 10*EDA | SVINI           | TL639(0~10)/TL319(10~15) | L62 | 15 d/32 d | 51   | revSTP    | HOPE from d10 | 1×5×18a  |
| 201011 | Rev Stoch scheme                       | T42                | L62  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 10*EDA | SVINI           | TL639(0~10)/TL319(10~15) | L62 | 15 d/32 d | 51   | revSTP+BS | HOPE from d10 | 1×5×18a  |
| 201111 | New ocean model                        | T42                | L62  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 10*EDA | SVINI           | TL639(0~10)/TL319(10~15) | L62 | 15 d/32 d | 51   | revSTP+BS | NEMO from d10 | 1×5×18a  |
| 201206 | Rev EDA-pert & refc suite              | T42                | L62  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 10*EDA | SVINI           | TL639(0~10)/TL319(10~15) | L62 | 15 d/32 d | 51   | revSTP+BS | NEMO from d10 | 1×5×20a  |
| 201311 | vert resol & coupling from d0          | T42                | L91  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 25*EDA | SVINI           | TL639(0~10)/TL319(10~15) | L91 | 15 d/32 d | 51   | revSTP+BS | NEMO from d0  | 1×5×20a  |
| 201505 | Extension to 46d and REFC suite to 22m | T42                | L91  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 25*EDA | SVINI           | TL639(0~10)/TL319(10~15) | L91 | 15 d/46 d | 51   | revSTP+BS | NEMO from d0  | 2×11×20a |
| 201603 | hor resol                              | T42                | L91  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 25*EDA | SVINI           | TL639(0~15)/TL319(15~45) | L91 | 15 d/46 d | 51   | revSTP+BS | NEMO from d0  | 2×11×20a |
| 201611 | Ocean (Horizontal & vertical)          | T42                | L91  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 25*EDA | SVINI           | TL639(0~15)/TL319(15~45) | L91 | 15 d/46 d | 51   | revSTP+BS | NEMO from d0  | 2×11×20a |
| 201707 | Rev EDA                                | T42                | L91  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 25*EDA | SVINI           | TL639(0~15)/TL319(15~45) | L91 | 15 d/46 d | 51   | revSTP+BS | NEMO from d0  | 2×11×20a |
| 201806 | Model error changes                    | T42                | L91  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 25*EDA | SVINI           | TL639(0~15)/TL319(15~45) | L91 | 15 d/46 d | 51   | revSTP    | NEMO from d0  | 2×11×20a |
| 201906 | Rev DA /mem                            | T42                | L91  | 48 h | (NH+SH)x+TC | 50*EDA | SVINI           | TL639(0~15)/TL319(15~45) | L91 | 15 d/46 d | 51   | revSTP    | NEMO from d0  | 2×11×20a |

隔 (optimization time interval, OTI) 从36 h增加到48 h, 从而改善了超出OTI以外的扰动增长, 并从1994年5月1日起, 于每日00时生成一次集合预报。1995年3月, ECMWF计算SVs的水平分辨率提高到T42, 水平分辨率的提高改善了扰动增长, 从而提高了集合预报的可靠性。1996年3月, ECMWF为解决南半球的扰动增长, 引入了一套新SVs, 它对南半球的集合预报可靠性有重大影响。1996年12月, 集合预报的预报阶段模式分辨率提高到TL159L31 (约120 km), 成员个数从33个增加到51个。1998年3月, ECMWF开始引入演化SVs<sup>[15]</sup> (Evolved Singular Vectors, 简称EVO SVs), 演化SVs主要模拟起报时间前两天的误差增长效果, 实践表明初始SVs加入演化SVs能够改善集合预报离散度, 尤其在较短预报时效范围内效果显著。1998年10月, ECMWF开始考虑与物理参数化相联系的模式不确定性问题, 引入了随机扰动参数化倾向方案<sup>[16]</sup> (Stochastic Perturbed Parameterization Tendency, SPPT), 这种方案在整个预报长度范围内, 对改善集合预报系统离散度和可靠性有显著效果, 尤其是在热带地区。1999年10月, 计算SVs的模式垂直层数从31层增加到40层。

2000年11月, 集合预报系统水平分辨率从TL159提高到TL255 (约80 km)。2002年1月, ECMWF增加了容易出现热带低气压的热带地区SVs, 效果表明这种方案能够改善热带地区的集合离散度, 尤其在出现热带风暴的天气背景下。2004年9月, ECMWF在集合预报初始扰动生成阶段采用的采样策略更改为高斯采样<sup>[17]</sup>, 并于2005年6月改进了高斯采样方法。2006年2月, 集合预报系统水平分辨率开始从TL255L40提高到TL399L62 (约60 km)。2006年9月, ECMWF基于可变分辨率集合预报 (Variable Resolution Ensemble Prediction System, VAREPS) 思路<sup>[18]</sup>将集合预报长度延至15 d, 即在第10天预报模式分辨率从TL399切换至TL255。2008年3月开始, ECMWF基于VAREPS技术将中期集合预报与月尺度集合预报进行合并; 在这以前, 这两个业务系统一直独立运行。新合并系统针对短时效的小尺度和恶劣天气事件, 以及15 d的大尺度预报提供每天2次运行; 而对于预报长度达到32 d的大尺度预报每周1次运行<sup>[18-19]</sup>。此外, 从第10天开始, 集合预报系统与动力海洋模式HOPE (Hamburg Ocean Primitive Equation) 相耦合, 同时引入1个每周1次运行的由5个集合成员组成的过去18年的集合预报回报套件。平均结果表明, 使用这种新的组合系统, 温带地区的月预报得分略高。特别是新系统能对极端

事件产生更好的月尺度预测, 如2003年欧洲热浪或2007年英格兰的潮湿夏季。然而, 热带地区的月预报得分略低于以前的系统, 很可能是因为预报的前10 d缺乏海洋大气耦合。2009年9月, ECMWF修正了随机模式误差方案。

2010年1月, ECMWF集合预报系统的预报阶段模式水平分辨率在前10 d从TL319增加到TL639 (约35 km), 从第10天到第32天的水平分辨率从TL255增加到TL319 (约70 km)。2010年6月, ECMWF在集合预报系统中引入了一组由10个集合数据同化成员构成的新型初始扰动, 并取代了演化SVs, 效果表明基于集合数据同化的扰动能够改善与资料同化循环相联系的扰动刻画, 从而导致集合离散度提高, 且在短期预报时效与热带地区的效果尤其明显。2010年11月, 刻画模式误差方面, ECMWF引入了第二种方案, 即采用随机动能后向散射方案SKEB方案<sup>[20]</sup> (Stochastic Kinetic Energy Backscatter) 来模拟次网格尺度能量升尺度转换过程中存在的不确定性。2011年11月, ECMWF引入了新的海洋模式, 即选用分辨率为1° (约100 km) 的NEMO (the Nucleus for European Modelling of the Ocean) 取代了HOPE模式, 集合预报长度延长至32 d, 并且每周开始运行2次 (每周一和周四00时)。2012年6月, ECMWF对基于集合数据同化的扰动进行了改进, 引入了近地面变量扰动, 并且回报套件被扩大到涵盖过去20年。2013年11月, 初始扰动计算阶段, 模式垂直层数从62层增加到91层, 集合预报阶段与海洋模式耦合也从第10天移到了第0天, 使得热带地区天气现象预测效果取得重大进步, 例如MJO (Madden-Julian Oscillation) 现象。2015年5月, 集合预报时间长度从32 d延长到46 d, 回报套件扩大到每周2次 (每周一和周四00时) 运行的涵盖过去20年的11个成员集合预报。2016年3月, 第1天至第15天, 集合预报模式分辨率提高到了TCO639L91 (立方八面体网格, 约18 km), 从第15天到第46天, 模式分辨率增加到了TCO319L91 (约36 km)。2016年11月, 集合预报系统所使用的海洋模式分辨率从1°提高到0.25° (约25 km), 垂直层数从42层增加到75层, 并且引入了交互式海冰模式LIM2, 使得海冰覆盖能够动态演变。同时针对SPPT方案中扰动倾向进行了全局修正, 以改善全局动量、能量和湿度守恒特性。2017年7月, ECMWF改善了来自集合数据同化系统的湿度背景误差方差, 修正了背景误差方差小波滤波, 并为了改善热带气旋结构改进了4DVAR中下投式探空仪风场观测的质量控制。另外, 预报模式采用了具有

较低噪声和更精确的新型高效长波辐射传输方案, 对流方案也在较低温度 (低至 $-38^{\circ}\text{C}$ ) 下增加过冷水。2018年6月, ECMWF在高分辨率 (HRES 4d-Var) 和集合数据同化分析表面分析中应用了海冰-大气弱耦合同化, 计算相对湿度增量采用温度而不再使用虚拟温度。同时为避免模式积分受到冲击, 模式误差弱约束强制应用于每个时间步, 而不是每小时。模式误差方面, SPPT方案再次做了修改, 通过减少晴空区离散度、激活平流层倾向扰动, 改进了“流相关”误差表示, SPPT扰动模式的振幅减小 (20%)。同时集合数据同化采用了与集合预报系统一样的 SPPT方案, 停用了随机动能后向散射SKEB方案, 从而节约了集合预报系统2.5%的计算成本。2019年6月, ECMWF系统采用连续数据同化, 4D-Var外循环数量从3层增加到4层, 集合数据同化成员也从25个增加到50个。集合数据同化离散度被应用于计算简化扩展卡尔曼滤波的土壤分析雅可比矩阵; 热带区域海面温度也引入了弱耦合数据同化。改进了对流方案 (夹卷、CAPE闭合、浅对流), 考虑了辐射方案中的长波散射过程。集合预报系统基于50个集合数据同化成员生成初始扰动。集合预报系统的辐射时间步长从3 h减少到1 h, 与HRES一致。

以上内容仅从业务配置升级方面简要概括了欧洲业务集合预报的发展过程。本质上看, 计算成本是驱动集合预报升级的关键因素。从1992年12月至2019年6月, 预报阶段主要变化包括: 水平分辨率增加了20倍, 从大约320 km增加到大约16 km; 垂直分辨率几乎增加了5倍, 从19个垂直层增加到91个垂直层; 预测时间从10 d延长到了46 d<sup>[21]</sup>; 集合成员个数从33个增加到51个; 集合预报制作的频率也有所增加, 当前还开展集合预报回报业务。另外在将近27年的ECMWF配置升级时间轴上, 还有一些值得重视的特点:

1) 尽管ECMWF越来越倾向基于集合数据同化开展集合预报, 但SVs在未来几年不太可能被移除。换言之, SVs一直贯穿ECMWF集合预报系统始终直到今天。在ECMWF全球集合预报第1个版本中, 采用奇异向量模拟初始不确定性。奇异向量提供了一个非常严谨的理论基础, 直到2008年开始使用集合数据同化与奇异向量耦合<sup>[22]</sup>之前, 奇异向量是ECMWF集合预报系统中唯一使用的初始扰动方法。即便到如今, SVs仍然是ECMWF集合预报系统的一个重要组成部分, 因为它能不断提供关于初始不确定性的动力相关信息。2008年添加了基于集合数据同化的扰动后, 系统能够改善与观测系统特性 (观测误差、覆盖范围、

可扩展性) 相关的初始误差模拟, 并自2008年开始, ECMWF 集合数据同化与SVs一直结合使用, 以确定中期/月尺度集合预报的初始条件。

2) 刻画模式不确定性的方案选用主要以业务效果评估为基准。1999年, ECMWF以加拿大<sup>[23]</sup>为样例, 在集合预报中引入了一个旨在模拟模式不确定性的随机方案SPPT方案<sup>[16]</sup>。2010年, ECMWF还引入了随机动能反向散射方案SKEB方案来模拟模式无法解析的过程, 即模拟从低于模式分辨率的尺度到模式可分辨尺度的升尺度能量转移, 该方案事后被证明不能带来任何显著的好处, 于2018年关闭。可见ECMWF在系统应用新型理论方面不只做加法, 也做减法, 一切以业务效果检验为标准。

3) 致力于中期、月尺度、季节内尺度和季节尺度集合预报的融合统一与无缝隙。通过使用可变分辨率方法<sup>[18-19]</sup>和降低超过中期集合预报的模式分辨率, ECMWF能够生成预报长度更长、对集合性能影响最小的月尺度业务集合预报, 即实现中期集合预报与月尺度集合预报合并。通过进一步降低分辨率, 能够生成业务使用的季节尺度集合预报<sup>[24]</sup>。同时由于提取延伸期的可预测信号非常困难, ECMWF对这些集合预报补充了集合预报回报套件, 这些回报集合通常是较小成员规模的集合, 其配置除了集合大小之外, 其余均与过去几十年生成的业务集合预报相同。值得记住的是, 2006年中期集合预报延长至15 d, 2008年集合预报加入月尺度集合预报并延长至32 d, 2015年该预报时间进一步延长至46 d。

4) 集合预报质量方面稳步提升。由于模式不断升级、数据同化系统不断改进、更多观测数据被使用, 以及上述集合预报系统配置的变化, ECMWF集合预报系统性能在过去27年中有了显著提高。图1是从1995年1月至2017年6月北半球500 hPa位势高度集合预报技巧随时间的演变<sup>[21]</sup>。通过集合预报与业务分析值进行比较, 评价指标采用CRPS度量, 它是将集合预报的连续分级概率评分CRPS与参考预报 (如气候态) 进行比较。对于完美预报而言, CRPS的值为1, 值越大, 代表技巧越高; 而对于只与气候态统计预报具有相同技巧的预报, 则CRPS值为零。由图1可知, 对于刻画自由大气大尺度特征的500 hPa位势高度, 集合预报每10年提高约1.5 d。例如, 2017年的5 d预报技巧 (绿线) 和2001年的3 d预报技巧 (红线) 相当, 表示在这16年期间, 可预测性增加了约2 d。此外, 图1中每条曲线的波峰和波谷呈现出有规律的形态, 主要是因为集合预报技巧与季节相关导致的, 其

中冬季天气往往比夏季天气更容易预报。

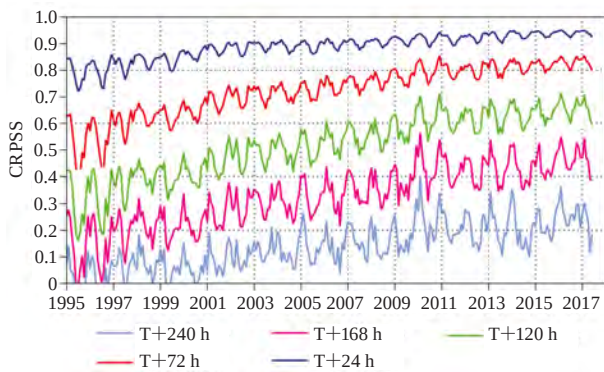


图1 1995年1月—2017年6月北半球500 hPa位势高度集合预报CRPSS随时间的演变(参考数据为业务分析值,预报时间为24 h、72 h、120 h、168 h和240 h)

Fig. 1 Time evolution, from 1 January 1995 to 1 June 2017, of the Continuous Ranked Probability Skill Score (CRPSS) of ENS forecasts of 500 hPa geopotential height over the northern hemisphere, for lead times of 24 h, 72 h, 120 h, 168 h and 240 h. Forecasts are verified against operational analyses

5) 各关键特征的刷新周期不同。表1中的参数概括了ECMWF集合预报系统的主要特征,这些参数主要针对初始不确定性估计与模式不确定性估计及集合预报系统配置两大类。从表1可知,ECMWF产生中期预报的集合预报系统,通常每年至少升级1次,与此不同,用于支撑月尺度或季节尺度的回报套件只是偶尔升级,间隔4~6 a,这种缓慢的刷新一部分是因为需要大量回报结果才能完成预报订正,另一部分是为了向用户提供长期而稳定的服务。此外,表中归类的初始不确定性与模式不确定性估计及集合预报系统配置两个阶段,其技术研发与配置升级相互独立。例如,刻画初始不确定性时,垂直分辨率刷新频率较快,从19层起,31层、40层、62层到91层,而水平分辨率,从T21提高到T42,不再变化;奇异向量计算优化间隔从36 h增加到48 h也不再变动;相反在集合预报阶段,水平和垂直分辨率均根据需要进行及时刷新。还可发现初始扰动生成方面存在一条理论主线,即从纯粹的初始奇异向量,再到初始奇异向量与演化奇异向量相结合,最终到奇异向量与集合资料同化相结合,即集合预报与资料同化一体化。

## 2 欧洲范围内主要有限区域业务集合预报系统发展与概况

欧洲集合预报业务发展至今,在世界范围内具有广泛影响力。当前业务部门和预报员的注意力主要聚焦在欧洲中心中期或全球业务集合预报,其实早在1993年,针对潜在恶劣天气的兴趣,在已有的欧洲

有限区域模式工作组EWGLAM (European Working Group on Limited Area Modelling) 联系基础上成立了短期数值天气预报工作组SRNWP (Short Range Numerical Weather Prediction)。且SRNWP项目从成立时起,就成了欧洲有限区域模式联盟(短期数值天气预报模式主要研发实体单位)相互之间进行合作的主要载体,并从2000年开始,该项目一直在欧洲气象服务网EUMETNET (European Meteorological Services Network) 领导下开展工作。这些数值天气预报联盟包括ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational)、COSMO (Consortium for Small-scale Modeling)、HIRLAM (High Resolution Limited Area Model)、LACE (Limited Area Modelling in Central Europe) 项目和英国气象局。同时鉴于有限区域高分辨集合预报对于提高灾害性强天气的预报准确率具有重要价值,以及探讨欧洲业务集合预报框架的完整性,本节内容主要从业务角度梳理欧洲范围内有限区域业务集合预报系统发展概况,下面分别从SRNWP-PEPS和SRNWP-EPS两个项目以及欧洲主要有限区域业务集合预报系统展开。

### 2.1 SRNWP-PEPS 短期数值天气预报“穷人”集合预报系统

在欧洲,区域模式早期研发主要由4个联盟组织:HIRLAM、ALADIN、COSMO和英国气象局,而每个联盟都有自己的有限区域模式,这些模式都是当今短期数值天气预报领域的最新技术代表,已被20多个国家气象服务机构用于业务预报。因此,客观存在使用不同模式参数化、不同资料同化技术和不同网格分辨率以及不同区域的多种业务预报,并且这些预报结果都是合理的,这就给预报员带来了巨大挑战,即如何有效利用现有各种业务数值天气预报结果。

2002年,德国气象局产生了将所有可用高分辨率数值预报收集起来开展“穷人”集合预报的想法,理论上可以将来自不同联盟的区域模式短期预报融合成一个在预报预警过程中效果更优的多模式集合预报。因此在欧洲气象服务网理事会会议上,建议在欧洲气象服务网的框架下启动SRNWP-PEPS<sup>[25]</sup>工程,其主要目标之一就是“穷人”集合预报进行评估,以确定它能否为预报预警提供重要支撑和改进。2003年6月,欧洲气象服务网SRNWP项目主任Quiby邀请欧洲国家的气象局参加,并启动了该计划。2004年底,德国气象局建立了SRNWP-PEPS业务,包括累积总降水量、累积总降雪、最大10 m风速、最大10 m阵风风速

度、最高和最低2 m温度，一天四次（00，06，12和18时）。到2006年，20多个气象服务部门（表略）已经加入了该计划，最终40个确定性和概率预报产品被分发给各贡献成员。

SRNWP-PEPS的主要处理方法是单个模式预报直接插值到一个参考网格上，即PEPS网格，间距为 $0.0625^\circ$ （约7 km），与德国气象局模式范围接近，覆盖欧洲（ $30^\circ\text{W}$ — $30^\circ\text{E}$ ， $35^\circ\text{N}$ — $70^\circ\text{N}$ ）区域，见图2。在每个PEPS网格点上，针对集合成员使用最近邻方法计算超过某一阈值的概率。由于每个预报成员具有不同的分辨率和积分区域，所以开展“穷人”集合预报时，成员个数多少取决于网格点位置。如图2所示，不同颜色代表成员个数不同。此外，集合大小还随预报变量而变化（表略），因为不是每个模式都提供每个预报变量。例如，只有一些ALADIN和COSMO联盟国家在其模式环境中考虑了阵风经验参数模型。

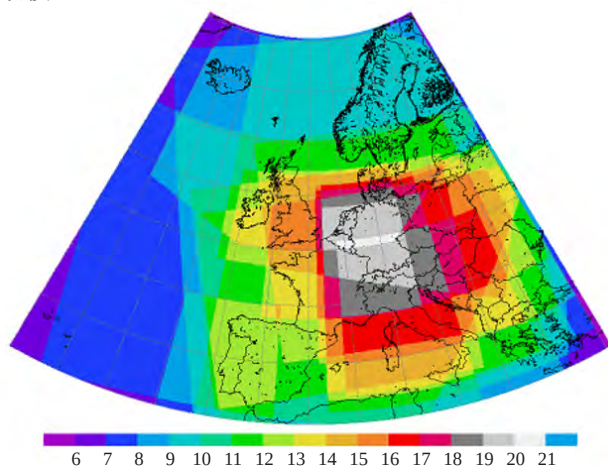


图2 SRNWP-PEPS格点的最大集合成员个数随空间的分布  
Fig. 2 The spatial distribution of the maximum ensemble size of the SRNWP-PEPS

SRNWP-PEPS的缺点在于其概率预报估计存在偏差，可能是因为每个联盟内部的预报成员聚类，以及仍然存在一些不确定性源还未考虑，但经过集合后处理生成SRNWP-PEPS订正后的概率预报，可以作为欧洲其他集合系统的参考。另外，不能忽略提供集合预报成员的有限区域模式运行状态，否则“穷人”集合预报系统可能不完整。

## 2.2 SRNWP-EPS 短期数值天气预报集合预报系统

SRNWP-EPS是在EUMETNET框架下的一个项目，由于该项目任务的复杂与艰巨性，它主要分为两个阶段。第一个阶段是从2013年1月至2014年6月，该阶段由西班牙气象厅Estrada领导，其核心目的是实现

2 km左右网格尺度的恶劣与高影响天气短期集合预报开发与应用在欧洲范围内最大限度地协作。主要完成任务：尽可能确定目前所拥有的项目相关状况和经验；计划使用SRNWP-I和SRNWP-V项目成果，以实现集合预报产品的互操作性和验证；为后面设计对流可允许尺度的集合预报系统筹划科学和技术实验；考虑最合适的初始扰动生成方法及其集合离散度、模型误差和大尺度边界不确定性以及可用的嵌套技术；满足所有相关合作伙伴要求，提供一个适用于不同气象中心的系统，使得高影响天气预报得到显著改善；分析和评估针对甚高分辨率集合预报的有限区域模式集合预报的科学方法发展现状，包括技术限制与弱点；可用和将来的计算机资源场景；为主要最终用户考虑必要的产品；为欧洲气象服务网咨询委员会提交一份SRNWP-EPS第二阶段提案。项目第二阶段从2015年7月—2017年12月，但最后延至2018年12月结束。该阶段由西班牙和意大利协调，其主要目的是帮助在欧洲建立甚高分辨率的集合预报系统，解决对流允许尺度的天气现象预报。主要完成任务：开发经订正后的集合预报新产品和新方法，用于雷暴、雾的极端预报和概率预报；针对极端事件（风、降水、温度等要素）进行集合订正；理解集合预报系统对土壤条件和边界层方案的敏感性及其对选定现象（雾和雷暴）预报的影响。从项目执行看，项目第二阶段主要聚焦高影响天气预报对象雷暴与雾，研究主要聚焦不同欧洲模式系统对土壤模型和边界层方案的描述不确定性，参与方目前主要有德国、匈牙利、意大利、挪威、波兰、西班牙、英国等21个欧洲气象服务网成员国。预计该项目将作为数值天气预报协作框架下SRNWP-EPS模块进行第三阶段工作，即从2023年1月1日—12月31日。

## 2.3 欧洲范围内主要有限区域业务集合预报系统发展概况

由于局地天气存在很大不确定性，因此欧洲很多国家都研发了有限区域集合预报系统，下面将对主要的代表性区域集合预报简要讨论，各高分辨区域集合业务系统的业务配置如表2所示，系统参数统计截止到2018年11月。

英国气象局：2005年，首次引入了一个短期区域集合预报系统，以改善对可能影响英国的高影响天气预报水平<sup>[26]</sup>。该系统被命名为英国气象局全球和区域集合预报系统MOGREPS（Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System），它主要用于帮助预报风暴的快速发展、风、雨、雪和雾等天气现

象。它包括一个覆盖北大西洋和欧洲的区域集合预报系统（称为MOGREPS-R）和一个为其提供侧边界条件的全球集合预报系统，称为MOGREPS-G。2012年7月，英国气象局推出了一个对流允许集合预报系统，其网格间距为2.2 km，嵌套在18 km网格的MOGRES-R系统中，预报长度为36 h，由一个控制预报和11个扰动成员组成，称为MOGRES-UK。2012年，它被首先用于为伦敦奥运会提供概率预报<sup>[27]</sup>。2013年1月，MOGREPS-G系统水平分辨率从60 km升级到33 km，这使得英国MOGRES-UK对流允许集合预报系统能够直接嵌套在MOGREPS-G全球集合预报系统中，而不需要中间的区域集合预报系统MOGRES-R<sup>[28]</sup>。截至2018年11月，该系统水平格距为2.2 km，垂直层达到70层，逐小时预报，预报长度54 h，集合成员24个。2019年3月，英国气象局对其业务运行的对流尺度集合预报系统MOGREPS-UK进行了升级，它将每6 h进行一次预报，更新为每1 h进行一次预报，预报长度增加到120 h。

德国：基于二十面体非静力模式ICON（Icosahedral Nonhydrostatic），在ICON-EPS全球集合预报系统（40 km）与ICON-EU-EPS区域集合预报系统（20 km）双向嵌套基础上，于2012年5月实施了一个2.8 km的对流允许尺度集合预报系统COSMO-DE-EPS，它嵌套在区域集合预报系统内，初始条件扰动来自区域集合预报的LETKF系统，由20个成员组成，每天运行8次，持续到21 h<sup>[29]</sup>。截至2018年11月，水平分辨率升级到2.2 km，预报长度增加到27 h。

法国气象局：基于2.5 km AROME模式，开发了一个对流允许尺度集合预报系统，称为PEARO（Prévision d'Ensemble AROME）系统，它嵌套在ARPEGE-EPS中，即法国全球短期集合预报系统PEARP（Prévision d'Ensemble ARPEGE）。PEARO系统2016年已经完成试验运行，并且自2016年10月中旬以来，每天业务运行两次，共有12个集合成员，其初始扰动来自于Arome-EDA系统。截至2018年11月，每天业务运行4次，其中在03时/15时起报的任务预报长度45 h，在09时/21时起报的任务预报长度为51 h。

奥地利：2007年3月，在ALADIN国际合作和中欧有限区域建模区域合作RC LACE（Regional Cooperation for Limited-Area modelling in Central Europe）框架内开发了中欧有限区域集合预报系统ALADIN-LAEF（Aire Limit'ee Adaptation Dynamique D'veloppement InterNational-Limited-Area Ensemble Forecasting），并正式投入准业务运行。它的主要特

征是通过ECMWF全球集合预报动力降尺度。2009年，ALADIN-LAEF系统升级多种处理预报不确定性的方法，以提高预报质量<sup>[30]</sup>。其初始扰动是通过混合方法<sup>[31]</sup>将ECMWF奇异向量产生的大尺度扰动与用ALADIN模式培育产生的小尺度扰动相结合得到，水平分辨率为18 km，垂直方向37层，预报长度54 h，由18个成员构成。截至2018年11月，水平分辨率升至11 km，垂直方向45层，预报长度延长至72 h。

当前甚高分辨率集合预报的研究和开发正在欧洲许多国家进行，已经成为集合预报研究的前沿与热点。作者认为，它应该成为除全球中期集合预报研究外的另一个焦点。欧洲其余国家的现状不再详述，其相关参数见表2所示。

总体而言，与欧洲全球集合预报相比，有限区域高分辨率集合预报有如下特点：1）集合预报系统的水平分辨率较高，除挪威（12 km）、奥地利（11 km）、匈牙利（8 km）和意大利（7 km）之外，其余国家均达到了5 km以下，大部分集中在2~3 km。2）有限区域高分辨率集合预报成员个数一般比全球中期集合预报的成员个数少。3）边界更新时间间隔均低于6 h，大部分达到逐3 h或逐1 h更新边界条件。4）集合预报的时间长度均比全球中期集合预报长度小，一般不超过72 h。5）初始扰动生成方面，挪威采用集合资料同化扰动加ECMWF全球集合预报的初始奇异向量扰动相结合，西班牙采用多个全球模式降尺度，奥地利采用奇异向量与区域模式增长模培育矢量相混合并结合陆面过程集合分析，匈牙利采用PEARP全球集合预报系统的奇异向量，英国采用高分辨率分析值叠加降尺度扰动，瑞士和意大利采用LETKF算法生成初始扰动，德国采用区域集合预报LETKF系统扰动得到初值，波兰通过时间滞后的确定性预报扰动土壤参数得到。不难发现，在高分辨率集合预报理论方面，初始扰动存在与全球中期集合预报初值理论切割的倾向，但目前还没出现一种公认的专门适合对流可分辨尺度集合预报的初值集合预报理论，因此各个国家在结合自身业务实际的基础上，集合预报理论与形式多种多样。

### 3 仍存在问题、挑战及未来方向

集合预报是欧洲业务预报的主流。当前它不仅广泛用于气象部门，还应用于水文学领域、能源部门和航空部门<sup>[32-33]</sup>等。截至目前，欧洲不但致力于全球集合预报的理论与应用不断向下迭代，其有限区域模式高分辨集合预报的研究与实践也在近十几年取得了丰硕的成果。本文从业务配置的角度简要探讨了欧洲业

表2 截至2018年11月欧洲运行的有限区域高分辨集合预报系统概况  
Table 2 Overview of operational limited area high resolution ensemble forecast systems in Europe as of November 2018

| 国家                   | 模式                                             | 格距/km                      | 格点数                    | 垂直<br>层数 | 起报<br>时间                      | 同化系统<br>与扰动方法                                                                                                                                                                                                                                          | 边界条件                        | 边界<br>更新 | 集合成员<br>个数                 |
|----------------------|------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|----------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------|----------------------------|
| 芬兰、挪威与瑞典<br>气象业务协作中心 | HARMONIE-AROME                                 | 2.5                        | 900 × 960              | 65       | 00/06/12/18                   | 3D-VAR                                                                                                                                                                                                                                                 | IFS HRES                    | 1 h      | 1+10                       |
| 丹麦                   | HIRLAM-E05                                     | 5                          | 496 × 372              | 40       | 00/06/12/18                   | SLAF, stoch. Physics;<br>2 physics packages                                                                                                                                                                                                            | ECMWF                       | 3 h      | 25                         |
| 荷兰                   | HARMONIE-AROME                                 | 2.5                        | 800 × 800              | 65       | 00/03/06/09<br>/12/15/18/21   | 3D-VAR                                                                                                                                                                                                                                                 | IFS HRES                    | 1 h      | 1+10                       |
| 挪威                   | LAMEPS / HIRLAM                                | 12                         | 232 × 371              | 60       | 06/18                         | EDA perturbations +<br>initial ECMWF EPS SVs                                                                                                                                                                                                           | ECMWF EPS                   | 3 h      | 20 + 1                     |
| 西班牙                  | Harmonie: AROME and ALARO<br>WRF: ARW and NMMB | 2.5                        | 576 × 480              | 65/72    | 00/12                         | Downscaling of ECMWF<br>GFS, CMC, JMA, MF                                                                                                                                                                                                              | ECMWF, GFS,<br>CMC, JMA, MF | 3 h/1 h  | 20                         |
| 奥地利                  | ALADIN-LAEF                                    | 11                         | 600 × 500              | 45       | 00/12                         | Blending ECMWF SV<br>and ALADIN Breeding<br>Ensemble Land Surface Analysis                                                                                                                                                                             | ECMWF EPS                   | 6 h      | 16+1                       |
| 法国                   | PEARP<br>(ARPEGE EPS)                          | 10- France<br>60- Antipode | global                 | 90       | 00/12<br>06<br>18             | SV initial perturbation;<br>coupling with global ensemble D.A.                                                                                                                                                                                         | /                           | /        | 35                         |
|                      | PEARO<br>(AROME EPS)                           | 2.5                        | 750 × 800              | 90       | 03/15<br>09/21                | Initial conditions perturbations from an Arome-EDA, added to the<br>interpolated Arome-1.3km atmospheric analysis.<br>Perturbation of some parameters of the Arome surface analysis.<br>Stochastic perturbations of physical tendencies (SPPT scheme). | PEARP                       | 1 h      | 12                         |
| 匈牙利                  | ALARO                                          | 8                          | 349 × 309              | 49       | 18                            | SV initial perturbation<br>in PEARP                                                                                                                                                                                                                    | PEARP                       | 6h       | 10+1                       |
| 德国                   | ICON-EPS<br>ICON-EU-EPS                        | 40<br>20                   | global<br>2-way nest   | 90<br>60 | 00/12<br>06/18<br>03/09/15/21 | IC from global LETKF<br>perturbed SST                                                                                                                                                                                                                  | /                           | /        | 40                         |
| 意大利                  | COSMO-DE-EPS<br>COSMO-ME EPS                   | 2.2<br>7                   | 651 × 716<br>779 × 401 | 65<br>45 | 00/03/06/.../18/21<br>00/12   | IC from regional LETKF<br>LETKF                                                                                                                                                                                                                        | ICON-EPS<br>ECMWF EPS       | 1h<br>3h | 20<br>40                   |
| 波兰                   | COSMOQPL 2.8)                                  | 2.8                        | 380 × 405              | 50       | 00/06/12/18                   | IC from time-lagged deterministic COSMO PL7 perturbed by soil<br>data parameters                                                                                                                                                                       | time-lagged<br>COSMO PL7    | 1h       | 20                         |
| 瑞士                   | COSMO-E                                        | 2.2                        | 582 × 390              | 60       | 00/12                         | LETKF                                                                                                                                                                                                                                                  | ECMWF/IFS-ENS               | 3h       | 20+1                       |
| 英国                   | MOGREPS-G<br>MOGREPS-UK                        | 20<br>2.2                  | global<br>740 × 752    | 70<br>70 | 00/06/12/18<br>03/09/15/21    | ETKF<br>UKV analysis with downscaled perturbations                                                                                                                                                                                                     | MOGREPS-G                   | 1h       | 36 (lagged)<br>24 (lagged) |

务集合预报的发展,旨在为集合预报理论探索和业务实践提供参考与借鉴。

总体而言,对于欧洲全球业务集合预报的发展,存在下面三个趋势<sup>[34]</sup>:

1) 欧洲全球集合预报逐步走向地球系统建模与同化。例如,全球集合预报系统在升级过程中考虑了与海洋模式和海冰模式耦合以及耦合资料同化,集合预报效果得到显著改进。这些升级表明,通过增加相关的地球系统相互作用过程,可以进一步提高现有预报的质量,还可以进一步延伸动力预报的预报技巧天数。

2) ECMWF致力于在制作分析值、中期集合预报、次季节尺度集合预报和季节尺度集合预报业务的设计与配置升级过程中走向无缝连接。这种趋势一方面因科学发展推动,另一方面因为技术要求推动。从科学角度看,有证据表明与延伸期预报相关的过程也与短期预报相关。例如,在ECMWF集合预报中加入了海洋动力模式,使用海洋—陆地—大气耦合模型来计算季节和月时间尺度,发现它有助于提高集合预报的可靠性和准确性,ECMWF自然也将它引入到中期集合预报中。从技术角度来看,从第0天到第1年,在分析和预报阶段使用相同模式的开展集合预报,便于维护和业务升级。

3) 全球业务集合预报向更高分辨率方向移动。这个问题源于需要更好解决较小尺度的天气预报问题以及相邻尺度之间的相互作用,其前提是增加计算资源。2016年ECMWF通过十年战略设定了许多宏伟目标,其中包括到2025年引入一个全球5 km的集合预报。并且ECMWF最终将丢弃高分辨确定性预报,而只专注于达到1 km左右的高分辨集合预报<sup>[34]</sup>,目前法国气象局也采用了这一战略。

上述关于欧洲全球集合预报发展的三个方面尽管路线清晰,但目前的发展水平仅仅才是开始,还存在许多尚未解决的科学与工程问题,需要大气科学及相关交叉学科厚重的基础研究支撑。

对于有限区域甚高分辨率集合预报,目前欧洲各个国家所建设的高分辨率集合预报业务相比ECMWF中期集合预报均有相当的优势,但理论方面仍未形成有效突破,部分做法仍未完全摆脱中期集合预报的理论框架。当前SRNWP-EPS项目第二阶段任务业已完成,主要解决土壤模型和边界层方案的不确定性,预计将开展第三阶段工作,主要目标可能致力于对流允许或对流可分辨尺度集合预报的理论突破与业务应用,值得密切关注。

需要说明的是,本文并不是一个关于欧洲业务集合预报进展及应用研究的完全性综述。许多十分重要的方面,如欧洲各个国家甚高分辨或对流允许/可分辨尺度集合预报沿革和集合预报水平、季节内和季节尺度集合预报进展,以及它们与ECMWF全球集合预报对比等均未有涉及。我们相信,集合预报未来将绽放更多的光彩。

## 参考文献

- [1] Alley R B, Emanuel K A, Zhang F. Advances in weather prediction. Science, 2019, 363(6425): 342-344.
- [2] Lorenz E N. A study of the predict ability of a 28-variable atmospheric model. Tellus, 1965, 17(3): 321-333.
- [3] Buizza R, Palmer T N. The singular vector structure of the atmospheric global circulation. Journal of the Atmospheric Sciences, 1995, 52(9): 1434-1456.
- [4] Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The new ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122(529): 73-119.
- [5] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(12): 2317-2330.
- [6] Tracton M S, Kalnay. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: practical aspects. Weather and Forecasting, 1993, 8(3):379-398.
- [7] 李泽椿, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. 应用气象学报, 2002, 13(1): 1-15.
- [8] 杜钧. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [9] 孔凡铀. 雷暴尺度天气集合数值预报研究. 气象科技进展, 2018, 8(3): 53-60.
- [10] 陈静, 陈德辉, 颜宏. 集合数值预报发展与研究进展. 应用气象学报, 2002, 13(4): 497-507.
- [11] 王晨稀. 热带气旋集合预报研究进展. 热带气象学报, 2013, 29(4): 698-704.
- [12] 段明铿, 王盘兴. 集合预报方法研究及应用进展综述. 南京气象学院学报, 2004, 27(2): 279-288.
- [13] 麻巨慧, 朱跃进, 王盘兴, 等. NCEP ECMWF及CMC全球集合预报业务系统发展综述. 大气科学学报, 2011, 34(3): 370-380.
- [14] 张涵斌, 智协飞, 陈静, 等. 区域集合预报扰动方法研究进展综述. 大气科学学报, 2017, 40(2): 145-157.
- [15] Barkmeijer J, Buizza R, Palmer T N. 3D-Var Hessain singular vectors and their potential use in ECMWF ensemble prediction system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125(558): 2333-2351.
- [16] Buizza R, Miller M, Palmer T N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125: 2887-2908 (also available as ECMWF Technical Memo. No. 279).
- [17] Ehrendorfer M, Beck A. Singular vector-based normal sampling in ensemble prediction. ECMWF Technical Memorandum, 2003(416).
- [18] Buizza R, Bidlot J, Wedi N, et al. The new ECMWF VAREPS (variable resolution ensemble prediction system). Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2007, 133(624): 681-695.
- [19] Vitart F, Buizza R, Balmaseda M A, et al. The new VarEPS-monthly forecasting system: a first step towards seamless prediction. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008, 134(636): 1789-1799.
- [20] Berner J, Shutts G J, Leutbecher M, et al. A Spectral Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme and Its Impact on Flow-Dependent Predictability in the ECMWF Ensemble Prediction System. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2009, 66(3): 603-626.
- [21] Buizza R, Richardson D. 25 years of ensemble prediction at ECMWF. ECMWF Newsletter, 2017, 153: 20-31.

- [22] Buizza R, Leutbecher M, Isaksen L. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2008, 134(637): 2051-2066.
- [23] Houtekamer P L, Lefraive L, Derome J, et al. A system simulation approach to ensemble prediction. *Monthly Weather Review*, 1996, 124: 1225-1242.
- [24] Molteni F, Stockdale T, Balmaseda M, et al. The new ECMWF seasonal forecast system (System 4). ECMWF Research Department Technical Memorandum, 2011(656). <http://old.ecmwf.int/publications/> [Accessed 1 June 2011].
- [25] Heizenreder D, Trepte S, Denhard M. SRNWP-PEPS: a regional multi-model ensemble in Europe. *The European Forecaster, Newsletter of the WGCEF*, 2006(11).
- [26] Bowler N, Arribas A, Mylne K R, et al. The MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2008, 134(632):703-722
- [27] Golding B, Ballard SP, Mylne K, et al. Forecasting capabilities for the London 2012 Olympics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(6): 883-896.
- [28] Tennant W. Improving initial condition perturbations for MOGREPS-UK. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(691): 2324-2336.
- [29] Bouallègue Z B, Theis S E, Gebhardt C. Enhancing COSMO-DE ensemble forecasts by inexpensive techniques. *Meteorologische Zeitschrift*, 2013, 22(1): 49-59.
- [30] Wang Y, Bellus M, Wittmann C, et al. The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(655): 483-502. DOI:10.1002/qj.751
- [31] Brožková R, Klaric D, Ivatek-Sahdan S, et al. DFI Blending, an alternative tool for preparation of the initial conditions for LAM. PWRP Report Series No. 31 (CAS/JSCWGNE Report), WMO-TD, 2001, 1064: 1-7.
- [32] Verlinden K L, Bright D R. Using the second-generation GEFS reforecasts to predict ceiling, visibility, and aviation flight category. *Weather and Forecasting*, 2017, 32:1765-1780. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0211.1>.
- [33] Osinski R, Bouttier F. Short-range probabilistic forecasting of convective risks for aviation based on a lagged-average-forecast ensemble approach. *Meteorological Applications*, 2018, 25: 105-118.
- [34] Palmer T. The ECMWF Ensemble Prediction System: Looking Back (more than) 25 Years and Projecting Forward 25 Years. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018.

## (上接18页)

- 特征. *大气科学*, 2018, 42(2): 367-382.
- [19] Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al. A comparison of ETKF and downscaling in a regional ensemble prediction system. *Atmosphere*, 2015, 6(3): 341-360.
- [20] Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al. Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(8): 1143-1155.
- [21] 陈静, 李晓莉, 李红祺, 等. GRAPES\_REPS v3.0 区域集合预报系统业务化技术报告. 北京: 中国气象局数值预报中心, 2019.
- [22] 马旭林, 薛纪善, 陆维松. GRAPES全球集合预报的集合卡尔曼变换初始扰动方案初步研究. *气象学报*, 2008, 66(4): 526-536.
- [23] 刘永柱, 杨学胜, 王洪庆. GRAPES奇异向量研究及其在暴雨集合预报中的应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(2): 271-277.
- [24] 刘永柱, 沈学顺, 李晓莉. 基于总能量模的GRAPES全球模式奇异向量扰动研究. *气象学报*, 2013, 71(3): 517-526.
- [25] 李晓莉, 刘永柱. GRAPES全球奇异向量方法改进及试验分析. *气象学报*, 2019, 77(3): 552-562.
- [26] 李晓莉, 陈静, 刘永柱, 等. GRAPES全球集合预报初始条件及模式物理过程不确定性方法研究. *大气科学学报*, 2019, 42(3): 348-359.
- [27] 霍振华, 陈静, 李晓莉, 等. GRAPES业务全球集合控制预报初值的动力升尺度方法. *气象科技*, 2018, 46(4): 707-717.
- [28] 陈静, 李晓莉, 刘永柱, 等. GRAPES\_GEPS v1.0 全球集合预报系统业务化技术报告. 北京: 中国气象局数值预报中心, 2018.
- [29] 袁月, 李晓莉, 陈静, 等. GRAPES 区域集合预报系统模式不确定性的随机扰动技术研究. *气象*, 2016, 42(10): 1161-1175.
- [30] 彭飞, 李晓莉, 陈静, 等. GRAPES全球集合预报系统模式扰动随机动能补偿方法初探. *气象学报*, 2019, 77(2): 180-195.
- [31] 徐致真, 陈静, 王勇, 等. 中尺度降水集合预报随机参数扰动方法敏感性试验. *气象学报*, 2019, 77(5): 849-868.
- [32] Molteni F, Buizza R, Palmer TN, et al. The new ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1996, 122(529): 73-119.
- [33] 霍振华, 刘永柱, 陈静, 等. 热带气旋奇异向量在GRAPES全球集合预报中的初步应用. *气象学报*, 2020, doi:10.11676/qxxb2020.006.
- [34] Wang X, Bishop C H. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60: 1140-1158.
- [35] Denis B, Côté J, Laprise R. Spectral decomposition of two-dimensional atmospheric fields on limited-area domains using discrete cosine transform (DCT). *Monthly Weather Review*, 2002, 130: 1812-1829.
- [36] 吴政秋, 张进, 陈静, 等. GRAPES区域集合预报条件性台风涡旋重定位方法研究. *气象学报*, 2020, doi:10.11676/qxxb2020.027.
- [37] Kurihara Y, Bender M A, et al. Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Monthly Weather Review*, 1995, 123: 2791-2801.
- [38] Palmer T, Shutts G, Hagedorn R, et al. 2005. Representing model uncertainty in weather and climate prediction. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33: 163-193.
- [39] Buizza R, Milleer M, Palmer T N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125(560): 2887-2908.
- [40] Shutts G. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(612): 3079-3102.
- [41] Wang J Z, Chen J, Du J, et al. Sensitivity of ensemble forecast verification to model bias. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(3): 781-796.
- [42] XiaY, Chen J, Du J, et al. A unified scheme of stochastic physics and bias correction in an ensemble model to reduce both random and systematic errors. *Weather and Forecasting*, 2019, 34: 1675-1690.
- [43] Chen J, Wang J Z, Du J, et al. Forecast bias correction through model integration: a dynamical wholesale approach. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, doi:10.1002/qj.3730.

# 集合预报统计学后处理技术研究进展

苏翔<sup>1, 2</sup> 袁慧玲<sup>3</sup>

(1 江苏省气象台, 南京 210008; 2 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210009;

3 南京大学大气科学学院中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 近年来, 随着集合预报的广泛应用, 大量新颖的集合预报统计学后处理方法层出不穷, 因此有必要对其进行系统地回顾。首先, 对单变量集合预报统计后处理方法进行分类介绍, 包括基于特定数学分布的参数化方法: 逻辑回归、非均匀回归、贝叶斯模型平均、集合敷料法, 以及灵活的非参数化方法: 排序直方图订正、可靠性曲线订正、衰减平均偏差订正、分位数映射、分位数回归、概率匹配、频率匹配、最优百分位、最优评分法、逐成员订正、相似法、邻域法、基于对象的概率预报方法和虚拟降水法。其次, 拓展到须考虑变量依赖性结构的多变量集合预报统计后处理方法, 包括参数化的连接方法, 以及非参数化的集合连接耦合和Schaaake洗牌法。再次, 介绍多模式集合和机器学习方法。最后, 总结并讨论了常用的集合预报统计后处理方法使用中需要注意的问题。

**关键词:** 集合预报, 统计学后处理, 预报订正

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.005

## The Research Progress of Ensemble Statistical Postprocessing Methods

Su Xiang<sup>1, 2</sup>, Yuan Huiling<sup>3</sup>

(1 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210009

3 School of Atmospheric Sciences and Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023)

**Abstract:** With the extensive use of ensemble forecasts, various novel ensemble statistical postprocessing methods have emerged in recent years. This review tries to summarize these methods comprehensively, including univariate and multivariate ensemble statistical postprocessing methods. The univariate methods can be classified as parametric methods based on certain mathematical distributions (such as logistic regression, nonhomogeneous regression, Bayesian model averaging, and ensemble dressing) and flexible nonparametric methods. Many techniques belong to the nonparametric type, including rank histogram calibration, reliability curve calibration, decaying average bias correction, quantile mapping, quantile regression, probability matching, frequency matching, optimal percentile, optimal score, member-by-member calibration, analog, neighborhood, object-based probabilistic forecast and pseudo-precipitation methods. As an extension of univariate methods, multivariate ensemble statistical postprocessing methods need to construct multivariate dependence structure, including the parametric copula, the nonparametric ensemble copula coupling, and Schaake shuffle methods. Then, multimodel ensemble and machine learning methods are introduced. In addition, limits and validity of the widely used ensemble postprocessing methods are discussed.

**Keywords:** ensemble forecast, statistical postprocessing, forecast calibration

## 0 引言

集合预报是表达预报不确定性的重要手段<sup>[1-2]</sup>, 在天气预报、气候预测和水文预报等方面具有重要应用<sup>[3-6]</sup>。大量研究表明, 集合预报相比于单一的确

定性预报具有更高的经济价值<sup>[7-10]</sup>。然而集合预报系统由于同化方案、初值扰动、模式设计、集合成员数等方面的不完美, 常存在一阶系统偏差和二阶离散度偏差<sup>[11-14]</sup>。因此, 模式原始输出的集合预报需要进行统计学后处理, 纠正系统偏差、调整离散度, 以提升集合预报的可靠性(reliability)和准确率(accuracy)。

数值预报的统计学后处理方法已有较长的研究历史。例如早期的完美预报法(perfect prog, PP)<sup>[15]</sup>和后来的模式输出统计法(model output statistics,

收稿日期: 2019年8月6日; 修回日期: 2019年10月9日  
第一作者: 苏翔(1988—), Email: suxiang01@163.com  
通信作者: 袁慧玲(1975—), Email: yuanhl@nju.edu.cn  
资助信息: 国家自然科学基金(41805078, 41675109); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206005)

MOS)<sup>[16]</sup>，都是针对单一确定性的原始预报，纠正一阶系统偏差，输出单一的确定性预报。此外，集合预报的统计学后处理还可根据需要进行调整二阶离散度偏差，产生连续的概率分布或者代表连续分布抽样的离散集合成员，方法更加新颖和复杂。由于数值模式版本的不断更新，集合预报的系统偏差可能会发生改变。回算预报（reforecast）<sup>[17-18]</sup>数据采用与实时模式相同的模式版本对过去几十年的预报进行回算，可为集合预报统计学后处理提供误差特征一致性较好的大样本训练数据。

毕宝贵等<sup>[19]</sup>和代刊等<sup>[20]</sup>系统介绍了定量降水集合预报的统计学后处理技术；Li等<sup>[21]</sup>详细介绍了水文集合预报中的统计学后处理方法；Duan等<sup>[22]</sup>在最新的水文集合预报的参考手册中回顾了气象集合预报和针对水文应用的常用集合天气预报后处理技术，以及水文集合预报的后处理方法。本文将从更宽的视角整理和归纳现有重要的集合预报统计学后处理技术方法，首先对单变量集合预报统计后处理方法进行全面系统的整理归纳，然后拓展到须考虑变量依赖性结构的多变量集合预报统计后处理方法，之后再介绍多模式集合预报和机器学习方法，最后是全文总结，并讨论了常用的集合预报统计后处理方法以及需要注意的问题。

## 1 单变量集合预报统计后处理

表1和表2分别整理和归纳了部分参数化和非参数化的单变量集合预报统计后处理方法。下面选取常用的单变量集合预报的统计后处理方法进行介绍。

### 1.1 逻辑回归

逻辑回归（logistic regression, LR）是一种广义线性回归模型，常用于二分类预测问题。Hamill等<sup>[23]</sup>利用历史回算数据集将LR方法应用于地面气温和降水的中期集合概率预报中。由于LR仅能得到有限个数阈值的概率预报而非完整的概率分布，Wilks<sup>[24]</sup>将因变量的阈值引入回归方程中作为自变量来获得完整的概率分布预报，提出扩展逻辑回归（extended logistic regression, ExLR）。Ben Bouallègue<sup>[25]</sup>认为ExLR中固定模型预报因子系数的做法过于刻板，限制了模型的灵活性，因此引入交互项对ExLR进行修改，提出了第二代扩展逻辑回归（ExLR2）。此外，还有有序逻辑回归（ordered LR）和删失逻辑回归（censored LR）<sup>[26]</sup>等类似的集合预报后处理方法。

### 1.2 非均匀回归

非均匀回归（nonhomogeneous regression, NR）也叫集合模式输出统计（ensemble model output statistics, EMOS）方法，预先假定预报物理量服从某

种数学分布，然后建立集合预报自变量与分布之间的函数关系，进而求解连续概率预报分布函数。NR模型的概率分布函数可根据集合预报的离散度大小反映预报的不确定性。

#### 1.2.1 高斯分布的非均匀回归

Gneiting等<sup>[27]</sup>提出了应用于高斯分布型物理量（温度或气压等）的非均匀高斯回归（nonhomogeneous Gaussian regression, NGR）方法。Messner等<sup>[28]</sup>通过估计回归系数的方法自动选择合适的输入变量，建立了最高和最低温度的集合预报NGR模型。Sansom等<sup>[29]</sup>在全球气候变暖背景下，考虑到系统偏差随时间的变化，加入时间变化项，将NGR集合预报统计后处理拓展到季节预报中。Möller等<sup>[30]</sup>在NGR模型中考虑误差的自相关性，提出自回归集合模式输出统计方法（Autoregressive EMOS, AR-EMOS），改善了原始NGR模型欠离散的问题。Siegert等<sup>[31]</sup>使用bootstrap方法（自展法，即一种有放回的增广统计样本的抽样法）考虑NGR模型参数估计的不确定性。

#### 1.2.2 非高斯分布的非均匀回归

一些非负物理量（如风速、降水量等）不满足高斯分布，如果在零值处的连续性较好（如风速），可通过合适的数学变换（如幂变换或对数变换等）将物理量先转换为准高斯分布，再使用NGR模型进行统计后处理；若非负物理量在零值处具有显著的不连续性，例如降水量，有时其概率分布在零值处呈现明显的“概率长钉”，会导致准高斯变换以及常规的连续分布函数不适用，需要结合“截断”（truncation）或“删失”（censoring）技术进行NR建模。

对于风速集合预报，Thorarinsdottir等<sup>[32]</sup>采用零值截断的正态分布（truncated normal, TN）模型，Lerch等<sup>[33]</sup>对TN分布模型、广义极值（generalized extreme value, GEV）分布模型以及TN-GEV转换混合模型进行了对比。Baran等<sup>[34]</sup>提出了对数正态（log-normal, LN）分布模型以及TN-LN转换混合模型，并与TN分布模型、GEV分布模型以及TN-GEV转换混合模型进行对比。之后，Baran等<sup>[35]</sup>又进一步提出了TN-LN加权混合模型。

对于降水集合预报，Bentzien和Friederichs<sup>[36]</sup>使用混合模型进行模拟，零降水概率采用LR分布，非零降水分布函数分别采用LN、gamma和逆高斯分布，并提出对于极端降水采用广义帕雷托分布（generalized Pareto distribution, GPD）可以更好地拟合高值降水的尾端部分。此外，降水集合预报的NR模型分布还包括左删失GEV分布<sup>[37]</sup>和删失偏移gamma（censored

表1 单变量参数化集合预报统计后处理技术列表

Table 1 List of univariate parametric ensemble statistical postprocessing methods

| 类别                                 | 方法                            | 参考文献                                                                                                  |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 逻辑回归                               | 逻辑回归 (LR)                     | Hamill等, 2004 <sup>[23]</sup>                                                                         |
|                                    | 扩展逻辑回归 (ExLR)                 | Wilks, 2009 <sup>[24]</sup>                                                                           |
|                                    | 第二代扩展逻辑回归 (ExLR2)             | Ben Bouallègue, 2013 <sup>[25]</sup>                                                                  |
|                                    | 有序逻辑回归 (ordered LR)           | Messner等, 2014 <sup>[26]</sup>                                                                        |
|                                    | 删失逻辑回归 (censored LR)          |                                                                                                       |
| 非均匀回归 (NR)<br>或<br>集合模式输出统计 (EMOS) | 高斯分布的非均匀回归 (NGR)              | Gneiting等, 2005 <sup>[27]</sup>                                                                       |
|                                    | 自回归集合模式输出统计 (AR-EMOS)         | Möller等, 2016 <sup>[30]</sup>                                                                         |
|                                    | TN分布的NR                       | Thorarinsdottir等, 2010 <sup>[32]</sup>                                                                |
|                                    | TN-GEV转换混合NR                  | Lerch等, 2013 <sup>[33]</sup>                                                                          |
|                                    | TN-LN转换混合NR                   | Baran等, 2015 <sup>[34]</sup>                                                                          |
|                                    | TN-LN加权混合NR                   | Baran等, 2016 <sup>[35]</sup>                                                                          |
|                                    | 左删失GEV分布的NR                   | Scheuerer, 2014 <sup>[37]</sup>                                                                       |
|                                    | 删失偏移gamma分布的NR (CSG NR)       | Scheuerer等, 2015 <sup>[38]</sup><br>Baran等, 2016 <sup>[39]</sup>                                      |
|                                    | 标准化距平模式输出统计法 (SAMOS)          | Dabernig等, 2017 <sup>[40,44]</sup><br>Stauffer等, 2017 <sup>[43]</sup>                                 |
|                                    | 高斯分布的BMA                      | Raftery等, 2005 <sup>[45]</sup>                                                                        |
| 贝叶斯模型平均法 (BMA)                     | gamma分布的BMA                   | Slougher等, 2007 <sup>[48]</sup><br>Schmeits等, 2010 <sup>[49]</sup><br>Slougher等, 2010 <sup>[51]</sup> |
|                                    | Von Mises分布的BMA               | Bao等, 2010 <sup>[52]</sup>                                                                            |
|                                    | $\beta$ 分布的BMA                | Chmieleck等, 2011 <sup>[53]</sup>                                                                      |
|                                    | TN分布的BMA                      | Baran, 2014 <sup>[54]</sup>                                                                           |
|                                    | 地理统计模型平均 (GMA)                | Kleiber等, 2011 <sup>[47,50]</sup>                                                                     |
| 集合敷料法                              | 最优成员集合敷料法                     | Roulston等, 2003 <sup>[55]</sup>                                                                       |
|                                    | 二阶矩约束的最优成员集合敷料法               | Wang等, 2005 <sup>[56]</sup>                                                                           |
|                                    | 基于 $\beta$ 分布的不同核密度、不等权重集合敷料法 | Fortin等, 2006 <sup>[57]</sup>                                                                         |
|                                    | 仿射核密度敷料法 (AKD)                | Bröcker等, 2008 <sup>[58]</sup>                                                                        |
|                                    | 集合核密度模式输出统计法 (EKDMOS)         | Glahn等, 2009 <sup>[59]</sup><br>Veenhuis, 2013 <sup>[60]</sup>                                        |

表2 单变量非参数化集合预报统计后处理技术列表

Table 2 List of univariate nonparametric ensemble statistical postprocessing methods

| 方法                        | 参考文献                                                                                                          |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 排序直方图订正                   | Hamill等, 1997 <sup>[61]</sup>                                                                                 |
| 可靠性曲线订正                   | Flowerdew, 2014 <sup>[62]</sup>                                                                               |
| 杜一周排序法                    | Du等, 2011 <sup>[63]</sup>                                                                                     |
| 衰减平均偏差订正                  | Cui等, 2012 <sup>[64]</sup>                                                                                    |
| 概率匹配 (PM) 和频率匹配法 (FMM)    | Ebert, 2001 <sup>[65]</sup> ; 李俊等, 2014, 2015 <sup>[71,72]</sup><br>Zhu等, 2015 <sup>[73]</sup>                |
| 分位数映射 (QM)                | Voisin等, 2010 <sup>[78]</sup> ; Scheuerer等, 2015 <sup>[38]</sup>                                              |
| 分位数回归 (QR)                | Bremnes, 2004 <sup>[83,85]</sup>                                                                              |
| 最优百分位和最优评分方法              | 代刊等, 2016, 2018 <sup>[20,88]</sup> ; 吴启树等, 2017 <sup>[89]</sup>                                               |
| 方差膨胀法 (INFL)              | Wood等, 2008 <sup>[91]</sup>                                                                                   |
| 平移拉伸法 (shift-and-stretch) | Eckel等, 2012 <sup>[94]</sup>                                                                                  |
| 变量误差回归 (EVMOS)            | Vannitsem, 2009 <sup>[95]</sup>                                                                               |
| 相似法 (analog)              | Hamill等, 2006 <sup>[98]</sup> ; Du等, 2008 <sup>[108]</sup><br>Delle Monache等, 2011, 2013 <sup>[100,101]</sup> |
| 邻域法                       | Schwartz等, 2010 <sup>[113]</sup> ; Ben Bouallègue等, 2014 <sup>[117]</sup><br>Blake等, 2018 <sup>[114]</sup>    |
| 基于对象的概率预报方法               | Johnson等, 2012 <sup>[120]</sup>                                                                               |
| 虚拟降水法                     | Yuan等, 2019 <sup>[121]</sup>                                                                                  |

shifted gamma, CSG) 分布<sup>[38-39]</sup>等。

### 1.2.3 基于标准化距平的非均匀回归

Dabernig等<sup>[40]</sup>研究发现: 如果将不同时间不同站点的变量做标准化距平处理, 可去除误差的季节和地域性差异, 从而可以用所有样本建立统一的模型; 提出了基于标准化距平的非均匀回归方法, 也叫“标准化距平模式输出统计法”(standardized anomaly model output statistics, SAMOS)。SAMOS的优点在于全场只需建一个模型, 可用于无观测区域的预报订正, 且不需要频繁滚动更新模型参数。而从变量标准化距平还原到变量本身, 还需要计算气候背景场的均值和标准差。Dabernig等<sup>[40]</sup>采用基于位置、尺度和形状的广义可加模型(generalized additive model for location, scale and shape, GAMLSS)<sup>[41-42]</sup>对所有站点同时拟合气候均值和标准差。Stauffer等<sup>[43]</sup>进一步结合欧洲中期天气预报中心(ECMWF)回算预报数据, 使用左删失幂变换的逻辑分布将SAMOS应用于复杂地形条件下的降水集合预报订正。Dabernig等<sup>[44]</sup>也采用SAMOS方法对同一起报时间不同预报时效的温度集合预报统一建模, 大大加快了模型的计算速度同时获得了与传统方法相当的预报技巧。

### 1.3 贝叶斯模型平均

贝叶斯模型平均(Bayesian model averaging, BMA)是多个概率分布的加权组合, 每个概率分布都以偏差订正后的集合成员为中心。

#### 1.3.1 高斯分布的贝叶斯模型平均

Raftery等<sup>[45]</sup>最早将BMA方法用于温度和海平面气压这类高斯分布型变量的统计后处理中。Wilson等<sup>[46]</sup>应用BMA来订正加拿大集合预报系统的温度预报。Kleiber等<sup>[47]</sup>将BMA拓展为空间可变模型参数并用于温度集合预报的后处理, 提出了地理统计模型平均(geostatistical model averaging, GMA)方法。

#### 1.3.2 非高斯分布的贝叶斯模型平均

Sloughter等<sup>[48]</sup>采用混合分布将高斯分布型变量的BMA模型拓展到降水变量中, 结合幂变换, 对零降水部分采用LR模型, 非零降水部分采用gamma分布构造降水的分布函数, 并通过gamma分布的均值和方差搭建分布参数与预报之间的关系。Schmeits等<sup>[49]</sup>考虑集合成员的可交换性, 将零降水概率中的成员系数设为相等, 并将gamma分布方差中的系数也设为不随集合成员变化。Kleiber等<sup>[50]</sup>将基于地理统计信息的GMA方法用于降水概率预报。

与降水分布相比, 风速的分布也属于非高斯分布, 但不需要将零值部分的概率单独处理。Sloughter

等<sup>[51]</sup>采用gamma分布对风速集合预报进行了BMA统计后处理。Bao等<sup>[52]</sup>采用常用于模拟角度数据的Von Mises分布将BMA用于地面风向集合预报订正。Chmieleck等<sup>[53]</sup>采用 $\beta$ 分布将BMA用于能见度概率预报。Baran<sup>[54]</sup>参考Thorarinsdottir等<sup>[32]</sup>采用TN分布将BMA用于风速集合预报订正。

### 1.4 集合敷料法

集合敷料法(ensemble dressing)最初由Roulston等<sup>[55]</sup>提出, 考虑每个集合成员预报误差的概率分布, 以偏差订正后的集合成员为中心估计单个集合成员的概率分布(核密度, kernel density), 再对所有集合成员的核密度进行平均得到集合预报整体的概率分布。Roulston等<sup>[55]</sup>提出了“最优成员集合敷料法”, Wang等<sup>[56]</sup>则对其改进加入二阶矩约束条件, 但不适用于集合预报过离散的情况。Fortin等<sup>[57]</sup>对此做了进一步改进, 基于 $\beta$ 分布使用不同核密度、不等权重的集合敷料法, 对集合预报过离散和欠离散的情况均适用。Bröcker等<sup>[58]</sup>基于高斯分布提出“仿射核密度敷料法”(affine kernel dressing, AKD), 考虑将气候分布加入集合成员以增加概率预报的健壮性。Glahn等<sup>[59]</sup>提出的集合核密度模式输出统计法(ensemble kernel density MOS, EKDMOS)需通过经验公式调整集合离散度, 而Veenhuis<sup>[60]</sup>则根据不同站点之间的差异以及离散度与集合平均误差的关系(spread-skill relationship)调整EKDMOS中的集合离散度。

### 1.5 非参数化统计后处理方法

#### 1.5.1 排序直方图订正

早期Hamill等<sup>[61]</sup>基于排序直方图检验对降水集合预报进行订正以提升概率预报的可靠性。首先根据集合平均和对应观测对集合成员做去偏差处理(负降水处理为0值), 并从小到大排序得到偏差订正后的集合成员。对不超过最大集合成员的分位值采用线性插值计算概率, 对超过最大集合成员的分位值则采用Gumbel分布进行拟合。

#### 1.5.2 可靠性曲线订正

Flowerdew<sup>[62]</sup>根据可靠性曲线对温度、气压、风速和降水等地面变量集合预报进行了订正。为保证充足的统计样本仅使用5个概率区间, 将区间内平均预报概率订正为相应的观测频率, 并结合线性插值构建订正后的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)曲线, 最后再通过等概率切割从CDF曲线还原到集合成员。

#### 1.5.3 杜-周排序法

杜一周排序法(Du-Zhou Ranking)<sup>[63]</sup>根据集合平

均判断集合成员的相对优劣,从而进行排序加权以改进集合预报。此法的优点是不需要观测资料,在数值模式没有太大偏差时效果较好。

#### 1.5.4 衰减平均偏差订正

Cui等<sup>[64]</sup>介绍了一种衰减平均偏差订正(decaying average bias correction)方法用于北美集合预报系统(North American ensemble forecast system, NAEFS)的35个高斯分布型变量的偏差订正。该方法的思路是首先计算每一个格点和每一个预报时效的偏差,然后采用自适应卡尔曼滤波型的衰减平均方法估计平均系统偏差,订正后的预报值为原始预报减去平均系统偏差。

#### 1.5.5 概率匹配和频率匹配

Ebert<sup>[65]</sup>最早提出概率匹配(probability matching, PM)的思想。假定集合平均预报具有较好的空间分布,而集合成员预报在量级上有更高的准确度,PM方法将全场所有 $N$ 个格点的集合平均预报与 $N \times M$ 个集合成员预报( $M$ 为集合成员数)分别排序后进行概率密度函数(probability density function, PDF)匹配,然后将每个格点对应的集合平均值替换为排序对应的 $M$ 个集合成员预报值的平均。PM方法多用于中小尺度降水集合预报用于产生确定性预报产品<sup>[66-70]</sup>。需要注意的是,PM方法采用集合成员进行匹配,并没有使用观测数据,如果采用观测资料对不同阈值下的降水进行匹配就变成了频率匹配法(frequency matching method, FMM)<sup>[71-73]</sup>,该方法在国内也得到了广泛的推广和应用<sup>[74-75]</sup>。李俊等<sup>[72]</sup>进一步指出,若对降水预报先做简单的集合平均,再应用FMM方法对集合平均进行偏差订正,效果会更好,因为这样既可以订正雨区位置,又订正了降雨量。

#### 1.5.6 分位数映射

分位数映射(quantile mapping, QM)与FMM具有一定相似之处,通过估计预报和观测的CDF分布,然后对不同的分位数进行频率匹配。QM在天气、水文和气候集合预报的偏差订正方面应用广泛<sup>[38, 76-81]</sup>。

#### 1.5.7 分位数回归

分位数回归(quantile regression, QR)方法最早由Koenker和Bassett<sup>[82]</sup>提出。Bremnes<sup>[83]</sup>将QR引入降水集合预报的后处理中,Bentzen和Friederichs<sup>[84]</sup>也将QR方法应用于降水集合预报的订正,此外QR在风能概率预测<sup>[85-86]</sup>和全球辐射集合预报<sup>[87]</sup>的后处理等方面也有应用。

#### 1.5.8 最优百分位和最优评分法

最优百分位<sup>[20, 88]</sup>是中国气象局国家气象中心根据

预报员经验发展起来的降水集合预报客观订正技术,对不同的降水阈值寻找评分最优的集合百分位进行映射,参考了PM方法的思想。2013—2015年夏季降水的TS(Threat Score)评分表明,该方法不亚于预报员的主观预报<sup>[88]</sup>。吴启树等<sup>[89]</sup>设计的最优评分法也用到了评分最优的思想,对不同降水阈值寻找评分最优的预报订正值进行映射。

#### 1.5.9 逐成员订正

逐成员订正(member-by-member, MBM)的名称由Van Schaeybroeck等<sup>[90]</sup>提出,考虑先通过平移订正集合预报的一阶偏差,再以平移后的集合平均为中心进行拉伸以订正二阶离散度偏差。该思想与方差膨胀法(variance inflation, INFL)<sup>[91-93]</sup>、平移拉伸法(shift-and-stretch)<sup>[94]</sup>、变量误差回归方法(error-in-variables regression或error-in-variables MOS, EVMOS)<sup>[95-97]</sup>都有类似之处,故上述三种方法也可与MBM方法归为一类。

#### 1.5.10 相似法

相似法(analog)首先寻找与当前预报场特征最相似的历史样本,然后用相似样本对应的观测组成新的集合预报,常用回算预报数据作为训练样本。Hamill等<sup>[98]</sup>建立了基于相似法的集合预报后处理理论并用于降水概率预报后处理。Hamill等<sup>[99]</sup>在相似法中加入了补充位置训练样本,有效提升了降水集合预报性能。Delle Monache等<sup>[100-101]</sup>定义了多物理量相似度指标来寻找相似样本。Junk等<sup>[102-103]</sup>提出了一种基于CRPS(continuous ranked probability score)评分最小化的蛮力法(a brute-force CRPS minimization)计算最优的预报因子权重。Junk等<sup>[102]</sup>在风能集合预报的后处理中增加了潜在有用的预报因子数量,并通过主成分分析进行因子降维。Junk等<sup>[103]</sup>提出了一种基于相似法的EMOS方法(analog-based EMOS)用于订正100 m风能集合预报,并与相似法、EMOS方法和Pinson<sup>[104]</sup>的自适应风矢量订正(adaptive wind vector calibration, AUV)进行对比。Yang等<sup>[105]</sup>采用双预报因子组合(dual-predictor combinations)的方法将两个模式的多个预报因子进行加权组合。Scheuerer等<sup>[106]</sup>则将非参数化的相似方法与参数化的CSG NR方法相结合进行了降雪概率预报。杜钧和李俊<sup>[107]</sup>指出,回算预报相似法在中期暴雨预报中也有特殊效果,显著优于多模式中期集合预报。Du等<sup>[108]</sup>提出的regime dependent偏差订正法也是基于相似法的同一思想,即用过去相似天气形势下的预报误差来订正当前的预报。此外,相似法在台风路径和强度的集合预报后处

理方面也有较多应用<sup>[109-111]</sup>。

### 1.5.11 邻域法

随着计算资源的不断提升,对流允许(convection allowing)模式可在强天气模拟中产生更加精细的物理量(如大风、强降水)结构特征,同时也带来了更多位置和时间上的不确定性。Theis等<sup>[112]</sup>提出了一种利用确定性模式格点的时空邻域预报生成概率预报的方法,随后Schwartz等<sup>[113]</sup>将该邻域法拓展到集合预报的后处理中,提升了原始集合预报的可靠性。Blake等<sup>[114]</sup>根据集合成员在不同尺度下的离散度<sup>[115-116]</sup>提出自适应邻域半径法,用于对流尺度集合预报的后处理,提升了概率预报性能。邻域法的特点是简单易用且节省计算资源,邻域半径的选取通常取决于假定模式在何种尺度上预报准确。Ben Bouallègue等<sup>[117]</sup>将这种进行格点平滑却不改变预报格距的邻域法称为模糊(fuzzy)概率预报,并提出了另一种增大预报格距的升尺度(upscaling)邻域法。

### 1.5.12 基于对象的概率预报方法

传统的点对点检验评估已不能适应逐步发展的高分辨率对流允许模式,Davis等<sup>[118-119]</sup>提出基于对象的诊断评估方法(method for object-based diagnostic evaluation, MODE),通过识别预报场和观测场中的目标对象,对两场中不同对象的不同属性进行分析,并计算表征两对象总体相似度的“总体兴趣值”(total interest)用于对象之间的匹配。Johnson等<sup>[120]</sup>将MODE方法用于对流允许集合预报的后处理,对从不同集合成员中提取的对象进行匹配和归类,从而获取不同预报对象的概率值。

### 1.5.13 虚拟降水法

Yuan等<sup>[121]</sup>基于大气整层可降水量分别构造了模式预报和分析场的“虚拟降水场”,通过集合预报的“虚拟降水场”来订正降水预报偏差。该方法针对降水量在零值处的不连续性问题,可对一般统计方法难以订正的降水干偏差(模式降水为0)进行一定程度上的改进。

## 2 多变量集合预报统计后处理

使用上一章介绍的单变量集合预报统计后处理方法分别订正不同变量仅能得到相互独立的集合预报,而在实际应用中常需要获得在时间和空间上具有依赖性结构的多变量集合预报<sup>[122]</sup>。一种后处理方法是将对单变量集合预报参数化后处理方法进行拓展,获得多变量的联合概率分布,而在这过程中需要估计较多参数,因此适用于变量维数较低的情况;另一种方法是采用非参数化方法,无须获得模型完整的联合概率

分布,而是基于特定预报或观测排序结构的依赖模板(dependence template)对单变量概率分布进行抽样和重新排序,适用于变量维数较高的情况。表3整理和归纳了部分需要考虑依赖性结构的多变量集合预报统计后处理方法。

表3 多变量集合预报统计后处理技术列表  
Table 3 List of multivariate ensemble statistical postprocessing methods

| 类别            | 依赖结构                | 后处理方法             | 参考文献                                                                                                 |
|---------------|---------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 参数化<br>后处理方法  | 保留天气变量<br>之间的依赖结构   | NR+高斯连接           | Schuhen等, 2012 <sup>[123]</sup><br>Baran等, 2017 <sup>[127]</sup>                                     |
|               |                     | BMA+高斯连接          | Sloughter等, 2013 <sup>[124]</sup><br>Möller等, 2013 <sup>[125]</sup><br>Baran等, 2015 <sup>[126]</sup> |
|               | 保留空间<br>依赖结构        | BMA+GOP           | Berrocal等, 2007 <sup>[129]</sup>                                                                     |
|               |                     | NR+GOP            | Feldmann等, 2015 <sup>[130]</sup>                                                                     |
|               | 保留时间<br>依赖结构        | 多变量高斯核函数<br>集合敷料法 | Schölzel等, 2011 <sup>[131]</sup>                                                                     |
|               |                     | NR+高斯连接           | Hemri等, 2015 <sup>[132]</sup>                                                                        |
| 非参数化<br>后处理方法 | 集合连接耦合<br>(ECC)     | BMA/NR+ECC        | Schefzik等, 2013 <sup>[133]</sup>                                                                     |
|               |                     | NR+dual-ECC       | Ben Bouallègue等, 2016 <sup>[134]</sup>                                                               |
|               | Schaaake洗牌法<br>(SS) | MOS+SS            | Clark等, 2004 <sup>[135]</sup>                                                                        |
|               |                     | NR+SimSchaaake    | Schefzik, 2016 <sup>[136]</sup>                                                                      |
|               |                     | NR+MDSS           | Scheuerer等, 2017 <sup>[137]</sup>                                                                    |

### 2.1 多变量参数化统计后处理方法

对于特定预报时效和特定的单个变量,我们可以先通过单变量集合预报统计后处理方法得到单变量的边缘分布函数,再通过参数化方法选择合适的连接函数(copula),就可得到具有依赖性结构的多变量联合分布函数。

Schuhen等<sup>[123]</sup>基于双正态概率分布提出了一种适用于二维风矢量的NR模型,Sloughter等<sup>[124]</sup>采用类似的方法提出了一种适用于二维风场的BMA模型。Möller等<sup>[125]</sup>利用高斯连接函数将5种天气变量的BMA边缘分布有机结合。Baran等<sup>[126]</sup>、Baran等<sup>[127]</sup>分别采用BMA和NR模型对风速和温度集合预报进行了联合后处理。

多变量参数化后处理方法除了可用于产生不同天气变量之间的联合分布以外,还可用于生成具有空间相关性的预报。地理统计输出扰动(geostatistical output perturbation, GOP)方法是一种将单一确定性预报结合模拟误差场生成具有空间相关性的集合预报的方法<sup>[128]</sup>。Berrocal等<sup>[129]</sup>将BMA方法与GOP相结合,提出了一种可同时产生全场温度概率预报的空间BMA方法,显著降低了计算量,在保留集合预报流依赖信息的同时考虑了观测场的空间结构特征。Feldmann等<sup>[130]</sup>则将GOP与NR方法相结合用于温度概率预报。

此外,还有一些考虑时间相关性的多变量参数化

后处理方法研究。Schölzel 和Hense<sup>[131]</sup>将高斯核函数集合数料法拓展到双变量用于估计集合预报系统在时间上的自协方差, 获得区域气候模拟的温度平均和趋势的联合概率分布。Hemri等<sup>[132]</sup>使用高斯连接将不同预报时效的NR后处理径流集合预报相结合, 获得具有多时效一致性的联合概率分布。

## 2.2 多变量非参数化统计后处理方法

当变量维数较高, 参数化后处理方法需要处理复杂的模型和参数拟合, 可能变得难以实施, 而非参数化方法则有着计算简便的优势, 通过经验连接 (empirical copula) 对单变量集合预报统计后处理得到的边缘分布函数的离散型随机抽样进行转换, 获得具有时间、空间或多变量一致性的集合预报。

### 2.2.1 集合连接耦合

集合连接耦合 (ensemble copula coupling, ECC) 采用原始集合预报数据作为依赖模板对集合预报进行经验连接后处理, 考虑了流依赖信息<sup>[133]</sup>。ECC假定集合成员之间是可交换的并且模式是完美的, 即认为集合预报能够充分反映实际的空间、时间和变量之间的相异性。Ben Bouallègue等<sup>[134]</sup>指出当集合预报的后处理不加区分地扩大集合离散度时, ECC会产生偏离实际的情形, 这是因为原始集合预报对相关性的结构的歪曲在后处理之后被进一步放大, 将ECC用于可靠性差的集合预报反而会进一步恶化集合预报信息。为了克服该问题, Ben Bouallègue等<sup>[134]</sup>提出了一种双重ECC (dual-ECC) 方法, 假定预报误差具有平稳性, 将连续预报时效的预报误差的自相关部分加入ECC。

### 2.2.2 Schaake 洗牌法

Clark等<sup>[135]</sup>提出了Schaake洗牌法 (Schaake shuffle, SS), 采用历史观测数据作为依赖模板。Clark等<sup>[135]</sup>指出这里的SS方法由于使用固定的依赖模板, 对于不同的大气状态无法区别对待, 建议选用与当前预报的大气状态相似的历史记录日期作为依赖模板。受此启发, Schefzik<sup>[136]</sup>结合了Hamill等<sup>[98]</sup>和Delle Monache等<sup>[100]</sup>的相似集合预报概念提出了SimSchaake方法, 解决了原始SS方法不包含流依赖信息的问题。SimSchaake方法选取历史上与当前集合预报相似的集合预报对应的日期构建依赖模板。而Scheuerer等<sup>[137]</sup>指出SimSchaake方法虽然优于标准的SS方法<sup>[135]</sup>, 但存在两个问题: 一是若相似建立在集合预报上则应采用历史回算预报数据寻找相似日期, 而且即使如此也无法保证所选的相似回算预报与相应的观测具有一致的依赖结构; 二是在较长预报时效时由于预报技巧的下滑, 预报场与观测场偏离较大而失去意义。

因此Scheuerer等<sup>[137]</sup>改为直接寻找历史观测数据子集使其与后处理之后的集合预报尽可能的相似, 这里采用Bröcker<sup>[138]</sup>定义的两个分布之间的散度反向衡量相似程度, 提出最小散度SS法 (minimum divergence Schaake shuffle, MDSS)。

## 3 多模式集合与机器学习

以上方法主要针对单模式集合预报系统, 而业务应用和实际预报中经常使用多模式集合来预报天气要素。第一节和第二节中的后处理方法均可以不同程度地应用到多模式集合。此外, 随着高性能计算机和并行计算方法的发展, 近年来机器学习的方法也逐渐在集合预报统计后处理中有着越来越多的应用。表4列出了常见的多模式集合和机器学习方法。

表4 多模式集合与机器学习方法列表  
Table 4 List of multi-model ensemble and machine learning methods

| 方法         | 参考文献                                                                       |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 多模式集合      | Hagedorn等, 2005 <sup>[142]</sup>                                           |
|            | Matsueda等, 2008 <sup>[139]</sup>                                           |
|            | Weigel等, 2009 <sup>[143]</sup>                                             |
|            | Johnson等, 2009 <sup>[145]</sup>                                            |
|            | Yamaguchi等, 2012 <sup>[140]</sup><br>智协飞等, 2013 <sup>[144]</sup>           |
| 机器学习       | Yuan等, 2007 <sup>[148]</sup>                                               |
|            | Krasnopolsky等, 2012 <sup>[149]</sup>                                       |
|            | Rasp等, 2018 <sup>[150]</sup>                                               |
|            | 陈超辉等, 2010 <sup>[152]</sup>                                                |
|            | Herman等, 2016 <sup>[155]</sup><br>黄威等, 2017 <sup>[153]</sup>               |
| 随机森林 (RFs) | Ahijevych等, 2016 <sup>[160]</sup>                                          |
|            | Gagne等, 2014, 2017 <sup>[157, 161]</sup><br>Herman等, 2018 <sup>[158]</sup> |

### 3.1 多模式集合

Matsueda等<sup>[139]</sup>基于北半球500 hPa位势高度场的研究发现简单的等权重多模式超级集合优于单一最优集合预报。Yamaguchi等<sup>[140]</sup>研究了多模式超级集合在热带气旋路径预报方面相比于单个集合预报系统的优势。Zhou等<sup>[141]</sup>应用多模式区域集合预报使雾的预报得到了明显的改善。Hagedorn等<sup>[142]</sup>指出多模式集合预报相比于单一集合预报的优势不仅仅在于误差的相互抵消, 还在于多模式集合预报具有更好的一致性和可靠性。Weigel等<sup>[143]</sup>也指出, 多模式集合通过增加模式的不确定性, 提升了集合离散度和概率预报的可靠性。智协飞等<sup>[144]</sup>基于TIGGE资料进行了地面气温和降水的多模式集合预报, 提升了集合预报性能。

也有学者指出, 并非所有情况下多模式集合都显著优于单个集合预报。例如, Park等<sup>[12]</sup>也采用等权重的方法进行多模式集成, 并与最优的单个集合预报系统ECMWF进行比较, 发现当ECMWF的集合离

散度调整较好时,性能差异不大,而当ECMWF明显欠离散时(例如在热带地区),多模式集合的优势凸显;Johnson等<sup>[145]</sup>对ECMWF、NCEP和英国气象局(United Kingdom Met Office, UKMO)的集合预报系统进行了偏差订正、模式误差权重集成以及离散度调整的后处理,并与单个集合预报系统进行对比,发现当单个集合预报系统之间的性能相似时多模式集成的优势并不明显;Weigel等<sup>[146]</sup>的多模式季节温度预测研究也证实了多模式集合优于单个最优集合预报系统是有条件的。

在研究对比了多模式集合与单个模式集合之后,研究关注点开始转向多模式集合与统计订正后的单个模式的性能对比。Weigel等<sup>[143]</sup>发现气候守恒校准后的单个集合预报系统与多模式集合预报性能相当。Hagedorn等<sup>[17]</sup>发现采用部分优质集合预报系统组成的多模式集合要好于采用全部集合预报系统组成的多模式集合,且采用回算预报资料对ECMWF集合预报系统进行订正可消除系统偏差和离散度误差,从而达到与优质多模式集合相媲美的效果。Hamill<sup>[147]</sup>则对24 h累积降水进行研究,也发现采用回算预报资料订正后的ECMWF与多模式集成的效果相当,进而说明多中心数据共享和回算预报资料的应用均可有效提升集合预报性能。

## 3.2 机器学习

机器学习是人工智能(artificial intelligence, AI)的一个分支,通过数据驱动建立预报量与预报因子之间的非线性关系模型。随着计算机资源的不断提升以及海量气象资料的不断涌现,机器学习在大气科学领域得到蓬勃发展,并在集合预报后处理应用中广泛应用。下面就一些常见的机器学习方法进行介绍。

### 3.2.1 人工神经网络

人工神经网络(artificial neural networks, ANN)是深度学习方法的基础,通过可调节的权重将不同节点的非线性函数相互连接,模仿神经系统形成多层网络。通过学习训练,ANN可以灵活地表示任意非线性函数。Yuan等<sup>[148]</sup>、Krasnopolsky等<sup>[149]</sup>使用ANN对降水集合预报进行后处理,Rasp等<sup>[150]</sup>则将ANN用于地面温度集合预报的订正,Manzato<sup>[151]</sup>使用ANN进行了冰雹集合预报。

### 3.2.2 支持向量机

支持向量机(support vector machines, SVM)是一种用于分类和回归的监督学习模型,可通过核函数将低维空间的非线性问题转化为高维空间的线性问题进行回归估计。陈超辉等<sup>[152]</sup>使用SVM进行了多模式

降水和700 hPa流场的回归预报取得了不错的效果。黄威等<sup>[153]</sup>和孔庆燕等<sup>[154]</sup>也将SVM方法应用于降水集合预报中。Herman等<sup>[155]</sup>使用SVM方法进行了云顶和能见度的概率预报。

### 3.2.3 随机森林

随机森林(random forests, RF)是一种包含多个决策树的分类和回归模型,可纠正单个决策树可能存在的过度拟合问题。RF方法在降水<sup>[156-158]</sup>、气温<sup>[159]</sup>、中尺度对流系统初生<sup>[160]</sup>和冰雹<sup>[161]</sup>的概率预报方面都有广泛的应用。

## 4 总结与讨论

本文全面系统地介绍了现有重要集合预报统计后处理技术的研究进展,为广大集合预报相关的科研和业务工作者提供参考。下面就集合预报统计后处理中需要注意的几点问题进行讨论。

1) 不同的集合预报统计学后处理方法适用性不同且各有优缺点。参数化后处理方法的优点在于模型对训练样本量的要求不是很高,模型函数对历史上未发生的事件具有一定的推演能力,模型占用存储空间较小,只需存储模型的若干参数值即可;缺点在于模型的准确性取决于预先假设的数学分布,可能会导致拟合的失真。非参数化后处理方法的优点在于可以灵活地反映历史训练样本中预报和观测数据的统计关系,但缺点是对历史上未发生过的事件缺乏外推能力,且为了获得稳定的统计模型需要较多的训练样本,模型所占的存储空间相对较大。

2) 合理采集训练样本数据对集合预报后处理结果至关重要。集合预报偏差的统计学特征可能存在地域、季节、年份、不同预报时效等方面的差异,采集训练数据时应尽量考虑样本的时空代表性。此外,集合预报的偏差特征也可能随模式版本的更新发生变化。使用回算预报数据作为训练样本则可以较好地解决样本代表性以及模式版本更新的问题,可以获得误差特征一致性较好的大样本训练数据。许多研究表明,回算预报数据集可显著提升集合预报的统计后处理性能,尤其是对极端事件的集合预报后处理效果明显<sup>[17-18, 162-165]</sup>。

3) 全面客观的检验评估才能科学地反映集合预报统计后处理效果。Wilks<sup>[166]</sup>指出在集合预报参数化后处理中常常通过最优化某个特定评分(例如连续分级概率评分,CRPS)来估计参数,然而这样并不能保证提升集合预报的其他重要属性,例如可靠性。一个好的集合预报系统应该是各方面综合性能优异,而不是仅仅在某些单一检验指标方面表现突出,因此在

集合预报后处理性能评估方面应该对不同属性加以考察以获得综合客观的结论。

4) 统计后处理对于集合预报性能的提升有限。统计后处理本质上是找出集合预报系统误差(包括一阶系统偏差和二阶离散度偏差)的统计学规律并加以修正。如果集合预报系统本身可预报性差,系统误差不具有稳定的规律,统计后处理方法很难发挥作用,这时需要从动力上对集合预报系统本身加以改进。

5) 对于未来发展方向的展望。一是加强不同集合预报统计后处理方法的对比研究,总结不同方法的适用性和优缺点,在此基础上进行新方法的研发;二是基于人工智能技术的不断进步,使用机器学习挖掘海量气象数据以提升集合预报性能;三是面向高分辨率模式的空间检验新技术正日益普及(MODE<sup>[118-119]</sup>),未来的集合预报后处理技术也会随着检验技术的发展而发生变革;四是考虑时间、空间以及变量之间依赖结构的多变量集合预报统计后处理技术将在水文、风能和天气预报等领域得到广泛应用。

#### 参考文献

- [1] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction. *Tellus A*, 1969, 21(6): 739-759.
- [2] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Monthly Weather Review*, 1974, 102(6): 409-418.
- [3] Schaake J C, Hamill T M, Buizza R, et al. HEPEX: the hydrological ensemble prediction experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 3(5): 1541-1547.
- [4] Demargne J, Wu L, Regonda S K, et al. The science of NOAA's operational hydrologic ensemble forecast service. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(1): 79-98.
- [5] 赵琳娜,包红军,田付友,等.水文气象研究进展. *气象*, 2012, 38(2): 147-154.
- [6] 卢迪,彭勇,徐炜,等.气象集合预报在水文领域中的应用研究进展. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(2): 116-119.
- [7] Buizza R. Accuracy and potential economic value of categorical and probabilistic forecasts of discrete events. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(9): 2329-2345.
- [8] Richardson D S. Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126(563): 649-667.
- [9] Zhu Y, Toth Z, Wobus R, et al. The economic value of ensemble-based weather forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(1): 73-84.
- [10] 杜钧,邓国.单一值预报向概率预报转变的价值:谈谈概率预报的检验和应用. *气象*, 2010, 36(12): 10-18.
- [11] Buizza R. Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(125): 99-119.
- [12] Hamill T M. Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(3): 550-560.
- [13] Park Y Y, Buizza R, Leutbecher M. TIGGE: Preliminary results on comparing and combining ensembles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2008, 134(637): 2029-2050.
- [14] Su X, Yuan H, Zhu Y, et al. Evaluation of TIGGE ensemble predictions of Northern Hemisphere summer precipitation during 2008-2012. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(12): 7292-7310.
- [15] Klein W H, Lewis B M, Enger I. Objective prediction of five-day mean temperatures during winter. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 16(6): 672-682.
- [16] Glahn H R, Lowry D A. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *Journal of applied meteorology*, 1972, 11(8): 1203-1211.
- [17] Hagedorn R, Buizza R, Hamill T M, et al. Comparing TIGGE multimodel forecasts with reforecast-calibrated ECMWF ensemble forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(668): 1814-1827.
- [18] Hamill T M, Bates G T, Whitaker J S, et al. NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(10): 1553-1565.
- [19] 毕宝贵,代刊,王毅,等.定量降水预报技术进展. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 534-549.
- [20] 代刊,朱跃建,毕宝贵.集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述. *气象学报*, 2018, 76(4): 493-510.
- [21] Li W, Duan Q, Miao C, et al. A review on statistical postprocessing methods for hydrometeorological ensemble forecasting: statistical postprocessing methods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2017, 4(6): e1246.
- [22] Duan Q, Pappenberger F, Wood A, et al. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Springer, 2019.
- [23] Hamill T M, Whitaker J S, Wei X. Ensemble reforecasting: improving medium-range forecast skill using retrospective forecasts. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(6): 1434-1447.
- [24] Wilks D S. Extending logistic regression to provide full-probability-distribution MOS forecasts. *Meteorological Applications*, 2009, 16(3): 361-368.
- [25] Ben Bouallègue Z. Calibrated short-range ensemble precipitation forecasts using extended logistic regression with interaction terms. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(2): 515-524.
- [26] Messner J W, Mayr G J, Wilks D S, et al. Extending extended logistic regression: extended versus separate versus ordered versus censored. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(8): 3003-3014.
- [27] Gneiting T, Raftery A E, Westveld A H, et al. Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(5): 1098-1118.
- [28] Messner J W, Mayr G J, Zeileis A. Nonhomogeneous boosting for predictor selection in ensemble postprocessing. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(1): 137-147.
- [29] Sansom P G, Ferro C A, Stephenson D B, et al. Best practices for postprocessing ensemble climate forecasts. Part 1: Selecting appropriate recalibration methods. *Journal of Climate*, 2016, 29(20): 7247-7264.
- [30] Möller A, Groß J. Probabilistic temperature forecasting based on an ensemble autoregressive modification. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(696): 1385-1394.
- [31] Siegert S, Sansom P G, Williams R M. Parameter uncertainty in forecast recalibration. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(696): 1213-1221.
- [32] Thorarindottir T L, Gneiting T. Probabilistic forecasts of wind speed: ensemble model output statistics by using heteroscedastic censored regression. *Journal of the Royal Statistical Society*, 2010, 173(2): 371-388.
- [33] Lerch S, Thorarindottir T L. Comparison of non-homogeneous regression models for probabilistic wind speed forecasting. *Tellus A*, 2013, 65(1): 21206.
- [34] Baran S, Lerch S. Log-normal distribution based ensemble model output statistics models for probabilistic wind-speed forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(691): 2289-2299.
- [35] Baran S, Lerch S. Mixture EMOS model for calibrating ensemble forecasts of wind speed. *Environmetrics*, 2016, 27(2): 116-130.
- [36] Bentzien S, Friederichs P. Generating and calibrating probabilistic quantitative precipitation forecasts from the high-resolution NWP model COSMO-DE. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(4): 988-1002.
- [37] Scheuerer M. Probabilistic quantitative precipitation forecasting

- using ensemble model output statistics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(680): 1086-1096.
- [38] Scheuerer M, Hamill T M. Statistical postprocessing of ensemble precipitation forecasts by fitting censored, shifted gamma distributions. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(11): 4578-4596.
- [39] Baran S, Nemoda D. Censored and shifted gamma distribution based EMOS model for probabilistic quantitative precipitation forecasting. *Environmetrics*, 2016, 27(5): 280-292.
- [40] Dabernig M, Mayr G J, Messner J W, et al. Spatial ensemble post-processing with standardized anomalies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 143(703): 909-916.
- [41] Rigby R A, Stasinopoulos D M. Generalized additive models for location, scale and shape. *Journal of the Royal Statistical Society*, 2005, 54(3): 507-554.
- [42] Stasinopoulos D M, Rigby R A. Generalized additive models for location scale and shape (GAMLSS) in R. *Journal of Statistical Software*, 2007, 23(7): 1-46.
- [43] Stauffer R, Umlauf N, Messner J W, et al. Ensemble postprocessing of daily precipitation sums over complex terrain using censored high-resolution standardized anomalies. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(3): 955-969.
- [44] Dabernig M, Mayr G J, Messner J W, et al. Simultaneous ensemble postprocessing for multiple lead times with standardized anomalies. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(7): 2523-2531.
- [45] Raftery A E, Gneiting T, Balabdaoui F, et al. Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(5): 1155-1574.
- [46] Wilson L J, Beauregard S, Raftery A E, et al. Calibrated surface temperature forecasts from the Canadian ensemble prediction system using Bayesian model averaging. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(4): 1364-1385.
- [47] Kleiber W, Raftery A E, Baars J, et al. Locally calibrated probabilistic temperature forecasting using geostatistical model averaging and local Bayesian model averaging. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(8): 2630-2649.
- [48] Sloughter J M, Raftery A E, Gneiting T, et al. Probabilistic quantitative precipitation forecasting using Bayesian model averaging. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(9): 3209-3220.
- [49] Schmeits M J, Kok K J. A comparison between raw ensemble output, (modified) Bayesian model averaging, and extended logistic regression using ECMWF precipitation reforecasts. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(11): 4199-4211.
- [50] Kleiber W, Raftery A E, Gneiting T. Geostatistical model averaging for locally calibrated probabilistic quantitative precipitation forecasting. *Journal of the American Statistical Association*, 2011, 106(496): 1291-1303.
- [51] Sloughter J M, Gneiting T, Raftery A E. Probabilistic wind speed forecasting using ensembles and Bayesian model averaging. *Journal of the American Statistical Association*, 2010, 105(489): 25-35.
- [52] Bao L, Gneiting T, Grimit E P, et al. Bias correction and Bayesian model averaging for ensemble forecasts of surface wind direction. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(5): 1811-1821.
- [53] Chmielecki R M, Raftery A E. Probabilistic visibility forecasting using Bayesian model averaging. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(5): 1626-1636.
- [54] Baran S. Probabilistic wind speed forecasting using Bayesian model averaging with truncated normal components. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2014, 75: 227-238.
- [55] Roulston M S, Smith L A. Combining dynamical and statistical ensembles. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2003, 55(1): 16-30.
- [56] Wang X, Bishop C H. Improvement of ensemble reliability with a new dressing kernel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(607): 965-986.
- [57] Fortin V, Favre A C, Saïd M. Probabilistic forecasting from ensemble prediction systems: Improving upon the best-member method by using a different weight and dressing kernel for each member. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2006, 132(617): 1349-1369.
- [58] Bröcker J, Smith L A. From ensemble forecasts to predictive distribution functions. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2008, 60(4): 663-678.
- [59] Glahn B, Peroutka M, Wiedenfeld J, et al. MOS uncertainty estimates in an ensemble framework. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(1): 246-268.
- [60] Veenhuis B A. Spread calibration of ensemble MOS forecasts. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(7): 2467-2482.
- [61] Hamill T M, Colucci S J. Verification of Eta-RSM short-range ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(6): 1312-1327.
- [62] Flowerdew J. Calibrating ensemble reliability whilst preserving spatial structure. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014, 66(1): 22662.
- [63] Du J, Zhou B. A dynamical performance-ranking method for predicting individual ensemble member performance and its application to ensemble averaging. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(10): 3284-3303.
- [64] Cui B, Toth Z, Zhu Y, et al. Bias correction for global ensemble forecast. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(2): 396-410.
- [65] Ebert, Elizabeth E. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(10): 2461-2480.
- [66] Chien F C, Jou B J. MM5 ensemble mean precipitation forecasts in the Taiwan area for three early summer convective (mei-yu) seasons. *Weather and Forecasting*, 2004, 19(4): 735-750.
- [67] Clark A J, Gallus Jr WA, Xue M, et al. A comparison of precipitation forecast skill between small convection-allowing and large convection-parameterizing ensembles. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(4): 1121-1140.
- [68] Gallus Jr W A. Application of object-based verification techniques to ensemble precipitation forecasts. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(1): 144-158.
- [69] Berenguer M, Surcel M, Zawadzki I, et al. The diurnal cycle of precipitation from continental radar mosaics and numerical weather prediction models. Part II: Intercomparison among numerical models and with nowcasting. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(8): 2689-2705.
- [70] Snook N, Xue M, Jung Y. Ensemble probabilistic forecasts of a tornadic mesoscale convective system from ensemble Kalman filter analyses using WSR-88D and CASA radar data. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(7): 2126-2146.
- [71] 李俊, 杜钧, 陈超君. 降水偏差订正的频率 (或面积) 匹配方法介绍和分析. *气象*, 2014, 40(5): 580-588.
- [72] 李俊, 杜钧, 陈超君. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究. *气象*, 2015, 41(6): 674-684.
- [73] Zhu Y, Luo Y. Precipitation calibration based on the frequency-matching method. *Weather and Forecasting*, 2015, 30(5): 1109-1124.
- [74] 周迪, 陈静, 陈朝平, 等. 暴雨集合预报-观测概率匹配订正法在四川盆地的应用研究. *暴雨灾害*, 2015, 34(2): 97-104.
- [75] 徐姝, 尉英华, 熊明明, 等. 频率匹配法在海河流域 ECMWF 集合预报融合产品中的应用研究. *气象与环境学报*, 2018, 34(4): 11-17.
- [76] Hopson T M, Webster P J. A 1-10-day ensemble forecasting scheme for the major river basins of Bangladesh: Forecasting severe floods of 2003-07. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(3): 618-641.
- [77] Li H, Sheffield J, Wood E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D10).
- [78] Voisin N, Schaake J C, Lettenmaier D P. Calibration and downscaling methods for quantitative ensemble precipitation forecasts. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(6): 1603-1627.
- [79] Maraun D. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: Revisiting the inflation issue. *Journal of Climate*, 2013, 26(6): 2137-2143.
- [80] Cannon A J, Sobie S R, Murdock T Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 2015, 28(17): 6938-6959.

- [81] Hamill T M, Engle E, Myrick D, et al. The US National Blend of Models for statistical postprocessing of probability of precipitation and deterministic precipitation amount. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(9): 3441-3463.
- [82] Koenker R, Bassett Jr G. Regression quantiles. *Econometrica*, 1978, 33-50.
- [83] Bremnes J B. Probabilistic forecasts of precipitation in terms of quantiles using NWP model output. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(1): 338-347.
- [84] Bentzien S, Friederichs P. Generating and calibrating probabilistic quantitative precipitation forecasts from the high-resolution NWP model COSMO-DE. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(4): 988-1002.
- [85] Bremnes J B. Probabilistic wind power forecasts using local quantile regression. *Wind Energy*, 2004, 7(1): 47-54.
- [86] Pinson P. Wind energy: forecasting challenges for its operational management. *Statistical Science*, 2013, 28(4): 564-585.
- [87] Ben Bouallègue Z. Statistical postprocessing of ensemble global radiation forecasts with penalized quantile regression. *Meteorologische Zeitschrift*, 2017, 253-264.
- [88] 代刊, 曹勇, 钱奇峰, 等. 中短期数字化天气预报技术现状及趋势. *气象*, 2016, 42(12): 1445-1455.
- [89] 吴启树, 韩美, 刘铭, 等. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比. *应用气象学报*, 2017, 28(3): 306-317.
- [90] Van Schaeckbroeck B, Vannitsem S. Ensemble post-processing using member-by-member approaches: theoretical aspects. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(688): 807-818.
- [91] Wood A W, Schaake J C. Correcting errors in streamflow forecast ensemble mean and spread. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(1): 132-148.
- [92] Johnson C, Bowler N. On the reliability and calibration of ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(5): 1717-1720.
- [93] Roulin E, Vannitsem S. Post-processing of medium-range probabilistic hydrological forecasting: impact of forcing, initial conditions and model errors. *Hydrological processes*, 2015, 29(6): 1434-1449.
- [94] Eckel F A, Allen M S, Sittel M C. Estimation of ambiguity in ensemble forecasts. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(1): 50-69.
- [95] Vannitsem S. A unified linear model output statistics scheme for both deterministic and ensemble forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2009, 135(644): 1801-1815.
- [96] Van Schaeckbroeck B, Vannitsem S. Post-processing through linear regression. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2011, 18(2): 147-160.
- [97] Vannitsem S, Hagedorn R. Ensemble forecast post-processing over Belgium: comparison of deterministic-like and ensemble regression methods. *Meteorological Applications*, 2011, 18(1): 94-104.
- [98] Hamill T M, Whitaker J S. Probabilistic quantitative precipitation forecasts based on reforecast analogs: theory and application. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(11): 3209-3229.
- [99] Hamill T M, Scheuerer M, Bates G T. Analog probabilistic precipitation forecasts using GEFS reforecasts and climatology-calibrated precipitation analyses. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(8): 3300-3309.
- [100] Delle Monache L, Nipen T, Liu Y, et al. Kalman filter and analog schemes to postprocess numerical weather predictions. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(11): 3554-3570.
- [101] Delle Monache L, Eckel F A, Rife D L, et al. Probabilistic weather prediction with an analog ensemble. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(10): 3498-3516.
- [102] Junk C, Delle Monache L, Alessandrini S, et al. Predictor-weighting strategies for probabilistic wind power forecasting with an analog ensemble. *Meteorologische Zeitschrift*, 2015, 24(4): 361-379.
- [103] Junk C, Delle Monache L, Alessandrini S. Analog-based ensemble model output statistics. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(7): 2909-2917.
- [104] Pinson P. Adaptive calibration of (u, v)-wind ensemble forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(666): 1273-1284.
- [105] Yang J, Astitha M, Delle Monache L, et al. An analog technique to improve storm wind speed prediction using a dual NWP model approach. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(12): 4057-4077.
- [106] Scheuerer M, Hamill T M. Probabilistic forecasting of snowfall amounts using a hybrid between a parametric and an analog approach. *Monthly Weather Review*, 2019, 147(3): 1047-1064.
- [107] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. *气象科技进展*, 2014, 4(5): 6-20.
- [108] Du J and DiMego G. A regime-dependent bias correction approach. 19th Conference on Probability and Statistics, New Orleans, Los Angeles, January 20-24, 2008.
- [109] Sievers O, Fraedrich K, Raible C C. Self-adapting analog ensemble predictions of tropical cyclone tracks. *Weather and Forecasting*, 2000, 15(5): 623-629.
- [110] Chen P, Yu H, Brown B, et al. A probabilistic climatology-based analogue intensity forecast scheme for tropical cyclones. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(699): 2386-2397.
- [111] Alessandrini S, Delle Monache L, Rozoff C M, et al. Probabilistic prediction of tropical cyclone intensity with an analog ensemble. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(6): 1723-1744.
- [112] Theis S E, Hense A, Damrath U. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: a pragmatic approach. *Meteorological Applications*, 2005, 12(3): 257-268.
- [113] Schwartz C S, Kain J S, Weiss S J, et al. Toward improved convection-allowing ensembles: model physics sensitivities and optimizing probabilistic guidance with small ensemble membership. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(1): 263-280.
- [114] Blake B T, Carley J R, Alcott T I, et al. An adaptive approach for the calculation of ensemble gridpoint probabilities. *Weather and Forecasting*, 2018, 33(4): 1063-1080.
- [115] Dey S R, Roberts N M, Plant R S, et al. A new method for the characterization and verification of local spatial predictability for convective-scale ensembles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(698): 1982-1996.
- [116] Chen X, Yuan H, Xue M. Spatial spread-skill relationship in terms of agreement scales for precipitation forecasts in a convection-allowing ensemble. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018, 144(710): 85-98.
- [117] Ben Bouallègue Z, Theis S E. Spatial techniques applied to precipitation ensemble forecasts: From verification results to probabilistic products. *Meteorological Applications*, 2014, 21(4): 922-929.
- [118] Davis C, Brown B, Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(7): 1772-1784.
- [119] Davis C A, Brown BG, Bullock R, et al. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(5): 1252-1267.
- [120] Johnson A, Wang X. Verification and calibration of neighborhood and object-based probabilistic precipitation forecasts from a multimodel convection-allowing ensemble. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(9): 3054-3077.
- [121] Yuan H, Schultz P, Tollerud E I, et al. Pseudo-Precipitation: A Continuous Precipitation Variable. NOAA Technical Memorandum OAR GSD-62, 2019. <https://doi.org/10.25923/3h37-gp49>.
- [122] Wilks D S. Multivariate ensemble model output statistics using empirical copulas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(688): 945-952.
- [123] Schuhen N, Thorarindottir T L, Gneiting T. Ensemble model output statistics for wind vectors. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(10): 3204-3219.
- [124] Sloughter J M, Gneiting T, Raftery A E. Probabilistic wind vector forecasting using ensembles and Bayesian model averaging. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(6): 2107-2119.
- [125] Möller A, Lenkoski A, Thorarindottir T L. Multivariate

- probabilistic forecasting using ensemble Bayesian model averaging and copulas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139(673): 982-991.
- [126] Baran S, Möller A. Joint probabilistic forecasting of wind speed and temperature using Bayesian model averaging. *Environmetrics*, 2015, 26(2): 120-132.
- [127] Baran S, Möller A. Bivariate ensemble model output statistics approach for joint forecasting of wind speed and temperature. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2017, 129(1): 99-112.
- [128] Gel Y, Raftery A E, Gneiting T. Calibrated probabilistic mesoscale weather field forecasting: the geostatistical output perturbation method. *Journal of the American Statistical Association*, 2004, 99(467): 575-583.
- [129] Berrocal V J, Raftery A E, Gneiting T. Combining spatial statistical and ensemble information in probabilistic weather forecasts. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(4): 1386-1402.
- [130] Feldmann K, Scheuerer M, Thorarinsdottir T L. Spatial postprocessing of ensemble forecasts for temperature using nonhomogeneous Gaussian regression. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(3): 955-971.
- [131] Schölzel C, Hense A. Probabilistic assessment of regional climate change in Southwest Germany by ensemble dressing. *Climate Dynamics*, 2011, 36(9-10): 2003-2014.
- [132] Hemri S, Lisniak D, Klein B. Multivariate postprocessing techniques for probabilistic hydrological forecasting. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 7436-7451.
- [133] Schefzik R, Thorarinsdottir T L, Gneiting T. Uncertainty quantification in complex simulation models using ensemble copula coupling. *Statistical Science*, 2013, 28(4): 616-640.
- [134] Ben Bouallègue Z, Heppelmann T, Theis S E, et al. Generation of scenarios from calibrated ensemble forecasts with a dual-ensemble copula-coupling approach. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(12): 4737-4750.
- [135] Clark M, Gangopadhyay S, Hay L, et al. The Schaake shuffle: a method for reconstructing space-time variability in forecasted precipitation and temperature fields. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(1): 243-262.
- [136] Schefzik R. A similarity-based implementation of the Schaake shuffle. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(5): 1909-1921.
- [137] Scheuerer M, Hamill T M, Whitin B, et al. A method for preferential selection of dates in the Schaake shuffle approach to constructing spatiotemporal forecast fields of temperature and precipitation. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 3029-3046.
- [138] Bröcker J. Evaluating raw ensembles with the continuous ranked probability score. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(667): 1611-1617.
- [139] Matsueda M, Tanaka H L. Can MCGE outperform the ECMWF ensemble? *Scientific online letters on the atmosphere*, 2008, 4(1): 77-80.
- [140] Yamaguchi M, Nakazawa T, Hoshino S. On the relative benefits of a multi-centre grand ensemble for tropical cyclone track prediction in the western North Pacific. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(669): 2019-2029.
- [141] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(1): 303-322.
- [142] Hagedorn R, Doblas-Reyes F J, Palmer T N. The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting. I. Basic concept. *Tellus A*, 2005, 57(3): 219-233.
- [143] Weigel A P, Liniger M A, Appenzeller C. Seasonal ensemble forecasts: are recalibrated single models better than multimodels? *Monthly Weather Review*, 2009, 137(4): 1460-1479.
- [144] 智协飞, 季晓东, 张璟, 等. 基于TIGGE资料的地面气温和降水的多模式集成预报. *大气科学学报*, 2013, 36(3): 257-266.
- [145] Johnson C, Swinbank R. Medium-range multimodel ensemble combination and calibration. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2009, 135(640): 777-794.
- [146] Weigel A P, Liniger M A, Appenzeller C. Can multi-model combination really enhance the prediction skill of probabilistic ensemble forecasts? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2008, 134(630): 241-260.
- [147] Hamill T M. Verification of TIGGE multimodel and ECMWF reforecast-calibrated probabilistic precipitation forecasts over the contiguous United States. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(7): 2232-2252.
- [148] Yuan H, Gao X, Mullen S L, et al. Calibration of probabilistic quantitative precipitation forecasts with an artificial neural network. *Weather and Forecasting*, 2007, 22(6): 1287-1303.
- [149] Krasnopolsky V M, Lin Y. A neural network nonlinear multimodel ensemble to improve precipitation forecasts over continental US. *Advances in Meteorology*, 2012, <https://doi.org/10.1155/2012/649450>.
- [150] Rasp S, Lerch S. Neural networks for postprocessing ensemble weather forecasts. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(11): 3885-3900.
- [151] Manzato A. Hail in northeast Italy: a neural network ensemble forecast using sounding-derived indices. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(1): 3-28.
- [152] 陈超辉, 李崇银, 谭言科, 等. 基于交叉验证的多模式超级集合预报方法研究. *气象学报*, 2010, 68(4): 464-476.
- [153] 黄威, 牛若芸. 基于集合预报和支持向量机的中期强降雨集成预报试验. *气象*, 2017, 43(9): 1110-1116.
- [154] 孔庆燕, 史旭明, 金龙. 基于粒子群-支持向量机定量降水集合预报方法. *数学的实践与认识*, 2017, 47(5): 219-225.
- [155] Herman G R, Schumacher R S. Using reforecasts to improve forecasting of fog and visibility for aviation. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(2): 467-482.
- [156] 赵华生, 黄小燕, 黄颖. ECMWF集合预报产品在广西暴雨预报中的释用. *应用气象学报*, 2018, 29(3): 344-353.
- [157] Gagne D J, McGovern A, Xue M. Machine learning enhancement of storm-scale ensemble probabilistic quantitative precipitation forecasts. *Weather and Forecasting*, 2014, 29(4): 1024-1043.
- [158] Herman G R, Schumacher R S. Money doesn't grow on trees, but forecasts do: Forecasting extreme precipitation with random forests. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(5): 1571-1600.
- [159] 门晓磊, 焦瑞莉, 王鼎, 等. 基于机器学习的华北气温多模式集合预报的订正方法. *气候与环境研究*, 2019, 24(1): 116-124.
- [160] Ahijevych D, Pinto J O, Williams J K, et al. Probabilistic forecasts of mesoscale convective system initiation using the random forest data mining technique. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(2): 581-599.
- [161] Gagne D J, McGovern A, Haupt S E, et al. Storm-based probabilistic hail forecasting with machine learning applied to convection-allowing ensembles. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(5): 1819-1840.
- [162] Hamill T M, Whitaker J S, Mullen S L. Reforecasts: an important dataset for improving weather predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(1): 33-46.
- [163] Hamill T M, Hagedorn R, Whitaker J S. Probabilistic forecast calibration using ECMWF and GFS ensemble reforecasts. Part II: Precipitation. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(7): 2620-2632.
- [164] Hagedorn R, Hamill T M, Whitaker J S. Probabilistic forecast calibration using ECMWF and GFS ensemble reforecasts. Part I: Two-meter temperatures. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(7): 2608-2619.
- [165] Guan H, Cui B, Zhu Y. Improvement of statistical postprocessing using GEFS reforecast information. *Weather and Forecasting*, 2015, 30(4): 841-854.
- [166] Wilks D S. Enforcing calibration in ensemble postprocessing. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018, 144(710): 76-84.

# 集合敏感性分析在北半球中纬度高影响天气中的应用

郑明华<sup>1</sup> 杜钧<sup>2</sup> Brian A. Colle<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>美国加利福尼亚大学圣地亚哥分校斯克里普斯海洋研究所, 美国 加利福尼亚 92093; <sup>2</sup>美国国家海洋和大气管理局国家环境预报中心, 美国 马里兰 20740; <sup>3</sup>美国纽约州立大学石溪分校海洋与大气科学学院, 美国 纽约 11794)

**摘要:** 总结回顾了集合敏感性分析 (ESA) 在诊断中纬度高影响天气预报不确定性中的应用。作为一个简单高效且不需要大量计算资源的方法, 集合敏感性分析主要被应用在中纬度气旋、台风或飓风的温带转换, 以及在强对流过程中诊断预报误差和不确定性的来源。集合敏感性方法极有灵活性, 可以根据实际需要改变不同的预报变量和初始场。在对2010年美国东岸圣诞节暴风雪的分析中, 集合敏感性分析通过三种形式来诊断了预报不确定性的初值敏感性, 即基于EOF分析的敏感性、预报差别的敏感性, 以及基于短期预报误差的向前积分敏感性回归。三种方法证实气旋路径的不确定性主要和位于美国南部大平原的短波槽初始误差相关。此外, 气旋强度的不确定性还和产生于北太平洋向下游延伸的罗斯贝波列相关。集合敏感性分析方法对于分析中纬度气旋的不确定性、诊断初值敏感性、分析误差发展机制都非常有效。

集合敏感性分析也被应用于分析台风/飓风的温带气旋转换过程的不确定性。在对2019年美国首个主要登陆台风Dorian的分析中发现, 加拿大CMC的集合预报主要不确定性来自于强度的不确定性, 而这个不确定性与初始时刻的大尺度环流型有关, 较连贯的信号可以追溯至东北太平洋的前倾槽。而NCEP和ECMWF的不确定性主要在于气旋位置的东北—西南向移动, 而敏感性主要和飓风系统本身 (即其北部低压区和中纬度槽) 的锁相有关。分析结果进一步验证了集合敏感性分析对诊断模式之间的不一致性, 以及模式成员之间不一致性的不确定性来源和发展过程的可靠性。

集合敏感性分析方法综合了集合预报、资料同化和敏感性分析, 因此对于资料同化技术改进、诊断模式误差 (或者缺陷)、附加 (目标) 观测最优策略, 以及评估观测对预报的影响等都有重要意义。同时可以更有效地利用集合预报信息, 帮助预报员提高情景意识, 最终减少高影响天气预报中的决策失误。

**关键词:** 集合预报, 高影响天气, 集合敏感性分析, 温带气旋, 台风的温带气旋转换

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.006

## Applications of Ensemble Sensitivity Analysis to High-Impact Weather Systems in the Middle Latitudes of Northern Hemisphere

Zheng Minghua<sup>1</sup>, Du Jun<sup>2</sup>, Brian A. Colle<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego, CA 92093

<sup>2</sup> National Centers for Environmental Prediction, NOAA, MD 20740

<sup>3</sup> School of Marine and Atmospheric Sciences, State University of New York at Stony Brook, NY 11794)

**Abstract:** In this article, we provide a short review on the applications of ensemble sensitivity analysis (ESA) to high-impact weather events in mid-latitude of Northern Hemisphere. As an efficient and computationally inexpensive method, ESA has been applied to diagnose the forecast uncertainties in the extratropical cyclones, typhoons/hurricanes and their extratropical transitions, convective processes, etc. This method is very flexible: one can adjust its forecast metrics and/or state vectors based on the practical needs. ESA was applied in three different ways to diagnose the uncertainty in predicting a high-impact winter storm in December 2010 based on the choice of forecast metrics: sensitivity using the EOF approach, sensitivity using run cycle difference, and forward sensitivity regression using short-range forecast errors. All these three approaches confirmed that the track's uncertainty for this cyclone was linked to the initial uncertainty in the short-wave trough over the southern Great Plains based on the 50-member ECMWF ensemble. Moreover, the cyclone intensity uncertainty was associated with the trough and ridge systems embedded in a Rossby wave train over the Northeast Pacific and the central U.S. Therefore, the ESA method is very robust for midlatitude cyclones in analyzing their forecast uncertainty, determining initial-condition sensitive regions, and diagnosing

收稿日期: 2019年10月22日; 修回日期: 2020年1月7日  
第一作者: 郑明华 (1983—), Email: mzheng@ucsd.edu

the mechanism for the error growth.

ESA has also been used to analyze the uncertainty in typhoons/hurricanes and their ET processes. Through the application to the first major landfall hurricane Dorian in 2019, Canadian CMC ensemble showed the largest uncertainty in the intensity forecast among three ensemble systems during the transition time and this uncertainty was associated with the onset large scale circulation. Coherent sensitivity signals can be traced back to the positively tilted trough over the Northeast Pacific. In contrast, the uncertainties in NCEP and ECMWF ensemble were associated with the along-track southwest(northeast)ward shifting. ESA approach found this track uncertainty was more attributed to the cyclone itself, particularly to the phasing between its northern part and its leading edge midlatitude trough. The applications to Dorian further emphasized the value of ESA in diagnosing model disagreement, member inconsistency, and the origin and development of these uncertainties for extremely high-impact weather events.

To sum up, ESA combines ensemble forecasting, data assimilation, and forecast sensitivity. Therefore, it has great potential in improving data assimilation, diagnosing model deficiency, and evaluating observational impact. On the other hand, it can efficiently utilize ensemble information, help forecasters to enhance situational awareness, and contribute to benefit the decision makers.

**Keywords:** ensemble forecasting, high-impact weather event, ensemble sensitivity analysis, extratropical cyclone, extratropical transition

## 0 引言

北半球的冬季高影响天气和中纬度气旋紧密相关,比如持续性寒潮、强风和强降水(雪)过程<sup>[1-4]</sup>。而春夏季强对流天气<sup>[5-6]</sup>和秋季的登陆台风/飓风及其相应的温带转换<sup>[7-8]</sup>会带来冰雹、强降水和强阵风,以及海水倒灌等高影响天气。这些灾害性天气严重影响交通出行、环境生态、人体健康以及区域经济。比如2015年美国东部的“2015年1月暴风雪”造成了数千航班延误、五个州的交通管制,以及2人遇难<sup>[9]</sup>等。因此,尽可能提高灾害性天气的预报尤其是中长期预报对于预警减灾至关重要。随着数值模式的发展和计算机能力的提高,高影响天气的预报也有了很大提升。这些提高很大程度可以归功于资料同化技术尤其是对卫星辐射同化的进步、模式分辨率的提高,以及物理参数化技术的发展。但是由于大气本身的可预报性上限以及高影响天气的复杂性,单一的数值模式对于预报这些和高影响天气相关的过程仍存在严重局限性,比如气旋低压中心强度、路径和起止时间等。因此,集合预报对于高影响天气预报的实际可预报性至关重要<sup>[10]</sup>。

集合预报的优势在于考虑到大气的不确定性本质,从而给预报员和公众提供一系列的可能方案,可以定量估计高影响天气预报的不确定性。由于数值预报本身是个初值问题<sup>[11]</sup>,所以主要的集合预报生成方法都是添加扰动来改变初值场,每一个改变过的初值场都可以用来进行时间积分,产生不同的预报结果。每一个时次集合预报的概率分布代表了不同时刻的不确定性<sup>[12]</sup>。很多学者分析了集合预报在预报高影响天气中的优势。但是众所周知,集合预报产品的价值并没有很好地被利用,主要原因在于缺少可以交流预报不确定性和评估集合预报错误及偏差的简单又客观的工具。在实际业务预报中,时效性给预报工作带来了很大的压力,而集合成员的存在相当于在时间和空间

的维度上又多了一个维度,导致用传统的方法提取集合预报的信息变得非常低效。而如果仅仅做集合预报平均的话就失去了集合预报的主要价值<sup>[13]</sup>。基于此,本文将总结一种简单高效分析集合预报的方法——集合敏感性方法在中纬度高影响天气中的应用。

Zhang<sup>[14]</sup>开始提出用基于误差和协方差的集合预报敏感性分析方法来研究一个发生于2000年1月24—25日的强气旋发展的动力机制和中尺度系统的结构。Zhang等<sup>[15]</sup>进一步用基于MM5的集合卡尔曼滤波资料同化系统来验证了集合预报的误差和协方差方法的意义和有效性。他们的结果发现集合卡尔曼滤波在减少大尺度的误差上最有效果而在模式边缘尺度上减小误差的效果有限。基于误差协方差的研究,Hawblitzel等<sup>[16]</sup>运用了集合相关性来检查2003年6月10—13日中尺度对流涡(MCV)的动力关系及可预报性。这些工作证明了运用协方差方法来推论动力关系以及初始场和预报变量之间的敏感性在中尺度系统中的可行性。

基于协方差分析,Torn等<sup>[17]</sup>进一步正式提出集合敏感性分析(ESA)的概念来应用于一个集合预报系统的分析场和预报场。通常来说,可以将一个在预报时刻的预报变量的矢量(或者叫响应函数 $J$ )线性回归在模式变量的初始时间或者更早的验证时刻上。而在某一时刻任一点的线性回归陡峭系数可以定义为集合预报敏感性。敏感值常常是一个 $N \times 1$ 的矢量 $(\partial J / \partial X)$ ,其中 $X$ 有 $N$ 个空间格点。这个方法综合了集合预报、资料同化以及敏感性分析。初始场敏感性的计算是根据预报产品的一个预报变量和分析场的任何变量而做的线性回归。计算的过程不需要计算伴随矩阵或者奇异变量方法,因此计算过程直接、简单且经济实惠。Ansell等<sup>[18]</sup>证明ESA通过分析场误差协方差矩阵而与伴随敏感性方法相关。集合敏感性分析可

以用来计算观测影响和确定附加观测的最优地方。但是和奇异向量分析以及伴随敏感性不同，这个方法同时吸收了分析误差、观测误差、动力误差增长以及资料同化的信息，可以为辅助观测提供一个最优策略。在Ancell等<sup>[18]</sup>中，集合敏感性分析和伴随敏感性分析被同时应用于北美西海岸的一个冬季环流场中。伴随敏感性发现的关键系统是中尺度低层大气随高度强烈“upshear”倾斜的结构。而ESA侧重于在分析时刻天气尺度的较连贯的特性（比如上层大气槽、中尺度温度梯度）而且只有轻度倾斜结构。McMurdie等<sup>[19]</sup>将集合敏感性分析应用到了探讨北太平洋登陆气旋的可预报性上。

很多的ESA研究主要是用来分析短期预报（小于3 d）和中小尺度系统（比如对流）<sup>[20-22]</sup>。比如，Bednarczyk等<sup>[21]</sup>证明集合敏感性分析可以应用于对流天气的高精度预报，而结果显示对流过程和一些天气尺度最相关，主要包括高层大气环流和底层热力过程的位置耦合。Chang等<sup>[23]</sup>第一次把集合敏感性分析方法用到了对两个太平洋爆发性气旋的中期天气预报分析。根据初始场扰动试验，他们发现集合敏感性分析能有效地预报成员之间气旋的中心气压和位置的差别。到目前为止，集合敏感性分析方法已经在很多集合预报的应用中用来推断一个预报变量和初始场的动力关系<sup>[8,19,21,23-27]</sup>。比如Torn等<sup>[7]</sup>用集合敏感性来研究了位于西太平洋的两个台风热带外转换。但是现有的研究大多是针对个例分析，缺少综述性文章，而综合性文章的缺少在某种程度上限制了这个方法的应用。

本文的目的在于总结集合敏感性分析的应用方法以及在不同极端天气中的结果。此外我们会讨论集合敏感性分析的验证和与其他敏感性分析方法的比较。在结论中会简略讨论将来的发展和应用方向。

## 1 方法

集合敏感性分析有不同版本<sup>[28]</sup>。Zheng等<sup>[2]</sup>提出了最简洁的版本，总结如下：

给定有M个成员的集合预报，任何预报变量J对一个初始场变量 $X_i$ 的敏感性可以定义为：

$$“Sensitivity” = \frac{cov(J, X_i)}{\sqrt{var(X_i)}}, \quad (1)$$

其中，J和 $X_i$ 分别是1×M对预报变量的集合评估和在第i个格点处初始变量 $X_i$ 的集合。cov代表J和 $X_i$ 基于集合成员的协方差；var是方差。由公式（1）定义的敏感性“Sensitivity”和预报变量J单位相同，代表如果初始状态变量 $X_i$ 改变一个标准差相应的预报变量J的变化量。

## 1.1 基于 EOF 分析的集合敏感性分析

为了计算集合敏感值，首先对集合预报变量进行经验正交函数EOF分析<sup>[29]</sup>。EOF分析运用在一个固定验证时间对海平面气压（MSLP）的集合预报扰动上，比如扰动可以是每个成员和集合平均的偏差。选定一个特定时间后，在预报的气旋周围可以选取一个方框作为验证区域，在这个区域里可以计算EOF的主成分。EOF分析的主要模态代表了验证区域内的预报不确定型的主要特点。而其他的预报变量，比如直接采用气旋的强度或纬度，即使不同成员有接近的数值，但是它们的结构和模态可能大不相同，而用主模态对应的成员主成分来做预报变量可以更好的显示天气系统的相似或者迥异特点<sup>[23,30]</sup>。因此跟每一个主模态对应的每个成员的主成分可以理解为是该成员和集合平均的差异在这个主模态上的投影。在这个应用中，每个成员的主成分值形成预报变量J。如果所分析的气旋处于EOF分析区域的中心，那相应的EOF模态通常代表了气旋的强度和位置的不确定性<sup>[2,23,30]</sup>。因此，基于EOF主模态和主成分作为预报变量的方法，ESA可以客观评估不确定性模态和初始时刻或者其他预报时次的状态的关系。Zheng等<sup>[2]</sup>将EOF分析的主成分正交化，因此主成分值为无量纲单位，并且方差为1.0。同时EOF模态的单位依然是预报变量的单位，反映了每一个EOF模态解释的方差量的开根号值。在预报变量方差为1.0且无量纲时，方程（1）简化为相关系数：

$$“Correlation” = \frac{cov(J, X_i)}{\sqrt{var(X_i)}\sqrt{var(J)}}, \quad (2)$$

所以方程（1）中的“Sensitivity”等价于（2）中的相关系数“Correlation”，J依然代表验证变量的集合。可见，在该应用中敏感性等于相关值。

## 1.2 基于预报差别的敏感性分析

集合敏感性在业务预报中的第二个应用方法是来诊断两个相邻预报对某个系统预报（比如气旋）的变化。某个预报变量的平均场在相邻两个初始场的变化可以用P来表示。而某个集合成员m在验证预报时次相较于集合平均的扰动值 $Y_m$ 可以投影在P上，从而得到投影值：

$$J_m^{dif} = \frac{\sum_{j=1}^N P_j Y_{mj}}{\sum_{j=1}^N P_j^2}, \quad (3)$$

其中，N是在验证区域的总格点数，而 $m=1, \dots, M$ 代表集合成员。因此方程（3）里的 $J_m^{dif}$ 可以作为方程（2）中的验证变量。相应根据方程（2）计算的敏感

性（相关）值可以理解为用来客观决定造成两次预报差异的不确定性来自哪里。

### 1.3 基于短期预报误差的向前敏感性回归方法

集合敏感性的另一个衍生方法是向前敏感性回归分析方法，该方法可以研究短期预报时次的偏差对同一集合预报中长期预报的影响。具体算法如下：1）假设一个集合预报的短期验证时刻为 $T_0$ 而初始时刻为 $(T_0 - \Delta T)$ ，在 $T_0$ 时刻的分析值和该短期预报的平均预报值之间的差别模态为 $Q$ 。该模态和验证时刻在 $T_0$ 的预报误差大小一致，只是符号相反；2）第 $m$ 个集合成员在该时次相对于集合平均的扰动可以用 $Z_m$ 表示。 $Z_m$ 在差别模态的投影可以表示如下：

$$J_m^{fwd} = \frac{\sum_{j=1}^N Q_j Z_{mj}}{\sum_{j=1}^N Q_j^2}, \quad (4)$$

方程（4）中的投影系数 $J_m^{fwd}$ （ $m = 1, \dots, M$ ）可以用来回归分析时次和其后预报时次跟气旋相关的任意变量 $X_i$ 上。因此，这个方法可以用来评估短期预报错误对其后气旋相关预报的影响。回归值可以理解为另一种形式的敏感性，称之为“向前集合回归值”（“Forward Ensemble Regression”）具体形式如下：

$$\text{“Forward Ensemble Regression”} = \alpha \frac{\text{cov}(J, X_i)}{\sqrt{\text{var}(J)}}, \quad (5)$$

向前集合回归值和状态变量 $X_i$ 的单位一致。方程（5）中的 $\alpha$ 是一个尺度因子，用于将 $Q$ 的幅度和在 $T_0$ 时刻的回归值幅度保持一致。通常情况下，较早时刻的集合预报更适用于该方法中的状态变量计算，因为集合成员之间的短期预报不确定性相对于较晚时次的预报更大可以减少计算噪音。

由方程（5）表示的集合敏感性是一般形式集合敏感性方法的补充，该方法可以在业务预报中更好地诊断基于同一套模式结果的早期预报的错误对随后时次的影响。

## 2 应用总结

### 2.1 中纬度气旋

本节主要总结敏感性分析方法在2010年12月圣诞节后的一次强气旋过程中的运用。更多具体分析请参考文献Zheng等<sup>[2]</sup>。

2010年美国圣诞节（12月25日）之后爆发了一次暴风雪，该暴风雪由一次强气旋过程引发，较强的斜压不稳定性有利于气旋的发展和加深，在验证时刻2010年12月27日00时，中心气压在24 h内下降了近30 hPa。

Zheng等<sup>[2]</sup>利用上一节提到的三种集合敏感性方法来诊断这次高影响气旋过程。根据ECMWF的50个成员的MSLP预报，分析发现在验证时刻2010年12月27日12时，集合预报的不确定性较大（图1a）。对5.5 d预报的EOF分析发现，第一模态是在气旋中心附近的一个单极（图1b），异常最大值为-12 hPa，解释了近一半的方差。第二个模态是西南至东北方向接近对称的偶极子（图1c），解释了近1/3的方差。因此第一模态可以理解为预报成员之间最大的不确定性是气旋的强度，对应图1b的主成分值如果为正，则代表该成员预报的气旋在此时刻较强；相反若某成员主成分值为负，则代表该成员预报了较弱的气旋。第二模态的物理意义是代表了气旋位置在西南至东北方向的不确定性，或者是沿着气旋路径的不确定性。若某成员对应该模态的主成分为正，则代表该成员预报的气旋会更接近陆地，因此会对人口密集的美国东海岸带来更大影响；反之，则代表气旋很快入海，对东海岸影响较小。因此虽然第二模态解释较小误差，但它却有较实际的社会经济影响。

采用1.1节中的方法，图2显示了EOF前两个模态主成分对Z500环流场的敏感性。在验证时刻（图2a）第一模态和位于美国东海岸的深槽负相关（ $< -0.9$ ），可以理解为如果该槽加深即500 hPa高度值（Z500）减小，则EOF1模态加强。同时，敏感性在下游西太平洋的脊上显示为正值，物理意义是如果该脊加强即Z500增加，则EOF第一模态也加强。所以在初始时刻，气旋的强度和上游500 hPa槽及其下游脊的强度成正相关。敏感区域随着时间前推向西南方向追溯至北太平洋的低压中心（图2e），在-84 h和-108 h（图2d和2e）形成从太平洋延伸至美国东海岸正负交替的波列状。图2a~2e证实气旋的整体强度和上游的大尺度环流型有关。

在验证时刻（图2f），EOF第二模态的敏感值虽然也和位于美东的深槽及下游脊相关，但是仔细观察会发现负敏感值位于该槽的西南，而正敏感值位于其下游脊的西边，因此降低槽西南部的高度值，同时增加下游脊西南部的高度值会增强EOF2模态。这样的物理意义是如果槽向西南移动下游脊也向西移动，EOF2正模态加强（图2a），气旋会向陆地更接近，给美国东岸带来更大经济影响。

图2h~2g显示了第二模态的敏感性更加区域化，在接近初始场的一108 h，敏感值和位于美国西南的一个短波槽负相关。同时在从-108 h到验证时刻的过程中，敏感值存在类似于罗斯贝波列的下游效应：即上游的敏感区发展→减弱，对应下游的敏感值产生

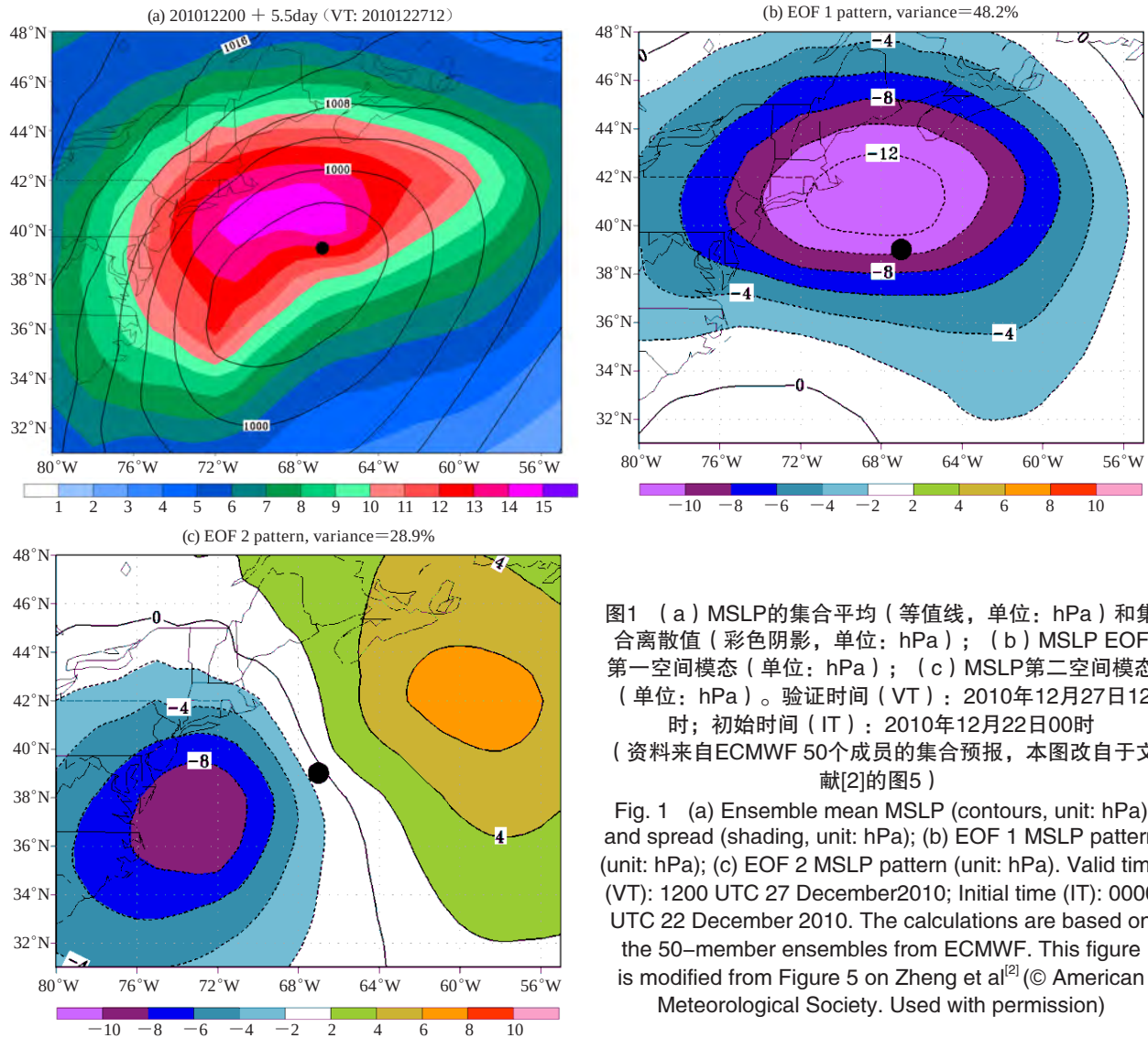


图1 (a) MSLP的集合平均 (等值线, 单位: hPa) 和集合离散值 (彩色阴影, 单位: hPa); (b) MSLP EOF第一空间模态 (单位: hPa); (c) MSLP第二空间模态 (单位: hPa)。验证时间 (VT): 2010年12月27日12时; 初始时间 (IT): 2010年12月22日00时 (资料来自ECMWF 50个成员的集合预报, 本图改自于文献[2]的图5)

Fig. 1 (a) Ensemble mean MSLP (contours, unit: hPa) and spread (shading, unit: hPa); (b) EOF 1 MSLP pattern (unit: hPa); (c) EOF 2 MSLP pattern (unit: hPa). Valid time (VT): 1200 UTC 27 December 2010; Initial time (IT): 0000 UTC 22 December 2010. The calculations are based on the 50-member ensembles from ECMWF. This figure is modified from Figure 5 on Zheng et al<sup>[2]</sup> (© American Meteorological Society. Used with permission)

→发展<sup>[31]</sup>。因此和第二模态对应的敏感值虽然在幅度上小于第一模态的值, 但却也是显著且有清晰物理意义的。

本次暴风雪个例的预报存在极大不确定性, 比如直到3.5 d之前集合预报的离散值还达到13 hPa (图3a)。模式成员之间对于气旋中心的位置可以有近2000 km的区别。而从-2.5 d (图3b) 开始, 集合预报的离散度减少40%, 而模式成员之间也更趋于一致, 即更接近东海岸。图3c显示了2.5 d集合平均MSLP和3.5 d预报的区别。可以清楚地看到2.5 d预报更向西西南接近, 类似于图1c中的EOF2 模态。

为了研究什么系统造成了2.5 d预报和3.5 d预报的差异, Zheng等<sup>[2]</sup>利用章节1.2 中的方法来计算和图3c预报差对MSLP和Z500的敏感性。从图4可以看出, 预报差别场的敏感性可以追溯至美国南部平原的短波槽西部及其上游相邻的脊。虽然3.5 d的预报和图

2f~2j中的预报大不相同, 但敏感值所甄别的系统大致相符, 即源自美国西南在南部平原发展的短波槽的西移及加深会影响气旋相对于美国东岸登陆的位置。同时MSLP的敏感区域可以追溯至气压倒槽的位置 (图4c, 美国得克萨斯州东部), 在从图4d至4a, 以及图4h至4e的过程中, 敏感区值的发展也存在明显的“上游消下游长”的下游发展效应, 和图2f~2h结果一致。

从以上两种敏感性方法的结果来看, 从美国南部平原发展的短波槽以及对应的地面低压系统是决定气旋中心是否更接近人口密集的美国东北海岸的关键。为了验证在敏感区域的短期预报误差是否能迅速发展并且最终影响验证区域的气旋位置, Zheng等<sup>[2]</sup>应用了向前敏感回归方法来确定24 h对于位于得克萨斯州的短波槽误差对随后预报的影响。图5结果显示初始的短波槽“西南弱的正误差以及东北强的负误差”在

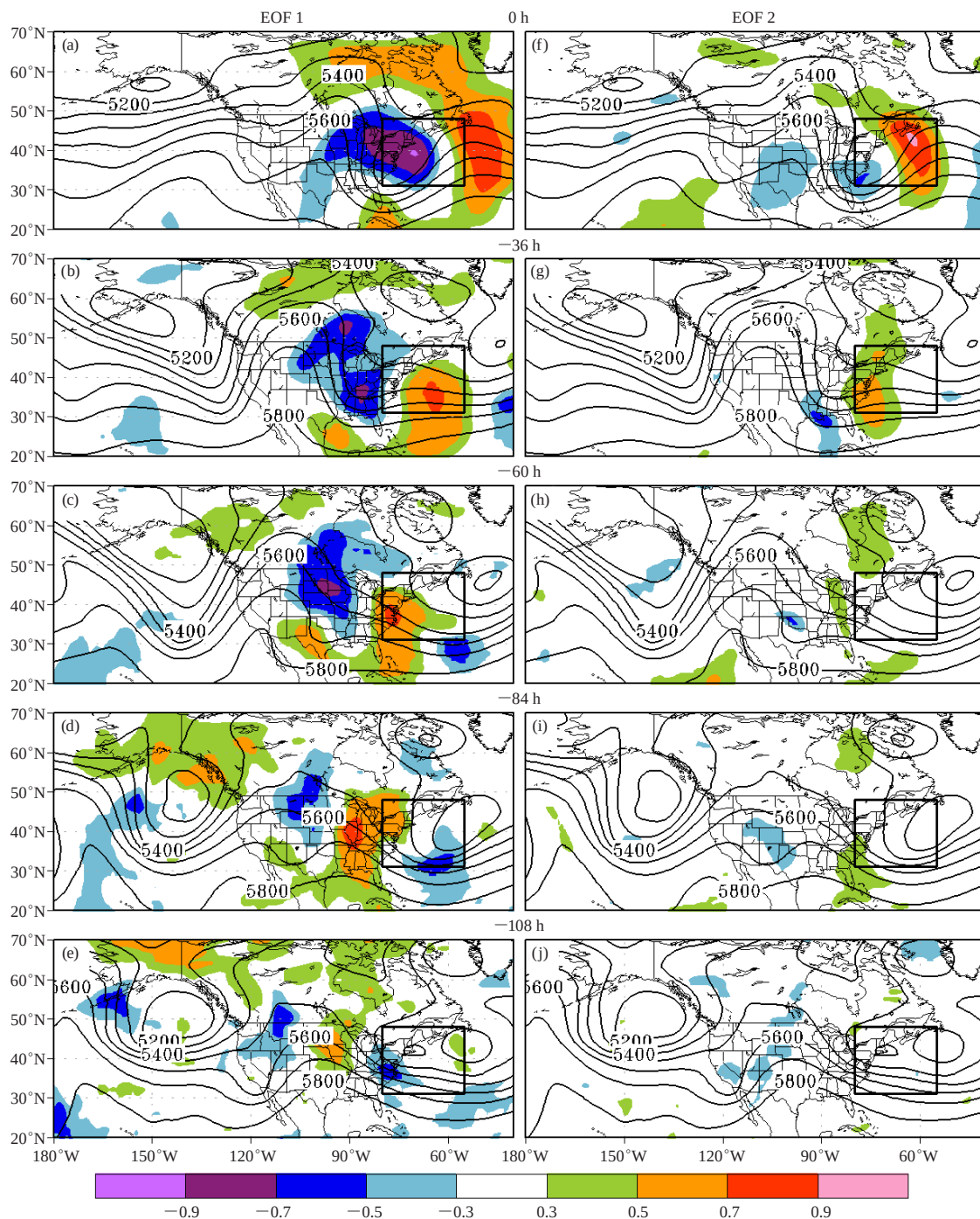


图2 (a~e) EOF1主成分对500 hPa高度场的敏感性 (彩色阴影); (f~j) EOF2主成分对500 hPa高度场的敏感性 (彩色阴影)。等值线对应于集合平均的500 hPa高度场。验证时次(0 h): 2010年12月27日12时; 初始时刻: 2010年12月22时 (本图改自于文献[2]的图6)

Fig. 2 (a~e) Sensitivity (shading) of EOF PC1 to Z500; (f~j) Sensitivity (shading) of EOF PC2 to geopotential height. Contours are ensemble mean of Z500. VT (0 h): 1200 UTC 27 December 2010; IT: 0000 UTC 22 December 2010. This figure is modified from Fig. 6 on Zhenget al<sup>[2]</sup> (© American Meteorological Society. Used with permission)

两天半内加倍, 在验证时刻向西—西南方向靠近, 也就是更接近实际分析结果, 这和Li等<sup>[27]</sup>对中国西南涡路径预报通过改变敏感区初值的数值模拟结果是一致的。由于初始场的回归场和短期误差的符号相反, 所

以这个结果证实如果在敏感区域订正初始场误差, 最后的预报结果会更加接近分析值, 即气旋中心更向西西南方向靠近, 对东海岸带来更大的影响。

在Zheng等<sup>[2]</sup>之后, 更多的研究开始应用集合

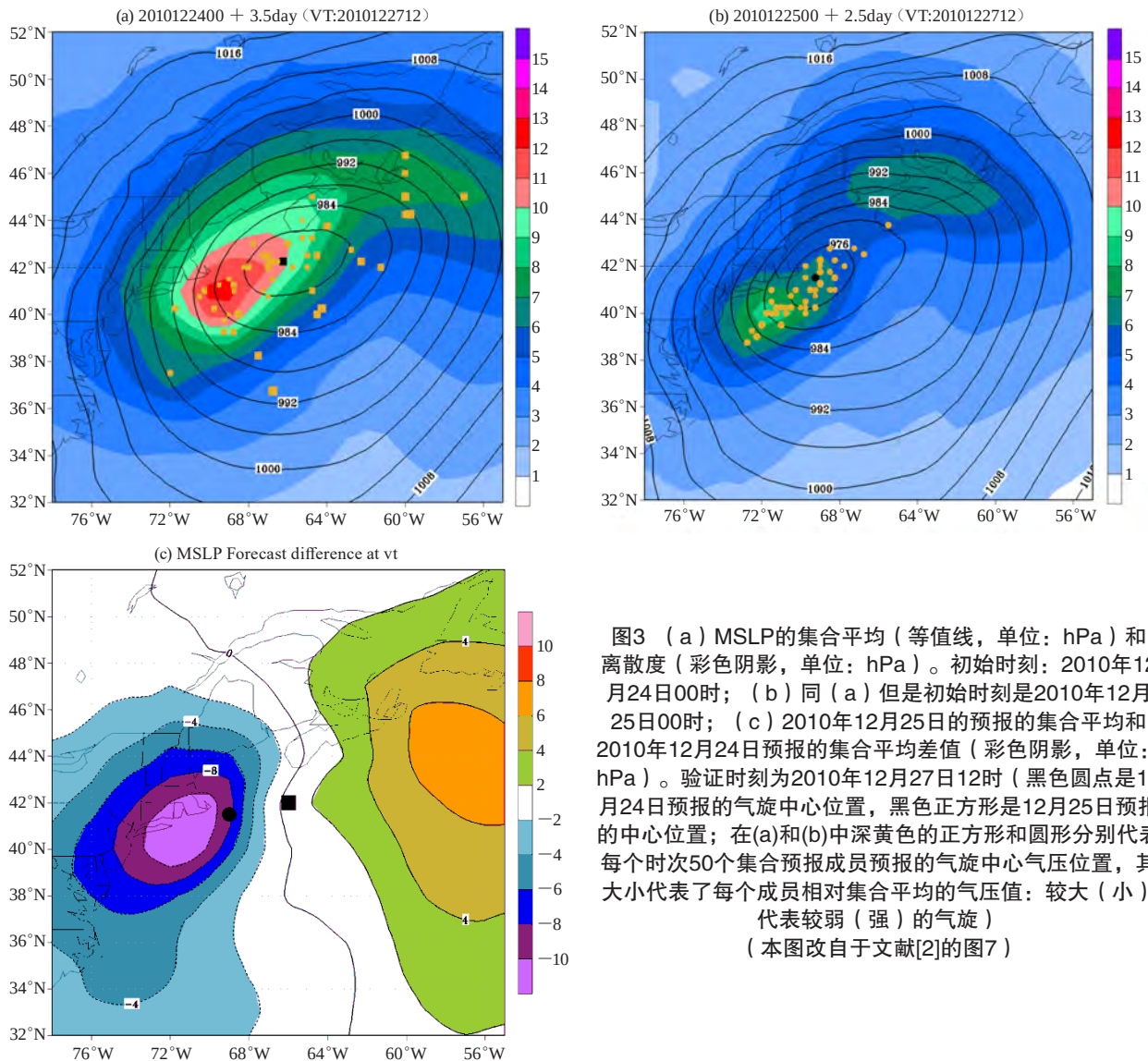


图3 (a) MSLP的集合平均(等值线, 单位: hPa)和离散度(彩色阴影, 单位: hPa)。初始时刻: 2010年12月24日00时; (b) 同(a)但是初始时刻是2010年12月25日00时; (c) 2010年12月25日的预报的集合平均和2010年12月24日预报的集合平均差值(彩色阴影, 单位: hPa)。验证时刻为2010年12月27日12时(黑色圆点是12月24日预报的气旋中心位置, 黑色正方形是12月25日预报的中心位置; 在(a)和(b)中深黄色的正方形和圆形分别代表每个时次50个集合预报成员预报的气旋中心气压位置, 其大小代表了每个成员相对集合平均的气压值: 较大(小)代表较弱(强)的气旋)(本图改自于文献[2]的图7)

Fig. 3 (a) Ensemble mean MSLP (contours, unit: hPa) and spread (shading, unit: hPa) for forecast initialized at 0000 UTC 24 December 2010, (b) Ensemble mean MSLP (contours, unit: hPa) and spread (shading, unit: hPa) for forecast initialized at 0000 UTC 25 December 2010, (c) Difference between ensemble mean MSLP initialized at 0000 UTC 25 December 2010 and that initialized at 0000 UTC 24 December 2010 (shading, unit: hPa). VT: 1200 UTC 27 December 2010. Solid black circle is the ensemble mean position of surface cyclone forecast by cycle 0000 UTC 25 December 2010 and solid black square is that forecast by cycle 0000 UTC 24 December 2010. In (a) and (b), dark yellow squares/dots represent cyclone positions forecast by 50 individual ensemble members and their sizes represent cyclone central pressure relative to ensemble mean central pressure with larger (smaller) size representing weaker (stronger) cyclone.

This figure is modified from Fig.7 on Zheng et al<sup>[2]</sup> (© American Meteorological Society. Used with permission)

敏感性方法来分析中纬度气旋的不确定性。比如 Greybush等<sup>[32]</sup>将集合敏感性方法用于诊断2015年1月25—28日在美国东部的强气旋过程。基于NCEP GEFS 预报的气旋路径, 他们的结果发现靠岸的降水强度梯度的不确定性和气旋位置相关, 而气旋路径的误差源自24 (48) h前位于亚拉巴马(堪萨斯)的Z500深槽的移动(图3<sup>[32]</sup>)。西移的槽会给纽约城带来更多的降雪。McMurdie等<sup>[19]</sup>利用集合敏感性来分析了2008/2009年

和2009/2010年在美国西海岸登陆的气旋的可预报性, 结果发现, 处在发展阶段的并且从西南路径登陆的气旋存在最大的初始条件敏感性。来源于西北方向, 移速较慢, 结束于40°N以南的气旋存在最大的可预报性, 并且和它们处在的发展阶段无关。而离散度较大且初始敏感性较低的气旋, 即可预报性较差的通常是成熟的气旋, 它们的较低可预报性很可能来自于较大的初始场离散度而不是扰动的快速增长。他们的结果

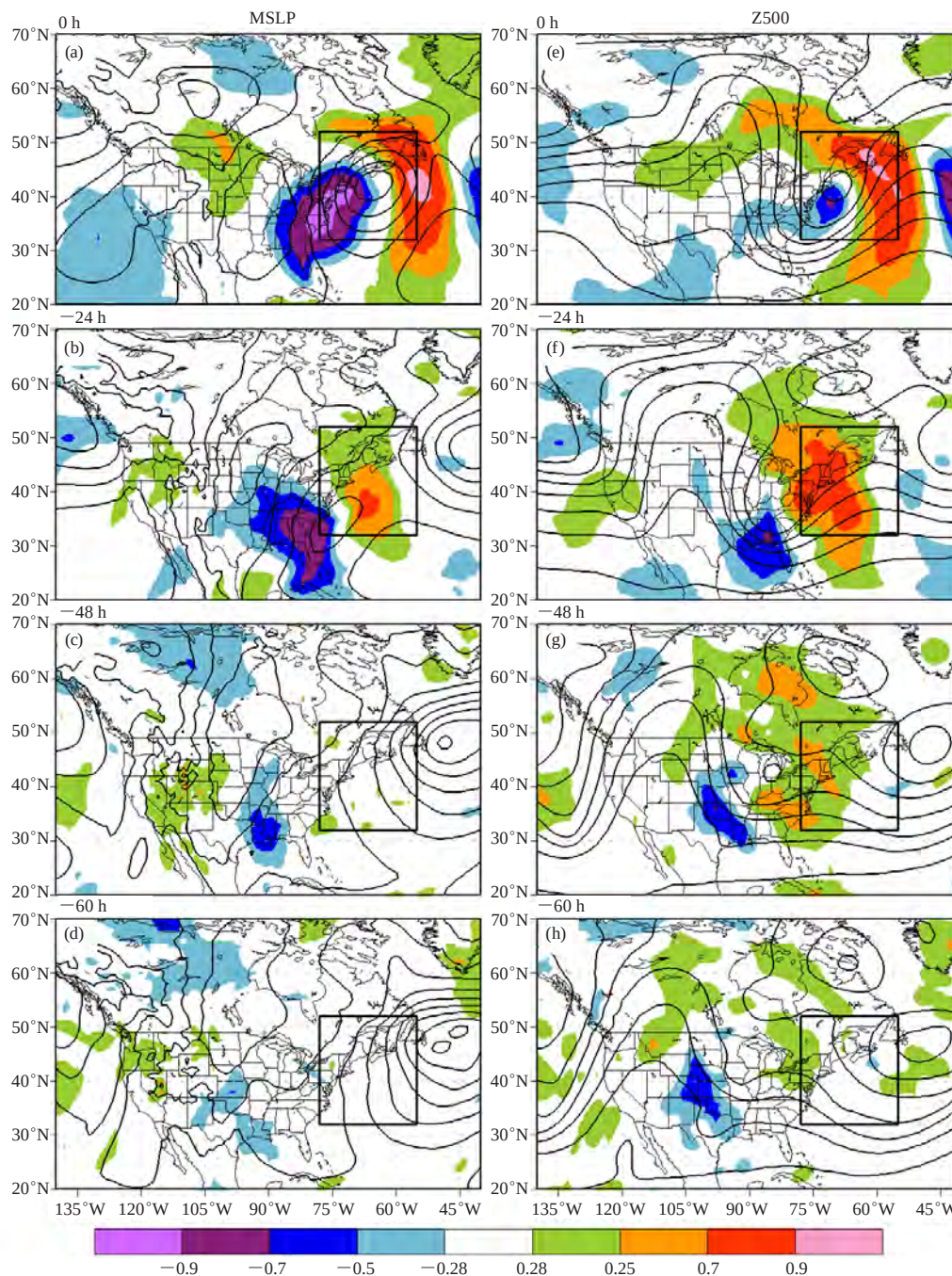


图4 基于图3c预报差别的投影系数对MSLP (a~d) 和Z500 (e~h) 的敏感性 (等值线分别为集合平均的MSLP和Z500)。验证时刻 (0 h): 2010年12月27日12时; 初始时刻: 2010年12月24日00时  
(本图改编自文献[2]图8)

Fig. 4 Sensitivity (shading) of projection coefficients on forecast jump pattern to MSLP (a~d) and Z500 (e~h). Contours are ensemble mean of MSLP and Z500, respectively. VT (0 h): 1200 UTC 27 December 2010; IT: 0000 UTC 24 December 2010. This figure is modified based on Fig. 8 on Zheng et al.<sup>[2]</sup> (© American Meteorological Society. Used with permission)

也强调了和特定天气特点有关的可预报性较差的一些气旋可以通过改进观测资料的覆盖面来提高。

## 2.2 飓风和台风的温带转变过程

飓风和台风的预报往往存在更大的不确定性和模式的不一致性, 而登陆的飓风和台风是天气现象中对

社会经济影响最大, 公众关注度最强的天气现象。集合敏感性分析在飓风和台风的研究中也有重大价值。

Torn等<sup>[28]</sup>将集合敏感性方法应用到WRF集合预报中来研究2004年台风Tokage和2005年台风Nabi的动力过程和温带转变过程的可预报性, 基于集合敏

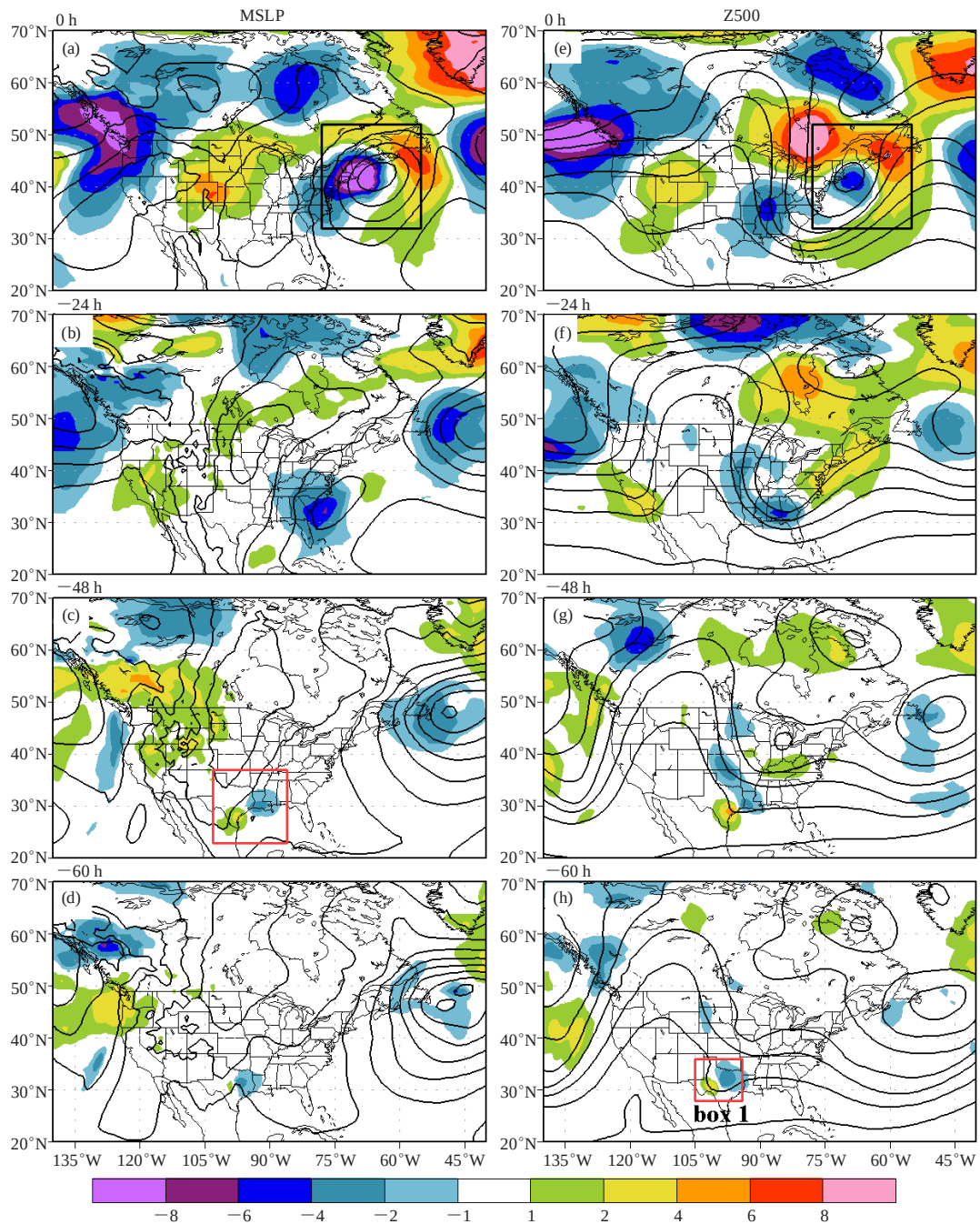


图5 基于短期预报误差(黑色方框)的投影系数的MSLP(a~d, 单位: hPa)和Z500的敏感回归值(e~h, 单位: dm)。验证时刻(0 h): 2010年12月27日12时; 初始时间: 2010年12月24日00时  
(本图改自于文献[2]中图11)

Fig. 5 Sensitivity regression (shading) of projection coefficients on forecast error pattern over box 1 to MSLP (a~d, unit: hPa) and Z500 (e~h, unit: dm). Contours are ensemble mean of MSLP and Z500, respectively. VT (0 h): 1200 UTC 27 December 2010, IT: 0000 UTC 24 December 2010. This figure is modified based on Fig.11 on Zheng et al<sup>[2]</sup> (© American Meteorological Society. Used with permission)

感性,发现台风Tokage具有较大的集合离散度和初始场的敏感性,而台风Nabi刚好相反。在两个个例中,48 h预报的最低气压和MSLP的预报误差都和热带气旋的位置以及和与热带气旋相互作用的中纬度低压槽有关系。此外他们还发现,对于台风Tokage的预报,

仅仅在敏感区域吸收一个最大影响的观测记录,即在蒙古的一个探空气球的上层纬向风观测,可以将48 h预报的MSLP改变10 hPa以及Z500改变60 m。Keller<sup>[33]</sup>应用集合敏感性分析来研究热带气旋温带转化和罗斯贝波列下游效应的关系。通过分析台风Choi-Wan

(2009)和飓风Hanna(2008),他们发现在Choi-Wan(Hanna)中扰动动能Ke的收支项增加一个标准差会引起下游扰动动能最大值增加36%<sup>[24]</sup>。这个关系和台风Choi-Wan与中纬度高空槽锁相位,以及台风Hanna的二次加强而增强。Nystrom等<sup>[34]</sup>也用到了集合敏感性分析方法来研究飓风Joaquin(2015),分析发现路径不确定性源自距初始位置600~900 km低层的引导气流,而飓风Joaquin北边大约300 km内的初始场对飓风强度的不确定性贡献最大。

Zheng等<sup>[2]</sup>中总结的基于EOF主成分分析的方法,也可以用于诊断台风和飓风的温带转换过程。用2019年的一次主要飓风Dorian作为个例,研究了如何用基于EOF的集合敏感性分析来诊断、不同模式之间的一致性和模式成员之间的不确定性。

在2019年9月初,起源于大西洋中部的飓风Dorian对巴哈马和整个美国的东部七个州带来了重大的影响,同时它也是2019年第一个主要的飓风。9月1日,飓风Dorian加强为五级飓风并且在Bahamas登陆,中心最低气压为911 hPa,阵风风速最大值为355 km/h;9月4日,“Dorian”开始作为2级飓风沿着美国东大陆北部移动。9月6日中午,已降级为一级飓风的“Dorian”在North Carolina的Cape Hatteras登陆,中心气压为956 hPa,最大阵风风速约150 km/h;此后,“Dorian”开始了向温带气旋的转变过程,同时它快速地东北方向移动。

选取2019年9月7日00时作为验证时刻,来分析初始时刻为9月2日00时(5 d预报)不同预报中心对这次温带气旋转换过程的预报敏感性。美国NOAA天气预报中心对此预报时刻分析的低压中心位置为(37.5°N, 71.2°W),最低气压为982 hPa。

图6a、6c、6e显示了三个预报中心NCEP、CMC、ECMWF对MSLP预报的集合平均和离散度。NCEP和ECMWF的集合平均显示了向西南—东北方向狭长的低压区,同时离散大值区也呈现西南至东北的狭长方向。NCEP(ECMWF)的中心位于38.5°N(37.0°N),70.0°W(71.5°W),最低气压为988.5 hPa(999.0 hPa)。CMC的气压显示了一个更加集中的低压区,最大的集合离散值也集中在低压中心附近,中心位置在(38.0°N, 68.0°W),较NCEP和ECMWF的预报都离东海岸更远,最低气压为998.5 hPa。图6b、6d、6f显示了对每个中心进行EOF分解的第一模态。其中NCEP和ECMWF的EOF1正模态均显示西南方向的正异常和东北方向的负异常,代表在这两个预报中心的集合预报主要的不确定性为沿着西南至东北的路径预报。而CMC的EOF1正模态为

略微偏西的正异常,代表的CMC集合预报的不确定性为偏东更弱的低压中心(正模态)或者偏更强的气旋中心(负模态)。而后者更加接近分析值。

图7和图8显示了和图6对应的EOF主成分对MSLP和Z500的集合敏感性。在验证时刻,NCEP和ECMWF的敏感值在低压中心的西南方向为正、东北方向为负,与相应图6中的EOF1正模态一致。而在Z500场中敏感值的均为槽西南正值、槽下游为负,相邻下游脊东部为正的正负交替型,显示了台风转换为温带气旋的东北移动加深和对应中纬度的槽及其下游脊的东北移动相关。而敏感值可以追溯到接近初始时刻飓风北部区域位势的降低(图7g和图8d),即和其移动方向的高空槽与飓风低压系统的相位有关。这个结果和Keller<sup>[33]</sup>结论相符合。而在初始时刻,对应CMC EOF1的MSLP敏感值主要为低压中心略偏西的正值区,这点和NCEP和ECMWF的结果不同。而对应Z500的敏感值为在高空槽略偏西的正值区,代表该槽的略微东移和减弱会造成气旋的减弱入海。CMC的敏感值可以追溯至位于东太平洋的离岸前倾槽的底部以及位于美国中西部脊的北部。因此CMC的敏感区来自于东北太平洋的大尺度环流耦合型,大尺度环流耦合配置主要影响转换气旋的强度。

值得关注的是三个模式对这次台风温带气旋转换的预报存在较大不确定性,综合强度和位置而言NCEP的集合预报更加接近分析值,而CMC的预报虽然较大偏差,但是第一模态和其他中心完全不同,增加了集合预报的预测方案的多样性。同时集合敏感性追溯的初始敏感系统也存在非常好的一致性,有利于在业务预报中提高预报员更好的理解天气系统的动力机制,实际可预报性以及更高效提炼集合预报信息。

## 2.3 其他应用

敏感性分析在最近几年也被广泛用于中尺度强对流天气的集合预报中。Bednarczyk等<sup>[21]</sup>根据WRF EnKF系统研究了2012年4月发生于美国得克萨斯州北部的一次强对流过程。集合敏感性分析显示此次对流天气最重要初始敏感系统是上层低压槽的位置和下层气团的热力特点。集合预报中产生最强和最弱对流的成员的特点和集合敏感性分析的结果一致:即预报更加东移的天气尺度系统的成员会产生更强的对流。他们的结果还显示基于不同对流表征参数比如雷达反射率,垂直速度和降水的敏感性结果一致。Hanley等<sup>[20]</sup>采用降水作为验证变量,用集合敏感性分析研究发现初始时刻上层PV场对于飏线对流的预报至关重要。其他研究比如Hill等<sup>[35]</sup>和Torn等<sup>[22]</sup>也将敏感性分析用到了对于不同环流型下干线对流的预报敏感性。

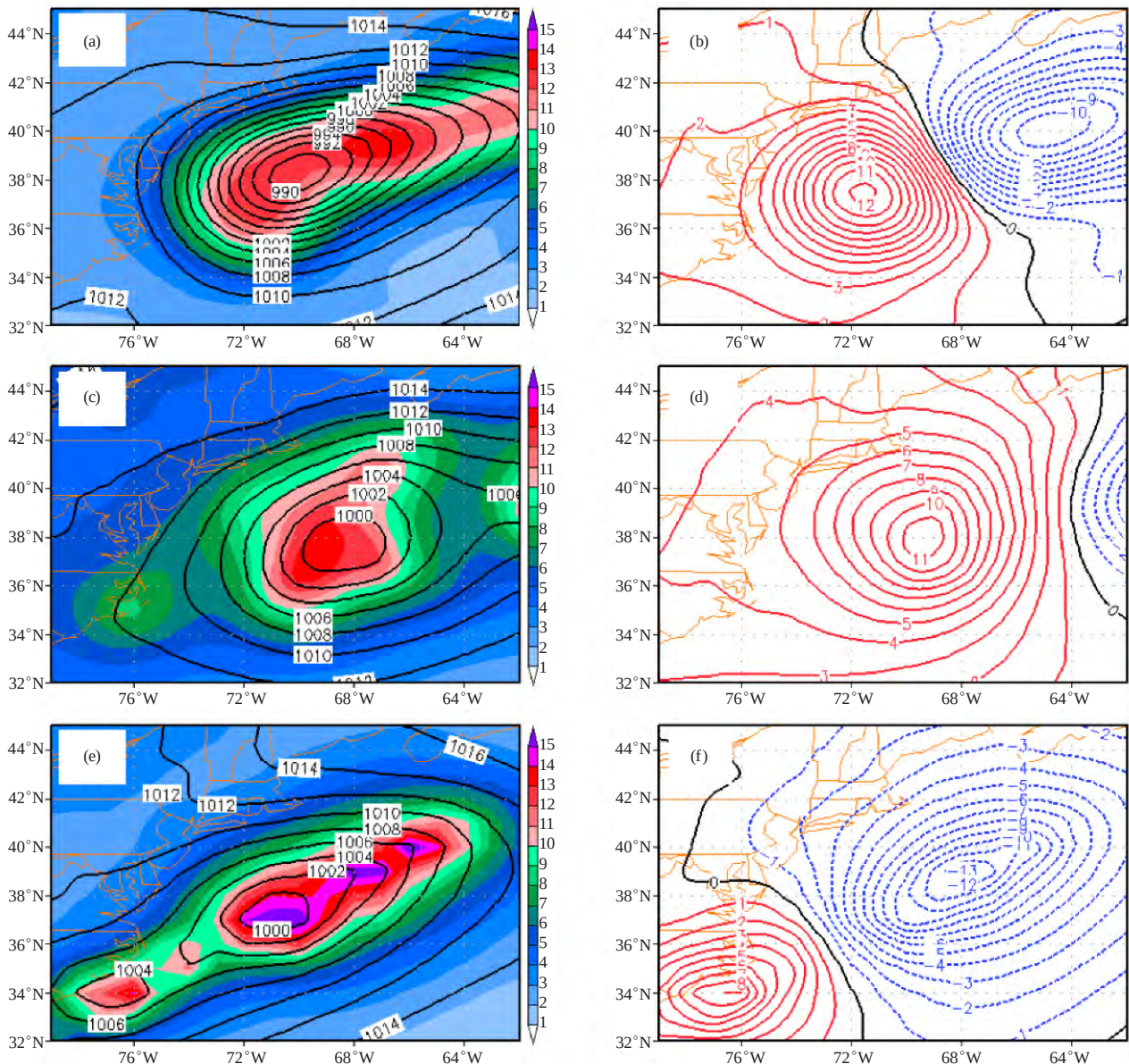


图 6 (a) NCEP GEFS 20个成员MSLP预报的集合平均(等值线, 单位: hPa)和集合离散值(彩色阴影, 单位: hPa); (b) MSLP EOF 第一空间模态(单位: hPa, 解释方差: 52.5%); (c~d)同(a~b)但是资料来自于CMC的20个成员(EOF1解释方差: 47.7%); (e~f)同(a~b)但是资料来自于ECMWF的50个成员(EOF1解释方差: 44.7%)。验证时间(VT): 2019年9月7日00时; 初始时间(IT): 2019年9月2日00时

(图片来源: [http://breezy.somas.stonybrook.edu/CSTAR/Ensemble\\_Sensitivity/EnSense\\_Main.html](http://breezy.somas.stonybrook.edu/CSTAR/Ensemble_Sensitivity/EnSense_Main.html))

Fig. 6 (a) Ensemble mean MSLP (contours, unit: hPa) and spread (shading, unit: hPa) based on NCEE GEFS 20-member ensemble, (b) EOF 1 MSLP pattern corresponding to (a), unit: hPa. EOF1 explained 52.5% of the total variance, (c~d) Same as (a~b) but for the CMC 20-member ensemble. EOF1 explained 47.7% of the total variance, (e~f) same as (a~b) but for ECMWF 50-member ensemble. EOF1 explained 44.7% of the total variance. Valid time (VT): 0000 UTC 7 September 2019, Initial time (IT): 0000 UTC 2 September 2019. Figure source: [http://breezy.somas.stonybrook.edu/CSTAR/Ensemble\\_Sensitivity/EnSense\\_Main.html](http://breezy.somas.stonybrook.edu/CSTAR/Ensemble_Sensitivity/EnSense_Main.html)

一些文章将集合敏感性分析也应用在其他天气系统中, 比如Parker等<sup>[36]</sup>利用集合预报分析方法来确定26次Greenland阻塞高压的15 d预报的敏感性。他们的结果发现这些阻塞高压对遥远区域的一些前提条件, 比如500 hPa和50 hPa的高度场相关, 尤其是一些低频

气流。一般来说, 这些阻高对热带异常的敏感性大于对极地的敏感性, 而最强最持久的敏感性来自于初始到达太平洋横跨北美的罗斯贝波包。Torn<sup>[8]</sup>用敏感性分析来评估初始场误差对一次2006年非洲东风波强度和位置预报的影响。他的结果发现东风波的强度的短

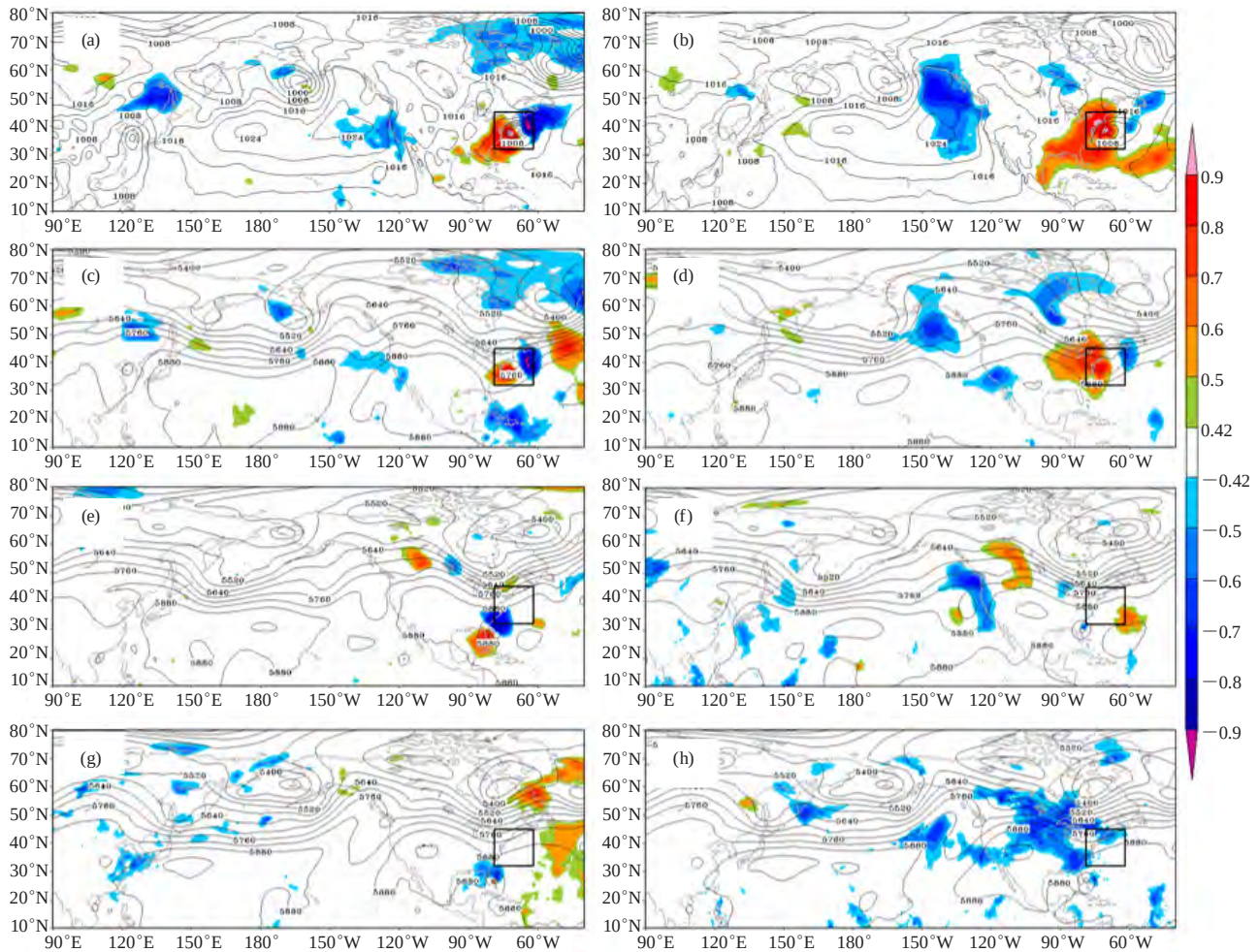


图7 (a) NCEP EOF1主成分对MSLP在验证时刻的敏感性(彩色阴影); (b) 同(a)但是采用了CMC的集合预报; (c, e, g) NCEP EOF1主成分对500 hPa高度场在验证时刻(5 d预报)、2.5 d预报、12 h预报的敏感性, 彩色阴影; (d, f, h) 同(c, e, g)但是采用CMC的集合预报。(等值线在(a~b)中表示集合平均的MSLP, 其他对应于集合平均的500 hPa高度场; 初始时刻为2019年9月2日00时)

Fig. 7 (a) The ensemble sensitivity (shaded) corresponding to NCEP EOF1 PCs at verification time; (b) same as (a) but for CMC 20-member ensemble; (c, e, g) Same as (a) but for Z500 sensitivity (shaded) at verification time (5-day forecasts), 2.5-day, and 12-hour, respectively. (d, f, h) Same as (c, e, g) but for CMC 20-member ensemble. Black contours in a-b (c-h) represent ensemble mean MSLP (Z500). Initial time (IT): 0000 UTC 2 September 2019

期预报误差和东风波本身的热力廓线以及对流层中层环流的初始强度相关, 而较长期的预报对热力环境最为敏感。

### 3 讨论

#### 3.1 基于初始场扰动试验的验证

集合敏感性方法的基础是集合预报, 也因此同样会受到集合样本数的影响。同时大多应用都基于线性化的关系, 因此研究集合敏感性的适用空间时间尺度以及同其他方法的比较都是很值得探讨的话题。

初始场扰动试验是用来验证敏感区域的最有效的方法。Torn等<sup>[28]</sup>将不同幅度的扰动添加在原始场的敏感区域, 来研究比较基于敏感性分析的台风最低气

压和路径预报变化和基于扰动试验所得实际预报的变化。对于48 h的最低气压预报, 敏感性扰动试验可以改变不超过8 hPa的中心气压变化。同时, 基于敏感性分析的初始场调整可以将台风的气压场均方根误差减少近60%。他们的结果验证了敏感性分析方法在48 h内的可靠性。同时由于受非线性影响, 实际扰动变化远小于基于敏感性分析的气压较大负变化(比如小于-8 hPa)。

Chang等<sup>[23]</sup>对两个位于北太平洋的温带气旋个例进行了敏感性分析, 同时利用扰动集合试验来对初始场的敏感区域进行验证。他们的结果证实虽然这些气旋发展过程具有很强的非线性, 但是他们误差增长在

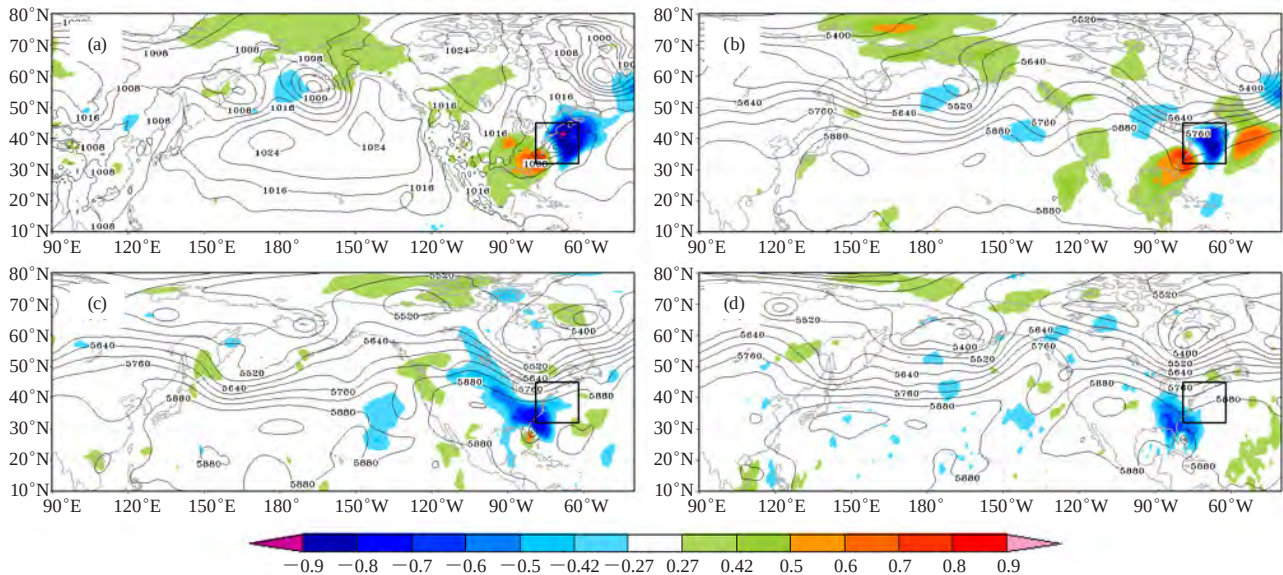


图8 同图7 (a, c, e, f) 但是基于ECMWF 50个成员的集合预报  
(注: 阴影部分表示集合敏感性)

Fig.8 Same as Fig.7 (a, c, e, f) but for ECMWF 50-member ensemble

中期预报可能仍然是准线性的。因此集合敏感性分析即使在中期预报尺度依然能显示较连贯且清晰的敏感场。基于敏感值的初始场扰动试验的确能够在中期预报中成功改变气旋的发展周期, 只是需要注意应用基于EOF的主成分来进行敏感性分析比气旋的参数结果更加连贯。他们也发现扰动试验证实的变化比敏感性分析预报的变化较小。

Torn等<sup>[28]</sup>以及Chang等<sup>[23]</sup>的扰动试验分别验证了敏感性分析的在短期和中期预报的可靠性。Chang等<sup>[23]</sup>第一次将敏感性分析试验引入了中长期, 并且证实了EOF分析在增加应用时间尺度的重要性。扰动试验的缺点是昂贵性和耗时, 但是随着计算机技术的发展, 扰动性试验对于研究敏感性方法, 尤其是重大灾害性天气可预报性的分析中较值得推广。

### 3.2 集合敏感性的验证: 和 ETKF 敏感区域的比较

集合卡尔曼变换 (Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF)<sup>[37-38]</sup>也被用于辨别上游的敏感区域, 在冬季风暴侦察 (Winter Storm Reconnaissance, WSR)<sup>[39]</sup>中用于确定最可能提高下游预报的飞机观测区域。Ansell等<sup>[18]</sup>推导了ETKF和ESA的关系, 他们认为通过一个合适的模, ESA可以等价于ETKF。同时ESA不需要转换矩阵且允许通过统计可信区间来解决与样本数相关的误差。Zheng<sup>[40]</sup>认为两种方法独立发现的敏感区域可以互相验证。因此ETKF的预报高分分布图可以作为一种较经济的方式来验证集合敏感分析方法。图9和图10比较了集合敏感分析方法和ETKF

在定量分析下游预报敏感值的空间分布和随时间发展的过程。该个例对应于Majumdar等<sup>[38]</sup>的case 15, 基于ECMWF 50个成员的10 d预报。初始时刻为2007年2月15日, 预报验证时刻为2月25日 (0 h)。

对于此次个例, 集合平均在验证时刻的850 hPa显示了一个清晰的气旋, 相应的EOF1 主模态显示了一个西南负—东北正的偶极子异常, 代表向西南移动的气旋, 并解释了44.2%的850 hPa位势高度的方差。图9显示了EOF1 成员主成分对500 hPa 高度场的敏感性。在-108 h (图9d) 即预报时刻5.5 d, 有一系列的敏感信号开始于印度的西部 (“X”), 穿过印度南部和中部 (“C+”、“C-1”和“C-2”) 以及日本 (“B+”), 进入白令海峡的北部 (“B-1”)。在-72 h (图9d), 信号“C+”、“C-2”以及“B+”随着天气系统东移。但是信号“X”接近原位。信号“C-1”和“B-1”消散或减弱。同时有几个下游信号产生比如“B-2”、“A+”和“A-”。在-36 h, 大多数敏感信号东移。但是信号“X”和一部分的“C+”依然在原位。上游的信号 (比如“C+”、“C-2”和“B+”) 或保持之前的大小或减弱, 而下游的信号 (比如“A+”、“B-”和“A-”) 都得以加强。而其中最东部的下游信号即信号“A-”发展最强。与此同时, 该信号更下游发展出了新的敏感信号“D+”和“D-”。在验证时刻0时, 最强的敏感信号“A-”和“D+”处于美国中部和东部, 和位于美国中部上层深槽紧密联系。同时, 其下游的信号“D-”也已经增强。对比之下, 上游的信号

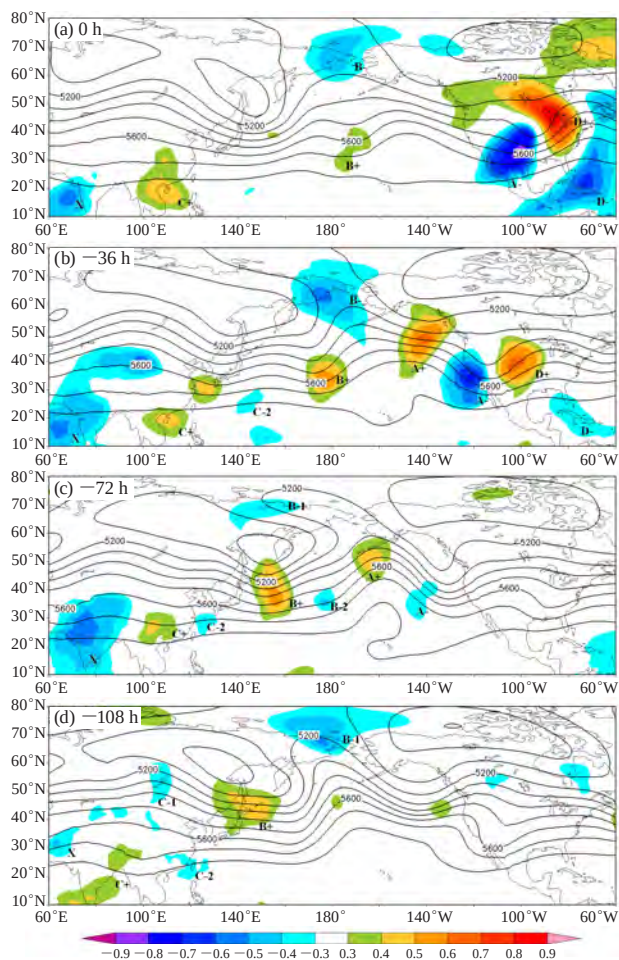


图9 EOF1的成员主成分对500 hPa高度场的敏感值（彩色阴影）

(a~d) 分别为验证时刻(0 h)、-36 h、-72 h和-108 h。集合预报资料为初始时刻为2007年2月15日00时的ECMWF 50个成员的预报；预报验证时刻为2007年2月25日00时。黑色等值线为各时次集合平均的500 hPa高度场。每个字母和随后的数字代表各个敏感区域

Fig. 9 Ensemble sensitivity (shades) of EOF PC 1 to Z500 at verification time (a), -36 h (b), -72 h (c) and -108 h (d). Ensemble forecasts are based on 50 ECMWF members initialized at 0000 UTC 15 February 2007. Verification time: 0000 UTC 25 February 2007. Black contours are ensemble mean Z500. The letters and their following numbers denote sensitivity pieces

比如“C-2”和“A+”已经消失其他的比如“B+”和“B-”均减弱。信号“X”和“C+”几乎保持原位。

图10显示了相应时次的ETKF信号，其物理意义可以理解为由于吸收三层（850 hPa, 500 hPa, 200 hPa）的 $u$ ,  $v$ ,  $T$ 观测而减少的预报误差。最大值代表可以用做策略性飞机侦测的最优区域。值得注意的是由于ETKF用了能量模，ETKF的信号只显示正值。在-108 h（图10d），ETKF存在4个较大的信号，从东往西分别为“X”、“C”和“B”，

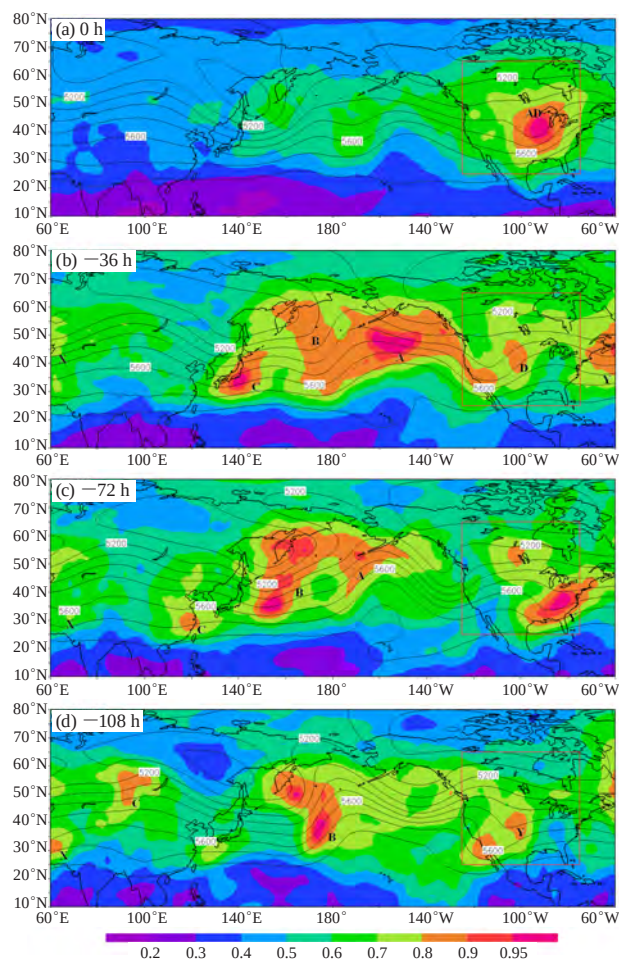


图10 ETKF计算的由于850 hPa/500 hPa/200 hPa的 $u$ ,  $v$ ,  $T$ 观测影响的预报误差方差减小。(a~d) 分别对应于验证时刻：0 h、-36 h、-72 h和-108 h。集合预报资料和图9一致，基于2007年2月15日的10 d预报。橙色方框代表了验证区域。字母代表了单个敏感区域

Fig. 10 ETKF reduction of wind forecast error variance due to adaptive obs of ( $u$ ,  $v$ ,  $T$ ) at 850/500/200 hPa for verification time (a), -36 h (b), -72 h (c) and -108 h (d). Ensemble forecasts are based on 50 ECMWF members initialized at 0000 UTC 15 February 2007. Verification time: 0000 UTC 25 February 2007. Orange frame shows verification region. The letters denote sensitivity regions

和图9d相应字母对应的集合敏感性分析信号相当。此外在美国中部还存在一个信号“Y”。在-72 h（图10c），之前的“B”信号下游长生了一个心的较大信号“A”，大致对应于图9c中的“A+”。但是信号“Y”在图9c中仍无对应的集合敏感性信号。在-36 h（图10b），ETKF信号“X”依然原位。上游的信号“C”和“B”变弱，而下游信号“A”在此时变得最强。“A”下游发出了信号“D”。ETKF信号“Y”，并不对应任何集合敏感性信号，此时已移到验证区域的东部。在0 h，上游的ETKF信号“C”和

“B”退散。最强的信号是在验证区域“A”和“D”合并生成的信号，和图9a显示的信号一致。但是图9a中的“D-”信号在ETKF的信号中并不存在。

根据图9和图10显示的两种方法的结果，ETKF和ESA的信号“D”对应“D+”、“A”对应“A+”、“A-”都发展并传播到了验证区域。在此过程中，下游发展的特征在两种方法中也较为一致。个别静止信号比如“X”也在两种方法中都大致相当。但是，这两种方法在一些时次一些遥远的信号存在分歧，比如ETKF在-108 h、-72 h、-36 h在验证区域附近都存在信号“Y”；但是集合敏感性分析并不存在此信号。这里我们建议采用初始扰动试验来确定重要的信号和虚假的信号。值得提出的是，ESA提供的敏感值存在信号的正负相位信息，因此可以更好地显示和罗斯贝波包相关的下游发展效应，而ETKF有时并不能清晰显示或者会错过这个重要特点。

### 3.3 非线性的影响

集合敏感性方法建立在任意验证变量和初始场变量的线性关系上。由此推导的关系更适用于气流的线性关系更强的天气现象中，同时在时间尺度上最早的应用也仅仅是在短期的天气过程中。Chang等<sup>[23]</sup>发现用EOF成员主成分作验证矩阵的时候，集合敏感性方法可以延伸到更久天气尺度中。主要也是基于EOF分析往往是较大空间尺度的模态也是减噪的过程，因此模态和初始场的耦合关系更强。值得提出的是其他的敏感性分析方法，比如伴随敏感性<sup>[41]</sup>，也往往更适用于短期尺度（小于3 d）。因此在长时间尺度，高非线性的气流中，所有的敏感性方法都存在瓶颈。而基于EOF主成分的集合敏感性方法至少提供了可以用于中尺度较可行的新颖思路。未来的工作中，机器学习方法中的高级分类方法可以用来对天气系统提前进行归类，也许可以将集合敏感性方法推广至更久时间尺度（10~14 d）。

## 4 总结和未来工作

本文总结分析了集合敏感性分析在诊断中纬度高影响天气预报不确定性中的应用。作为一个有效简单且不需要大量计算资源的方法，集合敏感性分析已经被广泛地应用在中纬度高影响天气的预报不确定性分析中，包括气旋、台风和温带气旋转换，对流天气以及阻塞高压等。集合敏感性方法极具灵活性，可以根据需要改变或组合任意预报变量和初始场。在对2010年美国东岸圣诞节暴风雪的分析中，集合敏感性分析通过三种形式来分别诊断了预报的不确定性的初值敏感性，其中包括基于EOF分析的敏感性、预报差别的敏

感性，以及基于短期预报误差的向前积分敏感性回归方法。

在对2010年美东暴风雪的预报不确定性分析中，ECMWF对气旋强度5.5 d的集合预报不确定性和位于太平洋东北地区的槽以及美国中部的脊相关。同时，气旋路径的不确定性和位于美国大平原南部的短波槽相关。基于MSLP预报差的敏感性也证实两个时次预报中气旋的路径的变化和大平原南部短波槽的初始误差有很大关系。而基于初始误差的向前敏感性方法进一步验证了和该短波槽有关的短期预报的初始误差发展并且对两个时次预报的气旋位置的转变贡献最大。因此，集合敏感性试验对于分析中纬度气旋的不确定性，诊断初值敏感性，分析误差发展机制都非常有效。

集合敏感性分析也被应用于分析台风/飓风的温带气旋转换过程的不确定性。我们在对2019年美国首个主要登陆台风Dorian的分析中发现，CMC的集合预报主要不确定性来自于强度的不确定性，而这个不确定性与初始时刻的大尺度环流型有关，较连贯的信号可以追溯至东北太平洋的前倾槽。而NCEP和ECMWF的不确定性主要在于气旋位置的东北—西南移动，而敏感性主要和飓风系统本身，即其北部低压区和中纬度槽的锁相有关。分析结果进一步验证了利用集合敏感性分析对诊断模式之间的不一致性，以及模式成员之间不一致性的不确定性信号来源和发展的有效性。

集合敏感性和其他集合预报工具一样，往往受限于集合样本影响，因此对其敏感区域的验证是一个重要话题。最可靠的验证方法是初始场扰动试验，但是该方法较为耗费时间和计算资源。我们还探讨了用ETKF来交叉验证集合敏感性，在一个美国中部东部的高影响天气的预报中，二者的结果总体较为一致，进一步证明了集合敏感性分析在短期至中期预报中的可靠性。

值得注意的是集合敏感性最适用于线性和准线性的过程中，强烈的非线性过程会影响敏感值的可靠性。但是Zheng等<sup>[2]</sup>证实即使是发展最强烈的气旋，在使用EOF分析主成分为验证变量的情况下，集合敏感性可以在5~7 d的预报中使用。因此基于集合预报性的试验非常有希望应用于和大尺度环流相关的高影响天气的中长期预报中。

集合敏感性分析方法综合了集合预报、资料同化和敏感性分析，对于资料同化技术改进、诊断模式错误、辅助性观测最优策略，以及观测对预报的影响评估都有重要意义。同时可以更有效地利用集合预报信息，帮助预报员提高情景意识，最终减少在对高影响天气预报中的失误。未来的工作可以着眼于和资料同

化的结合,以及对观测影响的评估上。

致谢:感谢石溪大学Edmund Chang教授对相关研究的指导和讨论;感谢来自迈阿密大学的Sharan Majumdar教授提供ETKF的原始算法以及提供相关讨论。

## 参考文献

- [1] Colle B A, Rojowsky K, Buonaito F. New York City storm surges: climatology and an analysis of the wind and cyclone evolution. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(1): 85-100.
- [2] Zheng M, Chang E K, Colle B A. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(5):1133-1156.
- [3] Layer M, Colle B A. Climatology and ensemble predictions of nonconvective high wind events in the New York City metropolitan region. *Weather and Forecasting*, 2015, 30(2): 270-294.
- [4] Colle B A, Booth J F, Chang E K. A review of historical and future changes of extratropical cyclones and associated impacts along the U.S. east coast. *Current Climate Change Reports*, 2015, 1(3): 125-143.
- [5] 王文晶. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. *南方农业*, 2017, 11(23): 106-107.
- [6] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题. *气象*, 2017, 43(6): 641-652.
- [7] Torn R D, Hakim G J. Initial condition sensitivity of western Pacific extratropical transitions determined using ensemble-based sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(10): 3388-3406.
- [8] Torn R D. Ensemble-based sensitivity analysis applied to African easterly waves. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(1): 61-78.
- [9] Zheng M, Chang E K, Colle B A, et al. Applying fuzzy clustering to a multimodel ensemble for US East Coast winter storms: Scenario identification and forecast verification. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(3): 881-903.
- [10] 杜钧, 陈静. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革. *气象*, 2010, (11): 1-11.
- [11] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20(2): 130-141.
- [12] Du J, Mullen S L, Sanders F. Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(10): 2427-2459.
- [13] Du J, Zhou B. A dynamical performance-ranking method for predicting individual ensemble member performance and its application to ensemble averaging. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(10): 3284-3303.
- [14] Zhang F. Dynamics and structure of mesoscale error covariance of a winter cyclone estimated through short-range ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(10): 2876-2893.
- [15] Zhang F, Meng Z, Aksoy A. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part I: Perfect model experiments. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(2): 722-736.
- [16] Hawblitzel D P, Zhang F, Meng Z, et al. Probabilistic evaluation of the dynamics and predictability of the mesoscale convective vortex of 10-13 June 2003. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(4): 1544-1563.
- [17] Torn R D, Hakim G J. Ensemble-based sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(2): 663-677.
- [18] Ancell B, Hakim G J. Comparing adjoint-and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(12): 4117-4134.
- [19] McMurdie L A, Ancell B. Predictability characteristics of landfalling cyclones along the North American west coast. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(1): 301-319.
- [20] Hanley K E, Kirshbaum D J, Roberts N M, et al. Sensitivities of a squall line over central Europe in a convective-scale ensemble. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(1): 112-133.
- [21] Bednarczyk C N, Ancell B C. Ensemble sensitivity analysis applied to a southern plains convective event. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(1): 230-249.
- [22] Torn R D, Romine G S, Galarneau Jr T J. Sensitivity of dryline convection forecasts to upstream forecast errors for two weakly forced MPEX cases. *Monthly Weather Review*, 2017, 145: 5, 1831-1852.
- [23] Chang E K, Zheng M, Raeder K. Medium-range ensemble sensitivity analysis of two extreme Pacific extratropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(1): 211-231.
- [24] Hakim G J, Torn R D. Ensemble synoptic analysis. In *Synoptic-Dynamic Meteorology and Weather Analysis and Forecasting*. American Meteorological Society, 2008: 147-161.
- [25] Sippel J A, Zhang F. Factors affecting the predictability of hurricane Humberto (2007). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 67(6): 1759-1778.
- [26] Matsueda M, Methven J, Pappenberger F, et al. The TIGGE project and its achievements. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(1): 49-67.
- [27] Li J, Du J, Zhang D L, et al. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(680): 766-82.
- [28] Torn R D, Hakim G J. Initial condition sensitivity of western Pacific extratropical transitions determined using ensemble-based sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(10): 3388-3406.
- [29] Hannachi A, Jolliffe I T, Stephenson D B. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: a review. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(9): 1119-1152.
- [30] Gombos D, Hoffman R N, Hansen J A. Ensemble statistics for diagnosing dynamics: tropical cyclone track forecast sensitivities revealed by ensemble regression. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(8): 2647-2669.
- [31] Chang E K. The impact of wave packets propagating across Asia on Pacific cyclone development. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(7): 1998-2015.
- [32] Greybush S J, Saslo S, Grumm R. Assessing the ensemble predictability of precipitation forecasts for the January 2015 and 2016 East Coast winter storms. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(3): 1057-1078.
- [33] Keller J H. Amplification of the downstream wave train during extratropical transition: sensitivity studies. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(4): 1529-1548.
- [34] Nystrom R G, Zhang F, Munsell E B, et al. Predictability and dynamics of Hurricane Joaquin (2015) explored through convection-permitting ensemble sensitivity experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 75(2): 401-424.
- [35] Hill A J, Weiss C C, Ancell B C. Ensemble sensitivity analysis for mesoscale forecasts of dryline convection initiation. *Monthly Weather Review*, 2016, 144: 11, 4161-4182.
- [36] Parker T, Woollings T, Weisheimer A. Ensemble sensitivity analysis of Greenland blocking in medium-range forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018, 144(716): 2358-2379.
- [37] Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(3): 420-436.
- [38] Majumdar S J, Sellwood K J, Hodyss D, et al. Characteristics of target areas selected by the Ensemble Transform Kalman Filter for medium-range forecasts of high-impact winter weather. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(7): 2803-2824.
- [39] Szunyogh I, Toth Z, Zimin A V, et al. Propagation of the effect of targeted observations: The 2000 Winter Storm Reconnaissance Program. *Monthly weather review*, 2002, 130(5): 1144-1165.
- [40] Zheng M. Growth of errors and uncertainties in medium range ensemble forecasts of U.S. East Coast cool season extratropical cyclones. *Stony Brook University*, 2016.
- [41] Doyle J D, Amerault C, Reynolds C A, et al. Initial condition sensitivity and predictability of a severe extratropical cyclone using a moist adjoint. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(1): 320-342.

# 集合敏感性在预报误差及可预报性研究中的应用进展综述

王毅<sup>1</sup> 代刊<sup>1</sup> 张晓美<sup>2</sup> 唐健<sup>1</sup> 周非凡<sup>3</sup> 马杰<sup>1</sup>

(1国家气象中心, 北京 100081; 2 中国气象局公共气象服务中心, 北京100081;

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 研究大气的可预报性和预报误差产生的原因, 对于改进数值预报, 提升业务预报技巧具有重要意义。集合敏感性基于具有流依赖特性的集合预报, 通过建立预报与初始场或前期预报大气状态之间的统计关系, 为揭示与预报对象可预报性相关的动力学特征及理解预报误差来源和传播机制提供了一种新方法。同时, 介绍了集合敏感性的定义和度量, 并综述了其针对典型天气系统和高影响天气事件研究的进展, 并讨论了该方法的优势和局限性。

**关键词:** 集合敏感性, 可预报性, 集合预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.007

## Research Progress in Study of Forecast Errors and Predictability Based on Ensemble Sensitivity

Wang Yi<sup>1</sup>, Dai Kan<sup>1</sup>, Zhang Xiaomei<sup>2</sup>, Tang Jian<sup>1</sup>, Zhou Feifan<sup>3</sup>, Ma Jie<sup>1</sup>

(1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Public Meteorological Service Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract:** Research on the atmospheric predictability and causes of forecast errors has important significance to improvements of numerical weather prediction and operational forecast skill. Based on flow-dependent ensemble, ensemble sensitivity determines relationships between forecasts and initial or early forecast atmospheric conditions. It provides a new methodology to reveal dynamic features relevant to the predictability of the forecast variable of interest and to understand origin of forecast errors with its propagation. This paper introduces the definition and measures of ensemble sensitivity and then reviews its application progress for typical weather systems and high-impact weather. Finally, the strength and limitation of the ensemble sensitivity is discussed.

**Keywords:** ensemble sensitivity, predictability, ensemble forecast

### 0 引言

近几十年来, 模式系统的改进与资料同化技术的发展使得数值模式预报的水平稳步提高<sup>[1,2]</sup>。然而, 大气是一个复杂的非线性系统, 任何初始的微小误差都会导致预报结果存在很大的不确定性<sup>[3]</sup>, 即大气的可预报性问题。Lorenz<sup>[4]</sup>提出了两类可预报性问题, 即与初始条件不确定性有关的第一类可预报性问题, 以及模式不确定性有关的第二类可预报性问题。

目前, 天气和气候的可预报性研究已经成为当代气象科学研究领域的前沿热点问题, 并从传统的可预

报性问题延伸至探讨研究预报结果不确定性(预报误差)产生的原因和机制, 并寻求减小预报不确定性的方法和途径<sup>[5-6]</sup>。敏感性分析是研究可预报性问题的重要方法之一, 旨在分析输入变量或模型的变化对所关心的变量的影响程度。就数值预报模式而言, 敏感性研究包括采用多种方法(如奇异向量法、卡尔曼滤波、伴随模式等)分析初始条件或模式(如物理参数化方案)对预报误差<sup>[7]</sup>、集合离散度<sup>[8]</sup>、动力过程<sup>[9-10]</sup>的影响。

集合预报是为了解决数值预报对初始条件微小误差的敏感性问题<sup>[11]</sup>, 已成为估计预报不确定性信息的重要工具。Evensen提出了集合卡尔曼滤波器(EnKF)方法<sup>[12]</sup>, 它利用集合成员估计预报误差的协方差矩阵, 再利用观测资料通过同化方法更新协方差矩阵, 得到分析集合成员, 构成了集合预报成员的初

收稿日期: 2019年8月6日; 修回日期: 2019年10月21日

第一作者: 王毅(1982—), Email: yiwang@cma.gov.cn

资助信息: 国家科技支撑项目(2015BAC03B01); 国家重点研发计划(2017YFC1502004)

始场。EnKF的一大优点就是其背景误差协方差的结构具有流依赖特征。集合敏感性分析方法是在EnKF基础上由Hakim等<sup>[13]</sup>提出的, 基于WRF模式采用EnKF生成集合分析场和预报场, 研究了温带气旋预报对相关大气状态量的敏感性。集合敏感性可以用于研究预报量与初始扰动以及前期预报状态量之间的关系, 探讨预报不确定性背后的动力学过程, 并且可以用于目标观测的敏感区识别<sup>[14-15]</sup>。Ansell等<sup>[16]</sup>比较了伴随敏感性和集合敏感性的关系, 发现基于集合敏感性得到的结果更能反映天气尺度的动力学演变特征。另外, 集合敏感性无需切线性和伴随模式, 计算量较小。Schumacher<sup>[17]</sup>首次将集合敏感性方法应用于采用奇异向量和随机物理过程扰动的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集合预报系统, 将集合敏感性方法的应用范围拓展至业务中心运行的集合预报模式。

近十年来, 集合敏感性分析这一新技术已被应用于不同尺度的天气系统和高影响天气的预报误差和可预报性研究, 如暴雨<sup>[18-21]</sup>、强对流<sup>[22-23]</sup>、阻塞高压<sup>[24-25]</sup>、温带气旋<sup>[26-27]</sup>、热带气旋<sup>[28-31]</sup>、东风波<sup>[32]</sup>、风速预报<sup>[33]</sup>等, 采用的集合模式以及集合敏感性的度量各有不同。本文将首先介绍集合敏感性方法, 然后对其在典型天气系统及高影响天气的预报误差和可预报性研究上的应用进行详细介绍, 最后对集合敏感性的优势和不足进行总结, 并展望其应用前景。

## 1 集合敏感性分析方法简介

Hakim等<sup>[13]</sup>在2008年提出了集合敏感性分析(Ensemble Sensitivity Analysis)方法, 其假设集合预报模式的初始(或某个时间的预报)场在某个点上的扰动与随后预报之间存在线性关系。通过建立预报量(因变量)和初始(或之前某个时刻的预报)扰动状态量(自变量)的线性回归方程, 将集合敏感性用线性回归方程的斜率来表示。根据定义, 集合预报如果有M个预报成员, 任一预报量J对初始时刻(或某个时刻的预报)扰动状态量 $X_i$ 的集合敏感性S定义为:

$$S = \frac{\partial J}{\partial X_i} = \frac{\text{cov}(J, X_i)}{\text{var}(X_i)}, \quad (1)$$

其中, J代表集合预报M个成员的M个预报量值, 是一维标量;  $X_i$ 代表模式区域范围内第i个格点上的M个状态量值, 是二维标量; cov表示J和 $X_i$ 之间的协方差, var表示状态量的方差。从公式(1)可以看出, S与状态量的方差成反比。

从气候角度来讲, 低纬地区的方差一般比高纬地区低, 因此会导致低纬地区的集合敏感性普遍高于高纬地区。为了消除这一差异, Garcies等<sup>[34]</sup>提出对集合

敏感性进行标准化, 标准化集合敏感性 $S_{\text{norm}}$ 定义为:

$$S_{\text{norm}} = \frac{\partial J}{\partial X_i} \cdot \sigma_{X_i} = S \cdot \sigma_{X_i}, \quad (2)$$

其中,  $\sigma_{X_i}$ 代表状态量的标准差。 $S_{\text{norm}}$ 表示状态量变化1个标准差引起的预报量的变化大小。标准化的优势是 $S_{\text{norm}}$ 的单位就是预报量的单位, 而且可以方便地比较预报量对于不同时效起报的不同状态量的敏感性, 从而找出对预报量影响最大的状态量或天气系统以及敏感区。

很容易证明, J和 $X_i$ 的相关系数与集合敏感性及标准化集合敏感性成正比:

$$\text{cor}(J, X_i) = \frac{\text{cov}(J, X_i)}{\sigma_J \cdot \sigma_{X_i}} = S \cdot \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_J} = \frac{S_{\text{norm}}}{\sigma_J}. \quad (3)$$

其中,  $\sigma_J$ 代表预报量的标准差。对于给定的某一时刻的预报量标量, 其标准差是固定的。因此, 可以将 $S_{\text{norm}}$ 简化为相关系数来表示集合敏感性。相关系数作为无量纲数, 能够反映状态量和预报量之间线性关系的强弱, 但是不能给出状态量对预报量的影响程度。

集合成员样本是有限的, 因此需要对集合敏感性进行统计显著性检验, 通常采用95%或99%的显著性水平来验证集合敏感性或相关系数。

## 2 集合敏感性研究进展综述

表1给出了基于集合敏感性的部分代表性研究及其所用的集合预报模式。可以看出, 集合敏感性研究大多数是基于EnKF及相关方法(如集合调整卡尔曼滤波, EAKF)生成的区域集合分析场及预报, 也有应用ECMWF全球集合预报模式的, 因为后者是当今预报水平较高的业务集合预报模式, 并且THORPEX交互式全球预报大集合(简称TIGGE)提供了所需的集合预报资料。由于ECMWF集合模式不是采用EnKF的

表1 集合敏感性的代表性研究及所用的集合模式特征与敏感性度量

Table 1 Representative research based on ensemble sensitivity and the characteristic of ensemble model used with measure of sensitivity

| 扰动方法或模式           | 水平分辨率/km   | 集合成员个数 | 敏感性度量             | 文献                                |
|-------------------|------------|--------|-------------------|-----------------------------------|
| EnKF              | 100        | 100    | S                 | Hakim等, 2008 <sup>[13]</sup>      |
| EnKF              | 45         | 90     | S                 | Torn等, 2009 <sup>[35]</sup>       |
| EnKF              | T85 (≈150) | 80     | cor               | Chang等, 2013 <sup>[26]</sup>      |
| ECMWF             | T399 (≈50) | 51     | cor               | Schumacher, 2011 <sup>[17]</sup>  |
| ECMWF             | 0.5° (≈50) | 51     | $S_{\text{norm}}$ | Parker等, 2018 <sup>[38]</sup>     |
| ECMWF             | T639 (≈32) | 51     | $S_{\text{norm}}$ | Zheng等, 2013 <sup>[27]</sup>      |
| EAKF              | 12, 4      | 50     | S                 | Bednarczyk等, 2015 <sup>[36]</sup> |
| EAKF              | 12, 4      | 96     | $S_{\text{norm}}$ | Wile等, 2015 <sup>[37]</sup>       |
| ECMWF, NCEP, UKMO | 1° (≈100)  | 96     | $S_{\text{norm}}$ | Quandt等, 2019 <sup>[25]</sup>     |

方法产生初始场，因此需要模式积分一定时间（一般为12~36 h）让集合预报反映流依赖特性。

集合敏感性不仅利用水平分辨率较粗的集合预报模式研究大尺度天气，也采用高分辨率模式来研究中小尺度对流天气。从集合敏感性的度量上来看，标准化集合敏感性 $S_{\text{norm}}$ 使用得更为广泛。下面，将分类阐述集合敏感性针对不同典型天气系统和高影响天气事件的研究进展。

## 2.1 针对温带气旋的集合敏感性研究

温带气旋是影响中高纬度大范围天气变化的一个重要天气系统，受斜压不稳定驱动，能够造成激烈的天气现象，如极端暴雨（雪）、强风暴和风暴潮等。集合敏感性方法主要用于研究温带气旋强度、位置及路径的不确定性问题。Hakim等<sup>[13]</sup>提出集合敏感性方法时就是对美国一次春季温带气旋开展的研究，基于EnKF利用WRF模式生成了包含100个成员的集合分析场，研究了预报时效为24 h的温带气旋的海平面气压中心值（预报量）对初始分析场（高度场、风场等状态量）的敏感性。

爆发性温带气旋相比一般性的温带气旋可预报性更低。Chang等<sup>[26]</sup>基于包含80个成员的集合模式研究了两次太平洋温带气旋。他们将集合敏感性方法拓展至了中期时效（7.5 d）。除了将海平面气压最小值作为预报量，还对气旋中心附近的海平面气压作了经验正交函数（EOF）分解，再将EOF主分量作为预报量。结果表明，利用EOF主模态揭示的敏感性信号更加清楚。Zheng等<sup>[27]</sup>利用ECMWF模式分析了北美一次冬季温带气旋强度和路径的可预报性，也利用EOF方法对海平面气压进行了分解，EOF的第一模态、第二模态分别反映了气旋的强度和位置，识别出的敏感性（相关系数）以类似Rossby波包的方式传播。

国内学者也开展了相关研究。针对引发2016年7月19—20日华北极端降水的黄河气旋，代刊等<sup>[39]</sup>基于ECMWF集合预报资料，对黄河气旋的中期预报误差的来源和演变进行了分析，揭示出对气旋强度和路径预报不确定性影响最大的系统及区域。Li等<sup>[40]</sup>基于WRF集合预报模式，采用相关系数研究了西南涡位置和强度的短期预报（60 h）对初始时刻扰动的敏感性，发现短期预报的敏感区都位于西南涡系统的附近，而不是类似于中期时效位于一定距离的上游地区。

## 2.2 针对热带气旋的集合敏感性研究

与温带气旋类似，集合敏感性方法也可用于研究热带气旋的强度和路径预报不确定性问题。针

对热带气旋（台风），Ito等<sup>[41]</sup>将台风的位置作为预报量，提出了基于台风位置的集合敏感性分析方法（TyPOS）。Torn<sup>[42]</sup>利用集合敏感性的思想开展了针对台风的目标观测试验，基于下投式探空仪观测资料设计了四组中尺度模式WRF的集合预报，结果发现同化了敏感区资料的预报对台风强度的预报效果最好，700 hPa及以下的风场对气旋强度的预报影响最大。

虽然目前数值模式对于台风路径的预报准确率总体在稳步提高，但对于台风路径的突变以及台风的生成等过程，预报误差仍然较为明显。Qian等<sup>[28]</sup>在分析1013号超强台风“鲇鱼”突然北折时，利用相关系数研究了台风路径特别是其转向角度的关键影响因子，指出台风水平尺度的大小相比强度对“鲇鱼”台风路径的北翘更加重要。Shu等<sup>[43]</sup>基于ECMWF集合预报采用集合敏感性等方法分析了赤道波动对1330号超强台风“海燕”生成的影响。Torn等<sup>[44]</sup>针对三个处于变形场环流中的台风个例，基于ECMWF集合预报利用集合敏感性研究了台风位置的预报不确定性，结果发现台风附近（500 km以内）引导气流对台风位置预报最为敏感，因此变形场环流中的台风预报存在较大不确定性。

热带气旋的温带变性过程有时会出现较大的预报误差。Torn等<sup>[35]</sup>基于WRF模式研究了2004年和2005年两次西太平洋台风的温带变性过程，利用集合敏感性评估变性时期初始场误差和预报误差之间的关系。结果发现，存在两个敏感区：一是台风中心附近，二是上游的蒙古和西伯利亚。表明预报误差既与台风本身位置有关，也和与台风产生相互作用的上游副热带低槽有关（图1）。

## 2.3 针对阻塞高压的集合敏感性研究

阻塞高压（以下简称“阻高”）的长期持续可造成大范围地区的天气气候异常。集合敏感性分析主要应用于研究阻高的可预报性、远距离前兆信号等问题。2010年夏季，欧洲东部和俄罗斯出现了严重的热浪天气，而巴基斯坦发生了严重的洪涝灾害，这些极端天气事件都与中高纬阻塞形势的长时间维持有关。Quandt等<sup>[25]</sup>利用TIGGE资料的三个全球集合预报模式共96个成员，基于集合敏感性方法研究了阻高生命史中不同阶段的可预报性问题。在计算集合敏感性时，采用不同的预报量来代表阻高生命周期的不同阶段。例如，阻高建立期，预报量选为某个区域的500 hPa高度场最大值，状态量选取的是500 hPa高度场、海平面气压和垂直积分水汽通量。结果发现，阻高建立期的预报不确定受到天气尺度波列及非绝热加热过程的

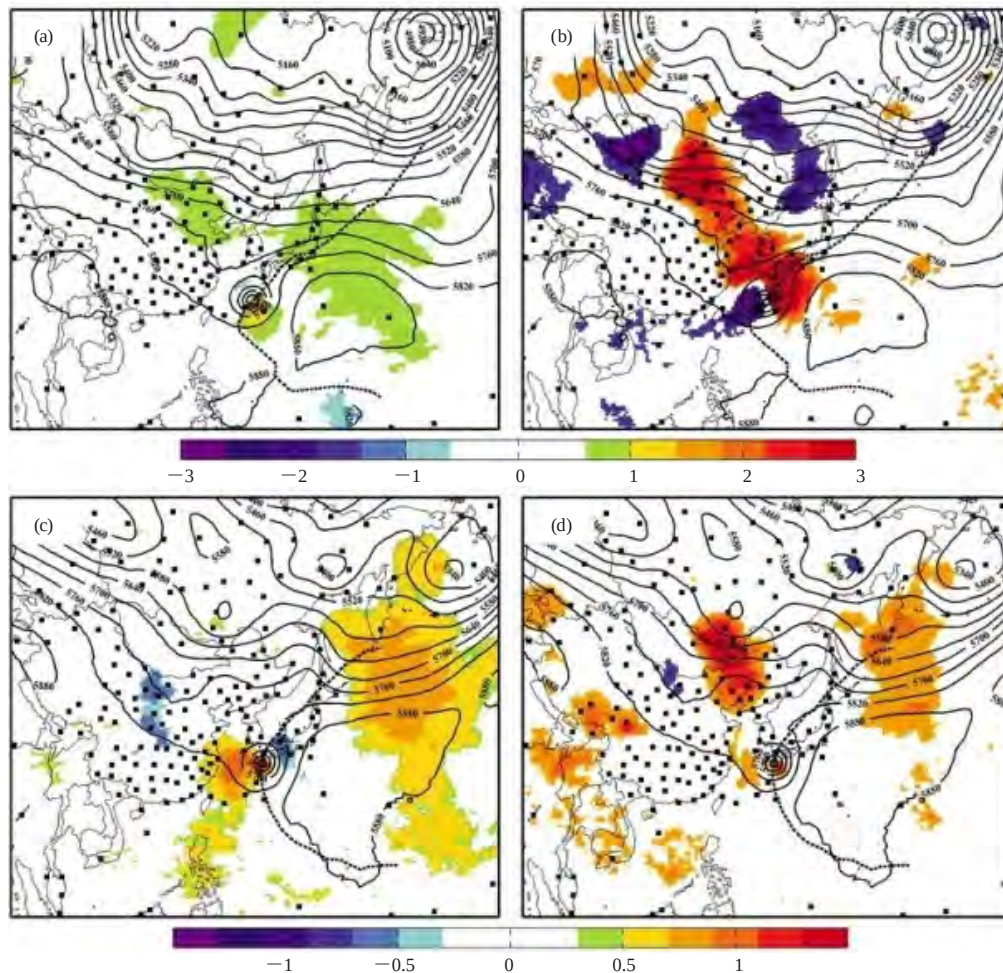


图1 2004年10月19日12时起报的台风“蝎虎”24 h (a) 和48 h (b) 的海平面气压最小值对500 hPa高度分析场的敏感性(填色, 单位: hPa); (c)、(d) 同(a)、(b), 但为2005年9月6日00时起报的台风“彩蝶”, 等值线为500 hPa高度分析场的集合平均<sup>[35]</sup>

Fig. 1 Sensitivity (shading; unit: hPa) for 24 h (a) and 48 h (b) cyclone minimum SLP forecasts to the analysis of 500 hPa height for Typhoon Tokage forecast initialized at 1200 UTC 19 October 2004. (c)–(d), same as (a)–(b), but for Typhoon Nabi forecast initialized at 0000 UTC 6 September 2005. Coutours denot the ensemble mean 500 hPa height analysis<sup>[35]</sup>

影响。

Magnusson<sup>[45]</sup>针对2014—2016年ECMWF集合模式对欧洲地区的三次明显预报误差事件, 利用集合敏感性研究了预报误差的来源。预报量选取为模式预报第6 d的欧洲地区500 hPa高度的均方根误差(RMSE), 状态量选取的是200 hPa和500 hPa高度场等。结果表明三次过程的预报误差都与斯堪的纳维亚的阻塞形势有关, 意味着模式对该天气系统的预报难度较大。

冬季格陵兰岛上空的阻高与北大西洋涛动(NAO)密切相关, 对欧洲地区的冬季天气有着重要影响。Parker等<sup>[38]</sup>基于集合敏感性分析, 利用ECMWF集合预报资料分析了冬季格陵兰岛26次阻高事件。研究指出, 格陵兰岛阻高不是孤立发展的, 而是对远距离的前兆信号非常敏感, 例如前期500 hPa和50 hPa高度场, 特别是大气环流的低频变化部分。此外, 集合

敏感性分析表明, 格陵兰岛阻高对热带地区的环流异常相比于极地地区更加敏感, 最强的敏感系统对应于从太平洋盆地到北美地区的罗斯贝波列。

目前, 数值模式对于阻高的建立的预报还存在不足, 特别是从纬向型环流向经向型环流的转变。最近, Maddison等<sup>[46]</sup>利用集合敏感性分析研究发现欧洲一大西洋地区阻高的建立对其上游的气旋的位置和强度预报比较敏感。因此, 改进上游地区气旋的预报可以提高下游阻高建立的预报效果。

## 2.4 针对暴雨的集合敏感性研究

暴雨由于其过程复杂、发生具有很多的不确定性以及模式无法准确描述降水过程等原因, 使得降水预报尤其是暴雨的预报难度大。集合敏感性方法可以研究影响暴雨预报, 特别是确定性数值模式预报效果不好的暴雨过程的关键影响系统及其演变特征, 进而

加深对暴雨发生发展物理机制的理解。Schumacher<sup>[17]</sup>利用ECMWF集合预报模式研究了一次暖季低涡暴雨过程及可预报性,通过相关系数探讨了上游天气系统的扰动对降水预报的影响。需要指出的是,由于全球集合预报模式的初始扰动信息主要是天气尺度的,因此,适用于研究天气尺度上的预报误差和可预报性,如一段时间或区域上的累积降水量。Lynch等<sup>[18]</sup>利用ECMWF集合预报模式分析了一次由连续两个准静止中尺度对流系统(MCS)造成的极端暴雨过程。结果发现,降水量与中层的低槽和地面气旋密切相关。集合预报的高度场、风场的较小差别就会导致随后降水预报的较大差异,强调了集合预报对于这种不确定性较大的降水过程的必要性。

国内学者近几年也逐渐开始利用集合敏感性方法开展暴雨预报的诊断分析和可预报性研究。2012年“7·21”北京特大暴雨过程是一次高影响极端天气事件,确定性模式对此次过程的预报存在较大的偏差。Yu等<sup>[47]</sup>利用TIGGE资料共计84个成员的多模式集合预报,分析了区域平均的24 h累积降水量与不同层次高度场、风场的集合敏感性,结果发现强降水预报对850 hPa低涡相比500 hPa高空槽更加敏感。对2016年7月19—20日华北强暴雨过程,确定性数值模式预报在中期时效出现了明显的偏差。王毅等<sup>[48]</sup>利用ECMWF集合预报模式基于集合敏感性分析发现,对于暴雨预报最敏感的环流系统是黄河气旋,集合成员预报的黄河气旋的路径和强度对京津冀降雨的落区及强度预报至关重要。Huang等<sup>[49]</sup>基于TIGGE资料评估检验了5个全球集合预报模式对4次典型华南前汛期暴雨的预报效果,通过集合敏感性分析指出,华南沿海地区的低层西南气流是华南地区降水预报的关键因子。

由于集合敏感性方法能够客观地评估不同状态量对预报量的敏感性,因此可以用于比较模式预报中不同天气系统对于暴雨预报的影响程度。王毅等<sup>[50]</sup>利用ECMWF集合预报模式对一次高原涡和西南涡作用下的四川盆地暴雨过程进行了研究,结果表明,此次暴雨预报对高原涡比西南涡更加敏感,在集合预报对西南涡预报不确定性较小的情况下,集合成员对高原涡的预报是影响降水强度和落区预报的关键因子。

对于一次暴雨过程,不同阶段的降水其可预报性也可能存在差别。王毅等<sup>[50]</sup>在研究四川盆地暴雨时发现集合敏感性分析识别出的白天和夜间暴雨的敏感性因子不同,主要原因是此次暴雨过程,夜间的动力作用更加显著,因而对反映动力学特征的状态量更加敏感。Zhang等<sup>[51]</sup>基于集合敏感性方法对华南一次

持续暴雨不同阶段降水的影响因子进行了分析。两个阶段的暴雨都对低空急流比较敏感,第一、二阶段暴雨的预报不确定性分别来源于低空急流位置预报和宽度预报的不确定性。Du等<sup>[20]</sup>分析华南暴雨过程时发现,锋面(暖区)暴雨预报的离散度小(大),集合平均预报误差小(大),表明两类暴雨的可预报性存在差异。通过集合敏感性分析发现,西南低空急流(850~700 hPa)和偏南超低空急流(925 hPa)是分别影响锋面暴雨和暖区暴雨的关键系统。此外,影响锋面暴雨和暖区暴雨的急流的敏感区也存在差异(图2)。

## 2.5 针对强对流天气的集合敏感性研究

强对流天气由于中小尺度误差的快速增长和强非线性,使得其可预报性问题一直是研究的热点。近些年来,相关研究证明了集合敏感性应用在强对流天气上也是可行的,一般应用的是分辨率较高的中尺度模式,主要关注大气环境场对对流发生发展的敏感性。在计算敏感性时,预报量选取的是基于中尺度模式得到的变量,例如反射率、垂直速度、(局地)降水等。Bednarczyk等<sup>[36]</sup>针对美国南部一次引发了多个龙卷的春季强对流天气,利用WRF模式研究了对流变量对上游天气系统及低层热力和动力特征的敏感性。研究表明,集合敏感性分析的结果能够反映出实际的对流特征,对流的预报与中层天气尺度系统的位置以及低层的热动力学特征(温度和湿度)密切相关。Hill等<sup>[22]</sup>对美国春季两次干线对流的触发进行了中尺度数值模拟,发现对流的触发主要对上游地区对流发生前(0~12 h)的温度和露点场敏感。作者指出,虽然使用的预报量(最大组合反射率)不符合正态分布,但是集合敏感性分析仍然可以得出有意义的结果。

此外,一些学者利用中尺度可预报性试验(MPEX)<sup>[52]</sup>来开展集合敏感性的研究,重点研究上游预报不确定性如何影响下游的对流预报<sup>[53-54]</sup>。另外,Torn等<sup>[55]</sup>针对美国两次弱天气尺度强迫的MPEX强对流个例开展了集合敏感性分析。结果发现,对流预报对对流层低层的水汽和前期南部干线附近的纬向风敏感。Kerr等<sup>[56]</sup>将集合敏感性方法应用于研究对流与风暴附近环境场的相互关系,预报量为对流风暴平均反射率、降水及上升螺旋度,探讨了对流风暴—环境场之间的正反馈关系。

近年来,集合敏感性分析也被应用于更小尺度的对流天气研究。Limpert等<sup>[23]</sup>针对超级单体雷暴,利用包含101个成员的1 km分辨率的云模式集合预报开展了基于集合敏感性的目标观测研究。结果表明,虽然

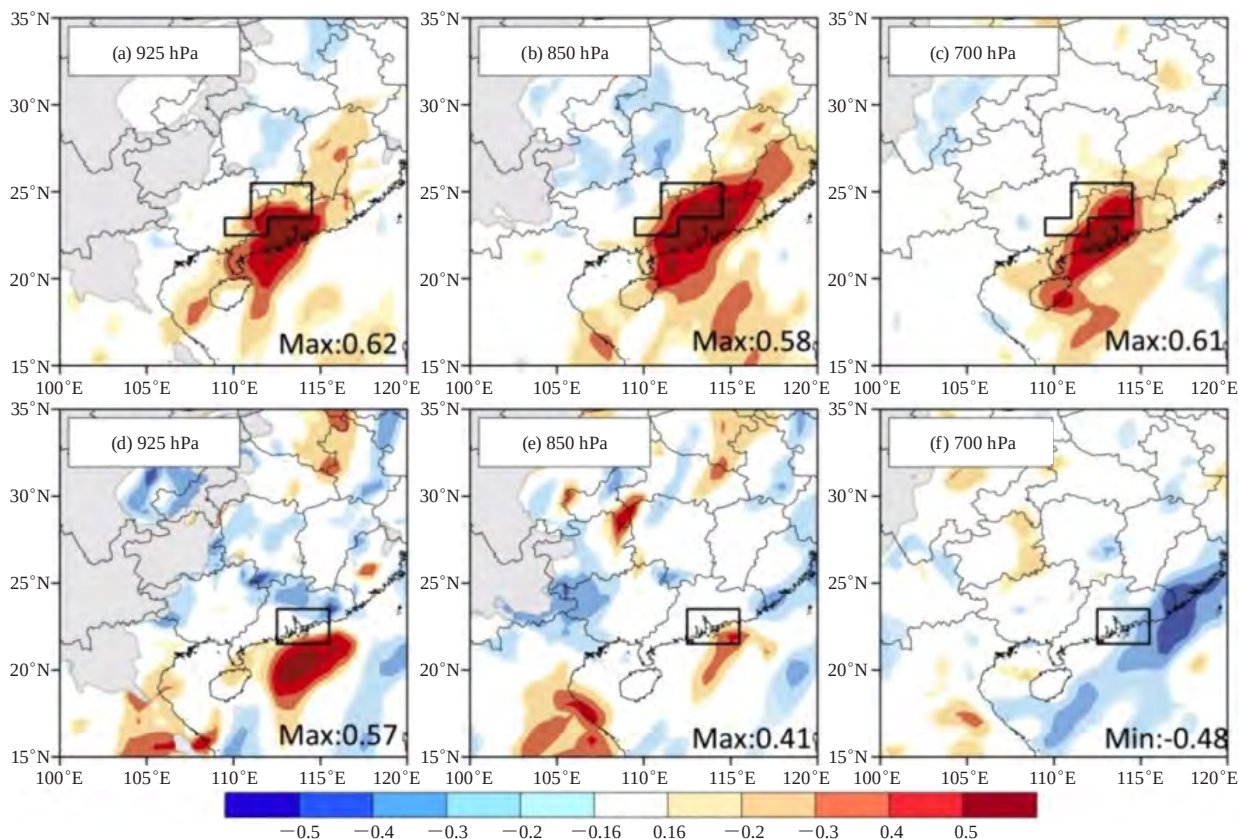


图2 2014年5月11日00—06时北区 (a~c), 南区 (d~f) 区域平均降水量对5月11日00时925 hPa (a和d), 850 hPa (b和e), 700 hPa (c和f) 经向风的敏感性<sup>[20]</sup>

Fig. 2 Sensitivity for area-averaged precipitation during 0000–0600 UTC 11 May 2014 over the north region (a~c) and the south region (d~f) to meridional wind at 925 hPa (a, d), 850 hPa (b, e), 700 hPa (c, f) at 0000 UTC 11 May 2014<sup>[20]</sup>

单点上的敏感性存在较大噪音, 但是区域平均和时间平均以后的敏感性结果更易于分析研究。同时指出, 考虑到非线性动力过程、预报量的迅速变化及自相关等现象, 集合敏感性应用于风暴尺度的研究还存在一定的局限性。

### 3 总结和展望

本文在前人研究的基础上, 对集合敏感性的定义、度量, 以及应用进行了详细介绍。集合敏感性的思想是利用EnKF得到分析集合成员, 以此作为初始场生成集合预报, 基于具有流依赖特性的集合预报样本研究初始扰动 (或某时刻预报的) 状态量对随后预报量的影响。

集合敏感性作为研究预报误差和可预报性的新工具, 经过不断改进, 已经在温带气旋、热带气旋、阻塞高压、暴雨和强对流等很多方面得到了广泛的研究和应用。在计算集合敏感性时, 预报量可以根据研究对象进行灵活的选择, 例如针对暴雨的累积降水量, 针对台风的中心气压以及针对强对流的组合反射率等。另外, 还可以采用EOF分解将主成分作为预报

量, 更深入地研究误差和不确定性的原因。集合敏感性相对于其他方法的主要优势在于: 1) 使用流依赖的集合预报样本; 2) 无需使用切线性模式和伴随模式; 3) 计算量小, 容易在业务中使用。当然, 集合敏感性也有一些不足: 比如基于线性关系的假设。另外, 敏感信号的强弱与预报量的选择 (变量及其区域范围) 有关。因而, 基于某次天气个例研究识别出的敏感区和敏感因子可能需要更多的个例来提炼出具有普适意义的结论。另一方面, 集合敏感性分析可以和其他方法相结合 (集合组间差异分析<sup>[57]</sup>) 来相互印证其结论的可靠性。

综上所述, 集合敏感性方法能够有助于揭示影响预报对象的动力学特征, 并增加对预报误差来源及传播机制的认识。此外, 集合敏感性对于实际天气预报业务也有很重要的价值。一般来说, 预报员对天气过程的关键影响系统具有一定的经验, 如果基于集合敏感性的客观结果与预报员的主观经验一致, 则有助于增加预报员使用集合预报的信心。另外, 基于集合敏感性得到的敏感区, 预报员可以在实际使用集合预报

过程中关注此区域,并结合滚动更新的实况观测资料对集合预报进行订正<sup>[58]</sup>,或选择敏感区中表现较好的集合成员(或子集)<sup>[59]</sup>,来减小未来预报的误差和不确定性。

致谢:感谢在本文撰写过程中美国国家海洋局(NOAA)地球系统研究实验室(ESRL)Zoltan Toth和中国气象局数值预报中心庄照荣博士给予的帮助。

## 参考文献

- [1] Magnusson L, Kall E. Factors influencing skill improvements in the ECMWF forecasting system. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(9): 3142-3153.
- [2] Bauer P, Thope A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525(7567): 47-55.
- [3] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Science*, 1963, 20(2): 130-141.
- [4] Lorenz E N. Climatic predictability in the physical basis of climate and climate modeling. *WMO GARP Publ*, 1975, 16: 132-136.
- [5] 陈静, 陈德辉, 颜宏. 集合数值预报发展与研究进展. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 497-507.
- [6] 穆穆, 段晚锁, 唐佑民. 大气-海洋运动的可预报性: 思考与展望. *中国科学(地球科学)*, 2017, 47(10): 1166-1178.
- [7] Kalnay E, Ota Y, Miyoshi T, et al. A simpler formulation of forecast sensitivity to observations: application to ensemble Kalman filters. *Tellus A*, 2012, 64: 1-9.
- [8] Hamill T, Snyder C. Using improved background-error covariances from an ensemble Kalman filter for adaptive observations. *Monthly Weather Review*, 2002, 130: 1552-1572.
- [9] Martin W, Xue M. Sensitivity analysis of convection of the 24 May 2002 IHOP case using very large ensembles. *Monthly Weather Review*, 2006, 134: 192-207.
- [10] Melhauser C, Zhang F. Practical and intrinsic predictability of severe and convective weather at the mesoscales. *Journal of the Atmospheric Science*, 2012, 69(11): 3350-3371.
- [11] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 1969, 21(6): 739-759.
- [12] Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C5): 10143-10162.
- [13] Hakim G J, Torn R D. Ensemble synoptic analysis. *Synoptic-Dynamic Meteorology and Weather Analysis and Forecasting: a Tribute to Fred Sanders. Meteorological Monographs*, 2008, 33(55): 147-161.
- [14] Majumdar S J. A review of targeted observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(12): 2287-2303.
- [15] 马旭林, 于月明, 陈德辉. 适应性观测研究现状和展望. *气象学报*, 2015, 73(2): 221-235.
- [16] Ancell B, Hakim G J. Comparing adjoint-and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(12): 4117-4134.
- [17] Schumacher R S. Ensemble-based analysis of factors leading to the development of a multiday warm-season heavy rain event. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(139): 3016-3035.
- [18] Lynch S L, Schumacher R S. Ensemble-based analysis of the May 2010 extreme rainfall in Tennessee and Kentucky. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(1): 222-239.
- [19] Greybush S J, Saslo S, Grumm R. Assessing the ensemble predictability of precipitation forecasts for the January 2015 and 2016 east coast winter storms. *Weather and Forecasting*, 2017, 32: 1057-1078.
- [20] Du Y, Chen G. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: ensemble-based analysis. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(11): 3827-3844.
- [21] Kumpf A, Rautenhaus M, Riemer M, et al. Visual analysis of the temporal evolution of ensemble forecast sensitivities. *IEEE Trans. Visualization Comput. Graphics*, 2019, 25: 98-108.
- [22] Hill A J, Weiss C C, Ancell B C. Ensemble sensitivity analysis for mesoscale forecasts of dryline convection initiation. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(11): 4161-4182.
- [23] Limpert G L, Houston A L. Ensemble sensitivity analysis for targeted observations of supercell thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 2018, 146: 1705-1721.
- [24] Matsueda M, Kyouda M, Toth Z, et al. Predictability of an atmospheric blocking event that occurred on 15 December 2005. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(8): 2455-2470.
- [25] Quandt L, Keller J H, Martius O, et al. Ensemble sensitivity analysis of the blocking system over Russia in summer 2010. *Monthly Weather Review*, 2019, 147(2): 657-675.
- [26] Chang E K, Zheng M, Raeder K. Medium-range ensemble sensitivity analysis of two extreme Pacific extratropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(1): 211-231.
- [27] Zheng M, Chang E K, Colle B A. Ensemble Sensitivity Tools for Assessing extratropical cyclone intensity and track predictability. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(5): 1133-1156.
- [28] Qian C, Zhang F, Green B W, et al. Probabilistic evaluation of the dynamics and prediction of supertyphoon Megi (2010). *Weather and Forecasting*, 2013, 28(6): 1562-1577.
- [29] Xie B, Zhang F, Zhang Q, et al. Observing strategy and observation targeting for tropical cyclones using ensemble-based sensitivity analysis and data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(5): 1437-1453.
- [30] Brown B R, Hakim G J. Sensitivity of intensifying Atlantic hurricanes to vortex structure. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(692): 2538-2551.
- [31] Keller J H. Amplification of the downstream wave train during extratropical transition: sensitivity studies. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(4): 1529-1548.
- [32] Torn R D. Ensemble-based sensitivity analysis applied to African easterly waves. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(1): 61-78.
- [33] Zack J, Natenberg E, Young S, et al. Application of ensemble sensitivity analysis to observation targeting for short-term wind speed forecasting in the Washington-Oregon region. *Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory Tech Rep*, 2010.
- [34] Garcies L, Homar V. Ensemble sensitivities of the real atmosphere: application to Mediterranean intense cyclones. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2009, 61(3): 394-406.
- [35] Torn R D, Hakim G J. Initial condition sensitivity of Western Pacific extratropical transitions determined using ensemble-based sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(10): 3388-3406.
- [36] Bednarczyk C N, Ancell B C. Ensemble sensitivity analysis applied to a southern plains convective event. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(1): 230-249.
- [37] Wile S M, Hacker J P, Chilcoat K H. The potential utility of high-resolution ensemble sensitivity analysis for observation placement during weak flow in complex terrain. *Weather and Forecasting*, 2015, 30(6): 1521-1536.
- [38] Parker T, Woollings T, Weisheimer A. Ensemble sensitivity analysis of Greenland blocking in medium-range forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018, 144(716): 2358-2379.
- [39] 代刊, 毕宝贵, 朱跃建. 2016年7月华北极端降水的中期预报误差分析. *科学通报*, 2018, 63(3): 340-355.
- [40] Li J, Du J, Zhang D L, et al. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(680): 766-782.
- [41] Ito K, Wu C C. Typhoon-position-oriented sensitivity analysis. Part I: Theory and verification. *Journal of the Atmospheric Science*, 2013, 70(8): 2525-2546.
- [42] Torn R D. The impact of targeted dropwindsonde observations on tropical cyclone intensity forecasts of four weak systems during

(下转74页)

# 集合预报产品在省、市、县天气预报中的应用情况调查

■ 陈圣劼 孙泓川 康志明

用“包含了不确定性”的“完全预报”来取代现行“确定性单一值”的“不完全预报”是一个已能被广大预报员接受的概念，但预报员对用户使用不确定性信息的信心相较于2011年结果变化不大，一定程度上反映出公众气象科普工作进展缓慢，需加大集合预报的公众科普宣传力度。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.008

天气的演变是一个具有不确定性因素在内的随机动力过程，大气混沌特性叠加数值预报模式初值的不确定性及其本身的近似误差，因此单一的确定预报无法完全描述大气的真实演变过程。鉴于此，“集合预报”的概念被提出。集合预报是针对数值预报不确定性问题发展起来的新一代随机动力概率预报技术，它既能给出单一的最佳可能预报，也能定量描述天气事件发生的不确定性，同时提供概率预报产品。集合预报的业务应用在发达国家已较为成熟，其在天气预报业务系统中的重要地位和作用已获得广泛认可。集合预报通过多初值、多物理方案产生不同的预报成员，可通过概率预报描述预报的不确定性，具有更大的应用价值。中国气象局《现代天气业务发展指导意见》明确提出以集合数值预报为依托，提高降水、灾害性天气和其他极端天气的概率预报水平。

从2007年开始，国家级业务单位不断积累着在定量降水预报（QPF）、中期预报、台风海洋预报和强对流预报等业务中的集合预报产品应用技术和经验。2011年，集合预报数据开始进入国家气象中心实时数据库。2012年，国家气象中心逐步建立了完整的业务应用流程。在此背景下，各省开始了集合预报的业务应用系统建设。江苏省气象部门于2013年引入国家气象中心的集合预报工具箱、集合预报和多模式集成功能综合分析显示平台（NUMBERS）等集合预报业务系统；2014年完成针对多种集合预报模式数据的可视化模块开发，在江苏预报业务一体化平台进行集中展示，其集合预报产品包括端须图、面条图、邮票图、概率预报、集合统计量、离散度、EFI指数等。在探索集合预报产品快捷展示方式的同时，江苏省气

象部门预报员也积极开展集合预报的后处理释用技术的研究。江苏先后实现了偏差订正、频率匹配、概率匹配平均、最优百分位、评分最优化订正（OTS方法）、集合预报模式输出统计（EMOS）方法、标准化距平模式输出统计（SAMOS）方法等国内、外主流的后处理释用技术的本地化应用。针对暴雨等灾害性天气事件，基于大量暴雨样本系统检验和评估了EC集合预报及多种后处理释用产品的预报能力。评估结果进一步加深了对各集合预报产品区域暴雨预报能力的认识，为预报员更直接快速地选取有效的集合预报产品提供参考。此外，针对集合预报模式的不确定性进行相应研究，开发了“集合预报信心指数”。集合预报后处理技术均纳入江苏本地化的RIOF（Refined Integration Optimal Forecast）技术体系，最终进入智能网格精细化无缝隙预报系统。

2019年8月，通过手机app对江苏省、市、县三级预报员进行了集合预报产品应用情况的调查（问卷及统计数字见附录）。调查内容包括对集合预报产品的基本认识、集合预报产品的获取和分析、集合预报产品的应用、集合预报产品的作用以及目前集合预报应用的不足和改进建议等方面。希望以江苏为代表的调查结果能帮助科研人员和业务管理者了解一线业务预报员目前使用集合预报产品的实际状况，以对未来进一步推进集合预报产品的应用有参考和指示意义。

## 1 基本情况

此次调查采用调查问卷匿名回答的形式，共有来自江苏省、市、县三级气象业务部门的251位预报员参与调查，其中省级预报员28名（11.16%），市级

收稿日期：2019年9月18日；修回日期：2019年11月15日

第一作者：陈圣劼（1987—），Email: chenshengjieshez@163.com

通信作者：康志明（1978—），Email: Kangzm@cma.gov.cn

资助信息：江苏省气象局重点项目（KZ201801）；气象预报业务关键技术的发展专项（YBGJXM（2019）04-04）

103名(41.04%)，县级120名(47.81%) (图1a)，市、县级的基层台站预报员占了此次调查对象的大多数。不同岗龄的参与调查人数总体呈现平均分布：1~3年69人(27.49%)，4~6年54人(21.51%)，7~10年53人(21.12%)，10年以上75人(29.88%) (图1b)，反映了此次调查涵盖了省、市、县三级不同资历业务一线预报员的群体。此外，在职称方面 (图1c)，参与调查的预报员以工程师(118人)和副高级工程师(45人)为主，共占64.94%，另有正研级高工6人(2.39%)和助理工程师82人(32.67%)，调查群体在预报专业技术能力上总体呈现中高级水平。在学历方面，以大学本科和硕士研究生学历为主，分别有117人(46.61%)和103人(41.04%)，共占调查总人数的87.65%，另有博士研究生20人(7.97%) (图1d)，显示江苏预报员普遍具有较高的学历层次，博士群体主要集中在省级(17人)。为更详细地分析调查结果及其可能原因，在本文的分析中，除了总体样本的统计外，还按照“工作单位”“岗龄”“学历”“职称”4个子样本集进行了统计，如果子样本集的结果与总样本没有明显差异，我们就只给出总样本的分析结果，否则，会进一步分析子样本集的不同。

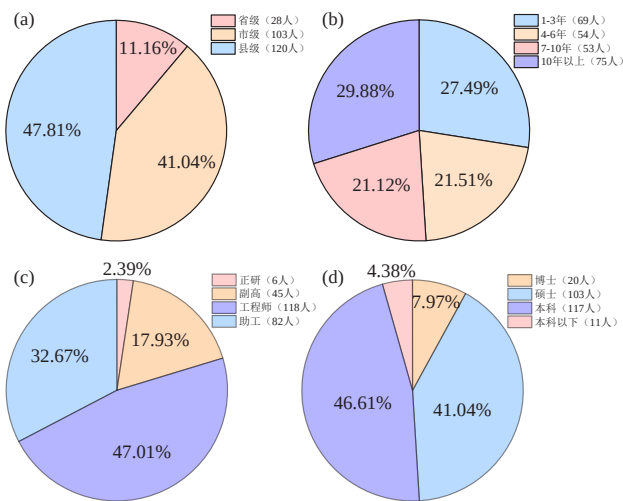


图1 调查样本分布

(a) 机构级别；(b) 岗龄；(c) 职称；(d) 学历

## 2 调查结果

### 2.1 预报员对集合预报的基本认识

集合预报具有丰富的预报信息，不仅在科学上是一个新的课题，在人的思维方式上也是一个挑战。要理解并用好集合预报，首先需要对集合预报有清楚的认识。对于集合预报的认识包括多个方面，集合预报的基本概念、种类、基本输出产品及其相关后处理技

术等。

对251名江苏基层台站预报员的调查结果显示，97.21%的预报员对集合预报或多或少有一些认识或使用，极少数人员(7人，2.79%)至今完全没有接触集合预报(图2)。对集合预报了解的人数比例较2011年的调查结果(66.9%)有大幅提高。完全没有接触的人员主要是县级单位、大学本科以下学历或助理职称(刚工作不久)的预报员(图略)。从开始接触集合预报的时间来看(图2)，一半以上的(59.36%)预报员是从从事预报工作以来才开始接触集合预报，部分(37.85%)预报员在校期间已对集合预报有所了解或使用，其中本科阶段起步的居多(21.51%)。可见，基层台站预报员对于集合预报的了解、使用或研究大多数起步于实际业务工作。为更早、更深入的认识，并在实际工作中尽可能熟练地应用集合预报，加强在校期间关于集合预报的专业气象知识的学习很有必要。

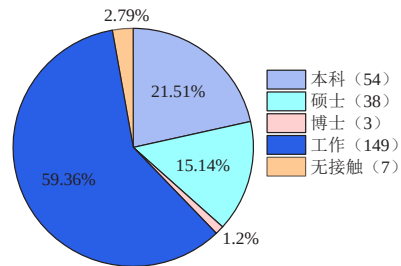


图2 开始接触集合预报的时段

调查显示一半以上的(59.36%)预报员是从从事预报工作以来才开始接触集合预报，那么预报员如何在工作中加深对集合预报认识呢？由图3可见，绝大多数预报员(170人以上，67.73%)表示是通过参加相关业务培训和实际预报应用进一步加深对集合预报的理解；52名(20.71%)预报员通过参与科研项目或研发集合预报相关技术的方式进一步认识集合预报；调查也有极个别(5人，2%)预报员对集合预报没有兴趣进一步了解。

虽然绝大多数预报员在预报业务中都使用了集

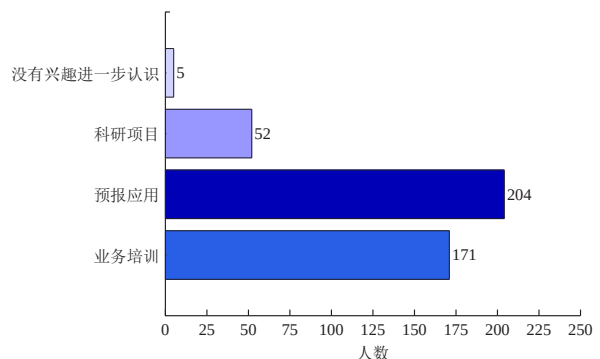


图3 进一步认识集合预报的方式

合预报产品,但调查发现大多数预报员对集合预报产品的基本知识如定义、算法和特点的了解程度并不够,少数了解的人数占56.67%,不了解的人占12.35%,仅有29.08%和1.99%的预报员大部分了解和完全了解(图4),说明预报员在使用集合预报时多半呈现一知半解的状态。集合预报熟悉程度较高的(完全了解和大部分

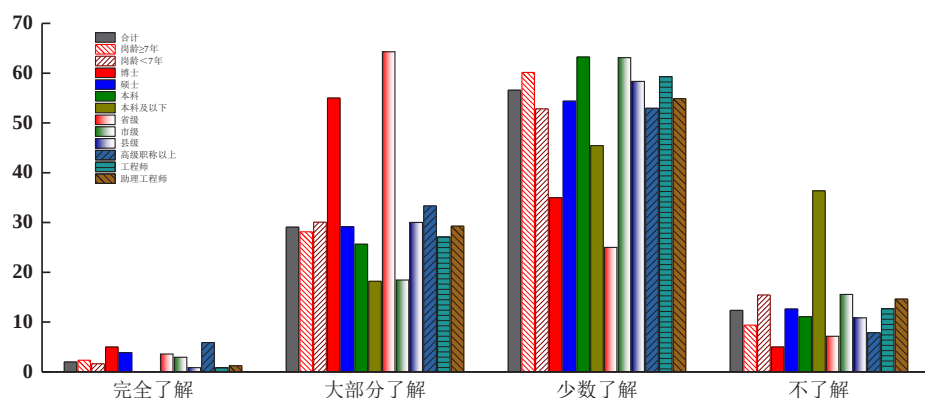


图4 对集合预报基本产品定义、算法和特点的了解程度

了解)预报员集中在省级、高级职称以上或博士学历预报员中,省级预报员高达67.86%,高级职称以上39.22%,博士学历群体中有60%,而资历深(年龄≥7年)浅(年龄<7年)对集合预报熟悉程度的比例相当(图4)。原因是省级预报员参加集合预报业务培训(85.71%)和科研工作(39.39%)的机会明显多于市、县级(业务培训65.92%和科研工作18.83%)(图略),而市、县级预报员主要通过实际预报应用来认知集合预报。高级职称以上或博士学历群体相比其他职称或学历人员拥有更高比例的业务培训和科研经历,所以对集合预报有更深入的了解。

## 2.2 集合预报产品的获取和分析、处理

集合预报产品的获取、分析和处理是预报员使用集合预报产品,开展集合预报相关研究的前提。从集合预报产品的获取方式来看(图5a),大多数预报员直接从省级或国家级业务网站获得各类集合预报产品,尤其是江苏省自主开发的业务网站(239人直接从省级业务网站获取集合预报产品,占95.22%)。少数预报员(19.12%)也会使用本级部门集合预报研究成果转化的产品,极少数预报员(9.16%)直接浏览国外业务网站。可见,省级部门研发的集合预报产品和业务展示平台是基层台站预报员应用集合预报产品

的主要支撑,在集合预报应用和推广中,省级部门是做好承上启下,联系集合预报基础研发和实际基层应用的关键环节。

调查显示,对于集合预报原始数据的数据类型、时空分辨率等信息有所了解的人数不及一半,而对于读取集合预报数据的处理方式,完全不了解的人数高达89人(35.46%)(图5b)。对集合预报后处理技术的认识上(图5c),各类后处理技术(统计后处理、降尺度处理、聚类分析等)了解的人数均不及调查总人数的一半,完全不了解的人数73人,占29.08%。要充分用好这些集合预报后处理产品,还需相关研发人员加强相关技术的宣讲、推广和答疑等。

在国家级和省级的业务网站中,除了中国GRAPES模式外还包括了欧洲ECMWF和美国的GFS等模式的预报(图6)。调查表明,业务中应用的集合预报产品主要来源是欧洲ECMWF(232人)、中国GRAPES(166人)和美国NCEP(112人),有少量预报员使用过加拿大CMC(5人)和其他来源(16人)的集合预报,其中86.85%的预报员最常使用的集合预报模式是ECMWF,9.16%的预报员最常使用的模式是中国的GRAPES,其他模式只有较少预报员认为是最常用的。可以看出欧洲ECMWF集合预报还是预报员使用最多、最常用的集合预报模式,中国的GRAPES还有

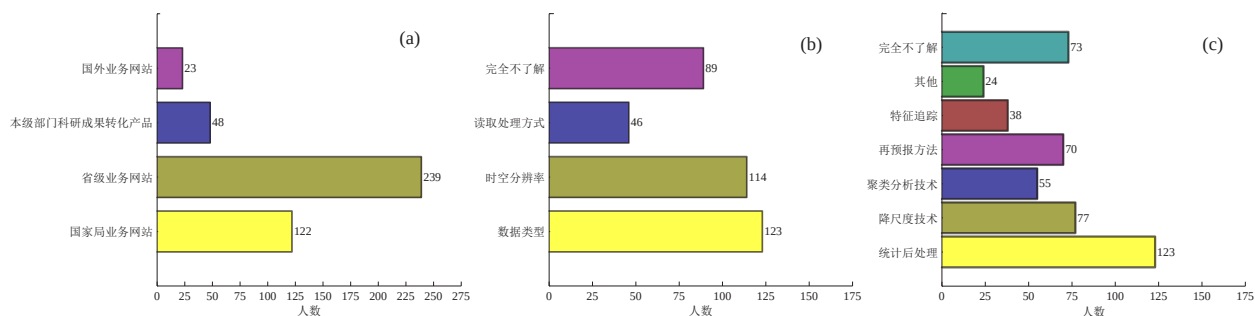


图5 集合预报产品的获取和分析、处理  
(a) 获取方式; (b) 数据分析; (c) 后处理技术

较大差距。

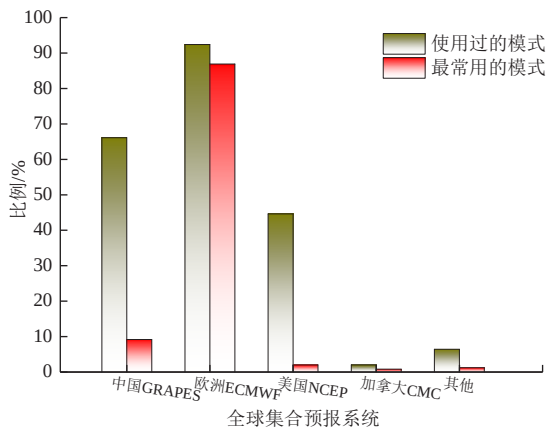


图6 预报员使用过的和最常用的全球集合预报系统

### 2.3 集合预报产品的应用

认识集合预报是基础，应用集合预报是导向。集合预报具有丰富的预报产品，图7显示了预报员在实际业务工作中常用集合预报产品的调查结果。预报员最常用的是要素的概率预报，其次是反映不同模式成员气象要素空间分布的邮票图、单站箱线图和集合平均或集合中位数，面条图的使用相对略少，可能的原因是面条图更多是用于分析形势场的不确定性，不直接反映预报要素。离散度主要用于表征预报的不确定性，使用相对也较少，排在面条图之后。使用最少的是分位值，可能原因是分位值作为预报参考需要结合研究结论和统计分析结果的支撑，而目前产品的展示方式有缺陷，预报员对各分位值的指示意义认识不够。这些集合预报产品按照其特点可以归纳为三类：基于集合预报生成的确定性产品、集合预报概率产品、指示预报不确定性的相关产品（邮票图、面条图、端须图等），其中预报员最常使用的是集合预报生成的确定性产品（37.85%），其次是集合预报概率产品（33.47%），最不常使用的是集合预报指示不确定性的相关产品（28.69%）。调查结果一定程度上反映了预报业务和服务需求的一些实际情况：海量常规

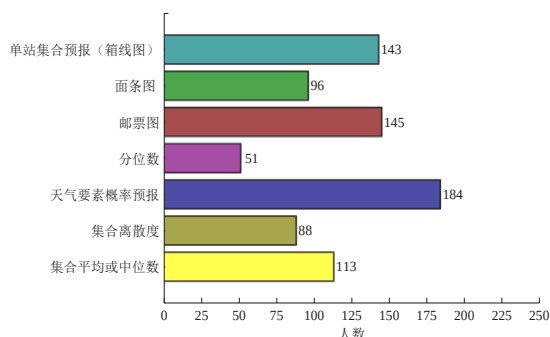


图7 集合预报基本产品的使用情况

预报资料的处理和分析已经让预报员疲于应付，因此预报员更愿意接受预报意义直接明确的不确定性产品，而不愿意耗时去分析相对难懂的不确定性产品；随着模式预报能力的提升和预报员队伍的年轻化，直接应用模式要素预报产品已经成为主流，展示形势场预报不确定性的集合产品受到了冷落；现行的预报发布规范、内容和格式仍是确定式的，分析得到的不确定性信息仍然无法表达在预报结论中，这也是预报员不愿意去主动分析不确定性信息的原因之一。

基层台站预报员当前对集合预报的应用多见于何种场景，有64.14%的人回答是仅业务值班，31.08%的回答是业务和科研使用，只有极少数的人回答是“仅科研”（2.79%）或“从不使用”（1.99%）（图8），可见，已有相当一部分预报员不仅仅是在预报业务上使用集合预报产品，而且也深入到集合预报相关的科研活动中。省市县三级样本的统计表明，与市县级相比，省级有更多比例的预报员在业务和科研上均使用集合预报产品（省级为46.4%；市级为25.2%；县级为32.5%）。分不同岗龄的统计可以看出，随着预报员岗龄的增长，仅用于业务值班的比例逐步增加，而极少数从不使用的人群中的只分布在最年轻预报员（1~3年，占比5.8%）和最资深预报员（占比1.3%），业务和科研均使用集合预报比例最高的是7~10年预报员（34.0%），说明这个岗龄段的预报员作为业务和科研的骨干，能够更好的结合业务做一些研发工作（图8）。

在日常业务值班中，经常使用（48.21%）和偶尔使用（49.00%）集合预报的预报员占到了绝大多数，只有极少数的预报员（2.79%）从不使用。这说明使用集合预报产品已经成为大部分预报员业务值班中的一种习惯，特别是有将近一半预报员在值班中经常使用，其中省级预报员经常使用（67.9%）的比例明显高于市（47.6%）、县（45.8%），这也侧面印证了集合预报产品已经成为重要的预报工具（图9），机构级别越高，使用集合预报的程度越高。

进一步分析业务值班中，预报员会在哪些天气场景使用集合预报的调查显示（图10），预报员在预报灾害性天气时最爱用集合预报产品，其次分别是常规天气、极端天气预报、专项气象预报服务。近年来，大量学者对集合预报在灾害性天气预报中的应用开展了大量的研究工作，形成了相对成熟的预报技术和较为丰富的预报产品，所以相当一部分预报员在面对灾害性天气的时候，会去参考集合预报的结果。而出乎意料之外的是，常规天气的使用占到了第二，一方面说明使用集合预报产品已经成为部分预报员日常预报

值班的一种习惯；另一方面也说明随着集合预报释用技术的深入开展，集合预报的优势和作用已经从灾害性天气、极端天气预报领域拓展，渗透到日常天气预报的方方面面，并得到预报员的认可。然而，在集合预报有很强指示意义的极端天气预报上，预报员使用的比例仅有54%，这可能与极端天气发生概率低，部分预报员在实际预报值班过程中并未碰见这类天气过程有关。一定程度上反映出预报员对集合预报对极端天气指示作用的意义认识还不够。专项气象服务中使用集合预报的比例不足50%，这可能与专项服务更加强调确定性预报结论的需求有关。

## 2.4 集合预报产品在预报服务中的作用

针对集合预报产品在目前天气预报服务中的应用效果调查是每位产品开发人员或业务管理、推进者最为关心的问题。调查显示（图11），有超过一半预报员（52.59%）认为集合预报能起到主要参考的作用，还有45.82%的预报员认为有补充参考的作用（尤其在省级层面），只有极个别预报员（主要是市、县）认为作用不大。分年龄统计年资较轻的预报员更多认为集合预报是主要参考（1~3年占69.6%，4~6年占50%），年资偏高的预报员更倾向于集合预报作用是补充参考。调查结果

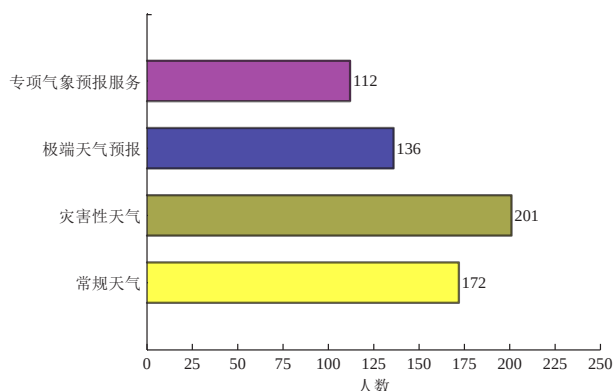


图10 使用集合预报的天气场景

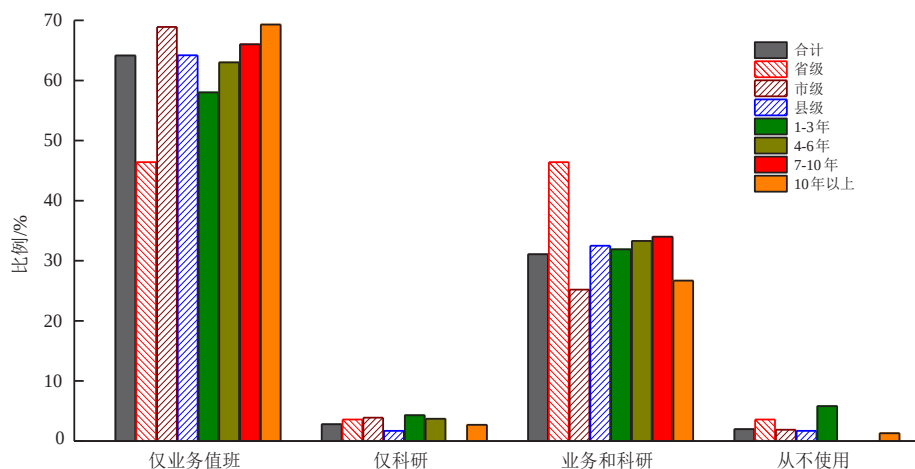


图8 集合预报的使用场景

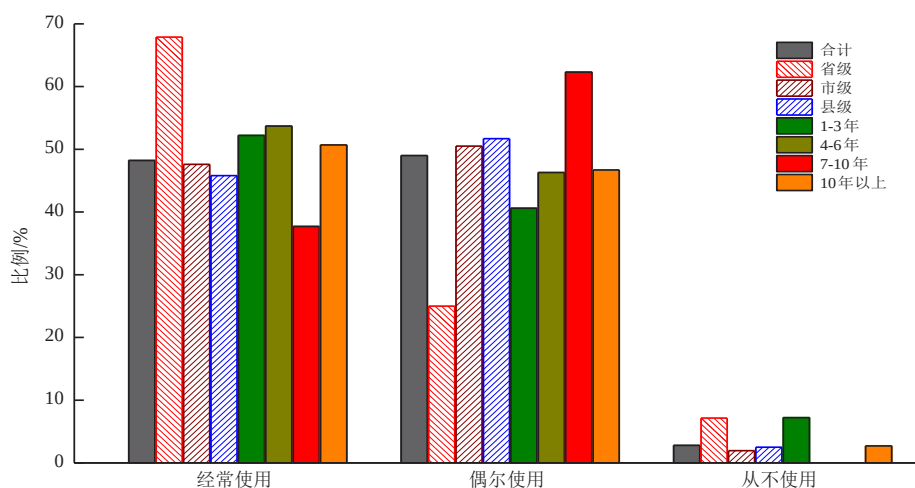


图9 日常预报值班中集合预报使用情况

呈现了一个非常有意思的现象，认为集合预报能起主要参考作用的省级预报员比例明显低于市县级（省级为17.9%，市级为39.8%，县级为71.7%）。也就是说最经常使用集合预报产品、对集合预报产品了解最深的省级预报员反而对集合预报的能力和作用最缺乏信心，最大可能的原因是随着对集合预报认识的加深，省级预报员反而更清楚地了解目前集合预报的不足和局限性。

如何更好地把集合预报相关产品信息应用在日常的天气预报制作和服务的问题上（图略），绝大多数的预报员（97.61%）（其中省级预报员100%）认为在现有预报规范下（即最后发布的是单一值确定预报），预报员可以通过斟酌预报用语、调整量级等来表达对预报的把握程度，但这种方式预报可信度信息得不到最大程度的应用。要使它得到最大程度的应用，现有的预报规范需要修改（由确定性预报变为概率预报），从而把集合预报的不确定性信息应用在日

常的天气预报制作和服务上。这个调查结果相比于2011年的86.4%有了明显的提升,说明随着集合预报技术的发展和应用的推进,预报员对集合预报的应用价值有了更充分的肯定。而认为“把集合预报相关产品信息应用在每天的天气预报制作和服务没有用处,反而造成混乱”的观点(2.39%)主要集中在岗龄1~6的年轻预报员中,表明资历较浅的年轻预报员对集合预报相关产品的信息应用仍存在不解和困惑。

针对是否应该把这种隐藏在预报背后的预报可信度或不确定性作为天气预报的一部分如实地告诉公众和用户这一问题,大部分预报员(83.67%)认为应该将预报不确定信息告诉用户,这才是客观、科学的态度,让用户根据预报不确定性去安排他们的行为,将有助于最大限度地发挥预报的价值,并同时要帮助用户正确理解天气预报不确定性的内容;11.16%的预报员认为因为用户不会用带有不确定性的预报,只会造成混乱所以不应该;5.18%的预报员认为因为人们会觉得气象部门预报不准,还把预报的责任推卸到用户身上,所以不应该。预报员对于用户的看法相较于2011年变化不大,对用户使用不确定性信息的信心提升不大,一定程度反映出公众气象科普工作进展缓慢。

上面两项的调查结果表明,绝大多数预报员都愿意应用预报不确定性的产品(97.61%),并且认为应该把预报可信度告诉用户(83.67%)。这说明,用“包含了不确定性”的“完全预报”来取代现行“确定性单一值”的“不完全预报”是一个已被广大预报员接受的概念,它在目前预报员中已有相当的思想基础,尤其是对自己针对的用户更加开放。

如何向大众来表达预报中的不确定性,调查结果(图略)发现,概率是很多预报员所推崇的(32.27%),用不同的语言和颜色也受到一定程度的欢迎(分别为12.35%和19.52%)。超过三分之一的预报员(35.86%)较开放,愿意接受以上各种方式,认为在不同的场合应用不同的方式来表达。

如何让广大公众和用户了解气象预报有不可避免的不确定性本质以避免他们有不切实际的期望(图12)?有相当数量的预报员(42.23%)认为科普是一种首选的工具。其他依次是培训(3.98%)、学校科学常识类教科书(3.9%)和同用户合作(2.39%)。

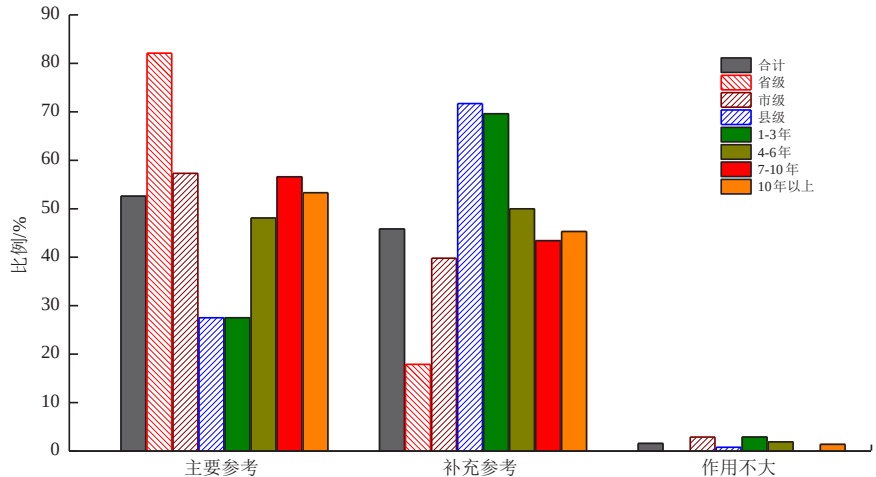


图11 对集合预报产品在目前天气预报服务中作用的想法

而约一半的预报员(47.81%)认为以上这些都很重要,应该多管齐下。相比于2011年的问卷调查,大家对培训的作用认同度变得更高一些,其他变化不大。

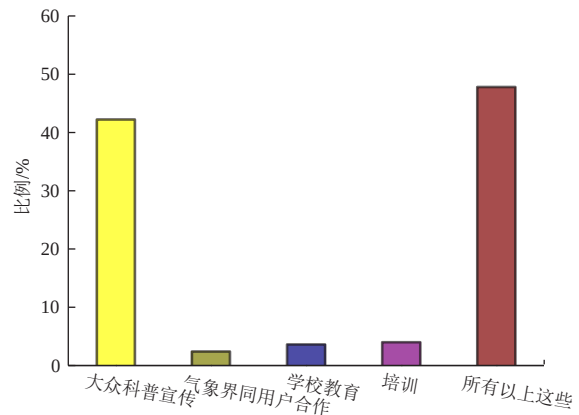


图12 让公众能够接受天气预报有不确定性的事实的关键因素

## 2.5 不足与建议

通过认识、使用、研究、分析集合预报及其相关产品,探讨和追踪集合预报产品服务方式及效果,预报员对目前集合预报产品本身最大的不足也形成了自己的切实体会(图13),接近一半(40.24%)的预报员认为是集合预报产品生成的确定性产品准

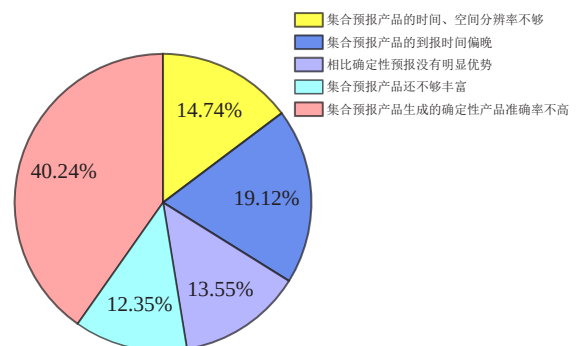


图13 集合预报产品本身最大的不足

确率不高,也有19.12%的预报员认为最大的不足是集合预报产品的到报时间偏晚。此外还有部分预报员认为是集合预报产品的时间、空间分辨率不够(14.74%),相比确定性预报没有明显优势(13.55%)和集合预报产品还不够丰富(12.35%)。

有接近一半(41.04%)的预报员认为对集合预报相关产品的认知程度不够是阻碍集合预报相关产品应用

用的最大可能原因(图14),还有部分预报员认为主要原因是集合预报产品本身不够可靠、准确和丰富(30.28%)以及集合预报不确定性信息的应用缺少需求(28.69%)。其中省、市级预报员更倾向于认为是认知程度不够是最大阻碍(省级为53.6%、市级为49.5%),而县级更倾向于认为最大阻碍是集合预报不确定性信息应用缺少需求(35.5%)。预报员倾向于加大力度发展和使用的集合预报的类型产品主要有全概率预报(143人,56.97%)、离散度预报(不确定性信息预报)(94人,37.45%)和转化为更多的确定性预报(143人,56.97%)。

针对目前集合预报产品本身和应用上的不足和阻碍,预报员也提出对上级业务部门在集合预报业务应用上的建议:1)增加集合预报推广和培训(180人,71.71%);2)提高集合预报产品分辨率、准确率(175人,69.72%);3)丰富集合预报产品的种类(163人,64.94%);4)让预报员更多地参与集合预报研发工作(113人,45.02%)。由此可见,预报员认为首要的建议是通过增加集合预报推广和培训的形式来影响更多的预报员,加深认识,从而使得集合预报在业务上得到更好的应用。

### 3 结论与讨论

为了解目前集合预报在业务部门的应用情况,就相关问题设计了调查问卷,共有来自江苏省、市、县三级气象业务部门的251位预报员参与调查。具体的调查内容包括对集合预报的基本认识,集合预报的应用和研究情况,集合预报在预报服务中的作用,目前集合预报产品的不足以及对提升集合预报产品应用的建议等等。调查结果分类总结和讨论如下:

#### 3.1 对集合预报的认识

调查表明目前绝大多数预报员们(97%)对集

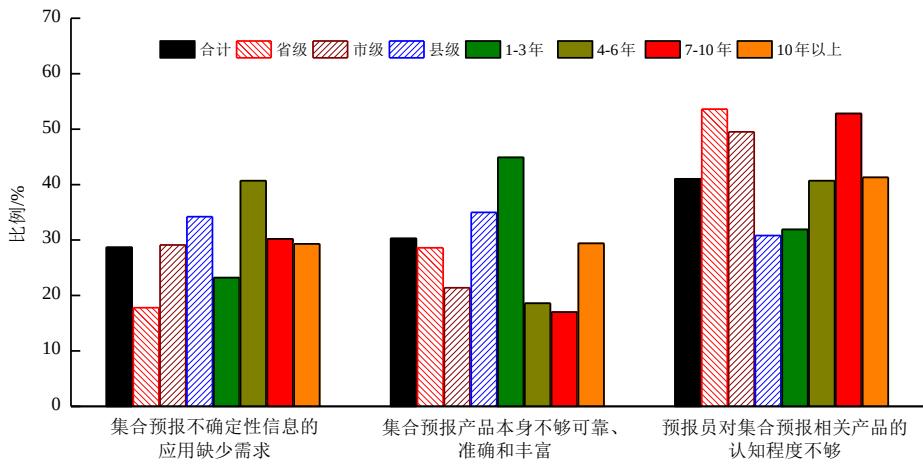


图14 阻碍集合预报相关产品应用最大可能原因

合预报有一定的了解,该比例较2011年的调查结果(67%)有大幅提高。预报员了解集合预报的主要途径是通过参加相关业务培训和实际预报应用,也有相当比例(21%)的预报员通过参与科研项目或研发相关技术从而进一步认识集合预报。虽然绝大多数预报员在预报业务中都使用了集合预报产品,但是大多数预报员对集合预报产品的定义、算法和特点的了解程度并不够。集合预报熟悉程度较高的预报员集中在省级、高级职称以上或博士学历,主要原因是省级预报员参加集合预报相关业务培训和科研的机会明显多于市、县级。因此,通过业务培训,特别是围绕业务应用的培训,从而提升市、县级预报员对集合预报的认识,在目前还是一个急需加强的任务。

#### 3.2 集合预报产品的获取方式和分析、处理

绝大多数预报员直接从省级预报业务网站上获取集合预报产品,表明在集合预报应用和推广中,省级部门是做好承上启下,联系集合预报基础研发和实际基层应用的关键环节。欧洲ECMWF、中国GRAPES和美国GFS是业务中应用的集合预报产品的几个主要来源,其中ECMWF集合预报产品是预报员最常用的,中国的GRAPES模式较之还有较大差距。了解集合预报数据处理和各类后处理技术的人数均不及调查总人数的一半,说明相关的培训和技术推广、宣传等工作仍有待加强。

#### 3.3 集合预报产品的应用

在日常预报中,预报员最常使用的是集合预报生成的确定性产品,其次是集合预报概率产品,最不常使用的是集合预报指示不确定性的相关产品。这个结果与业务流程紧张的现状和以确定性预报结论为主的业务规范有关系。有超过三分之一的预报员不仅在业务值班中,还在科研中使用集合预报产品,特别是

省级的预报员，经常使用集合预报的比例超过了三分之二。预报员在预报灾害性天气时最爱用集合预报产品，其次分别是常规天气、极端天气预报、专项气象预报服务。表明随着集合预报释用技术的深入开展，集合预报的价值已经从灾害性天气、极端天气预报领域拓展，渗透到日常天气预报的方方面面，并得到预报员的广泛认可，集合预报产品已然成为业务天气预报的主要参考产品。对集合预报各类产品及其相关技术继续加以拓展研发，并积极推广应用应是今后相关业务管理者和科研人员开展集合预报工作的重点。

### 3.4 集合预报产品在预报服务中的作用

超过一半预报员认为集合预报在预报服务中能起到主要参考的作用，其中省级预报员比例明显低于市县级，可能是由于随着对集合预报认识的加深，省级预报员反而更清楚地了解目前集合预报的不足和局限性。即使在目前，以确定预报结论为主的业务规范下，绝大多数预报员都愿意应用预报不确定性的产品（97.61%），并且认为应该把预报可信度告诉用户（83.67%）。这说明，用“包含了不确定性”的“完全预报”来取代现行“确定性单一值”的“不完全预报”是一个已被广大预报员接受的概念，但预报员对用户使用不确定性信息的信心相较于2011年结果变化不大，一定程度上反映出公众气象科普工作进展缓慢，需加大集合预报的公众科普宣传力度，追踪用户使用不确定信息的体验感受，加强与用户的有效沟通。

### 3.5 对集合预报产品及应用的不足与建议

绝大多数预报员认为目前集合预报产品最大的不足是生成的确定性产品准确率不高，其次是集合预报产品的到报时间偏晚，最后是集合预报产品的时间和空间分辨率不够、相比确定性预报没有明显优势以及产品不够丰富等。这些不足均是今后集合预报系统改进和完善的研究方向。

在集合预报推广过程中，预报员认为对集合预报相关产品的认知程度不够是阻碍集合预报相关产品应用的最大可能原因。对上级业务部门在集合预报业务应用上的建议，预报员认为最重要的还是应该通过增加集合预报推广和培训来影响更多的预报员，从而推

动集合预报在业务上更好的应用。

#### 深入阅读

- 陈圣劼, 刘梅, 张涵斌, 等, 2019. 集合预报产品在江苏省暴雨预报中的应用评估. 气象, 45(7): 893-907.
- 代刊, 朱跃建, 毕宝贵, 2018. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述. 气象学报, 76(4): 493-510.
- 杜钧, 陈静, 2010. 天气预报的公众评价与发布形式的变革. 气象, 36(1): 1-6.
- 杜钧, 邓国, 2010. 单一值预报向概率预报转变的价值: 谈谈概率预报的检验和应用. 气象, 36(12): 10-18.
- 杜钧, 康志明, 2014. 天气预报中不确定性问题的调查分析. 气象科技进展, 4(1): 58-62.
- 李俊, 杜钧, 陈超君, 2015. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究. 气象, 41(6): 674-684.
- 王东海, 杜钧, 柳崇健, 等, 2011. 正确认识和对待天气气候预报的不确定性. 气象, 37(4): 385-391.
- 吴启树, 韩美, 刘铭, 等, 2017. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比. 应用气象学报, 28(3): 306-317.
- 周迪, 陈静, 陈朝平, 等, 2015. 暴雨集合预报—观测概率匹配订正法在四川盆地的应用研究. 暴雨灾害, 34(2): 97-104.
- Buizza R, 2008. The value of probabilistic prediction. Atmospheric Science Letters, 9(2): 36-42.
- Cui B, Toth Z, Zhu Y, et al, 2012. Bias correction for global ensemble forecast. Weather and Forecasting, 27(2): 396-410.
- Dabernig M, Mayr G J, Messner J W, et al, 2017. Spatial ensemble post-processing with standardized anomalies. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 143: 909-916.
- Ebert E E, 2001. Ability of a Poor Man's Ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. Monthly Weather Review, 129(10): 2461-2480.
- Gneiting T, Raftery A E, Westveld A H, et al, 2005. Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation. Monthly Weather Review, 133(13): 1098-1118.
- Scheuerer M, 2014. Probabilistic quantitative precipitation forecasting using Ensemble Model Output Statistics. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140(680): 1086-1096.
- Scheuerer M, Hamill T M, 2015. Statistical post-processing of ensemble precipitation forecasts by fitting censored, shifted gamma distributions. Monthly Weather Review, 143(11): 4578-4596.
- Stauffer R, Umlauf N, Messner J W, et al, 2017. Ensemble postprocessing of daily precipitation sums over complex terrain using censored high-resolution standardized anomalies. Monthly Weather Review, 145(3): 955-969.
- Tilmann G, Raftery A E, 2005. Atmospheric science: weather forecasting with ensemble methods. Science, 310(5746): 248-249.
- Zhu Y, 2005. Ensemble forecast: a new approach to uncertainty and predictability. Advances in Atmospheric Sciences, 22(6): 781-788.
- Zhu Y, Luo Y, 2015. Precipitation calibration based on the frequency-matching method. Weather and Forecasting, 30: 1109-1124.

（作者单位：中国气象局交通气象重点实验室；江苏省气象台）

## 附录

## 集合预报产品应用调查表和总体统计

## 一、预报员基本情况

1. 您从事预报工作的年限？（单选）
  - ☐ 1~3年 [27.49%]
  - ☐ 4~6年 [21.51%]
  - ☐ 7~10年 [21.12%]
  - ☐ 10年以上 [29.88%]
2. 您的最高学历或学位？（单选）
  - ☐ 大学本科以下 [4.38%]
  - ☐ 大学本科 [46.61%]
  - ☐ 硕士 [41.04%]
  - ☐ 博士 [7.97%]
3. 您的职称是？（单选）
  - ☐ 助工 [32.67%]
  - ☐ 工程师 [47.01%]
  - ☐ 副高 [17.93%]
  - ☐ 正研 [2.39%]
4. 您在哪一级气象部门工作？（单选）
  - ☐ 县级 [47.81%]
  - ☐ 地市级 [41.04%]
  - ☐ 省级 [11.16%]

## 二、预报员对集合预报的基本认识

5. 您何时开始接触集合预报？（单选）
  - ☐ 本科 [21.51%]
  - ☐ 硕士 [15.14%]
  - ☐ 博士 [1.2%]
  - ☐ 工作 [59.36%]
  - ☐ 无接触 [2.79%]
6. 您工作中通过何种方式进一步认识集合预报？（多选）
  - ☐ 业务培训 [68.13%]
  - ☐ 预报应用 [81.27%]
  - ☐ 科研项目 [20.72%]
  - ☐ 没有兴趣进一步认识 [1.99%]
7. 您对集合预报基本产品的定义、算法和特点了解吗？（单选）
  - ☐ 完全了解 [1.99%]
  - ☐ 大部分了解 [29.08%]
  - ☐ 少数了解 [56.57%]
  - ☐ 不了解 [12.35%]
8. 您从何种渠道可获得集合预报产品？（多选）
  - ☐ 国家局业务网站 [48.61%]
  - ☐ 省级业务网站 [95.22%]
  - ☐ 本级部门科研成果转化产品 [19.12%]
  - ☐ 国外业务网站 [9.16%]
9. 您对集合预报原始数据有哪些了解？（多选）
  - ☐ 数据类型 [49.00%]
  - ☐ 时空分辨率 [45.42%]
  - ☐ 读取处理方式 [18.33%]
  - ☐ 完全不了解 [35.46%]
10. 您了解过哪些类集合预报后处理技术？（多选）
  - ☐ 统计后处理（如概率分布函数等） [49.00%]
  - ☐ 降尺度技术（如动力降尺度、统计尺度等） [30.68%]

- ☐ 聚类分析技术 [21.91%]
- ☐ 再预报方法（如极端天气预报指数、分位数匹配等） [27.89%]
- ☐ 特征追踪 [15.14%]
- ☐ 其他 [9.56%]
- ☐ 完全不了解 [29.08%]

## 三、集合预报产品应用及研究情况

11. 您在何种场景使用集合预报？（单选）
  - ☐ 仅业务值班 [64.14%]
  - ☐ 仅科研 [2.79%]
  - ☐ 业务和科研均使用 [31.08%]
  - ☐ 从不使用 [1.99%]
12. 您在日常预报值班中使用集合预报吗？（单选）
  - ☐ 偶尔使用 [49.00%]
  - ☐ 经常使用 [48.21%]
  - ☐ 从不使用 [2.79%]
13. 您常在哪些天气预报场景中使用集合预报？（多选）
  - ☐ 常规天气 [68.53%]
  - ☐ 灾害性天气 [80.08%]
  - ☐ 极端天气预报 [54.18%]
  - ☐ 专项气象预报服务 [44.62%]
14. 您使用过哪些常用集合预报产品？（多选）
  - ☐ 集合平均或中位数 [45.02%]
  - ☐ 集合离散度 [35.06%]
  - ☐ 天气要素概率预报 [73.31%]
  - ☐ 分位值 [20.32%]
  - ☐ 邮票图 [57.77%]
  - ☐ 面条图 [38.25%]
  - ☐ 单站集合预报（箱线图） [56.97%]
15. 您最常使用哪一类的集合预报产品？（单选）
  - ☐ 集合预报生成的确定性产品 [37.85%]
  - ☐ 集合预报概率产品 [33.47%]
  - ☐ 集合预报指示不确定性的相关产品（邮票图、面条图、端须图等） [28.69%]
16. 您使用过的全球集合预报系统有哪些？（多选）
  - ☐ 中国GRAPES [66.14%]
  - ☐ 欧洲ECMWF [92.43%]
  - ☐ 美国NCEP [44.62%]
  - ☐ 加拿大CMC [1.99%]
  - ☐ 其他 [6.37%]
17. 其中最常用的是？（单选）
  - ☐ 中国GRAPES [9.16%]
  - ☐ 欧洲ECMWF [86.85%]
  - ☐ 美国NCEP [1.99%]
  - ☐ 加拿大CMC [0.80%]
  - ☐ 其他 [1.20%]
18. 您觉得集合预报产品在目前天气预报服务中的作用如何？（单选）
  - ☐ 主要参考 [52.59%]
  - ☐ 补充参考 [45.82%]
  - ☐ 作用不大 [1.59%]

19. 您会如何把集合预报的不确定性信息应用在日常的天气预报制作和服务上? (单选)
- ☐ 在现有预报规范下(即最后发布的是单一值确定预报), 预报员可以通过斟酌预报用语、调整量级等来表达对预报的把握程度, 但这种方式预报可信度信息得不到最大程度的应用。要使它得到最大程度的应用, 现有的预报规范需要修改(由确定性预报变为概率预报) [97.61%]
  - ☐ 没有用处, 反而造成混乱 [2.39%]
20. 您觉得应不应该把这种隐藏在预报背后的预报可信度或不确定性作为天气预报的一部分如实地告诉公众和用户, 为什么? (单选)
- ☐ 应该。将预报不确定信息告诉用户, 这才是客观、科学的态度, 让用户根据预报不确定性去安排他们的行为, 将有助于最大限度地发挥预报的价值。并同时要帮助用户正确理解天气预报不确定性的内容 [83.67%]
  - ☐ 不应该。因为人们会觉得气象部门预报不准, 还把预报的责任推卸到用户身上 [5.18%]
  - ☐ 不应该。因为用户不会用带有不确定性的预报, 只会造成混乱 [11.16%]
21. 如果要求对公众和用户发布预报的可信度, 您觉得什么样的形式比较合适? (单选)
- ☐ 预报事件的概率大小 [32.27%]
  - ☐ 不同的用语(如可能性很小、中等、很大) [12.35%]
  - ☐ 用不同颜色来表达预报可信度(如红色代表可信度很低, 黄色代表中等, 绿色代表可信度高) [19.52%]
  - ☐ 根据不同情景, 所有以上这些都 [35.86%]
22. 让公众能够接受天气预报有不确定性的事实(如同治疗疾病有风险一样), 并科学地运用量化的不确定性信息来决策(使

社会或经济效益最优化), 您认为关键因素是什么? (单选)

- ☐ 大众科普宣传 [42.23%]
- ☐ 学校教育(教科书) [3.59%]
- ☐ 培训 [3.98%]
- ☐ 气象界同用户合作 [2.39%]
- ☐ 所有以上这些 [47.81%]

#### 四、不足和建议

23. 您觉得目前集合预报相关产品本身的最大不足是什么? (单选)
- ☐ 集合预报产品生成的确定性产品准确率不高 [40.24%]
  - ☐ 集合预报产品的时间、空间分辨率不够 [14.74%]
  - ☐ 集合预报产品的到报时间偏晚 [19.12%]
  - ☐ 相比确定性预报没有明显优势 [13.55%]
  - ☐ 集合预报产品还不够丰富 [12.35%]
24. 您倾向于加大力度发展和使用集合预报什么类型产品? (多选)
- ☐ 全概率预报 [56.97%]
  - ☐ 离散度预报(不确定性信息预报) [37.45%]
  - ☐ 转化为更多的确定性预报 [56.97%]
25. 您觉得阻碍集合预报相关产品应用最大可能原因是什么? (单选)
- ☐ 集合预报不确定性信息的应用缺少需求 [28.69%]
  - ☐ 集合预报产品本身不够可靠、准确和丰富 [30.28%]
  - ☐ 预报员对集合预报相关产品的认知程度不够 [41.04%]
26. 您对上级业务部门目前在集合预报业务应用上的建议? (多选)
- ☐ 丰富集合预报产品的种类 [64.94%]
  - ☐ 提高集合预报产品分辨率、准确率 [69.72%]
  - ☐ 增加集合预报推广和培训 [71.71%]
  - ☐ 让预报员更多地参与集合预报研发工作 [45.02%]

(上接64页)

- PREDICT. Monthly Weather Review, 2014, 142(8): 2860-2878.
- [43] Shu S, Zhang F. Influence of equatorial waves on the genesis of super typhoon Haiyan (2013). Journal of the Atmospheric Science, 2015, 72: 4591-4613.
- [44] Torn R D, Elless T J, Papin P P, et al. Tropical cyclone track sensitivity in deformation steering flow. Monthly Weather Review, 2018, 146: 3183-3201.
- [45] Magnusson L. Diagnostic methods for understanding the origin of forecast errors. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2017, 143: 2129-2142.
- [46] Maddison J W, Gray S L, Martinez-Alvarado O, et al. Upstream cyclone influence on the predictability of block onsets over the Euro-Atlantic region. Monthly Weather Review, 2019, 147: 1277-1296.
- [47] Yu H, Meng Z. Key synoptic-scale features influencing the high-impact heavy rainfall in Beijing, China, on 21 July 2012. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2016, 68(1): 31045.
- [48] 王毅, 马杰, 代刊. “7·20”华北强暴雨集合预报的中期预报转折和不确定性分析. 气象, 2018, 44(1): 53-64.
- [49] Huang L, Luo Y. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for south China during the presummer rainy season. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122: 8494-8516.
- [50] 王毅, 何立富, 代刊, 等. 集合敏感性方法在高原涡和西南涡引发暴雨过程中的应用. 高原气象, 2017, 36(5): 1245-1256.
- [51] Zhang M, Meng Z. Impact of synoptic-scale factors on rainfall forecast in different stages of a persistent heavy rainfall event in South China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123: 3574-3593.
- [52] Weisman M L, Trapp R J, Romine G S, et al. The Mesoscale Predictability Experiment (MPLEX). Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(12): 2127-2149.
- [53] Torn R D, Romine G S. Sensitivity of central Oklahoma convection forecasts to upstream potential vorticity anomalies during two strongly forced cases during MPLEX. Monthly Weather Review, 2015, 143(10): 4064-4087.
- [54] Berman J D, Torn R D, Romine G S, et al. Sensitivity of northern Great Plains convection forecasts to upstream and downstream forecast errors. Monthly Weather Review, 2017, 145: 2141-2163.
- [55] Torn R D, Romine G S, Galarneau T J. Sensitivity of dryline convection forecasts to upstream forecast errors for two weakly forced MPLEX cases. Monthly Weather Review, 2017, 145: 1831-1852.
- [56] Kerr C A, Stensrud D J, Wang X. Diagnosing convective dependencies on near-storm environments using ensemble sensitivity analyses. Monthly Weather Review, 2019, 147: 495-517.
- [57] Lamberson W S, Torn R D, Bosart L F, et al. Diagnosis of the source and evolution of medium-range forecast errors for extratropical cyclone Joachim. Weather and Forecasting, 2016, 31(4): 1197-1214.
- [58] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. 气象科技进展, 2014, 4(5): 6-20.
- [59] Ancell B C. Improving high-impact forecasts through sensitivity-based ensemble subsets: demonstration and initial tests. Weather and Forecasting, 2016, 31: 1019-1036.

# “预报挑战度”和“可预报性演变指数”简介

■ 杜钧 邓国

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.009

“预报挑战度”(measure of forecast challenge, MFC)是一种衡量预报难易的新尺度;“可预报性演变指数”(predictability horizon diagram index, PHDX)是一种检验集合预报的新评分。这二种新指标是杜钧等于2019年提出来的,文章发表在美国气象学会英文杂志《天气和预报》上。为了让国内基层台站业务预报和研发人员也能熟悉和应用这些方法,我们在此作一简短的总结介绍。

## 1 方法提出的动机和目的

目前我们都是用预报的误差大小来度量一个数值预报的好坏。引入集合预报后,预报的可信度可以用集合离散度来量化。对预报员和用户而言,同样一个预报,虽然它们的集合平均预报误差可能一样,但不确定性大(可信度低)的预报显然比不确定性小(可信度大)的预报更难在具体决策中运用(图1)。“预报挑战度”就是既考虑预报误差又考虑预报可信度,来综合衡量预报的质量。这相当于把一张二维的平面照片变成了一张三维的立体图形,希望能更准确地描述一个物件。

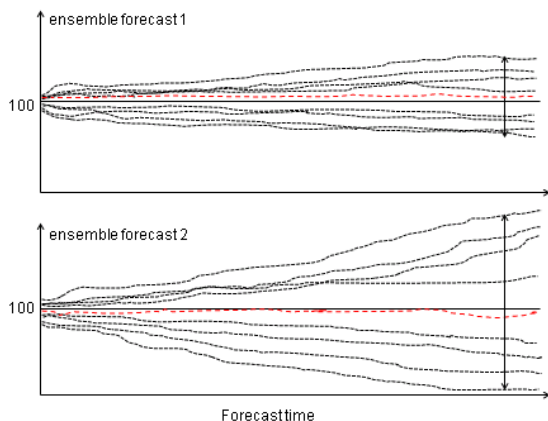


图1 集合预报1和2(黑色为成员,红色为集合平均)。虽然它们的集合平均预报很相似,但集合离散度相差很大。显然,集合预报2在预报员或用户决策过程中比集合预报1更难应用

针对某一地点某一天气(如北京某一日08时的风向),通常预报检验都是针对某一个给定的预报(如前一日08时发布的预报)在某一预报时刻(如24小时预报)进行的,而不考虑过去曾对该天气事件发布过的所

有预报的时间演变情况。而现实中,过去预报结果的时间演变对预报员或用户决策过程难易程度和成败起了重要作用:有些起了积极作用、有些起了误导作用。现有的集合预报检验方法并没有把这个时间演变情况考虑在内,而新提出的“可预报性演变指数”把过去一系列预报的时间演变特征定量地考虑进去了,如预报的稳定情况(误差变化)和可信度的变化(离散度变化)。这样在检验指标中加入时间维度后,相当于把照片变成了录像,希望能更全面地反映真相。

## 2 方法介绍

### 2.1 预报挑战度(MFC)

任何一个变量在给定的某一地点和预报时刻,它的“预报挑战度”可以通过公式(1)从一个集合预报中计算出来:

$$MFC = (EME + Sprd + NonLN) \times (1 + OUT), \quad (1)$$

式中包括了4个同预报难易程度有关的要素(集合平均预报误差 $EME$ 、离散度 $Sprd$ 、非线性度量 $NonLN$ 和实况出界程度 $OUT$ ),它们分别通过式(2)~式(5)来定义。 $EME$ 、 $Sprd$ 和 $NonLN$ 量级差不多,所以没有进行正态化处理;出界度是对前三项之和的修正,如果实况出界就增加惩罚。分析表明这4个元素除享有共同的信息外,还在很大程度上提供相对独立的信息。

$EME$ 是集合平均预报 $m$ 同观测 $O$ 之差的绝对值,反映的是一个模式的平均预报水平:

$$EME = |m - O|. \quad (2)$$

集合离散度 $Sprd$ 定义为 $n$ 个成员预报 $m_i$ 相对集合平均 $m$ 的标准差:

$$Sprd = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (m_i - m)^2}, \quad (i=1, 2, 3, \dots, n). \quad (3)$$

非线性度量 $NonLN$ 应用Du和Zhou(2011)的定义,为控制预报 $m_{cl}$ 同集合平均预报 $m$ 之绝对差值:

$$NonLN = |m - m_{cl}|. \quad (4)$$

$Sprd$ 和 $NonLN$ 都同大气可预报性和集合扰动技术有关。

出界度 $OUT$ 描述实况 $O$ 是否被集合解所包含,如果被包含就是0.0(式5c),否则就定义为出界程度,即超出集合边界的距离相对于集合解宽度(最大解 $m_{max}$ 和最小解 $m_{min}$ 之差)的比率(式5a和5b):

$$OUT = \frac{O - m_{max}}{m_{max} - m_{min}}, \quad \text{if } O > m_{max}, \quad (5a)$$

收稿日期:2019年11月17日;修回日期:2019年12月18日  
第一作者:杜钧(1962—), Email: jundu\_noaa@yahoo.com

$$OUT = \frac{m_{\min} - O}{m_{\max} - m_{\min}}, \text{ if } O < m_{\min}, \quad (5b)$$

$$OUT = 0, \text{ if } m_{\min} \leq O \leq m_{\max}. \quad (5c)$$

所以, *MFC* 不但包括了模式预报误差, 还考虑了预报的不确定性, 大气运动的非线性程度, 以及实况是否被集合预报解所包括 (同集合预报系统的设计和模式系统性偏差有关)。分析表明, 此指标中集合平均预报误差贡献最大, 其次是离散度, 然后是非线性度量, 出界率贡献最小。譬如, 用 NCEP 全球集合预报中高度、温度、湿度和风场的 126 小时预报资料计算的平均结果看到, *EME*、*Sprd*、*NonLN* 和 *OUT* 与 *MFC* 的空间相关系数分别为 0.85, 0.7, 0.6 和 0.3。

## 2.2 可预报性演变指数 (PHDX)

对于某一天气事件, 随着预报时效愈来愈接近, 集合预报解随时间的演变可以有如下 4 种情形 (图 2): 1) 符合实况的成员数不断增多而不确定性减小 (图 2A 中 a); 2) 同上相反, 尽管离散度也变小, 但符合实况的成员数反而变少 (图 2B 中 a); 3) 集合解不随时间收敛 (不确定性保持很大), 但包含了实况 (图 2C 中 a); 4) 离散度保持很大, 且实况基本不被包含 (图 2D 中 a)。如果用 *MFC* 来衡量的话, 在第一种情形中 *MFC* 随着事件的接近而变小, 该预报为用户决策提供了可靠有用的信息, 称为第一类 (Type I, 图 2A 中 c); 第二种情形下, *MFC* 变大, 误导了用户的决策过程, 称为第二

类 (Type II, 图 2B 中 c); 在第三和四情形中, *MFC* 随预报时长变化不大, 但前者 *MFC* 值稍小 (因为实况包含其中), 后者值稍大 (因为实况不在集合解中), 该类预报由于不确定性不减小, 很难帮助用户决策, 称为第三类 (Type III, 图 2C 中 c 和图 2D 中 c)。

为了定量反映上述 4 种可能的情形, “可预报性演变指数” 定义如下:

$$PHDX = \frac{Trend}{Mag}, \quad (6)$$

式中 *Trend* 是过去一系列集合预报的 *MFC* 值随天气事件逼近时 (图 2 中的  $t = 12, 11, \dots, 2, 1$ ) 的时间变化净趋势:

$$Trend = \sum_{t=T}^2 (\delta_t \times Avslp), \quad (t = T, T-1, \dots, 3, 2), \quad (7)$$

式中,  $t=T$  代表最远的预报,  $t=1$  代表最近的预报, *Avslp* 是 *MFC* 在所有众多二个相邻集合预报间变化的平均值 (平均斜率):

$$Avslp = \frac{1}{T-1} \times \sum_{t=T}^2 |MFC(t-1) - MFC(t)|, \quad (8)$$

$$(t = T, T-1, \dots, 3, 2),$$

$$\delta_t = 1, \text{ if } MFC(t-1) - MFC(t) < 0 \text{ (MFC 变小)}, \quad (9a)$$

$$\delta_t = -1, \text{ if } MFC(t-1) - MFC(t) > 0 \text{ (MFC 变大)}, \quad (9b)$$

$$\delta_t = 0, \text{ if } MFC(t-1) - MFC(t) = 0 \text{ (MFC 没有变化)}. \quad (9c)$$

*Mag* 是所有预报的 *MFC* 值之总和:

$$Mag = \sum_{t=T}^1 MFC(t). \quad (10)$$

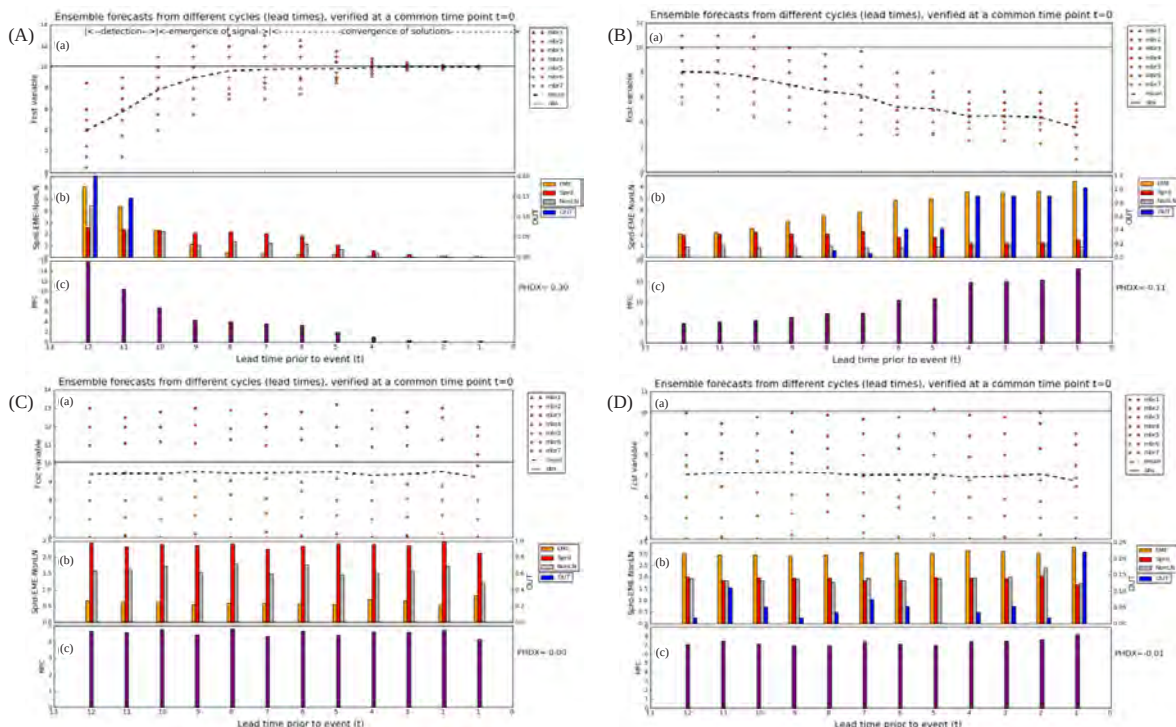


图 2 (A) “第一类”情形: (a) 集合预报随时间的演变 (水平实线表示实况 *obs*, 虚线表示集合平均, 红点表示集合成员), “第一类”情形下有三个阶段, 先是个别成员接近实况, 然后更多的成员围绕着实况, 最后是离散度变小、集合解向实况收敛; (b) 计算 *MFC* 中四要素; (c) *MFC* 的时间演变。(B) “第二类”情形。(C) 和 (D) “第三类”情形: 前者集合解包含了实况, 后者漏了实况

PHDX值的变化范围为-1.0~1.0, 正值对应“第一类”情形, 负值对应“第二类”情形, 零值附近对应于“第三类”情形。对应图2中的4种情况, 它们的PHDX值分别为0.30(图2A), -0.11(图2B), 0.00(图2C)和-0.01(图2D)。

PHDX可以用来比较不同集合预报系统的预报能力, 或对于同一个集合预报系统来区分哪些天气事件或要素可预报性较高或较低等。譬如, 图3是用NCEP区域集合预报SREF的实际降水和温度预报资料计算的例子:

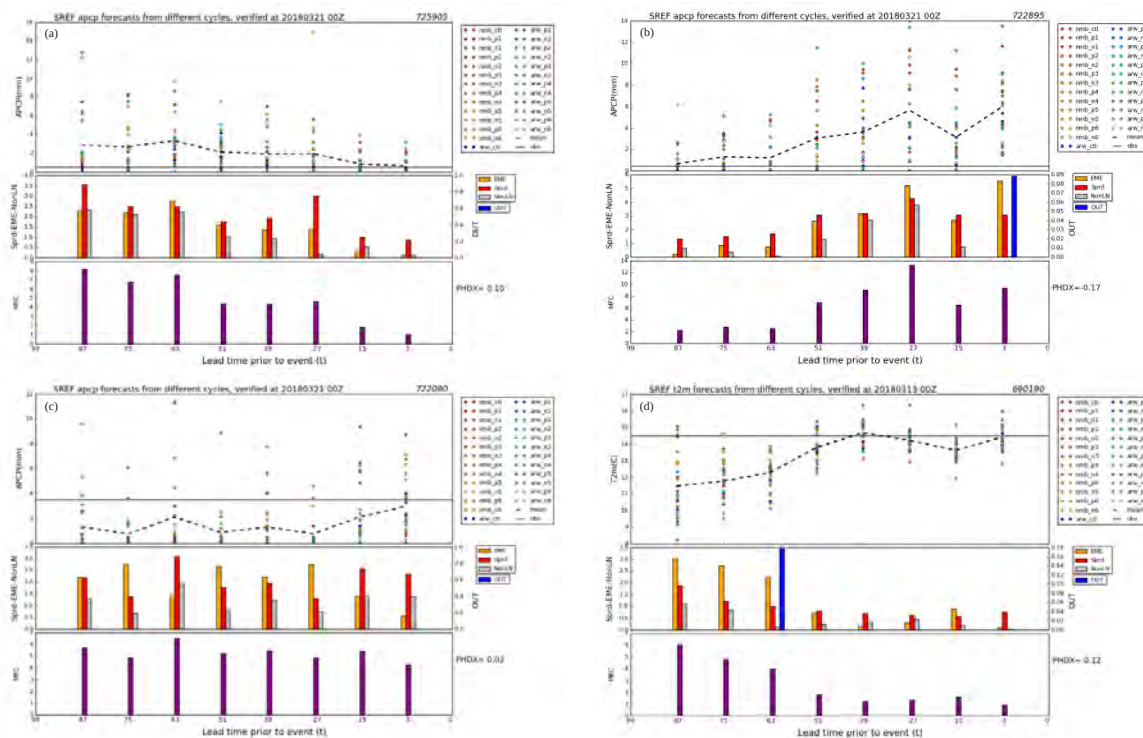


图3 同图2, 但是用NCEP区域集合预报SREF的实际降水和温度预报资料计算的例子: (a), (b)和(c)分别是集合降水预报可预报性演变的“第一类”(PHDX=0.10)、“第二类”(PHDX=-0.17)和“第三类”(PHDX=0.02)情形; (d)是离地表2 m高度处的气温集合预报可预报性演变的例子(“第一类”, PHDX=0.12)

### 3 结论

随着集合预报的出现, 预报可信度成了衡量一个预报信息的重要度量, 所以检验预报的评分指标也应该包括这一应用价值的度量, “预报挑战度”就是为了适应这一需要而提出来的, 它除了预报误差还考虑了预报不确定性。对某一天气事件, 其预报信息的时间演变对预报员或用户决策有重大的影响, 一个稳定而又准确的预报是用户所期待的, 而一个不准确或多变或不确定性很大的预报对用户决策会起误导作用或无法决策。所以, 预报评价指标中应该考虑预报的时间演变, 本文中的“可预报性演变指数”正是这一方面的新尝试。由上可知, 此二种预报评价新指标的出发点是以预报员或用户决策过程的难易程度和准确性为标准, 而并不以直接描述被预报的天气过程难易程度或揭示预报模式的某些缺陷为目标, 虽然它们会有某种程度上的联系。

图3a~3c分别是集合降水预报可预报性演变的“第一类”“第二类”和“第三类”情形; 图3d是离地表2 m高度处的气温集合预报可预报性演变的例子(“第一类”)。经过许多例子的检验, 发现气温预报出现“第一类”的情况远多于降水, 或说气温的可预报性一般大于降水, 这同我们的实际经验是相符的。原文中还对NCEP全球集合预报系统GEFS预报的二次大雪过程进行了计算, 也表明PHDX有能力来区分同一天气过程但不同地点其可预报性的高低。

因为此二种指标刚提出不久, 实际例子应用还不多, 所以希望大家多应用, 并在应用中逐步改进完善它们。

#### 深入阅读

- 杜钧, 2002. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 13(1): 16-28.
- 杜钧, 周斌斌, 2016. 雾的集合预报与集合预报的检验. 气象科技进展, 6(3): 41-47.
- Du J, Zhou B, 2011. A dynamical performance-ranking method for predicting individual ensemble member performance and its application to ensemble averaging. Monthly Weather Review, 139: 3284-3303, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05007.1>.
- Du J, Zhou B, Levit J, 2019. Measure of forecast challenge and predictability horizon diagram index. Weather and Forecasting, 34: 603-615.
- Greybush S, Saslo S, Grumm R, 2017. Assessing the ensemble predictability of precipitation forecasts for the January 2015 and 2016 east coast winter storms. Weather and Forecasting, 32: 1057-1078. doi: 10.1175/WAF-D-16-0153.1.

(作者单位: 杜钧, 美国国家海洋和大气管理局国家环境预报中心; 邓国, 中国气象局数值预报中心)



立足气象事业  
服务人才发展



CMA HUMAN RESOURCES  
EXCHANGE CENTER  
中国气象局人才交流中心

### 【编者语】

本期在中国气象局人才交流中心支持下刊载一组在人才工作、培训需求、气象科普等方面的研究成果。这些成果主要围绕当前气象人才队伍建设中存在的突出问题，从不同方面进行了有益的思考和探索：一是气象人才准入，全面分析潜在气象人才资源状况、气象工作岗位特点，结合人才招聘需求，有针对性地提出招聘工作策略；二是气象人才选拔，探讨气象部门在深化人才评价机制体制改革中的实践经验，在此基础上构建人才评价指标体系，为更好的改进气象人才评价工作提供参考；三是气象人才队伍建设，从不同的视角分析气象部门高层次人才和企业人才队伍建设现状及发展趋势，对比分析队伍发展特征，提出针对性对策建议，力图为加强人才队伍建设提供解决方案。



# 气象部门高层次人才评价研究

王梅华 刘蕊

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 中国气象局人才交流中心, 北京 100081)

**摘要:** 人才评价是人才发展体制机制的重要组成部分, 是人才资源开发与管理的的前提。在分析总结气象部门高层次人才评价现状基础上, 构建气象部门高层次人才评价指标体系, 提出了高层次人才评价的优化路径, 为气象部门合理建设高层次人才队伍提供理论支撑。

**关键词:** 气象部门, 高层次人才, 评价指标

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.010

## Research on the Evaluation of High-Level Talents in Meteorological Departments

Wang Meihua, Liu Rui

(1 CMA Training Center, Beijing 100081 2 CMA Talent Exchange Center, Beijing 100081)

**Abstract:** Talent evaluation is an important part of the system and mechanism of talent development, and a prerequisite for the development and management of talent resources. This paper summarizes the practice of high-level personnel evaluation in meteorological departments, constructs the evaluation index system of high-level personnel in meteorological departments, and puts forward the optimization path of high-level personnel evaluation, which provides theoretical support for the rational construction of high-level personnel in meteorological departments.

**Keywords:** meteorological department, high-level talent, evaluation index

### 0 引言

人才是实现民族振兴、赢得国际竞争主动的战略资源, 围绕实现“两个一百年”奋斗目标, 党中央、国务院对人才工作做出了一系列重要指示, 并强调要创新人才工作机制体制, 要改进人才评价, 发挥好评价指挥棒和风向标作用。气象事业作为科技型、基础性社会公益事业, 需依靠人才推动气象事业科学发展, 气象部门高层次人才是气象工作中的“领头雁”, 从根本上决定着气象事业发展的速度与质量。

人才评价是人才资源开发与管理的关键环节。气象部门出台了一系列人才发现、培养、使用的政策措施, 开展了首席预报员、首席气象服务专家、气象科技领军人才、气象青年英才、专业技术二级岗、正高级职称等一系列高层次人才评价工作。本文总结分析气象部门高层次人才评价现状, 构建气象部门高层次人才评价指标体系, 有利于发挥人才评价对气象部门高层次人才配置、导向、激励和约束作用, 对推动气象部门人才队伍建设具有重要意义。

### 1 气象部门高层次人才评价现状分析

#### 1.1 气象部门高层次人才特征分析

综合分析气象部门高层次人才政策和评价实践发现, 新时代气象部门高层次人才有以下主要特征:

1) 具有良好的道德修养和敬业精神, 能引导广大气象科技工作者坚持正确价值取向; 2) 具有较高的知识水平和专业技能, 体现气象事业基础型和科技型特点; 3) 具有较高的技术把关、科技创新和团队合作能力, 能把握气象发展的前沿研究方向, 突破气象核心技术, 解决制约气象现代化的关键科技问题; 4) 具有显著的业绩贡献, 对经济、社会产生了重大影响。

#### 1.2 气象部门高层次人才评价现状分析

近年来, 气象部门开展了一系列高层次人才评价遴选工作, 选拔首席预报员94人、首席气象服务专家27人、科技领军人才49人, 青年英才61人, 西部优秀青年人才160人。截至2019年10月, 在聘的二级岗专家134人、正高级专家1123人、“双百计划人选”163人(表1), 他们在推动气象事业的发展中发挥了重要作用。

收稿日期: 2019年7月29日; 修回日期: 2020年3月2日  
第一作者: 王梅华(1962—), Email: wangmh@cma.cn

表1 近年来中国气象局开展高层次人才评价情况  
Table 1 Evaluation of high level talents by CMA in recent years

| 人才类型     | 政策文件名称                                                                                                                            | 目的                                                                     | 成效*           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 二级岗      | 气象部门事业单位专业技术二级岗位管理办法<br>气发2012[37]、气发2017[19]、气发2018[55]                                                                          | 完善高层次骨干才使用评价激励政策，简政放权，加强用人单位主体责任，健全气象部门事业单位岗位设置管理制度                    | 二级专业技术岗专家134人 |
| 正高级      | 中国气象局正高级专业技术人员岗位考核实施细则<br>气象正高级职称评审条件 气人函[2017]230号、<br>《气象专业工程系列职称评审条件》《气象专业研究系列职称评审条件》气人函[2019]305号                             | 去掉计算机、英语的硬性要求，取消“一刀切”做法，摒弃“四唯”的传统做法，推进职称制度改革，科学公正评价气象专业技术人员学术技术水平和专业能力 | 正高级专家1123人    |
| “双百计划”人选 | 中国气象局“双百计划”管理办法（试行）<br>气发（2010）153号<br>中国气象局首席气象服务专家管理实施细则（2012年）<br>中国气象局科技领军人才管理实施细则（2013年）<br>中国气象局首席预报员管理实施细则（2015年）<br>..... | 落实《国家中长期人才发展规划纲要2010-2020》和《中国气象局关于加强气象人才体系建设的意见》，加大高层次学科带头人的引进和培养     | “双百”专家163人    |
| 青年英才     | 气象部门青年英才培养计划 气发（2010）109号                                                                                                         | 着眼于人才基础性培养和战略性开发，重点扶持、跟踪培养一批具有发展潜力的青年人才，形成气象部门科技领军人才的重要后备力量            | 61人           |
| 西部优秀青年   | 中国气象局西部优秀青年人才津贴实施办法<br>气发（2002）271号 气发（2010）148号                                                                                  | 进一步加强西部地区人才队伍建设                                                        | 160人          |

\*数据来源于2019年11月3日全国气象科技创新工作会议中国气象局副局长李如聪《突出科技型定位 推动气象事业高质量发展》的工作报告。

### 1.3 气象部门高层次人才评价影响因素分析

气象部门高层次人才评价标准不断优化，逐步以突出品德、能力、业绩为导向，注重考察人才的品德，重点考核创新质量和业务贡献，把学科领域活跃度和影响力、研发成果原创性、成果转化效益、气象服务满意度等作为重要评价指标。研究发现，人才评价指标和标准的调整直接影响人才评价成效。2017年气象部门修订正高级职称评审条件，摒弃“四唯”，促使通过评审的人数从2016年的86人增加到2017年的244人，而人才队伍在这两年并没有本质的变化。

现行的气象部门高层次人才评价方式主要采用答辩评审、材料评审，一般是专家组集中开会的形式，需要评委在短时间内对申报人的水平、能力、贡献等有准确的判断，对评审专家的学术水平、专业测评能力和分析判断能力等综合素质要求极高，难免出现受到申报人名气或专家组内其他专家意见影响的情况，探索更科学的评价方式显得非常有必要。采用信息化评审手段既可以减少评委之间的相互影响，又可以解决集中会议评审时受时间的约束，评委可以自主控制评审时间。有学者表示，人才测评的目的从公平取向到科学取向，应该加强对于人才测评的重视和研究<sup>[1]</sup>。

综上，针对气象高层次人才呈现4方面特征，即道德修养、知识和技能水平、能力、业绩贡献，制定合理的评价指标和标准，有效组织人才评价工作对人才队伍建设有十分重要的意义。

## 2 气象部门高层次人才评价指标体系构建

### 2.1 评价指标体系构建原则

1) 目标性原则。本研究主要是瞄准气象部门

高层次人才选拔培养的目的进行研究。2) 科学性原则。选取评价指标，既要符合当前国家政策导向，又要能够全面反映气象部门高层次人才的特征要求。3) 可操作性原则。在基本满足评价要求和给出决策所需信息的前提下，尽量减少指标个数<sup>[2]</sup>。4) 动态性原则。当气象事业向高质量发展的新时期，对气象部门高层次人才的要求不断变化，高层次人才评价指标体系必然做出相应的调整。

### 2.2 气象部门高层次人才评价指标体系构建

按照评价指标构建体系的原则，对标国家出台的系列人才评价政策，结合气象部门高层次人才的特征和人才评价实践，以道德修养、知识水平、能力结构、业绩成果四个维度综合评价气象部门高层次人才的框架。通过对文献与政策文件中出现频次较高的评价指标进行比对，初步筛选出相关评价指标，并以系统论的思维，对初步筛选出的评价指标逐级归类，建立一个按层次划分，包括各级要素的目标群，归纳二级指标20项，遴选三级评价指标50项。

德尔菲法是在函询调查和专家会议法的基础上扬长避短发展起来的一种有效的直接预测技术，匿名性、有控制地循环反馈、收敛性、统计性是其主要特点。本文采用该方法对分类后的指标进行筛选和修订。第一轮选取20余位相关专家，采用专家访谈、会议讨论等方式征询意见，第二轮在全国气象部门范围内广泛发放问卷征询意见，共收回有效问卷144份，剔除认可程度在70%以下的指标。调查咨询结果显示，专家普遍认同指标体系框架，但对二、三级指标数量及内涵提出了修改建议，经进一步筛选和整合，形成了一级指标4个、二级指标15个，三级指标38个

的评价指标体系。

结合近年来气象部门高层次人才评价工作实践，再

次征求部分专家意见，对指标解释进行了细化，最终形成

气象部门高层次人才评价指标体系框架(图1)。

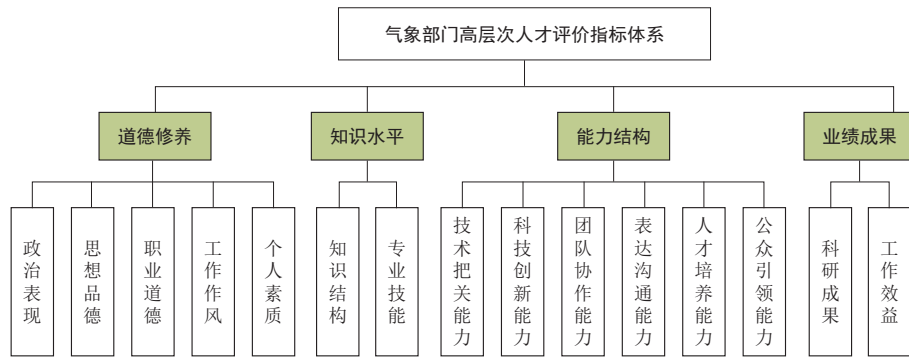


图1 气象部门高层次人才评价指标体系框架

Fig. 1 evaluation index system framework of high level talents in meteorological department

气象部门高层次人才评价指标体系的四个维度要求及指标细分如下。

#### 1) 道德素养

道德素养是气象部门高层次人才必须具备的基本素质，应在政治表现上考量是否具有正确的政治方向和良好的政治觉悟；思想品德上考量遵纪守法、廉洁诚信情况；职业道德上考虑热爱气象事业，责任感，奉献精神的程度；在工作作风上要求学术严谨、工作态度积极，并具有良好的身体和心理素质。

#### 2) 知识水平

气象事业的发展离不开具有多元知识结构和突出专业技能的创新型复合人才。创新型复合人才不仅擅长气象科学的某一领域，同时在广度上了解几个不同的学科，具备多学科交叉融合的特点，能形成气象科学与地理学、地质学、天文学、地震学、航空学、生态学、水文学、海洋学、环境科学等领域交叉融合，以交叉学科知识与复合能力服务于气象事业发展<sup>[3]</sup>。知识结构可以从学历层次和知识广度两方面考量；专业技能可从受教育培训程度和技能水平两方面评估。

#### 3) 能力结构

气象部门高层次人才能力是区别于其他技术人员的核心，需突出评价其履职能力和创新能力，应具备技术把关能力、科技创新能力、团队协作能力、表达沟通能力、人才培养能力、公众引领能力等六方面，具体考量指标如表2。

#### 4) 业绩成果

业绩成果由科研成果和工作效益两部分组成。科研成果要突出评价科研成果对推动气象科技进步和气象业务服务发展的实际贡献，包括科研项目、科研奖励、科研成果总结和科研成果转化等考核指标；经济效益主要考察可量化的经济效益和可从客户满意度角

度评判的社会效益。

### 3 气象部门高层次人才评价的优化路径

#### 3.1 完善高层次人才评价机制

根据气象人才队伍建设目标，明确不同类别高层次人才评价目的，以上述评价指标体系为基础，选取相应的评价指标，确定不同的权重系数，建立动态、分层、分类的人才评价标准；根据不同的评价类型，采用面试答辩、成果展示、业绩评估、材料评审等多种灵活的形式，尝试多元评价措施，注重个人评价和团队评价的结合，保证高层次人才评价的全面性；组建不同专业岗位方向的评审专家库，广泛吸收跨部门、跨单位的同行优秀专家，对综合性强的评审尝试同行专家预评审方式，注重加强对评审专家的规范化培训，提高高层次人才评价的质量和公正性；加强对评价结果的分析以及评价结果的反馈，促进评价对象的改进和提高，发挥人才评价的正向引导作用；进一步重视用人单位的评价意见，强化用人单位在人才评价过程中的主体地位。

#### 3.2 探索引入人才测评技术

人才测评技术是一种用于甄别被评价者未来潜能的评价过程有效方式。人才测评是运用心理学、管理学等相关学科的研究成果，使用客观化的方法对人的能力、水平、性格特征等因素进行测量，并根据需求对其素质状况、发展潜力、个性特征等做出科学的评价，为人才的选拔和评价提供参考信息。气象行业作为专业性较强的行业，气象人才的共性特征比较突出，可探索引入人才测评技术，全面、立体的评价气象部门高层次人才的综合素质。同时，组织专人开展人才评价基础理论、方法、模型等方面的研究工作，为气象人才评价提供基础理论支撑，提高气象部门人

表2 能力结构指标细分  
Table 2 Breakdown of capacity structure indicators

| 指标     | 指标细分   | 指标解释                                                                      |
|--------|--------|---------------------------------------------------------------------------|
| 技术把关能力 | 业务综合能力 | 能够解决制约气象现代化的关键科技问题，发挥示范引领作用                                               |
|        | 经验总结能力 | 在工作领域善于总结经验，形成气象技术总结成果                                                    |
|        | 知识更新能力 | 拥有知识及跟踪气象学科前沿状况                                                           |
|        | 项目推动能力 | 在气象业务、科研工作中有序推动科研项目顺利开展                                                   |
| 科技创新能力 | 创新思维   | 能提出新颖有实践意义的思维方式，为气象业务发展提出建设性意见                                            |
|        | 创新意识   | 敢于突破陈规、勇于探索与实践的精神，在业务发展、学科建设等方面具有创新性。                                     |
|        | 创新技能   | 能生产独创性地方法、知识等的技能，例如完成创造发明、获得科技进步奖等                                        |
|        | 前瞻能力   | 有洞察力和质疑能力，能预见科学发展的宽度和深度，具有前瞻性判断并解决实际工作中遇到的问题，能撰写预测材料及文章，并被管理部门认可，被同行广泛引用。 |
| 团队协作能力 | 团队协作意识 | 共同完成业务工作的协作意识和大局意识                                                        |
|        | 组织协调能力 | 妥善处理团队成员关系，指挥、激励、调配组织成员能力                                                 |
|        | 号召影响能力 | 在团队内的个人公信度和威望                                                             |
| 表达沟通能力 | 文字组织   | 用书面语言正确、生动、形象地表达思维、传播、交流信息记事状物的综合能力，完成较高水平的论文、报告等材料                       |
|        | 交流沟通   | 能够清晰表达自己以及理解他人                                                            |
| 人才培养能力 | 指导他人   | 具有指导气象专业技术人员工作或学习的经历                                                      |
|        | 带领团队   | 参加气象相关创新团队，科研课题等，发挥专家示范指导作用                                               |
| 公众引领能力 | 社会影响力  | 提升公众对气象行业认知的影响力，例如当选领军人物，气象微博大V等                                          |
|        | 科技影响力  | 体现担任学术专家情况、学术组织任职情况、学术类获奖或荣誉称号情况、主持或参加有影响力的国际国内学术会议情况等                    |

才评价的客观性和科学性。

### 3.3 推进高层次人才评价信息化

开发气象部门高层次人才评价信息化系统，探索网络化评审方式甚至远程盲审等评价方式，不但有助于克服时间和地域上的局限性，还可以使高层次人才的评价工作更高效便捷，降低评价成本。注重对高层次人才队伍储备信息资料的收集整理，建立科学完善的气象人才信息系统，保持人才信息库的准确性和有效性。借助大数据，形成人才跟踪评价机制，随时跟踪高层次人才队伍的变化，为预测、分析未来一定时期的高层次人才存量、变量、需求量和潜在供应量等提供可靠依据，掌握人才现状、特点、创新能力等，把握好部门人才发展的规律和趋势。

### 3.4 加强高层次人才评价监督

建立高层次人才评价监督机制，确保人才评价工作科学规范、公开公正地开展。一是加强高层次人才

评价的内部监督，通过“列计划、定方案、严执行、勤追踪”的方式，做到事前、事中、事后及重点环节的多方面监督，保证评价程序公正规范，尤其加强专家在高层次人才评价工作中的公正性的监督和评估。二是探索高层次人才评价外部监督机制建设，引入评价第三方机构参与评价工作，增加评价的公正性。三是实施高层次人才评价后评估的管理制度，通过对人才评价工作实行定期检查监督，及时发现人才评价工作中偏差和不足，通过政策解读、经验分享等措施加以纠正，形成良性的人才工作环境。

#### 参考文献

- [1] 萧鸣政, 赵源. 领导人才评价与开发的创新、前瞻与突破——“2012中国领导人才论坛”会议综述. 中国人才资源开发, 2013(6): 105-108.
- [2] 崔行武, 王滨, 时涛. 高层次创业人才能力评价指标体系构建研究. 西北人口, 2015, 36(5): 63-67.
- [3] 张芝和, 高文丽, 付兆锋. 复合型气象人才: 减灾抗灾的急切呼唤. 中国人才, 2010(19): 25-26.

# 大气科学类专业毕业生就业意向 对气象部门人才招聘工作的启示

蔡金玲 林巧 乐青

(中国气象局人才交流中心, 北京 100081)

**摘要:** 大气科学类专业毕业生是全国气象部门补充人才资源、建设气象人才梯队的主要来源。然而, 随着气象事业发展的需求以及外部竞争的加剧, 气象部门招聘大气科学类专业毕业生面临的压力持续增长。调查研究大气科学类专业毕业生的就业意向, 对气象部门提高招聘工作效率和招聘质量有重要意义。

**关键词:** 气象部门, 人才招聘, 大气科学专业毕业生, 就业意向

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.011

## Inspiration of Employment Intentions of Atmospheric Sciences Graduates to Talent Recruitment in Meteorological Department

Cai Jinling, Lin Qiao, Yue Qing

(CMA Talent Exchange Center, Beijing 100081)

**Abstract:** Graduates in atmospheric science are the main source for the national meteorological departments to supplement human resources and build meteorological talent echelons. However, with the development of meteorological industry and intensification of external competition, the pressure for meteorological departments to recruit graduates in atmospheric sciences continues to increase. To investigate the employment intention of graduates in atmospheric science is of great significance for the meteorological department to improve the efficiency and quality of recruitment.

**Keywords:** meteorological department, recruitment, graduate in atmospheric science, employment intention

### 0 引言

近年来, 全国气象部门每年接收的大气科学类专业毕业生人数都低于招聘需求数量。随着民众对气象服务需求的增加, 气象服务市场的放开, 气象服务公司的不断发展, 都逐渐增加了对大气科学类毕业生的需求, 加之其他部门如农业、海洋, 特别是民航部门对大气科学类毕业生的需求量的逐年提高, 气象部门在招聘大气科学类专业毕业生方面将面临持续增长的压力。因此, 调研大气科学类专业毕业生真实就业意向, 对气象部门的招聘工作具有重要的参考价值。

### 1 大气科学类专业基本情况

大气科学类专业是理学大类下的一级学科。在本科教育层次, 大气科学类专业下设大气科学、应用气象学2个二级学科, 在研究生教育层次, 大气科学主要有气象学、气候学、大气物理与大气环境3个学

科方向。随着气象学科的发展, 以及社会对气象类专业毕业生需求的增加, 部分高校根据教育部的有关规定, 在研究生教育层次自设了部分气象专业, 如南京信息工程大学增设了气候系统与气候变化、应用气象学、大气遥感与大气探测、环境气象、海洋气象学等九个专业, 以扩大气象类专业规模和招生规模。在本文中, 将高等院校、科研院所等人才培养单位按照国家教育主管部门关于学科、专业设置的有关规定, 根据国家气象业务服务人才需求和大气科学学科发展需要开设的专业, 全部统计为大气科学类专业来开展毕业生就业意向的调查研究。

据不完全统计, 目前全国开设大气科学类专业人才培养的高校、科研院所所有二十多所, 近五年来平均每年大约有3000余名毕业生(包含博士、硕士、本科、专科四个学历层次)毕业。2020年大气科学类专业毕业生人数约为3500人(包括定向、在职生源)。其中, 博士研究生占9%, 硕士研究生占21%; 本科毕业生占61%, 大专毕业生占9%。

收稿日期: 2019年7月19日; 修回日期: 2020年2月20日  
第一作者: 蔡金玲(1982—), Email: 17650171@qq.com

本研究分别连续两年面向2019年、2020年毕业的大气科学类专业高校毕业生进行线上问卷调研，两年调研结论基本一致。本文以2020年毕业生的调研数据为例进行分析。在2020年毕业生的线上问卷调研中，共收到来自南京信息工程大学、成都信息工程大学、中国海洋大学等18所高校大气科学类专业毕业生的1039份有效问卷。参与本次问卷调查的毕业生中，本科毕业生占比78%，硕士占13%，博士占3%，大专毕业生占到3%。问卷填写人员的结构比例与毕业生实际结构分布相近，因而本次问卷填写样本具有较好的代表性。

## 2 毕业生就业意向调研基本分析

### 2.1 毕业生就业心态

参与问卷调查的学生仅有42%选择毕业以后就业（图1）。不同的学历（位）层次的学生在就业意愿上差距较大，本科选择就业的比例仅有29%，而硕士和博士分别为89%和91%。在准备就业的学生中，60%的学生认为如果不挑剔，就能找到工作；13%的学生认为如果充分准备，就能找到满意的工作。从整体看，虽然也有24%的毕业生认为难以找到工作，但大多数学生对自己能否顺利就业还是保持比较积极的

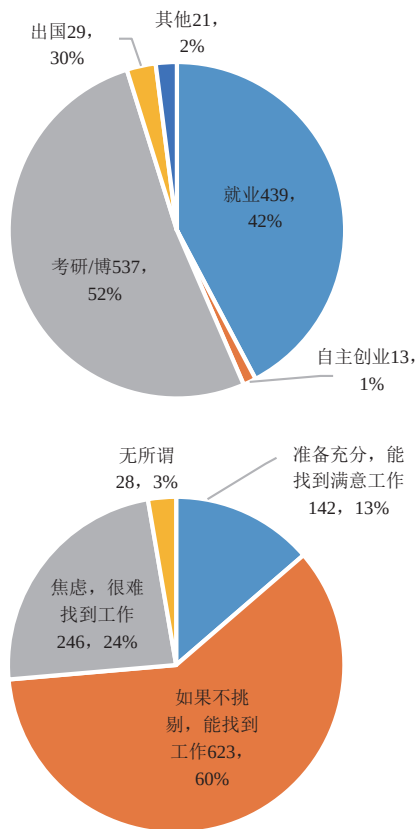


图1 毕业生就业意愿和心态

Fig. 1 Graduates' employment intention and mindset

心态。

关于影响个人就业的最主要因素调查结果显示，选择最多的前三项分别是：个人综合素质（66%）、实践或工作经验（64%）、专业对口（63%）（图2）。与此相对应，在关于求职的过程中认为自己最具竞争实力的回答中，选项最高的是个人综合素质，占比58%（图3）。这说明毕业生普遍对自身的综合素质有信心，一定程度上也解释了他们乐观的就业心态。

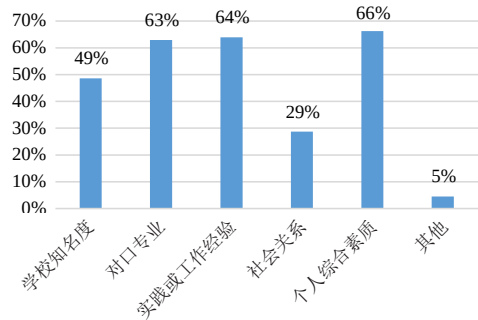


图2 毕业生认为影响就业最重要的因素

Fig. 2 The most important factors affecting employment hold by graduates

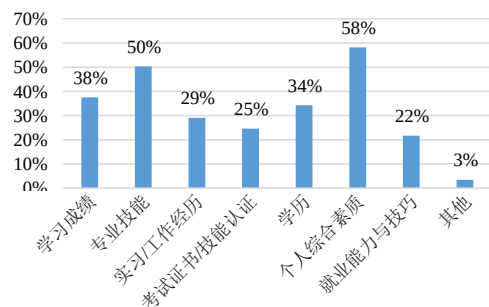


图3 毕业生认为自己最具竞争实力的方面

Fig. 3 The most competitive aspects graduates consider they have

### 2.2 毕业生就业选择

毕业生在择业时优先考虑的因素是薪酬待遇（77%），其次为工作环境（67%）和发展机会（57%）（图4）。

在薪酬方面，最能被学生接受的工资范围是每月5001~8000元，占比46%；排在第二位的是8001~12000元，占比24%；位列第三的是3001~5000元，占比18%。还有11%的学生希望能达到12000元以上，而能接受3000元及以下工资的学生只有不到1%（图5）。

在单位类型选择时，超过77%的毕业生首选事业单位、高校校及科研院所和政府机关，而首选私企或外企的选择人数只有5%（图6）。而从行业选择上看，占据首位的仍然是气象部门（91%），其次为航空行业（61%）和环保部门（46%），说明大多学生

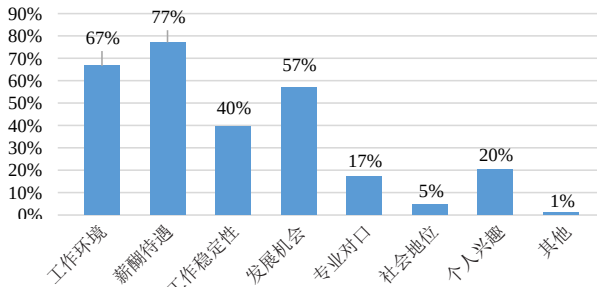


图4 毕业生就业时优先考虑的因素

Fig. 4 The Priority factors graduates consider in employment

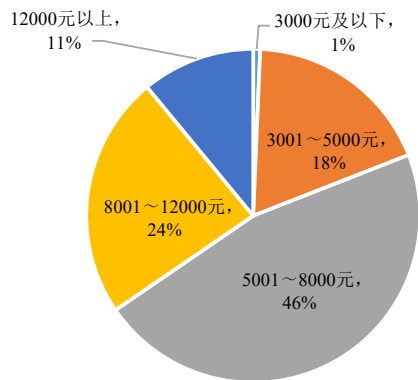


图5 毕业生期望的月薪水平

Fig. 5 Expected salary from graduates

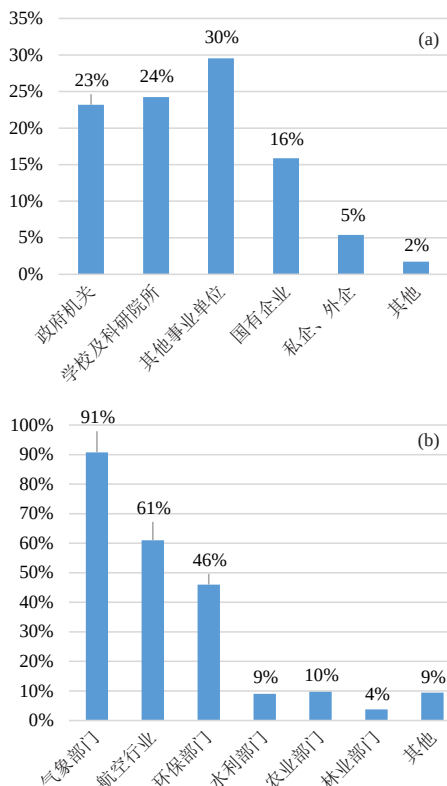


图6 毕业生就业单位类型(a)和行业(b)选择

Fig. 6 Organization type (a) and industry selection (b) of graduate employment

都还是希望能够学以致用，从事专业对口的工作。

而在就业地区的选择上，超过六成以上的学生选择东部大中城市就业，其次是北上广深等一线城市（图7）。从整体结果来看，学生就业城市还是偏向发达城市，这也与学生最关注薪酬待遇和高工资期望相符。学生选择东部大中城市就业的原因是除了当地的工作待遇好外，还因为较大的发展空间和生活环境好以及良好的就业政策。

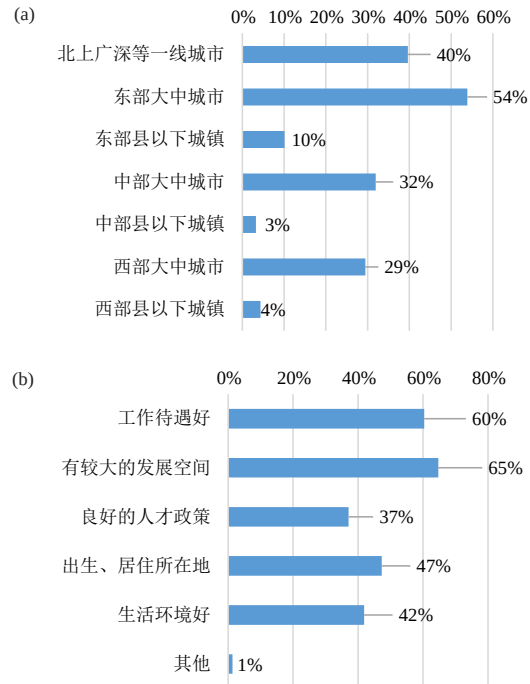


图7 毕业生就业区域选择(a)及原因(b)

Fig. 7 Choice area (a) and reason (b) of graduate employment

### 2.3 毕业生获取就业信息渠道及就业中的困扰

在受调查的毕业生中，超过一半的学生在毕业前提前一年开始关注招聘信息，还有15%的学生刚入校就已着手准备，说明现在的学生就业意识非常强。毕业生获取招聘信息渠道（图8）最多是学校就业指导中心（66%）、然后是招聘会/校园宣讲会（49%）和专业招聘网站（39%），其余还有从导师或亲戚朋友推荐的微信公众号获取招聘信息。

超过半数的学生表示气象部门就业信息少、对岗位工作不了解以及缺少相关实践和工作经验是自己在气象部门求职时遇到的主要困难（图9）。对气象部门职业发展路径、招聘流程和要求不了解也是困扰学生的重要问题。

在开放性问题中，部分学生对气象部门招聘工作提出一些建议，主要包括：多举办招聘会和宣讲会，加大气象部门招聘宣传力度，帮助学生了解岗位信

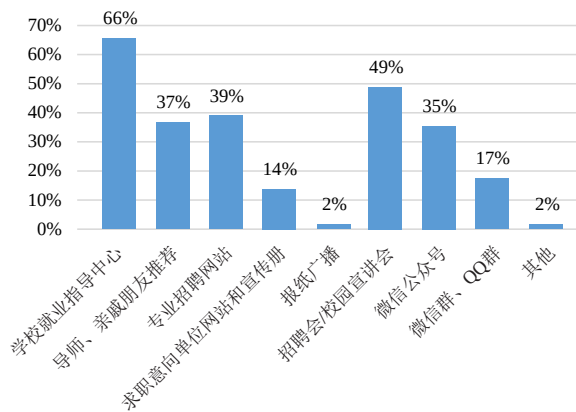


图8 毕业生就业信息获取渠道

Fig.8 Employment information acquisition channels for graduates

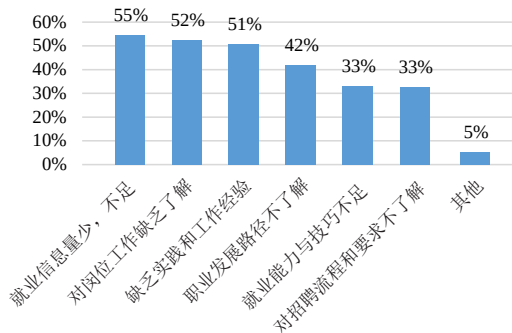


图9 毕业生在气象部门的求职困扰

Fig. 9 Issues related to graduates' job hunting in the meteorological department

息; 提高工资待遇, 减少学历要求虚高现象; 统一招考, 公平公正, 多给学生笔试、面试机会, 细化招聘要求等具体建议。

### 3 结论

#### 1) 大气科学类专业毕业生数量供不应求

近几年气象部门每年毕业生招聘需求计划都在2000人左右, 其中60%~70%的岗位需要大气科学类专业毕业生。全国每年大气科学类专业毕业生仅有3500多人, 其中42%的学生选择就业, 即每年选择就业的人数只有1500人左右。而需求单位则包括全国气象部门、民航、农业、海洋、森林、盐业等其他行业机构以及社会气象服务机构。气象部门用人单位在大气科学类毕业生招聘工作中面临较大压力, 供需矛盾突出。

#### 2) 气象部门招聘呈现区域性失衡现象

问卷调查显示, 毕业生到气象部门就业的意愿非常高, 但全国气象部门每年接收大气科学类专业毕业生的人数远低于招聘需求数量, 不少用人单位存在大气科学类专业岗位空编现象, 中西部偏远地区和艰

苦台站尤为严重。超过一半的学生选择在东部大中城市、北上广深等一线城市就业, 选择到中、西部县级气象部门就业的仅有7%, 造成招聘季几家欢喜几家愁的分化局面。

#### 3) 气象部门单位与毕业生之间信息不对称

单位和学生信息不对称, 用人单位和学生之间互动较少, 缺乏有效沟通途径。问卷显示毕业生对气象部门招聘最为困扰的是对岗位工作缺乏了解, 如招聘岗位职责、能力要求和职业发展路径等内容。这说明气象部门对高校毕业生招聘宣传工作有待改进。

### 4 对气象部门人才招聘工作的启示

1) 引导教育部门适当增加招生数量, 加大局校合作力度, 优化气象部门人才招聘结构

首先, 气象部门作为气象行业的主管机构, 要对气象行业未来人才需求进行科学预测, 定期发布大气科学类专业人才需求预测报告, 加强与教育部门的沟通, 引导教育部门适当增加大气科学类专业的招生数量, 优化招生计划在各省的比例。

其次, 各级气象部门要加大与高校的合作力度, 促使高校调整招生区域结构。同时还可与高校开展联合人才培养, 提前介入气象人才教育工作, 如实施与大学生在大一、大二年级时签订合作协议, 进行定向培养、定向就业等措施, 引导学生将个人的职业发展与气象事业发展需要相结合, 吸引学生到本地区就业。

2) 扩大气象部门招聘的影响范围, 加强气象部门人才政策的宣传力度

各级气象部门要紧跟时代潮流, 使用传播速度快、范围广的微信、微博公众号以及其他年轻人更喜欢使用的等各种新媒体网络传播方式, 让毕业生多途径、及时充分了解气象部门相关招聘信息。

要加强对气象部门人才政策的宣传力度。从调查结果来看, 毕业生对于收入水平、个人的职业发展前景最为关注。而近年来, 气象部门在人才引进、选拔等方面陆续出台了系列人才激励、奖励文件, 在人才的收入水平、人才的在职培养、成长通道等方面都有具体的体现。一是人事部门可将人才政策面向毕业生公布, 让毕业生了解气象部门的人才政策; 二是邀请近年毕业在气象部门就业的优秀青年到母校进行“现身说法”, 以自身在气象部门的成长经历来向毕业生传达气象部门对人才的重视, 增加气象部门对毕业生的吸引力。

3) 要严格规范招聘工作流程, 结合实际优化地

(下转122页)

# 气象部门事业单位公开招聘工作现状及问题分析

乐青 林巧 蔡金玲

(中国气象局人才交流中心, 北京 100081)

**摘要:** 毕业生是气象部门进人的主要来源, 气象部门事业单位公开招聘主要是针对应届毕业生招聘。通过对气象部门各直属事业单位、各省市气象部门的招聘工作开展的调研分析, 总结气象部门招聘工作特点和不足, 为各级气象部门有针对性地开展招聘, 提高招聘工作效率和人才质量提供有价值的参考信息。

**关键词:** 气象部门, 事业单位, 公开招聘

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.012

## Status and Problem Analysis of Open Recruitment in Meteorological Departments

Yue Qing, Lin Qiao, Cai Jinling

(CMA Talent Exchange Center, Beijing 100081)

**Abstract:** Graduates are the main source of meteorological departments, and public recruitment in meteorological departments is mainly for fresh graduates. This paper summarizes the characteristics and shortcomings of the recruitment work in meteorological departments. The relevant data were collected based on the investigation and analysis of the recruitment work carried out by institutions directly under the meteorological departments, and provincial and municipal meteorological departments. We expect that this study provides valuable reference for meteorological departments at all levels to carry out targeted recruitment and improve the efficiency and quality of recruitment work.

**Keywords:** meteorological department, government-affiliated institutions, open recruitment

### 0 引言

事业单位公开招聘制度实施以来, 在进一步拓宽事业单位的选人渠道、保证新进人员的素质、维护社会公平、促进党风廉政建设等方面发挥了巨大作用。但是, 随着社会主义市场经济体制的逐步建立, 这种选人用人方式也出现了一些弊端。2000年7月, 中组部、人事部联合下发《关于加快推进事业单位人事制度改革的意见》要求, 事业单位要制定具体的招聘考试办法, 从制度上规范事业单位选人用人的程序和做法。2005年11月, 人社部第6号令《事业单位公开招聘人员暂行规定》明确了事业单位公开招聘的范围、条件和程序, 招聘计划、信息发布、资格审查、考试考核的具体要求, 以及公开招聘的纪律。

根据以上规定, 结合气象部门实际情况, 2015年8月, 中国气象局印发了《气象部门事业单位公开招聘应届高校毕业生管理办法(试行)》(以下简称《管理办法》)对气象部门事业单位的公开招聘的方

法、程序做了具体的规范。2015年12月印发了《关于进一步规范事业单位公开招聘工作的通知》要求各单位严格执行公开招聘制度, 推进招聘工作公开透明, 增强公信力。

### 1 气象部门事业单位公开招聘毕业生工作进展

为进一步了解气象部门事业单位公开招聘的工作现状, 为气象部门各单位提供更加优质的人才招聘服务, 提高人才招聘工作质量, 为有关决策部门提供参考依据, 中国气象局人才交流中心根据管理办法, 面向各单位招聘工作人员, 开展气象部门事业单位公开招聘工作相关调查研究, 了解各单位招聘工作详情。本次调研共收到气象部门14个直属事业单位和31个省局单位的45份有效问卷, 各单位具体招聘工作情况如下。

#### 1.1 制度建设和公开情况

调研结果显示, 气象部门80%的单位以《管理办法》为招聘工作依据, 有24%的单位将《管理办法》和当地政府事业单位工作人员公开招聘管理办法作为共同参照依据。此外, 有73%的单位在参照《管理办法》的基础上制定了本单位的公开招聘管理办法。有

收稿日期: 2019年7月22日; 修回日期: 2020年2月6日  
第一作者: 乐青(1988—), Email: 496966305@qq.com

51%的单位建立了毕业生招聘接收工作标准和规范。47%的单位建立了毕业生招聘的监督检查和责任追究机制。各事业单位招聘工作都是依据相关文件要求开展工作。

《管理办法》中规定，各省（区、市）气象局、中国气象局直属事业单位应及时向社会公示拟聘人员信息，公示时间不少于7个工作日。公示内容包括招聘单位、岗位名称、拟聘人员基本情况、监督举报电话等。调查结果显示有53%的单位招聘工作全流程公开。此外，有78%的单位公开招聘岗位和拟聘用人员基本情况。73%的单位公示监督举报电话。只有38%的单位公示考试结果。因此，气象部门公开招聘工作仍需进一步规范，逐渐做到招聘工作全流程公开。

## 1.2 招聘工作周期和招聘途径

从图1可以看出，各单位的招聘时间主要集中在11月以后，部分单位的二轮招聘在次年3月以后，招聘工作主要集中在年底冬月。工作周期较长，三个月及以下完成招聘工作只占所有单位的31%。有38%的单位的招聘周期为6~12个月，其余为3~6个月。整体来看，各单位招聘周期较长，影响工作效率。

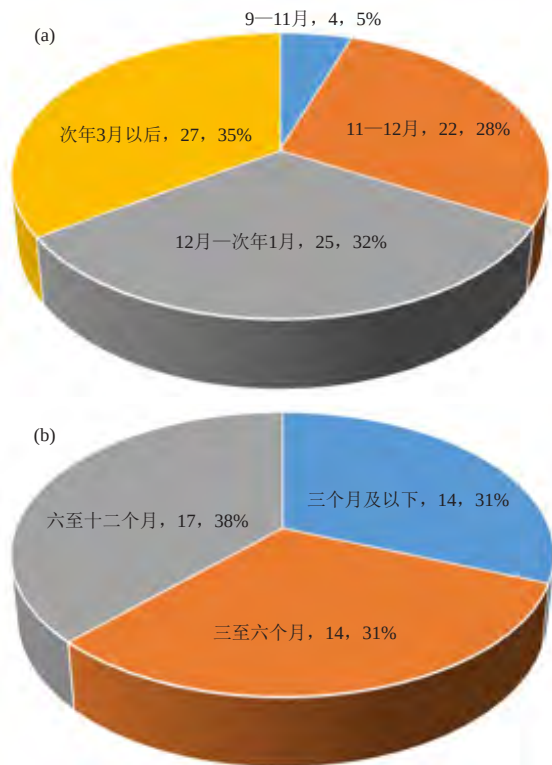


图1 单位招聘工作周期与时间  
Fig. 1 Open recruitment cycle and time

图2显示，各单位的招聘方式主要通过参加现场招聘会、中国气象局校园招聘系统和单位邮箱收集简历。

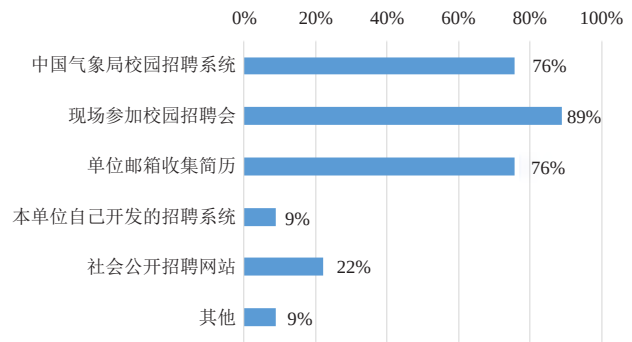


图2 单位招聘工作公开招聘途径  
Fig. 2 Open recruitment channels

## 1.3 招聘考试方式

气象部门招聘工作考试方式主要有笔试和面试（图3）。据调研结果显示，只有20%的单位逢进必考，有38%的单位是硕士及以上学历或大气科学类专业毕业生直接面试，本科生笔试加面试，16%的单位考试方式为仅面试，气象部门各单位的考试方式执行中缺乏科学合理的规划，各单位按本单位实际情况安排，气象部门招聘考试需加强统筹规范。

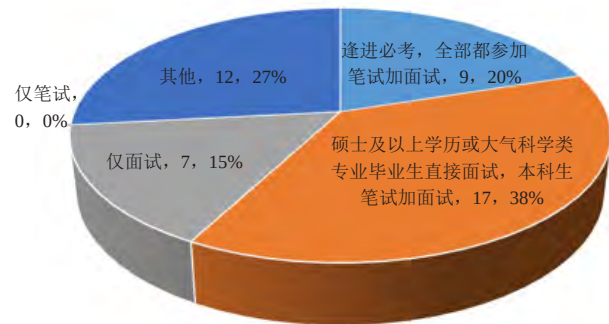


图3 单位招聘考试组织情况  
Fig. 3 Organization recruitment examination

### 1.3.1 笔试情况

在考试组织上，45家单位中只有33%的单位希望据本单位情况自行组织考试，其他都是希望中国气象局能统一组织考试，其中33%单位希望统一组织考试的试卷要按岗位和专业区分。可以看出，大多数单位倾向于中国气象局统一组织考试安排，但是考卷的设计要根据岗位、专业、区域、层级等情况设计。

各单位的笔试面试命题来源中，49%的单位都采用中国气象局人才交流中心命题，本单位自行组织考试。其次是地方人事行政部门所属考试服务机构、人才服务机构提供命题和组织考试。各单位都是采用第三方命题，自主命题只占整体的11%（图4）。

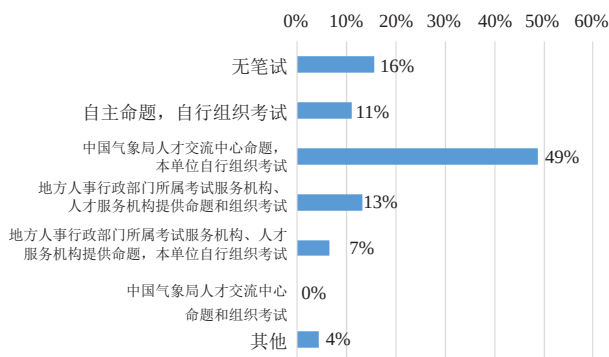


图4 单位招聘笔试组织情况

Fig. 4 Written examination in organization recruitment

### 1.3.2 面试情况

面试是气象部门招聘考试的重要方式, 调研显示, 45家单位中有41家面试权重超过50%, 其中8家单位面试权重100%, 14家单位面试权重大于50%, 19家单位面试权重等于50% (图5)。管理办法中规定: 招聘岗位面向大气科学类硕士研究生及以上全日制应届高校毕业生的, 可采取直接面试的考试方式。其他需要直接进行面试的情形, 须经省(区、市)气象局或中国气象局直属事业单位领导班子同意。直接面试的招聘岗位应在招聘计划和招聘公告中予以明确。因而各单位对毕业生的面试成绩十分重视。

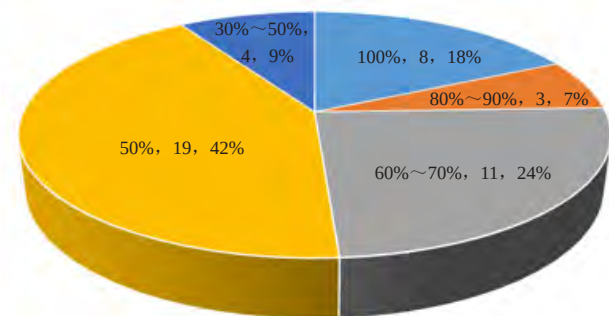


图5 单位招聘面试权重

Fig. 5 Weights of interview in organization recruitment

在各单位招聘成立的面试小组中, 外部委面试成员多为地方政府或其他单位人员, 其次为气象系统的其他单位成员。无外部评委, 全部为本单位内部评委的情况只存在几家少数单位。

### 1.4 招聘计划完成情况

调研结果 (图6) 显示, 仅有3家单位能够圆满完成招聘计划, 14家单位基本完成招聘计划, 但需调整招聘条件。有4家单位仅完成招聘计划的一半。由此可见, 大多数单位的招聘需求是不被满足的。各单位招聘计划不能完成的主要原因有本地生源不足、签约

流失率高、招聘周期长、大气科学类专业生源不足以及艰苦基层岗位投递人数较少等原因, 此外还有多数岗位的专业限制、待遇问题也是招聘计划不能满足的重要原因。

## 2 气象部门事业单位公开招聘毕业生工作经验、特点

### 2.1 执行规章制度严格, 工作秩序规范

调研结果显示, 气象部门80%的单位参照管理办法为招聘工作依据, 其中有24%的单位是管理办法和当地政府事业单位公开招聘管理办法为共同参照依据。调研结果显示, 各单位事业单位公开招聘工作按照中国气象局的招聘工作管理办法严格执行。此外, 有73%的单位结合本单位的实际情况, 在国家规定和管理办法的基础上, 制度本单位招聘工作管理办法或毕业生接收管理办法, 较2016年的自查报告中显示有10个省(区、市)气象局和7个直属单位未正式发布本单位的毕业生招聘接收工作标准和规范相比, 更多的单位建立了本单位的毕业生招聘规范, 制定招聘工作管理办法, 招聘工作有法可依、有章可循, 各单位招聘工作严谨有序, 规范执行。

### 2.2 招聘工作流程公开透明、公正公平

中国气象局在《关于进一步规范事业单位公开招聘工作的通知》中强调在招聘工作中要贯彻公开、平等、竞争、择优的原则, 切实做到信息公开、过程公开、结果公开。要严格规范公开招聘信息发布, 按要求及时公布进展情况, 提高公开招聘实施过程的透明度。调研结果显示53%的单位招聘工作全流程公开, 其余都是按照规定要求公开岗位信息、人员情况、监督电话等相关学生信息。各单位招聘工作应公开透明, 防止不正之风影响公开招聘工作, 单位主动接受舆论、群众和社会监督, 设立举报电话、邮箱, 联合上级纪检部门对重点工作环节进行全程监督, 着力推进招聘计划、招聘过程和招聘结果公开透明, 扩大了公开招聘的公信力。

### 2.3 考试方式逐渐规范, 严格执行回避制度

气象部门招聘考试采取笔试、面试方式进行。逢进必考, 考试主要测试岗位所需的专业知识、业务能力和综合素质。各单位根据工作实际, 组织笔试或面试, 笔试加面试双重考核对应聘者进行考核考察。在组织面试工作中严格执行回避制度, 坚决避免任人唯亲, 内部招聘等现象。超过一半的单位选择委托专业的第三方专业服务机构组织命题或组织考试, 确保招聘考试工作专业、严谨, 提高了公开招聘的公信力, 降低了招聘各环节出问题的风险。

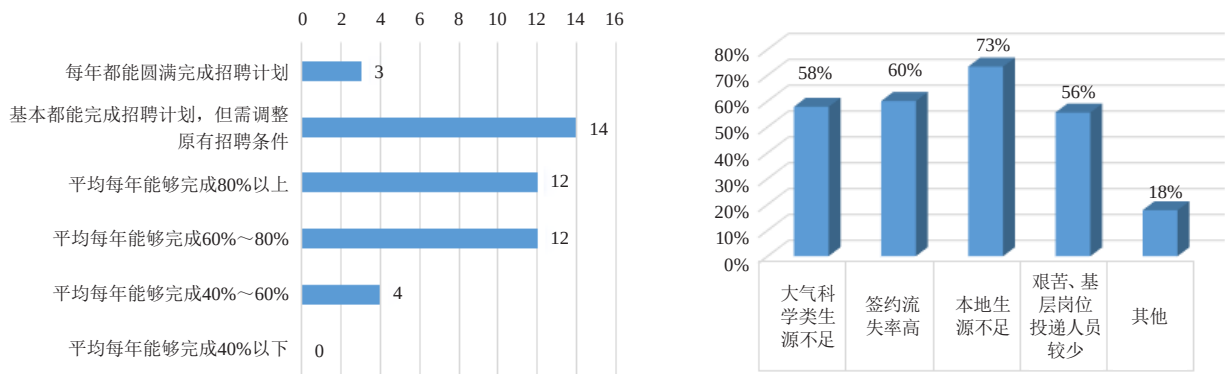


图6 单位需求计划完成度及原因  
Fig. 6 Completion of the recruitment demand plan and associated reasons

## 2.4 科学规划岗位需求,严格执行招聘计划

《管理办法》中规定各省(区、市)气象局人事部门负责审核汇总本省气象部门事业单位的公开招聘毕业生计划,经省(区、市)气象局领导班子研究后,报中国气象局人事司核准。中国气象局所属在京单位的公开招聘毕业生计划由中国气象局人事司审核后报人力资源和社会保障部审批。各单位的招聘岗位严格按照人事司批复的毕业生接收计划和岗位执行,不允许擅自更改接收条件,突破接收数量。避免了萝卜招聘,因人设岗等情况。调研结果中显示各单位严格按照招聘计划进行招聘,有65%的单位基本能完成招聘,个别单位因特殊情况,完善调整招聘计划后需上报上级部门调整招聘计划,复批后完成招聘计划。

## 3 气象部门事业单位公开招聘毕业生工作存在的问题

### 3.1 招聘制度不健全,仍需完善细化

气象部门各单位招聘工作严格遵守规章制度,依章有序进行。大部分单位建立了本单位的毕业生招聘规范,制定招聘工作管理办法,但仍有部分单位未制定出台本单位公开招聘相关制度,招聘制度本地化仍需进一步完善,结合本单位地方实情,细化相关管理制度。

此外,多数单位虽已初步建立事业单位公开招聘的制度体系,但有些制度还不够科学、规范,如招聘监督和招聘纪律方面对政策规定的理解和执行还不够深入。制度建立后学习宣传不到位,部分干部职工仍秉持旧观念,缺乏执行政策的自觉性,说情打招呼现象依旧存在,要求对子女就业予以适当照顾,对公开招聘工作带来一定压力。

### 3.2 考评机制不完善,仍需进一步探索

各单位注重对毕业生的考评,严格按照管理办法对毕业生进行考试考察,大多数单位选择与专业的第三方考试服务机构合作,开展招聘考试服务工作,这有利于提高了公开招聘的公信力,降低了招聘各环节出问题的风险,同时也存在一些问题:一是委托费用较高;二是面试工作中邀请外系统或外单位人员的参与比例目前没有明确规定;三是许多第三方考试机构提供的笔试和面试题本为通用型,不适合气象部门特点,缺少对岗位所需专业知识的设置。当前招录考试制度还不能全面测试应聘考生的专业知识、业务能力和综合素质,考试考评机制的针对性、科学性和公平性仍需进一步完善。

### 3.3 招聘形式守旧,仍需探索优化

调研结果显示,各单位的招聘周期较长,只有30%的单位招聘周期为三个月及以下,其余均为六个月左右,招聘工作周期较长,增加招聘工作成本。其次事业单位审批流程时间较长,且毕业生违约成本低,使得学生毁约率增加,影响招聘工作进展。

由于部分省(区、市)特殊的气候条件和相对落后的经济社会发展,致使在人才成长环境、待遇和保障方面与发达地区存在明显差距。即使当前就业压力较大情况下,到部分偏远省(区、市)气象局应聘且符合专业要求的高校毕业生仍十分有限,招聘岗位往往达不到1:3的竞争比例,形不成有效竞争。如何探索符合各省实际科学有效、简便易行的招聘方式,如何吸引并稳定住毕业生在基层工作,成为亟需解决的问题。

### 3.4 招聘工作监督、评估环节薄弱

管理办法中对招聘工作的纪律和监督工作有明确

的规定和指示,除了严格执行回避制度,建立招聘文档归档机制,以备必要时调查取证,发现违反行为,一律严肃处理。据调查结果显示,有51%的单位建立了毕业生招聘接收工作标准和规范,47%的单位建立了毕业生招聘的监督检查和责任追究机制。仍有一半的单位对毕业生的监督没有建立明确的规章制度,需进一步完善改进。

此外,招聘工作评估也是各单位相对忽略的部分,招聘评估是对整个招聘工作的总结和评价,对招聘结果、招聘成本和招聘方法等进行评估可以有效地总结招聘工作的优缺点,扬长避短,改善提升,提高下次招聘工作效率。

## 4 气象部门事业单位公开招聘毕业生工作建议

### 4.1 继续加强公开招聘制度建设和落实

各单位按要求研究制定适用于本单位的事业单位公开招聘接收工作标准和规范,不断细化和改进公开招聘工作制度,提高招聘人员队伍的专业化水平和专业素养,深入推进招聘工作的规范化和制度化,为全面深化气象改革和全面推进气象现代化建设提供有力的政策保障<sup>[1]</sup>。

要认真贯彻落实《事业单位公开招聘人员暂行规定》《气象部门事业单位公开招聘应届高校毕业生管理办法(试行)》等文件的有关要求,在事业单位公开招聘中严格执行各项规定,切实做好信息发布、资格审查、考试考核、招录公示等工作环节。

### 4.2 统筹规范招聘考评机制

各单位需进一步探索规范有效的招聘方式,完善考试考评机制。应进一步规范考试命题、笔试阅卷、面试组织等环节,提高科学性和权威性,力求招聘各个环节不留漏洞,经得起社会公众和干部职工和纪检部门的监督。要加大笔试、面试题目委托公正权威的第三方机构组织参与力度,面试评委应有一定比例的外系统或外单位人员参加。要对应聘人员一视同仁,杜绝内部招聘、因人招聘等现象。

进一步提升笔试和面试试题的科学测评水平。强化标准规范执行,对应聘人员实行多维度考察。招聘工作主管机构应结合气象部门岗位设置,统筹规划,提高招聘考试效度。

### 4.3 强化公开招聘薄弱环节,完善招聘方式

各单位应查找当前公开招聘工作中的漏洞和薄弱环节,积极探索规范有效的招聘方式,减少公开招聘成本。如减少招聘工作周期,节省工作成本;明确招聘时间节点,避免人才多方寻找,造成违约现象严重;依托局校合作,“关口前移”发掘优秀人才,根据实际情况不断完善当前考试考评机制。

要充分发挥气象人才招聘系统的平台作用,线上线下结合,网罗优秀毕业生,提高招聘质量,提升工作效率<sup>[2]</sup>。面对各单位人事部门“事多人少”,组织专业规范的招聘工作的投入有限的现状,单位可以通过和专业的第三方机构合作,加强招聘宣传、招聘考试等薄弱环节工作的开展。

### 4.4 建立健全长效监督机制,完善招聘评估

在招聘工作中要坚持德才兼备的用人标准,贯彻公开、平等、竞争、择优的原则,切实做到信息公开、过程公开、结果公开。加强对公开招聘的监督检查,建立舆情处理工作规程,自觉接受社会和考生的监督。主动邀请纪检部门监督,认真查核公开招聘工作中的信访举报,严肃查处违纪违规行为,着力建成民主、公开、竞争、择优的事业单位进入机制。提高各级领导和管理人员执行政策的自觉性,从思想上杜绝公开招聘工作中违规违纪行为。

招聘工作结束后,对招聘周期、招聘成本、招聘结果、招聘的毕业生质量和招聘方式进行有效的招聘评估,检验招聘工作的有效性,检验招聘成果和招聘方法的实用性,提高招聘工作质量。

#### 参考文献

- [1] 罗玉娟,张璐,刘鹏奋.事业单位公开招聘存在的问题及对策建议.管理观察,2018(27):75-77.
- [2] 罗晓蕊.事业单位公开招聘的现状及改革建议.财经界,2019(34):87.

# 面向预报员的精细化数值预报产品应用 培训需求研究

钟琦 薛童 朱禾 叶梦姝

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

**摘要:** 伴随高分辨率数值预报、集合预报和人工智能等关键技术的发展, 现代气象预报业务已进入精细化、无缝隙、数字化的智能网格预报时代。为提升广大预报员对数值预报的应用水平, 提高预报服务综合效果, 从精细化网格预报业务发展对预报员能力素养的新要求和预报员能力现状两方面开展数值预报应用的培训需求研究。结果显示, 预报员在综合运用多源资料提升精细化数值预报应用水平方面具有迫切培训需求, 在培训数值预报技术进展、产品特点、应用方法的基础上, 培训需求呈现出向研究型业务和针对性服务发展的趋势。从数值预报应用培训的内容来看, 最大培训需求集中在数值预报新技术原理、产品精细化评估和订正、多源资料综合应用策略三个方面。对预报员分层次进行分析, 显示新预报员需求较广泛, 相对侧重数值预报基础应用, 骨干预报员侧重预报产品评估和订正方法等实用技术, 首席预报员相对侧重研究性。最后对开发面向预报员的分层分类数值预报应用培训课程提出了建议, 为教学策划和课程设计提供参考。

**关键词:** 数值预报, 培训需求, 精细化网格预报, 预报员培训

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.013

## Research on the Forecaster Training Needs of Using Refined Numerical Weather Forecast

Zhong Qi, Xue Tong, Zhu He, Ye Mengshu

(China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081)

**Abstract:** With the development of high-resolution numerical model, ensemble forecast and using of artificial intelligence, modern weather forecast has entered the era of fine, seamless and digital intelligent grid forecast. In order to study the training needs of using numerical prediction, this paper analyzes the operational requirements, the current ability of forecasters, and the gap between them. The results show that in the refined wisdom grid forecast, it is critical for forecasters to improve the skills of using numerical forecast and multi-source meteorological information. On the basis of understanding the basics of new numerical technologies and their products, the training needs on operation-oriented research and targeted services are also shown. The most required training on this aspect includes the principle of new numerical technologies, their evaluation and correction, and the comprehensive strategy of using multi-source meteorological information. The training needs vary with the level of forecasters, the new forecasters have relatively basic needs, the senior forecasters focus more on practical technologies, and the chief forecasters concern more about research. In the end, suggestions are made to give support to curriculum design on the numerical weather prediction.

**Keywords:** numerical weather prediction, training need, refined grid forecast, forecaster training

### 0 引言

数值预报是现代预报预测业务的基石, 每天在世界各地主要气象业务中心运行, 在精细化预报、灾害性天气预报、延伸期预报中发挥着不可替代的作用,

并逐步走向精细和精准<sup>[1]</sup>。伴随数值天气预报的准确率不断提高, 预报员职能正在发生很大变化, 美国著名气象学家Cliff Mass认为, 数值模式的发展和加工处理技术将从根本上改变预报制作方式, 预报员未来最大的贡献是理解传播预报和为更多的用户服务。Jascourt等<sup>[2]</sup>经过四年完善并提供数值预报培训的试验探索了预报员改进模式预报的机会, 肯定了预报员能通过了解数值模式组成部分的性能及其局限性, 达到智慧地评价和改善数值预报模式。预报员需要了解数值预报模式的预报性能, 积累数值预报应用和订正经

收稿日期: 2019年12月31日; 修回日期: 2020年2月26日  
第一作者: 钟琦 (1980-), Email: zhongqi@cma.gov.cn  
通信作者: 叶梦姝 (1987-), Email: yems@cma.gov.cn  
资助信息: 国家重点研发计划 (2018YFC1507606); 中国气象局气象干部培训学院重点研究项目 (内 2018-005)

验,才能成为以数值预报为基础,综合运用各类气象信息的新型预报员<sup>[3-5]</sup>。由于数值预报本身处在迅速发展,预报员需要根据数值预报的新属性调整使用数值预报产品的策略与方法,以达到提升预报效果,否则会在使用中陷入盲目,或对数值预报结果过分依赖。因此,帮助预报员建立数值预报的应用策略成为国内外气象教育培训的重点课题。

21世纪初,美国天气预报服务中心(NWS)即开始关注数值天气预报对人工预报的影响,持续开展两者的预报评分对比并发布年度报告。NWS培训中心基于职业发展系列的课程体系中,包括了一些数值预报开发、模式产品解读等相关内容。美国国家大气研究中心的教育培训计划“业务气象、教育和培训合作计划”自2009年起制作并发布了面向预报员的“在天气预报中有效使用数值预报”系列课程,内容涵盖数值模式基础和产品使用,模式数据的偏差订正,集合预报产品及应用,有效应用高分辨数值预报等<sup>[6]</sup>。2015年欧洲中期天气预报中心和欧洲气象培训虚拟组织联合组织了其第十届国际专题研讨会,聚焦新时期的数值天气预报应用培训,研讨气象培训如何适应数值预报的发展,包括预报员的角色转变;如何基于天气分析技术和数值预报提升天气预报的精度;培训机构应该注重发展哪些创新的培训理念以适应和支持培训中需要的技术和能力要求等内容。法国国立气象学校在2016年的在职培训项目中设计了一个为期5 d的数值天气预报培训,但仅专注法国气象局的数值预报基础知识和产品使用。

综上,从国内外气象预报业务的发展趋势来看,加强数值预报的应用是未来预报员转型、提升预报预测准确率的主流方向,欧美国家气象培训机构均已着手讨论和推进数值预报应用专题的培训设计和实施。我国天气预报员队伍规模庞大,地域差别显著,培训需求具有多层次多样化的特点。开展面向我国气象业务发展的数值预报应用培训需求分析,设计适合我国预报员的数值预报应用培训课程体系势在必行,以助力广大预报员掌握不断涌现的数值预报新技术和新产品的内涵,提升有效应用数值天气预报的能力,形成对现代气象业务发展的有力支撑。

## 1 研究方法

研究拟通过准确定位精细化网格预报对数值预报应用的组织需求,调研目前预报员数值预报应用的实际能力,并分析两者差距,提出数值预报应用培训的需求,为科学合理设计教学课程和搭建实习实训平台提供依据。研究中采用了资料分析、文献追踪、专家

访谈、问卷调查等多种方式方法。首先通过文献整理了解新时代研究型气象业务格局下精细化智能网格预报业务的发展背景和关键技术,通过文件和政策分析定位现代气象业务在提升预报员数值预报应用能力方面的组织需求,通过专家访谈和专题报告进一步细化了精细化数值预报滋生的科学问题和对预报员能力素养的新要求,通过问卷调查分析了预报员队伍的能力现状和与组织需求的差距,最后综合整理了分层分类的精细化数值预报应用培训需求和教学侧重点。

## 2 精细化数值预报应用培训组织需求

根据世界气象组织(WMO)的规定,气象业务人员应同时具备资质(Qualification)与胜任力(Competency)。资质指从事某一职业所需的最少量的核心知识,一般通过完成教育机构(如大学)的学习课程一次性获得;胜任力指履行工作职责过程中完成技术性较高任务所需的知识和技能,一般通过岗位培训迅速提升。WMO《技术规则》(《Technical Regulations》)于2017年规范了包括公共天气预报与服务、航空气象、海洋气象等六个领域的胜任力框架,其中预报员胜任力标准包含了“业务基础知识技能、制作产品的能力、确保产品质量的能力、与内外用户沟通的能力”的内在层次。本文以我国精细化网格预报业务对预报员能力素养的要求为例,分析了精细化数值预报的培训需求。

### 2.1 中国气象局对预报员数值预报应用能力的要求

数值预报是现代气象事业发展的核心支撑,同时具有不可替代性、不完整性和不精准性的特征<sup>[7]</sup>,上述“三不”特征决定了研究型气象业务的发展格局,此业务性研究的属性正是预报员职能变迁的内在原因,也是数值预报继续教育应把握的专业内涵。

2016年1月,中国气象局印发《现代气象预报业务发展规划(2016—2020年)》(以下简称《业务发展规划》),服务于构建全国精细化气象网格预报一张“网”明确提出构筑高素质创新型人才体系,推进预报员转型发展——从过于依赖数值预报和经验的“传统型”向更多依靠科学分析、驾驭现代预报技术的“现代型”转变。通过加强培训和业务技术总结,着力提升国家-省两级预报员在灾害性天气预报和重大气候事件监测预测中的科学分析能力、多源资料综合应用能力以及对数值预报的解释应用和订正能力。实施预报员能力提升工程,强化预报员岗位培训,完善培训体系,组织实施预报员全员轮训。

2018年5月,中国气象局进一步印发《智能网格预报行动计划(2018—2020年)》(以下简称《行动

计划》），计划到2020年建成无缝隙、精准化、全覆盖、智慧型预报业务体系，这一业务发展战略离不开“现代型”“研究型”预报员和人才队伍。为培育预报理论功底扎实、预报技术开发有创新、可驾驭现代预报技术的新型预报员，《行动计划》中明确要求创建有利于创新型人才队伍成长的机制，其中包括强化预报员专业技术培训、完善培训体系、实施分类培训，通过加强培训和交流总结，使预报员转变观念，适应智能网格预报业务技术发展。提升预报员对多源资料应用能力和对数值预报解释应用订正能力，凝练网格预报和灾害性天气预报经验，强化网格预报客观订正技术和方法研发，并集成到智能网格气象预报业务系统中。为保障精细化智能网格预报业务的人才培养需求，中国气象局于2019年印发《2019—2023年全国气象部门干部教育培训规划》，明确要求专业化能力培训更加精准，适应新时代、实现新目标、落实新部署的履职能力明显增强，专业素养、专业能力进一步提升。气象新理论、新技术、新方法培训更具针对性。

近年来，中国气象局干部学院紧紧围绕全面推进现代化对预报预测人才队伍建设的要求，对在岗人员全员轮训，精心设计不同层级、紧扣实际的教学计划，形成了理论与实践紧密结合的课程体系<sup>[8]</sup>。而在国家经济发展战略不断升级，防灾减灾形势日益复杂，气象科技创新发展迅猛，人工智能等技术对传统天气业务的影响不断加深的背景下，预报员面临提升专业知识背景、学习总结能力、科研创新能力、国际交流能力综合素质的更高要求，这对专业培训提出了更大的挑战。《中国气象局气象干部培训学院发展规划（2011—2020年）》中明确提出，以学科为基础提升教学研的综合水平是气象教育培训工作向更深入内涵式发展的重要途径，并提出重点加强“数值预报模式及应用”等继续教育学科领域建设，提升预报员的数值预报应用能力。

预报员的能力素养主要体现在四个方面：一是基本素质（个人素质，知识素质和职业素养）；二是业务能力（业务常识、预报能力、订正能力、工作经验和信息素养）；三是科研能力（基础型研究，应用性研究和技术开发）；四是学习与创新能力。下面将基于精细化数值预报的科学问题和对预报员能力素养的新要求分析归纳数值预报应用的培训任务。

## 2.2 精细化数值预报应用培训主要任务

对数十年和几代前的数值预报产品应用而言，预报员参考多为全球环流模式，主要应用于环流形势的判断，对区域强天气的参考价值主要体现在触发强

天气的大尺度环流背景和环境参数预报。近年来局地要素产品的精细化和精确度得到了很大的提升，对预报员的使用向低门槛和高门槛两极转化，实际在精细化预报的理解应用、产品的检验评估、预报结果和经验的总结等方面对预报员提出了更高要求。随着中尺度业务模式分辨率达到10 km甚至3 km，快速更新同化短临预报分辨率达到1 km甚至更细，集合预报也逐渐走向高分辨率对流尺度（1~4 km）。数值模式可显示分辨尺度进入灰色区域，其本身基础理论面临许多新的科学问题，相应模式的初值和动力/物理过程对预报结果的影响和原因也发生了变化，预报员需要更新认识。当进入灰色尺度后数值模式本身有较大变化，最直观的是显示分辨和次网格过程描述的内容发生变化。以降水预报为例，模式在大尺度降水和对流降水的区分上变得模糊，模式云物理应充分考虑包括灰区参数化、尺度自适应参数化、精细下垫面次网格地形效应等。数值预报模式达1 km以内，模式边界层参数化（或大涡模拟）方案和参数选择对模式重力波和湍流结构和强度，进而对地面温风湿及对流降水预报准确性具有影响。多尺度资料尤其是精细观测（如雷达）资料的同化方法不断发展，温湿廓线和水凝物等要素短临预报更精确。公里尺度分辨率模式中动力-物理过程之间以及物理过程之间存在强的不可分离的非线性相互作用，直接影响模式对对流触发和发展传播、冷池强度和大小、降水落区强度和日循环特征的预报能力，而对流尺度集合预报可为对流系统发生发展、强降水落区、大风极值分布等提供丰富的概率预报信息。

基于对高分辨数值预报原理及其对预报结果影响的了解，预报员需要依据精细化评估技术和在实际天气中的应用实践来总结产品的应用和订正经验。精细化预报产品不是简单的分辨率提升而是时空精细度的提高，相临时刻或相邻网格点之间的要素预报并非总是平滑过渡，而是包含高梯度细节，其时间、空间和量级误差难以简单区分，传统检验评价方法已无法反映高时空分辨率产品的精细化特征。何为最优评价指标，如何生成相匹配的参照实况序列，怎样融入精细化检验和订正方法开发，如何通过主客观融合平台增加预报附加值是预报员面临的新挑战。最近人工智能等客观技术逐渐引入模式和后处理系统，对预报员基于精细预报产品开展针对性服务和提升高影响天气预报能力的基本素养也提出新的要求。2019年4月中国气象局发布了《研究型业务试点建设指导意见》，在15个省（市）气象局、7个直属单位开展研究型业务试点，目前精细化网格智能气象预报业务日益完善，

以数值模式和实况业务为重点的综合检验评估业务格局初步形成。面向现代气象预报业务数字化和自动化的突出特点,当前和未来的预报中需深化对数值模式和已有客观方法不确定性的认识,加强对精细化天气气候演变规律的科学认识,创新和完善针对各类网格预报产品的精细化检验评估和订正,循环式上升,不断完善无缝衔接的全球多尺度气象过程及其影响的客观预报方法。这一业务过程突出了精细化预报和服务产品的检验评估,对未来研究型的现代预报员提出的新挑战包括:1)参与研发强大的后处理系统,包括订正模式预报误差,降尺度到更精细网格、集成多源数据结果的优势预报信息、捕捉极端性或灾害性预报信息、传递预报的不确定性信息;2)了解信息网络和数据支撑,理解数值预报产品和特点,根据天气特征分析和模式预报误差信息捕捉,结合对极端性、高影响等天气的预报经验和能力,抓住预报关键,达成增加预报员价值的目标。

基于上述分析将面向预报员的精细化数值预报应用培训重点内容归纳为三个大类:一是数值预报知识类培训,按照难易层次划分为数值模式基础原理;数值预报加深知识,包括模式动力、模式物理(尤其模式云和降水、边界层过程)、模式初值对预报的影响;数值预报前沿技术原理,包括集合预报、高分辨率数值预报、非常规观测资料同化技术、多源资料融合技术等;二是数值预报应用技能培训,包括数值预报产品解读、数值预报产品检验评估和订正、数值预报新技术的产品特性及应用效果;三是数值预报综合应用,按递进层次分为数值预报产品应用基本思路、数值预报综合应用策略、数值产品在典型和高影响天气案例中应用的分析和研讨。

下文将围绕这三类组织需求开展预报员现状调研,分析当前预报员能力与组织需求之间的差距和定位培训重点。

### 3 预报员数值预报应用能力和培训需求分析

#### 3.1 调研对象概况

面向预报员的调研主要采取问卷调研和交流讨论形式,在交流讨论中预报员反馈2016年以来高分辨率数值预报在业务化和预报可用性上逐渐被预报员接受。2016年高分辨率业务预报模式水平分辨率已达到10 km左右,主要包括EC细网格产品,GRAPES中尺度模式产品,以及各区域中心研发的中尺度模式产品(如华东区域气象中心中尺度数值预报模式(SMS-WARMS),华南区域中尺度模式(MARS),华北区域数值模式预报系统“睿图”);目前中尺度业务

数值预报已精细到3 km,快速更新短临预报模式已精细到1 km,全国智能网格预报精细到5 km,区域精细到1 km。研究于2016—2019年间向各级气象台预报员和培训班参训预报员发放问卷共计400余份,回收有效问卷共计337份。伴随高分辨率数值模式和基于模式的客观方法的快速发展,这期间预报员对精细化预报产品的认识也在快速调整,限于篇幅本文没有给出分时间段的调研分析结果。图1显示,参与调研的预报员大部分(62%)工作年限在10年以内,工作11~20年预报员占比22%,工作21年以上预报员占比16%。从学历来看,调研对象中60%人员具有硕士研究生学历,33%和6%具有本科和博士学历,与工作10年以下预报员队伍年轻化和高学历趋势相对应。从学科背景来看,82%的预报员是大学科学背景。可见所调研对象主要是一线预报业务岗位,具有大气科学专业背景和较高学历,较为年轻的预报员群体,正是面

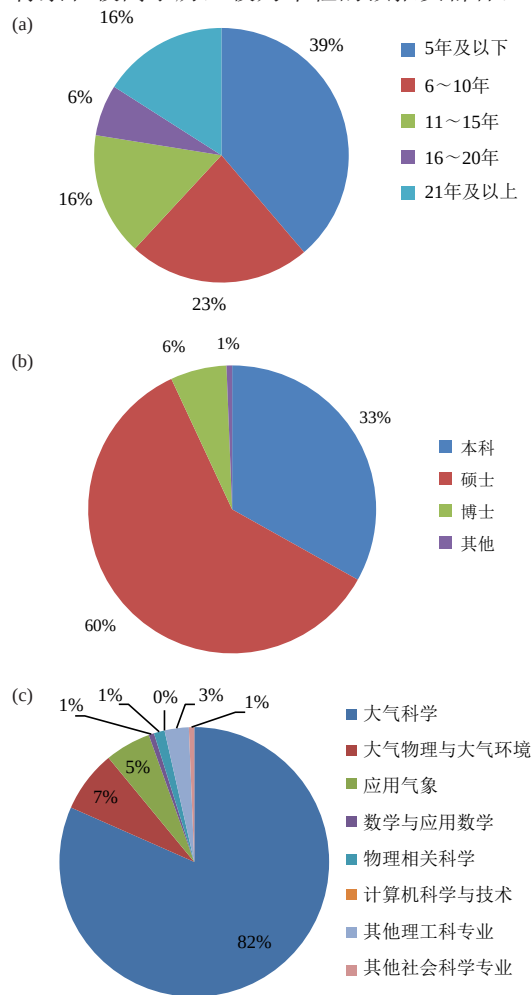


图1 调研对象从事预报的年限分布(a), 所获最高学历(b)和专业方向(c)

Fig. 1 Distribution of years being forecaster (a), education background (b) and majors (c) of the respondents

临向现代型预报员转型的队伍，是培训潜在对象，他们对问卷反馈的结果具有较好的代表性。

### 3.2 预报员对开展数值预报培训的必要性认识

随着数值预报的发展和客观预报水平的不断提升，预报员在很大程度上要依靠和参考数值预报的结果，调查显示61.3%的预报员基本在所有值班日预报中均参考了数值预报产品，另有32.2%的预报员参考数值预报产品的日数在70%以上，极少预报员（0.3%）较少参考数值预报产品。同时，半数以上预报员（51.5%）仍然坚信无论何时预报员都具有不可替代的作用，并且47.6%预报员认为应该在数值预报的基础上进行主观订正，订正的收益大于风险。而在数值预报基础上预报员能有所作为的领域集中在临近预报（59.7%）、强对流天气预报（57.3%）和短时预报（43%）领域。

然而目前预报员关于数值预报应用的系统性培训较为匮乏。图2显示，64.2%的预报员主要通过和同事的业务交流获得数值预报应用的经验，48.5%依靠自学数值模式发布的产品手册获得相关产品信息，仅有35.2%得到了相关培训，另有43.3%的预报员是通过参加学术活动（包括文献阅读和参加学术会议）获取数值预报发展的知识。

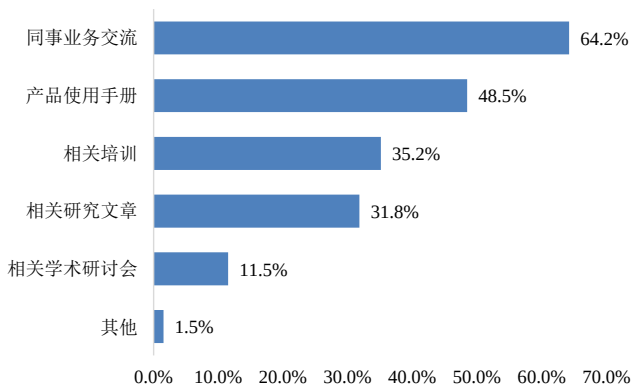


图2 目前预报员获取数值预报应用方法的主要途径  
Fig. 2 The main ways of forecaster to communicate the NWP skills

### 3.3 预报员数值预报应用能力现状分析

基于第2.2节数值预报培训组织需求的三类任务分解，分别从预报员对数值预报知识、数值预报技能和数值预报综合应用方面的能力现状及其与组织需求的差距展开分析。

#### 3.3.1 数值预报知识类培训

将数值预报知识类培训细化为数值模式的基础知识、加深知识、数值预报前沿技术展开分析。图3显示，大部分预报员（76.4%）认为对普适的数值模式

基础知识有较好的掌握基本不需要进一步学习。对模式加深知识的掌握普遍不够，仅25.2%预报员掌握模式动力对预报的影响，16.4%掌握模式物理对预报的影响，12.4%掌握同化系统如何构建模式初始场，极少数预报员（8.5%）对数值预报降尺度有了解。在数值预报新技术方面，仅有17.3%的预报员认为掌握高分辨率数值模式特性。集合预报技术方面，因已开展了3期专题培训和在第二轮省级预报员轮训中开设了集合预报课程，半数预报员（50.3%）认为对集合预报的原理已经有了较好的掌握。

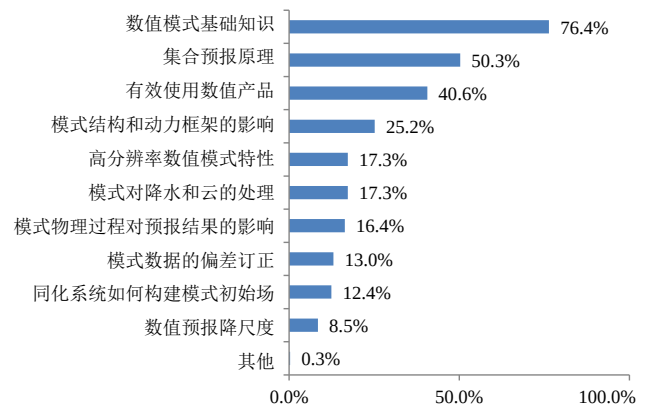


图3 预报员对数值预报知识的掌握情况  
Fig. 3 The status of forecasters' NWP knowledge acquisition

在资料同化技术方面（图4），70.3%的预报员关注快速更新循环同化系统在业务中的应用，半数以上的预报员对资料同化在实际天气中的应用（57.1%），资料同化方法介绍（54.9%）和观测资料质量评估、预处理和质量控制（51.6%）有学习需求，41.8%的预报员希望了解观测误差的统计方法（或同化系统对观测资料敏感性诊断分析）相关知识。半数以上预报员希望了解各区域中心特色的资料同化现状（63.7%）及未来发展（54.9%）。

#### 3.3.2 数值预报技能培训

将数值预报应用技能分为对数值预报产品解读，数值预报评估和订正，数值预报新技术产品应用等方面。调查显示，预报员在数值预报产品基本信息

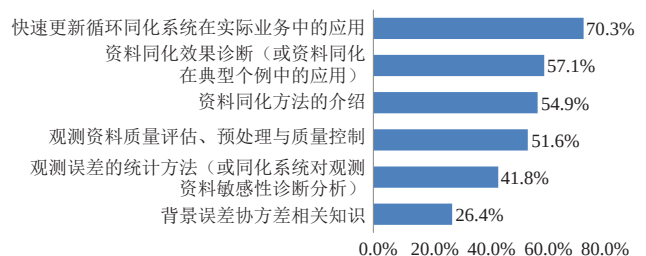


图4 预报员对资料同化技术的培训需求  
Fig. 4 Training needs of forecasters on data assimilation

(56.3%)和获取(44.1%)方面预报员相对掌握较好(图5)。如何利用数值预报提高预报准确率是需求最普遍(45.3%)的技能。如何利用数值预报提升科研能力成为预报员较为关切和需求旺盛的内容(38.4%),但仅有5.3%的预报员自认为具备这项能力,这一需求和现状的差距将随着研究型气象业务的推进进一步凸显。

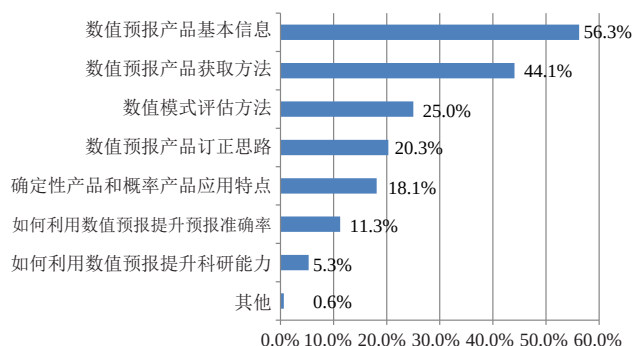


图5 预报员对数值预报应用技能的掌握情况  
Fig. 5 Forecasters' mastery of NWP skills

随着精细化智能网格预报的日益完善,基于数值预报的精细化检验评估和订正成为现代气象业务中的重要环节。多数业务单位已经认识到检验评估的重要性,但仅有约四分之一的预报员了解数值预报检验评估方法(图5)。而基于数值预报开展订正更加困难,虽然大部分预报员(67.9%)支持对数值产品进行订正,但仅20.3%预报员自认具备数值预报产品订正思路。

在目前的预报实践中进行了订正的比例并不高,对数值预报订正比例在70%以上的预报员仅占23.4%,订正比例不到一半的预报员占52.8%。目前预报员经常进行订正的数值预报要素为暴雨以上的降水量(41.2%),最高最低温度(39.4%),另外在一些地面要素如地面风(11.6%),边界层辐合线也有少部分预报员(5.1%)常进行订正,这些物理要素对强对流触发预报较为关键且模式预报准确率较差,是预报员容易发挥优势的领域。从主观订正效果来看(图6),能取得较好订正效果(提高预报效果的比例70%以上)的仅占16.6%,有一定订正效果(提高预报效果的比例50%~70%)的占31.6%,另有半数以上预报员(51.8%)认为自己订正后预报效果的提升不及50%。

为提升基于数值预报的主观预报能力,预报员迫切需要学习(图7)数值预报产品本地化和订正方法(79.8%),不同天气类型数值预报的能力(79%),高分辨率数值预报的误差评估(46.2%),数值预报误差来源(42.9%),数值预报评估方法和体系(42.9%)。

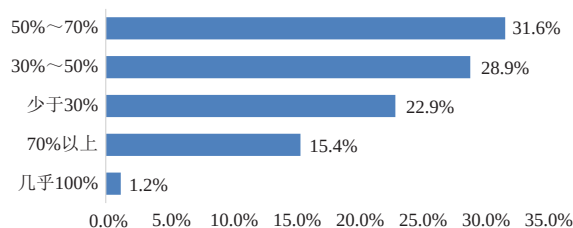


图6 预报员认为对数值预报结果进行订正后提高了预报效果的比例

Fig. 6 Proportions of Forecasters who believe that the accuracy is improved when they do corrections on NWP

因此,在未来数值预报应用技能的培训中,应开展分区域的分天气类型的数值预报能力评估,重点关注高分辨率数值预报的误差检验和误差来源分析,开发适用本地化的订正方法和策略,为预报员提供有效的参考。

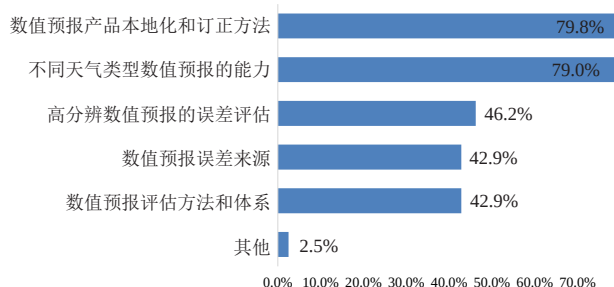


图7 预报员最希望得到的数值预报培训内容  
Fig. 7 The most wanted training on NWP for forecasters

### 3.3.3 数值预报综合应用

在掌握数值预报基本知识和基本技能的基础上,建立基于数值预报且综合运用多源气象资料和信息的气象预报思路是预报员培训的重要目标。目前预报员参考数值预报产品时最常采用的做法是把模式预报结果与实况直接比照分析(83.9%),或将模式预报分析场与实况对照分析(70%),将不同来源的模式产品进行对比(72.4%),不少预报员(61.2%)也会参考模式前几日的预报变化(图8)。小部分预报员(约25%)掌握了结合雷达资料和卫星资料对比模式产品

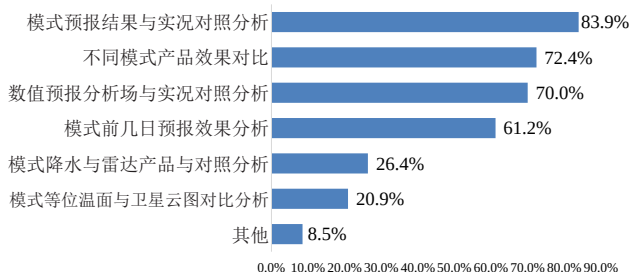


图8 目前预报员参考数值预报产品时常使用的天气分析和诊断方法

Fig. 8 Weather analysis methods based on NWP used by forecasters

进行分析。

随着集合预报的推广，预报员对不确定预报的接受度逐渐提升，但是在综合应用确定性预报和不确定性预报产品方面还没有形成科学的预报思路。36.5%的预报员认为维持原有预报思路不变，30.1%的预报员认为需要改变现有预报思路，因此在提升预报员协同集合预报和确定性预报的预报策略方面具有较大的空间和必要性。

面对预报员转型的新形势，预报员认为未来相对于传统预报将更多的转向精细化高影响预报和服务的提供者（35.2%），27.2%认为预报员将转向为数值预报解释应用和订正专家，22.4%预报员认为未来预报的研究性要求提高，逐步转向天气预报科学家或研究人员。可见，随着精细化智能网格预报业务的发展，预报员更多是在客观预报的基础上进行订正，关注高影响天气的预报，并且从单纯的预报业务转为向不同用户提供有针对性的预报服务。为适应这一新形势和要求，预报员需要更深入地理解数值预报在本地应用的优缺点，并积极参与到数值预报产品的后处理开发过程中。59.4%预报员认为应该参与数值预报统计释用，49.4%认为预报员应该开发更适合本地天气特点的统计产品，43.9%认为预报员应该参与到数值预报模式评估中，43.9%认为预报员应该开发更适合本地天气特点的统计产品，43.9%认为预报员应该参与到数值预报模式评估中，36.1%认为预报员的职责也包括进一步提高数值预报产品的价值（图9）。

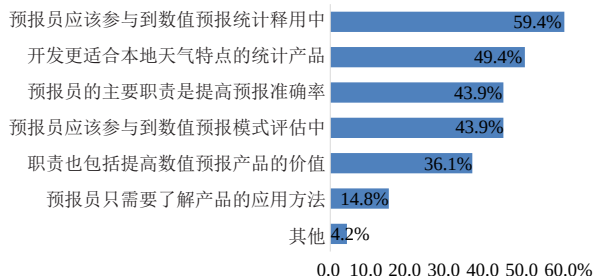


图9 预报员认为的未来预报员岗位职责  
Fig. 9 The future job responsibilities of forecasters according to forecasters

### 3.4 分层分类的数值预报应用培训需求分析

由于学员在工作年限、专业背景、知识储备和经验积累等方面存在的较大差异，按照工作年限和岗位职责将调研对象划分为三个层次，工作3年以内的为新预报员，工作10年以上且任首席岗位的为首席预报员，其他工作3年以上的非首席预报员为骨干预报员。分析发现，不同层次的预报员在具体培训内容和深度上具有不同的侧重点。

图10给出了预报员学习数值预报知识的需求情况，新任预报员培训需求较为广泛，最大需求（60%

以上）为模式物理过程和动力过程对预报结果的影响，超过半数首席预报员认为在模式预报偏差订正、有效使用数值产品和降尺度等方面更有需要。半数新预报员和首席预报员均希望了解模式对降水和云的处理。骨干预报员是这三类人员里最大的预报员群体，因此需求相对较为分散，最集中的学习需求体现在模式预报的订正，高分辨率模式特性，有效使用数值产品和模式物理过程的影响等内容。

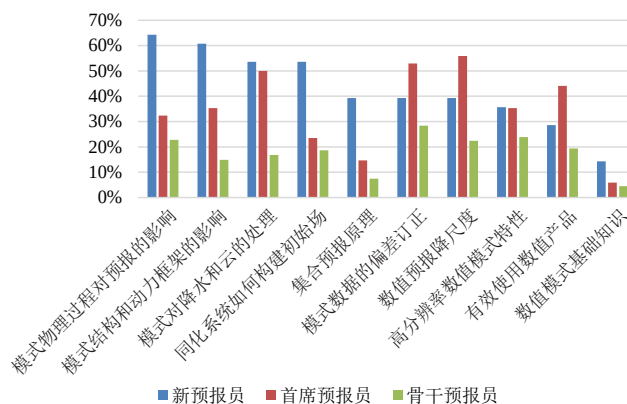


图10 分层次预报员希望学习的数值预报知识  
Fig. 10 NWP knowledge that forecasters of different levels hope to learn

数值预报应用相关技能的学习上（图11），新预报员对各种技能均有需求，相对而言在数值产品基础较为侧重，如确定性预报和集合预报的特点、数值预报的评估方法和订正思路、数值产品的获取方法和基本信息等方面均比骨干预报员需求大。首席预报员需求最大的是如何利用数值预报提升科研能力，在研究性上更为侧重。骨干预报员的需求相对较为分散，在数值预报订正和提升预报准确率上具有较大的需求。

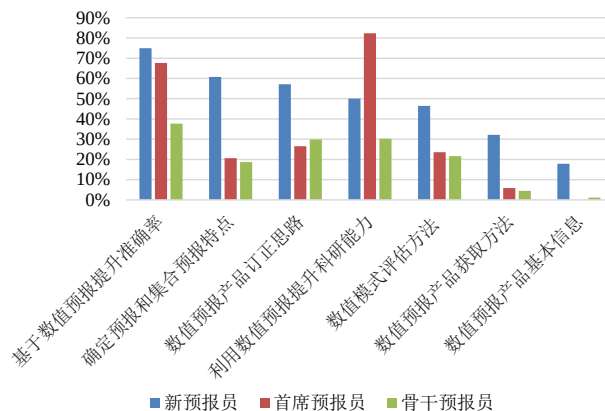


图11 分层次预报员希望获得的数值预报技能  
Fig. 11 NWP skills that forecasters of different levels hope to gain

综上，各级预报员对数值预报应用技能的培训需求具有一致性也具有各自特点，一致性体现在实用

性上,即提高预报准确率。新预报员的特点是需求广泛,对产品基本信息有所侧重,首席预报员更侧重研究性,而骨干预报员需求较分散,在预报产品的评估和订正等具体方法上较侧重。

#### 4 结论和建议

围绕无缝隙精细化自动预报和智慧服务的研究型业务格局和发展态势,首先分析了中国气象局以提升预报员数值预报解释应用和订正能力为目标开展精准专业培训的组训要求,将这一要求细化分解为数值预报知识、技能和综合应用三类,分别研究了不同层次预报员的能力现状,通过两者对比提炼出精细化网格预报员业务中预报员数值预报应用培训的需求和重点内容。结果显示:

1) 在深化对数值模式和客观方法的特性认识,综合运用多源资料提升数值预报应用水平方面具有较大培训需求,且呈现出向业务性研究和针对性服务发展的趋势。

2) 在数值预报知识、产品和技能、及综合应用三类内容中,最大培训需求分别集中在高分辨率数值预报等新技术原理、数值预报本地化评估和订正技能、及以加强精细化智能预报和服务为目标的数值预报综合应用预报策略。

3) 各级预报员对具体内容的培训需求各有侧重,新预报员培训需求较广泛,相对而言尚待掌握数值预报及其产品的基础信息,首席预报员相对需侧重研究性,而骨干预报员需求较分散,应考虑在预报产品评估和订正方法等实用性上有所侧重。

上述研究结论为把握精细化数值预报应用培训需求,开发内容务实,贴合预报员实际的教学课程提供了方向和依据。基于此研究报告提出以下几点建议:

一是瞄准精细化智能网格预报业务对现代型预报员的要求,开发系统和有针对性的数值预报应用培训课程。围绕精细化网格预报、集合预报、高分辨率数值预报、精细化预报检验和订正、人工智能与数值预报的结合、卫星和雷达等新资料与数值预报技术融合等新技术新资料应用培训,系统设计从基本原理,到

预报产品特点分析,到综合应用策略的阶梯性课程内容,开发针对性强的专题培训。

二是立足预报员岗位要求和队伍特点,开发科学分层分类的数值预报应用培训课程和创新培训方式方法。在新任预报员培训中侧重数值预报基础,采用理论讲解和个例实习相结合的培训方式;在骨干预报员培训中侧重考虑区域特点,即数值预报新技术和产品在本地释用、评估和订正方法的培训,采取按区域分组讨论和专家点评、数值预报误差本地化分析实训为主的方式;在首席预报员培训中侧重新技术新资料研发成果在业务应用的转化和效果研究,以新技术新资料在典型和高影响天气中应用的案例剖析和研讨方式为主,以期促进新技术新资料研究与实际业务应用的交叉融合。此外,应逐步推进远程和面授相结合的混合式培训方法,通过远程预培训基础概念和理论,指导学员进行本地天气实例收集和挑选,使面授能更高效地聚焦到对实际预报难点的研讨和针对性的实习实训上。

三是深化数值预报应用案例研究,加强实习实训平台建设。从业务实际需求出发,开展精细化智能网格预报等新技术在典型天气和高影响天气中的应用分析,通过数值试验开展关键物理要素和特定天气机理研究,根据培训内容制作可视化教学案例,搭建可开展本地化适用的数值预报检验评估和订正培训平台。

#### 参考文献

- [1] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525(7567): 47-55.
- [2] Jascourt S D, Bua W R. Opportunities for human forecasters to improve upon model forecasts now and in the future. Seattle, Washington: 84th AMS Annual Meeting, 2004.
- [3] 章国材. 预报员在未来天气预报中的作用探讨. *气象*, 2004, 30(7): 8-11.
- [4] 毕宝贵, 代刊, 王毅, 等. 定量降水预报技术进展. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 534-549.
- [5] 薛纪善. 和预报员谈数值预报. *气象*, 2007, 33(8): 3-11.
- [6] 叶梦姝, 钟琦. COMET “在天气预报中有效利用数值预报”课程思路浅析. *气象继续教育*, 2016(2): 38-41.
- [7] Yu R C, Li J, Jia P Q. Updated weather forecast operation shaped by “Triple-In” properties in numerical model. *WMO Bulltine*, 2019, 68(2): 56-62.
- [8] 高学浩, 杨萍, 罗林明. 面向终身教育的气象干部教育培训体系建设. *继续教育*, 2015(2): 55-57.

# 气象部门高层次人才队伍发展趋势研究

刘蕊 刘艺 杜净译

(中国气象局人才交流中心, 北京 100081)

**摘要:** 人才是气象事业高质量发展的基础。气象部门高层次人才是指在气象部门从事专业技术工作, 具备优良的素质, 良好的职业道德和团队协作精神, 有较高业务水平、科研水平, 在推进气象事业发展中有较高贡献, 起到示范和带动作用的科技型人才。加强气象部门高层次人才队伍建设, 是气象事业高质量发展的迫切要求。对气象部门高层次人才发展趋势进行了分析, 构建预测模型对未来5年气象部门高层次人才队伍发展进行了预测。

**关键词:** 气象, 高层次人才, 发展趋势

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.014

## Research on the Development Trend of High-Level Talents in Meteorological Departments

Liu Rui, Liu Yi, Du Jingyi

(CMA Talent Exchange Center, Beijing 100081)

**Abstract:** Strengthening the construction of high-level personnel in meteorological departments is an urgent requirement for the high-quality development of meteorological science and technology. In this paper, the development trend of high-level personnel in meteorological departments is analyzed, and a prediction model is built to predict the development of high-level personnel in meteorological departments in the next five years.

**Keywords:** meteorological, high-level talent, trend of development

### 0 引言

气象部门高层次人才是指在气象部门从事专业技术工作, 具备优良的素质, 良好的职业道德和团队协作精神, 有较高业务水平、科研水平, 在推进气象事业发展中有较高贡献, 起到示范和带动作用的科技型人才。从人才管理的角度, 以专业技术职称为依据, 认为气象部门高层次人才是具有高级专业技术职称者, 包括副高级和正高级专业技术职称的人员。

### 1 气象部门高层次人才队伍发展趋势

#### 1.1 总量变化趋势

人才是气象事业高质量发展的基础。“九五”至“十二五”期间气象部门高层次人才持续增长(图1)。“十五”和“十一五”时期高层次人才增速迅速, 分别达到45.97%和46.08%。“十二五”时期依然保持近18.74%的增速。2012年颁布的《气象部门人才发展规划(2012—2020)》指出, 将建设一支规模适度、结构优化、布局合理、素质优良的气象人才队伍, 预计到2020年高层次人才总数将达到13156人。

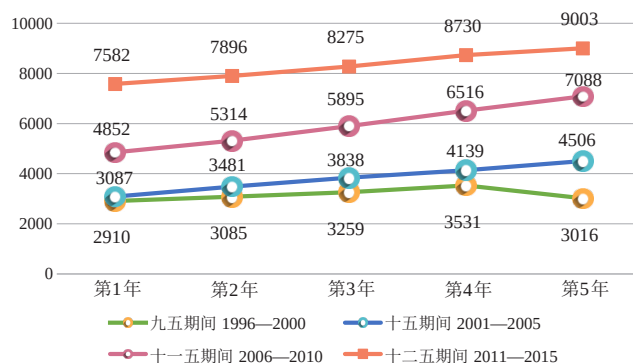


图1 “九五”至“十二五”期间高层次人才总量变化趋势  
Fig. 1 Changes in high-level talent number from “Ninth Five Year Plan” to “Twelfth Five Year Plan”

近5年, 高层次人才队伍建设成效尤为显著, 高层次人才数量从2014年8730人增加至2018年的11186人, 增长28.3%, 年均增长6.13%; 高层次人才占全国编内人员总数2014年为16.12%, 2018年升至21.55%, 与上年相比增长率最大的为2017年达到8.77%, 其次为2018年增长率为7.09%(图2)。究其原因, 2017年中国气象局开展了职称改革, 建立了更加科学的人才评价标准。

从图2可知, 近5年, 正高和副高职称人才队伍建

收稿日期: 2019年7月27日; 修回日期: 2020年2月22日  
第一作者: 刘蕊(1981—), Email: lorrywill@163.com

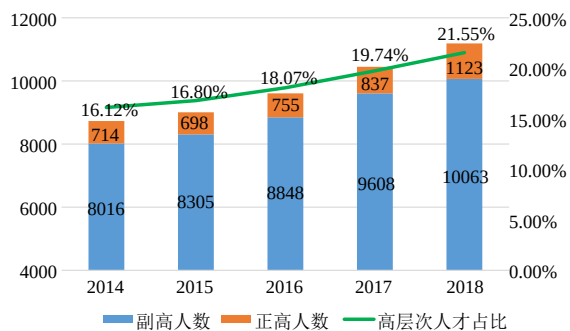


图2 2014—2018年高层次人才总量变化趋势

Fig. 2 Changes in the total number of high-level talents from 2014 to 2018

设相比，正高职称人才队伍增长速度较快，副高职称人才队伍发展较为平稳。2014—2018年，正高职称人数增加409人，总增长57.28%，年均增长11.46%；副高职称人数增加2047人，总增长25.54%，年均增长5.11%。

2017年中国气象局出台《中国气象局职称评定办法》要求进一步落实“放、管、服”，将副高级职称评审的主体责任落实在各用人单位。气象副高级职称改革后，副高级人才队伍增长迅速。2014年约1300人申报，90.35%的申报人通过审核，64.94%的申报人通过评审；2018年共约1900人申报，92.91%的申报人通过审核，59.73%的申报人通过评审，出现申报通过率提高而评审通过率下降现象，反映近5年气象部门高层次潜力人才众多，人才素质显著增强，各单位受岗位指标的限制，按照业务重点发展领域，遵循人才成长规律，更加科学合理地调整人才队伍结构，发挥人才评价指挥棒作用。

## 1.2 教育背景变化趋势

到2018年底，36.34%的研究生学历和22.45%的本科学历人员进入了高层次人才队伍（图3），体现了知识层次是成为高层次人才的重要影响因素。尤其是近5年来高层次人才学历结构越来越优化，在正高级

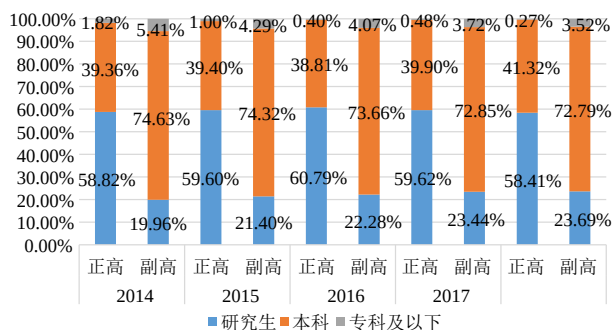


图3 高层次人才学历结构变化趋势

Fig. 3 Changes in the structure of academic qualifications of high-level talents

职称人才学历结构中，研究生和本科学历相对稳定，分别占比约为59.45%、39.76%；大专学历所占比例减少较大，从2014年1.82%降至2018年0.27%；副高级职称人才学历结构中，研究生比例增长较大，由2014年19.96%增长到2018年23.69%，本科学历比例由2014年74.63%至2018年降为72.79%，专科学历比例由2014年5.41%至2018年降为3.52%。

如果说一个学科高层次队伍的数量和质量是决定该学科发展水平的重要因素，那么高层次队伍在学科分布是否合理同样也很关键<sup>[1]</sup>。从图4可知，近5年气象部门高层次人才中大气科学专业人数最多，且所占比例有所收缩，其中在正高职称人才队伍中由2014年83%降至2018年80.55%，在副高队伍中由2014年61.33%降到2018年58.47%；地球科学专业人员在正高和副高职称队伍的涨幅相当，约增加1.5%。随着信息技术的快速发展，气象部门高层次人才中信息技术专业人员占比增长较大，在副高职称队伍中从2014年的18.59%涨到2018年的20.98%，在正高职称队伍中从2014年的5.84%涨到2018年的6.57%，对比可见信息技术专业人员在副高职称队伍中的涨幅更大，是在正高职称队伍中涨幅的3倍。

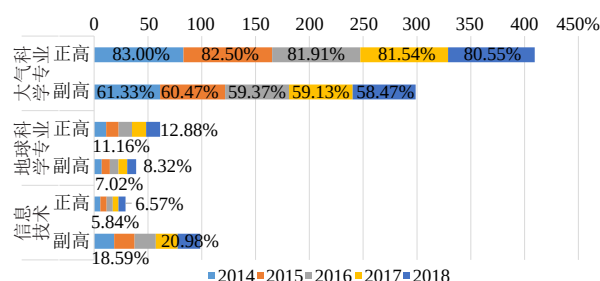


图4 高层次人才专业背景变化趋势

Fig. 4 Changes in professional background of high-level talents

## 1.3 年龄变化趋势

研究表明，30~45岁的人才处于创新活跃期和产出高峰期，诺贝尔物理学、化学、生理学或医学获奖者取得获奖成果的平均年龄分别为38岁、41岁、42岁<sup>[2]</sup>。

近5年来，气象部门高层次人才逐步年轻化，创新活力不断增强。2014年正高职称人才队伍中年龄在56岁及以上的人员占绝大多数，其占高层次人才总量的比例为84.31%，2018年该比例降至43.83%，增长率最高的集中在36~40岁，且于2018年首次出现35岁以下正高职称人才。副高职称人才队伍中，年龄在40岁以前的人才增长迅速，尤其体现在2018年36岁左右的人数出现第一个峰值，说明越来越多的青年人进入气

象部门高层次人才队伍。

#### 1.4 岗位变化趋势

岗位以《气象部门人才发展规划》为指导，将岗位类别分为气象预测与技术保障、气象预报、气象服务、气象信息技术、科研开发、教育咨询、县级综合气象业务、其他事业单位专业技术人员等八个岗位。

近5年来，正高级职称人才在气象预报和科研开发岗位上的人数最多，分别增加到284人和273人，占比分别为32.49%和31.24%，但气象预报岗位人数在2015年有所收缩；县级综合气象业务增长缓慢，目前全国仅有6人在该岗位。

近5年来，副高级职称人才在气象服务岗位上的人数最多，增加到2028人，占比27.67%；其次是气象预报岗位增加到1819人，占比24.82%（图5）。同时，县级综合气象业务岗位增长迅速，自2013年底设置县级综合业务岗位，目前有890人，占比12.14%，但难以满足每个县局至少1个高级岗位的需求。

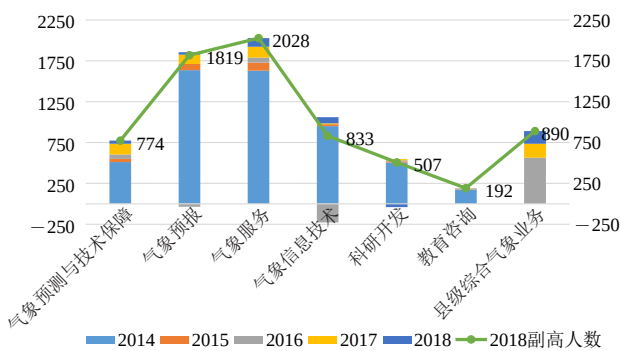


图5 副高级职称人员岗位变动趋势

Fig. 5 Job changes of staff with vice-senior title

#### 1.5 地域分布变化趋势

从近5年高层次人才的地域分布看，高层次人才数量在西部地区增长最多，由2014年的2802人增到2018年的3659人，共增加857人，高层次人才占全国编内人员总数的比例由5.17%增至7.05%，共增长1.88%；高层次人才数量在中国气象局直属单位的增长相对最少，由2014年的1147人增到2018年的1349人，仅增加202人，高层次人才占全国编内人员总数的比例由2.12%增至2.6%，仅增长了0.48%。

据统计，正高级职称人员在各区域的分布逐步均衡，从正高级职称人员占高层次人才总数的比例来看，2014年直属单位高达40.06%，东部地区为25.91%，中部地区为13.17%，西部地区为20.87%，中国气象局直属单位与东、中、西部地区的正高级职称人员分布结构比为3:1.2:1:1.6；2018年，正高级职称人员占高层次人才总数的比例分别为中国气象局直属单位34.11%，

东部地区为27.25%，中部地区为15.49%，西部地区为23.15%，直属单位与东、中、西部地区的正高级职称人员分布结构比为2.2:1.2:1:1.5。

副高级职称人员在各区域的分布变化较为平稳，主要集中在东部和西部地区。近5年来，副高级职称人员占高层次人才总数的比例，中部和西部地区分别增长0.77%和0.68%，东部地区下降0.31%，直属单位于2018年收紧较明显，比例共下降1.14%。

当前，东部地区副高级职称人员占高层次人才总数的29.38%，中部地区副高级职称人员占高层次人才总数的27.13%，西部地区副高级职称人员占高层次人才总数33.13%，中国气象局直属单位副高级职称人员占高层次人才总数的比例最小，约10.36%；

#### 1.6 层级分布变化趋势

近5年国家、省、地、县四级单位的高层次人才均有较大增长，其中省级单位增长最多，增加了830人；高层次人才在全国编内人员数量的占比增长最快的是省级单位，增长了1.9%，占比增长最慢的是国家级单位，增长了0.66%（图6）。

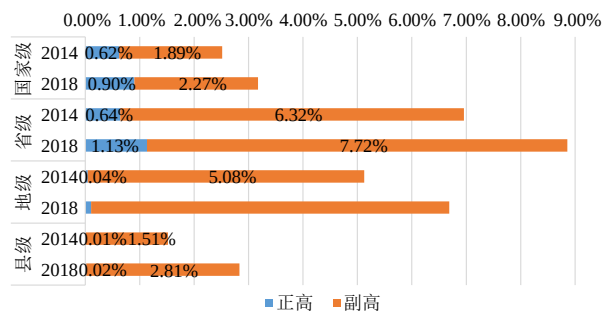


图6 高层次人才层次分布变化趋势

Fig. 6 Changes in the high-level talents at different administrative levels

正高级职称的人才主要集中在国家级和省级单位，且在全国编内人员中占比相当。地市级和县级单位的正高级职称人员较少，尤其县级单位2014—2016年一直仅6名正高级职称人员，2017年增加至7名，2018年增加至10名。但地市级单位近5年正高级职称人数增长率最高，由2014年24人到2018年增长到56人，增长率达133%。

副高级职称的人才主要集中在省级和地市级单位，在全国编内人员中均占6%~7%；近5年来，省级、地市级和县级单位的副高级职称人数在全国编内人员的占比增量较一致，分别是1.41%、1.5%和1.3%，国家级单位的副高级职称人数在全国编内人员的占比增量最小，仅为0.38%；从人员增量上看，近5年来，省级和地市级单位，副高级职称人数分别由

3412人、2752人增长至4009人、3415人，增幅分别为17.49%、24.09%，县级单位副高级职称人数从2014年的817人到2018年增至1460人，增长了79.82%，增幅最大，但离县级高级岗位需求仍有较大缺口。

## 2 气象部门高层次人才队伍发展预测

### 2.1 预测方法

灰色理论适用于系统中既包含已知信息又包含未知信息。人才的发展是个复杂的过程，既有显性特征也有复杂的隐性规律，可以看作是一个半明半暗的灰色系统。灰色预测的基本思想是把无明显规律的时间系列经过处理，变成有规律的时间系列，它的实质是将原始资料进行累加，使生成的离散资料呈现一定的规律，进而用光滑曲线逼近<sup>[3-5]</sup>。本研究采用后验差检验对灰色预测模型的效果进行精度检验（表1），有关公式参见文献[3]。

表1 精度等级

Table 1 Grade of accuracy

| 预测精度的等级 | 优     | 合格   | 勉强合格  | 不合格   |
|---------|-------|------|-------|-------|
| 小误差概率   | >0.95 | >0.8 | >0.7  | ≤0.7  |
| 后验差比值   | <0.35 | <0.5 | <0.65 | ≤0.65 |

### 2.2 预测结果

本文选取近5年来高层次人才总量、层级分布和地域分布数据分别构建灰色预测模型，对未来5年发展趋势进行预测，并构造的模型进行精度检验，后验差比值均小于0.35，小误差概率均等于1，达到优等级，预测模型精度达到一级。

1) 总量预测结果。未来5年气象部门高层次人才总量持续增长，人才结构更加优化，目前高层次人才占编内总人数约1/5，到2023年占比将升至约1/3。其中，全国气象部门正高级职称人数将达到2472人，副高人数将达到14036人。同时，预计至2020年高层次人才总数达到13035人，基本完成规划预计人数总量（图7）。尤其随着职称制度改革落实及《新时代气象高层次科技创新人才计划实施办法》等系列人才建设政策的相继出台，将加快高层次人才总量提升，有力推动人才强局的发展战略。

2) 地域分布预测结果。未来5年高层次人才在东、中、西部分布比较平稳，预计到2023年高层次人才在东部地区的占比为29.38%，中部地区的占比为26.28%，西部地区33.52%，直属单位的占比略微有所下降，占10.82%；预计2023年高层次人才在东部地区达1753人，中部地区4757人，西部地区4255人，中国气象局直属单位5429人（表2）。

3) 层级分布预测结果。未来5年气象部门高层

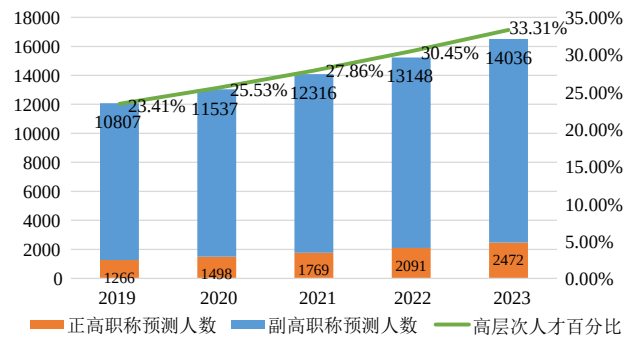


图7 高层次人才总量变化趋势预测

Fig. 7 Predicted number of high-level talents

表2 高层次人才地域分布预测

Table 2 Predicted regional distribution of high-level talents

| 预测结果      | 2019年 | 2020年 | 2021年 | 2022年 | 2023年 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 东部        | 1430  | 1504  | 1583  | 1666  | 1753  |
| 中部        | 3515  | 3792  | 4089  | 4411  | 4757  |
| 西部        | 3162  | 3406  | 3668  | 3951  | 4255  |
| 中国气象局直属单位 | 3940  | 4269  | 4625  | 5010  | 5429  |

次人才在国家级、省级、地市级和县级单位的分布将趋于均衡，由图可得，国家级、省级、地市级单位的高层次人才所占比例逐步萎缩，县级单位的高层次人才所占比例逐年上升，2019年国家级和县级单位的高层次人才占比相当，约14.5%，省级单位和地市级单位的高层次人才占比是国家级、县级单位的2~3倍，预计到2023年高层次人才在国家级、省级、地市级、县级单位层级分布结构比较均衡，在国家级单位2235人，省级单位6113人，地市级单位4848人，县级单位3435人，结构比约为1:2.7:2.2:1.5（图8）。

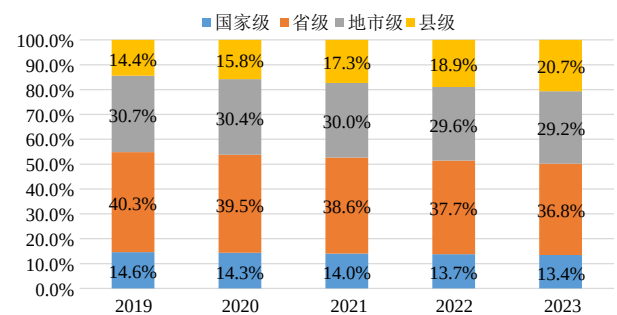


图8 高层次人才地域分布趋势预测

Fig. 8 Predicted regional distribution of high-level talents

### 参考文献

- [1] 罗云峰, 赵兵科, 周小刚. 我国大气科学高层次人才队伍建设几个问题的简单思考. 地球科学进展, 2006, 21(3): 324-329.
- [2] 吕金虎, 刘天星, 陈竟志. 建设世界科技强国 青年科技人才勇做创新先锋. 中国科学院院刊, 2017, 32(5): 530-535.
- [3] 邓聚龙. 灰色数理资料科学导论. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.
- [4] 刘思峰. 灰色系统理论及应用. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 李群. 不确定性数学方法研究及其在社会科学中应用. 北京: 中国社会科学出版社, 2005.

# 中国气象局直属机关青年人才队伍建设研究

孙天蕊 蔡金玲 杜净译 周倩  
(中国气象局人才交流中心, 北京 100081)

**摘要:** 中国气象局直属机关青年比例较高, 且普遍具备高学历, 整体综合素质强, 是气象人才队伍的生力军, 是气象事业发展的中流砥柱。通过调研, 发现青年人才在政治理论学习、职业发展现状、生活工作压力等方面还存在一些问题。针对青年人才队伍中存在的问题, 从提高政治理论教育成果、注重青年思想价值观引导、健全青年人才管理机制、加强职业指导、关注青年心理健康等方面提出建议, 为进一步提升青年工作质量, 加强青年人才队伍建设提供参考。

**关键词:** 中国气象局直属机关, 青年人才, 队伍建设

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.015

## Research on Youth Talents Development in Departments Under the China Meteorological Administration

Sun Tianrui, Cai Jinling, Du Jingyi, Zhou Qian  
(CMA Talent Exchange Center, Beijing 100081)

**Abstract:** The youth constitutes a large proportion of the talents in institutes directly under the China Meteorological Administration. They are generally well-educated and have strong comprehensive capability. They are the pillar of the development of talents team in meteorological industry. Our investigation indicated that youth talents have some problems in learning political theories, career development, and dealing with pressures from work and life. This paper offers suggestions on improving the education of political theory, guiding the youth's ideological values, improving the management mechanism of youth talents, strengthening guidance in career planning, and paying attention to the mental health of youth. This paper also aims to providing reference for improving the youth's working ability and youth talents development.

**Keywords:** institutes directly under the China Meteorological Administration, youth talent, team building

### 0 引言

中国气象局40岁以下的直属机关青年占到职工总数的62%, 是气象事业发展的宝贵资源和气象人才队伍的有生力量。坚持问题导向, 了解青年思想学习现状, 探究青年职业发展诉求, 通过相应措施解决青年发展中遇到的问题, 进一步做好青年工作, 是调动青年工作积极性, 助力青年人才发展, 加强青年人才队伍建设的重要手段。

### 1 中国气象局直属机关青年人才队伍总体情况

据统计, 中国气象局直属机关40岁以下青年2409人, 占在职编制人员总数的62% (截至2019年4月气象部门人力资源数据库)。直属机关青年队伍的平均年龄为34岁, 年龄集中于31~35岁和36~40岁, 男女比例为0.95:1。从学历来看, 以本科和硕士为主, 本

科867人, 占36%; 硕士研究生937人, 占39%; 博士477人, 占20%; 专科以下128人, 占5%。从政治面貌看, 中共党员1282人, 占53%; 共青团员309人, 占13%。

### 2 中国气象局直属机关青年人才队伍特征分析

#### 2.1 学历及专业技术水平整体较高

中国气象局直属机关青年中研究生以上学历人员比例高达59% (图1), 具有中级以上专业技术职称人员占到77% (图2), 中国气象局直属机关青年在学历、专业技术职称等方面均具有较高的层次和水平。

#### 2.2 青年人才专业与单位业务特点相吻合

直属机关各单位青年人才都有其自身专业特征, 并与本单位业务特点相吻合 (图3)。其中, 国家气象中心、国家气候中心、中国气象科学研究院三个单位, 大气科学类专业的人数最多。电子与信息类专业人才最多的单位为华云集团和信息中心。资产中心则以经济管理类专业人才居多。

投稿日期: 2019年10月14日; 修回日期: 2020年2月26日  
第一作者: 孙天蕊 (1989—), Email: 229808931@qq.com

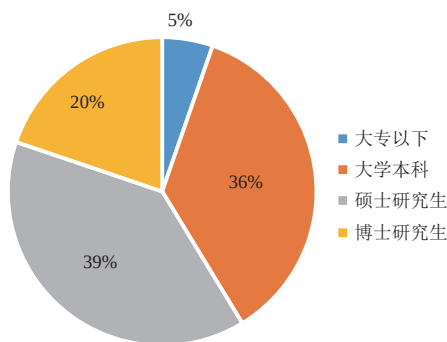


图1 青年人才学历情况

Fig. 1 Educational background of youth talents

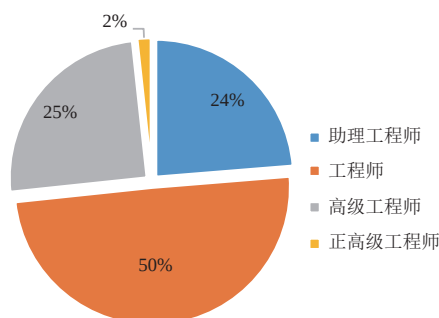


图2 青年人才专业技术级别情况

Fig. 2 Professional title of youth talents

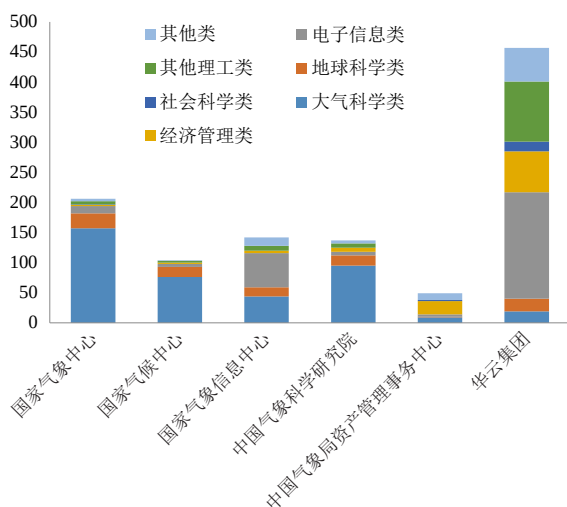


图3 各直属机关青年专业情况比较

Fig. 3 Comparison of majors of youth talents in institutes directly under the China Meteorological Administration

### 2.3 具有高级职称的青年人才以大气科学专业为主

青年人才的专业技术职务晋升也体现了鲜明的行业特色，具有高级职称的仍然以大气科学专业为主（图4）。其中正高级工程师主要以大气科学类（占83%）和地球科学类（占10%）专业为主；高级工程师的专业背景为大气科学类（占50%）、地球科学类（占14%）和电子信息类（占13%）。可见在正高级工程师及高级工程师中大气科学类专业占比均较大。

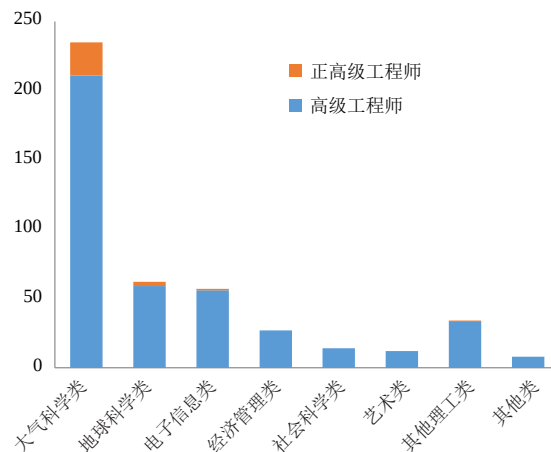


图4 高级职称青年的专业情况分布

Fig. 4 Majors of youth talents with senior positional titles

## 3 直属机关青年人才队伍现状及问题

本次调研采用电子调查问卷的方式，调研对象为中国气象局机关和16个国家级事业和企业单位40岁以下青年。由中国气象局机关直属各单位党委负责逐一落实，共回收有效问卷1012份。

### 3.1 青年政治理论学习深度不够

根据调查，大多数青年能够不断学习了解十九大报告并取得一定成效，但能够深入理解贯彻十九大报告精神，落实到工作生活中的青年仅占20%。从关于习近平新时代中国特色社会主义思想的学习程度来看，能够掌握深刻内涵的仅占19%。整体上看，青年在政治理论学习理解方面的深度不够，与实际工作生活结合不足。这也反映出单位对于青年政治理论的教育培训多停留在文件、精神的宣传，缺乏更为深入的引导与指导。

此外，我们将不同年龄层级青年的理论学习情况进行了比较（图5），可以看出，随着年龄的增长，

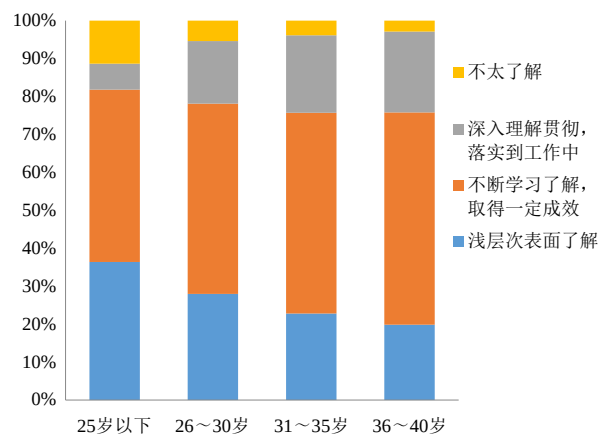


图5 不同年龄层级青年理论学习情况比较

Fig. 5 Comparison of political theory learning of youth talents among different age groups

对于政治理论的理解掌握及贯彻落实程度不断增强。

政治理论的理解认知程度与工作经历、生活阅历是密不可分的。年龄较小，工作时间不长的青年，对理论的认识也较为表面。

### 3.2 党团组织学习活动形式亟待创新

在近两年党支部开展活动的主要方式调查中，最常用的学习方式分别为组织文件学习（90%）、参观学习（85%）、党课教育（83%）（图6）。青年普遍认为现阶段党团组织学习活动形式较为单一，希望多举办集中培训班，并且能够融入外部门授课、信息化培训等方式。目前党团组织在活动形式和内容的设置上较为传统，缺少对青年学习需求的了解，对如何才能提高思想教育成果的分析把握不够，与现代化、信息化手段的结合不足。

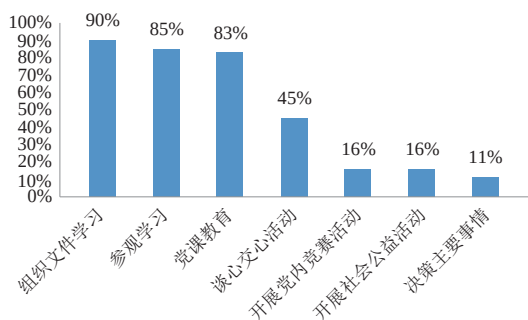


图6 党支部开展活动的主要方式

Fig. 6 Major forms of activity of Communist Party branches

### 3.3 青年价值判断标准更趋现实

通过调查，不同青年对于职业发展的考虑因素呈现多元化，有些人更加注重薪酬福利，有些人则认为自我价值的实现、学习培训机会更为重要。但总体来看，青年职业发展考虑因素（图7），得分排在前三位的分别为良好的薪酬福利、良好的工作氛围和环境以及实现自我的价值平台（得分是根据所有填写者对选项的排序情况自动计算得出的，它反映了选项的综合排名情况，得分越高，综合排序越靠前）。此外，青年普遍认为激励青年成才最有效方式是薪酬激励、学习培训机会和职位晋升机会。

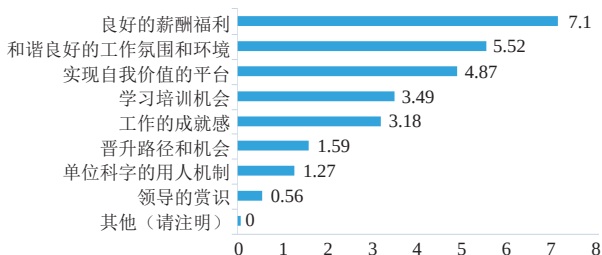


图7 职业发展考虑因素

Fig. 7 Factors considered for career development

市场经济在给我们带来科技发展、社会进步的同时，也使得社会价值观更加多元化。新旧观念的碰撞，网络文化的影响，理想与现实的差距，使青年人对于薪酬、物质的追求越来越强烈，价值判断标准也更趋现实。

### 3.4 青年职业目标实现存在困难

大部分青年为实现职业发展目标在努力，但还有近一半（42%）的青年没有时间去准备，认为目标较难实现。其中，25岁以下青年中，对于目标“没有时间准备，难以实现”的比例明显高于其他年龄段。

青年在初期设立职业发展目标时，对职业发展的认知还不清晰，以致在之后的目标准备过程中，逐渐意识到目标很难实现。工作时间较短的青年，对于如何准备和实现目标则更加迷茫。各单位对于青年的职业发展情况缺乏清晰的规划，在帮助青年人才成长、合理规划事业发展方面的指导不足。

### 3.5 压力感在青年中成为普遍现象

根据调查，40%的青年有时会感到有压力，30%的青年经常感到压力，对未来感到担忧，青年应对挫折、调节压力的能力还需进一步提升。

造成青年人才压力的原因包括组织因素及非组织因素。从影响工作压力的组织因素来看，“工作任务繁重，完成时间急”排在首位；影响压力的非组织因素则主要集中在“个人能力与长处没有得到发挥、工作与家庭生活的冲突”等方面（图8）。当前青年既要面对较为繁重的工作任务，又在一定程度上面临着工作与家庭生活的冲突，自身压力普遍较大。单位对青年心理健康的关注不够，缺少帮助青年调解压力的相应措施。

## 4 促进直属机关青年人才队伍建设的对策建议

#### 1) 理论联系实际，加强政治理论教育深度

一方面，可以通过集体学习、专题研讨交流等形式，强化青年政治理论的学习与理解，加强青年人才理论联系实际的能力，引导青年在学习的同时融会贯通，加强理解领会的深度，提升学习效果。另一方面，要充实教育内容。根据形势任务的需要，把握社会的热点难点，并结合各单位具体特点，针对性地开展教育，将教育内容丰富化、具体化，加强政治理论教育的深度。此外，对于工作时间不长、年龄较小的青年，更要在学习教育中注重引导和指导，提高其理论联系实际的能力。

#### 2) 丰富党团活动形式，提高思想教育成果

要不断探索，丰富党团学习活动形式。适时开展

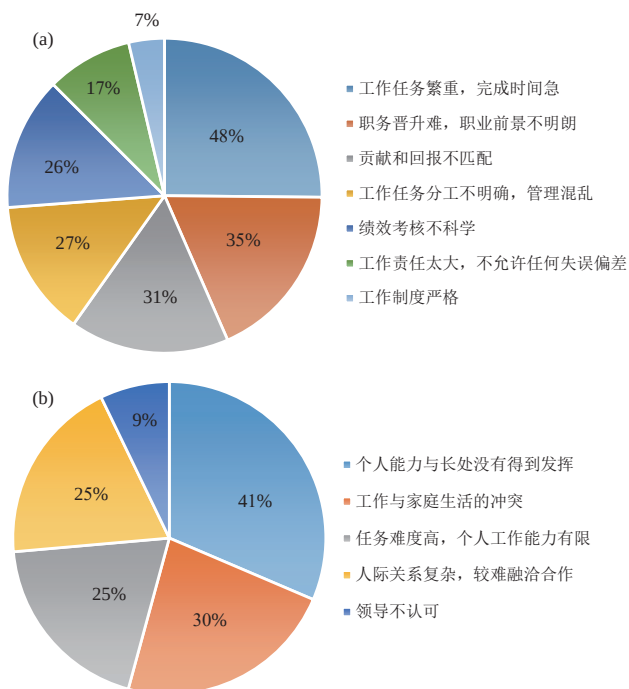


图8 影响压力的组织因素 (a) 与非组织因素 (b)  
Fig. 8 The organization factors (a) and non-organization factors (b) that affect psychological stress

党团联合活动, 针对不同主题采取相应的形式, 激发青年热情, 提高思想教育成果。一是要结合青年学习需求, 将研讨交流、外部党课学习与文件集中学习、内部党课教育贯穿融合。二是可通过实地参观、基地教育等形式提高青年学习的积极性, 增强其感性认识。三是运用信息化手段, 将移动化、碎片化的学习形式与传统方式相结合, 提高学习的实效性。

### 3) 注重思想引导, 增强青年责任感归属感

当前, 我们尊重青年注重物质激励、注重自我价值实现的需求, 但同时也要加强青年的理想信念教育, 引导他们增强对事业对组织的归属感。一是加强组织文化宣传。充分利用各种媒介, 如微博、微信公众号、单位网站等, 对气象部门的组织战略、组织文化、形势任务进行宣传, 增强青年对气象事业的责任感, 对组织文化的认同感。二是强化理想信念教育。可以在入职教育、干部培训、党员轮训等培训中进行针对性的课程设计, 强化理想信念教育内容, 引导青年增强理想信念。三是贴近青年需求, 充实活动内容。通过树立先进典型、优秀青年经验分享、基层帮扶等贴近青年、可以使青年参与其中的活动, 吸引青年融入组织之中, 引导青年树立正确的世界观、人生观、价值观。

### 4) 健全人才管理机制, 助力青年成长成才

要做好统筹规划, 建立健全青年的人才管理机制。从薪酬、福利、晋升、培训等方面进行统筹, 为青年创造公平的竞争环境和发展机会, 提高青年工作积极性。一方面, 可通过任职培训、岗位轮训、团队培养、岗位交流等方式, 全方位、多方式地进行青年培养。另一方面, 要将绩效考核、人才评价的结果与薪酬待遇、晋升机会切实联系起来, 做到科学评价, 有效激励<sup>[1-2]</sup>。

### 5) 加强科学指导, 促进青年职业发展

首先要区分不同年龄、不同工作年限, 针对性的引导青年树立合理的职业发展目标。目标的设定要结合青年自身具体情况, 确保目标与青年的能力水平、绩效评价结果、期望职位等紧密联系, 保证目标的可实现性<sup>[3]</sup>。对于入职时间较短的青年, 可根据职业测评, 了解其技能与期望的工作之间的差距, 通过评价信息来判断个人的优劣势。对于有一定工作经验的青年, 可综合绩效评价结果, 帮助个人了解组织对其技能、知识做出的评价及要求, 以更好的从自身实际情况出发, 设立职业发展目标。其次, 在青年对职业发展目标进行准备的过程中, 单位要对其进行指导与修正。可定期进行岗位胜任力测评、绩效评价, 了解青年职工岗位技能、工作能力等情况, 判断其是否偏离职业发展目标, 是否需要修正。

### 6) 加强人文关怀, 关注青年心理健康

要加强人文关怀, 畅通青年与组织的沟通渠道, 切实了解青年思想动态、需求诉求等。一是通过定期开展青年思想状况调研活动, 了解和掌握青年思想动态, 分析压力产生的主要因素。要针对不同年龄段的不同需求, 具体问题具体分析。通过谈心谈话、心理疏导等, 了解其需求并解决实际困难<sup>[4]</sup>。二是可建立相应的心理疏导平台。通过开展“青年职工沙龙”“单位青年交流平台”等, 为青年提供压力倾诉的平台, 单位也可派指定人员在平台中对青年的具体情况、具体困惑进行疏导, 从而引导青年形成良好的职业心态。

### 参考文献

- [1] 何土凤, 刘俊彦. 中国青年人才发展状况研究报告. 中国青年研究, 2018(11): 41-45.
- [2] 阿恩. 关于国有企业青年人才队伍建设的对策与思考. 科技创新与生产力, 2016(268): 6-8.
- [3] 雷茗. 职业生涯中的发展问题与对策探索. 产业与科技论坛, 2016(11): 255-256.
- [4] 伍少辉. 论如何加强公司青年人才队伍建设. 现代国企研究, 2016(10): 227-228.

# 气象部门人事管理岗位培训需求研究

邢亚争 孙天蕊 周倩

(中国气象局人才交流中心, 北京 100081)

**摘要:** 干部教育培训是干部队伍建设的先导性、基础性、战略性工程。加强气象部门人事管理岗位培训需求研究, 对于提高气象部门组织人事工作水平具有重要意义。文章引入气象培训需求分析模型, 从战略和组织分析、任务分析、人员分析、人口统计分析和区域差异分析五个方面进行培训需求分析, 探索建立了气象部门人事管理岗位培训需求要素体系, 为培训提供相关建议。

**关键词:** 培训需求, 理论模型, 人事管理, 岗位培训

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.016

## Study on the Training Demand of Personnel Management Post in Meteorological Departments

Xing Yazheng, Sun Tianrui, Zhou Qian

(CMA Talent Exchange Center, Beijing 100081)

**Abstract:** Leadership education and training is a leading, fundamental and strategic project for the construction of leadership team. Strengthening the study on the training demand of personnel management post in meteorological departments is of great significance to improve the level of organization and personnel work of meteorological department. This paper first introduces the meteorological training demand analysis model. Then, training demand analysis is carried out from five aspects including strategy and organization analysis, task analysis, personnel analysis, population statistical analysis, and regional difference analysis. Finally, the element system is established for the training demand of personnel management post in the meteorological departments. This paper provides related suggestions for the training.

**Keywords:** training demand, theoretical model, personnel management, post training

### 0 引言

目前, 气象部门人事管理岗位培训存在着培训数量严重不足, 缺乏系统性, 而部门外关于人力资源的培训存在着针对性不强, 培训效果不佳等问题, 阻碍着气象人事干部的知识更新和能力提高。培训需求是干部教育培训必须关注的重要问题, 培训满意与否, 满足程度高低是干部教育培训水平的重要评估标准<sup>[1]</sup>。

气象部门人事管理岗位人员结构复杂, 人员分散度高, 且每个岗位涉及职责范围也有所不同。因此, 在进行培训需求分析时, 除了考虑组织的一般需求外, 更要结合不同岗位需求及个人的差异化需求。同时, 根据气象部门的垂直管理体制和人员特点, 需要考虑人员特征和区域差异因素, 本文引入的气象培训需求分析模型正是将培训需求分析分为五个部分, 即战略和组织分析、任务分析、人员分析、人口统计分析和区域差异分析。

### 1 培训需求分析模型的引入

1961年, McGhee等<sup>[2]</sup>提出培训需求分析模型, 并经过其他研究者完善, 形成OTP模型, 它主要将培训需求分析分为三部分: 组织分析 (Organization Analysis)、任务分析 (Task Analysis) 和人员分析 (Person Analysis)。王卓妮等<sup>[3]</sup>根据气象培训的特点, 将OTP模型进行扩展, 增加了人口统计分析和区域差异分析, 构建了气象培训需求分析模型。本文主要基于此模型进行培训需求分析, 具体模型参见文献[3]。

### 2 气象部门人事管理岗位人员特征及培训问题分析

#### 2.1 人员特征及问题

1) 人员高度分散, 区域分布差异明显

气象机构高度分散, 所处的自然、经济、社会环境具有较大差别, 导致各地区人才队伍分布差异性较大。从层级分布上看 (图1), 国家级学历层次、人力资源专业所占比例和拥有副高级以上职称人员所占比例都是最高的。地市级和县级六成左右人员所学专业

收稿日期: 2019年7月31日; 修回日期: 2020年2月6日  
第一作者: 邢亚争 (1987—), Email: 674438723@qq.com

业为理工类专业，县级没有人力资源相关专业人员。

从人才的区域分布看（图2），本科以上学历和中级以上职称人员所占比例由东、中、西逐渐降低。

从专业分布看，大气科学类专业人员在东部地区比例最高，人力资源管理专业在西部地区所占比例最高，而信息技术专业在中部地区所占比例最高。

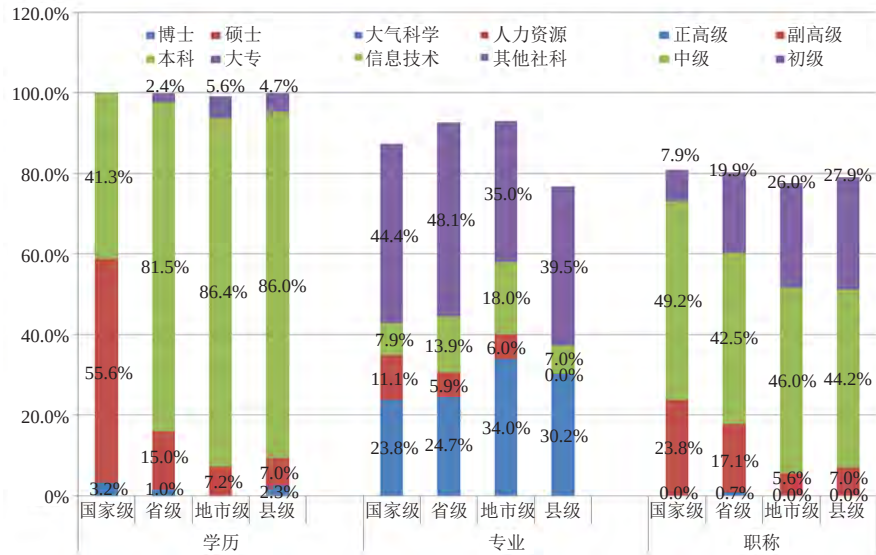


图1 各层级人才队伍学历、专业、职称结构

Fig. 1 Structure of academic qualifications, expertise, and job titles of personnel at each level

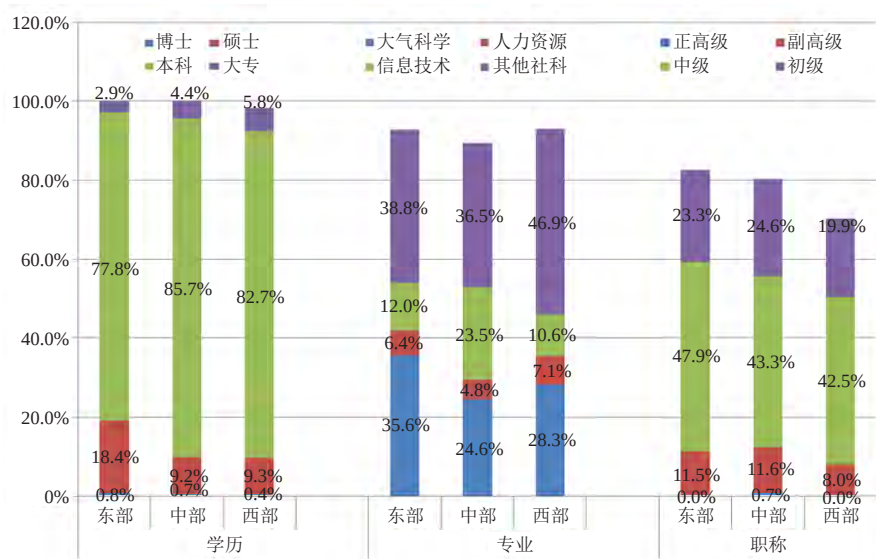


图2 各区域人才队伍学历、专业、职称结构

Fig. 2 Structure of academic qualifications, expertise, and job titles of personnel in each region

人员高度分散，队伍分布差异明显需要我们在进行培训需求分析时考虑人口统计分析和区域差异分析，考虑因人员素质结构和社会经济、文化背景不同产生的差异化培训需求。

## 2) 缺乏人力资源管理专业人才

从队伍的专业结构看（图3），大气科学类专业人才比例相对较好，占比达30.1%，但人力资源管理类专业人才数量仅占总数的6%。气象部门本身属

于专业性较强的部门，需要人力资源管理人员熟悉气象业务，但一定的人力资源管理知识也是必备素质。

## 2.2 人事管理岗位培训问题

### 1) 培训数量严重不足，缺口较大

气象部门内现有针对人事管理岗位培训的班型覆盖率较低。目前，相对固定的培训有人事处长和人事科长培训班，而人事处处长和人事科长仅占总人数的20.5%，近八成的人员没有参加培训的机会。据访谈调

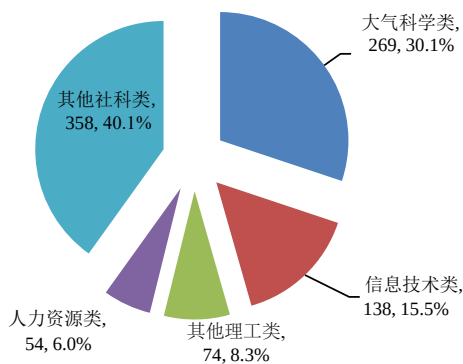


图3 2018年全国气象部门人事管理岗位人员专业分布

Fig. 3 Expertise structure of human resources management posts in meteorological departments in 2018

查,市面上其他培训机构关于人力资源的培训存在着鱼龙混杂的现象,气象部门人事干部很少选择去参加。

人事干部参加各类培训时长离《2018—2022年全国干部教育培训规划》的目标有较大差距。通过统计,处级干部、科级以下干部近一年参加的培训累计超过12天以上的分别仅占17.6%和14.3%。按照《规划》的要求,处级以上领导干部5年内参训累计不少于3个月或者550学时(每月按30天计算,处级干部每年平均累计要达到18天或110学时);科级以下干部每年参训累计不少于12天或90学时。问卷调查数据也显示,13.4%的气象人事干部过去1年中没有参加过任何培训,57.3%的人事干部认为目前参加的培训较少,并且有较强的培训需求(75.6%)。

#### 2) 培训内容缺乏系统性,培训方式较为单一

目前的培训很少从人事管理岗位或人员自身需要有针对性的开展,没有形成系统的培训体系。气象部门内开展的人事培训基本是根据上级要求及文件精神,由人事司不定期牵头提出培训内容,由干部学院进行组织实施,每年组织1~2次,培训对象主要为人事处长,培训内容以宣贯文件精神或布置工作为主。培训的开展以组织要求为主,没有根据各单位不同人事干部岗位、专业、个人能力素质情况进行进一步分析与区分。在制定的培训内容上,涉及专业能力、相关技能类的培训也很少。相应的培训方式也较为单一,以课堂讲授为主,主要采用单向的教学方式,强调对知识的传达灌输。

#### 3) 培训效果评估发挥作用不大

针对气象部门人事干部开展的培训,多为政策文件传达、系统操作的培训,只有人事处长班会以问卷的形式对培训课程进行评价,但针对性不强,很难发挥培训效果评估的真正作用。培训评估对提升培训管理水平和培训质量具有重要的导向和前瞻性作用<sup>[4]</sup>。

这种情况无法检验培训对于学员实际工作产生的影响,培训效果评估没有和干部的实际能力、工作绩效相关联。

### 3 气象部门人事管理岗位培训需求要素体系构建

主要采用文献分析法、问卷分析法、访谈法和专家座谈法,运用气象培训需求分析模型,最终形成了气象部门人事管理岗位培训需求要素体系。

#### 3.1 培训需求要素归纳

战略和组织分析。结合气象部门人事管理行业及岗位特点,通过对国家政策及中国气象局人才发展规划、政策、领导重要讲话的研究,初步形成战略和组织需求。包括:政治性、政策性强,需要很强的专业能力、专业精神,要深入调查研究,不断提高分析研判、综合协调和处理复杂问题的能力。此外,组织对人事干部服务能力、奉献精神、开拓创新精神等也有着较高的要求。

任务分析。任务分析主要是从气象部门人事管理岗位的职责,界定理想状况下工作任务的要求。通过对岗位说明书进行分析,并采取对分管领导进行访谈得出,岗位职责主要包括人力资源规划、人才队伍建设,干部选拔、考核、任免、监督工作,职称评定管理、人员招聘及培养、教育培训管理、劳动工资、社会保障、人事档案管理和公务员管理等工作。

人员分析。对不同单位的13名人事干部进行了访谈,通过访谈,人事干部普遍认为自己急需提升的能力或技能包括政治素质、政策理解运用、拓宽视野、专业知识、其他辅助技能等。希望培训的内容主要包括综合素质、人事政策和案例分析、工作方法、专业知识和能力等。

人口统计分析。人口统计分析主要通过对全国气象部门人力资源库数据中“人事管理”岗位人员的结构以及数量等方面的情况进行分析,识别因人口统计特征的差异带来的不同的培训需求。通过分析得出,应加大人力资源专业知识的培训,尤其是在地市级和县级等。

区域差异分析。区域差异分析的对象是通过将岗位进行区域划分,探讨差异化的培训需求。通过对问卷调查结果进行分析,可得出西部地区人员参加培训时长相对最少,需求较大;东部地区人员对培训内容满意率最高;各地区对培训内容的需求也有一定的差异,如:中部地区对管理提升类培训有较大需求,东部地区对流程制度类有较大需求,西部地区对业务技能类培训有较大需求。

结合以上需求分析,归纳总结培训需求要素,其中包括政治素质、管理能力、专业知识和能力、通用技能4个一级要素,并选取出48个二级要素。

### 3.2 培训需求要素的修改与筛选

在确定初步的培训需求要素框架后,通过专家讨论研究,对初步要素框架进行筛选修改。框架得到了专家的一致认同,但内部二级要素需进一步修改。结合专家意见,对初步形成的48个要素进行筛选分析,合并相似要素,删除重复要素,获得44个二级要素。

### 3.3 培训需求要素体系的确立

为进一步了解培训对象的需求,根据筛选过的要素,进行调查问卷的编制和发放。在全国气象部门人事干部中共发放问卷307份,收回有效问卷307份,参与调查人员占气象人事干部队伍总数的34.3%。其中,男性103人,女性204人;国家级占6.2%、省(区、市)级37.1%、地市级56.7%,与队伍总体分布比较一致。

问卷主要针对组织人事干部素质、能力、知识、技能等方面的现有状况与理想状况之间的差距,以及个人自我实现的需求,通过对3个方面评价结果的比较和综合,得到培训目标和具体培训内容。

对回收的307份问卷数据进行信度检验,信度系数数值为0.986,大于0.9,因而说明研究数据信度质量很高。针对“项已删除的 $\alpha$ 系数”,分析项被删除后的信度系数值并没有明显的提升,因而说明研究数据信度水平高。针对“CITC值”,分析项对应的CITC值,除“办公软件(office)技能”外,其他项全部均高于0.6,因而说明分析项之间具有良好的相关关系,同时也说明信度水平良好。通过进一步分析讨论,删除CITC值低于0.6的项目,合并了2项相似项。最终形成4个一级要素,42个二级要素,作为气象部门人事管理岗位培训需求要素体系(表1)。

## 4 完善气象部门人事管理岗位培训的建议

### 1) 构建分层分类的岗位培训体系

构建分层分类的气象部门人事管理岗位培训体系。本文仅总结出需求要素体系,在组织培训时可以根据不同类型的培训对象对这些要素进行筛选组合。一方面,可以根据人员不同职级、单位层级、区域开展培训,不同类型的培训内容可设置相似课程,也应有所侧重和区分。另一方面,可根据人事部门不同岗位进行专业化专题式培训,结合不同岗位的需求及内容进行更为具体深入的培训。

### 2) 丰富教育培训方式方法

可采用多样化的培训形式丰富教学内容。在培训方法上,除传统的讲授外,可采用主导式、启发式

表1 气象部门人事管理岗位培训需求要素体系  
Table 1 Training demand system of human resource management post in meteorological departments

| 一级要素 (4) | 二级要素 (42)  |             |
|----------|------------|-------------|
| 政治素质     | 政治信念坚定     | 服务能力        |
|          | 政治鉴别能力     | 道德内化力       |
|          | 政策理解能力     | 自我约束力       |
|          | 理论联系实际能力   | 组织纪律性       |
| 管理能力     | 大局意识       |             |
|          | 熟悉气象发展能力   | 调查研究能力      |
|          | 决策判断能力     | 应急处理能力      |
|          | 组织规划能力     | 社交洞察力       |
|          | 解决复杂问题能力   | 改革创新能力      |
| 专业知识     | 人力资源法律法规知识 | 招聘与选拔方法     |
|          | 业务系统操作     | 职业生涯规划管理方法  |
|          | 干部管理与监督政策  | 工资政策解读      |
|          | 干部选拔任用工作流程 | 劳动争议处理      |
|          | 人才政策解读     | 社保政策与流程     |
|          | 人才发展规划     | 公务员管理       |
|          | 人才评价方法     | 绩效管理        |
|          | 职称评定相关政策   | 培训教育管理规划与制度 |
|          | 职称评定工作流程   | 人事档案管理      |
|          | 压力与情绪管理    | 时间管理        |
| 通用技能     | 沟通协调       | 自我学习能力      |
|          | 语言文字能力     | 团队合作精神      |
|          | 人际关系       |             |

教育,适当增加案例分析、专题讲座、体验式教学等,还可通过干部间的讨论交流、经验分享、情景模拟等,加强培训的实效性;在教学方式上,也可根据不同需求采用面授和网络教学相结合的混合式培训形式。将培训方法与培训内容相融合,真正做到按需参训、因人施训。

### 3) 开展有效的培训效果评估

培训效果评估是检验培训效果的重要环节、科学有效的评估方法对于效果评估的实施起着重要作用。根据不同评估内容、采用不同方法进行效果评估。可通过问卷调查的方式了解受训者的态度,包括其对教师、课程、培训方法等方面的评价和反馈;可以通过纸笔测试等方式来评估受训者知识、技能等;对于更深层次素质能力的改变,则可对受训者回到工作岗位后的实际能力进行跟踪评估。

### 参考文献

- [1] 梁周敏.论干部教育培训需求满足与教学质量提升.学习论坛,2011,27(4):78-80.
- [2] McGhee W, Thayer P W. Training in business and industry. New York: Wiley, 1961.
- [3] 王卓妮,赵亚楠,叶梦姝.试述OTP模型在气象培训中的应用及扩展.继续教育,2013(10):40-42.
- [4] 田燕,闫琳.气象部门处级领导干部培训模式初探——以气象台长培训班为例.继续教育,2017(9):25-26.

# 微信公众号“气象人才”的宣传策略研究

林巧 乐青 张龙伯 邢亚争  
(中国气象局人才交流中心, 北京 100081)

**摘要:** 微信用户的迅猛增长催生了基于微信公众号的招聘宣传新模式, 阐述了通过微信公众号进行招聘宣传的优势, 对相关气象类微信公众号的招聘宣传情况进行分析, 并提出“气象人才”微信公众号的招聘宣传工作实施建议。

**关键词:** 微信公众号, 招聘宣传, 气象人才

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.017

## Research on the Recruitment Publicity Strategy of Meteorological Talents of WeChat Official Account

Lin Qiao, Yue Qing, Zhang Longbo, Xing Yazheng  
(CMA Talent Exchange Center, Beijing 10081)

**Abstract:** The rapid growth of WeChat users has given rise to a new recruitment publicity model based on WeChat official accounts. This paper expounds the advantages of recruitment publicity through the WeChat official accounts. It analyzes the recruitment publicity situation of the meteorological relevant WeChat official accounts, and puts forward implementation suggestions for recruitment publicity of Meteorological Talents of WeChat official account.

**Keywords:** WeChat official account, recruitment publicity, meteorological talents

### 0 引言

招聘宣传环节连接了用人单位和毕业生, 其渠道的有效性直接影响到毕业生招聘工作是否能顺利完成。《微信2018影响力报告》显示, 微信的月活跃用户已经达到10亿, 已成为重要的宣传平台。中国气象局人才交流中心于2018年10月创建“气象人才”微信公众号, 并组建运营团队, 建立运营管理机制, 自2019年4月起定期发布, 开展公众号的运营工作。

### 1 基于微信公众号进行招聘宣传的优势

微信公众号是指组织在微信公众平台上申请的应用账号<sup>[1-2]</sup>。微信公众号包括服务号和订阅号, 从信息的宣传与传播的功能角度来讲, 服务号信息展示比订阅号更直接, 订阅号推送信息数量更多, 各有利弊。通过微信公众号进行招聘宣传的优势如下。

拓宽宣传渠道。以往用人单位招聘宣传的途径主要包括现场招聘会、纸质媒体和招聘网站, 而微信公众号为用人单位提供了一个极有价值的新渠道<sup>[3]</sup>。借助微信公众号多样的信息发布方式, 招聘宣传可以图文并茂、视听兼具, 吸引求职者的同时也方便他们全面了解信息。招聘信息在微信公众号上发布后, 不仅

仅被关注公众号的用户看到, 还会被用户通过朋友圈或微信群转发, 依据人际关系网不断向外扩散, 实现宣传效果的叠加。

提升宣传精准度。传统招聘宣传渠道面向所在载体的所有用户, 属于全面大撒网的方式, 而微信公众号的招聘宣传则受众明确, 针对性强, 是精准式投递。气象部门的招聘对象主要是应届毕业生, 招聘信息在被毕业生阅读转发后, 由于其在朋友圈中毕业生多, 信息分享度高, 信息更容易实现多层而有效地传播。

提高宣传效率。不同于传统招聘宣传方式的“守株待兔”, 微信公众号是主动把信息推送到用户眼前, 大大地提高了信息被阅读的可能性<sup>[4-6]</sup>。微信用户的使用频率高, 利用碎片时间打开微信已经成为很多人的习惯, 这意味着发布的招聘需求信息能更快地被求职者获取, 从而保证信息的时效性, 有利于缩短招聘工作周期。

### 2 气象招聘类微信公众号的宣传效果分析

#### 2.1 研究对象

目前, 气象招聘类微信公众号主要有“气象人才”“新云天气”“气象就业招聘”“一展云图”和“气象及民航类招聘”等。其中除“气象人才”是

收稿日期: 2019年8月8日; 修回日期: 2020年2月21日

第一作者: 林巧(1984—), Email: linqiao2001.net@163.com

中国气象局人才交流中心官方微信公众号外,其他4个公众号主体均是个人。“气象人才”致力于及时、权威地发布气象部门招聘信息,专业、实用地解读人才政策,提供全面、高效的人力资源服务。“新云天气气象”的定位是气象从业人员和气象专业学生的信息平台,发布的信息内容涵盖气象行业动态、升学、就业、社会实践、会议、征稿及学术信息。“气象就业招聘”主要提供各单位有关大气科学专业最新的招聘信息,分享各类实用的面试技巧、专业技能和职场须知。“一展云图”旨在分享国内外大气科学、气象学就业升学和科研信息。“气象及民航类招聘”主要提供气象和民航类单位的招聘信息。

以上5个微信公众号,其中“气象人才”将在后面单独分析,而本研究选取分析的时间段是2018年7

月1日至2019年6月30日,以一年为周期,因“气象及民航类招聘”在此期间信息发布不连续,有数个1~3个月时间段的发布信息数量为零,故不作为分析样本。因此研究对象为“新云天气气象”“气象就业招聘”和“一展云图”3个微信公众号。

## 2.2 微信公众号推送的气象部门招聘相关信息特征

“新云天气气象”、“气象就业招聘”和“一展云图”在分析时段内推送的信息数量分别为1519、1122、855条,其中和气象部门招聘相关的信息各有231、298、59条,分别占各公众号发布总量的15.2%、26.6%、6.9%。这些气象部门招聘相关信息可分为招聘信息和就业指导两类(表1),各公众号推送的气象部门招聘相关信息主要为招聘信息,就业指导数量较少。

表1 3个微信公众号推送的气象部门招聘相关信息情况

Table 1 The recruitment relevant information of meteorological department pushed by the WeChat official accounts

| 内容<br>公众号 | 推送信息总量 | 推送气象部门相关信息 |         | 招聘信息 |              | 就业指导 |              |
|-----------|--------|------------|---------|------|--------------|------|--------------|
|           |        | 数量         | 占推送总量比重 | 数量   | 占气象部门相关信息量比重 | 数量   | 占气象部门相关信息量比重 |
| 新云天气气象    | 1519   | 231        | 15.2%   | 224  | 97.0%        | 7    | 3.0%         |
| 气象就业招聘    | 1122   | 298        | 26.6%   | 281  | 94.3%        | 17   | 5.7%         |
| 一展云图      | 855    | 59         | 6.9%    | 51   | 86.4%        | 8    | 13.6%        |

表1有关信息的逐月分布(图1)表明,虽然各公众号的数量存在差异,但总体的趋势是一致的,存在明显的时序特征,并与气象部门招聘工作实际情况一致。一年中,7—9月的信息发布量较低,10月数量上升,进入招聘预热期,11月为气象部门的招聘工作月,信息发布量爆发增长至最高点,12月时发布量开始回落,发布量经历一个小波谷,随后3月数量开始爬升,4—5月为气象部门补招的主要时间,信息量上升,至6月又开始回落。

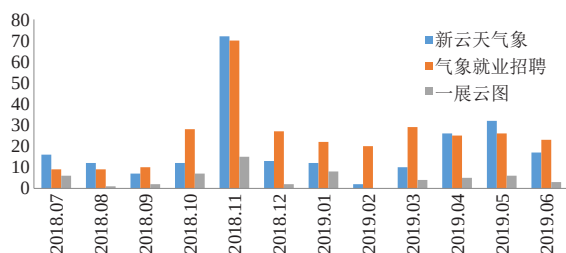


图1 3个微信公众号发布气象部门招聘信息数量变化

Fig. 1 Distribution of recruitment relevant information on meteorological department in different periods pushed by the WeChat official accounts

## 2.3 微信公众号的信息宣传效果

阅读和在看是用户对公众号信息最直接的反应,阅读量体现用户感兴趣的程度,在看量反映信息受欢迎程度。对3个公众号按所有信息、气象部门招聘信息和

求职技巧信息分类别进行平均阅读量的统计(图2),可以看到“气象就业招聘”各类信息的平均阅读量都是最高的,且该公众号的求职技巧类的阅读量远超其他信息。“新云天气气象”和“气象就业招聘”两个公众号都表现出气象部门的招聘信息平均阅读量超过总体平均阅读量,说明在求职者心中气象部门更受青睐,而“一展云图”的受众对气象部门招聘信息的关注度则低于平均值。

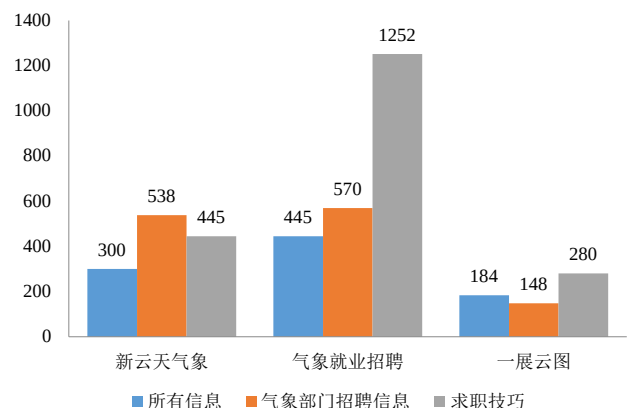


图2 各微信公众号推送的各类信息的平均阅读量对比

Fig. 2 Comparison of average reading volume of each type of information pushed by the WeChat official accounts

图3是3个微信公众号推送的各类信息的平均在看量情况,对于“新云天气气象”和“气象就业招聘”2

个公众号，求职技巧类信息最受好评，而气象部门招聘信息的平均在看量和所有信息的相当。“一展云图”的受众对各类信息的偏好无明显差异。

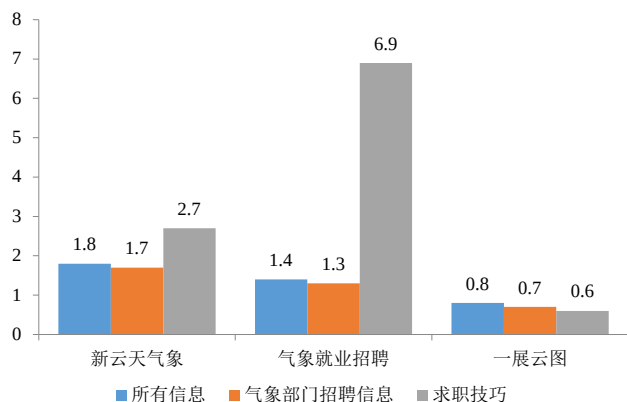


图3 各微信公众号推送的各类信息的平均在看量对比  
Fig. 3 Comparison of average amount of 'wow' of each type of information pushed by the WeChat official accounts

“新云天气象”“气象就业招聘”和“一展云图”3个微信公众号均为订阅号，可每天一次推送8篇文章。对不同位置文章的平均阅读量进行统计（图4），可以看到“气象就业招聘”的总体阅读量最高，“新云天气象”位列第二，“一展云图”最低。文章位置和阅读量的关系3个公众号的变化趋势相同，即文章的阅读数量都随着位置靠后而减少。

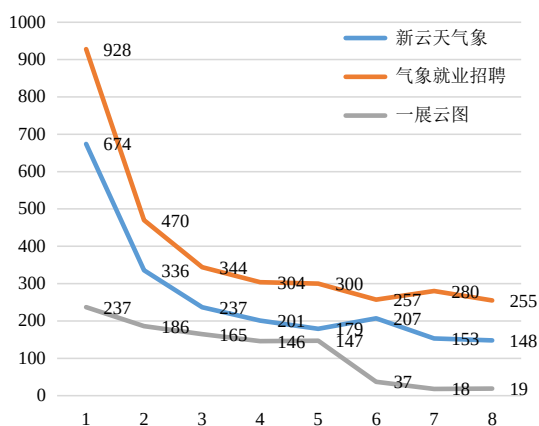


图4 各微信公众号不同位置文章的平均阅读量  
Fig. 4 Average reading amount at different locations of the WeChat official accounts

分别对这3个公众号阅读量排在最高前十名的文章进行统计分析，各有不同特点。“新云天气象”前十名阅读量都在2100以上，最高为5497，最低2101；内容包括7篇气象部门招聘信息，2篇非气象部门招聘信息，1篇行业新闻；发布的时间集中在2018年11月。“气象就业招聘”前十名阅读量从1707~4467不等，低于“新云天气象”；内容上仅1篇气象部门招

聘信息，5篇非气象部门招聘信息，4篇求职技巧；发布时间较为分散，基本全年均有分布。“一展云图”的前十名阅读量差别较大，最高的5662，为3个公众号最高值，最低的仅有680；内容方面有6篇博士后招聘信息，1篇博士招生信息，3篇其他行业招聘信息，无一篇气象部门招聘信息；发布的时间集中在2018年9月、10月和2019年3月。

### 3 “气象人才”公众号招聘宣传的困境与发展建议

2019年4—8月，“气象人才”共推送文章26篇，其中原创10篇，原创率为38.5%。发布的内容主要包括招聘信息、就业指导、雇主品牌推广、人才评价方法介绍、人才政策解读和社保档案相关知识等。文章平均阅读量为851，平均在看量为8，有6篇文章阅读量过千，阅读量最高达4524。雇主品牌推广相关文章有8篇，很好地弥补了其他公众号在此方面内容的空白。

虽然“气象人才”公众号运营管理机制已建立，但对于招聘宣传这一模块如此实施并未有具体规划。目前存在的问题一是招聘宣传的信息发布频率低，有时一个月仅有一篇，难以达到宣传效果。二是推送的信息内容审核不细致，偶尔出现错别字、文章删除现象。

微信公众号的推广是提升宣传效果的重要环节。招聘宣传的对象为毕业生，特别是气象类专业在校学生，但“气象人才”公众号自创建以来仅通过招聘会海报扫描二维码的方式进行宣传，效果不尽如人意，目前公众号的粉丝中招聘宣传的目标群体数量不多。

学生群体容易接受并喜欢体验新事物，而气象部门的招聘对象主要是应届毕业生，人才交流中心要成为用人单位和毕业生沟通桥梁，有必要借助新渠道提高宣传效果，将微信公众号纳入宣传途径中。明确“气象人才”公众号招聘宣传工作的定位，制定公众号招聘宣传的运营方案，确保信息推送工作的时效性和连续性，推动公众号顺利运行。此外还要注重加强推广，通过高校教师、宣讲会、网站公告等途径宣传公众号，吸引粉丝。

#### 参考文献

- [1] 任静. 互联网时代微信招聘效果提升策略研究. 市场周刊, 2018(12): 183-184.
- [2] 徐腾, 沈航, 贾兴飞. 新媒体在网络招聘应用中遇到的问题分析及解决方案. 辽宁经济, 2019(03): 67-69.
- [3] 赵聪敏. 微博招聘与微信招聘的对比分析. 现代商业, 2018(12): 176-178.
- [4] 李田田. 微博招聘传播力研究. 现代商贸工业, 2016 (10): 54-55.
- [5] 莫少聪. 基于微信公众号对招聘网站的网络口碑传播机制的探讨. 科学与财富, 2016(34): 446-447.
- [6] 向丽, 刘晖. 招聘类微信公众号的应用困境及对策. 北方经贸, 2019 (2): 137-139.

# 气象部门国有企业职称工作浅析

刘艺 刘蕊 杜净译

(中国气象局人才交流中心, 北京 100081)

**摘要:** 当前在事业单位分类改革和气象服务社会化的双重背景下, 气象部门国有企业担负着气象科技成果转化、气象服务体制改革的重要使命, 因此气象部门国有企业的发展, 将在一定程度上决定新时期中国特色的气象服务行业格局, 现在国有企业的人才发展问题比过去重要得多, 人才发展问题中职称管理尤为重要。分析气象部门国企职称管理中存在的问题, 旨在为气象部门国有企业的人力资源管理工作提供参考依据, 让职称工作更加合理、公正、健康的发展。

**关键词:** 职称, 国企, 改革

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.018

## Analysis of Job Title Management in State-Owned Enterprises of Meteorological Departments

Liu Yi, Liu Rui, Du Jingyi

(CMA Talent Exchange Center, Beijing 100081)

**Abstract:** Under the background of classification reform of public institutions and socialization of meteorological services, the state-owned meteorological departments are undertaking the important mission of transformation of meteorological scientific and technological achievements and reform of meteorological service physique. Therefore, the development of the state-owned meteorological department will determine to a certain extent the pattern of meteorological service industry with Chinese characteristics in the new period. The problem of talent development in state-owned enterprises is now much more important than ever before. Job title management is particularly important in talent development. This paper analyses the existing problems in the management of job titles of state-owned enterprises in meteorological departments. We aim to providing reference for the management of human resources of state-owned enterprises in meteorological departments and making the job title related work more reasonable, fair, and healthy.

**Keywords:** job title, state-owned enterprises, reform

### 0 引言

气象系统作为独立开展职称评定的部门, 有一套主要针对气象部门事业单位专业技术人员的评价标准。近几年气象部门国有企业也和事业单位用同一套评价标准来衡量自己的专技人员, 不能体现真正的专业水平。国有企业需要积极进行职称改革和人才的激励开发, 充分发掘、培养和盘活利用国企内部专技人员。在职称评定程序改革中, 要加强对职称评定的监督, 确保能够科学、合理、公正的对国企专技人员进行职称评定。

### 1 气象部门国企职称工作总体情况

2018年底, 全国气象部门所属法人企业共1000余家, 其中依靠中国气象局进行职称评定的, 主要有华云气象科技集团、华风气象传媒集团和气象报社等3家国有企业。本文以华云气象科技集团、华风气象传

媒集团和气象报社3家直属国有企业为研究对象, 依据每年气象部门开展的职称评定工作和气象部门人力资源数据库为数据来源进行分析, 以求真实、全面地分析气象部门国有企业职称工作。

截至2018年, 受国家和中国气象局深化职称制度改革影响, 高级职称占比较以往有一定幅度增长, 但初中级职称的专技人员基数仍然比较庞大, 并且拥有职称资格的人员占57.5%, 没有职称资格的占42.5% (图1), 在没有职称资格的人员中从事专业技术工作的人员占有一定比例, 他们在今后的职称改革洪流中该何去何从是亟待解决的问题。对气象部门国有企业的初中级职称存在的问题进行深入分析, 有助于让气象部门国有企业的职称工作得到切实的改善。因此, 本文着重对这3家直属国有企业的初中级职称评定相关数据进行了分析。

### 2 气象部门国企初中级职称情况分析

#### 2.1 参评人员占比趋势

3家国有企业人员总数5年间人数最低为1181人,

收稿日期: 2019年7月24日; 修回日期: 2020年2月3日  
第一作者: 刘艺 (1989—), Email: 945241596@qq.com

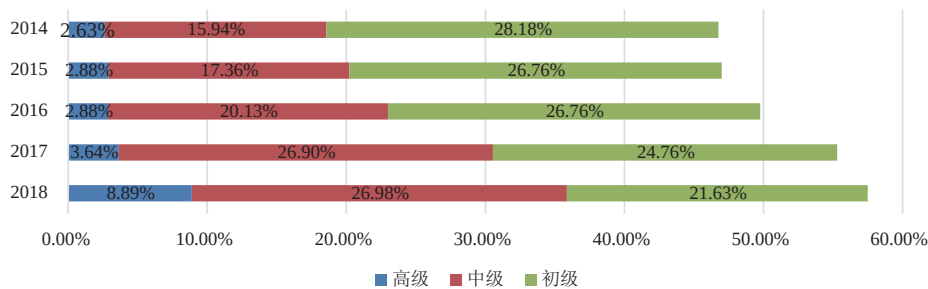


图1 2014—2018年气象部门国企职称评定数量总体情况

Fig. 1 Overall situation of the number of SOE titles assessed by the meteorological department during 2014–2018

最高为1327人，增减趋势较为平缓，因此从2014—2018年的5次初中级评定参评人员数量占当年3家国有企业总人数的比例（图2）可以看出，初中级职称参评人数占比在逐年提升。2014年参评人数仅占总人数的1.56%，到2018年，参评人数的占比已提升至5.80%，从2016年起参评人数占比大幅增长，因为从2016年开始，气象部门在对国有企业初中级职称进行评定前，专门开展了评定工作现场宣讲与指导，宣传初中级职称评定的重要性，指导初中级职称评定申请的规范性。2016年相较于2015年的占比增长了1.88%，涨了近1倍，2017年、2018年相较前一年涨幅逐渐趋于平缓，均在1%左右。经调查得知，这3家国有企业的人力资源管理部门较为重视职称工作，加大了对专业技术人员的职称评定督促力度。

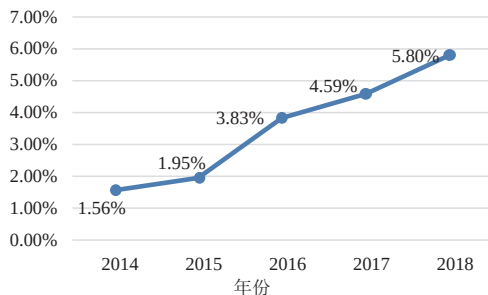


图2 2014—2018年气象部门国企初中级职称参评人员占总人数比例趋势

Fig. 2 The proportion of junior and intermediate title participant of the state-owned enterprises over the total number of staff from 2014 to 2018 in the meteorological department

## 2.2 参评人员数量变化

2014—2018年的5次初中级评定，在3家国有企业人员总数没有过大变化的前提下，职称评定人数呈现逐年上升的趋势（图3）。2016年初中级职称参评人员数量急速上升，2016—2018年中级职称参评人员数量成倍增长，前几年参评人员多集中于初级，2018年中级职称参评人员数量大幅度超过初级职称参评人员

数量，说明气象部门国企开始认识到职称评定的连续性，专业技术人员的职称不止步于初级，支持初级职称人员后续职称评定和发展。

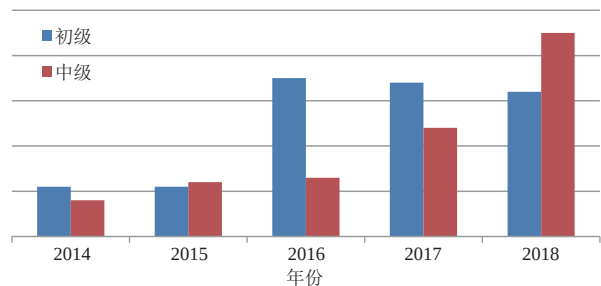


图3 2014—2018年气象部门国企初中级职称参评人员数量变化

Fig. 3 Changes in the number of junior and intermediate title participant of the state-owned enterprises in meteorological department in 2014–2018

## 2.3 逾期参评人员情况

尽管气象部门国企初中级职称情况在逐年增温，但每年的初中级职称评定仍存在很大问题。从评定方式和取得资格时间看，取得初级资格的人员中，仅有19.6%的人按时进行初级评定，其他人为逾期评定，占80.4%。逾期评定在初级成为普遍现象，且47.8%的参评人员逾期评定时间在6年以上（含6年）。取得中级资格的人中，仅有38.1%的人按时进行中级评定，其他人为逾期评定，占61.9%。逾期现象在中级评定也超过半数，且57.1%的参评人员逾期评定时间为6年及以上。初中级共有27.6%的参评人员为按时评定，逾期评定的参评人员占72.4%，其中逾期6年及以上的参评人员占51.9%（图4）。

## 3 气象部门国企职称工作存在的问题

### 1) 企业员工发展与职称相关度低

一是企业职称评聘不相关，气象部门国企目前职称评定和聘任是不相交的两条线，企业人员在评定职称后，企业不会对他进行相应的聘任，国有企业人员

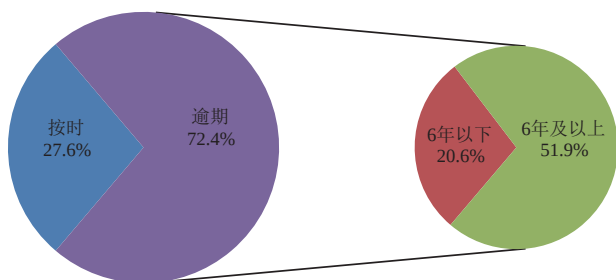


图4 2014—2018年逾期参评人员数量占比情况  
Fig. 4 Proportion of overdue participants in the five years from 2014 to 2018

参加职称评定的意义较低；二是职称评定结果与薪酬不相关，当下国有企业一般都会根据自身情况，制定一套内部的独立薪资考核的制度，体现不出职称高低带来的影响，这也致使企业员工参与职称评定的积极性较低。

#### 2) 企业职称评定工作规范性不足

一是职称评定标准不规范，气象国企与一般国企相比最大的区别在于系统内部没有独立的职称评选标准，现有职称评定标准更侧重于科研型或事业单位，并不倾向于国企专技人员；二是档案管理不规范，气象部门国企人员档案存放地点分散于各地人才市场，档案管理维护较难，无法及时同步档案中内容，导致不能核实申报人员的真实情况；三是申报材料不规范，申报人员平时的项目研究、技术报告等材料不认真留存，导致只能提交一些说明来辅佐，难以真实反映参评人员的能力水平。

#### 3) 企业员工流动性影响工作开展

一是受企业人员流出性大的影响，人员对企业的归属感不强烈，且流出后气象部门的职称资格证书是否在外部门有效，还需要看当地的相关规定，导致企业人员参与职称评定的积极性不大；二是从气象系统外部引进的人才往往有相关职业资格证书，该证书是参加全国统一考试取得的，可以在企业中得到认可，也就没有参加气象部门内部职称评定的必要。

#### 4) 企业职称评定专家组建不完善

一是专家库在组建时就存在不公平性，因为专家库中的评定专家基本是有很大一部分国有企业的高层管理者和领导等行政人员以及很少量的专业技术人员组成，这对国有企业专业技术人员的工作能力的评判会产生较大误差；二是评定工作量的巨大导致专家无法对参评人员的每一项业绩进行详细的评价，无法真正从学术业绩上去判断参评人员的能力，从而采取对参评人员的主观判断进行评价，有失公允。

## 4 气象部门国企职称工作问题对策

### 1) 加强气象部门对国企职称工作导向

国企职称工作推动成果不显著的根本原因是气象部门对国企管理的导向中对职称工作的重视程度不够，想要彻底改善气象部门国有企业职称工作，就要有明确的工作导向，这样一来国企职称工作会在很多方面有所突破<sup>[1-2]</sup>。一是会增强各企业对职称评定工作的认同，将职称评定工作作为人才培养一项重要举措，加大对职称评定工作的投入，将企业发展、员工薪酬等与职称工作紧密相连；二是推动企业申报人员对职称评定的认识，使其充分了解职称对个人发展的意义和作用，增强业务工作资料积累，提高对职称评定工作的积极性。

### 2) 完善气象部门国企职称文件与规范

根据职称改革精神和相关文件要求，修订评定办法，优化流程，保证评定工作公平、公正开展；有针对性的调整评定条件，在能力、业绩成果条件设置中充分体现评定系列的专业特点，提高参评人员能力素质评价的有效性；强化业绩材料的完整，能够切实体现参评人员水平，让职称工作更具有科学性；合理建设专家库，注重专家和参评人员的专业匹配<sup>[3]</sup>。

### 3) 大力开展国企内部职称评定的指导

加大职称评定宣传力度，加强职称的政策宣传，通过宣传，强化职称评定制度在国有企业员工心中的地位，让单位和个人理解职称评定相关材料的重要性和必要性，通过宣传和教育，将培养国有企业员工建立正确的价值观和工作态度；国企内部要加强宣讲，有针对性的提供职称评定政策解答、评审程序和方法讲解、申报具体要求指导等服务，协调联动做好职称政策的贯彻执行。

### 4) 提升气象部门国企评定的过程监督

职称评定工作重点在职称审查会议的评价过程，直接影响参评人员是否可以以普遍一致的评价通过审查，得到相应的资格<sup>[4]</sup>。职称评定专家们应侧重于选择各专业的专家，更少的选择行政人员，尽可能让职称评定过程公平、合理；应全面考虑低、中、高层次的建议，不能只以最高审查机构的意见为准；要严格的对业绩进行公示，形成有效的监督。

## 参考文献

- [1] 苏俐颖. 关于国企职称工作的现状浅析. 现代经济信息, 2017(7): 125.
- [2] 张挺慧, 刘春莉. 国企职称改革中存在的问题和思考. 现代经济信息, 2018(8): 40, 42.
- [3] 卢颖. 探析职称工作在人力资源管理中存在的问题及对策. 视听, 2016(6): 184-185.
- [4] 袁应红. 如何提高企业中级职称数量. 企业改革与管理, 2017(24): 76.

# 浅析气象继续教育教案的编写

■ 姚秀萍 叶梦姝

教案编写是气象教育培训工作的重要部分，也是教育培训人员的岗位必备素质。针对气象继续教育这种高科技、高层次行业继续教育，提出了教案在教学活动组织、教师能力培养中的重要作用，并论述了教案的基本要素和一般结构，总结了教案编写中存在的问题，并提出了相关建议。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.019

气象教育培训队伍，作为气象专业技术队伍中的一支，应同时具备大气科学的高科技专业化岗位特征，以及教育培训行业的传道授业的岗位职责。对于气象教育培训人员来说，其岗位必备素质，既包括大气科学、大气物理与大气化学、应用气象学等专业能力，也包括课程设计开发、培训需求分析、课程论与教学论等岗位必备素质。

## 1 教案在气象继续教育中的重要性

教案是教师为传授学科特定的基本知识和基础理论、训练学生的学科专业技能和培养学生的专业态度而制定的教学实施方案，也是教师为实现课程教学目标、完成教学任务而将特定时段的教学活动及其内容和形式进行有机组合、有序排列而形成的教学实施体系。教案是课堂教学设计的载体，也是教师备课成果的主要标志。授课是教学活动的核心，教案是课堂教学设计的载体，是课堂教学质量的基础。

### 1.1 教案对于培训教学活动组织的作用

备课是教学准备的关键，教案是备课的真正载体。撰写教案的过程是对备课中所做的各种课堂教学设想进一步条理化、科学化，并用文字书面表达的过程。撰写教案是备课的关键环节，也是备课的物化成果之一。教案是教学（培训）计划、教学大纲（课程大纲）的进一步细化，是教师实施课堂教学的蓝图，是准确控制课堂节奏的行动指南，也是确保课堂教学质量的基础。俗话说，“台上一分钟，台下十年功”。写好一份教案，教师花费的时间是一堂课的3~6倍，新教师甚至达到10倍以上。

### 1.2 教案在提升现代教育技术效益中的作用

教案是提升现代教育技术效益的基础，对于气

象继续教育而言，无论是理论知识的学习补充，例如公式推导、天气图分析等，还是天气预报服务管理实践，例如个例分析、思维导图绘制等，都需要遵守严格的思维逻辑。不少年轻教师重视技术，忽视备课和教案编写。虽然乍一看起来视觉效果十分丰富，但教学完成后并没有点透知识点及其组织逻辑，反而导致教学质量下降。因此，随着信息技术的变革和社会的发展，教育技术会不断发展变化，但无论采用什么样的方式方法，都需要精心设计讲授思路、系统传递教学内容、合理把握重点难点，才能最终达成教学目标。

### 1.3 教案在教师能力培养中的作用

教师作为教学活动的策划者和实施者，编写教案是教师的基本要求，也是教育培训机构核心能力建设的要求。教师“以教学为中心”，撰写教案是教师的教学基本功之一，也是评价教师教学水平和质量的重要依据之一。因此，应该把“如何撰写教案”纳入青年师资培训，对教案撰写的规范、要求、目的、意义等进行宣讲，让教师了解教案撰写要求，掌握教案撰写技巧。教学管理部门应该把教案的监督、考核评价作为教学管理和教师管理的重要部分。

## 2 教案编制方法

### 2.1 教案基本要素

一份完整的教案包括四部分内容：第一部分是课程基本情况，包括课程名称、课时数、节次、授课对象、选用教材；第二部分是教学要求，包括学员学情分析（学员学历背景、专业知识背景、学员岗位背景）、教学目标、教学要求、重点难点、教材分析（包括教材、讲义、教学个例、案例分析等各类型参

收稿日期：2019年5月24日；修回日期：2020年2月2日

第一作者：姚秀萍（1967—），Email: yaoxp@cma.gov.cn

资助信息：国家自然科学基金项目（91937301）；第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0105）；国家重点研发计划重点专项（2018YFC1507804）

考材料)；第三部分是课程设计，首先要有课程导入（本课程的先行课程有哪些，后续课程有哪些），主要内容与时间安排、教学法与手段应用、考核方式、课后反思等；第四部分是教案审定情况，即教务部门、教研室主任、课程负责人或教学组组长对该教案的评阅意见。

## 2.2 教案编制思路

教案的编制要以现代教学理论和教学思想观念为指导，以课程标准为依据，课程标准规定了本门课程和各章节的教学目的、教学内容、教学要求（包括重点、难点）等，体现了本门（节）课在实现整体人才培养目标中的作用。只有以课程标准为依据，才能保证整体培养目标的实现，才不会偏离正确的授课方向。

教学方案整体设计的核心是教学环境、内容、手段、方法、目标的确定。一般教案编制由教学团队分工按照编制流程完成编写，包括教学大纲研读、教学目标确定、学情分析、教材分析或教材编写、教学环境选择、教学内容选择、教学方法选择等。教案必须清晰规划出课堂教学的详细步骤和教学行为，以构建清晰有序的教学程序，确保课堂教学按照既定思路有序推进。

教案的编制要以满足所有学员知识、技能、态度协调发展为落脚点，贯彻以教师为主导、以学员为主体，因材施教，加强教学双方互动，鼓励学员质疑探究。

在教学方式方法的选择上，要与现代教育技术的有机结合等。科学教育与人文教育并举，实现知识、能力与素质协调发展。

## 2.3 教案质量评价

一个科学的教案评价办法，可以充分发挥诊断、导向和激励作用。教案评价要注意几点原则：一是形式与内容并举，二是共性与个性兼顾，三是专家评估、同行评估和学生评估相结合。要充分尊重教师的教学特点，不能以统一的脚本型教案标准要求所有教师，同时把教案纳入教师教学工作量与工作质量的考核，使教师撰写的教案得到应有的社会价值判断，形成教案质量保证的长效机制。

## 3 存在问题及相关建议

一是教案建设的规范度需要加强。部分教案基本要素不齐全，教案结构不一致，编制思路不清晰，一门课程在针对不同层次学员开展教学时使用的是同一个教案，部分新开设课程没有教案。对此建议，高度

重视继续教育教案编写工作，使教师明确教案对于培训教学组织、提升现代教育技术效益、培养教师能力的重要性，保证教师以认真严谨的态度编写教案，确保教案编写的正确性、准确性、科学性。

二是教案质量仍有提高空间。包括严谨科学性不够，基本概念含混不清，概念和定义来自于不同教科书的摘抄，对概念内涵的认识停留在字面上，缺乏深层次理解，逻辑性不强，前后内容出现重复和颠倒，内容安排顺序不合理，举例不恰当等等。例如在预报技术与方法培训中，有很多和“不稳定”相关的概念，条件不稳定、第二类条件不稳定、对流不稳定、位势不稳定等，单独每一个概念，大部分具有专业知识背景的人都能够说清楚，但是综合在一起，这几种不稳定概念之间的差别和关系，在什么样的天气条件下应用，就需要融会贯通。对此建议，把备课方法和教案编写作为师资培训的必修课，纳入气象教育培训师资学习内容，尤其针对教学重点难点划定，不同教学方式方法的内容分配（面授教学或在线教学），教学内容详略安排，如何做到重点突出、难点分散，达到良好的教学效果等，进行重点专项培训。

三是教案的共建共享共用及更新机制尚未建立。编写好一份继续教育教案的前提是要对整个培训班的所有教学内容彻底理解，融会贯通。不能停留在单个知识点的梳理，而要进一步研究整个知识体系。在气象业务更新频繁、大气科学交叉学科发展迅速的今天，一个培训班的设计往往需要不同背景不同研究方向的老师共同合作，集体备课、分头承担教学任务。对此建议，建立教案编写的共建共享机制，教案质量评估、效果反馈及更新机制，加强面授和远程结合的混合式培训的教案编写。

四是对教案的监督考评制度尚未建立。对此建议，培训班开班之前，教学计划需要进行审定，建议教学管理部门把教案纳入气象教育培训教学督导考评体系，监控教案质量，开展优秀教案评比、示范教案汇编、教案质量评估等针对教案的专项或专题教学活动，制定有效的评优激励措施。

### 深入阅读

WMO, 2013. Guidelines for trainers in meteorological, hydrological and climate services. WMO-No.1114.

鲁献蓉, 2004. 从传统教案走向现代教学设计——对新课程理念下的课堂教学设计的思考. 课程、教材、教法, 24(7): 17-23.

南纪稳, 殷春华, 2003. 优秀教案的特征. 教育科学, 19(2): 27-28.

裴亚男, 2007. 学案教学模式研究综述. 内蒙古师范大学学报(教育科学版), 20(4): 66-69.

王益辉, 2011. “导学案”之思与辨. 教育科学论坛, (9): 20-22.

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)

# 气象部门国有企业人才队伍建设问题及对策研究

## ——以华云和华风集团为例

■ 周倩 邢亚争 孙天蕊

对人的管理是现代企业管理的核心，人力资源管理是企业核心竞争力的重要方面。对气象部门国有企业人才队伍进行分析研究，有利于深化气象部门国有企业改革，对于提高企业核心竞争力和人力资本的有效利用具有重要意义。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.020

### 1 气象部门国有企业总体情况

2018年气象部门所属法人企业共1227户，主要经营业务包括专业气象服务、气象仪器设备研发生产销售、防雷、气象信息服务、广告等，从业人员共计12309人。

华云气象科技集团和华风气象传媒集团是中国气象局直属企业，是国有气象服务龙头企业，主要承担气象探测、信息与气象服务、雷电监测及防护、气象广播影视、公共气象服务等业务。本文以华云和华风集团为例，对气象部门国有企业人才队伍建设进行分析研究。

### 2 华云和华风集团人力资源现状及变动情况分析

#### 2.1 华云和华风集团人才队伍现状分析

截至2018年底，华云（本文中华云集团公司数据为华云集团和子公司在京人员信息）和华风集团人才队伍总计1284人，占气象部门国有企业人才队伍总量的10.4%。中共党员占华云和华风集团人才队伍总量的30.0%。40岁及以下人才占82.0%。学历结构上，本科学历人员所占比例为61.1%，硕士占23.9%，博士占1.7%。从职称结构看，两大集团具有各类专业技术职称人员占56.5%。其中，中级职称人员数量最多，占26.2%；高级职称人才仅占9.1%。从专业结构看，信息技术类和经济管理类人才占到了近乎一半，分别占28.1%和17.9%，大气科学类和地球科学类专业明显不足，仅分别9.5%和3.7%。在人才队伍中，社会招聘是国企招聘的绝对方式，占81.5%；其次为毕业生招聘

占18.1%，系统内调入占0.4%。

#### 2.2 近5年华云和华风集团人才队伍变动情况

2014—2018年两集团人才队伍数量基本保持稳定增长，由2014年的1179人增至2018年的1284人，人员数量增长了8.9%。

##### 1) 人才队伍日趋年轻

2014—2018年，人才队伍趋于年轻化，人才队伍始终以40岁以下青年人才为主，近5年占比总和都在82%以上。其中，30岁及以下人员2018年该年龄段人员数量占比比2014年增加了9.4%。

##### 2) 学历层次日益提高

近5年人才学历结构在不断优化，硕士和博士学历人员占比都在增加，且硕士学历人员数量占比增幅明显，2018年硕士学历人才占比比2014年增加了4.2个百分点。近年来，华云和华风集团的招聘计划已经逐渐转向研究生以上，几乎全部为本科以上学历人员。

##### 3) 职称层级显著提升

近年来，气象部门企业越来越重视专业技术人员的评价和开发使用，成效也比较明显。从2014—2018年各层级职称人才占比情况来看，具有各类职称的人员数量占比逐年增加，2018年各类职称人员数量占比比2014年增加10.2个百分点。其中，中高级职称占比增加较明显，尤其是2018年，受国家和中国气象局深化职称制度改革影响，两大集团高级职称占比较以往有较大增幅。

##### 4) 专业技术人才成为中坚力量

近5年，华云和华风集团专业技术人才所占比例

收稿日期：2019年7月29日；修回日期：2020年2月20日

第一作者：周倩（1979—），Email: 58613464@qq.com

通信作者：邢亚争（1987—），Email: 674438723@qq.com

相对稳定(图1)。随着互联网+时代的到来,信息技术类专业人才所占比重始终远高于其他专业。近5年,大气科学类专业人才占比成持续走高趋势。具备较强的专业知识及专业技能的专业技能人才已成为企业发展的中坚力量。

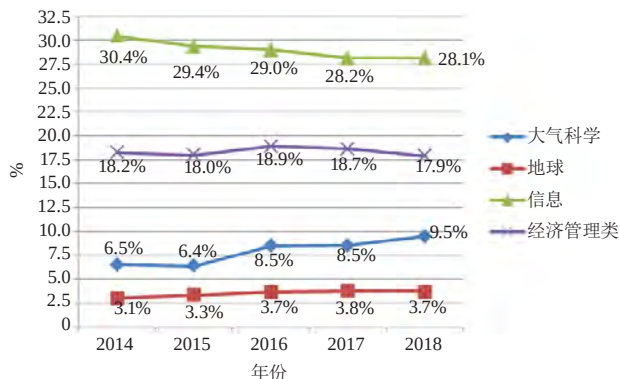


图1 2014—2018年华云和华风集团人才队伍专业结构

## 2.3 华云和华风集团人才流失情况分析

近5年,华云和华风集团人才流失率比较稳定,基本保持在10%。总体上看,流失人员的学历以本科和硕士为主,分别占54.1%和35.1%。2014—2017年,本科学历人才流失率普遍高于硕士学历人才,但2018年硕士学历流失人才占比(54.5%)高于本科生(45.5%)。

2014—2018年,流失人才的平均年龄为32岁(图2),人才流失率基本随着年龄、工作年限、职称的升高而降低,人才流失最多的人员集中在35岁以下,工作5年以下,初级以下职称人员。

电子信息类本科生易在入职初期离职。从专业来看,电子信息类专业流失人才最多,占到总数的3成左右(28.8%)。其次为经济管理类专业(18.9%)。综合学历层次看,电子信息类本科生流失率较高,占到总人数的18%,并且离职时工作年限在5年以下。

工作6~15年的女性员工流失率高于男性。从性别数据统计,流出人才中男性占48.2%,女性占51.8%。结合工作年限看,工作6~10年和11~15年的

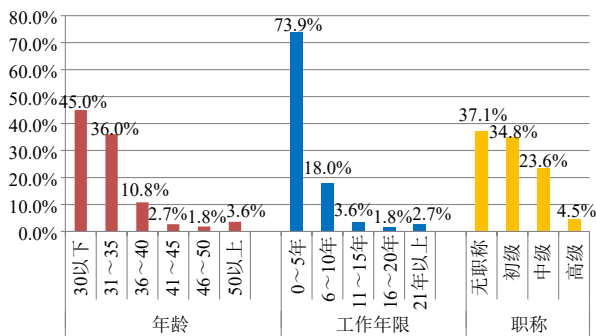


图2 2014—2018年华云和华风集团人才流失人才年龄、工作年限、职称结构

女性流失率远高于男性,这两段男女比例都接近3:7。

## 3 气象部门国有企业人才队伍特征分析

### 3.1 学历层次相对较高

人才队伍中86.7%人员拥有本科及以上学历。近5年人才学历结构仍在不断优化,硕士和博士学历人员占比都在不断增加,高学历人才的增加在未来将进一步促进企业的管理水平和业务发展。

### 3.2 创新意识和可塑性较强

40岁及以下人才数量占人才队伍总数的82.0%,充分说明,青年人才是国有企业发展的主力军。青年人才正处于人生生理机能和心理上的高峰期,思维敏捷,记忆力强,反应快速,充满活力,具有较强的事业心和创新意识。另一方面,青年人思想活跃、精力旺盛、情感丰富、充满热情,具有较强的学习能力,对新事物接受能力强,具有很大的可塑性。

### 3.3 专业性强

气象部门国有企业人才的专业背景主要以电子信息、经济管理、大气科学类专业为主。员工大多毕业于气象类、理工类高校或者一些重点大学的相关专业,都接受过相应专业的高等教育,具备较高专业知识和工作能力。

### 3.4 人才队伍相对稳定

近5年来,气象部门国有企业人才总体数量保持稳步增长。每年人员流动情况也都维持在比较平稳的水平。通过近5年人才变动趋势,可以看到企业基本在成熟发展时期,在控制人员数量和减少人员流失方面采取了有效措施,如进行机构改革,参照事业单位实行“三定方案”,即定职能、定机构、定编制,注重人才评价和人力资源开发等。

### 3.5 缺乏高层次人才

从日常工作及总体情况看,企业越来越重视人才培养工作,职称层次也在稳步提高。但仍有43.5%的人员没有任何职称。具有高级职称的占8.4%,高层次人才数量稀少。从年龄分布看,人才队伍年龄结构梯度不明显,构成大多集中在35岁以下年轻人。人才队伍过于年轻化,容易导致企业在高水平技术人员和高层管理人员方面比较缺少。

### 3.6 缺乏人才招聘规划

数据显示增长的人员以青年人才为主。年轻人有利于塑造和培养,缺点是有些岗位培养需要的时间比较长,短时间很难胜任工作的需要。其次,进入方式以社会招聘和校园招聘为主,缺乏气象部门内人才交流。人才选拔方法也比较单一,一般是按照“笔试+

面试”的方法进行，这种方式很难全面了解人才的综合素质，这就可能导致招收的人员存在理论强、专业操作技术弱和管理能力弱的特点。

#### 4 加强气象部门国有企业人才队伍建设的对策建议

要想吸引高素质人才进入国有企业，必须要对现有人才引进机制进行大胆的创新与改革。应不断完善相关制度，加强气象部门内部人才交流，实现事业和企业自由流动，积极吸引事业单位优秀人才开展关键共性技术、装备和标准研发。瞄准人才增量，从企业内部选拔和培养高级经理人，是当前国有企业解决人才匮乏困境的关键，也是国有企业贯彻职业经理人市场化选聘机制的有效手段。建立气象部门职业经理人制度，基于人才盘点实现职业经理人选聘管理。应进一步加强气象类专业人才的录用比例。

完善人才激励机制，有效提高国企人才工作积极

性。推行“绩效工资与企业效益”联动机制，确保员工收入与企业经营效益相匹配，驱动人才价值创造。要针对企业中青年人较多的特点，建立长效的心理疏导机制。工作上，要善于调动各类人才的积极性，培养勇于创新、敢于担当的精神，对成绩要给予充分的肯定和赞扬，建立健全容错纠错机制，宽容人才在改革创新中的失误错误。

##### 深入阅读

卢妮妮, 2016. 基于人才盘点的国有企业职业经理人选聘管理——以Y集团为例. 中国人力资源开发, (14): 36-43.  
纳凯, 2018. 新时代国有企业人才队伍建设创新策略. 现代国企研究, (7): 72.  
赵曙明, 翟俊生, 覃友茂, 等, 1998. 国有企业人力资源管理战略研究. 管理世界, (3): 196-201.  
王红军, 2013. 国有企业人力资源管理的SWOT分析及战略研究. 人力资源管理, (2): 48-51.

(作者单位: 中国气象局人才交流中心)

(上接86页)

#### 区人才政策

首先，各级气象部门要进一步落实《气象部门事业单位公开招聘应届高校毕业生管理办法》，严格按照要求制定招聘计划及方案，发布招聘公告，严格按照流程进行毕业生招聘工作，树立气象部门“公平、公开、公正”招聘人才的良好形象。

其次，气象部门应适当提高个别区县级气象部门的待遇水平，尤其是艰苦台站，满足毕业生的基本生活保障需求。此外，要推出良好的人才发展政策，用良好的发展环境留住人才。如中西部或偏远地区的气象部门，如加强职业技能培训，让毕业生有明确的五年或十年的职业生涯规划。

4) 统一管理与用人自主权相结合，避免气象部门内部竞争

根据对气象部门各单位的调研，由于各省气象部门招聘时间不一致、各地经济发展水平差异又较大，导致各省级气象部门争抢生源现象严重，加大了各级气象部门的招聘成本，影响招聘工作质量。中国气象局应将全国气象部门招聘工作纳入统一管理，但具体招聘工作由各单位自主进行。如进行全国统一笔试，但由各省自主制定本省分数线；将全国气象部门招聘工作纳入同一招聘平台，各省之间能够互相了解招聘进度及毕业生录用情况，避免内部竞争等。

(作者单位: 中国气象局人才交流中心)

# 气象直属单位青年绩优员工发展特征研究

杜净译 刘蕊 刘艺 孙天蕊

气象直属单位青年绩优人员在人际沟通、团队合作、人际协调和抗压能力四个维度上分数较其他受测人员显著较高，在创新能力维度上显著低于总体受测人员。分析结果可以为确定候选人与岗位匹配度、健全年度考核方式、人才发展及培养等提供指导。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.021

美国哈佛大学David McClelland教授于1973年首次提出“competency（胜任力）”概念，试图据此找出组织中绩效优异者和绩效平平者之间差异的主要特征。

国内外相关研究都证明，无论是公益性活动还是盈利性活动，胜任力对绩效有较高的预测作用，并且不同的胜任力对应不同的绩效成分。使用胜任力模型为基础的人才测评，通过累计数据分析绩优人员的显著特征，可为招聘、选拔、培养、绩优及人才工作调整等一系列实践工作提供参考。同时研究综述的梳理可见，国内的胜任力模型区分绩优者的研究主要集中在管理岗位，而对非领导岗位的研究则较少。

## 1 气象直属单位绩优人员情况分析

绩优人员基本数据来自于气象人力资源数据库，采用在京气象直属单位在编员工中2012—2018年获得年终优秀的员工数据，共892人次（表1），报告所用数据更新的截止时间为2019年4月30日。

由表1可见，气象直属单位绩优人员男女比例较平均。在直属单位绩优人员中，年龄主要分布在36~40岁（238人）占27%，31~35岁（182人）占20%，41~45岁（149人）占17%，和46~50岁（134人）占15%。这说明30~50岁年龄阶段的人，是开创事业、投入职业发展的重要年龄段。硕士研究生及以上学历占到了69%，其中硕士研究生占35%，博士研究生占34%，说明直属单位绩优人员大部分学历层次较高，有充分的知识储备，具有较高的思维、观察和探索能力和更广阔的视野，同时对于事业发展有更高的期望。直属单位绩优人员中具有行政职务的人

表1 气象直属单位2012—2018年绩优人员基本情况

| 特征     | 类别       | 人数  |
|--------|----------|-----|
| 性别     | 男        | 486 |
|        | 女        | 406 |
| 年龄     | 25~30岁   | 38  |
|        | 31~35岁   | 182 |
|        | 36~40岁   | 238 |
|        | 41~45岁   | 149 |
|        | 46~50岁   | 134 |
|        | 51~55岁   | 115 |
|        | 56~60岁   | 36  |
| 学历     | 博士研究生    | 301 |
|        | 硕士研究生    | 314 |
|        | 大学本科     | 243 |
|        | 大专及以下学历  | 34  |
| 行政职务级别 | 司局级      | 9   |
|        | 副司局级     | 27  |
|        | 正处级      | 90  |
|        | 副处级      | 154 |
|        | 正科级      | 140 |
|        | 副科级      | 59  |
| 专业技术级别 | 正研级高级工程师 | 169 |
|        | 高级工程师    | 366 |
|        | 工程师      | 220 |
|        | 助理工程师    | 21  |
| 政治面貌   | 中共党员     | 657 |
|        | 共青团员     | 30  |
|        | 其他民主党派   | 6   |
|        | 群众       | 199 |

共479人（占总绩效人员的53.7%），其中副处级占32%，正科级占29%，正处级占19%。直属单位绩优

收稿日期: 2019年8月7日; 修回日期: 2020年2月23日  
第一作者: 杜净译 (1989—), Email: 675679084@qq.com

人员中具有专业技术人员共779人（占87.3%），其中高级工程师占比最大，达到47%，工程师占28%，正高级工程师占22%。考虑到不同级别技术人员比例，这些数据说明绩优人员专业技术水平较高，工作和技术水平是预测其事业发展的重要因素。此外，在直属单位绩优人员中，中共党员占到73.7%，说明党员在工作和事业发展中起到一定的带头作用。

## 2 气象直属单位青年绩优人员入局胜任力素质测评分析

为探索气象直属单位绩优人员胜任特征及素质维度，使用基于胜任素质理论构建的气象人才胜任力素质测评系统，该测评基于气象人员及组织特点于2011年建立气象单位胜任力测评常模，结合理论分析挑选包括四大系统，共十三个维度指标：执行监控类，包括诚信正直、快速高效、自我激励、责任心、服从规范、严谨细致、积极主动；人际影响类，包括人际协调、沟通能力、团队合作；变革成长，包括抗压能力、创新能力、学习能力。

通过梳理气象人才胜任力测评系统有效数据，获得2012—2018年气象直属单位40岁以下青年绩优人员中有胜任力测评有效数据共57份（人次），其中男性32人，女性25人。31~35岁人数最多32人，占比56%；25~30岁人数19人（占比33.3%），36~40岁7人（占比14.0%）。学历情况以硕士研究生为主（57.5%），其次是博士研究生（27.5%）。政治面貌以中共党员为主（75%）。

其中，对不同性别的胜任力分数进行方差分析（表2），大部分维度（包括诚信正直、创新能力、沟通能力、积极主动、快速高效、团队合作、责任心、自我激励）女性高于男性（ $p<0.05$ ），只有在抗压方面，男性优于女性（ $p<0.05$ ）。

对不同学历的胜任力分数的方差分析发现，在诚信正直、创新能力、积极主动、快速高效、自我激励五个维度，本科显著低于硕士研究生、博士研究生（ $p<0.05$ ），但硕士研究生与博士研究生无显著差异。在服从规范维度上，博士研究生显著低于本科、硕士研究生（ $p<0.05$ ），但硕士研究生与本科无显著差异。在沟通能力、抗压能力、团队合作、严谨细致四个维度上，本科显著低于硕士研究生、博士研究生（ $p<0.05$ ）。在人际协调维度上，硕士研究生显著高于博士研究生（ $p<0.05$ ）。在学习能力上，硕士研究生显著高于本科、博士研究生（ $p<0.05$ ），但本科与博士研究生无显著差异。在责任心维度上，本科显著低于博士研究生（ $p<0.05$ ）。

表2 不同性别和学历的胜任力测评分数

| 维度<br>类别 | 性别（均分） |      | 学历（均分） |      |      |
|----------|--------|------|--------|------|------|
|          | 男      | 女    | 本科     | 硕士   | 博士   |
| 诚信正直     | 5.56   | 5.83 | 5.57   | 5.86 | 5.80 |
| 创新能力     | 4.84   | 4.93 | 4.73   | 5.01 | 4.90 |
| 服从规范     | 5.47   | 5.47 | 5.48   | 5.49 | 5.06 |
| 沟通能力     | 4.79   | 4.92 | 4.67   | 5.02 | 4.90 |
| 积极主动     | 5.51   | 5.68 | 5.47   | 5.72 | 5.73 |
| 抗压能力     | 4.82   | 4.65 | 4.43   | 4.88 | 4.69 |
| 快速高效     | 5.70   | 5.84 | 5.65   | 5.88 | 5.98 |
| 人际协调     | 5.35   | 5.37 | 5.30   | 5.42 | 5.17 |
| 团队合作     | 5.55   | 5.63 | 5.36   | 5.77 | 5.54 |
| 学习能力     | 5.23   | 5.24 | 5.12   | 5.33 | 5.00 |
| 严谨细致     | 6.34   | 6.38 | 6.45   | 6.33 | 6.11 |
| 责任心      | 6.35   | 6.53 | 6.46   | 6.47 | 6.58 |
| 自我激励     | 5.53   | 5.70 | 5.45   | 5.78 | 5.79 |

## 3 小结

本文结果表明，传统的招聘或选拔人才情境下，相对易于被培养的也更被重视的知识和技能很难清晰地被区分测验。对于现代大多数岗位，深层次的胜任特质在预测个体工作绩效方面比技能知识要显著的多，这也是最难直接培养的。从气象直属单位绩优人员的测评结果可以看到，绩优人员较好的人际交往和团队合作能力让其在组织中获得更好的评价，较强的抗压能力让其在组织工作中能更好的应对与处理。胜任力模型的内涵除了含有岗位要求，还含有组织文化和组织特征的因素。这提示我们在招聘选拔人才时，可通过测评报告关注个体的沟通影响、团队合作和抗压能力等素质，从中择优，不但可以拓展提高人才评估和选择方式，也可快速识别人职匹配度。

随着事业发展要求和人才结构的动态调整，能力标准也需要有效地反映组织发展变化的要求。针对绩优测评数据比总体人员在个别维度分数上反而更低的情况，可以考虑下一步探索绩优人员与绩差人员的测评数据对比分析，可以识别能力要求变化的同时，校正正常模来不断贴合组织新的发展情况和需求。

### 深入阅读

- 谷向东, 郑日昌, 2004. 基于胜任特征的人才测评. 心理与行为研究, 2(4): 634-639.
- 金杨华, 陈卫旗, 王重鸣, 2004. 管理胜任特征与工作绩效关系研究. 心理科学, 27(6): 1349-1351.
- 唐磊, 潘东紫, 于鹏, 2018. 员工能力剖象与人才评价技术创新. 人力资源管理, (2): 50-51.
- 文卡, 2016. 关于事业单位年度考核工作的思考. 商业经济, 2016, (4): 50-51.
- 仲理峰, 时勘, 2003. 胜任特征研究的新进展. 南开管理评论, 2003, (2): 4-8.

（作者单位：中国气象局人才交流中心）

# 新时代气象科普工作的定位与可持续发展路径研究

■ 康雯瑛 赵洪升 温晶 李陶陶

气象科普工作是气象事业的重要组成部分，是气象科技创新发展的一翼，是公共气象服务的有效拓展和延伸。气象科普在释放气象服务效益中具有先导性作用。实践证明，没有强有力的宣传科普工作，就没有高质量的气象服务。2018年全国气象科学知识普及率达到77.76%。面对新形势新需求，气象科普工作应继续发展气象科普业务，进一步提升气象科普能力，完善气象科普保障体系建设。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.022

信息技术的发展与传播环境的变化对气象科普工作提出了新要求。新时期信息传播速度实时性强，传播方式跨时空、大容量、开放交互、自由移动，传播主体走向多元、匿名和虚拟，传播行为个性化特点突出，网络舆论场异常复杂。这一全新的传播环境要求我们的传播思维必须改堵为疏、变封闭为开放、变灌输传达为沟通交流；要求我们在传播工作中主动性更强、反应更敏捷、应对更灵活；要求我们加强对受众的研判，真正做到渠道细分、分众传播；要求我们全面掌握多媒体技术并能够熟练应用各类新兴传播平台。

## 1 气象科普工作创新发展面临的挑战

对气象科普工作的认识亟待深化。通过媒体传播气象预报和灾害性天气警报等气象服务信息以及相关科技知识，是气象工作中极其重要的组成部分。目前对气象宣传科普工作的认识存在站位不高、内涵单一、外延狭窄的问题。

气象科普服务大局的能力亟待提升。气象科普的内容从预报预警信息和气象科技知识转变为服务经济社会发展和民生保障的各类气象信息；气象科普手段从单一利用传统媒体灌输转变为利用现代信息技术立体传播；气象科普范围从单纯面向国内转变为国内国际传播并举。目前气象科普作品产品原创能力较弱，适合多媒体、多频次、广范围投放的融媒体产品不多，可以引起广泛社会影响的精品更少。气象科普工作的现代化水平滞后于社会媒体和知名自媒体，支撑融合发展的基础设施和硬件设备薄弱。

气象科普工作管理运行机制亟待完善。新时代气象科普工作呼唤优化管理体制，从以传统媒体为中心转向传统媒体与新媒体齐头并进；呼唤创新运行机制，强化互联网思维和移动优先、一体发展的理念；呼唤再造内容生产流程，建立适应融合传播的业务平台和流程。

气象科普发展保障亟待增加。改进创新气象科普工作任务艰巨，提升全民气象科学素质任务艰巨。但是，气象科普政策体系不健全、支持力度不够，成为新时代气象科普工作发展的瓶颈。既懂政策又懂气象和传播的复合型人才严重不足，且缺少长效培训、考评、激励、晋升机制，工作动力和创新活力不够。

## 2 新时代气象科普工作科学定位、策略和路径

### 2.1 气象科普工作的科学定位

气象科普工作是气象科技创新发展的一翼。一方面，在建设气象现代化强国新征程中，需要社会各界人们学习和了解气象知识，了解气象科技发展水平，同时提高科学素养、提高防范意识和防灾减灾能力。另一方面，21世纪科学发展本身的复杂性和交叉融合以及气象服务领域的拓展给气象工作带来极大挑战，要更加重视对气象科技的投入和对气象科技的深层开发，实现气象科学的观念层面与物质层面的双向互动。气象科普在释放气象服务效益中发挥先导性作用。实践证明，没有强有力的宣传科普工作，就没有高质量的气象服务。

收稿日期：2019年10月23日；修回日期：2020年1月31日  
第一作者：康雯瑛（1962—），Email: 497888497@qq.com

## 2.2 气象科普工作的有效策略和路径

气象部门贯彻落实国家科普事业总体规划，认真组织实施《气象科普发展规划（2013—2016年）》，取得了显著成绩，全国气象科学知识普及率稳步提升，2018年达到77.76%。根据以往成功经验，推进气象科普业务化、社会化、品牌化，是推动新时代气象科普工作再上新台阶的有效策略和路径。

推进气象科普业务化，是指加强科普业务，跟踪每日天气预报，针对灾害性天气预报推送科普产品。建立国家级、省级气象科普业务机构，建设科普业务系统。加强气象科普基础设施建设，气象科普场馆日常向公众开放。不断壮大气象科普队伍，形成由专业兼职人员组成的、包括专家和志愿者在内的气象科普人才队伍。定期举办全国气象科普作品观摩交流活动和全国气象科普业务培训班。

推进气象科普社会化，是指将气象科普纳入全民科学素质行动计划纲要，融入国家科普发展体系。要发动社会团体和企业积极参与气象科普工作，不断丰富气象科普传播形式，形成传统媒体与新媒体、气象部门媒体与社会媒体相互融合的立体传播局面。要不断扩大气象科普的社会覆盖面，面向未成年人，借助气象夏令营、气象防灾减灾科普示范学校等载体，提升科普的科学性、互动性、趣味性。要面向农业农村，向新型农业经营主体和县（区、市）提供点对点、直通式气象科普宣传。

推进气象科普品牌化，是指精心组织策划世界气象日、气象科技活动周等全国性重大气象科普活动，形成品牌效应；打造“流动气象科普万里行”“绿镜头·发现中国”“应对气候变化·记录中国”“气象防灾减灾志愿者中国行”和“全国青少年气象夏令营”等一批气象科普品牌活动；推出一系列品牌气象科普作品；培养一批有社会影响力的气象科普专家。

## 3 新时代气象科普工作的保障

提高对气象科普工作重要性的认识。加强对气象科普工作的组织领导，把气象科学普及放在与气象科

技创新同等重要的位置。形成规划协调、政策引导、监测评估和奖励激励等完整的科普工作链条。建立工作协调机制，加强对科普工作的谋划和统筹，充分发挥各类科普主体的作用，密切配合，形成合力，将各项任务目标落在实处，推进气象科普事业科学发展。

加强激励鼓励。建立气象科技成果科普转化和评价机制，将气象科技成果的普及列入科研、业务项目成果验收；在科技人员职称评定和晋升等环节设立科普考核要素。建立气象科普激励机制，将气象科普纳入各级气象工作的奖励表彰范围，组织优秀气象科普作品、产品、活动评选、宣传和推广活动，激励气象科研业务和科普工作者做出突出贡献。

完善经费保障。争取将气象科普业务经费列入同级财政预算，国家、省、市、县四级共同分担气象科普财政投入，实现科普业务经费稳定投入。在气象工程建设项目、科研业务项目、专项任务中安排一定比例经费用于气象科普。拓展气象科普社会资金来源渠道。加强气象科普经费使用的绩效考评，确保专款专用和使用效益。

强化基础研究。跟踪国内外气象科普发展动态，加强气象科普工作的理论研究，重点开展气象科普体系建设的理论和实践研究、气象科普发展趋势研究、气象科普需求和科普舆情分析研究。开展公众气象科学素质水平定期调查，加强对气象科学知识普及率等评价指数的研究，建立以公众认知度、关注度和满意度为核心的气象科普绩效评价标准。加强气象科普主体的科普过程与效果的评估评价研究。加强科普作品创作方法、技巧以及信息化条件下科普融合创作的研究。

### 深入阅读

刘波, 康雯瑛, 任珂, 等, 2018. 气象科普工作的现在和未来思考. 北京: 气象出版社.

(作者单位: 康雯瑛, 李陶陶, 中国气象局气象宣传与科普中心; 赵洪升, 河南省气象学会; 温晶, 广东省气象学会)

# 气象部门政府购买人才服务需求探讨

■ 刘琛钊 王小超 王红侠

随着国家一系列关于人才社会化管理文件的出台,政府购买人才服务的条件日臻成熟,但是气象部门政府购买人才服务还处于起步阶段,对气象部门人才服务政府购买需求研究就显得十分必要。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.023

20世纪末,通过借鉴国外政府购买公共服务的相关研究及实践,我国部分地方推出了有力举措,以试点的方式开展了不同范围和类型的政府购买公共服务尝试。经过近些年的实践探索,政府购买公共服务已经有了一定的规模和成效。其中,人力资源服务购买(外包)成为了减轻政府负担,提高服务质量的有效方式。

## 1 概念阐述

目前学术界关于政府将其公共服务进行市场发包有两种表述方式,“公共服务外包”多见于学术期刊出版物,属于学术型概念;而“政府购买服务”则多见于报纸类出版物,属于实践型概念。本文主要采用其实践型概念,按照《政府购买服务管理办法》(财综〔2014〕96号)所阐明概念:政府购买服务,是指通过发挥市场机制作用,把政府直接提供的一部分公共服务事项以及政府履职所需服务事项,按照一定的方式和程序,交由具备条件的社会力量和事业单位承担,并由政府根据合同约定向其支付费用。

要明晰人才服务的概念,首先要把握什么是“人才”。《国家中长期人才发展规划纲要(2010—2020年)》指出人才是具有一定的专业知识或专门技能,能够进行创造性劳动并对社会做出贡献的人,是人力资源中能力和素质较高的劳动者。政府购买人才服务即是政府人事组织部门和其他相关机构,为更好履行人才工作职责,使用财政性资金,向各种社会力量购买专门性人才服务,并按程序实施监督管理的行为。而这里的人才服务相比较于广义上的人力资源服务从服务对象、服务方式上都有着一定程度的差别。

## 2 气象部门人事管理现状

中国气象局是中华人民共和国国务院直属事业单

位,主要承担全国气象工作的政府行政管理职能,是具有一定科技性、基础性的公益事业单位。气象部门区别于一般政府部门,除去有参照公务员法管理的行政管理人员以外,同时也存在大量专业技术人员,并且由于部门为中央垂直管理体制,多种不同类型、层次、身份的人员也给管理带来了很大难度。

### 1) 管理力量薄弱

全国气象部门约有70000人(含编制外),人事管理岗位人员(含兼职)约为1000人左右,服务比例约为70:1。由于编制限制、岗位特质,人事管理岗位人员发展是存在“双天花板”的。其一,目前气象部门从事人力资源管理的工作人员中真正有着人力资源管理专业背景的人大约只占6%,绝大多数现岗位为人事管理的人都是“半路出家”,可以说是缺乏系统的知识储备,只能靠实践摸索获得岗位知识。其二,39%以上的人事管理人员任职年限为10年以上,这体现了人事管理岗位人员流动性较差,缺乏多元的发展、上升渠道。

### 2) 事务性工作繁重

经过调研发现,目前人事部门工作压力系数较高,绝大多数人事管理人员认为目前其单位从事人事管理工作的人员数量不能够满足工作需求,人事部门整体处于高负荷运转状态。而九成以上的受访者认为目前工作压力主要来源于事务性工作。在基层的气象人事部门除了要承担人力资源管理职责外,有部分单位还需要负责老干部工作及党务工作,工作内容比较繁杂。

### 3) 管理角色及定位逐步转变

随着事业单位改革的逐步推进,气象部门人事管理工作的政策性、专业化要求不断提高,工作容错率也极低。气象人事部门的行政管理职能正在与时俱进

收稿日期: 2019年7月24日; 修回日期: 2020年3月15日  
第一作者: 刘琛钊(1986—), Email: 1748111725@qq.com

地向战略相关的规划管理职能转变，人事部门需要更加重视人才的整体规划和动态发展。面对各种不断更新的管理理念、管理思想对于人事部门来说，发现并利用新的人力资源管理方法，建立多元化的人才管理模式已经成为顺应现代管理潮流的必然选择。

### 3 气象部门政府购买人才服务需求分析

#### 3.1 需求概述

根据价值和独特性，学者马贵舫将人力资源管理外包分为“四类”：一是核心类，包括像“组织文化建设”这种具有高价值、战略性核心竞争力的人力资源管理业务；二是独特类，包括像解决员工之间冲突和抱怨、激励员工等的能满足组织的独特需要但不能直接创造价值的管理职能或活动；三是外围类，包括像工资发放、福利管理、退休金等由外部市场化的专业组织予以提供的管理业务；四是传统类，包括运用信息技术、人力资源软件和数据库等技术可以替代人力资源管理业务。

基于气象部门实际情况及人事管理中的问题分析，笔者认为通过政府购买提升气象人才工作效能有两种途径，一是非核心管理职能外包；二是人力资源管理信息技术外包。通过以上两种途径实现人事管理岗位人员精力集中在气象人才发展的核心竞争力提升上，帮助人事部门从功能性辅助性部门向战略部门转变。

#### 3.2 政府购买人才服务——以人才引进为例

##### 1) 毕业生招聘服务

每到毕业季，大量的毕业生涌入就业市场。气象部门作为一个专业性比较强，用人数量不大的行业来讲，有着较为特殊的需求。全国气象部门平均每年大约需完成2000~2500人的招聘计划任务，细化到地市级用人单位的招聘数量基本只有个位数。气象部门为垂直管理单位，招聘工作均由各省或者各地市自行组织招聘工作，但是由于招聘工作的特点及气象专业的特殊性，用人单位每年需要耗费大量的时间成本和经济成本去完成招聘工作，招聘到的人才还可能会因为各种问题产生流失，导致招聘效率低下。而对于“供方”来讲，由于“需方”缺乏更有效的宣传平台，供需双方的信息不对称也一定程度上影响了招聘工作的质量。

结合近年来部门内出台的一系列规范招聘工作有关文件精神，及对目前气象部门招聘工作的研判，笔者认为，在未来的气象部门人才招聘工作中，招聘方

将逐步进行角色转换，由具体操作的角色转向方向把控的角色。专业的人才服务机构可以从信息推送、政策宣传、宣讲会组织甚至是毕业生招聘全流程来介入毕业生招聘工作。政府购买人才招聘服务无论是从规范化管理上还是提升招聘效率上都是一个良好的解决方案。

##### 2) 高层次人才引进

地方政府在高层次人才引进上做出了很多尝试。2019年，北京市出台了《关于进一步发挥猎头机构引才融智作用 建设专业化和国际化人力资源市场的若干措施（试行）》。文件明确，要引导猎头机构为北京市政府机关、事业单位、企业和社会组织等各类用人单位提供精准服务，给予精准化引才奖励；政府机关、事业单位可将支付的猎头服务费列入财政预算；帮助北京市招纳这些紧缺人才的猎头们也将获得各种政策优待。气象部门的高端人才引进，可以参照已有的操作案例，实现人才精准选择，拓展视野，实现急、紧缺人才的有效补充。

### 4 小结

1) 建设完善的配套政策。出台能够明确规范购买流程、购买范围的相应规定，建立监督评估机制，针对可能出现的利益纠纷，明确责任界定，建立完善合作终止及解决纠纷的相关制度，确保政府购买能够有序进行。

2) 理顺资金渠道。政府购买服务所需资金，应当在既有财政预算中统筹安排。购买主体应当在现有财政资金安排的基础上，按规定逐步增加政府购买服务资金比例。对预算已安排资金且明确通过购买方式提供的服务项目，按相关规定执行；对预算已安排资金但尚未明确通过购买方式提供的服务项目，可以根据实际情况转为通过政府购买服务方式实施。

3) 做好风险防控。人才服务外包过程中不可避免会涉及到一些属于部门内的机密信息。如果这些机密信息被外包机构泄露将导致巨大的损失。因此，在挑选外包单位时需充分考察其资质，并签订保密协议，明确责任，同时加强监管。

#### 深入阅读

马贵舫, 2009. 试论政府人力资源管理外包. 人才开发, (8): 38-39.  
米新霞, 2018. 事业单位人力资源管理外包探析策略. 现代经济信息, (9): 98.  
杨燕东, 2009. 我国政府人力资源管理外包模式的构建. 东营: 中国石油大学硕士学位论文.

(作者单位: 中国气象局人才交流中心)

# 近代外国人历险记中的新疆天气

——以《帕米尔历险记》为例

■ 李冬梅

《帕米尔历险记》中共有气象记录399条，其中雨雪记录179条，大风记录64条、晴天、阴天记录27条，冷暖记录83条，其余还有物候记录等。从今天气象学专业的角度来看，该书对天气、气候的描述，以及采用的观测方法等已非常专业。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.024

19世纪，新疆还不被外界所认知，也因此吸引着不断前来探险的外国人，他们通过历险记等形式不仅揭开了新疆较为神秘的社会人文地理历史一角，还记录了新疆天气气候的特殊性、复杂性，留下的这些第一手气象资料不仅有利于了解和研究新疆近代天气气候的历史状况，而且成为后人了解新疆近代天气气候变化的一个窗口。《帕米尔历险记》正是其中的一部。

## 1 近代外国人在新疆探险情况概述

19世纪下半叶和20世纪上半叶，特别是20世纪前一二十年，是外国人在亚洲，特别是新疆探险的高峰期。根据田卫疆编著的《近代新疆探险百年》叙述，俄国地理学家彼·彼·谢苗诺夫早在1856—1857年就到新疆考察探险，并著有《天山游记》。之后的1858年，又有俄国军官乔坎·瓦里汉诺夫上尉前往喀什噶尔等地考察，写成《中国南路（小布哈拉）六城状况》一书。1858—1859年，俄国军官哥鲁别夫上尉、伊凡梯也夫等分别带队来新疆考察探险测量，绘制地图。1876—1885年，俄国探险家普尔热瓦尔斯基三次率队到新疆探险考察，其对罗布泊的考察与新的发现轰动一时。英国人扬哈斯本1890年穿越帕米尔高原探险前曾经与瑞典探险家斯文赫定在喀什相会。1893年法国探险家杜特雷依也曾经率队到南疆探险。最有名的“中亚探险巨人”瑞典探险家斯文赫定自1890年始，先后4次来新疆探险，特别是1893—1897年对新疆的第二次探险经历之艰险、成果之丰富奠定了他在中亚探险史上的历史地位，此次探险，“气象观测和水文调查”赫然在列。1892年，英国旅行家利特代尔夫妇

携手到新疆的南疆进行了考察探险。与斯文赫定齐名的英国考古探险家奥里尔·斯坦因（出身匈牙利）则于1900年开启了他的新疆考古探险之旅，1902—1914年，日本的大谷光瑞、橘瑞超，德国的格伦威德尔、勒柯克，美国的汉丁顿，法国的伯希和，俄国的默茨巴赫、奥登堡等也分别率队来新疆考古探险。

## 2 外国人历险记中有关气象的记载

据不完全统计，19世纪中叶到20世纪30年代，外国人深入中国新疆等地探险、考察共约55人次，其中俄国25人次、英国11人次、德国8人次、法国5人次、日本3人次、其他国家3人次。在新疆境内，外国人有10余次做过与气象有关的一些考察活动（表1），中外合作有2次做过与气象有关的一些考察活动（表2）。

## 3 关于《帕米尔历险记》的有关说明

《帕米尔历险记》的作者系弗朗西斯·爱德华·扬哈斯本，汉名荣赫鹏。英国军人、探险家、作家，生于印度。青年时代先后就学于克利夫顿学院和桑赫斯特皇家军事学院。爱好探险、旅游，喜读宗教、哲学著作。1882年加入第一龙骑兵近卫队。1886年受英印政府派遣，作为使节团成员赴中国，并开始军事冒险生涯。翌年从北京经新疆抵达克什米尔。

《帕米尔历险记》写的就是他从1884—1894年的3次探险之旅，他是第一个穿越中亚戈壁沙漠的欧洲人，也是第一位眺望喀喇昆仑山北坡的欧洲人。这本书就是他一生中最辉煌的探险旅行时代的记录，也是他许多著作中最好的一部。

1903年扬哈斯本奉命随英国麦克唐纳少将入侵我

收稿日期：2018年12月28日；修回日期：2019年7月10日  
作者：李冬梅（1975—），Email: maylee9019@163.com

表1 外国人在新疆探险考察中的气象活动一览表

| 时间         | 国别  | 探险家             | 气象活动                                                                                                                                                                                 |
|------------|-----|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1868年      | 俄国  | 布尼亚可夫斯基、莱因特尔    | 曾到天山进行气象观测；并到喀什噶尔（喀什），测定该地海拔高度为1224.4 m                                                                                                                                              |
| 1877—1885  | 俄国  | 普尔热瓦尔斯基（3次来疆考察） | 1877年从伊宁深入到亚洲腹地，在1200俄里的旅途用天文方法测定了7个点的经度和纬度；每到一处用气压表测量海拔高度，每天进行4次气象观测                                                                                                                |
|            |     |                 | 1879年1月20日带了帕罗特气压表和6支温度表，由彼得堡出发，于4月24日到达布尔津河，记录沿途天气，包括每天4次气温观测、天气现象观测，以及“海市蜃楼”等景观观测。                                                                                                 |
|            |     |                 | 1885年，到达罗布泊、喀喇库干、尼亚绿洲、亚苏勒棍、克里雅等地，在上述各地一直用气压表等测量海拔高度和气象观测                                                                                                                             |
| 1893年      | 俄国  | 罗波洛夫斯基、科兹洛夫     | 到库车、焉耆、吐鲁番盆地以及和鄯善交界处的鲁克沁。在鲁克沁设置气象站（1893年12月—1895年10月）进行定时气象观测，然后编为两队，分别到罗布泊、哈密、乌鲁木齐、玛纳斯等地收集气象资料                                                                                      |
| 1897年      | 俄国  | 克莱门茨            | 考察吐鲁番及附近遗址，测量了阿勒泰和西部戈壁地区并观测气象                                                                                                                                                        |
| 1887—1890  | 英国  | 弗朗西斯·爱德华·扬哈斯本   | 1887、1889、1890年3次到达新疆，著《帕米尔探险记》                                                                                                                                                      |
| 1900—1931  | 英国  | 斯坦因             | 1900—1901、1906—1908、1913—1916和1930—1931年先后4次来疆探险。1906年12月22日，在楼兰测得气温为-45°F（-7.2℃）；1907年秋，取道安西前往哈密，在经过北山戈壁时，记述了北山中上部气候的严酷，冬、春两季东北暴风和夏天燥热及风沙。著《中国新疆考古：地理探险旅行初步报告》《沙埋和阆虞墟记一个人笔记》《古代和阆》。 |
| 1901年      | 日本  | 山上万次郎           | 著有《新撰大地志》，其中第7卷第3册第4节涉及到新疆气候                                                                                                                                                         |
| 1902—1914年 | 日本  | 大谷光瑞及其探险队       | 3次到达新疆，著作《丝绸之路探险记》详尽介绍了新疆东部、南部的天气及气候特点                                                                                                                                               |
| 1903—1905年 | 美国  | 汉丁顿（地理、气候学家）    | 南疆塔里木、楼兰考察，其关于塔克拉玛干沙漠和河流与气候的关系的论点在学术界颇具代表性                                                                                                                                           |
| 1906年      | 奥地利 | 楚格迈尔（动物学家）      | 4月12日从慕尼黑出发，经俄国到喀什噶尔，4月28日到和田，6月5日前往克孜勒山口进行气象观测和天气记录                                                                                                                                 |

表2 中外合作在新疆探险考察中的气象活动一览表

| 时间              | 考察团名称     | 考察团情况                           | 气象活动                                                                                                                                              |
|-----------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1927年5月—1931年2月 | 中瑞西北科学考察团 | 斯文赫定、徐炳昶任团长，共27名团员，中方10人、瑞方17人。 | 建立了10个长期或短期气象测候所，分别是：迪化、库车、若羌、吐鲁番、和田、博格达山、屈莽山、福寿山（天池）、库车喀拉古尔、鄯善七格腾木山等。形成了与气象有关的文献，包括《徐旭生西游日记》，斯文赫定的《长征记》等。另外，赫德博士发表了两卷《中瑞西北气象考察报告》，未能查找到原版文献及中文文献 |
| 1931—1932年      | 中法学术考察团   | 法国学术界代表卜安和中国学术团体协会代表褚民谊、李煜瀛等    | 考察计划有地理学、考古学、测量学（包括气象观测等），担任气象观测的是海军上校彼甘。新疆境内自喀什经阿克苏、库车、迪化到哈密                                                                                     |

国西藏。1904年8月初进拉萨，驱走第十三世达赖喇嘛。同年9月强迫西藏地方政府签订《藏印条约》。后获爵士称号。1905年在剑桥大学执教。1906—1909年任克什米尔驻扎官。1919—1922年任伦敦皇家地理学会会长。

#### 4 《帕米尔历险记》中的气象资料

《帕米尔历险记》中共有气象记录399条，其中雨雪记录179条，大风记录64条、晴天、阴天记录27条，冷暖记录83条，其余还有物候记录等（表3）。

从今天气象专业的角度来看，该书对天气、气候的描述，以及采用的观测方法等已非常专业。

书中涉及到的气温普遍包括最高与最低，例如：

“1887年7月8日的夜间阴天，小雨，最高气温32.1℃，最低气温18.8℃。”

“7月10日晚上10：30分天阴了，周围的小山上出现了雷雨天气。根据温度计测量的结果，当日最高气温是30℃，最低气温是20℃。”

对新疆变化莫测的天气描述生动简洁，如：关于

表3 《帕米尔历险记》气象记录一览表

| 章节 | 气温 | 风  | 雨、雪 | 沙尘 | 晴、阴 | 冷、暖、凉、热 | 小计  |
|----|----|----|-----|----|-----|---------|-----|
| 一  | 0  | 0  | 5   | 0  | 0   | 4       | 9   |
| 二  | 2  | 1  | 4   | 0  | 0   | 4       | 11  |
| 三  | 4  | 2  | 4   | 0  | 1   | 7       | 18  |
| 四  | 2  | 8  | 1   | 0  | 1   | 2       | 14  |
| 五  | 3  | 3  | 12  | 0  | 8   | 18      | 44  |
| 六  | 4  | 3  | 16  | 0  | 11  | 18      | 52  |
| 七  | 1  | 2  | 1   | 0  | 0   | 2       | 6   |
| 八  | 0  | 5  | 14  | 0  | 0   | 4       | 23  |
| 九  | 1  | 2  | 7   | 0  | 0   | 2       | 12  |
| 十  | 4  | 11 | 56  | 0  | 1   | 2       | 74  |
| 十一 | 0  | 3  | 5   | 2  | 0   | 2       | 12  |
| 十二 | 8  | 6  | 9   | 0  | 1   | 0       | 24  |
| 十三 | 4  | 4  | 6   | 0  | 0   | 4       | 18  |
| 十四 | 0  | 0  | 4   | 0  | 0   | 0       | 4   |
| 十五 | 2  | 13 | 21  | 5  | 2   | 7       | 50  |
| 十六 | 4  | 1  | 12  | 0  | 2   | 6       | 25  |
| 十七 | 0  | 0  | 2   | 0  | 0   | 1       | 3   |
| 十八 | 0  | 0  | 0   | 0  | 0   | 0       | 0   |
| 十九 | 0  | 0  | 0   | 0  | 0   | 0       | 0   |
| 合计 | 39 | 64 | 179 | 7  | 27  | 83      | 399 |

阿尔泰山区:

“1887年6月16日偏西风突然转变成猛烈的阵风,晴天一时转阴,下起了雪。”

对新疆高原独特的天气气候特点,也有非常详实的记载:

“高原的气候跟想象中的一样恶劣。8月里,只不过是夏末秋初的时节,帐篷里的金属器皿就已开始结冰了。9月下旬,已记录到 $-17.7^{\circ}\text{C}$ 的气温了。10月底更记录了 $-27.7^{\circ}\text{C}$ 的温度。曾有欧洲的旅行者11月份在帐篷里观察到 $-20.5^{\circ}\text{C}$ 的低温。大风天气实在太多,难以忍受的寒流让人情绪低落,恶劣的气候加重了因高原反应产生的乏力和沮丧的心情。于是寒流、大风和高原反应的共同作用导致帕米尔高原的旅行生活完全没有了以往的快乐气息。”

夏末秋初,他曾在超过海拔4500 m的帕米尔高原待了一个半月的时间,对天气特点的概括令人身临其境:

“还是8月末,夜间就有霜冻出现,到了早晨脸盆里结了一层薄冰,到了9月末的时候,气温都到了 $-17^{\circ}\text{C}$ 以下。夏季还是绿油油的牧草地,转眼就变得枯黄了。山上、山谷,冬季的寒流无处不在,周围一片荒凉,放眼望去什么都没有。”

从他的记录中,可以了解到帕米尔高原南北两侧的天气差距:

“10月下旬,越过最后一道山口,即海拔3420米的托拉古巴尔(Tolagubar)山口,山口上雪也很深,清晨的天气异常冰冷,但随着向克什米尔山谷的一步靠近,大气中的温度也节节上升。帕米尔高原凛冽的寒风、巴吉尔山口可怕的冻伤全都一去不复返了。毛皮外套也用不着了,靠近山谷时连西装上衣都脱去了。”

对沙尘天气的描述也很细致。1891年7月22日,探险家离开喀什噶尔,有一段这样的描述:

“新疆是旅游者的乐园,但却不是一个值得长期居住的好地方。天空总是那么暗淡、沉闷,呆上两三天就会感到很不舒服。天上没有一丝云彩,但是当过了一天又一天,晴朗的天空消失的时候,就会感到憋气。从大漠中吹来的微细沙砾总是漂浮在空气中,新疆永远地被沙尘困扰。这种沙尘飘落在山前山后,堆起了一层松松的浮土,影响着当地居民的生活环境。”

对于某一地气候特点的记录,文字不多却很到位:

“在喀什的夏季,平原的酷热已经达到相当的程度,每天都能记录到 $38.8^{\circ}\text{C}$ 、 $38.9^{\circ}\text{C}$ 的高温。”

对下雪等天气现象的记录,显得非常生动,有身临其境的感觉。在1989年:

“8月8日,穿过德普桑(Depsen)平原时,突然风雪来临,温度直线下降,尽管是盛夏,到了夜间甚至出现了霜冻。”“9月14日登上了山谷左岸连绵的群山,由于下雪了,所期望的眺望被乌云遮挡而未能实现。这种云就像是柔软的绵羊毛,薄得很难抓住,是由细微的粉雪形成的。变化在不知不觉中发生了,先是山顶渐渐地隐没在云雾中,虽然眼前的山顶轮廓仍然可见,但也没有坚持多长时间就从视野中消失了,连轮廓也无法分辨,终于全部融入了周围灰暗的大气中。云的一部分环绕在山顶附近,飘着轻轻雪花,雪越来越大,最后,山脉也完全消失了。”

跟气候关联最为密切的物候现象,也有多处记载:

“1891年8月5日前后,喀什这个季节雨水较多,牧草生长旺盛。两年前经过这里时,受11月份霜的影响大部分植物都枯死了,满眼望去是干透了的土地,而现在却由于披上了一身绿装而充满活力。”

1892—1893年冬天:

“在这最初的一两个月确实过得没有意思。我住在既没有窗户又没有烟筒的当地人的土房子里,仅仅在房顶上留了一个洞,阳光、有时是雪和寒流从那里进入,而房子中央火堆的烟包括热气从那里排出。户外几乎干不成任何事情,只能是今天朝山谷上方走走,明天到山谷下方转转,几周时间都是固定不变的单调生活。但是春季一来,所有的景色都为之一变。一月和二月三天两头地下雪,夜间的温度降到了 $-11^{\circ}\text{C} \sim -18^{\circ}\text{C}$ ,可一到三月,山谷底部和山脚附近的雪融化光了,小草长出了嫩嫩的新芽,农田里的小麦开始返青,河岸边紫色的小樱草和黄色、红色的郁金香竞相争艳。又过了一段时间,当柳树开始长出嫩叶时,林子里又增添了绿色。到了4月初,杏树似乎一夜之间开满了杏花,像白云一样布满了山谷。不久阳光一天比一天暖和,所有的树干都长满了绿叶,郁郁葱葱的榆树、白杨、垂柳、杏树、桃树、梨树和苹果树更胜似硕果累累的果树园。到处弥漫着春天的气息,处处绽放着美丽的花朵,山谷中一派生机勃勃的景象。”

“到达了热闹的卡尔葛里库(Kargreeku)小镇,那天正好是集市日,农民们为了出售农产品和购买一周的生活必需品,纷纷从四面八方涌向这里,道路上人山人海。我在此之前一直没有介绍过集市的情况,

(下转133页)

# 飞沫传播与社交距离

■ 贾朋群 孙梦晗

美国哈佛大学一个疾病研究小组最新在《科学》上发表的研究结果提示我们，由于全球确诊新冠肺炎病例已经到了百万量级，新冠病毒的彻底根除几乎很难实现。因此，为避免新冠病毒的卷土重来，在全球范围内实施间歇性的“保持社交距离”的社会疏远类措施，要直至2022年。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.025

新冠肺炎疫情在全球的蔓延，让人们逐步认识到了社交距离在预防传染病传播中的作用。有研究指出，中国采取疫情控制措施后，新冠肺炎从1人传染3.8人下降至0.32人。这些措施中，包括了保持社交距离，能有效切断潜在的传染链的原理。

那么，什么是社交距离？美国疾病控制中心（CDC）的定义为：社交距离（也称为“物理距离”）是指让自己和他人之间保持距离。要保持社交距离或物理距离，应该做到：1）至少与他人保持6英尺（2米）的距离；2）勿扎堆聚集；3）远离人多的地方，避免大规模聚会。CDC认为，当新冠病毒在居住区域传播时，人人都应限制在室内和室外空间与家庭以外人员的密切接触，这时，社交距离对于那些患病风险更高的群体而言尤为重要。

那么，2米的社交距离的依据是什么呢？或者说“6英尺”的社交距离为什么就能有效防止传染呢？《BBC科学聚焦》杂志分析了人类咳嗽喷出的飞沫，类似于大气中的气溶胶的传播，解释了人类咳嗽行为使得病菌能扩散多远，得到了与社交距离基本一致的结果（图1）。

从生理角度看，人类咳嗽是在位于肺和胃之间的横膈膜，腹肌以及肋骨肌肉的驱动下产生的行为，它在净化肺部刺激物或粘液方面十分有效，但却也会因此喷出数千唾液滴液。这些滴液会以160 km/h的速度扩散。传播的每个唾液中，都可能包含病毒或细菌，传播的距离因滴液的大小可达约2米左右。如图1中的蓝衣女士与正在咳嗽的先生之间的2米范围内的红色滴液所

示，部分咳嗽的滴液会进入周围人群的鼻子或嘴里。与此同时，其余沉降的滴液中的细菌由于可以在某些表面上存活数小时，将有可能转移给毫无戒心的其他受害者。美国麻省理工学院学者的研究表明，咳嗽带来的包含病毒的分泌物，还能形成不可见的云状气体，如图1中一家三口与正在咳嗽的先生之间的灰色滴液部分所示，这种云状气体传播更远，甚至传遍整个房间，并且能在空气中停留更长时间。这充分表明保持社交距离和佩戴口罩配合，在阻止病毒传播上的重要作用。

范德比尔特大学传染病专家威廉·沙夫纳博士认为，“2米”社交距离的规则来自呼吸生理学，“哪怕没有咳嗽或打喷嚏，在我们呼吸的时候，彼此之间3~6英尺的距离称为呼吸区。我们吸入的空气正是这个距离内的与已经存在空气的混合。”沙夫纳说，“因此，如果你站在我3~6英尺的范围内，你可能会吸入一些我呼出的东西。当然，如果我感染了这种病



图1 人类咳嗽产生飞沫在空气中的传播示意图

毒，那么微观上讲，我所呼出的就是这种病毒。”

如果说在平面上2米的社交距离，是限制人际交流太过亲密的一个度量，那么在垂直方向上的这个距离，则代表的是阴阳之别。在西方文化中，要求墓穴深度一般不得少于2米，而对“6英尺下”来源的解释之一，恰恰也是与一场疫病有关。1665—1666年，黑死病肆虐英国，为防止疫病的进一步传播，当时的伦敦市长下令将已故感染者的遗体深埋于地下6英尺。另一个说法是，6英尺大约相当于一个身长，是保证逝者免受动物和盗墓贼惊扰的一个基本高度。

呼吸道飞沫无疑是包括新冠病毒在内的人与人

之间病毒传播的重要渠道，而人类排出的这类飞沫，从空气动力学角度的传播距离，为得到人类泰然应对流行病爆发必须保持的基本距离——即社交距离提供了依据。美国哈佛大学一个疾病研究小组最新在《科学》上发表的研究结果提示我们，由于全球确诊病例已经达百万量级，新冠病毒的彻底根除几乎很难实现。因此，为避免新冠病毒的卷土重来，在全球范围内实施间歇性的“保持社交距离”的社会疏远类措施，要直至2022年。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

（上接131页）

这是在新疆定期举行的交易活动。城镇和乡村，一周时间分别挑选一天作为赶集日。那一天，乡村所有的人都可以进行自由买卖。规模小的市场平时空荡荡的，即使某些地方有店，门也是关着的，而到了集市的那一天，所有的地方突然活跃了起来，来自五里三镇的男女老少穿着节日的盛装涌向集市。”

在历史气候与外国人笔记方面，目前，利用古（近）代外国人、文人历险记和笔记重建历史时期气候变化的研究越来越受到重视，研究内容渗透气象要素的各方面。通过分析近代外国人历险记中涉及到的新疆气象资料，可以重建具有典型特点时间段的历史时期气候变化；特别是在温度、降水、沙尘天气重建方面，这些历险记提供了可贵的历史资料。例如，从《帕米尔历险记》中可以挖掘出一部分当时当地的天气状况，1987年7月8—17日，扬哈斯本一行从哈密沿东天山一路向西到达吐鲁番，其中前7天每天傍晚或夜间都记载有雷阵雨，而后3天行进到戈壁沙漠地带时，天气“如此炎热真让人无法忍受”。盛夏7月从吐鲁番到喀什的漫长旅行中，深切体会到“夏天到哪里都是骄阳似火，……因为这里丝毫感受不到海洋温暖潮湿天气的影响。”以上的文字记载真实再现了那一时段的天气，仔细比较过去与现在的气候状况，不难发现其中的些微变化，这不但对研究近代南疆天气提供了重要的线索，也为分析南疆的气候变化趋势提供了参考。

## 5 结语

对外国人历险记的研究，不仅要注重它的文学价

值、历史价值，还应关注它的科学价值，特别是《帕米尔历险记》具备的气象资料佐证价值和探险活动的开拓价值。《帕米尔历险记》中的气象资料不仅有丰富、记载详细、直观性强、细致度高等特点，难能可贵的是当时这一地区气象资料几乎空白或极度稀缺，且定性描述较多，外国人来新疆探险依靠其较先进的仪器获取到的第一手气象资料就显得弥足珍贵。这些气象信息通过提取、整理、统计，在重建历史时期气候方面，有利于复原阶段性气候细节、特征以及一段时间内的天气变化过程。如：利用晴雨记录可以重建干湿状况，感应记录可重建冷暖状况，物候记录可作为复原当时气候状况的辅助信息，而奇异天气现象记录则可结合地方志等历史文献的共同分析，重建当时的极端天气现象。这些提取出的有用信息，可为预测、模拟今后气候变化趋势提供历史参考。

### 深入阅读

- 邦瓦洛特, 2001. 勇闯无人区. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.  
编纂委员会, 1995. 新疆通志 第10卷·气象志. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.  
大谷光瑞, 2001. 丝路探险记. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.  
黄媛, 何辰宇, 李蓓蓓, 2014. 论古代文人笔记中的气象——以《快雪堂日记》为例. 安徽文学(下半月), (11): 19-20.  
普尔热瓦斯基, 1999. 走向罗布泊. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.  
田卫疆, 1998. 近代新疆探险百年. 乌鲁木齐: 新疆青少年出版社.  
托马斯·维立安·阿托金逊, 2000. 横跨亚洲大陆. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.  
扬哈斯本, 2001. 帕米尔历险记. 任宜勇, 译. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.

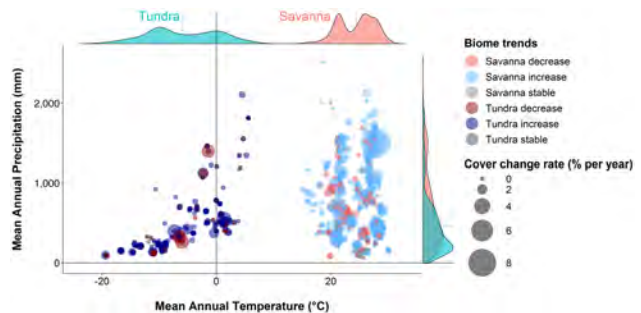
（作者单位：新疆兴农网信息中心）

## 编辑选编

### 气候变化下苔原和稀树草原生物群落木本植物入侵加剧

随着全球变化，全球生物群落正在发生变化。那些受到温度或降水限制的生物群落，如苔原和稀树草原，对于气候变化的强烈影响可能更为敏感。尽管木本植物入侵在两个生物群落中都很普遍，但其与温度和降水变化的关系仍然未知。利用来自全球苔原和稀树草原生态系统的基于遥感、实地生态监测和重复摄影的899个木本植物覆盖区随时间变化的1089条木本覆盖记录，英国爱丁堡大学的García Criado等量化了木本植物入侵与气候变化的关联程度。研究计算了每个生物群落的覆盖变化，并使用多种气候指标评估了覆盖变化对温度和降水变化的响应程度，确定了驱动因素的相对重要性。

在冻土带，木本植被变化的幅度与温度或降水的增加并不对应，而在稀树草原，植被变化与降水量的增加具有明显关联。随着苔原的变暖，较湿润地区的木本覆盖变化率高于较干燥地区；随着稀树草原降水量的增加，较干燥地区的木本覆盖变化率高于较湿润地区。然而，除了在热带稀树草原，当年降水量在阈值（650 mm）以下，木本增加与降水增长具有线性关系以外，对于其他大多数区域，较大的气候变化速率并不对



木本覆盖在温度梯度和降水梯度上的变化

应于较大的木本覆盖变化速率。

研究结果强调了受季节性限制的生物群落中气候变化影响的复杂性，木本覆盖变化率并不决定于气候变化率，其他可能的影响包括局地异质性、时间滞后、植物特异性反应和间接气候过程等。因此，木本入侵预测应考虑复杂的气候-生物群落相互作用，以便更好地估计全球变化情景下未来植被的变化。

来源：García Criado M, Myers - Smith I H, Bjorkman A D, et al. Woody plant encroachment intensifies under climate change across tundra and savanna biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29: 925-943.

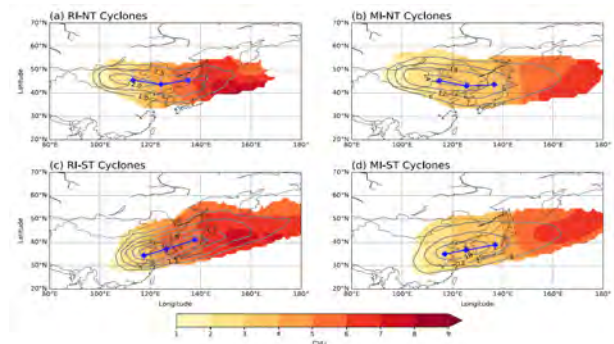
（侯美亭 编译）

### 朝鲜半岛附近东亚气旋的快速加强

韩国首尔大学的Kang等利用1979—2017年ERA-Interim数据判断和追踪东亚地区的温带气旋（ETC），并研究了朝鲜半岛附近ETC的快速增强及其影响。接近朝鲜半岛的ETC，从850 hPa相对涡旋场来看，主要在阿尔泰—萨彦岭的背风坡以及青藏高原南部生成，分别呈现北线和南线两条气旋路径。北线ETC通常伴随着高空槽的发展。特别是那些迅速增强（RI）的气旋，其特征是与槽加深相关的较强的高空位涡（PV）异常，而非绝热加热的影响相对较弱。这与南线的ETC形成了对比，后者主要是由非绝热加热引起了低空PV异常从而发展起来的。高低空PV异常的相互作用使得南线的ETC在存在移动的高空槽时迅速增强。

为了更好地了解它们的加强过程和区域影响，通过考虑源地和朝鲜半岛周围的最大加深率，将被追踪到的ETC客观地分为四类：北线快速发展（RI-NT）气旋、北线一般（MI-NT）气旋、南线快速发展（RI-ST）气旋和南线一般（MI-ST）气旋。由于该地区最大加深率前10%的RI气旋在北方春季最为频繁，故分析的重点是春季气旋。冷季（9月至次年5月）ETC的加强过程与春季ETC有很强的相似性。NT和ST气旋对地面有不同的影响。RI-NT气旋没有造成显著的降水变化，但导致了在东海/日本海上空强烈的地面风。然而，RI-ST气旋对

地面风和降水都有显著影响。当RI-ST气旋位于朝鲜半岛附近时，朝鲜半岛西海岸和日本九州岛上空风速可达10.0 m/s。朝鲜半岛和日本西部的降水也大幅增加（最高达15 mm/d）。



RI-NT气旋（a）、MI-NT气旋（b）、RI-ST气旋（c）和MI-ST气旋（d）的频率（灰色等值线，单位：个数/a）及强度（阴影，单位：CVU）（蓝色菱形和蓝线表示所用气旋个例的位置从第 $n-1$ 天到第 $n+1$ 天的平均值和标准差）

来源：Kang J M, Lee J, Son S W, et al. The rapid intensification of East Asian cyclones around the Korean Peninsula and their surface impacts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125, e2019JD031632. <https://doi.org/10.1029/2019JD031632>

（张萌 编译）

### 高分辨率 (30 m) 土壤水分数据构建

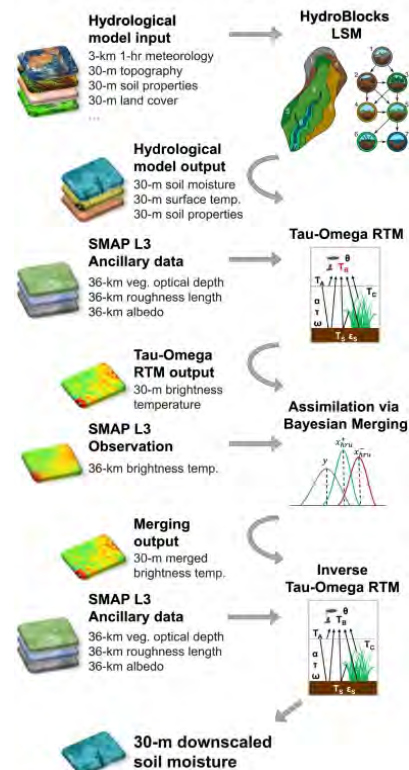
准确和详细的土壤水分信息对于灌溉、旱涝预报、水资源管理和田间尺度决策等至关重要。近年来发射的从太空测量土壤湿度的卫星继续改善了土壤湿度信息的可用性。然而，这些卫星产品的用途受到微波传感器粗空间分辨率的限制。

美国普林斯顿大学的Vergopolan等提出了一种合并框架，将高分辨率陆面模式 (LSM)、辐射传输模型 (RTM) 和贝叶斯方法相结合，将粗分辨率遥感水文变量降尺度到30 m的空间分辨率。该框架以HydroBlocks为基础，HydroBlocks是一种通过相互作用的水文响应单元 (hru) 来解决陆面过程田间尺度空间异质性的陆面模式。通过在土壤水分主动被动卫星 (SMAP) 中使用的Tau-Omega-RTM与HydroBlocks耦合，然后将HydroBlocks-RTM和SMAP L3的亮温合并，即可得到30 m土壤湿度。

利用原位土壤水分网络数据进行验证，获得了总体高相关性 ( $R>0.81$ ) 和良好的平均Kling-Gupta得分 (0.56)。无论是在田间尺度还是在流域尺度上，降尺度产品都比SMAP L3和L4产品更能反映土壤水分的时空动态。研究结果突出了超分辨率模型在弥补粗尺度卫星反演和野外水文应用之间的差距方面具有潜在价值。

来源: Vergopolan N, Chaney N W, Beck H E, et al. Combining hyper-resolution land surface modeling with SMAP brightness temperatures to obtain 30-m soil moisture estimates. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 242: 111740.

HydroBlocks-RTM Merging Framework



HydroBlocks-RTM合并框架流程图。利用Bayes合并，将HydroBlocks-RTM精细尺亮温估计值与36 km SMAP观测亮度相结合，得到最优亮温估计值，最终得到30 m土壤水分数据

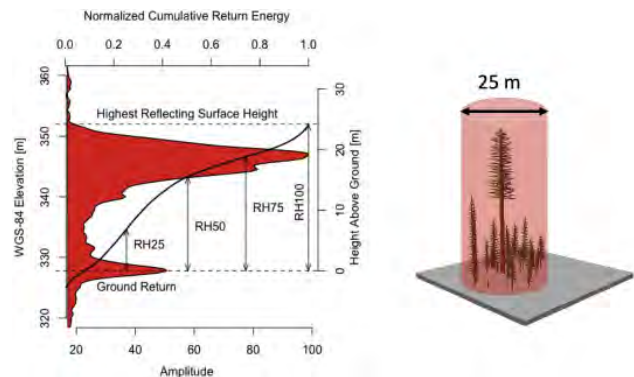
(■ 侯美亭 编译)

### 冠层垂直变化的高分辨率激光观测



Elsevier新创办的OA期刊*Science of Remote Sensing*被其称为著名期刊*Remote Sensing of Environment*的姐妹刊，近期刊登的美国马里兰大学的Dubayah等撰写的这篇“地球森林和地形高分辨率激光测距”文章是其创刊以来正式出版的第一篇研究论文，介绍了利用激光雷达对地球森林垂直结构进行的精确而广泛测量。这对于准确评估森林现有生物量以及人类活动或气候变化造成的生物量变化如何影响大气中的二氧化碳浓度至关重要。这部雷达即全球生态系统动力学调查激光雷达 (GEDI)，NASA于2018年底将其发射并安装至国际空间站上的日本实验舱暴露设施 (JEM-EF) 中，为51.6°N—51.6°S的温带和热带森林提供高质量的森林垂直结构测量。

森林三维结构是从局地到区域尺度内生境质量和生物多样性的一个关键组成部分。在其两年的标称寿命内，GEDI预计将提供分辨率为25 m的超过100亿个波形数据。这些数据将用于生成各种网格化产品，包括冠层高度、冠层叶剖面、叶面积指数和生物量等。来自GEDI



GEDI波形数据。激光能量的近红外脉冲被发射到地球表面，获取分辨率为25 m的反射特征。通过处理得到地形、冠层高度和各种相对高度度量，并反演出叶密度剖面、冠层覆盖和地上生物量等其他产品

的数据也将被用来验证生态系统建模和生物多样性研究以及使用雷达和其他遥感仪器进行融合的有效性。

来源: Dubayah R, Blair J B, Goetz S, et al. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, 2020, 1: 100002.

(■ 侯美亭 编译)

## 他山之石：美国气象继续教育与培训 ——摘自《继续教育》

■ 高学浩 王卫群

美国气象事业是社会公益性事业，其气象科学水平、业务现代化建设以及气象服务能力一直处于世界领先地位。美国的气象事业之所以能够取得瞩目的成绩，除了依靠科技进步外，与其重视人才队伍建设、重视继续教育与培训密切相关。学习美国气象部门在气象继续教育与培训方面的先进经验，对于加快中国的气象教育培训事业的发展具有重要意义。

注重气象人才培训和人员素质提高一直是美国气象工作的一大特点。国家天气局共有员工4800多人，其中4000人左右分布在全美各地，342人在国家天气局的总部办公，552人在总部以外的直属机构办公。国家天气局服务司下设培训处，其职责为：管理国家天气局的培训项目，管理制定和执行培训的预算，协调计划、任务、科学及技术培训的需求及优先顺序，制定培训计划和制度等。国家天气局没有自己的气象院校，但建有三个自己的培训机构，分别是：设在密苏里州的堪萨斯城的国家天气局培训中心、设在俄克拉何马州罗曼的警报决策培训部以及设在科罗拉多州波尔多的气象业务教育与培训合作计划科。此外，国家天气局在每个预报台都设有科学与业务培训官员，专门负责台站人员进修提高和相关培训工作。

气象培训任务分工与管理气象培训工作一般分为三类：第一类是面向部门的培训，也就是为部门职工开展的继续教育与岗位培训。第二类是面向行业的合作培训，主要是通过合作方式，为国防部等其他部门、世界气象组织以及其他国家培训各类气象人才。第三类是面向公众的社会培训。随着技术的进步，特别是台站业务的发展，培训课程不断得到更新和修改。国家天气局培训中心的培训课程紧密围绕国家天气局的业务是其突出的特点。

教育与培训合作计划科更多的是侧重于大学后的继续教育培训任务。它借助于美国大气研究院和美国大气研究学会人员和学科的优势，主要承担着对国家天气局台站的科学和业务官员及其他高级管理人员和高层次业务技术骨干的培训，促进学术研究与国家天气局业务预报机构的合作。

### 【编者语】

本期编辑期间，惊闻本刊原编委，也是期刊创刊时主办机构的主要负责人高学浩老师因病去世。为了纪念逝者，本刊节选高学浩老师与其合作者——也是他的夫人——王卫群老师共同撰写的，2005年发表在《继续教育》上的对美国气象继续教育的分析文章，与读者一道缅怀其一生对中国气象继续教育事业做出的贡献。

在美国，实际上已形成了教学、科研、业务及应用技术开发的三个园区，即华盛顿及马里兰地区园区：包括国家天气局的环境预报中心和几个实验室、国家海洋局研究院的几个实验室、马里兰大学及国家环境卫星中心。诺曼园区：包括强风暴实验室、风暴预报中心、雷达业务支持中心、培训机构、俄克拉何马大学和诺曼预报台。波尔多园区：包括美国大气研究院和大学大气研究协会、科罗拉多大学、国家海洋大气管理局的研究部门和实验室。在国家天气局培训中心，其培训工作也是紧紧围绕业务需求而进行的。主要表现在：第一，培训计划的制定基于业务的需求。第二，培训工作具有极强的针对性。第三，具有一支熟悉气象业务工作的专兼职教师队伍。这些人一般都具有丰富的业务工作经历和经验（要求在政府部门工作25年以上），熟知气象业务工作的需求，能够有针对性地释疑解惑。同时，该中心除坚持对师资进行培养外，还经常派教师下台站实习，让其了解台站业务的发展情况，以便能够结合业务实际开展教学工作。



图 高学浩2017年为第2期高校教师现代气象业务研修班授课

本文节选自《继续教育》2005年第8期“他山之石”栏目。

平顶冰山 (tabular iceberg或table iceberg)，旧称平板状冰山 (barrier iceberg)，指冰架断裂后形成的冰山。新形成的平顶冰山四边几乎垂直且顶部平坦。在南极，平顶冰山的宽度为数十千米，最宽可达160 km，厚度可达300 m，大约有30 m在海面以上。在北极，这类大型冰山被称为冰岛，但与南极最大的冰山相比要小很多。

该词汇的中文名称，包括了形容冰山的平顶、平板和桌状等，都是基于这种冰山顶部平整、四面垂直的外形。在《英汉英大气科学词汇》，以及《英汉大词典》(第2版)、商务印书馆《综合英汉科技大词典》(第2版)、化学工业出版社《汉英科技大词典》等词典中，都一致地将tabular iceberg翻译成平顶冰山。但是在公众和科普读物里，平顶冰山更多地被译成桌状冰山。例如，在百度搜索中，桌状冰山的结果近二百万条，平顶冰山关键词仅出现十几万次条。其中原因，可能是桌状冰山的叫法更为形象，容易被大众接受。

平顶冰山的新、旧英文名称中的tabular和barrier也是有联系的，后者的本意是障碍，而barrier iceberg的出现，很可能与早期北极、南极探险相联系：巨大的海上冰山无疑是探险者驾驶船只奔向极地时遇到的主要“障碍”，而这种障碍就像平板一样阻挡在航线上。气象出版社2012年版《英汉英大气科学词汇》收录了该词旧称的类似词 (barrier berg，很多语境下，berg与iceberg同义)，并更多采用意译，翻译为平顶冰山。

平顶冰山无疑是气候变化研究中的热词，在SCI数据库 (Web of Science核心合集) 及谷歌学术等文献数据库中，均有以平顶冰山为主题词的科学文献。检索出的72篇SCI文献，其中和地学多学科相关的有38篇，地理物理相关的有27篇，海洋学相关的有19篇，环境科学相关的有10篇、遥感技术相关的有8篇，影像科学和照相技术的有4篇，地球化学地球物理学以及气象和大气科学的论文各3篇。表1中给出这些文献中被引用60次及以上的5篇，同时给出在谷歌学术中的引用次数。这些论文全部为2000年以后发表的，凸显了近年来气候变化的深刻研究，对平顶冰山这一古老自然现象所表征的地球环境变化的重视。



# AMS 词汇

张 伊 编辑  
贾朋群

## 平顶冰山 ( tabular iceberg )

表1 高引用率的平顶冰山主题论文

| 序号 | 论文题目                                                                                | 第一作者       | 出版物                                                                                   | 被引次数<br>( SCI ) | 被引次数<br>( 谷歌学术 ) |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|
| 1  | The safety band of Antarctic ice shelves                                            | Fürst J J  | Nature Climate Change, 2016, 6(5): 479-482                                            | 89              | 110              |
| 2  | Ocean-driven thinning enhances iceberg calving and retreat of Antarctic ice shelves | Liu Y      | Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(11): 3263-3268             | 70              | 93               |
| 3  | Free-drifting icebergs as sources of iron to the Weddell Sea                        | Lin H      | Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography, 2011, 58(11): 1392-1406    | 65              | 86               |
| 4  | Evidence for rapid retreat and mass loss of Thwaites Glacier, West Antarctica       | Rignot E   | Journal of Glaciology, 2001, 47(157): 213-222                                         | 65              | 99               |
| 5  | Tracking large tabular icebergs using the SeaWinds Ku-band microwave scatterometer  | Stuart K M | Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2011, 58(11-12): 1285-1300 | 60              | 86               |

(from back cover)

127 Liu Chenzhao, Wang Xiaochao, Wang Hongxia/  
Analysis and Research on the Demand of Government  
Purchasing Talent Services in Meteorological  
Department

### History

People/Event

129 Li Dongmei/ The Weather in Xinjiang Described in

The Heart of a Continent

### Reading

132 Jia Pengqun, Sun Menghan/ Social Distancing vs  
Germs Travel

136 Gao Xuehao, Wang Weiqun/ On American  
Meteorological Training

134 Selected Papers

# Advances in Meteorological Science and Technology (Bimonthly)

Vol.10 No.2, April 20, 2020

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)  
Sponsor CMA Training Centre  
Chinese Meteorological Society  
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological  
Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors-in-Chief

Wang Zhiqiang  
Xiao Ziniu  
Zhai Panmao  
Yu Yubin  
Li Weijing  
Hu Yongyun  
Tan Zhemin  
Sun Jian  
Fei Jianfang  
Zhao Licheng  
Zhang Peng  
Guan Zhaoyong  
He Jianxin  
Huang Jianping  
Liao Xiaohan  
Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Luo Yunfeng, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang Huaigang, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yuewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Jiang Jianmin, Cui Xiaojun

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,  
Beijing 100081, China  
Tel: +86-10-68409927/68409933  
Email: amst@cma.gov.cn  
http://cmalibrary.cn/amst  
http://weibo.com/2115232930/profile

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973  
CN 10-1000/P  
RMB 30.00

## Main Contents

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

### Survey

- 2 Xu Xiaofeng/ Progress in Remote Sensing Detection Technology of Vertical Atmospheric Profile in Lower Layer
- 6 Jia Pengqun, Li Pan, Deng Jingmian/ R2O: 3 interpretations from AMS 100-Annual Meeting

### Article

- 9 Chen Jing, Li Xiaoli/ The Review of 10 Years Development of the GRAPES Global/Regional Ensemble Prediction
- 19 Chen Chaohui, Wang Yong, Du Jun, He Hongrang, Liu Yudi, Jiang Yongqiang/ Overview of the European Operational Ensemble Prediction Systems
- 30 Su Xiang, Yuan Huiling/ The Research Progress of Ensemble Statistical Postprocessing Methods
- 42 Zheng Minghua, Du Jun, Brian A. Colle/ Applications of Ensemble Sensitivity Analysis to High-Impact Weather Systems in the Middle Latitudes of Northern Hemisphere
- 58 Wang Yi, Dai Kan, Zhang Xiaomei, Tang Jian, Zhou Feifan, Ma Jie/ Research Progress in Study of Forecast Errors and Predictability Based on Ensemble Sensitivity
- 65 Chen Shengjie, Sun Hongchuan, Kang Zhiming/ A Survey on Use of Ensemble Forecast Products by Weather Forecasters at Provincial, Regional and County Observatories
- 75 Du Jun, Deng Guo/ An Introduction to "Measure of Forecast Challenge" and "Predictability Horizon Diagram Index"
- 79 Wang Meihua, Liu Rui/ Research on the Evaluation of High-Level Talents in Meteorological Departments
- 83 Cai Jinling, Lin Qiao, Yue Qing/ Inspiration of Employment Intentions of Atmospheric Sciences Graduates to Talent Recruitment in Meteorological Department
- 87 Yue Qing, Lin Qiao, Cai Jinling/ Status and Problem Analysis of Open Recruitment in Meteorological Departments
- 92 Zhong Qi, Xue Tong, Zhu He, Ye Mengshu/ Research on the Forecaster Training Needs of Using Refined Numerical Weather Forecast
- 100 Liu Rui, Liu Yi, Du Jingyi/ Research on the Development Trend of High-Level Talents in Meteorological Departments
- 104 Sun Tianrui, Cai Jinling, Du Jingyi, Zhou Qian/ Research on Youth Talents Development in Departments Under the China Meteorological Administration
- 108 Xing Yazheng, Sun Tianrui, Zhou Qian/ Study on the Training Demand of Personnel Management Post in Meteorological Departments
- 112 Lin Qiao, Yue Qing, Zhang Longbo, Xing Yazheng/ Research on the Recruitment Publicity Strategy of Meteorological Talents of WeChat Official Account
- 115 Liu Yi, Liu Rui, Du Jingyi/ Analysis of Job Title Management in State-Owned Enterprises of Meteorological Departments
- 118 Yao Xiuping, Ye Mengshu/ Compilation of the Teaching Contents of Meteorological Continuing Education
- 120 Zhou Qian, Xing Yazheng, Sun Tianrui/ Research on Problems and Countermeasures of Talented Personnel Construction in State-Owned Enterprises of Meteorological Departments: Take China Huayun Group and Huafeng Meteorological Media Group as examples
- 123 Du Jingyi, Liu Rui, Liu Yi, Sun Tianrui/ Research on the Development Characteristics of Excellent Youth Personnel in Institutes Directly under the Meteorological Department
- 125 Kang Wenying, Zhao Hongsheng, Wen Jing, Li Taotao/ Research on the Orientation and Sustainable Development Path of Meteorological Science Popularization in the New Era

(continued in page Inside back cover)