

Advances

in Meteorological Science and Technology

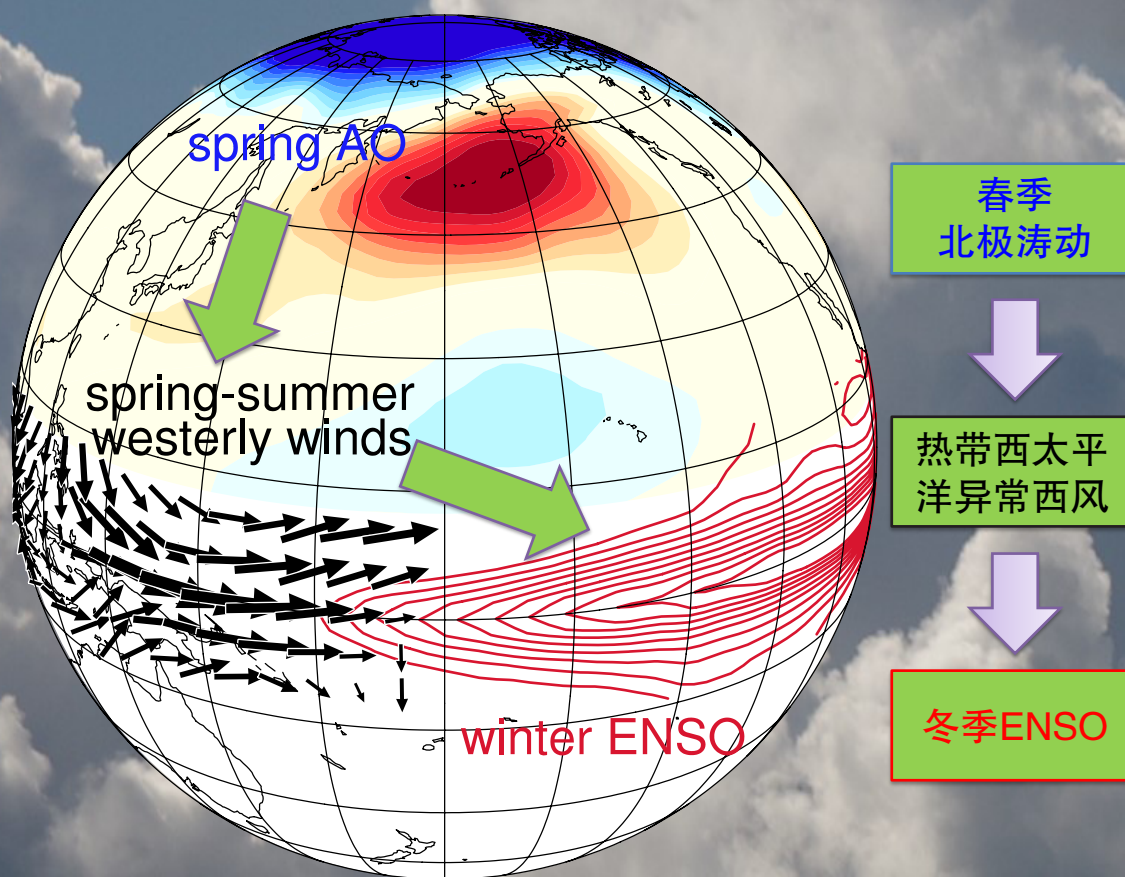
气象科技进展

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.5

2016年10月
第6卷 第5期



北极涛动/ENSO

气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院 主办

主管 中国气象局
主办 中国气象局气象干部培训学院
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

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
罗云峰 中国气象局
王会军 中国科学院大气物理研究所
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
费建芳 解放军理工大学
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
廖小平 中国科学院地理科学与资源研究所
吕世华 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
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)

成秀虎	高学浩	龚建东	郭学良	李 柏
李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉	任小波
沈文海	王卫丹	武炳义	杨修群	俞小鼎
张朝林	张 鹏	张庆云	赵 平	

编委 (按音序排名)

毕宝贵	陈云峰	陈振林	崔春光	崔讲学
董文杰	封国林	郭 虎	何金海	雷小途
胡 欣	胡玉蓉	胡跃文	姜 彤	李跃清
李 慧	李集明	李良福	李耀辉	卢乃锰
梁旭东	刘晶森	刘黎平	刘 实	马舒庆
陆日宇	罗 兵	罗亚丽	马 力	石广玉
马耀明	毛恒青	彭莹辉	浦一芬	王 斌
宋 燕	汤 绪	田 红	万齐林	王迎春
王东海	王建林	王晓青	王延敏	文洪涛
王 元	王在志	王自发	温 敏	杨昭明
吴立广	谢志辉	闫冠华	杨 松	张立祥
姚学祥	伊 兰	翟武全	张 华	周凌晔
张小玲	张跃堂	赵广忠	周定文	邹立尧
周显信	朱定真	朱小祥	祝燕德	

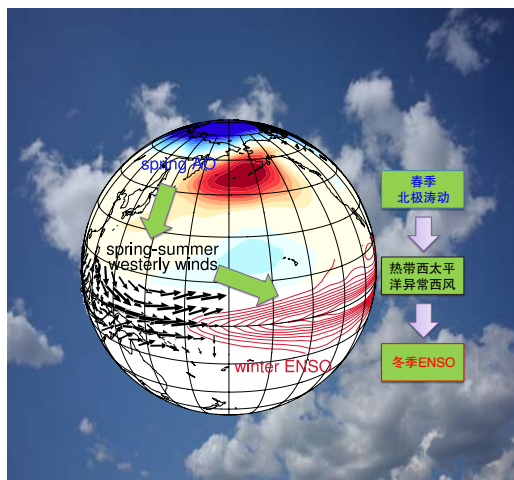
海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

编辑部

张 萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民
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://qxkjz.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

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6卷 第5期 2016年10月

1 许小峰: 主编语

研究论文

封面报道

6 陈尚锋, 陈文: 北极涛动对ENSO影响的研究进展

研究进展

- 14 刘柏年, 皇群博, 张卫民, 曹小群, 赵军, 赵延来: 集合四维变分资料同化研究进展
- 24 费海燕, 周小刚, 王秀明: 多普勒雷达中气旋判据及算法的发展与应用
- 30 林志强, 路红亚, 马艳鲜: 基于逐日积雪深度预报的藏北草原雪灾等级评估
- 36 王茹琳, 余华彬, 王闫利, 姜淦, 林珊, 沈沾红: 基于MaxEnt的华山松大小蠹在中国潜在分布区预测
- 41 潘彭刚, 田霄: 武汉天河机场一次下击暴流天气的多普勒雷达分析

短论

- 47 严欣, 任菊章, 琚建华: 热带大西洋暖海温促使拉尼娜事件发生的可能性研究
- 51 朱禾, 王秀明: 影响气温直减率变化的物理过程讨论
- 55 邵洋, 侯喜良, 孙锐, 赵志强: 人工影响天气作业人员安全风险评价

主编语

北极涛动(AO)是指北半球中纬度地区与北极地区气压形势出现此消彼长的“跷跷板”式变化,是北半球中高纬地区大气环流年际变率的第一主导模态。而厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)则是热带太平洋地区年际变化的最强信号,同时也是整个气候系统年际变化尺度上的最强信号。这两个气候系统对全球大范围的天气和气候都能产生显著的影响。本期主打文章(P6)总结了近年来关于AO影响ENSO的最新研究进展,旨在促进对中高纬度大气系统影响热带系统物理过程的理解。文中指出了春季AO对后期冬季ENSO事件发生的显著影响和物理过程,这对改进ENSO的预测有重要的科学意义。热带大气季节内振荡(MJO)也是大气环流的重要系统之一,它的演变与ENSO的发生也有一定的关联性,本期短论文章(P47)同时考虑MJO、ENSO以及热带大西洋海温三种因素,对2016年秋、冬季是否会产生拉尼娜事件进行了分析。

大气作为一种典型的混沌系统,其发展和变化对初值非常敏感。因此,解决初始场问题被认为是整个数值预报领域的关键环节,初始场的准确性直接影响着数值天气预报的成败。资料同化作为数值天气预报模式运算过程中初始场数据处理技术,解决好其中的难点问题已成为发展好数值预报模式必须面对的重要任务。近年来,在少数业务中心已实现了业务化的集合四维变分资料同化方法(En4DVar),能够精确估计流依赖背景误差协方差,被认为是解决变分资料同化主要问题的有效方法(P14)。

利用多普勒雷达对伴随着龙卷、强雹、台风等强天气的中气旋进行探测,对于准确、实时发布强天气预警具有十分重要的意义。然而,由于国内多普勒雷达应用研究起步较晚,且国内大部分C波段多普勒雷达应用软件中无中气旋算法,因此在

业务上发展适用于国内的中气旋判据和中气旋算法产品以识别中气旋(P24)是亟待解决的一个问题。

与我国东部沿海常出现的台风等剧烈天气不同,我国西藏、内蒙、新疆等地的雪灾是当地牧区冬、春季最主要的气象灾害之一。在雪灾气象服务中,对积雪深度的变化和积雪日数估计是评估雪灾严重程度的重要参数。气象要素(尤其是气温)是影响积雪消融的关键因子,基于它们之间的相关关系,建立局地积雪深度模拟模型,准确评估雪灾严重等级(P30),将为抵御草原雪灾提供参考。另外,气象条件也是影响某些森林虫害发生发展的主导因素,探索不同气象变量与森林虫害之间的关系(P36),有助于科学制定气候变化背景下的森林防控措施。对流层大气温度直减率是预报员在分析强对流天气时应用最广泛的重要指标之一,对其变化成因的分析与讨论将有助于加深对这一变量特征的认识与理解(P51)。在天气预报中,用到的气象变量多达数以十计、百计,但本质上都是由“压、温、湿、风”四个基本要素组成或导出的,本期论坛文章(P59)专门归纳了这四种基本气象要素的物理意义和预报应用价值。

由于在天气、气候、水文和水资源及相关环境领域的专业知识和国际合作方面发挥的世界领导作用,世界气象组织(WMO)在国际组织中的地位和声誉日益提高,而这在很大程度上得益于它各种计划的科学制定和顺利实施。及时跟踪WMO战略计划发展动态,借鉴其目的意义、总体思路、内容框架和保障措施等方面的先进理论和实践经验,将对我国气象事业发展战略带来重要启示(P64)。

许小峰

科学观察

2 读图 数字 榜单

论坛

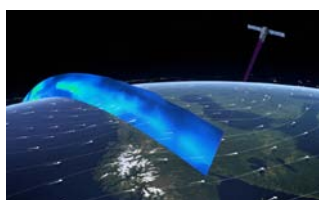
59 陶祖钰, 范俊红, 李开元, 刘淑媛, 杨引明: 谈谈气象要素(压、温、湿、风)的物理意义和预报应用价值

64 陈鹏飞, 朱玉洁, 陈正洪: 世界气象组织战略计划动态及其经验启示

往事钩沉

人物/事件

74 气象史料挖掘与研究工程项目组: 国民政府时期的福建气象业务进展



P2

阅读

信息

13 谢尚平教授获AMS斯维尔德鲁普金质奖

23 AMS在停刊8年后重新出版《气象文集》

35 新书架

40 《应用气象学报》创刊30周年纪念刊出版

70 高被引论文选编

72 编辑选编

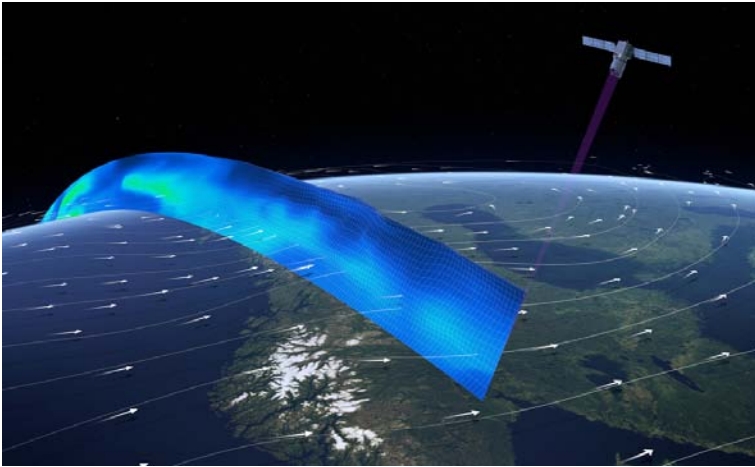
78 涓流细雨

80 第80页评刊

封3 媒体扫描



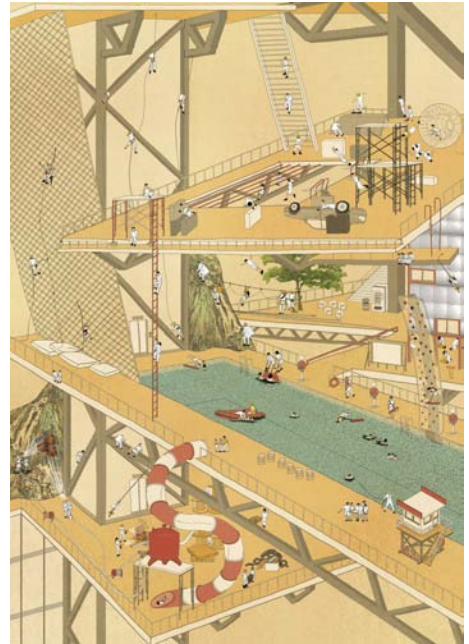
封3



全球大气风场层结探测卫星研发取得新进展

欧空局（ESA）研制的计划在2017年末发射的，将是世界上第一颗专注于全球大气风场层结探测的卫星。在距离该卫星预计升空时间还有一年的时候，卫星探测的关键探测器——Aladin风探测器研制成功。该探测器由两支强大的激光发射器、一个大型望远镜和多个非常敏感的接收器共同组成，能够探测给出大气垂直面结构以及气溶胶和云信息，因为探测信息可以实时给出，未来Aeolus卫星数据也将对改进数值天气预报有所贡献。

来源：ESA

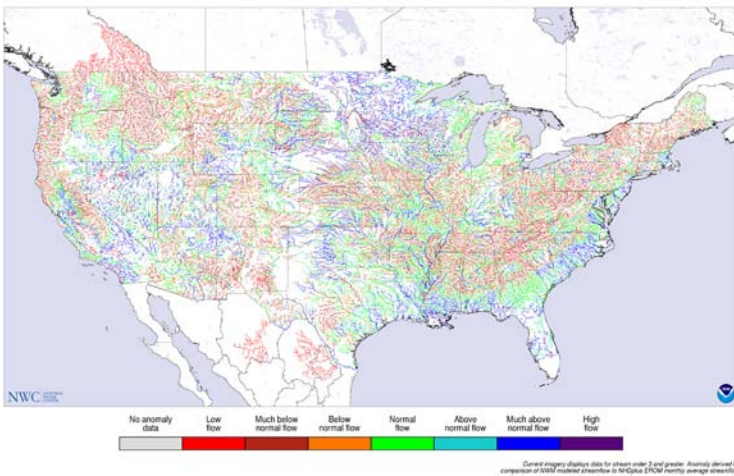


风险主题公园——提高防灾意识的有效手段

据英国皇家艺术学院（RCA）报道，韩国建筑师Soon-Min Hong设计并在韩国大邱市建设的风险主题公园，无疑会让现代人更全面认知风险就在身边，而掌握规避风险的逃生能力，越来越成为现代人不可或缺的生活内容。

来源：RCA

National Water Model Streamflow Anomaly Guidance
Analysis valid for 2016-08-11 18:00:00 UTC
Model initialized at 2016-08-11 15:00:00 UTC



NWS: 推出国家水模式，提升水预报服务

2016年8月，美国气象局（NWS）正式启动国家水模式预报（NWM）系统。该系统的推出，使得目前美国大约4000个水文预报点增加到270万个流域，该模式还将提供高分辨率的土壤湿度、表面径流、雪水当量及其他参数的预报。据悉，NWM基于WRF-Hydro模式由NCAR等多家机构合作开发，模式的核心是地球系统模拟。

来源：NWS

数字

300 亿英镑

英国气象局（MO）和英国商业、创新和技能部共同完成的报告，计算了英国气象局的工作对英国公司的价值，结果表明，从目前到2025年MO将为商业添加300亿英镑，效益成本比为14:1。

65%

发表在《美国科学院院刊》上的一项研究指出，美国本土仅剩41%的自然土地仍保持着足够气候连通性，通过创建廊道可使美国本土土地面积的气候连通性提高到65%，提高气候连通性的意义在于未来100年让动植物通过运动适应2.7℃的温度变化。

414 万km²

美国国家冰雪数据中心（NSIDC）宣布，今夏北极海冰最小面积为414万km²，是自1979年有卫星监测以来与2007年一起拥有的第二最低值，最小极值出现在1979年，为339万km²。

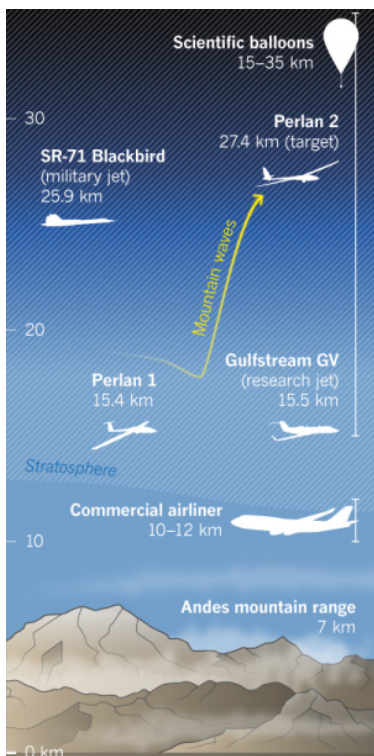
国际“北极涛动”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	标题	第一作者	来源期刊	被引频次
1	The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields	Thompson, DWJ	Geophysical Research Letters, 1998, 25(9)	1964
2	Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability	Thompson, DWJ	Journal of Climate, 2000, 13(5)	1494
3	Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends	Thompson, DWJ	Journal of Climate, 2000, 13(5)	631
4	Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere	Baldwin, MP	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1999, 104(D24)	487
5	Response of sea ice to the Arctic Oscillation	Rigor, IG	Journal of Climate, 2002, 15(18)	390
6	Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse-gas forcing	Shindell, DT	Nature, 1999, 399(6735)	367
7	Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data	Macdonald, RW	Science of the Total Environment, 2005, 342(1-3)	303
8	The Arctic and Antarctic oscillations and their projected changes under global warming	Fyfe, JC	Geophysical Research Letters, 1999, 26(11)	303
9	Arctic oscillation or North Atlantic Oscillation	Ambaum, MHP	Journal of Climate, 2001, 14(16)	296
10	East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation	Gong, DY	Geophysical Research Letters, 2001, 28(10)	255

来源: SCI-E数据库

检索时间: 2016年9月9日

田晓阳 提供



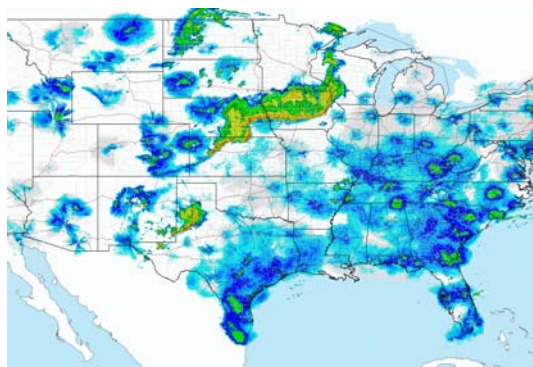
SCIENCE ON A GLIDER

The Perlan glider aims to fly higher than any other piloted aircraft, and to conduct unique stratospheric research.



用滑翔机探测大气

人类的动力飞机不可能到达的飞行高度，或许滑翔机可以借助平流层波到达。滑翔机Perlan项目近期将在阿根廷试飞，获取气候学研究中所需的大气高层的各种数据。

来源: <http://www.perlanproject.org/>

NOAA首签商业天气卫星数据购买合同

最近NOAA在其商业天气数据示范项目中，选择了GeoOptics和Spire Global两家公司签订了购买卫星探测数据合同，这是NOAA首次向商业提供商购买卫星天气数据。在示范项目中，两家公司将提供GPS无线电掩星数据（图为GeoOptics相关数据产品），这也是NOAA所需的关键数据。据悉，NOAA将先对商业购买的数据开展评估，之后才能进一步确定用于业务的进一步购买内容。NOAA商业天气数据示范计划于2016年4月提出，其目的是“评估商业天气数据在NOAA的天气模拟和预报中应用的潜在可行性”，项目支持“购买、评估和校准可用数据”。

来源: Via Satellite

50小时

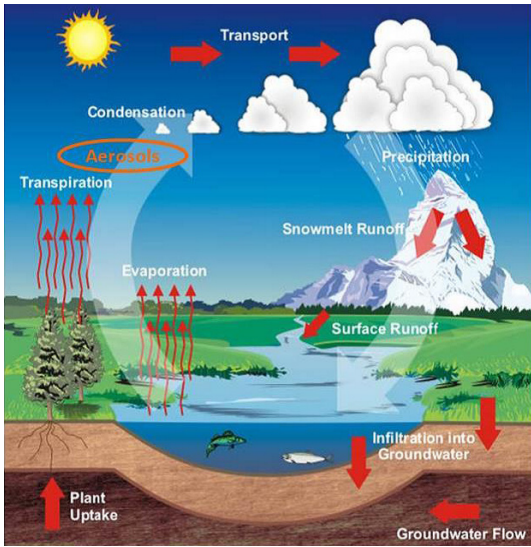
近日，俄罗斯成功试飞了首颗大气层卫星，这颗重量12kg的卫星，展翼为9m，在9km的空中停留了50小时。据悉，这种装备能实现多项低近地轨道卫星的功能，能在空中飞行数年。

90家

一项发表在《气候变化》杂志上的研究表明，仅90家公司便贡献了1751—2010年全球排放的温室气体的63%，其中一半的排放量发生在1988年以后。有学者因此认为气候变化大部分责任应由90家公司承担。但也有人指出，责备一个多世纪以来我们一直需要并且从中受益的产品的生产者，是一种逃避行为。

65%

中国气象局和国家发展改革委联合编制的《全国气象发展“十三五”规划》指出，“十三五”末，我国24小时暴雨的预报准确率将达到65%，此外，气象预警信息公众覆盖率达到90%以上，公众气象服务满意度保持在86分以上。



气溶胶与水循环的关系

美国科学院（NAS）最新论述未来大气化学发展的报告指出，大气化学在水循环中起关键作用。此外，大气传输动力、云形成、天气形态和降水过程等都控制着向地球表面淡水的传送。

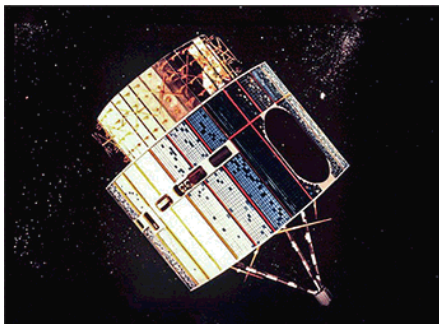
来源：NAS



空中看气候App拉近气候变化与百姓的距离

欧洲空间局（ESA）借助其在地球观测方面的优势，近期推出了“空中看气候（Climate from Space）”App。该款App用地球卫星观测提供反映我们居住星球健康状况的清晰图片和气候变化的信号，应用者还可以借助这款应用，近距离了解欧空局30年来获得的包括海洋温度、冰盖、海面高度、海冰、二氧化碳和土壤湿度等气候数据以及这些数据带来的知识认知。

来源：ESA



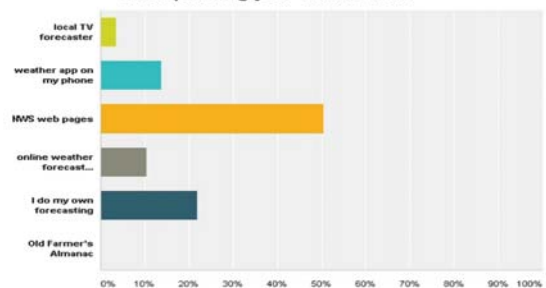
向GOES-3表达敬意

美国气象卫星GOES-3在38年前投入业务应用，21年前完成其气象卫星使命后，承担了向美国南极点科考站提供电话和互联网通信服务的任务。2016年6月，美国科学基金会（NSF）宣布，GOES-3因燃料用尽而退役。

来源：NSF

Survey Results

Who do you rely on for weather information when planning your summer fun?



美国人度假咨询天气：国家气象网站是首选

美国气象学会（AMS）2016年7月针对“考虑夏季度假计划时天气信息来源”的问卷调查结果表明，大约一半回答者选择美国国家气象部门网站信息，尽管依据古老传说的人几乎绝迹，但依然有20%以上的人回答依据自己做出的预报，是第二多的回答。

来源：AMS

数字

1599万kW

最新调查显示，我国近海岸20km以内的波浪能理论装机容量为1599万kW，其中广东省资源潜在值最高，其次是海南省、福建省和浙江省。

3项

近日业务化的NOAA第一颗深空天气卫星DSCOVER（Deep Space Climate Observing Laboratory，深空气候观测实验室），让NOAA空间天气预报中心的3项业务预报能力获得提升：地磁风暴预报、极光预报和区域空间天气预报。

2322起

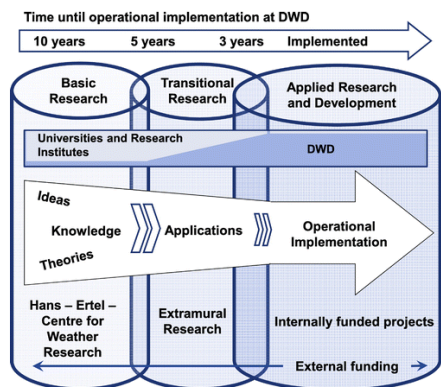
国土资源部公布的数据表明，2016年上半年我国发生地质灾害2322起，造成172人死亡、19人失踪、99人受伤，直接经济损失4.7亿元，比去年同期增加75%。



杀虫剂云雾：能抵挡寨卡吗？

图片中的“云雾”是通过喷洒杀虫剂生成的，这样的场景近来在古巴居民区经常出现，是当地为了阻止寨卡病毒的传播采取的措施。

来源：Nature



DWD：提倡更加紧凑和一体化的研究—业务转化模式

气象研究和业务之间的转化，美国气象界较早提出了全程大约20年左右的“漏斗”状模型让人们记忆犹新，而德国气象局（DWD）提出和提倡的“3个基石研究战略（a three-pillar research strategy）”不仅将研究和转化周期压缩到了10年，更将过渡基石定义为“转化研究”，并且在整个生命期，作为业务应用机构的DWD，虽然较少介入基础研究，但从过渡研究开始，全面参与其中。

来源：DWD

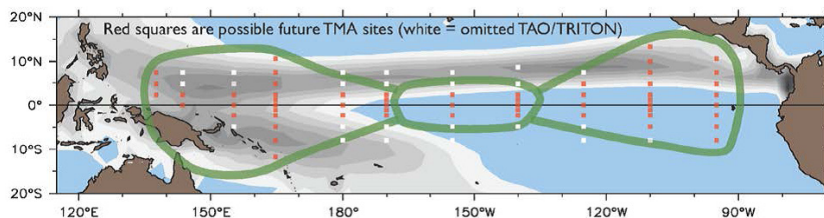
国际“ENSO”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	标题	第一作者	来源期刊	被引频次
1	Global and regional scale precipitation patterns associated with the El-Nino Southern Oscillation	Ropelewski, CF	Monthly Weather Review, 1987, 115(8)	1858
2	A dipole mode in the tropical Indian Ocean	Saji, NH	Nature, 1999, 401(6751)	1672
3	Variations in tropical sea-surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation El-Nino	Rasmusson, EM	Monthly Weather Review, 1982, 110(5)	1670
4	A model El-Nino Southern Oscillation	Zebiak, SE	Monthly Weather Review, 1987, 115(10)	1140
5	Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment	Serreze, MC	Climatic Change, 2000, 46(1-2)	1126
6	The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US	Enfield, DB	Geophysical Research Letters, 2001, 28(10)	942
7	Monsoon and ENSO - selectively interactive systems	Webster, PJ	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1992, 118(507)	833
8	Increased El Nino frequency in a climate model forced by future greenhouse warming	Timmermann, A	Nature, 1999, 398(6729)	705
9	El Nino Modoki and its possible teleconnection	Ashok, K	Journal of Geophysical Research-Oceans, 2007, 112(C11)	703
10	Meteorological aspects of the El-Nino Southern Oscillation	Rasmusson, EM	Science, 1983, 222(4629)	630

来源：SCI-E数据库

检索时间：2016年9月9日

田晓阳 提供



编制海上监测的“蝴蝶结”

热带太平洋观测系统（TPOS）的报告透露，用热带系留浮标矩阵（tropical moored buoy array, TMA）构造的“蝴蝶结”形状的监测网，2020年前后将在太平洋海域实现。

来源：TPOS

321 km

世界气象组织公布了有关闪电的两项新的世界纪录，其中纪录的最长距离闪电2007年发生在美国，达到321km，而最长时间闪电2012年发生在法国，为7.74秒。

149位

汤森路透最新公布了2016年高被引作者名单。在地学领域一共有149位作者进入这个名单，其中有13位来自中国（含港澳台），欧洲（69位）和美加（61位）上榜人数基本持平，澳大利亚（5位）和日本（1位）也有作者进入名单。

60个

据联合国相关机构报道，到2016年9月21日，正式批准巴黎气候变化协议的国家数量，已经多于既定的协议生效门槛之一——批准国家在55个以上，达到了60个国家。

北极涛动对ENSO影响的研究进展

陈尚锋 陈文

(中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029)

摘要: 北极涛动 (AO) 是北半球中高纬地区大气环流年际变率的第一主导模态, 厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 则是热带太平洋地区年际变化的最强信号。这两个气候系统对全球大范围的天气和气候都能产生显著的影响。总结了近年来关于AO影响ENSO的最新研究进展, 试图促进对中高纬度大气系统影响热带系统物理过程的理解。研究表明, 春季AO对随后冬季ENSO的爆发存在显著的影响, 其中北太平洋中纬度地区的天气尺度波与平均流之间的相互作用及其相关的涡度输送对赤道西太平洋异常西风的形成起着重要的作用。在年代际时间尺度上, 研究发现, 春季AO对随后冬季ENSO的影响在20世纪70年代初发生了一次显著的年代际变化, 该年代际变化与北太平洋地区风暴轴强度的年代际变化紧密相联。研究还揭示了春季AO对ENSO影响的不对称性, 即只有当春季AO处于正位相时, 才能对随后冬季赤道中东太平洋海温产生显著影响。研究发现春季AO位相变化对前冬NPO与后一个冬季ENSO之间的关系具有显著的调制作用。此外, 研究还发现, 除春季AO外, 11月AO对随后春季和夏季赤道中东太平洋海温也存在显著的影响, 这主要和北太平洋地区风暴轴气候态强度的年循环有关。

关键词: 北极涛动, 厄尔尼诺-南方涛动, 波流相互作用, 风暴轴

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.001

Progress in the Study of the Influence of Arctic Oscillation on ENSO

Chen Shangfeng, Chen Wen

(Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: Arctic Oscillation (AO) is the dominant mode in the atmospheric circulation variability over the extra-tropical Northern Hemisphere. El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is the primary mode in air-sea interaction over the tropical Pacific on interannual timescale. Variations of AO and ENSO exert substantial influences on the weather and climate anomalies over large areas in the globe. This paper reviews the studies of the influence of AO on ENSO, to improve our understanding the physical processes in the influence of extratropical atmospheric circulation on the tropical climate. It was found that the AO in spring has a significant influence on the ENSO events in subsequent winter. Interaction between synoptic scale eddy and low frequency mean flow over North Pacific plays a key role in the formation of the spring AO-related westerly wind anomalies over tropical western Pacific. The connection between the spring AO and subsequent winter ENSO experiences a significant interdecadal change around the early 1970s. This interdecadal change is closely related to the interdecadal change in the storm track intensity over North Pacific. The influence of the spring AO on the subsequent winter is asymmetric. Spring AO can exert significant influences on the following winter ENSO events only in its positive phase. Spring AO has a significant modulation effect on the linkage between previous winter North Pacific Oscillation and the following winter ENSO. In addition, the AO in November can exert significant influences on the sea surface temperature anomalies over tropical central-eastern Pacific in the following spring and summer. The intensification of the North Pacific storm track activity plays an important role in determining whether the variability of AO can exert influences on the subsequent SST anomalies in the tropical central-eastern Pacific.

Keywords: AO, ENSO, wave-mean flow interaction, storm track

0 引言

北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 是北半球中高纬地区大气环流变率的第一主导模态^[1-2]。伴随AO

的强弱变化, 北半球中纬度地区和极地地区之间的大气质量和气压异常呈“翘翘板”式准正压性的反向变化。平均流与天气尺度波动间的相互作用对AO模态的形成和维持起到很重要的作用^[3-8]。前人工作中已有许多关于AO对全球天气和气候影响的研究, 这些研究主要集中在北半球中高纬地区。例如, 研究发现, AO对北美、欧亚大陆中高纬地区的降水、表面气温

收稿日期: 2015年8月17日; 修回日期: 2016年1月16日
第一作者: 陈尚锋 (1989—), Email: chenshangfeng@mail.iap.ac.cn
资助信息: 国家自然科学基金项目 (41230527; 41605050)

和极端天气事件都存在显著的影响^[9-12]。同时, AO对东亚夏季风^[13-15]和东亚冬季风^[16-18]等气候系统也有显著的影响。近年来的研究表明,除了北半球热带外区域, AO的强弱变化也可以显著地影响到热带地区的天气和气候系统。例如, Miller等^[19]发现AO与中太平洋和大西洋低纬地区的向外长波辐射(OLR)存在显著的联系。他们发现,当AO处于正位相时,中太平洋和大西洋低纬地区OLR值偏低,即这些地区的对流比较旺盛。一些研究^[20-24]也揭示了AO对热带季节内振荡、西北太平洋和大西洋地区热带气旋活动、北半球热带太平洋和大西洋对流活动及太平洋热带辐合带的影响。

厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)是热带地区年际变化尺度上最强的信号。ENSO事件的发生不仅直接造成热带太平洋地区的天气气候异常,还会以遥相关的方式间接地影响到热带太平洋外乃至全球的天气和气候^[25-27]。因此,有关ENSO变率影响因子的研究对ENSO事件本身及与其相联系的天气气候异常的预测都具有重大意义。早先的观点指出,ENSO是一个热带太平洋地区自维持的振荡系统。ENSO变率可以通过热带太平洋地区的非线性相互作用来维持,它可以通过自身物理过程的变化和相互反馈得到激发和发展^[28-30]。虽然热带太平洋地区的海气相互作用对ENSO的发生、发展和衰亡起到重要的作用,但一些研究也指出,热带太平洋区域以外的气候系统对ENSO变率的维持也存在重要的影响。比如, Li^[31]发现东亚冬季风可以触发ENSO事件的发生。他的研究指出,当东亚冬季风偏强时,东亚寒潮活动频繁,寒潮向南发展时触发热带西北太平洋地区的对流活动,导致热带西太平洋出现异常西风;热带西太平洋地区的异常西风激发东传的暖Kelvin波,使得西太暖池的暖海温异常沿着斜温层向东传播到赤道东太平洋,最终导致El Niño的发生。Vimont等^[32-34]发现冬季北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO^[35-36])可以通过“季节脚印机制”过程对下一个冬季ENSO事件造成显著影响。最近的研究指出, AO作为北半球热带外大气环流变化第一主导模态,对随后的ENSO或赤道中东太平洋海温变率也存在显著影响。

本文总结了近年来关于AO影响ENSO的最新研究成果,包括AO影响ENSO的物理过程, AO影响ENSO的年代际变化和AO影响ENSO的不对称性等。AO和ENSO都能对全球大范围地区的天气和气候产生显著影响,因此总结这方面的研究不仅有利于提高对中高纬大气系统影响热带系统的认识,也有助于改善天气气候预测技巧。

1 春季AO对ENSO的影响

1.1 春季 AO 影响随后冬季 ENSO 的物理过程

图1给出标准化的春季AO指数和随后冬季Niño3.4指数的时间序列以及标准化春季AO指数回归的海表面温度(SST)异常场。从图1中可以看到,春季AO变化与随后冬季赤道中东太平洋海温异常存在显著的联系。当春季AO处于正(负)位相时,随后冬季赤道中东太平洋往往会发生El Niño(La Niña)。Nakamura等^[37]指出,当春季AO处于正位相时,赤道西太平洋出现显著的西风异常,该西风异常在随后的夏季和秋季向东扩张,进而触发El Niño的发生。Nakamura等^[38]认为,在春季AO高值年,赤道西太平洋西风异常的出现与东亚寒潮爆发频次偏多有关;在春季AO高值年,东亚地区的寒潮爆发频次偏多,寒潮爆发向南到达热带西北太平洋后会频繁触发该地区的对流活动,进而大气对热带西太平洋地区的对流加热产生Matsuno-Gill响应^[39-40],赤道西太平洋两侧出现两个异常气旋,从而产生赤道西太平洋的西风。但是,前人研究认为在AO高值年,东亚地区的寒潮爆发频次偏少^[12, 17],因此用寒潮解释赤道西风异常的出现与前人的研究存在矛盾。同时,前人研究发现东亚寒潮事件的发生与西伯利亚高压的强度有关,只有当西伯利亚高压达到一定强度时,东亚寒潮事件才有可能发生^[41-42]。通过计算春季AO指数与前冬和同期春季西伯利亚高压指数的相关系数,发现它们之间为负相关,与以往研究结果一致^[17]。这说明,春季AO处于高值年时,西伯利亚高压偏弱,因此东亚寒潮爆发频次趋向于偏少^[12, 17, 41-42]。而春季AO高值年时,赤道西太平洋西风异常出现的物理过程仍不清楚。

Chen等^[43]进一步分析了春季AO影响随后冬季ENSO的物理过程。研究表明,春季AO并不是通过寒潮活动而是通过北太平洋地区的天气尺度波动和平均流之间的相互作用形成赤道西太平洋的西风异常。在春季AO高年,东亚—北太平洋中纬度地区的西风减弱,西风减弱伴随着天气尺度波动的减弱。天气尺度波动异常反馈给平均流,在副热带北太平洋地区产生气旋性环流异常和显著的大气加热异常^[44]。副热带北太平洋地区的大气加热异常对热带西太平洋西风异常的形成和维持起到重要的作用。赤道西太平洋的西风异常触发东传的暖开尔文波,使随后夏季和秋季赤道中东太平洋海温升高。海温升高后会通过皮叶克尼斯正反馈过程^[45]使赤道中东太平洋的暖海温异常得以维持和加强,最终导致随后冬季El Niño的发生。最近Chen等^[46]的个例分析研究指出,春季北极涛

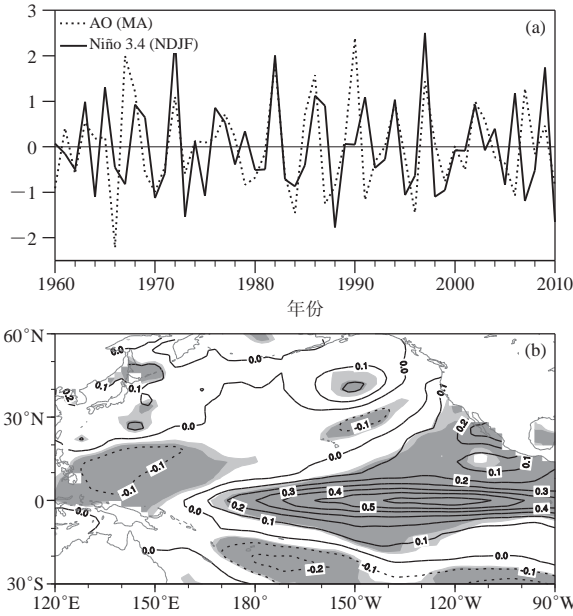


图1 (a) 标准化的春季(3—4月平均)AO指数和随后冬季(11—次年2月平均)Niño3.4指数; (b) 春季AO指数回归的随后冬季热带太平洋海温(单位: °C)异常(图b中浅色和深色阴影分别表示海温异常通过90%和95%信度检验)^[43]

Fig. 1 (a) Normalized time series of spring (averaged over March to April) AO index and the following-winter (averaged over November to February) Niño3.4 index; (b) Anomalies of SST (unit: °C) in the following winter obtained with regressions from the normalized spring AO index. Dark (light) shading in Fig. 1b indicates anomalies that are significantly different from zero at the 95% (90%) confidence level

动对2015—2016年超强厄尔尼诺的爆发起着非常重要的触发作用。这再次证实了春季北极涛动对随后冬季ENSO事件的影响。

1.2 春季AO影响随后冬季ENSO的年代际变化

研究发现, 春季AO与随后冬季ENSO之间的关系是不稳定的^[47]。图2给出了春季AO指数和随后冬季

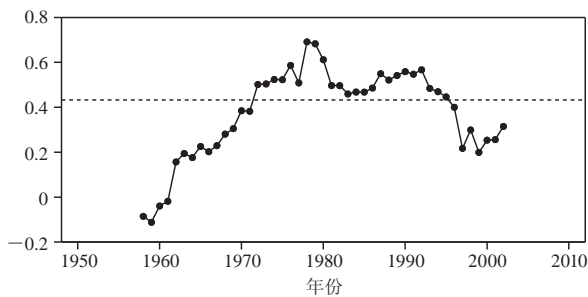


图2 春季AO指数和随后冬季Niño3.4指数的21年滑动相关(虚线表示相关系数通过95%信度检验)^[47]

Fig. 2 21-year sliding correlations between spring AO index and the following winter Niño 3.4 index. Dashed line indicates the correlation is significant at the 95% confidence level

Niño3.4指数的21年滑动相关结果。从图2可以看出, 20世纪70年代初之前和20世纪90年代中期之后, 春季AO对随后冬季ENSO的影响不显著。20世纪70年代初—90年代中期, 春季AO能对随后冬季ENSO事件的发生产生显著的影响。研究认为, 春季AO与ENSO关系在20世纪70年代初的年代际变化可能与春季北太平洋地区天气尺度波动(也称风暴轴)活动强度的年代际变化有关^[47]。春季北太平洋风暴轴活动强度在20世纪70年代初发生了一次显著的年代际变化: 70年代初之前, 春季北太平洋风暴轴活动强度较弱; 之后, 风暴轴活动显著增强。前人研究^[48-50]已证明, 在风暴轴强(弱)的年代, 天气尺度波动对平均流的反馈作用强(弱)。相比于20世纪70年代之前, 70年代之后春季北太平洋风暴轴强度显著增强, 从而与春季AO相关的北太平洋地区的波流相互作用强, 由此产生的赤道西太平洋西风异常也比较强。因此, 20世

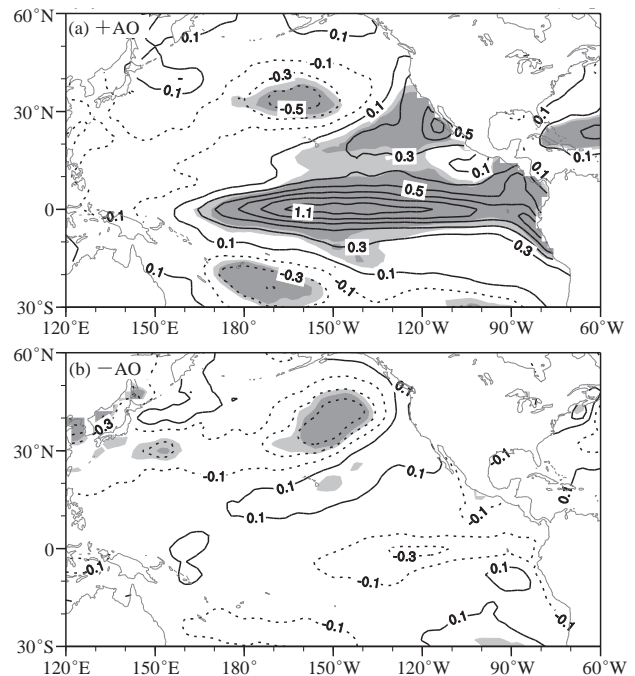


图3 1958—2012年春季AO指数高位相年(a)和低位相年(b)的随后冬季海温异常场的合成。图中等值线间隔为0.2°C。浅色和深色阴影分别表示海温与春季AO正常年的差异分别通过90%和95%信度检验(春季AO高低位相年以±0.5标准差为选择依据, 其余年份为春季AO正常年)^[51]

Fig. 3 Composite anomalies of SST in the following winter from (a) high and (b) low spring AO years for 1958-2012. The contour interval is 0.2°C. The dark (light) shading indicates anomalies significantly different from zero at the 95% (90%) level. The high (low) spring AO years are defined as those during which the normalized spring AO index is higher (lower) than 0.5 standard deviation above the mean, and the remaining spring AO years

纪70年代之后，春季AO与随后冬季ENSO之间的联系更加密切。

1.3 春季AO影响随后冬季ENSO的不对称性

研究^[51]发现，春季AO对ENSO的影响存在明显的不对称性。图3给出了1958—2011年春季AO指数高位相年和低位相年的随后冬季海温异常场的合成。春季AO高低位相年根据 ± 0.5 个标准差选出。根据此选择标准，春季AO高位相年有17年，春季AO低位相年有18年，其他年份归为春季AO正常年份。从图3可以看出，当春季AO处于高位相年时，随后冬季赤道中东

太平洋地区存在显著的正海温异常。值得强调的是，赤道中东太平洋地区的暖海温异常的振幅大于 1.1°C （图3a）；而当春季AO处于低位相年时，随后冬季赤道中东太平洋的负海温异常不显著（图3b）。另外，在17个春季AO高位相年中，有11年随后的冬季发生了El Niño事件；而18个春季AO低位相年中，只有5年随后的冬季发生La Niña事件。这说明，在春季AO为正位相的条件下，随后冬季发生El Niño事件的概率约为65%；然而，在春季AO为负位相的条件下，随后冬季发生La Niña的概率仅为28%。因此，比起La Niña，

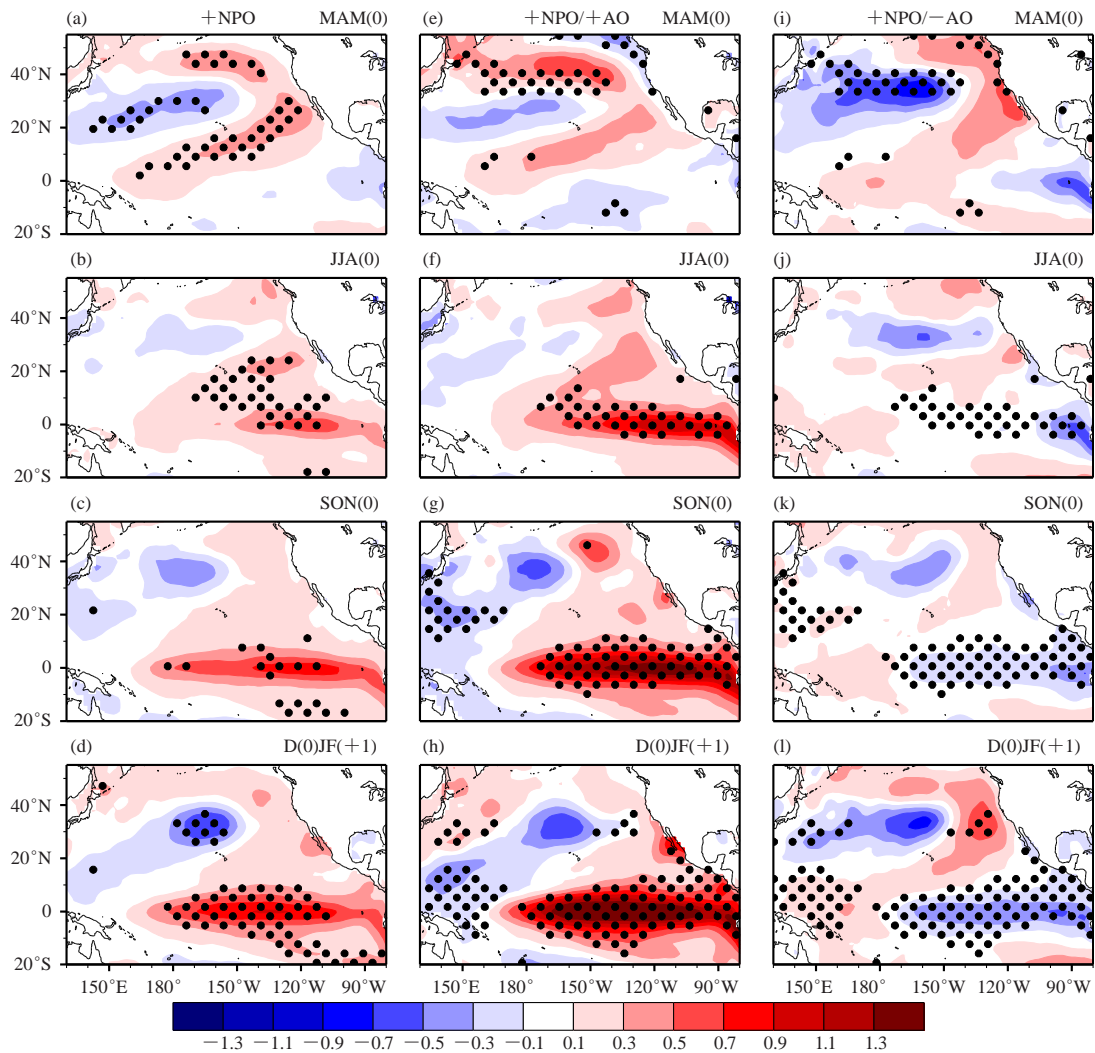


图4 冬季[ND(-1)JFM(0)]NPO指数高年(+NPO)随后春季(a),夏季(b),秋季(c)和冬季(d)海温异常的合成^[53]。(e-h)和(i-l)同(a-d),但分别为+NPO/+AO和+NPO/-AO年海温异常的季节演变^[58];(a)-(d)中打点区域表示+NPO年海温异常通过95%信度检验;(e)-(l)中打点区域表示+NPO/+AO年合成海温与+NPO/-AO年合成海温的差异通过95%信度检验(单位:°C)

Fig. 4 Composite anomalies of SST ($^{\circ}\text{C}$) in the following (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter corresponding to high NPO (+NPO) in the previous winter (Nov.–Mar.). (e–l) As same as in (a–d), but (e–h) corresponding to +NPO/+AO, and (i–l) to +NPO/-AO, respectively. Stippled areas denote that the anomalies are significantly different from zero at 95% confidence level in Figs. a–d; but in Figs. e–l denote the regions where anomalies for the +NPO/+AO years are significantly different from those for the +NPO/-AO years at 95% confidence level

春季AO对随后冬季El Niño事件的影响更加显著。研究认为，春季AO对ENSO影响的不对称性与春季AO相关的大气环流场在北太平洋地区的不对称有关。相比于春季AO低年，春季AO高年相关的北太平洋大气环流异常强度更强、位置更偏南，由此相关的波-流相互作用产生的赤道西太平洋纬向风异常更强，从而对随后冬季赤道中东太平洋海温的影响更加显著^[43]。

1.4 春季AO对“季节脚印机制”的调制作用

前人研究^[35-36]发现，冬季NPO可以通过“季节脚印机制”（seasonal footprinting mechanism）影响到下一个冬季ENSO事件的发生^[32-34, 52]；冬季NPO通过改变表面热通量影响到同期冬季北太平洋地区的SST异常，NPO相关的冬季北太平洋SST异常可以通过海气正反馈作用^[53]维持到次年的夏季。次年夏季大气场对NPO相关的SST异常产生Gill响应^[39-40]，在赤道两侧产生两个气旋性环流异常，产生赤道西太平洋西风，进而影响随后冬季的ENSO事件^[54-56]。Alexander等^[52]检测了海气耦合模式中NPO影响ENSO的季节脚印过程，该海气耦合模式由两倍NPO标准差相关的表面热通量驱动，结果显示有70%的模式试验能模拟出热带中东太平洋地区的海温增暖现象。Park等^[57]通过观测资料分析发现，当冬季NPO为正位相时，下一个冬季发生El Niño事件的概率仅为41%。这些结果说明，冬季NPO并不总能通过季节脚印机制过程导致下一个冬季El Niño事件的发生。Chen等^[58]研究揭示了春季AO对前冬NPO与下一个冬季El Niño之间的关系存在显著的调制作用（图4），发现只有当春季AO处于高值年时，冬季NPO高位相年才能触发下一个冬季El Niño事件。春季AO高（低）位相年，春季AO有关的海温异常可以增强（减弱）前冬NPO高年在副热带北太平洋强迫出的春季海温异常，从而增强（减弱）之后夏季通过海气相互作用形成的赤道西太平洋西风异常，最终增强（减弱）随后冬季赤道中东太平洋NPO相关的海温异常。

2 其他月份AO对后期赤道中东太平洋海温的影响

2.1 11月AO对随后春季和夏季赤道中东太平洋海温的影响

前面的分析指出春季AO对随后冬季热带中东太平洋的海温存在显著的影响。当春季AO处于它的正位相时，随后冬季往往会发生厄尔尼诺事件。然而，关于AO与热带太平洋海温关系的研究，仍有一些科学问题尚不清楚。比如，其他月份AO的变率是否对热带中东太平洋海温的变化也存在显著的影响？如果

存在，那么它们之间联系的物理过程是怎样的？我们的研究进一步发现，除了春季AO外，11月份AO的变化也能对后期春季和夏季热带中东太平洋海温产生显著的影响。

图5给出了月平均AO指数与Niño3.4指数的超前相关系数分布^[59]，可以看出，除了春季AO（3—4月平均）指数与随后冬季赤道中东太平洋海温存在显著相关外，11月AO与随后春季和夏季赤道中东太平洋的海温也存在显著的相关。图6给出了11月AO指数相关的海温和850hPa风场异常的时间演变，可以看出，当11月份AO为正（负）位相时，随后春季和夏季热带中东太平洋地区往往出现海温正（负）异常。因此，11月AO指数可以作为春季和夏季赤道中东太平洋的海温异常的一个重要的前期预报因子。与春季AO类似，天气尺度波与平均流之间的相互作用对北太平洋地区11月AO相关的大气环流异常的形成起到关键的作用。在11月AO正位相年，副热带北太平洋地区存在显著的气旋环流和大气加热异常。大气加热对热带西北太平洋地区异常西风的形成和维持起到重要的作用。热带西太平洋地区异常西风通过海气正反馈过程向东传播，导致随后春季和夏季热带中东太平洋地区出现显著的异常暖海温^[45]。

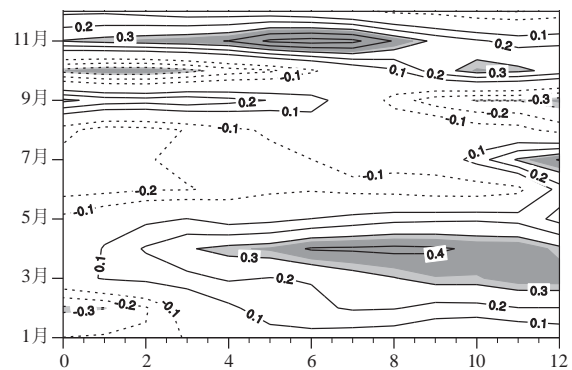


图5 月平均AO指数和Niño3.4指数的超前相关系数分布。纵坐标表示AO所在的月份。横坐标的数字为Niño3.4指数落后AO指数的月份数（浅色和深色阴影分别表示相关系数通过90%和95%信度检验）^[59]

Fig. 5 Lead-lag correlation coefficients between the monthly AO index and the Niño 3.4 index. Positive (negative) lag indicates that the AO index leads (lags) the Niño 3.4 index. The dark (light) shading indicates the correlation over the 95% (90%) confidence level

2.2 AO影响赤道中东太平洋海温的季节依赖性

月平均AO指数与Niño3.4指数的超前相关系数分布（图5）已展示了哪些月份的AO对随后赤道中东太平洋海温存在影响。除了春季（3—4月平均）AO和11月AO外，其他月份的AO不能对随后季节赤道中东

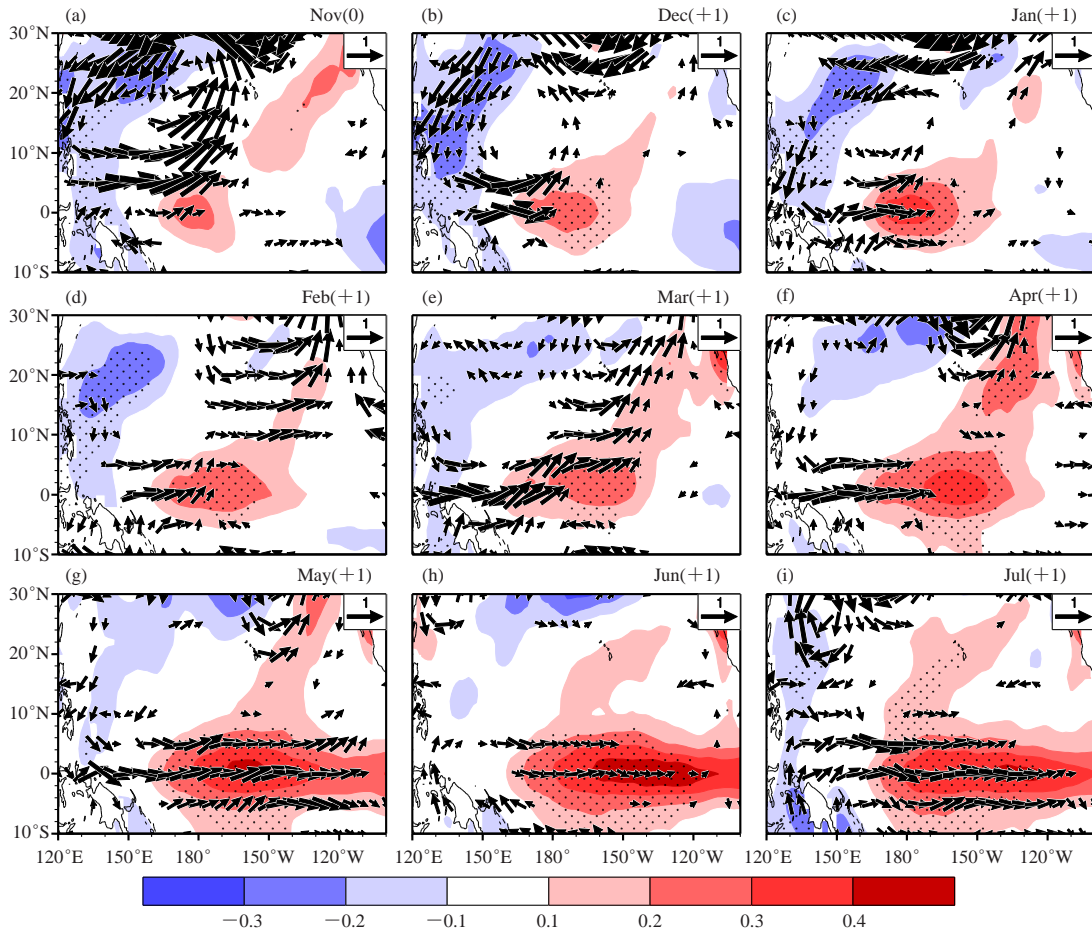


图6 11月AO指数对海温(填色,单位:℃)和850hPa风场(矢量,单位:m/s)的线性回归图^[59]
(a) - (i) 依次为同期11月、后期的12—7月(打点区域表示海温异常通过95%信度检验)

Fig. 6 Anomalies of SST (shadings, °C) and horizontal winds at 850 hPa (vectors, m/s) obtained by regression upon the normalized AO index in Nov (0): for (a) Nov (0), (b) Dec (0), (c) Jan (+1), (d) Feb (+1), (e) Mar (+1), (f) Apr (+1), (g) May (+1), (h) Jun (+1), and (i) Jul (+1). Stippled areas indicate where the anomalies are significantly different from zero at the 95% confidence level

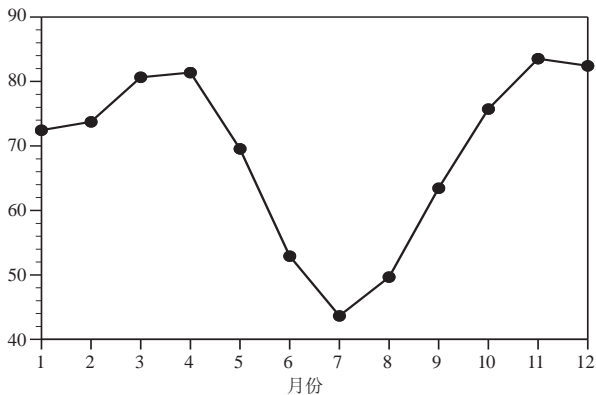


图7 北太平洋(35°—60°N, 150°E—140°W)风暴轴强度的年循环^[59](风暴轴定义为2~8d带滤波300hPa位势高度场的标准差,单位:m)

Fig. 7 Annual cycle of the North Pacific storm track activity (unit: m) at 300 hPa, averaged over the region of 35°—60°N and 150°E—140°W, and 1979—2011

太平洋的海温产生显著影响。AO影响随后季节赤道中东太平洋海温的关键因子是赤道西太平洋的西风异常。研究发现,春季AO和11月AO都能通过波-流相互作用触发赤道西太平洋的西风异常,但是在其他月份AO相关的赤道西风异常很弱。

图7进一步给出了北太平洋风暴轴活动强度的年循环,可以发现,北太平洋风暴轴活动存在两个峰值,恰好分别在11月和春季(3—4月)。研究已证明,风暴轴偏强的时候,天气尺度波动对平均流的反馈作用就更强,由此产生的赤道西风也更强。因此,相对于其他月份,11月和春季北太平洋风暴轴活动更强,对应的波流相互作用更强,从而AO相关的波流相互作用产生的赤道西太平洋西风异常更强。这就解释了为什么只有春季(3—4月平均)AO和11月AO对随后月份的赤道中东太平洋的海温存在显著的影响。

响^[58]。需要注意的是，AO空间结构的差异可能也会影响AO的信号能否传到热带地区。

3 总结和讨论

本文总结了最近一些关于AO影响ENSO的最新研究进展。主要有以下的最新研究成果：

1) 揭示了春季AO影响随后冬季ENSO的物理过程。春季AO通过北太平洋地区的波流相互作用产生赤道西太平洋的西风异常，进而对随后冬季ENSO事件产生影响。

2) 揭示了春季AO与随后冬季ENSO之间的关系在20世纪70年代初发生了一次显著的年代际变化；在年代际转变之前，春季AO对随后冬季ENSO的影响不显著，之后春季AO对ENSO事件的发生具有显著的作用。北太平洋风暴轴活动强度的年代际变化是AO-ENSO关系在20世纪70年代初变化的重要原因之一。

3) 揭示了春季AO对随后冬季ENSO影响的不对称性。只有当春季AO处于正位相时，它对随后冬季赤道中东太平洋的海温才有显著的影响。

4) 揭示了春季AO对NPO和ENSO的关系存在显著的调制作用。当春季AO处于正（负）位相时，前冬NPO对后期冬季El Niño的影响（不）显著。

5) 揭示了11月AO对随后春季和夏季赤道中东太平洋海温的影响。与春季AO类似，11月AO通过北太平洋地区的波-流相互作用产生赤道西太平洋的西风异常，进而通过海气相互作用和海洋动力过程对随后春季和夏季赤道中东太平洋的海温产生影响。

6) 揭示了AO影响随后季节赤道中东太平洋海温的季节依赖性。AO影响赤道中东太平洋海温的季节依赖性与北太平洋风暴轴强度的季节演变有关。只有当北太平洋风暴轴活动强度比较强时，AO才能激发赤道西太平洋的西风异常，进而对随后季节赤道中东太平洋海温产生影响。

虽然AO影响ENSO的研究取得了一些研究进展，但是仍然有一些问题值得进一步的研究：1) 目前关于AO影响ENSO的研究大都是采用观测资料分析，耦合模式中AO与ENSO的关系值得进一步的分析；2) 目前研究集中在AO对ENSO的影响。ENSO是否对后期的AO存在影响？若存在，影响的物理过程也值得进一步的探究。

参考文献

[1] Thompson D W, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 1297-1300.
[2] Thompson D W, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. *J Climate*, 2000, 13: 1000-1016.

[3] Hartmann D L, Lo F. Wave-driven zonal flow vacillation in the Southern Hemisphere. *J Atmos Sci*, 1998, 55: 1303-1315.
[4] Limpasuvan V, Hartmann D L. Eddies and the annular modes of climate variability. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 3133-3136.
[5] Limpasuvan V, Hartmann D L. Wave-maintained annular modes of climate variability. *J Climate*, 2000, 13: 4414-4429.
[6] Lorenz D J, Hartmann D L. Eddy-zonal flow feedback in the Southern Hemisphere. *J Atmos Sci*, 2001, 58: 3312-3327.
[7] Lorenz D J, Hartmann D L. Eddy-zonal flow feedback in the Northern Hemisphere winter. *J Climate*, 2003, 16: 1212-1227.
[8] Thompson D W, Lee S, Baldwin M P. Atmospheric processes governing the northern hemisphere annular mode/North Atlantic oscillation. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 2002, 134: 81-112.
[9] Chen W, Li T. Modulation of northern hemisphere wintertime stationary planetary wave activity: East Asian climate relationships by the Quasi-Biennial Oscillation. *J Geophys Res*, 2007, 112, D20120.
[10] Chen W, Zhou Q. Modulation of the Arctic Oscillation and the East Asian winter climate relationships by the 11-year solar cycle. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 217-226.
[11] Chen S, Chen W, Wei K. Recent trends in winter temperature extremes in eastern China and their relationship with the Arctic Oscillation and ENSO. *Adv Atmos Sci*, 2013a, 30: 1712-1724.
[12] Jeong J H, Ho C H. Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 2005, 32. doi: 10.1029/2005GL023024.
[13] Chen S, Chen W, Wu R. An interdecadal change in the relationship between boreal spring Arctic Oscillation and the East Asian Summer Monsoon around the early 1970s. *J Climate*, 2015, 28: 1527-1542.
[14] Gong D Y, Ho C H. Arctic oscillation signals in the East Asian summer monsoon. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4066.
[15] Gong D Y, Yang J, Kim S J, et al. Spring Arctic Oscillation-East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western North Pacific. *Clim Dyn*, 2011, 37: 2199-2216.
[16] Chen W, Yang S, Huang R H. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon. *J Geophys Res*, 2005, D14110.
[17] Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2073-2076.
[18] Wu, B, Wang J. Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 1897.
[19] Miller A J, Zhou S, Yang S K. Relationship of the Arctic and Antarctic oscillations to the outgoing longwave radiation. *J Climate*, 2003, 16: 1583-1592.
[20] Choi K S, Byun H R. Possible relationship between western North Pacific tropical cyclone activity and Arctic Oscillation. *Theor Appl Climatol*, 2010, 100: 261-274.
[21] Choi K S, Wu C C, Byun H R. Possible connection between summer tropical cyclone frequency and spring Arctic Oscillation over East Asia. *Clim Dyn*, 2012, 38: 2613-2629.
[22] Larson J, Zhou Y P, Higgins R W. Characteristics of landfalling tropical cyclones in the United States and Mexico: Climatology and interannual variability. *J Climate*, 2005, 18: 1247-1262.
[23] Zhou S, Miller A J. The interaction of the Madden-Julian oscillation and the Arctic Oscillation. *J Climate*, 2005, 18: 143-159.
[24] 胡森, 龚道溢, 毛睿. 2-4月北极涛动对中西太平洋ITCZ活动的可能影响. *热带气象学报*, 2013, 29(1): 55-65.
[25] Huang R, Chen W, Yang B, et al. Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 407-424.
[26] Wang B, Wu R, Fu X. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Climate*, 2000, 13: 1517-1536.
[27] 陈文. El Niño和La Niña事件对东亚冬、夏季风循环的影响. *大气科学*, 2002, 26(5): 595-610.
[28] Schopf P S, Suarez M J. Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 549-566.

- [29] Battisti D S, Hirst A C. Interannual variability in a tropical atmosphere-ocean model: influence of the basic state, ocean geometry and nonlinearity. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 1687-1712.
- [30] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: conceptual model. *J Atmos Sci*, 1997, 54: 811-829.
- [31] Li C Y. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño Events. *Adv Atmos Sci*, 1990, 7: 36-46.
- [32] Vimont D J, Battisti D S, Hirst A C. Footprinting: A seasonal connection between the tropics and mid-latitudes. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 3923-3926.
- [33] Vimont D J, Wallace J M, Battisti D S. The seasonal footprinting mechanism in the Pacific: Implications for ENSO. *J Climate*, 2003, 16: 2668-2675.
- [34] Vimont, D J, Alexander M, Fontaine A. Midlatitude excitation of tropical variability in the Pacific: the role of thermodynamic coupling and seasonality. *J Climate*, 2009, 22: 518-534.
- [35] Rogers J C. The north Pacific oscillation. *J Climatol*, 1981, 1: 39-57.
- [36] Walker G T, Bliss E. World weather. *V Mem Roy Meteor Soc*, 1932, 4: 53-84.
- [37] Nakamura T, Tachibana Y, Honda M, et al. Influence of the Northern Hemisphere annular mode on ENSO by modulating westerly wind bursts. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L07709.
- [38] Nakamura T, Tachibana Y, Shimoda H. Importance of cold and dry surges in substantiating the NAM and ENSO relationship. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L22703.
- [39] Matsuno T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J Meteor Soc Japan*, 1966, 44: 25-43.
- [40] Gill A E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 447-462.
- [41] Ding Y H. Monsoons over China. New York: Springer, 1987.
- [42] Zhang Y, Wang W C. Model-simulated northern winter cyclone and anticyclone activity under a greenhouse warming scenario. *J Climate*, 1997, 10: 1616-1634.
- [43] Chen S, Yu B, Chen W. An analysis on the physical process of the influence of AO on ENSO. *Clim Dyn*, 2014, 42: 973-989.
- [44] Lau N C. Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in circulation pattern. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 2718-2743.
- [45] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific. *Mon Wea Rev*, 1969, 97: 163-172
- [46] Chen S, Wu R, Chen W, et al. Genesis of westerly wind bursts over the equatorial western Pacific during the onset of the strong 2015-16 El Niño. *Atmos Sci Lett*, 2016, 17:384-391.
- [47] Chen S, Yu B, Chen W. An interdecadal change in the influence of the spring Arctic Oscillation on the subsequent ENSO around the early 1970s. *Clim Dyn*, 2015, 44: 1109-1126.
- [48] Jin F F. Eddy-induced instability for low-frequency variability. *J Atmos Sci*, 2010, 67: 1947-1964.
- [49] Jin F F, Pan L, Watanabe M. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part I: A linear closure. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 1677-1694.
- [50] Jin F F, Pan L, Watanabe M. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part II: A theory for low-frequency modes. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 1695-1708.
- [51] Chen S, Chen W, Yu B. Asymmetric influence of boreal spring Arctic Oscillation on subsequent ENSO. *J Geophys Res: Atmos*, 2014, 119: 135-150.
- [52] Alexander M A, Vimont D J, Chang P, et al. The impact of extratropical atmospheric variability on ENSO: testing the seasonal footprinting mechanism using coupled model experiments. *J Climate*, 2010, 23: 2885-2901.
- [53] Xie S P, Philander S G H. A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific. *Tellus Ser A-Dyn Meteorol Oceanol*, 1994, 46: 340-350.
- [54] Barnett T, Dümenil L, Schlese U, et al. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 661-686.
- [55] Huang R, Zhang R, Yan B. Dynamical effect of the zonal wind anomalies over the tropical western Pacific on ENSO cycles. *Sci Chin Ser D: Earth Sci*, 2001, 44: 1089-1098.
- [56] Weisberg R H, Wang C. A Western Pacific Oscillator Paradigm for the El Niño-Southern Oscillation. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 779-782.
- [57] Park J Y, Yeh S W, Kug J S, et al. Favorable connections between seasonal footprinting mechanism and El Niño. *Clim Dyn*, 2013, 40: 1169-1181.
- [58] Chen S, Chen W, Yu B, et al. Modulation of the seasonal footprinting mechanism by the boreal spring Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 6384-6389.
- [59] Chen S, Wu R, Chen W, et al. Influence of the November Arctic Oscillation on the subsequent tropical Pacific sea surface temperature. *Int J Climatol*, 2015, 35: 4307-4317.

谢尚平教授获AMS斯维尔德鲁普金质奖

■ 本刊编辑部



2016年9月30日，美国气象学会（AMS）公布了2017年度的获奖名单。中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室和海洋与大气学院“千人计划”谢尚

平教授获得斯维尔德鲁普金质奖章（Sverdrup Gold Medal），成为该奖项自设立以来第40位获得者，也是首位获得该奖的华人科学家。谢尚平教授主要从事海气相互作用和气候变化研究工作，是该领域的国际知名专家。AMS在授奖公告里指出，谢尚平教授“揭示了海洋-大气耦合反馈过程及其在气候变化中的作用，在该领域做出了杰出贡献”。此前，谢尚平教授曾于2014年入选汤森路透集团（Thomson Reuters）高引用学者（Highly-Cited Researcher），并于2016年7月入选美国地球物理联合会士（AGU Fellow）。此次荣获Sverdrup Gold Medal，是国际学术界对他在海洋-大气相互作用及气候变化领域多年杰出工作的再次褒奖。

集合四维变分资料同化研究进展

刘柏年^{1, 2} 皇群博^{1, 2} 张卫民¹ 曹小群¹ 赵军¹ 赵延来¹

(1 国防科学技术大学海洋科学与工程研究院, 长沙 410073; 2 国防科学技术大学计算机学院, 长沙 410073)

摘要: 背景误差协方差矩阵的精确定义是构建高水平资料同化系统的先决条件。传统四维变分资料同化(4D-Var)方法将观测资料处理转化成以动力模式为约束的泛函极小化问题, 通过调整控制变量, 使指定时间窗口内由控制变量得到的模式预报结果与实际观测资料之间的偏差达到最小。该方法在同化窗口内可以利用模式的切线性和伴随隐式地改变背景误差协方差, 能够在某种程度上满足快速发展的天气过程。但是大部分业务中心的四维变分资料同化系统仍采用静态化的背景误差协方差矩阵模型来缓解背景误差协方差矩阵的维度问题, 即矩阵维数远大于可用信息量。随着计算机科学的迅猛发展, 维度问题可以进一步通过集合的方法缓解。集合四维变分资料同化就是基于这一目标通过构造多个能反映出背景误差协方差分布特征的样本集合来弥补可用信息量的不足。该方法目前已在ECMWF、Mete-France等业务中心实现业务化, 为确定性四维变分资料同化系统提供流依赖背景误差协方差估计。简要介绍了集合四维变分资料同化方法的基本原理; 其次以ECMWF为例, 概述了四维变分资料同化系统的业务现状, 重点阐述了系统在开发过程中需要解决的扰动、滤波、校正等一些关键技术; 最后探讨集合四维变分资料同化系统目前存在的问题和未来可能的研究方向。

关键词: 背景误差协方差矩阵, 集合四维变分资料同化, 扰动, 流依赖

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.002

Research Progress in Ensemble Four-Dimensions Variational Data Assimilation

Liu Bainian^{1,2}, Huang Qunbo¹, Zhang Weimin¹, Cao Xiaoqun¹, Zhao Jun¹, Zhao Yanlai¹

(1 Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073

2 College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: Accurate background error covariance is the foundation for all advanced data assimilation systems. For four dimensions data assimilation (4D-Var), assimilating the observation data is converted to a question of cost function minimization which is constricted by atmosphere dynamic model. By adjusting the control vectors, the distance between model trajectory and real time observations reached its minimal value over whole assimilation time window. As background error covariance evolves according to the adjoint and tangent linear model, it can adapt to rapid development weather. However, most of operational 4D-Var systems still adopt semi-climatic background error covariance model compromised by huge dimensionality, which can't be exactly defined with all available information. As the rapid development of computer science, the problem of dimensionality can be released by ensemble method. Ensemble four dimensionality data assimilation (En4DVar) employed several independent perturbed analysis forecast cycles to remedy the limited information synchronously. In this scheme, flow-dependent background error covariance can be estimated from the differences between ensemble members. Several famous numeric prediction centers, such as ECMWF, Mete-France, adopted it to provide flow-dependend background error covariance for the high-resolution determined 4D-Var system. In this thesis, the basic theory of the En4DVar method is demonstrated briefly, followed by a description of currently application at ECMWF, and focusing on the disturbing, filtering, calibration as well as other key techniques for helping to improve the precision of estimates. The last part presents an investigation of some issues in current operation and possibly future research fields in the En4DVar.

Keywords: background error covariance, ensemble, four-dimensional data assimilation, disturb, flow-dependent

收稿日期: 2015年5月21日; 修回日期: 2015年7月11日
第一作者: 刘柏年(1985—), Email: bnliu@nudt.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金项目(41375113, 41105063, 41475094, 41305101)

0 引言

大气作为一种典型的混沌系统, 其发展和变化对初值非常敏感。Bjerknes等^[1]曾把数值天气预报归结为一个典型的偏微分方程“初/边值问题”, 指出要得到一个准确的天气预报必须要满足两个条件: 一

是数值预报模式能够足够准确地模拟天气系统的演变过程,即对控制大气运动的物理规律有较好地描述;二是模式初值能够足够精确地反映初始时刻的大气状态。所以好的初始场越来越被认为是整个数值预报领域的一个重要方面,初始场的精确性直接影响着数值天气预报的成败。资料同化方法应运而生成为估计大气状态的主要工具,它定义为利用一切可用的信息估计出尽可能精确的大气或海洋流体状态的过程^[2],这里的一切可用信息除了各种仪器设备观测到的气象观测数据以外,还包括模式对当前大气状态的短时预报(背景场)以及各自的误差信息^[3]。1949年, Panofsky^[4]第一次提出多项式插值的资料同化方法,即用一个低阶的多项式拟合分析区域内一小范围观测值,并尝试引入动力约束来协调风场和质量场,但由于区域多项式拟合不稳定,导致了分析场在拟合区域之间存在不连续。随后,资料同化方法经历了逐步订正^[5]、最优插值^[6-7]、三/四维变分^[8-14]、卡尔曼滤波和集合卡尔曼滤波^[15-16]等发展阶段。与其他资料同化方法相比,四维变分资料同化具有以下几个优势:1)在同化周期内可以同化不同时刻、不同地区、不同性质的各种气象资料而不需要对时间做近似^[17],通过设计非线性观测算子同化日益丰富的非常规资料^[18-19];2)将动力约束和资料约束纳入同一方程,由动力模式同化观测资料,反过来观测资料又优化动力模式的要素场和某些参数,这样在动力模式和观测资料之间建立起一种可信又可观的联系,不但同化效果好,而且同化的结果满足动力约束可直接输入模式进行预报^[20],可以在同化框架中比较自然地引入重力波控制和观测资料质量控制等技术;3)通过预报模式协方差矩阵、背景误差协方差矩阵、观测误差协方差矩阵有效控制各种误差,利用切线性和伴随模式隐式演变同化窗口内的预报误差协方差,这对于快速发展天气过程使用观测资料十分重要。基于以上因素,目前国际上大部分先进业务中心仍采用四维变分资料同化方法^[21]。

背景误差协方差矩阵的精确定义是构建高水平资料同化系统的先决条件^[22]。在四维变分资料同化框架中,背景误差协方差矩阵^[23-25]的精度很大程度上决定了分析场的准确度,也就决定了数值预报的整体水平。一方面,背景误差协方差决定了背景信息在分析场中所占的权重,ECMWF评估各种信息在分析场中所占的贡献,同化系统得到的分析场信息大约只有15%来自同化窗口内的观测资料,其余85%是来自背景场^[26];另一方面,背景误差协方差对信息传播、信息光滑、平衡关系和流型结构建立等具有十分重要的

作用,它决定了观测信息如何在模式空间上传递,并通过平衡关系将观测信息从一个变量传递给其他变量^[23-24]。由于背景误差协方差矩阵对分析场的质量和预报技巧起关键作用,世界上各数值天气预报中心在建立变分同化系统的过程中都十分注重背景误差协方差模型的设计与统计参数的估计^[11-13, 27-30]。但背景误差协方差估计同时也是一项十分困难的工作。首先是背景误差协方差矩阵的维数特别巨大,如分辨率为25km的全球分析预报系统所需的背景误差协方差矩阵元素个数达到了 10^{16} 以上;其次是我们无法获取大气环境的真实状态,也就是不可能直接得到完整的背景误差。在当前大多数的业务变分同化系统,尤其是全球变分同化系统中为了避免直接表示,通常是从物理、统计和计算效率等方面考虑构造简化和近似的背景误差协方差模型,如假定误差相关函数满足均匀性、各向同性和静态假设^[23-24]。然后,在此基础上利用NMC、更新向量法、集合方法等统计出平衡关系的回归系数和误差相关函数^[31-35]。但是这种处理忽略了背景误差协方差中的非均匀、各向异性和时变等特性,在处理锋面、台风等快速发展系统时尤为明显。

Fisher^[22]和Fisher等^[10]在全球四维变分资料同化系统中引入非正交小波基,有效解决了背景误差协方差的非均匀、各项异性表征问题。Zhang等^[35]也在YH4DVAR系统中构建了基于小波的背景误差协方差模型,使该模型具备了各项异性、垂直相关和水平相关不可分,背景误差相关具有空间变化等特征。但是模型中的基于历史样本统计的方差项和水平相关函数仍然是一个时间常量,无法反映快速发展的天气系统。针对这一问题,Fisher^[22]基于集合卡曼滤波的思想提出了集合同化概念,即同时运行多个相互独立的同化循环,每个循环的背景场、观测资料及SST输入是在控制的基础上叠加了服从各自误差分布的扰动,利用集合同化的样本就可以实时估计出背景误差方差,这即为集合四维变分资料同化方法(En4DVar)的雏形。En4DVar集合资料同化能够精确估计流依赖背景误差协方差,被认为是解决变分资料同化主要问题的有效方法,目前已经在国际上少数业务中心(如ECMWF^[22, 36-37]和法国气象局(Mete-France)^[38-39])实现了业务化,其业务实现对确定性四维变分系统的水平提升起到了至关重要的作用^[36-37]。

本文简要介绍了En4DVar的基本原理及其在ECMWF和Mete-France的业务应用情况,归纳了En4DVar的业务化实现过程中面临的主要问题及相应的解决方法,旨在为其他业务中En4DVar的实现提供

理论参考。随着研究的深入，En4DVar在不断被完善，应用也在不断被拓展，En4DVar后续的发展将在文章最后一部分讨论。

1 En4DVar的基本原理

En4DVar的目的是统计具有流型特征的背景误差协方差，即从前一时刻起报到分析时刻的短时预报与大气真值之间的误差协方差。背景误差的主要来源包括大气观测误差和积分模式误差。En4DVar的思想源自扰动观测的集合卡曼滤波，在观测资料、海表温度(SST)和预报模式上叠加来自各自误差分布的扰动，构造多个能反映背景误差分布特性的分析-预报样本集合。利用数据同化集合(EDA)成员之间的差别可以统计所需的背景误差协方差。图1为En4DVar的扰动分析-预报系统示意图，相对于控制系统，扰动系统采用相同的资料同化模块，但是通过扰动预报模式的随机物理过程来隐式地扰动背景场，而对观测资料和侧边界的扰动则是直接进行。事实上，背景场也可以采用直接扰动的方式，后面2.2节将会详细讨论。

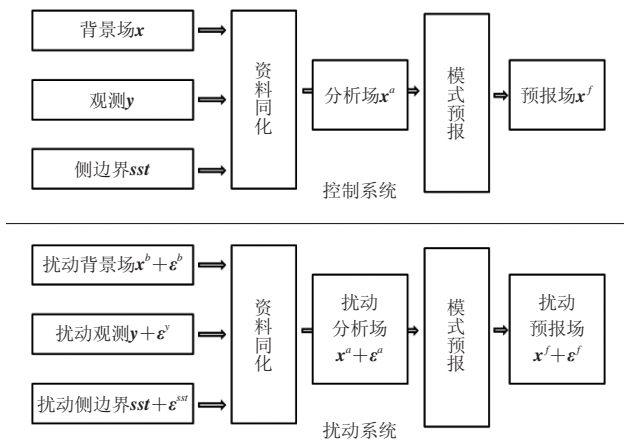


图1 En4DVar的扰动分析-预报系统示意图

Fig. 1 Schematic illustration showing the analysis-forecast employed in En4DVar

短时的分析-预报可以被看成是一个弱非线性系统，对图1中的控制系统可以用下式表示：

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k^a &= \mathbf{x}_k^b + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k^b) \\ \mathbf{x}_{k+1}^b &= \mathbf{M}_k (\mathbf{x}_k^a) \end{aligned} \quad (1)$$

其中， \mathbf{K} 表示增益矩阵， k 代表分析-预报循环步序号， \mathbf{y}_k 是观测矢量， \mathbf{x}_k^a 表示第 k 时间步的分析场， \mathbf{x}_k^b 是背景场，观测算子 \mathbf{H}_k 将模式空间的变量转换到观测空间。 \mathbf{M} 是预报模式，第 k 步的分析误差协方差矩阵 \mathbf{P}_k^a 和背景误差协方差矩阵 \mathbf{P}_k^b 满足下式：

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k^a &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^b (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k)^\top + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^\top \\ \mathbf{P}_{k+1}^b &= \mathbf{M}_k \mathbf{P}_k^a \mathbf{M}_k^\top + \mathbf{Q}_k \end{aligned} \quad (2)$$

式中， \mathbf{R}_k 和 \mathbf{Q}_k 分别表示观测、模式误差协方差矩阵， \mathbf{I} 是单位矩阵。

扰动系统在控制的基础上考虑了观测和模式的不完美性，并采用扰动的方式来构造一个可能输入状态。对于扰动系统，数学表达形式为：

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_k^a &= \tilde{\mathbf{x}}_k^b + \mathbf{K}_k (\tilde{\mathbf{y}}_k + \boldsymbol{\eta}_k - \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{x}}_k^b) \\ \tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^b &= \mathbf{M}_k (\tilde{\mathbf{x}}_k^a) + \boldsymbol{\xi}_k \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)与式(1)相减可得出添加的扰动满足：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_k^a &= \boldsymbol{\varepsilon}_k^b + \mathbf{K}_k (\boldsymbol{\eta}_k - \mathbf{H}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k^b) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1}^b &= \mathbf{M}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k^a + \boldsymbol{\varsigma}_k \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $\boldsymbol{\varepsilon}_k^a = \tilde{\mathbf{x}}_k^a - \mathbf{x}_k^a$ ， $\boldsymbol{\varepsilon}_k^b = \tilde{\mathbf{x}}_k^b - \mathbf{x}_k^b$ 分别代表两个系统的分析、预报场之间的差别。假定式(3)中叠加的扰动 $\boldsymbol{\eta}_k$ 和 $\boldsymbol{\xi}_k$ 分别服从协方差矩阵 \mathbf{R}_k 和 \mathbf{Q}_k 的分布，则扰动系统的分析、预报误差协方差矩阵的演化公式为：

$$\begin{aligned} \overline{\boldsymbol{\varepsilon}_k^a (\boldsymbol{\varepsilon}_k^a)^\top} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \overline{\boldsymbol{\varepsilon}_k^b (\boldsymbol{\varepsilon}_k^b)^\top} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k)^\top \\ &\quad + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^\top \end{aligned} \quad (5)$$

$$\overline{\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1}^b (\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1}^b)^\top} = \overline{\boldsymbol{\varepsilon}_k^a (\boldsymbol{\varepsilon}_k^a)^\top} (\mathbf{M}_k)^\top + \mathbf{Q}_k$$

对比控制和扰动系统的协方差矩阵演化式可以看出，如果在分析-预报循环步 m 时满足 $\overline{\boldsymbol{\varepsilon}_m^b (\boldsymbol{\varepsilon}_m^b)^\top} = \mathbf{P}_m^b$ ，则对于所有 $k \geq m$ 步都满足 $\overline{\boldsymbol{\varepsilon}_k^a (\boldsymbol{\varepsilon}_k^a)^\top} = \mathbf{P}_k^a$ 和 $\overline{\boldsymbol{\varepsilon}_k^b (\boldsymbol{\varepsilon}_k^b)^\top} = \mathbf{P}_k^b$ 。

上述理论表明，如果在控制系统的基础上叠加的观测和模式扰动分别是真实的观测误差、模式协方差中独立取样得到，则基于扰动构造的分析-预报集合，利用成员间的差别可以统计出流依赖的背景误差协方差。事实上，在系统启动时刻，式(3)中的背景场 $\tilde{\mathbf{x}}_k^b=0$ 还没加入扰动信息，即 $\boldsymbol{\varepsilon}_k^b = \tilde{\mathbf{x}}_k^b - \mathbf{x}_k^b=0$ 。但是这并不影响 $\boldsymbol{\varepsilon}_k^a (\boldsymbol{\varepsilon}_k^a)^\top$ 收敛于 \mathbf{P}_k^a 的结论。可以将两个不同的 $\boldsymbol{\varepsilon}_0^b$ 经扰动系统演化后的差值定义为 δ ，两个不同的 \mathbf{x}_0^b 经控制系统演化后的差值定义为 Δ ，很容易证明 δ 与 Δ 是等价的，即收敛性不受初值状态 \mathbf{x}_0^b 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_0^b$ 的影响。文献[40]研究了集合资料同化系统冷启动 $\mathbf{x}_0^b = \boldsymbol{\varepsilon}_0^b=0$ 的收敛性，结果表明，对于500hPa的位势高度，全球集合离散度能在一周左右达到渐进值。

综上所述，如果观测、模式及其他输入量的扰动服从各自误差协方差的真实分布，则一周后的集合离散度能正确表征出分析、背景误差方差。这即为集合四维变分资料同化的基本理论依据。业务中为了使集合离散度处于收敛状态，En4DVar往往与业务高分辨率4D-Var系统同时不间断地往前循环推进。

2 En4DVar的发展及业务现状

目前，ECMWF、Mete-France等中心已成功实现

了En4DVar的业务化运营。Fisher^[22]首次提出了集合资料同化的思想，扰动短期预报场在生成过程中的各个环节，来表征短期预报场的主要误差来源，短期预报场之间的差别就具有背景误差的统计特征。ECMWF在文献^[37, 40]试验和研究基础上，于2010年6月在c36r2版本集成预报系统中正式引进En4DVar，一方面为业务高分辨率4D-Var系统提供流依赖的背景误差协方差的估计值，另一方面结合奇异向量技术为集合预报系统提供高质量的扰动初值。业务运营的En4DVar包含了10个扰动的成员和1个控制成员，为了避免引入垂直方向的插值误差，分辨率设为T399L91，在T399/T95/T159的三重嵌套的最小化循环迭代的框架设计下，总计算量与T1279分辨率的业务确定性四维变分资料同化系统持平。En4DVar每天运行两次，选用相同的时间滑窗与观测资料集，模式的不确定性表征采用了集合预报系统中随机扰动参数化倾向方案。

整个业务流程如图2所示，En4DVar分析使用与高分辨率4D-Var相同的观测资料。控制成员不需要扰动观测资料，而其他En4DVar成员则需要对观测资料叠加一个随机方法抽样得到的满足均值为零、标准偏差等于观测误差的高斯分布扰动。由于大气运动矢量观测^[41]和海表温度场^[42]等具有高相关性的观测资料，在扰动中则需要考虑其相同性。在背景场扰动方面，ECMWF采用了SPPT模式扰动方案以提高En4DVar的离散度。统计得到的背景误差在应用到4D-Var之前需要经过滤波和校正处理来消除估计值中存在的随机误差和系统偏差。

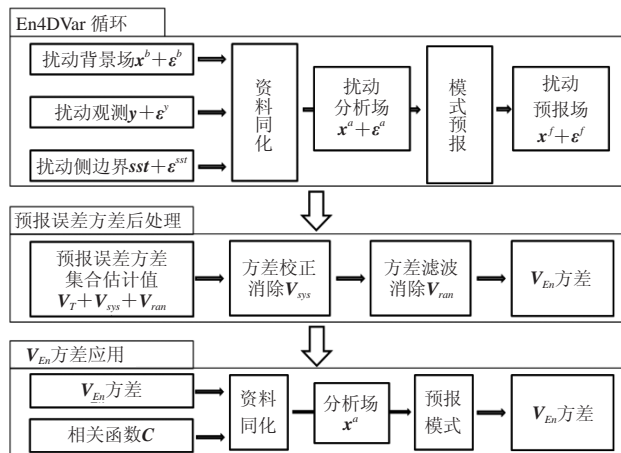


图2 En4DVar流依赖背景场误差协方差的模拟流程
Fig. 2 Process in generation of flow-dependent background error covariance

2012年，为了得到流依赖背景误差协方差，EDA的成员增至25个，并改进和引入了许多新的技术，如能量后向散射（SKEB）的模式扰动方法，方差估

计值的小样本随机噪声滤波方法，方差估计值的系统偏差校正技术，以及流依赖背景相关函数的估计方法等等。

Mete-France业务实现的En4DVar系统与ECMWF相似，早期考虑到现有的计算条件，集合中只包含了6个成员，因此Mete-France在随机误差处理方面进行了大量研究。随着计算条件的改善，目前已经将集合成员数扩展到了10个。

2.1 观测资料和 SST 扰动

根据观测之间相关性的强弱，将观测资料划分为强相关观测资料、弱相关观测资料。对于大部分不相关或相关性较小的观测资料，叠加的扰动服从均值为0，标准差为观测误差协方差的高斯分布。但是，扰动云导风资料时需要考虑资料之间的相关特性。由于SST是在原始观测基础上经过最优插值和二维变分等处理过程得到的二维格点场，在扰动时，除了原始观测误差外，还需要考虑处理过程中的误差特性，且扰动也需要遵循SST的遥相关特性。

受高度指定、相似云结构追踪、质量控制过程^[43]等因素影响，同步卫星的云导风观测具有很强的时间、空间相关性^[44-45]，目前大部分风产品的分辨率在160km或更高，因此只能诊断该分辨率以下的相关性，而很难表征出更细的相关特征。Bormann等^[41]基于一年的云导风（AMVs）-无线电探空数据集，在假定探空仪观测误差不相关的条件下，利用密集的探空观测网络研究了AMVs随机误差的空间相关性。其结果表明，云导风的显著相关距离约为800km，且相关距离对于不同卫星、不同通道和垂直层相关距离变化不大。其中热带地区的相关性大于其他地区，相关性具有各向异性。北半球高空的风分量误差年平均约为2.7~3.5m/s，冬季的误差最大。Bormann等^[41]分别采用各向同性（利用站点距离分组）或各向异性（利用N-S和E-W分离进行分组）相关函数将相关的数据以一种统计的方式外插到0来估计空间相关的AMV误差大小，外插的相关函数在0点位置将探空资料方差划分为空间相关和空间不相关部分。相关部分对应AMV的观测误差，而空间不相关部分则由不相关的AMV误差、探空观测误差、探空（单点测值）与AMVs（区域平均）之间的失配误差构成。其中各向同性的相关函数可采用以下形式：

$$R(r) = R_0 \left(1 + \frac{r}{L} \right) e^{-\frac{r}{L}} \quad (6)$$

$$L^2 = - \frac{2R(r)}{\nabla^2 R(r)} \Big|_{r=0}$$

式中, L 表示 R 的长度尺度, r 表示两点之间的大圆距离, R_0 表示 $r=0$ 时的 R 的大小。

海洋具有多种天气气候意义的特性, 它在地-气系统热量平衡及水分平衡中具有重要作用。其中, SST不仅是海洋表面物理状态的重要参数, 还是影响大气环流及长期天气变化的重要因素。在4D-Var中, SST作为侧边界输入信息, 其精度或者误差分布对同化效果影响较大, 同时SST又具有遥相关特性^[46], 因此对SST扰动的过程也必须考虑其相关性。目前, ECMWF业务中采用的是集合预报中SST扰动方案^[42], 该扰动方案通过构造两组扰动量来表征SST的不同误差来源: 第一组扰动量的构造方法是, 根据Reynolds等^[46]的最优插值方法得到的SST分析场周平均和二维变分SST分析场的周平均差在1985—1999年的统计量来构造表征SST产品中的典型误差分布的扰动量; 第二组SST扰动构造则是利用Reynolds等^[46]二维变分SST分析场与其一周均值的差来构造扰动。第一组扰动代表了SST分析场中的不确定性, 而第二种扰动则主要考虑到了NCEP的SST是周平均产品。这两组扰动采用随机选取的方法叠加到SST分析场上。扰动系数由海表的1线性衰减到40m海深处的0。

2.2 预报模式扰动

En4DVar采用的预报模式并不是真正的“完美模式”, 而是用到了很多次网格参数化过程和随机方法, 因此也需要开展模式扰动方案来表征模式中的误差特征。模式误差来源之一是参数化方案中缺少对次网格物理过程变率的描述。对于数值模式中各物理过程的参数化方案, 它的整体作用表现为在控制方程中采用某一倾向项描述次网格物理过程的贡献, 该描述是一确定性的结果并且依赖于网格尺度的物理量, 因此忽略了物理量通量具有统计意义振荡的特性以及网格尺度运动与次网格尺度运动之间的相互作用。

模式误差的另一个来源则是参数化方案及模式积分方案本身的原理导致了系统性的动能缺失, 从而使模式大气的动能谱与实际大气不符。例如, 模式积分中为保证计算稳定性而采用半拉格朗日平流方案并引入水平耗散项, 这往往导致过强的能量耗散; 在深对流参数化方案中, 没有合理描述出对流产生的动能向平衡流场传输并激发重力波生成这一物理过程。所以, 这一模式误差来源的主要影响在于没有描述大气动能的升尺度传播特性, 导致系统性的动能谱偏差。ECMWF的En4DVar业务系统中根据如上的模式误差来源, 同时引用了集合预报系统中的两套扰动方案: 参数化倾向随机扰动法 (SPPT) 表征已有参数化方案中

存在的不确定性; 随机后向散射法 (SKEB) 表征模式中未被参数化方案描述而缺失的物理过程。

BMP方法^[47]是SPPT的原始版本, 最早应用在ECMWF的集合预报系统中, 用来表征数值模式已有物理过程参数化方案中存在的不确定性。对于模式中的任意预报量 \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \{u, v, t, q, \dots\}$, 其预报方程如下:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{P}(\mathbf{x}, t) \quad (7)$$

式中, \mathbf{A} 表示模式网格尺度运动 (非参数化部分) 对预报量倾向的贡献。 \mathbf{P} 表示次网格物理过程参数化对预报量倾向的贡献, 为描述这一倾向分量的不确定性, 在等式右边叠加与 \mathbf{P} 有关的随机强迫项, 故上式可改写成:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{P}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{P}'(\mathbf{x}, t) \\ \mathbf{P}'(\mathbf{x}, t) &= \langle r(\lambda, \phi, t) \rangle_{D,r} \mathbf{P}(\mathbf{x}, t) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, λ 和 ϕ 分别对应经度、纬度, r 为某一区域内均匀分布的随机数, 通常取 $(-0.5, 0.5)$ 。 $\langle \dots \rangle_{D,r}$ 是用于调整 $\mathbf{P}'(\mathbf{x}, t)$ 时空自相关性的参数, 表示将整个模式积分区域划分成 $D \times D$ 格距的子区域, 每个子区域中相同变量的各模式层所有格点均采用相同的随机数 r , 且 r 每隔 T 小时更新一次。由于每个区域叠加了一个不同的随机扰动, 物理量在区域边界会出现间断现象。

SPPT的原理与BMP方法一致, 区别在于对随机数 r 的处理, 即对所用变量采用相同的 r , 且在近地表和平流层引入调整因子 $\mu = [0, 1]$ 来调整扰动的幅度。另外, 为了解决BMP方法出现的不连续现象, SPPT方法在谱空间中利用谱系数构造随机扰动, 使得扰动随时间和空间的变化都非常平滑。SPPT实现后改进了集合预报中降水分布的预报效果^[48]。

SKEB^[47, 49]方法认为与随机中小尺度系统运动联系的物理过程包含了局地深对流产生的动能向平衡流场传输并激发重力波、水平耗散等过程, 它将影响尺度位于模式截断波数附近的动能传输, 最终使得网格尺度运动的动能谱发生改变, 故最终的影响效果为风场分量的倾向。因此, 随机物理过程扰动作为一强迫项作用于速度场, 引入有效流函数强迫项:

$$\psi'_{eff}(\lambda, \phi, z, t) = \sqrt{rD(\lambda, \phi, z, t)} \psi'(\lambda, \phi, t) \quad (9)$$

式中, λ, ϕ, z, t 分别对应模式物理空间中的经度、纬度、垂直层和时间。 ψ'_{eff} 是最终引入模式的流函数扰动, 称为有效流函数扰动; $\psi'(\lambda, \phi, t)$ 为具有一定动能谱分布的2D随机流函数, $rD(\lambda, \phi, z, t)$ 作为局地调整系数。因此, ψ'_{eff} 对模式大气的影 响, 就是通过随机分布流函数扰动 $\psi'(\lambda, \phi, t)$ 的形式注入动能, 然后通过

$rD(\lambda, \phi, z, t)$ 将注入的能量进行局地调整。所以,对 $\psi'(\lambda, \phi, t)$ 的构造成为关键,其需要在各个尺度谱(波数)进行扰动动能的注入。

SPPT和SKEB都是通过扰动模式来隐式表征背景场的不确定性,另一种显式表征方法是直接将扰动叠加到背景场上,这种方法称为XB方法^[51]。扰动定义为 $\zeta = f(\lambda, l, x)B^{1/2}\tilde{\zeta}$,其中,扰动幅度调整因子 $f(\lambda, l, x)$ 是一个与纬度 λ 、模式层 l 和模式变量 x 有关的函数, $\tilde{\zeta}$ 则是从高维高斯分布(0, B)中取样得到的随机扰动, B 表示背景误差协方差矩阵。 $f(\lambda, l, x)$ 的大小为高分辨率业务信息向量方差和集合方差(这里的集合仅扰动观测)的差值的三周统计平均。ECMWF对离散度诊断后得出XB方法能得到比物理过程参数化方法更大的离散度,因此不再需要进行集合离散度的校正处理,这一改进在中高纬地区更为明显。此外,应用XB方法的En4DVar来为ECMWF的集合预报系统提供扰动初值,能够得到最大的离散度,使得中期集合预报系统更为稳定。相对于原有的集合预报系统3和7d的预报技巧有了小幅度的提升。

2.3 方差系统偏差校正

En4DVar通过使用扰动观测, SST和背景场分别表征输入到分析-预报系统的初值、边界值、背景场等主要误差来源。但是在观测误差统计, SST扰动和模式误差参数化中的任何缺陷或近似,以及其他未知的不确定项(如陆表过程)都会引起En4Dvar取样方差为分析和背景场预报的次最优估计值。这种类型的估计误差无法通过增加集合成员个数方法来消减,且转化为En4DVar取样方差和真实分析/预报误差的系统差别。

一种简单的处理方式是将En4DVar平均离散度值乘以一个定值缩放因子来减少这种系统偏差。但是En4DVar方差的系统误差具有复杂的空间和时间结构,并不能简单地通过乘以一个全局的缩放因子来表征。ECMWF采用Leutbecher^[49]的方法,即利用集合离散度-误差关系定量诊断系统偏差。对于一个理想的En4Dvar系统,离散度-误差曲线应当位于对角线位置,即:

$$\frac{N}{N-1} E \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(x_j - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \right)^2 \right] = \frac{N}{N-1} E \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j - y \right]^2 \quad (10)$$

其中, N 是集合成员个数, y 是真实值,实际中以高分辨率业务分析场代替。等式左边表示集合方差,右边为集合误差方差(RMSE)。而实际的En4Dvar系统并不满足上式,即离散度-误差曲线斜率并不为1,其大小反映了集合离散度的条件偏移程度。处理方法

按照离散度-误差差别的带状分布特征,较为精细的将全球划分为N(30°—90°N), S(30°—90°E), T(30°E—30°N)三个区域,对每个区域应用不同的膨胀系数。考虑到离散度-误差诊断系数的日变化和周变化不大,但有一明显的季节性漂移,大小可利用最近5d的集合样本通过离散度-误差曲线以在线的形式来确定。

2.4 方差随机误差滤波

受计算资源的限制,集合成员个数限制在 $o(10) \sim o(10^2)$,由这种小集合统计得到的 B 矩阵,包含了样本噪声,对 B 矩阵的统计精度有很大的影响,因此在使用前需要引入滤波工具消除样本噪声。文献[32, 39, 51-52]研究了长距离的假非零值。Raynaud等^[53]对相关性进行了试验研究,结果表明,最优局域空间平均滤波能提高 B 的计算精度但效果并不明显,且低通滤波器的截断波数与变量场、垂直层、背景误差特征尺度有关,需要花费大量的工作进行最优化设置。Raynaud等^[54]在此基础上进行了改进,通过计算信号、噪声的特征尺度长度,能自动计算最佳截断波数。由此发展成的客观滤波器被应用到ECMWF的集合资料同化系统中。

形式上可将EDA的计算误差分为随机项和系统项:

$$b - b^* = [b - E(b)] + E[b - b^*] \quad (11)$$

式中, b 是背景误差的集合统计值, b^* 是 b 的真实值。估算误差的随机项的平均值(统计期望)趋为0。集合成员的有限个数是随机误差项的主要因素,而系统误差项表示的是EDA误差估计与真实平均的偏离程度,反应了EDA表征不确定性的来源的不足。业务中采用目标滤波的方法处理和过滤随机误差项引起的噪声。

对于一组相互独立、服从高斯分布的 N 成员扰动的背景场 $\tilde{x}_k^b = x^b + \epsilon_k^b$,背景误差协方差的集合估计值为:

$$\tilde{B} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (\tilde{x}_k^b - \bar{\tilde{x}}^b) (\tilde{x}_k^b - \bar{\tilde{x}}^b)^T \quad (12)$$

$$\bar{\tilde{x}}^b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{x}_i^b$$

可以推导出样本噪声协方差矩阵的矩阵形式为:

$$E[G^c G^{cT}] = \frac{2}{N-1} \tilde{B}^* \otimes \tilde{B}^* \quad (13)$$

式中, \otimes 表示为Hadamard乘积, G^c 是取样噪声。上式表明样本噪声协方差矩阵是背景误差协方差集合平均的简单函数。样本噪声的平均相关长度小于背景误差。也就是说原始信号中,相对于噪声而言,信号具有更大的大尺度特征。这也是采用谱滤波方法滤波样

本EDA方差中样本噪声的基本理论依据。针对上述理论，采用以下低通目标滤波：

$$\rho(n) = \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \min(n, N_{trunc}) / N_{trunc}\right) \quad (14)$$

式中， n 是总谱波数， N_{trunc} 是滤波器的截断波数。在谱空间应用此低通滤波，相当于在格点空间的误差方差添加了一个加权平均，使得较大尺度信号通过，而较小尺度样本噪声被过滤。但该方法也存有以下局限：1) 它是基于样本估计的误差协方差矩阵，而真实的误差协方差矩阵是未知的；2) 所采用的参数不能适用于所有变量/模式层；3) 不适用于处理EDA方差能量谱的小变化。为了克服以上方法的局限性，Montmerle等^[34]对以上方法进行了修正，利用同一个EDA系统的两个不同集合来计算EDA背景场标准偏差噪声能量谱：

$$P_n(S^e) = 0.5(P_n(S_i - S_j)) \quad i \neq j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

谱形式的噪声滤波可以简单的拓展到小波形式。小波转化的主要特征是，信号与一组径向基函数 $\psi_j(r), j=1, \dots, k$ 的卷积、径向基函数的选择受谱带限制，对于一些连续的截断波数 N_1, \dots, N_k ，Legendre 转

化满足：

$$\begin{cases} \hat{\psi}_j(n) = 0 \\ n < N_{j-1}, n > N_{j+1} \end{cases} \quad (16)$$

从一组10成员EDA事件，可以计算小波空间中相关系数样本，如对于每个小波分解的波带计算空间相关系数场。小波滤波标准偏差就能通过原标准偏差和取样相关系数在小波空间中的卷积导出：

$$S^{filt} = \sum_{j=1}^K \rho_j \otimes S_j^{raw} \quad (17)$$

式中， S_j^{raw} 是原取样EDA标准偏差的小波 j 分量。对于小尺度天气现象，目前谱滤波在热带高估了样本方差的统计显著性，相反，在副热带则低估。

不同尺度上的截断波数可以采用Donoho方法来自动最优确定^[55]，图3对应2013年8月2日09:00 UTC第91模式层上涡度场背景误差的集合估计值、应用Donoho方法经小波滤波和谱滤波方法得到结果。其中心最大值对应于第九号台风飞燕的中心位置，大小分别为 8.31×10^{-5} 、 8.21×10^{-5} 和 6.59×10^{-5} 。对比可以看出，应用小波方法能够改善谱滤波在空间平滑过程导致部分关键信息被抹平的局限性，且由于Donoho方法无需应用式15统计噪声能量谱，因此可以极大提高滤波效率。

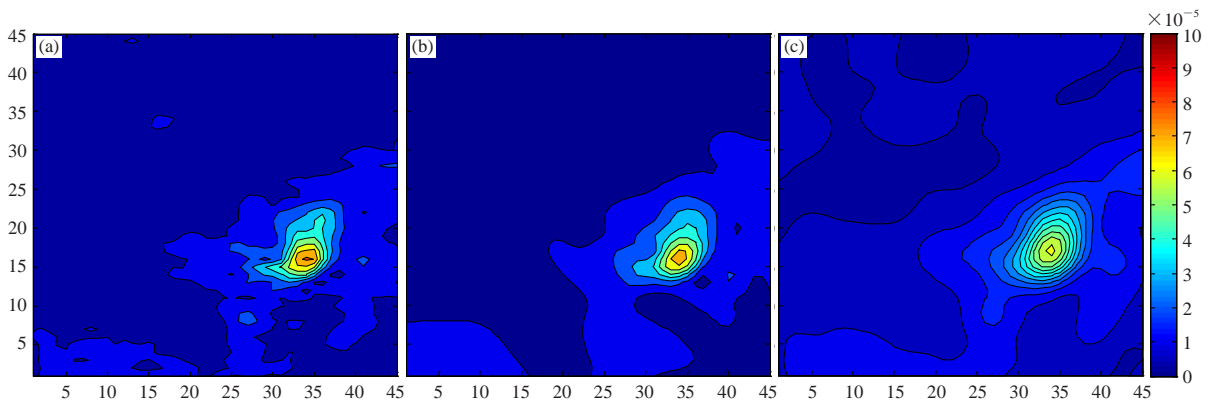


图3 2013年8月2日09:00 UTC第91模式层上涡度场背景误差 (单位: 10^{-5}s^{-1})
(a)、(b)、(c) 分别为10个样本得到的集合统计值、小波和谱方法滤波结果

Fig. 3 Standard deviations of vorticity at model level 91, for 0900 UTC on 2 August 2013 (unit: 10^{-5}s^{-1}). (a) Corresponding to raw estimates from 10 member ensemble; (b) to the filtered results with wavelet and (c) with spectral method

2.5 流依赖相关函数统计

相关函数 C 对应的是背景误差协方差矩阵 B 中的非对角元素，表示变量内部和变量之间在不同位置、不同高度的相关性。由于 C 的个数是方差元素个数的二次方倍，因此对 C 的精确估计远大于方差估计。Fisher^[22]利用不同时次的样本估计得到具有尺度相关、位置相关的各向异性相关函数，但是其统计是基于历史不同时次的集合样本，因此得到的是一个气候

态的定常量，忽略了其流依赖的特性。Varella等^[56]研究表明，具有弱流依赖特性的时变相关函数能够更加精确地表征出隐含的相关结构，这一优势在活跃天气系统的影响区域中更为明显。

根据样本个数的不同，对流依赖相关函数的处理也不同。当样本个数十分有限时，为了消除因样本不足导致的噪声或虚假相关，需要构造合适的空间局地化函数来消除或减少远距离虚假相关；另一种方法是

构造出足够多的样本个数，减少小样本估计值中含带的远距离虚假相关。

Houtekamer等^[52]于2001年首次引入局地化矩阵 C_{loc} 与原估计值进行相乘来实现局地化，对流依赖相关函数即：

$$C^e = \tilde{C}^e \otimes C_{loc} \quad (18)$$

式中， C_{loc} 是变化的相关性矩阵，大小与 \tilde{C}^e 相同， C_{loc} 的形式直接决定了流依赖相关函数的局地化的效果。一种简单局地化处理方式是，假定变量的自相关强度与距离成反比， C_{loc} 为一个高维的高斯函数矩阵。另一种处理思路将低分辨率的局地化矩阵通过谱变换作用到高维的流依赖相关函数估计值矩阵上。其优点是，如果局地相关性在谱空间中是水平均匀的，则谱形式的局地化矩阵 C_{loc} 即为简单的对角矩阵。

实践表明，在没有空间局地化和滤波处理的前提下，至少需要500~600个扰动样本才能粗略统计得到小波 B 模型。如此庞大的样本个数是现阶段、以及未来几年都无法承受的。对此有两种解决思路：1) 通过滞后方法实时估计 B ；2) 采用混合的形式构造 B 。滞后法实时估计 B 的思想是结合现有的和过去12d滑动窗口内的EDA背景预报成员构成一个包含600个样本的超大EDA集合，用于统计流依赖相关函数 C 。该方法尽管得到足够的统计样本，但是由于滑动窗口过长，统计得到的相关函数 C 中的流依赖信息量过少，很难及时反映快速发展的天气系统。且如果业务EDA成员个数少，这一情况将更加严重。混合方法则是利用最新的200个集合成员表征出误差逐日变化的特征，另外再从全年的EDA样本取样出400个成员表示误差的气候态特性。ECMWF试验表明上述方法都能有效改进现有的静态相关函数 C ，且对同化和预报具有正效果^[58]。

3 存在问题及展望

集合四维变分资料同化系统业务化以后，显著提升了确定性和集合预报水平。其成功主要基于四个方面的因素：拥有一个非常可靠的成熟的集合四维变分资料同化系统；先进的小波背景误差协方差模型；精确的切线性、伴随模式以及高精度的观测算子。这些因素使得背景误差能在同化窗内的表征非常精确，而避免采用空间局地化技术来消除协方差的噪声。但是集合资料同化系统仍存在一些尚未解决的问题：如忽略了中高层质量-风平衡约束对预报的影响。同时出于实际业务化考量，ECMWF和Mete-France简化了En4Dvar中误差表征、随机误差处理、系统误差校正等问题，随着计算条件的逐步提升，对这些问题的处

理将会更加精细化。

常规观测资料扰动采用均值为0、标准偏差等于观测误差的高斯型分布来模拟。但是对于占据同化系统观测资料来源主体（约占90%）的卫星观测资料而言，部分类型的观测误差具有空间或时间相关性，扰动时必须遵循这一相关性。目前上述业务中心仅考虑了具有强相关的云导风卫星观测资料，并假设其他卫星观测资料是不相关的。

随机误差的滤波处理能减少背景误差方差估计值中的采样噪声，提高精确度，其作用十分重要。业务中采用的统计滤波都属于均匀滤波，即作用在谱系数上的滤波系数仅与波数（或尺度）有关。在格点空间相当于全球相同尺度的平滑范围和平滑强度是一样的。这种处理有可能会抹去尺度较小的局地特征信号，降低集合方差估计值的有效分辨率，如T399分辨率下，10成员的有效分辨率仅为T70。因此有必要开展更精细化的非均一滤波方法。非均一滤波系数具有各向异性，大小不仅与尺度有关，还受方向和位置影响，符合背景误差协方差各向异性的这一既定事实。文献[57]利用扩散方程构造了一种非均一滤波器，通过建立起滤波系数与尺度函数之间的关系来局地调整滤波的强度。由于ECMWF的4D-Var系统采用的背景误差协方差模型是基于小波构造的，另一种高效的方法是利用小波的多尺度、多分辨率的刻画优势，同时精确表征全局的尺度信息和局地的信息。同时将信号和与位置 x 有关长度尺度信息 $L(x)$ 转换到小波空间，构造非均一小波滤波器 $S^{filt} = \sum_{j=1}^K \rho_j(x) \otimes S_j^{raw}$ 。

集合方法统计得到的离散度一般偏小，一种处理的方法是乘上一个膨胀系数来调整离散度，这个膨胀系数对全球而言是一致且不变的。改进后可以按照离散度的带状分布特征，较为精细的将全球划分为N（30°—90°N），S（30°—90°E），T（30°E—30°N）三个区域，对每个区域应用不同的膨胀系数，考虑到离散度的时变特性，膨胀系数可利用最近5d的集合样本通过离散度-误差曲线以在线的形式来确定。划分区域能够较为精确的调整每个区域的离散度，但是在区域之间的边界区域会存在不连续情况。

2013年，ECMWF将En4DVar的成员个数由原来的10个增加到了25个，使得到的背景误差方差更加精细化。其另一方面的作用是可以利用25个集合成员估计流依赖的背景误差相关函数，结合背景误差方差组成一个全流依赖的背景误差协方差估计值。ECMWF计划将估计值与静态的背景误差协方差矩阵按照30%和70%的权重线性组合。另一种解决思路是采用滞后法构造

足够多的统计样本统计流依赖的背景误差协方差。

目前, ECMWF的业务资料同化系统已经从原来的T799L91提升到了T1279L139。随着模式和资料同化的空间分辨率进一步提升, 原有相关长度尺度的各向同性假设已不再适用, 现有背景误差协方差模型面临的流依赖平衡关系估计问题将更加严峻。无论是集合四维变分资料同化(En4DVar), 还是目前盛行的四维集合变分资料同化(4DEnVar), 都需要进一步研究集合信息引入到4D-Var中的效率。另一个面临的关键问题是En4DVar本质上属于蒙特卡罗方法, 其分辨率与扰动是否能表征高分辨率资料同化系统的误差密切相关。即使En4DVar的外层循环分辨率从T399升到T699, 仍只有目前4DVar分辨率的一半。它能够考虑大部分不确定性信息, 降低参数化表征模式误差的需求, 但是以4D-Var为基本模块的En4DVar是一个计算量非常大的系统, 未来研究将主要集中在提高En4DVar的效率, 如改进估计值中随机误差、系统误差的处理方法, 利用流依赖集合离散度优化观测资料质量筛选和质量控制决策等。

参考文献

- [1] Bjerknes V, Hesselberg T. Dynamic meteorology and hydrographs. Part II: Kinematics. New York: Carnegie Institute Press, 1911.
- [2] Talagrand O. Assimilation of observations, an introduction. *J Meteor Soc Japan*, 1997, 75: 191-209.
- [3] Ham J. Mesoscale predictability and background error covariance estimation through ensemble forecasting: Texas: Texas A&M University College Station Press, 2002.
- [4] Panofsky H. Objective weather map analysis. *J Met*, 1949, 6: 386-392.
- [5] Gilchrist B, Cressman G P. An experiment in objective analysis. *Tellus A*, 1954, 6(4): 309-318.
- [6] Bergthorsson P, Does B. Numerical weather map analysis. *Tellus A*, 1955, 7(3): 329-340.
- [7] Rutherford I D. Data assimilation by statistical interpolation of forecast error fields. *J Atmos Sci*, 1972, 29(5): 809-815.
- [8] Sasaki Y. Numerical variational analysis with weak constraint and application to surface analysis of severe storm gust. *Mon Wea Rev*, 1970, 98(12): 899-910.
- [9] Laroche S, Gauthier P. A validation of the incremental formulation of 4D variational data assimilation in a nonlinear barotropic flow. *Tellus A*, 1998, 50(5): 557-572.
- [10] Fisher M, Andersson E. Developments in 4D-Var and Kalman filtering, ECMWF Tech Memo No 347, 2001. (available from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, UK).
- [11] Zhao J, Song J Q, Li Z J. Distributed parallelization of a global atmospheric data objective analysis system. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(1): 159-163.
- [12] 曹小群, 黄思训, 杜华栋. 变分同化中水平误差函数的正交小波模拟新方法. *物理学报*, 2008, 57(3): 1984-1989.
- [13] 曹小群, 黄思训, 张卫民, 等. 区域三维变分同化中背景误差协方差的模拟. *气象科学*, 2008, 28(1): 8-14.
- [14] 卢风顺, 宋君强, 朱小谦. WRF三维变分同化并行程序性能分析. *计算机工程与科学*, 2008, 29(11): 149-151.
- [15] Daley R. Atmospheric data analysis. London: Cambridge university Press, 1993.
- [16] Anderson J L. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2884-2903.
- [17] 廖洞贤, 王两铭. 数值天气预报中的若干新技术. 北京: 气象出版社, 1995.
- [18] 潘宁, 董超华, 张文建. 变分同化及卫星资料同化. *气象科技*, 2001, 29(2): 29-36.
- [19] Lindskog M, Salonen K, Järvinen H, et al. Doppler radar wind data assimilation with HIRLAM 3DVAR. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(5): 1081-1092.
- [20] Li Z, Navon I M, Zhu Y. Performance of 4D-Var with different strategies for the use of adjoint physics with the FSU global spectral model. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(3): 668-688.
- [21] Fisher M, Courtier P. Estimating the covariance matrices of analysis and forecast error in variational data assimilation. ECMWF Tech Memo No 220, 1995. (available from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, UK).
- [22] Fisher M. Background error covariance modelling. Seminar on Recent Development in Data Assimilation for Atmosphere and Ocean. ECMWF, 2003.
- [23] Bannister R N. A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation. I: Characteristics and measurements of forecast error covariances. *Q J R Meteorol Soc*, 2008, 134(637): 1951-1970.
- [24] Bannister R N. A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation. II: Modelling the forecast error covariance statistics. *Q J R Meteorol Soc*, 2008, 134(637): 1971-1996.
- [25] Lorenc A C. Analysis methods for numerical weather prediction. *Q J R Meteorol Soc*, 1986, 112(474): 1177-1194.
- [26] Cardinali C, Rukhovets L, Tenenbaum J. Jet stream analysis and forecast errors using GADS aircraft observations in the DAO, ECMWF, and NCEP models. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(3): 764-779.
- [27] 曹小群, 宋军强, 张卫民, 等. 一种基于复数域微分的资料同化新方法. *物理学报*, 2013, 62(17): 170504-170504.
- [28] 王舒畅, 李毅, 张卫民, 等. 资料同化中的数字滤波弱约束试验及分析. *物理学报*, 2011, 60(9): 99203-099203.
- [29] 赵延来, 黄思训, 杜华栋. 基于变分方法的有限区域风场分解与重构I: 理论框架和仿真实验. *物理学报*, 2013, 62(3): 39204-039204.
- [30] 朱孟斌, 张卫民, 曹小群. GPS掩星一维弯曲角算子在四维变分资料同化系统中的实现方法研究. *物理学报*, 2013, 62(18): 189203-189203.
- [31] Hamill T M, Snyder C. Using improved background-error covariances from an Ensemble Kalman Filter for adaptive observations. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(6): 1552-1572.
- [32] Buehner M, Charron M. Spectral and spatial localization of background-error correlations for data assimilation. *Q J R Meteorol Soc*, 2007, 133(624): 615-630.
- [33] Carrier M J, Ngodock H. Background-error correlation model based on the implicit solution of a diffusion equation. *Ocean Modelling*, 2010, 35(1): 45-53.
- [34] Montmerle T, Berre L. Diagnosis and formulation of heterogeneous background-error covariances at the mesoscale. *Q J R Meteorol Soc*, 2010, 136: 1408-1420.
- [35] Zhang W M, Cao X Q, Xiao Q N. Variational data assimilation using wavelet background error covariance: initialization of typhoon KAEMI (2006). *J Trop Meteor*, 2010, 16: 333-340.
- [36] Bonavita M, Isaksen L, Hölm E. On the use of EDA background error variances in the ECMWF 4D-Var. *Q J R Meteorol Soc*, 2012, 138(667): 1540-1559.
- [37] Bonavita M, Raynaud L, Isaksen L. Estimating background-error variances with the ECMWF Ensemble of Data Assimilations system: the effect of ensemble size and day-to-day variability. *Q J R Meteorol Soc*, 2010, 137: 423-434.
- [38] Ștefănescu S E, Berre L, Pereira M B. The evolution of dispersion spectra and the evaluation of model differences in an ensemble estimation of error statistics for a limited-area analysis. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(11): 3456-3478.
- [39] Berre L, Pannekoucke O, Desroziers G, et al. A variational assimilation ensemble and the spatial filtering of its error

- covariances: increase of sample size by local spatial averaging. Proc ECMWF Workshop on Flow-Dependent Aspects of Data Assimilation: 2006, 151-168.
- [40] Isaksen L, Fisher M, Berner J. Use of analysis ensembles in estimating flow-dependent background error variances. ECMWF Tech Memo No 492, 2006. (available from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, UK).
- [41] Bormann N, Saarinen S, Thepaut J, et al. The spatial structure of observation errors in atmospheric motion vectors from geostationary satellite data. Mon Wea Rev, 2003, 131: 706-718.
- [42] Vialard J, Vitart F, Balmaseda M A, et al. An ensemble generation method for seasonal forecasting with an ocean-atmosphere coupled model. Mon Wea Rev, 2005, 133: 441-453.
- [43] Holmlund K. The utilization of statistical properties of satellite-derived atmospheric motion vectors to derive quality indicators. Wea Forecasting, 1998, 13: 1093-1104.
- [44] Ingleby N B. The statistical structure of forecast errors and its representation in the Met. Office Global 3-D Variational Data Assimilation Scheme. Q J R Meteorol Soc, 2001, 127(571): 209-231.
- [45] Bouttier F, Kelly G. Observing-system experiments in the ECMWF 4D-Var data assimilation system. Q J R Meteorol Soc, 2001, 127(574): 1469-1488.
- [46] Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. J Climate, 2002, 15(13): 1609-1625.
- [47] Berner J, Ha S Y, Hacker J P, et al. Model uncertainty in a mesoscale ensemble prediction system: stochastic versus multiphysics representations. Mon Wea Rev, 2010, 139(6): 1972-1995.
- [48] Palmer T N, Buizza R, Doblas-Reyes F, et al. Stochastic parametrization and model uncertainty. ECMWF Tech Memo No 598, 2009. (available from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, UK).
- [49] 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. J Atmos Sci, 2009, 66(3): 603-626.
- [50] Cardinali C, Zagar N, Radnoti G, et al. Representing model error in ensemble data assimilation. ECMWF Tech Memo No 726, 2014.
- [51] Houtekamer P L, Mitchell H L. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. Mon Wea Rev, 1998, 126(3): 796-811.
- [52] Houtekamer P L, Mitchell H L. A sequential ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. Mon Wea Rev, 2001, 129(1): 123-137.
- [53] Raynaud L, Berre L, Desroziers G. Spatial averaging of ensemble-based background-error variances. Q J R Meteorol Soc, 2008, 134(633): 1003-1014.
- [54] Raynaud L, Berre L, Desroziers G. Objective filtering of ensemble-based background-error variances. Q J R Meteorol Soc, 2009, 135(642): 1177-1199.
- [55] Donoho D, Johnstone I. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage. Biometrika, 1994, 81: 425-455.
- [56] Varella H, Berre L, Desroziers G. Diagnostic and impact studies of a wavelet formulation of background-error correlations in a global model. Q J R Meteorol Soc, 2011, 137: 1369-1379.
- [57] Raynaud L, Pannekoucke O. Heterogeneous filtering of ensemble-based background-error variances. Q J R Meteorol Soc, 2012, 138: 1589-1598.

AMS在停刊8年后重新出版《气象文集》

本刊编辑部

让美国气象学界，乃至包括中国学者在内的全球气象学者都记忆犹新的，由美国气象学会（AMS）出版的期刊形式的学术集刊《气象文集》

（*Meteorological Monographs*），在2008年出版了第55卷之后，一直处于停

刊状态。2015年美国气象学会决定继续出版该系列出版物，并且通过网络以在线和开放获取的方式出版。2016年该出版物第56和57卷和读者见面，主题分别为“热带多尺度对流耦合系统”和“大气辐射观测项目：前20年”。

“热带多尺度对流耦合系统”主题专辑的推出，用以纪念Michio Yanai博士在这一领域做出的贡献。该文集源于2011年美国气象学会年会期间召集的纪念Michio Yanai博士的学术会议。文集引言中，作



者简要回顾了Michio Yanai博士的学术生涯和学术成就。日本作者在文集序言里则给出了热带气象学发展的个人回顾。之后，文集分16章就Michio Yanai博士在热带波、MJO等领域的贡献，TRMM卫星对大尺度分析的推动、季风对流，青藏高原的影响，热带多尺度相互作用，云微物理和辐射对热带气旋结构及运动的影响，热带系统模拟研究，以及热带气象学的未来发展等多个主题，由不同作者给出了描述。来自中国科学院和中国气象局的作者及合作者，领衔贡献了青藏高原影响和动能扰动等主题文章。

美国能源部在1990年构思了大气辐射观测（ARM）项目，瞄准的最重要的科学问题是云-气候反馈。多年来ARM项目被认为是基础研究的样板，该项目还成就了大量杰出科学家，当项目走过第一个20年之际，第57卷文集全面梳理了项目实施取得的科学成就。众多学者为这本多达30章和3个附录的文集撰写了文章，就ARM项目本身的科学设计、项目在改进多谱段辐射通量，以及加热率、气溶胶物理、气溶胶-云-降水关系研究、云解析模拟和气候模拟等方面的进展进行了描述。

多普勒雷达中气旋判据及算法的发展与应用

费海燕 周小刚 王秀明

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 由于超过90%的中气旋伴随着龙卷、强雹、大风等强天气发生, 因此中气旋的识别与应用对于准确、实时发布强天气预报具有十分重要的意义。目前我国仅CINRAD WSR-98D SA/SB多普勒雷达内置了美国强风暴实验室开发的中气旋算法, 并有相应的中气旋产品, 其他型号的多普勒雷达则只能从径向速度图上人工识别中气旋。回顾了中气旋判据演变的三个阶段, 对当前业务上使用的第三阶段的中气旋判据存在的问题进行了分析; 依据中气旋算法发展历程, 介绍了中气旋切变算法、中气旋算法及中气旋探测算法, 并对当前业务上使用的中气旋算法得到的产品应用及其存在问题作了讨论。

关键词: 中气旋判据, 中气旋切变算法, 中气旋算法, 中气旋探测算法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.003

The Development and Application of Doppler Radar Mesocyclone Criterion and Algorithm

Fei Haiyan, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming

(China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081)

Abstract: Since more than 90 % of the mesocyclones are accompanied by severe weather such as tornadoes, severe hails, strong winds etc., it is a great significance to identify the mesocyclones and apply to publishing the severe weather warning in real-time for more accurate. At present, only the CINRAD WSR-98D SA / SB in China has mesocyclone algorithm, which was developed by US National Severe Storms Laboratory, and mesocyclone products. While other types of Doppler radar have to recognize mesocyclone by using radial velocity maps artificially only. This paper reviews the evolution of the mesocyclone criterion for three stages in the operational application, and analyzes some issues in the third stage. Based on the development of the mesocyclone algorithm, this paper introduces the mesocyclone shear algorithm, mesocyclone algorithm and mesocyclone detection algorithm, and discusses the operational applications and the issues of products from the mesocyclone algorithm.

Keywords: mesocyclone, criterion, algorithm, shear, detection

0 引言

在20世纪中期, Brooks^[1]就已认识到在雷暴单体中可能存在尺度比龙卷要大的气旋式涡旋。1963年, Fujita^[2]将其正式命名为中气旋(mesocyclone)。根据国外的统计, 90%以上的中气旋会伴随着龙卷、强雹、大风等强天气发生, 因此中气旋探测对于准确、实时发布强天气预报具有十分重要的意义。

在多普勒雷达应用之前, 由于缺乏对速度场的探测资料, 中气旋研究进展缓慢。1971年, 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的强风暴实验室(NSSL)拥有了位于诺曼(Norman)的第一台用于研究的S波

段多普勒雷达。其后, 依据Norman多普勒雷达所收集的数据集, NSSL对中气旋的基本特征进行了深入研究, 先后提出了利用径向速度对来识别中气旋的判据及中气旋客观算法。

中气旋的判据发展经历了三个阶段: 使用径向速度方位切变阈值和厚度阈值; 使用与距雷达站距离有关的径向速度方位切变阈值和厚度阈值; 使用与距雷达站距离有关的旋转速度阈值和厚度阈值。目前, 国内业务中最常使用的中气旋判据是使用与距雷达站距离有关的旋转速度和厚度阈值。

中气旋客观算法的发展也经历了三个阶段: 中气旋切变算法(mesocyclone shear algorithm)、中气旋算法(mesocyclone algorithm)、中气旋探测算法(mesocyclone detection algorithm)。目前在全美布网的165部WSR-88D S波段雷达build 9.0版本中内置的是中气旋算法, 预期下一阶段将会更新为中气旋探测算

收稿日期: 2015年6月3日; 修回日期: 2015年9月11日
第一作者: 费海燕(1983—), Email: feihy2009@163.com
资助信息: 国家自然科学基金项目(41475042); 江苏省气象科学研究所北极阁基金(BJG201305)

法。我国CINRAD WSR-98D SA/SB目前使用的也是中气旋算法。

国内在中气旋判据和中气旋算法得到的中气旋产品的应用上,业务人员也积累了一些相关经验。个例分析^[3]表明,与非超级单体龙卷相比,导致强龙卷的中气旋底高明显偏低,基本在1km以下。台风前部龙卷个例研究^[4]发现,中气旋算法产品没有报警,认为中气旋阈值应结合当地特点作调整。由中气旋文本产品给出的最强切变值统计发现,当中气旋最强切变达到 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 以上极有可能出现 $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的强风或者龙卷天气^[5]。根据对中气旋的旋转速度统计,64.3%以上的冰雹天气的中气旋达中等强度以上,50%以上的雷雨大风天气的中气旋达中等强度以上,而强降水天气达中等以上强度仅为36.4%^[6]。

国内多普勒雷达应用研究起步较晚,且国内大部分C波段多普勒雷达应用软件中无中气旋算法,因此业务上由中气旋判据和由中气旋算法产品来识别中气旋是并存的。

1 中气旋判据发展的三个阶段

由于多普勒雷达仅能探测到一维的径向风场,因此必须对中气旋流场作一定假设,才能在径向速度场上给予合理解释。故通常假设中气旋流场满足Rankine涡旋条件,即:

$$\begin{cases} v_t = V_t \frac{r}{R_t} & r \leq R_t \\ v_t = V_t \frac{R_t}{r} & r \geq R_t \end{cases} \quad (1)$$

式中, v_t 表示切向速度, V_t 表示核半径 $r=R_t$ 时的最大切向速度。在核区内($r \leq R_t$),切向速度随半径线性增加;在核区外,速度与半径成反比。对气旋式旋转, V_t 为正;对反气旋式旋转, V_t 为负。

中气旋为气旋式旋转。由于多普勒雷达平面扫描是以顺时针方向进行的(正北为 0° 方位角,顺时针方位角增加到 360°)。因此,在多普勒雷达平面扫描径向速度场上,中气旋就表示为同一距离圈上,相隔一定方位角距离(即直径)的最大负速度与最大正速度(简称最大正负速度对或径向速度对)。传统意义上,中气旋可以定义为具有风暴尺度(2~10km)的Rankine涡旋特征的多普勒径向速度对。径向速度对的值越大或径向速度对之间的距离越小,说明中气旋的强度越强。

1.1 第一阶段的中气旋判据

从传统意义上的中气旋定义到中气旋定量识别判据,主要是考虑到中气旋为三维旋转系统,加入了对

中气旋厚度要求的限制。中气旋识别判据的第一阶段即是使用径向速度方位切变值(即 V_t/R_t)和厚度值作为中气旋识别判据。

该判据是Donaldson^[7]在1970年提出的。Donaldson^[7]使用美国空军5.4cm多普勒气象雷达,分析了1968年春季美国Massachusetts东部地区一次伴随大范围强雹和龙卷过程的中气旋演变,首次提出中气旋定量识别判据阈值为:径向速度方位切变值 $\geq 5 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$;其伸展厚度大于 $2R_t$ 。1976年, Burgess^[8]利用NSSL的Norman多普勒雷达在1971—1975年的每年春季收集到的37个Oklahoma中气旋(62%伴有龙卷)进行特征统计研究时,降低了Donaldson判据的厚度值要求,采用的中气旋识别判据阈值为:径向速度方位切变值 $\geq 5 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$;其伸展厚度大于3km。

1.2 第二阶段的中气旋判据

第二阶段的中气旋判据是使用与距雷达距离有关的径向速度方位切变阈值和厚度阈值识别中气旋。这是1977年NSSL研究人员在Norman多普勒雷达(注:Norman多普勒雷达径向速度探测范围为345km)进行的春季联合多普勒业务试验(Joint Doppler Operational Project, JDOP)中提出来的。主要是考虑到受雷达采样方式的影响,距雷达越远分辨率越低,因此,采用的中气旋识别判据阈值为:距雷达230km范围内,方位切变值 $\geq 5 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$,其伸展厚度大于3km;距雷达230km范围外,切变值 $\geq 1 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$,无厚度要求^[9]。此后,针对中气旋的研究一直使用该识别判据。

1.3 第三阶段的中气旋判据

第三阶段的中气旋判据是使用与距雷达距离有关的旋转速度阈值和厚度阈值识别中气旋。这是1987年NSSL研究人员在多普勒/闪电(Doppler/Lightning, DOPLIGHT)试验中首次提出来的,其使用旋转速度(即 V_t)代替方位切变值作为判据。中气旋识别判据阈值为:距雷达150km范围内,旋转速度 $\geq 15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,其伸展厚度大于3km;距雷达150~230km范围,旋转速度 $\geq 11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,无厚度要求^[10]。此后,美国预报业务人员开始使用旋转速度作为定量识别中气旋的重要参量。

1997年, Andra^[11]根据美国俄克拉荷马(Oklahoma)中部伴有强雹和龙卷的中气旋进行统计,给出了距雷达不同距离圈上观测到的旋转速度和中气旋强度的关系,将中气旋判据进行了细化,根据旋转速度和距雷达距离,将其分成了弱切变、弱中气旋、中等强度中气旋、强中气旋四个区域(图1)。

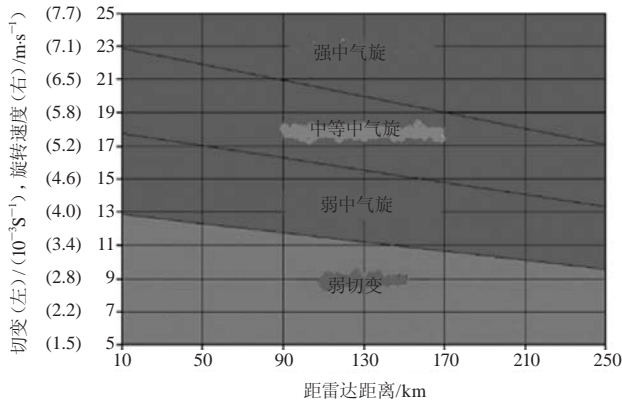


图1 中气旋强度阈值 (改自Andra^[11])
Fig. 1 Mesocyclone strength threshold

图1是目前我国业务中最常使用的中气旋判据依据。对此图的使用要注意以下几点：1) 图1是根据美国Oklahoma中部伴有强雹和龙卷的中气旋统计结果绘出的，按照Burgess等^[12]的统计结论，Oklahoma中部地区伴有强雹或龙卷的中气旋成熟阶段时的核半径平均为2.75km，旋转速度平均为23.3m·s⁻¹。由图1可知，该旋转速度对应为强中气旋；而根据我国的统计^[13]，中气旋成熟阶段时的平均核半径为3.085km，平均旋转速度为18.945m·s⁻¹。由图1可知，在距雷达150km范围内，仅对应为中等强度中气旋。因此在我国使用图1时，要考虑到我国中气旋的平均强度比Oklahoma中部地区伴有强雹或龙卷的中气旋要弱的事实，适当降低对旋转速度值的要求；2) 图1是主观估计中气旋强度的工具，对无经验的预报员，可以起指导作用。但要注意图中中气旋的特定直径是6.5km，对直径明显小于或大于6.5km的中气旋，该图会过低或过高地估计了中气旋的强度；3) 根据NSSL中气旋第三阶段判据，中气旋要有一定的垂直伸展厚度，而图1仅考虑了旋转速度，并没有考虑厚度。由于单层中气旋有可能是没有意义的，因此，在雷达探测单仰角上旋转速度满足阈值后，还要确定一下所探测到的旋转速度区是否满足垂直伸展厚度大于3km的要求。

2 中气旋客观算法的发展

由第一节可知，Donaldson^[7]首次提出了用单多普勒雷达识别中气旋的判据，即径向速度方位切变值 $\geq 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，垂直伸展厚度等于或大于其直径的2倍。其后，NSSL算法开发人员对Donaldson的判据进行了改进，并开发了中气旋切变算法来自动识别是否存在满足阈值的中气旋切变区域。目前我国CINRAD WSR-98D SA/SB使用的中气旋算法是NSSL对中气旋切变算法的改进。因此，本节按照NSSL对中气旋客

观算法改进的过程，分别介绍中气旋切变算法、中气旋算法、中气旋探测算法。

2.1 中气旋切变算法

图2为中气旋切变算法流程图，图中一些术语定义如下：

- 1) 类型矢径 (pattern vector)：指在常定距离圈上寻找到的速度增加的长度。
- 2) 角动量：类型矢径的速度差和方位角距离的乘积。
- 3) 切变：类型矢径的速度差除以方位角距离。
- 4) 2D特征：一个类型矢径与其他类型矢径在方位角和距离圈距离小于阈值时，则可以组成一个2D特征。
- 5) 对称特征：2D特征切向和径向长度之比在阈值范围内，则认为是对称特征。

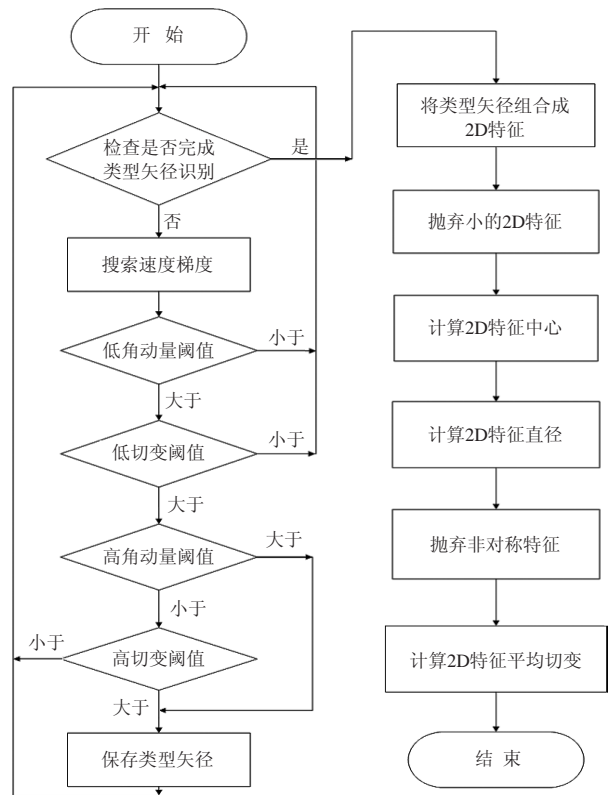


图2 中气旋切变算法流程图 (引自Zrnic等^[14])
Fig. 2 Flow chart of mesocyclone shear algorithm

1985年，Zrnic等^[14]依据1977年春季美国联合多普勒业务项目 (JDOP) 观测，利用位于Norman的多普勒雷达所观测到的Oklahoma中部40个中气旋例子 (伴随强雹和强龙卷天气的中气旋)，给出了中气旋切变算法中参数的阈值：如低切变取为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ，高切变取为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ，低角动量取为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ，高角动量取为 $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。这些值是根据这40个中气

旋主观确定的，原则上使用这些阈值，可以保证40个中气旋没有一个被遗漏。

对比图1发现，低切变取为 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ，意味着强度在弱切变以上的中气旋，在中气旋切变算法中都给予保留。这样算法识别的中气旋能完全涵盖由图1识别的弱切变以上的中气旋。

2.2 中气旋算法及产品应用

2.2.1 中气旋算法

NSSL对中气旋切变算法进行改进后，将其命名为中气旋算法，1996年秋季开始正式用于全美布网的165部S波段多普勒雷达。目前我国CINRAD WSR-98D SA/SB使用的即是中气旋算法。

中气旋切变算法考虑的仅是单层中气旋，中气旋算法增加了对垂直连续性的检验，即考虑中气旋有一定的伸展厚度。中气旋算法第一步是由中气旋切变算法探测2D特征（对称或不对称）；第二步是通过对垂直连续性的检验将中气旋切变分成三种类型。其流程图见图3。

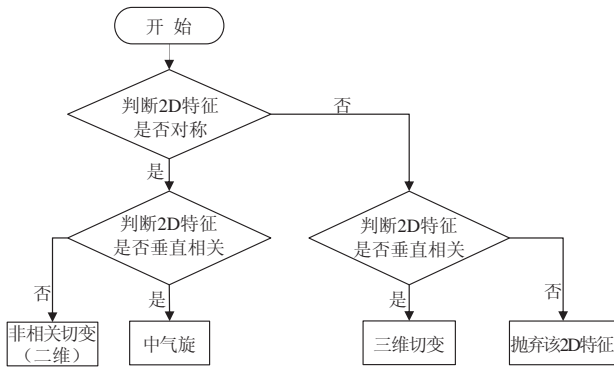


图3 中气旋算法流程图

Fig.3 Flow chart of mesocyclone algorithm

2.2.2 中气旋产品应用

由图3可见，中气旋算法通过对2D特征做垂直相关性检验，最终得到三种类型：非相关切变、三维切变、中气旋。在目前的CINRAD WSR-98D SA/SB中气旋图形产品（M，60号）中，中气旋用深黄色的圆圈（线的宽度为4个像素）显示，并带有离它最近的被识别的风暴单体的标识号；三维切变用浅黄色的圆圈（线的宽度为1个像素）显示，不带有风暴单体的标识号；非相关切变在图形产品上不显示，但在中气旋文本产品（M，60号；中气旋文本产品是中气旋图形产品的匹配产品，共用一个产品号）中有显示。

中气旋图形产品可以叠加到反射率因子或径向速度图形产品上，与强单体相伴随的中气旋伴随着龙卷、强雹、大风等强天气发生，要充分引起

注意。图4出示了2013年3月23日14:53（北京时间）1.5°仰角百色雷达反射率因子图叠加中气旋图形产品（黄色圆圈），此超级单体风暴维持了较长时间的中气旋，并造成沿途经过的田林县定安镇、八渡乡、八桂乡出现了直径为20~30mm的冰雹、强风和雷电等强对流天气。



图4 2013年3月23日百色雷达强反射率因子叠加中气旋（黄色圆圈）

Fig.4 Strong reflectivity with mesocyclone product (yellow circle) in Baise radar on 23 March 2013

在中气旋图形产品上并不能确定中气旋最强2D特征的高度，但在中气旋文本产品中会显示最强切变值及其高度。可以利用文本产品中的最强切变值及其高度进一步区分强天气类型。

2013年3月23日午后，百色市田林县、右江区、田阳县、田东县、平果县的部分地区先后出现雷暴、冰雹、雷雨大风等灾害性天气。根据百色SB雷达探测，导致田林降雹的强风暴维持了一个持续较长时间的中气旋，图5即是中气旋最强切变高度演变图。由图5可见，强中气旋的最强切变维持在 0°C 层左右，这里称为中层中气旋，意味着旋转上升气流超过 0°C

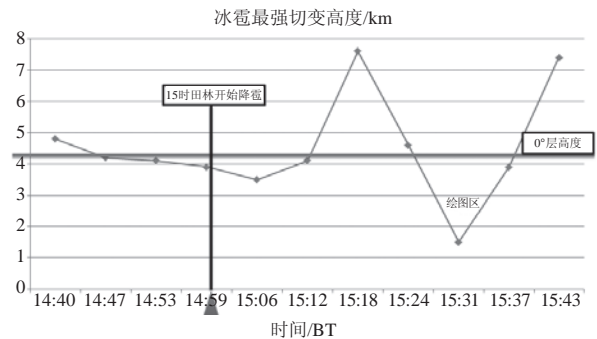


图5 2013年3月23日14:40—15:43百色雷达探测降雹单体中气旋最强切变高度

Fig.5 The height of the strongest shear in the hail cell detected by Baise radar at 14:40 to 15:43 BT on 23 March 2013

层。由冰雹形成和增长的概念模型，上升气流超过0℃层高度且持续时间足够长，说明冰雹胚胎在过冷却水累积区生长，冰雹则可以增长到很大的尺寸。

2013年7月7日午后，一个伴有短时强降水和龙卷产生的超级单体风暴维持了一个持续较长时间的中气旋，图6是中气旋最强切变高度演变图。由图6可见，强中气旋的最强切变维持在0℃层距地高度一半左右，可以称为低层中气旋，可以排除降雹可能。在环境中边界层相对湿度较高和0~1 km垂直风切变较强时，如果低层中气旋强度强、维持时间长，龙卷发生的可能则较大。

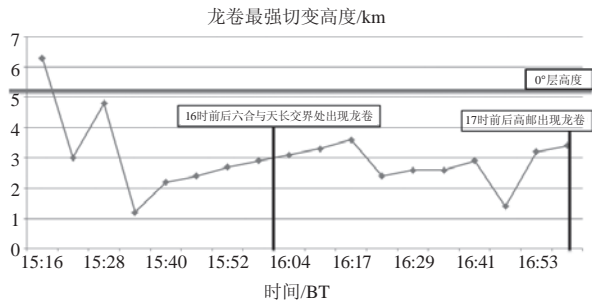


图6 2013年7月7日15:16—16:59南京雷达探测的龙卷单体中气旋最强切变高度

Fig.6 The height of the strongest shear in the tornado cell detected by Nanjing radar at 15:16 to 16:59 BT on 7 July, 2013

2.2.3 中气旋产品应用中需要注意的问题

1) 注意剔除退速度模糊引起的虚假中气旋。在中气旋算法中，没有去除风暴运动，因此对退模糊算法有很大的依赖性，不正确的退模糊算法会导致不正确的中气旋识别。如图7所示的2006年4月9日湖南永州

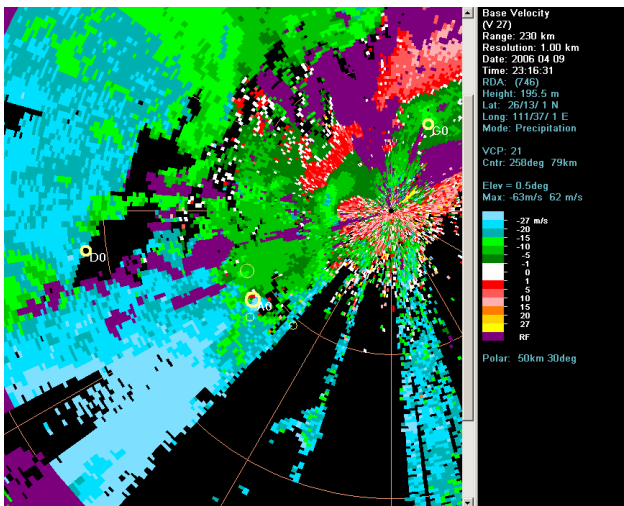


图7 2006年4月9日湖南永州叠加中气旋产品的径向速度图
Fig.7 Radial velocity and mesocyclone product in Yongzhou, Hunan on 9 April 2006

的例子，由于退速度模糊的影响，图中标识号为Do的深黄色圆圈（算法识别的中气旋）是虚假的中气旋。

2) 目前算法中的大部分缺省参数来源于中气旋方位切变算法开发使用的参数。由于资料集只有几个风暴过程时间只有几小时，且是20世纪70年代Oklahoma中部春季伴有强冰雹和龙卷的中气旋参数。因此在我国使用时可以适当对缺省参数做修改。如对于我国台风前部龙卷，可以适当调低缺省参数中的类型矢径(TPV)值。

2.3 中气旋探测算法

中气旋算法参数来源于中气旋切变算法参数，是以Norman多普勒雷达观测到的中气旋资料集建立的。随着美国多普勒雷达的布网，NSSL发现一些地区产生了龙卷等强天气的风暴尺度(2~10km)涡旋会被中气旋算法漏报。因此，NSSL又设计开发出了一个新算法，称为中气旋探测算法^[15]。根据算法过程，给出下列流程图(图8)。

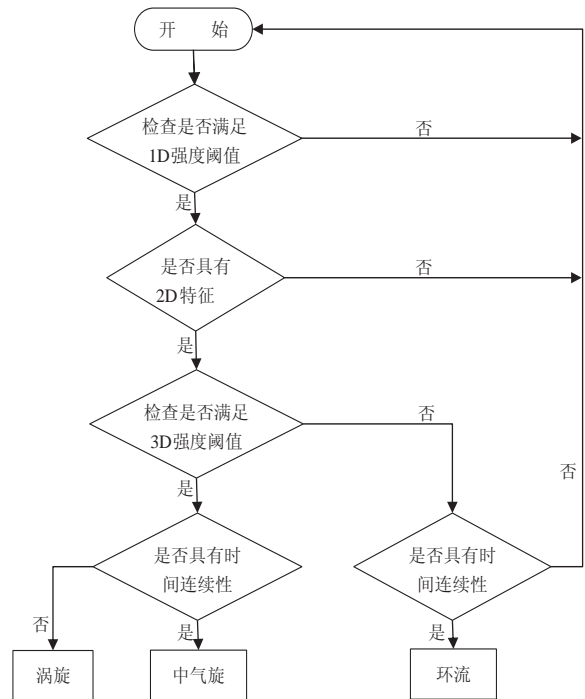


图8 中气旋探测算法流程图

Fig.8 The flow chart of mesocyclone detection algorithm

与目前使用的中气旋算法相比，中气旋探测算法使用了中气旋强度阈值来代替切变阈值；并使用多个不同距离的强度阈值，以识别更多的2D特征；增加了时间连续性测试，能够跟踪并预报中气旋的移动路径。图形产品中增加了随时间变化的最大切变高度显示等特征(图5、图6是根据目前中气旋文本产品的最大切变高度值和探空的0℃层高度做的，中气旋探测算法的图形产

品则将会直接显示随时间变化的最大切变高度), 这样可以使预报员更快地判断中气旋的强度值和高度值, 为相应强天气预警提供宝贵的提前时间。

3 结语

中气旋探测与强天气预警密切相关。中气旋的判据发展经历了三个阶段, 目前国内业务中最常使用的中气旋判据是其中的第三阶段, 即使用与距雷达站距离有关的旋转速度和厚度阈值。对没有内置中气旋算法的多普勒雷达, 预报业务人员依据图1来识别中气旋及其强度, 要注意其阈值不一定完全适用于国内中气旋的实际状况, 因此需有更多的统计结果, 才能由权威部门对图1的阈值做修订。此外, 在雷达探测单仰角上旋转速度满足阈值后, 还要确定所探测到的旋转速度区是否满足垂直伸展厚度大于3km的要求。对满足垂直伸展厚度的真实中气旋要立即发布强天气警报。

中气旋客观算法的发展也经历了三个阶段: 中气旋切变算法、中气旋算法和中气旋探测算法。对目前有中气旋算法的CINRAD WSR-98D SA/SB多普勒雷达, 对与强单体相伴随的真实中气旋要引起高度注意。由于目前我国多普勒雷达业务中使用的速度退模糊算法效果不够显著, 因此对算法识别的中气旋要人工剔除由退速度模糊算法引起的虚假中气旋。同时要充分关注文本产品中切变值大小和高度。根据中气旋文本产品中的最大2D切变高度与环境0℃层高度的比较, 可以将中气旋分成中层中气旋和低层中气旋, 通常在环境边界层相对湿度较高和0~1km强垂直风切

变时, 如果低层中气旋强度强、维持时间长, 则要优先发龙卷预警; 对直径较大的低层中气旋, 优先发短时强降水预警; 对中层强中气旋, 优先发冰雹预警。

参考文献

- [1] Brooks E M. The tornado cyclone. *Weatherwise*, 1949, 2: 32-33.
- [2] Fujita T T. Analytical mesometeorology: a review. *Meteor Monogr*, 1963, 5: 77-125.
- [3] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. *高原气象*, 2009, 28(3): 617-625.
- [4] 蒋义芳, 吴海英, 沈树勤, 等. 0808号台风凤凰前部龙卷的环境场和雷达回波分析. *气象*, 2009, 35(4): 68-75.
- [5] 方翀, 郑媛媛. 新一代天气雷达中气旋产品特征值统计和个例分析. *气象*, 2007, 33(11): 16-20.
- [6] 冯晋勤, 汤达章, 俞小鼎, 等. 新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析. *气象*, 2010, 36(8): 47-52.
- [7] Donaldson R J. Vortex signature recognition by a Doppler radar. *J Appl Meteor*, 1970, 9: 661-670.
- [8] Burgess D W. Single Doppler radar vortex recognition. Part I: Mesocyclone signatures. Preprints, 17th Conf on Radar Meteorology, Seattle, WA. Amer Meteor Soc, 1976.
- [9] JDOP Staff. Final report on the Joint Doppler Operational Project (JDOP), 1979.
- [10] Forsyth D E, Burgess D W, Mooney L E, et al. DOPLIGHT 87 program summary. NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-101. National Severe Storms Laboratory, Norman, OK, 1989.
- [11] Andra D L. The origin and evolution of the WSR-88 D mesocyclone recognition nomogram. Preprints, 28th Conf on Radar Meteorology, Austin, TX. Amer Meteor Soc, 1997.
- [12] Burgess D W, Wood V T, Brown R A. Mesocyclone evolution statistics. Preprints, 12th Conf on Severe Local Storms, San Antonio, TX. Amer Meteor Soc, 1982.
- [13] 周小刚, 王秀明, 俞小鼎, 等. 逾量旋转动能在区分我国龙卷与非龙卷中气旋中的应用. *高原气象*, 2012, 31(1): 137-143.
- [14] Zrnicek D S, Burgess D W, Hennington L D. Automatic detection of mesocyclonic shear with Doppler radar. *J Atmos Oceanic Technol*, 1985, 2: 425-438.
- [15] Stumpf G J, Witt A, Mitchell E D W, et al. The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 304-326.

基于逐日积雪深度预报的藏北草原雪灾等级评估

林志强¹ 路红亚¹ 马艳鲜²

(1 西藏自治区气候中心, 拉萨 850000; 2 西藏自治区气象服务中心, 拉萨 850000)

摘要: 选取西藏高原北部牧区的13个气象站冬半年(11月一次年4月)的1980—2007年逐日积雪深度和最高、最低、平均气温资料,对藏北牧区草场的融雪量与气温关系进行了分析。利用线性回归模型建立融雪率和最高、最低气温的方程,给出了藏北草场的融雪日数、逐日积雪深度的计算方法,得出草场雪灾等级评估产品,实现在一场降雪后根据日常天气预报业务制作草场逐日积雪深度的预报产品,并实时评估雪灾的严重程度,为草原雪灾气象服务提供量化参考产品。对2008—2009、2009—2010和2010—2011年的三个冬半年进行了预报效果评估,1~15d的逐日积雪深度的平均绝对误差不超过2cm;积雪日数误差不超过9d,误差在1d以内的占78.5%;雪灾等级的准确率约为84%;该方法具有较好的预报效果,能为藏北雪灾评估提供参考。该方法的缺陷在于,由于没有准确的定量降雪预报产品,故没有考虑后续降雪量的新增积雪影响。

关键词: 藏北草原, 积雪日数, 融雪率, 雪灾评估

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.004

Snowstorm Intensity Assessment in the Grassland over Northern Tibetan Plateau Based on Daily Snow Depth Forecasting

Lin Zhiqiang¹, Lu Hongya¹, Ma Yanxian²

(1 Climate Center of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000

2 Weather Service Center of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000)

Abstract: The relationship between snow melting rate (SMR) and temperature is analyzed by using ground observation data during the winter half year from current November to the next April in years from 1980 to 2007, at 13 weather stations over the Northern Tibetan Plateau. The daily products of snow cover days, snow depth and snowstorms intensity level are offered based on the linear regression model between SMR and the maximum temperature, minimum temperature. This method may be applied to assessing the snowstorm severity on time, and providing quantitative products in meteorology for the grassland snowstorm. In assessments for three winter half years of 2008-2009, 2009-2010 and 2010-2011, the averaged absolute forecast-error of daily snow depth is less than 2cm for 1-15 days; of snow cover days is less than 9d, of which 78.5% errors are not more than 1 day; of the accuracy of snowstorms intensity level is about 84%. So, it has a better forecast function for the snow disaster assessment in the Northern Tibet. The defect is that no consideration of the new snow cover for the later snowfall, because there is no accurately quantitative snowfall forecasting products.

Keywords: the grassland of Northern Tibetan Plateau, snow cover days, snow melting rate, snowstorm intensity assessment

0 引言

雪灾是西藏高原北部牧区冬春季最主要、影响最广、破坏力最大的气象灾害,积雪覆盖牧场,并且在表面结一层冰壳,使得积雪不能融化而成灾,牲畜无法吃草,膘情较差的牲畜在饥寒交迫下大批死亡,同

时大雪封路、封山,给交通运输、邮政通讯、国防建设、地质测绘等造成巨大损失^[1]。

由于青藏高原地处高寒地带,生态环境脆弱,人口稀少,经济发展较为滞后,雪灾对国民经济的损害尤为严重,对青藏高原雪灾的时空分布特征和环流特征的分析得到了国内气象工作者的重视,姚玉壁等^[2]、董文杰等^[3]、董安祥等^[4]、马林等^[5-6]、梁潇云等^[7]、周陆生等^[8]、时兴合等^[9]对青藏高原不同区域牧区的冬、春、秋季雪灾的气候特征和水汽、环流特征进行了分析。在雪灾的监测和服务中,需要对雪

收稿日期: 2014年7月25日; 修回日期: 2014年9月4日
第一作者: 林志强(1982—), Email: linqz82@gmail.com
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106005);
中国气象局新技术推广项目(CMATG2010M25)

灾的严重程度进行评估。李彰俊等^[10]引入湿度对体感温度的影响以及人畜身上落雪增加的体热损耗,对Schlatter风寒指数进行了修正,对暴风雪灾害进行了有效的评估。周秉荣等^[11]应用灾害学的理论和观点,对造成青藏高原雪灾的致灾因子、孕灾环境和承灾体等要素综合分析,建立从降水、积雪、成灾、灾情评价的综合判识模型。林建等^[12]结合常规站点雪深资料和卫星监测的积雪覆盖率资料,主要考虑积雪厚度和持续时间对不同草场的灾情影响,建立了一套简单的雪灾监测方法。宫德吉等^[13]指出在暴风雪过程中,大风、暴雪、强降温联合施虐,加剧了人畜的热损耗率,从而形成严重的冻害。姚筠等^[14]利用实时雪情和灾情资料建立了安徽省单站和全省的农业经济损失定量评估模型。

在青藏高原冬春季雪灾的气象服务实践中,在一场强降雪之后,对积雪深度的变化和积雪日数估计是评估雪灾严重程度的重要参数,能够为及时抗灾救灾提供参考。在目前的研究中,融雪模式由于需要大量的地雪、雪气交界面模式参数输入^[15-17],在业务中并不适用。本文通过分析气象要素与积雪消融的关系,建立藏北草原分站的逐日积雪深度模拟模型,提出制作逐日积雪深度和积雪日数的预报方法,以准确评估雪灾严重等级,为抵御藏北草原的冬春季雪灾提供参考。

1 资料与方法

选取1980年1月—2008年6月的藏北草原13个气象站(图1)的冬半年(11月—次年4月)的地面气象观测资料,包括积雪深度、最高气温、最低气温、日平均气温等气象要素,对积雪消融速率(即一天消融的积雪厚度,以下称融雪率)与气象要素的关系进行分析。采用线性回归方法建立融雪率与气象要素的关系,建立藏北草原分站融雪率预报模型。

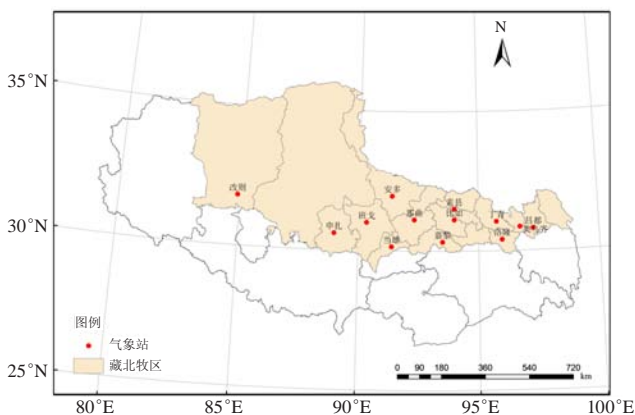


图1 藏北草原区域和气象站分布

Fig. 1 The grassland in Northern Tibetan Plateau and locations of weather stations

2 藏北草原气温-融雪率关系

气温是决定融雪率的主要因素^[18-20],为了分析藏北草原气温和融雪率的关系,选取1980年1月—2008年6月间的符合以下条件的个例:

- 1) 前一天有积雪,而当天没有新降雪的个例;
- 2) 去掉前一天有积雪,而当天已经完全消融的情况。

将这些个例的当天积雪减前一天的积雪,即可得到融雪率,而这些积雪都是在前一天08时至当天08时这一时段内消融的,该时段的最高、最低和平均气温均可从气象记录中得到。

分别对最高、最低和平均气温以1℃为间隔,计算每一温度区间的平均融雪率(图2),从图中可见:最高、最低和平均气温都满足准正态分布;最高、最低和平均气温与融雪率都呈线性关系,即温度越高(低),融雪率越大(小),相关系数分别为0.824、0.856和0.838,均通过0.001的显著性水平检验,其中最低气温与融雪率的关系最好;从两者的线性趋势关系上看,最高、最低和平均气温每升高1℃,积雪的融雪率分别增加0.036、0.046和0.055cm。

由此可见,温度是一种很好的计算融雪率的指标^[21-22],以下将以温度为因子,分别对藏北草原每个气象站建立融雪率预报方程。

3 积雪深度预报方法及结果检验

考虑到日常天气预报业务中只对最高、最低气温进行预报,因此这里只建立基于最高和最低气温的模型,用线性回归方法建立融雪量 ΔS 与最高气温、最低气温的方程:

$$\Delta S = a_0 + a_1 T_{\max} + a_2 T_{\min} \quad (1)$$

其中, a_0 、 a_1 、 a_2 为回归系数, T_{\min} 、 T_{\max} 分别为当日最低、最高气温;当 $\Delta S < 0$ 时, $\Delta S = 0$ 。

对13个站分别建立回归方程,回归系数和拟合结果见表1。其中,洛隆的拟合结果只通过了0.05显著性水平检验,改则和昌都分别通过了0.01显著性水平检验,其他的拟合都通过了0.001显著性水平检验,可见采用最低和最高气温作为预报因子参数是可行的。作为例外情况,从图2中,当 $T_{\max} \geq 10^\circ\text{C}$ 或者 $T_{\min} \geq 0^\circ\text{C}$ 时,则融雪率为现有的积雪;当通过回归方程计算的融雪率为负值时,融雪率取为0。

在日常业务预报产品中,仅提供24~168h(1~7d)最高、最低气温的分站定量预报结果,因此该时段最高、最低气温采用西藏自治区气象台提供的定量预报;从延伸期预报能力^[23-27]来看,目前的预报水平较低,而且在西藏自治区气象台未提供该期

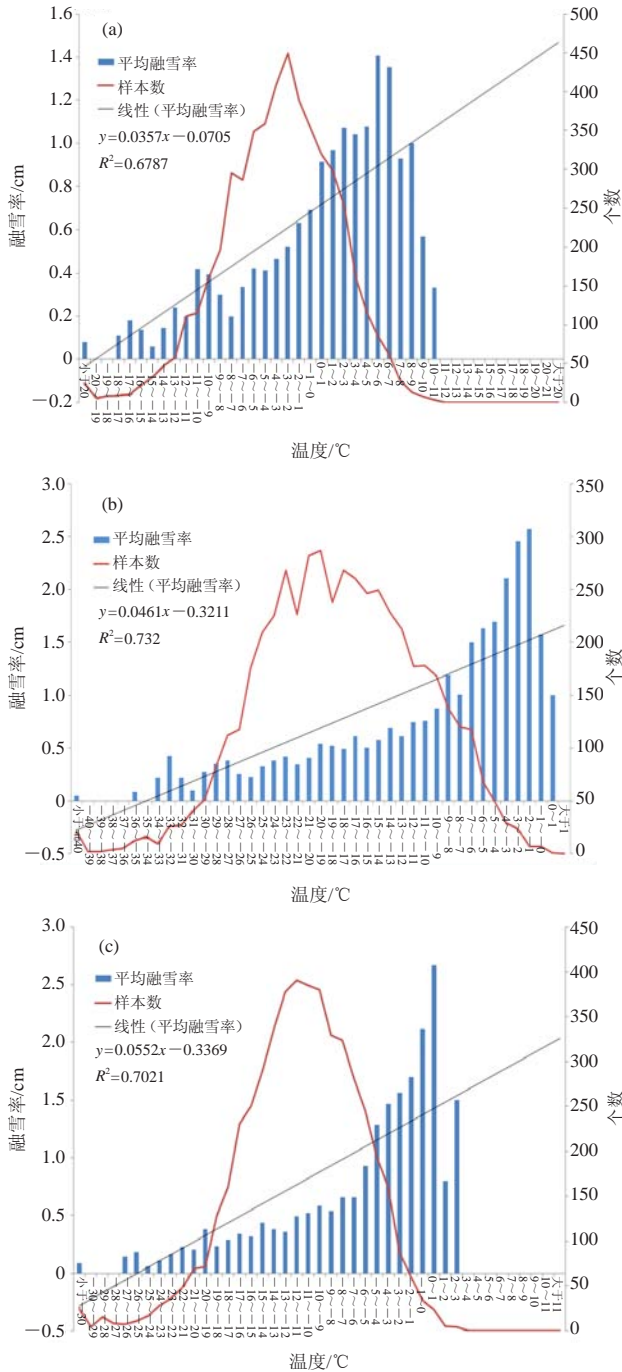


图2 不同温度的平均融雪率分布
(a) 最高气温; (b) 最低气温; (c) 平均气温
Fig. 2 Distribution of averaged snow melting rate at different temperature
(a) the maximum temperature; (b) the minimum temperature; (c) average temperature

间的逐日温度预报的情况下, 8d及其后的最高、最低气温值采用气候平均值。值得指出的是, 由于目前的预报水平提供准确、定量降雪量预报尚存在较大的困难^[28-30], 因此无法在积雪深度预报中对新增积雪进行

表1 融雪量回归方程系数和拟合结果
Table 1 The regression coefficients and fitting effects

站点	a_0	a_1	a_2	样本数	P值
改则	1.126	0.021	0.008	190	0.01
班戈	0.968	0.002	0.027	395	0.001
安多	1.080	0.031	0.023	488	0.001
那曲	1.113	0.032	0.023	502	0.001
申扎	1.681	0.080	0.039	132	0.001
当雄	1.173	0.039	0.030	332	0.001
索县	0.935	0.009	0.022	648	0.001
比如	0.790	0.053	0.01	326	0.001
丁青	1.202	0.081	0.037	237	0.001
类乌齐	1.752	0.044	0.062	182	0.001
昌都	1.039	0.002	0.061	47	0.01
嘉黎	1.703	0.053	0.049	1043	0.001
洛隆	1.375	0.042	0.116	49	0.05

考虑, 因而在模型中只对融雪过程中不再有新的降雪的情况进行分析。此预报模型可以提供的积雪深度预报产品包括:

1) 直至积雪完全消融的逐日积雪厚度 H_t 的预报。预报方法是:

$$H'_t = H'_{t-1} - \Delta S_{t-1} \quad (2)$$

$$H_t = Ceil(H'_t), \quad t=1,2,3,\dots \quad (3)$$

式中, H'_{t-1} 为前一天的积雪厚度, $t=0$ 即为起报时间的积雪厚度; ΔS_{t-1} 为根据式(1)由最高、最低气温得到的融雪量, 考虑到积雪深度一般取整数, 因此对最后的积雪厚度序列结果取不小于 H'_t 的整数为最后结果 H_t (即Ceil函数)。

考虑到温度预报有一定的不确定性, 对 ΔS 预报中, 分别对最高、最低气温取 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的预报偏差, 由于最高气温和最低气温的回归系数 a_1 和 a_2 均为正数, 因此即相当于融雪量 ΔS 的范围为:

$$\Delta S_{\min} = a_0 + a_1(T_{\max} - 2) + a_2(T_{\min} - 2) \quad (3)$$

$$\Delta S_{\max} = a_0 + a_1(T_{\max} + 2) + a_2(T_{\min} + 2)$$

这样可以得到从起报时间到完全融化期间的逐日积雪深度及其不确定性烟羽图 (图3a), 这是本预报方法的基础产品, 其他的产品均基于此产品而制作。

2) 持续积雪日数 D 预报 (图3b)。由逐日积雪深度预报产品, 即可得到持续积雪日数 D , 并可以相应地得到考虑了温度预报不确定性的持续积雪日数 $D_{\min} \sim D_{\max}$, 如图3a中, $D=47\text{d}$ 、 $D_{\min}=40\text{d}$ 、 $D_{\max}=54\text{d}$ 。

3) 藏北草原的逐日积雪深度预报 (图3c)。对所有站取预报日的积雪深度预报值, 即可形成当日的积雪深度空间分布预报图, 如从图3a中即可知安多站1998年2月3日的积雪深度预报量为12cm, 考虑温度不

确定性后的取值范围为9~15cm。

利用2008—2009、2009—2010和2010—2011年的三个冬半年的西藏自治区气象台逐日天气预报产品对藏北草原的逐日积雪深度预报，并制作服务产品，预报制作的标准为当藏北任意一站的当日积雪厚度 $\geq 1\text{cm}$ 时，即启动本预报模块。

对预报产品的检验方法为：当预报时效的时段内，预报站没有新的降雪，即对其预报效果进行评

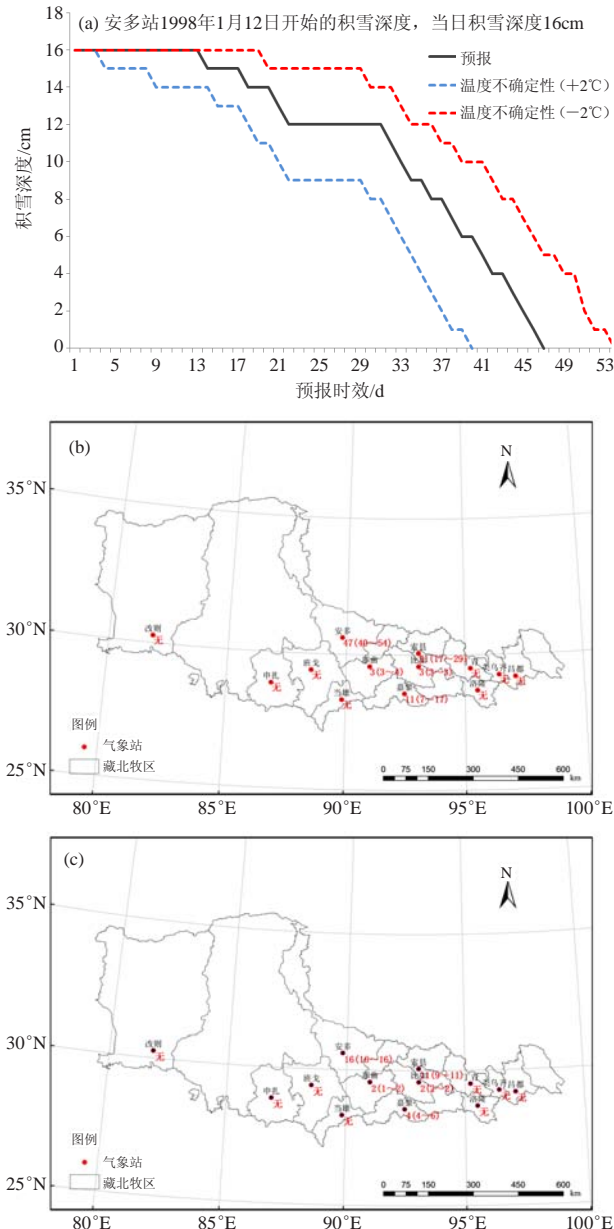


图3 1998年1月12日起报的积雪深度预报产品示例
(a) 安多站逐日积雪深度；(b) 藏北草原持续积雪日数；(c) 藏北草原24h积雪深度

Fig. 3 A sample of forecast products of snow cover over Northern Tibetan Plateau, started from 12 January 1998
(a) daily snow depth at Amdo Station; (b) continuous snow cover days; (c) snow depth after 24 hours

估，例如如果预报的第三天又有新的降雪，那么则只对1、2d的预报产品进行评估，而不评估3d及其后的产品预报效果。

1~15d的逐日积雪深度预报绝对误差如图4a所示，可见15d内的平均绝对误差不超过2cm，其中1d有300多个样本，平均绝对误差为0.76cm；2d有约200个样本，平均绝对误差为1.11cm；3d有约180个样本，平均误差为1.05cm；平均绝对误差最大为13d，为1.65cm；在1~3d，预报误差较小，之后误差增大，但时间较长后的积雪深度较小，误差增长的幅度不大。

将一次降雪后直至雪融化完的一次过程称为一次融雪过程，以降雪当天的积雪深度作为起报日期，试报期间共有398个融雪过程，其中383个无灾，11个轻度雪灾，3个中度雪灾，1个严重雪灾；图4b给出积雪日数的预报检验结果，可见误差为0d的有194个过程，占48.7%；误差为1d的有119个过程，占29.9%；误差为2d的有43个，占10.8%；误差为3d以上的有42个，占10.5%；最大误差为9d，共有3个过程；积雪日数预报的平均误差约为1.1d。

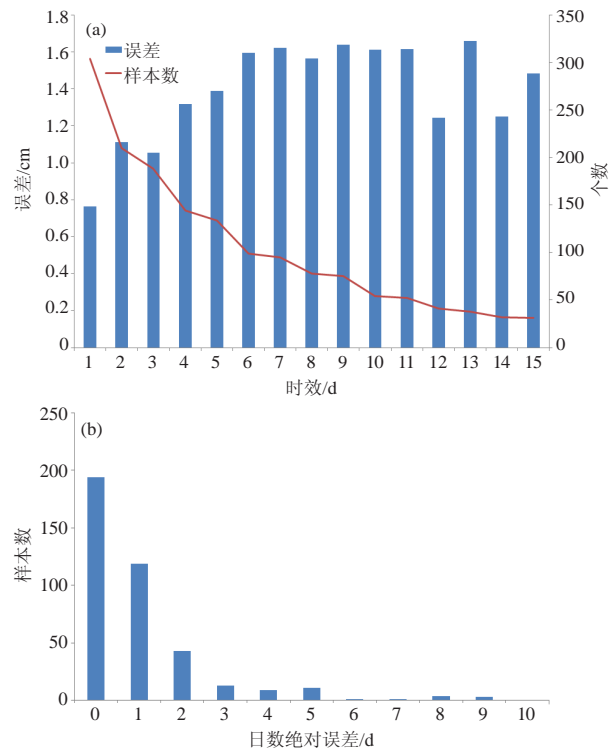


图4 积雪深度与积雪日数预报效果评估
(a) 1~15d积雪深度预报绝对误差；(b) 积雪日数预报误差
Fig. 4 The assessments of forecast effects
(a) the averaged absolute error of daily snow depth on 1-15 days; (b) the absolute error of days with continuous snow cover

4 雪灾等级评估

根据第三节建立的积雪深度预报结果，可以对雪

灾严重等级进行评估(图5)。评估一次雪灾的严重程度不仅取决于这次雪灾的积雪深度,还取决于这次雪灾中积雪的持续时间,例如,初春和初夏两次降雪过程后,积雪深度均为20cm,由于初春的温度较低,融雪较慢,即使没有后续的降雪,积雪时间可能达到10d以上,因此形成了一次严重雪灾;而初夏由于温度高,积雪很快消融,可能持续积雪日数仅为1~2d,因此不会对农牧业生产形成很大的影响,不会造成雪灾。因此,这里综合利用逐日积雪深度 H 和持续积雪日数 D 的预报,对雪灾的等级进行评估,雪灾的评级采用假拉等^[31]定义的雪灾强度等级(表2),由图3a即可知此次雪灾程度为严重雪灾。

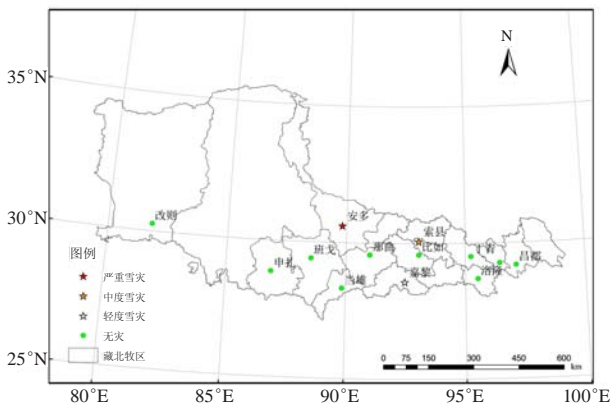


图5 1998年1月12日藏北草原雪灾等级评估

Fig. 5 The evaluation of snowstorm intensity levels for 12 January 1998

表3给出了2008—2009、2009—2010和2010—2011年的三个冬半年的雪灾等级估计结果,有334个过程的评估等级与实际等级一致,占84%;有51个过程评估等级与实际等级差1级,占13%,其中5个评估等级比实际等级弱1级,46个比实际等级强1级;

表2 雪灾强度等级^[31]

Table 2 The snowstorms intensity levels^[31]

雪灾等级	积雪深度/cm	持续日数/d	受灾情况
轻度雪灾	3~4	≥10	影响牛的采食,对羊的影响尚小,对马无影响,牲畜死亡在5万头(只)以下
	≥5	≥5	
中度雪灾	5~9	≥10	主要影响牛、羊的采食,对马的影响尚小,牲畜死亡在5~10万头(只)
	≥10	≥5	
严重雪灾	5~9	≥20	影响各类牲畜的采食,牛、羊损失较大,出现死亡;牲畜死亡在10万头(只)以上

表3 雪灾等级评估

Fig. 3 Assessment of snowstorm intensity levels

	评估等级			
	严重雪灾	中度雪灾	轻度雪灾	无灾
实际等级				
严重雪灾	/	1	/	/
中度雪灾	/	2	1	/
轻度雪灾	/	1	7	3
无灾	1	12	45	325

13个过程评估等级比实际等级强2级以上,没有过程评估等级比实际等级弱2级以上。

5 结论与讨论

1) 气温与融雪率都呈线性关系,最高、最低和平均气温每升高一度,积雪的融雪率分别增加0.036、0.046和0.055cm;采用最高和最低气温利用线性回归方法建立藏北草原分站融雪率回归方程,除了洛隆、昌都和改则拟合结果分别通过0.05、0.01和0.01显著性检验外,其他各站均通过0.001显著性水平检验;

2) 基于最高、最低气温和融雪率的回归模型,利用日常业务预报产品和气候平均值,可以提供包括逐日积雪深度、积雪日数和雪灾严重等级评估等产品,该方法没有考虑后续降雪量的新增积雪影响,只是在假定没有新增积雪的情况下,在未来可能温度影响下积雪的消融速度;

3) 对2008—2009、2009—2010和2010—2011年的三个冬半年的预报结果15d内的平均绝对误差不超过2cm;积雪日数误差不得超过9d,误差在1d以内的占78.5%;雪灾等级评估的准确率约为84%。

本文基于最高、最低气温建立了藏北草原融雪率预报方程,利用业务天气预报产品和气候平均状况建立了积雪深度预报方法,并在此基础上建立了雪灾等级的评估。由于重点考虑了方法的业务应用,因此对积雪融化速度的预报上没有结合风速、日照、相对湿度、地温等其他影响因素,这在一定程度上可能影响了积雪融化预报的准确率。更重要的是,由于目前定量降水及降雪-积雪深度转换的预报准确率不高,因此本文没有考虑起报日后的新降雪对雪灾等级的影响,这在一定程度上影响了预报产品的服务效果。在服务过程中,根据中、长期预报(定性)结论,由预报和服务值班人员对今后的天气状况进行描述,以修正此缺陷,如何提高产品的定量程度和准确度还有待进一步的研究。

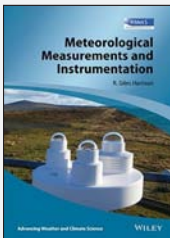
参考文献

- [1] 刘光轩. 中国气象灾害大典—西藏卷. 北京: 气象出版社, 2008.
- [2] 姚玉璧, 余优森. 青藏高原东北边缘牧区雪灾的研究. 气象, 1994, 20(2): 47-51.
- [3] 董文杰, 韦志刚, 范丽军. 青藏高原东部牧区雪灾的气候特征分析. 高原气象, 2001, 20(4): 402-406.
- [4] 董安祥, 瞿章, 尹宪志, 等. 青藏高原东部雪灾的奇异谱分析. 高原气象, 2001, 20(2): 214-219.
- [5] 马林, 马元仓, 王文英, 等. 青藏高原东部牧区秋季雪灾天气的形成及预报. 高原气象, 2001, 20(4): 407-414.
- [6] 马林, 张青梅, 赵春宁, 等. 青藏高原的东部牧区春季雪灾天气的形成及其预报. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 61-68.
- [7] 梁潇云, 钱正安, 李万元. 青藏高原东部牧区雪灾的环流型及水汽场分析. 高原气象, 2002, 21(4): 359-367.
- [8] 周陆生, 李海红, 汪青春. 青藏高原东部牧区大-暴雪过程及雪灾分布的基本特征. 高原气象, 2000, 19(4): 450-458.

- [9] 时兴合, 李生辰, 李栋梁, 等. 青海南部冬季积雪和雪灾变化. 气候变化研究进展, 2007, 3(1): 36-40.
- [10] 李彰俊, 官春宁, 姜学恭, 等. 风寒指数的修订及其在暴风雪灾害评估中的应用. 气象, 2007, 33(S1): 3-9.
- [11] 周秉荣, 申双和, 李凤霞. 青海高原牧区雪灾综合预警评估模型研究. 气象, 2006, 32(9): 106-110.
- [12] 林建, 范蕙君. 内蒙古雪灾监测方法研究. 气象, 2003, 29(1): 27-31.
- [13] 官德吉, 李彰俊. 内蒙古暴风雪灾害及其形成过程. 气象, 2001, 27(8): 19-23.
- [14] 姚筠, 马晓群, 许莹, 等. 2008年安徽省雪灾农业影响定量评估研究. 气象, 2010, 36(1): 85-90.
- [15] 马虹, 刘一峰, 胡汝骥. 天山季节性积雪的能量平衡研究和融雪速率模拟. 地理研究, 1993, 12(1): 87-93.
- [16] 陈肖柏, 张永萍. 南极长城站积雪及其消融过程. 南极研究, 1991, 3(3): 8-14.
- [17] 车宗玺, 金铭, 张学龙, 等. 祁连山不同植被类型对积雪消融的影响. 冰川冻土, 2008, 30(3): 392-397.
- [18] 周秉荣, 李凤霞, 申双和, 等. 青海高原雪灾预警模型与GIS空间分析技术应用. 应用气象学报, 2007, 18(3): 373-379.
- [19] 韩海东, 王建, 王欣, 等. 科其喀尔冰川表渍区冰崖消融的度日因子研究. 冰川冻土, 2009, 31(4): 620-627.
- [20] 柯丹, 汪玲玲, 牛生杰, 等. 基于常规气象资料融雪模式的建立及应用. 大气科学学报, 2010, 33(5): 555-560.
- [21] 方乾, 于波, 沈树勤, 等. 新一代天气预报业务流程. 北京: 气象出版社, 2001.
- [22] 章国材, 矫梅燕, 李延香, 等. 现代天气预报技术和方法. 北京: 气象出版社, 2007.
- [23] 张存杰, 董安祥. 对T63L16所作月延伸预报准确率的评估. 气象, 1998, 24(10): 38-42.
- [24] 穆海振, 徐家良. 卡尔曼滤波方法在动力延伸预报产品释用中的应用. 气象, 2000, 26(7): 20-22.
- [25] 林纾, 李维京, 陈丽娟. 月动力延伸预报产品在甘肃省的释用及评估. 气象, 2004, 30(10): 22-26.
- [26] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸预报. 气象, 2010, 36(7): 111-122.
- [27] 钱维宏. 中期: 延伸期天气预报原理. 北京: 科学出版社, 2012.
- [28] 矫梅燕, 龚建东, 周兵, 等. 天气预报的业务技术进展. 应用气象学报, 2006, 17(5): 594-602.
- [29] 罗兴宏. 那曲冬季雪灾天气的500hPa形势场的客观分型. 气象, 1995, 21(1): 40-43.
- [30] 王雨, 闫之辉. 2004年汛期主客观降水预报检验. 热带气象学报, 2006, 22(4): 331-339.
- [31] 假拉, 杜军, 边巴扎西. 西藏气象灾害区划研究. 北京: 气象出版社, 2008.

新书架 NEW BOOK

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



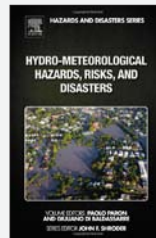
Meteorological Measurements and Instrumentation
《气象测量及仪器》

编著者: R. Giles Harrison
出版者: Wiley-Blackwell
出版年: 2014



The Sun's Influence on Climate
《太阳对气候的影响》

编著者: Joanna D. Haigh,
Peter Cargill
出版者: Princeton University Press
出版年: 2015年



Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters
《水文气象危害、风险及灾害》

编著者: Paolo Paron,
Giuliano Di Baldassarre
出版者: Elsevier
出版年: 2014年



《应对气候变化的全球治理研究》

编著者: 吴静等
出版者: 科学出版社
出版年: 2016年



《大气PM_{2.5}对中国城市公众健康效应研究》

编著者: 潘小川等
出版者: 科学出版社
出版年: 2016年



《公共气象服务导论》

编著者: 吴先华等
出版者: 气象出版社
出版年: 2016年



《地球气候的演变: 过去、现在和未来》

编著者: 丁一汇
出版者: 科学普及出版社
出版年: 2016年



《大气化学动力学》

编著者: 葛茂发、佟胜睿等
出版者: 科学出版社
出版年: 2016年

基于MaxEnt的华山松大小蠹在中国潜在分布区预测

王茹琳 余华彬 王闫利 姜淦 林姗 沈沾红
(四川省农村经济综合信息中心, 成都 610072)

摘要: 华山松大小蠹是华山松的毁灭性害虫, 明确华山松大小蠹在中国的潜在分布对有效控制其扩散蔓延有重要的指导意义。基于最大熵算法的生态位模型MaxEnt和地理信息系统软件DIVA-GIS对华山松大小蠹进行适生区分析及预测, 用受试者工作特征曲线对预测模型和结果进行评估, 用Jackknife法分析影响华山松大小蠹分布的重要因子。结果表明, 华山松大小蠹在我国适生范围比较集中, 高风险区主要分布在陕西南部、四川东北部和甘肃东南部三省交界地区。确定了影响华山松大小蠹分布的主导气候因子, 即最干季度平均温度、最暖季度降水量、降水量变异系数、温度季节性变化标准差和最冷季度降水量。分析了主导气候因子与该虫分布概率的关系, 并对下一步的工作思路进行了介绍。

关键词: 华山松大小蠹, MaxEnt, 适生性分析, 影响因子

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.005

Potential Geographical Distribution of *Dendroctonus armandi* in China Based on the MaxEnt Prediction

Wang Rulin, Yu Huabin, Wang Yanli, Jiang Gan, Lin Shan, Shen Zhanhong
(Sichuan Provincial Rural Economic Information Centre, Chengdu 610072)

Abstract: *Dendroctonus armandi* is a destructive insect of *Pinus armandi*, it caused serious economic losses annually to the forest industry in China. Determination of the potential geographical distribution of *Dendroctonus armandi* is an important factor for effectively controlling the spread of this pest. In this study, the niche model MaxEnt and Diva-gis were employed to analyze and predict the suitable distribution area of *Dendroctonus armandi*, the ROC was used to evaluate the prediction model and the prediction results, and the Jackknife analysis was adopted to analyze the most important environmental factors that affect the occurrence of *Dendroctonus armandi*. The results show that *Dendroctonus armandi* had a concentrated distribution regions: the south of the Shaanxi Province, the northeast of the Sichuan Province and the southeastern Gansu Province. Four dominant climatic factors controlling *Dendroctonus armandi* distribution were determined, including the mean temperature in the driest quarter, the precipitation in the warmest quarter, the precipitation seasonality, the temperature seasonality and the precipitation in the coldest quarter. Here, we analyze the relationship between dominant climatic factors and the probability of the pest presences, and suggest a thinking way for the further research.

Keywords: *Dendroctonus armandi*, MaxEnt, suitability analysis, environmental factors

0 引言

华山松大小蠹 (*Dendroctonus armandi* Tsai and Li) 又名凝脂小蠹, 属鞘翅目 (Coleoptera) 齿小蠹科 (Ipidae) 昆虫, 目前仅在我国有分布。由于该虫隐蔽性强, 世代重叠严重, 防治十分困难, 每年大量发生危害, 严重影响木材材质, 降低经济价值, 甚至导

致华山松大量死亡, 给华山松林区生态环境建设和林业产业带来巨大的损失^[1-2]。近年来, 华山松大小蠹在四川和陕西发生日益严重, 发生面积不断扩大, 为防止该虫进一步扩散和危害, 科学研究并明确其在我国的潜在适生区分布, 制定长治有效的防治措施已经刻不容缓。

Phillips等^[3]研发了一种生态位模型软件MaxEnt (maximum entropy modeling), 它是以最大熵理论 (maximum entropy method) 为基础的一种选择性方法, 用于密度估计和物种分布预测, 采用物种出现点数据和环境变量数据对物种生境适宜性进行评价, 选择熵最大的分布最为最优分布, 推测该物种在目标地

收稿日期: 2014年1月24日; 修回日期: 2014年7月10日
第一作者: 王茹琳 (1986—), Email: wrl_1986_1@163.com
资助信息: 中国气象局“2012年业务专项经费”; 四川省气象局科学技术研究开发课题 (川气课题 2013-开发-10)

区的适生分布, 并分析环境变量对分布概率的影响。物种分布和森林生态类型的主要影响因子往往为气象要素, 气候变化对物种的生理、分布区域及与天敌关系等产生了较大的影响^[4]。

本研究采用MaxEnt, 分析并预测了华山松大小蠹在我国的潜在生物分布区域, 用Jackknife法分析了影响华山松大小蠹分布的重要因子, 为开展该虫在我国的分布区域测报提供技术支持, 为制定合理、有效的检疫及防治措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 华山松大小蠹分布数据的来源与处理

数据来源: 物种分布数据的获得一般通过实地考察、国内外发表论文和标本馆记录三种方式获得^[5-6]。本研究中, 华山松大小蠹的分布数据主要通过实地考察和查阅国内外公开发表的相关论文获取。

数据处理: 通过Google地图查找分布点的经纬度, 按照MaxEnt的要求, 将华山松大小蠹实际分布点按物种名、分布点经度和分布点纬度顺序储存为csv格式的文件^[7]。

1.2 试验软件

研究使用的生态位分析软件为MaxEnt, 由Phillips等^[3]编写, 工作原理可表述为: 一个物种在没有任何条件约束的情景下, 会尽最大可能扩散蔓延, 接近均匀分布^[8]。模型计算基于贝叶斯定理, 利用Gibbs分布将特征集进行加权并作为参数, 进行一系列运算, 得到物种分布的最大熵联合分布估计, 进而建立地理分布预测模型^[9]。软件获取方法: 提供研究者姓名、研究机构信息和电子邮件地址后, 可以从<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>免费下载, 本研究使用的版本为3.3.3。

用于地图处理的GIS软件采用免费软件DIVA-GIS, 从<http://www.diva-gis.org/>下载, 版本为7.5。

1.3 环境层数据和地图数据

环境层数据: 采用WORLDCLIM (<http://www.worldclim.org/>) 免费下载的1950—2000年19个生物气候变量的监测数据, 数据空间分辨率为5'。19个气候变量为: 年平均气温 (bio1)、平均日较差 (bio2)、等温性 (bio3)、温度季节性变化标准差 (bio4)、最暖月最高温度 (bio5)、最冷月最低温度 (bio6)、年均温变化范围 (bio7)、最湿季度平均温度 (bio8)、最干季度平均温度 (bio9)、最暖季度平均温度 (bio10)、最冷季度平均温度 (bio11)、年降水量 (bio12)、最湿月降水量

(bio13)、最干月降水量 (bio14)、降水量变异系数 (bio15)、最湿季度降水量 (bio16)、最干季度降水量 (bio17)、最暖季度降水量 (bio18) 和最冷季度降水量 (bio19)。

地图数据: DIVA-GIS所需的分析底图采用从国家基础地理信息系统 (<http://nfgis.nsd.gov.cn/>) 下载的1:400万的中国行政区划图。

1.4 研究方法

MaxEnt模型操作方法^[10-11]: 将华山松大小蠹的分布数据和19个生物气候变量导入MaxEnt, 参数设置为: 25%的分布点作为测试集, 剩余的分布点为训练集, 选择刀切法分析影响因子, 输出格式为ASCII。图形处理: ASCII格式文件导入DIVA-GIS进行格式转换, 将华山松大小蠹在我国的潜在适生区划分为4个等级: 高风险区 (61~100, 红色)、中风险区 (31~60, 橙色)、低风险区 (11~30, 黄色) 和无风险区 (0~10, 白色)。

主导因子的选取: 根据19个生物气候因子对华山松大小蠹分布影响贡献率的大小, 选出影响华山松大小蠹分布的主导因子。在此基础上, 重建华山松大小蠹在中国分布的最大熵模型, 并进行模拟结果精度评价^[12]。

2 结果与分析

2.1 华山松大小蠹在中国的适生性分析

利用DIVA-GIS软件和MaxEnt生态位模型分析处理的华山松大小蠹在中国的适生性分布结果如图1所示: 华山松大小蠹在我国的高风险区主要集中在陕西

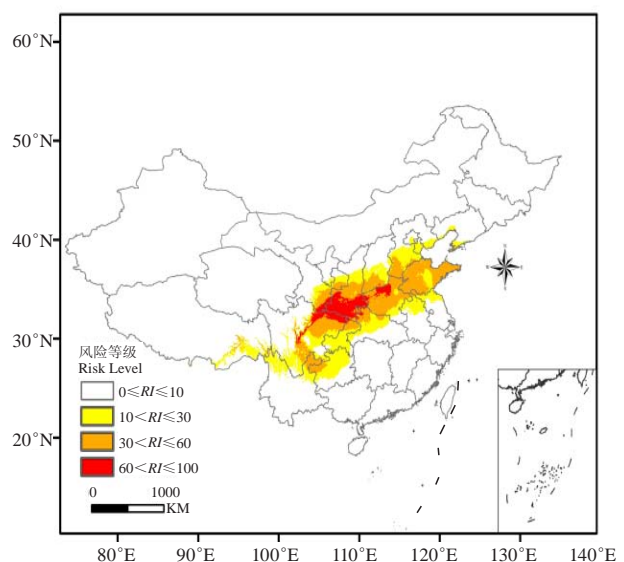


图1 基于MaxEnt的华山松大小蠹在我国的适生区域
Fig. 1 Map of potential regions suitable for *Dendroctonus armandi* in China, based on the MaxEnt prediction

南部、四川东北部和甘肃东南部三省交界地区，以及湖北西北部地区。根据实际调查及查阅文献得知，该区域也是该虫近年来发生严重的地区。中风险区分布范围以高风险区为核心向外扩大，主要集中在四川、陕西、山西、河南和山东等省。

2.2 华山松大小蠹发生的影响因子分析及 ROC 曲线评价

图2为影响华山松大小蠹发生的主要气候变量的刀切分析图，从图中可以看出：最干季度平均温度（bio9）对华山松大小蠹分布影响最大，训练增益（training gain）超过了2.0。最冷季度平均温度（bio11）、最湿月降水量（bio13）和最冷月最

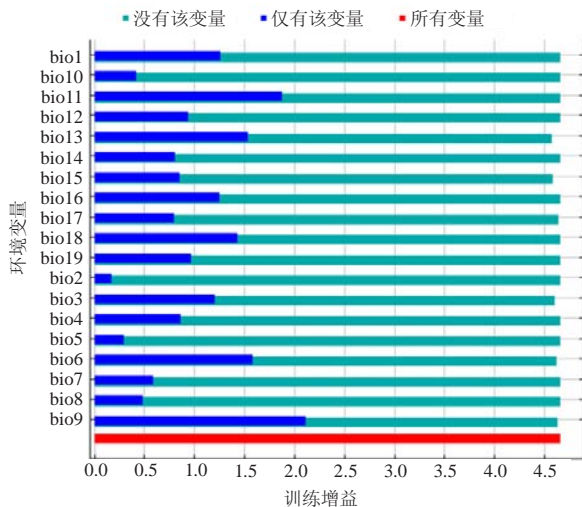


图2 影响华山松大小蠹发生的环境变量的刀切分析
Fig.2 The jackknife analysis of importance of environmental variables for *Dendroctonus armandi*

2.3 主导气候因子筛选及其与存在概率关系

表1给出了影响华山松大小蠹在中国分布的前5个主要气候因子的贡献百分率和累计贡献百分率。按照贡献百分率由大到小排序依次为：最干季度平均温度（25.4%）、最暖季度降水量（21.3%）、降水量变异系数（11%）、温度季节性变化标准差（10.1%）和最

表1 影响华山松大小蠹分布的气候因子贡献百分率和累积贡献百分率

Table 1 The accumulated contribution of each environmental variable to the potential distribution of *Dendroctonus armandi* resulted from the MaxEnt

环境变量	MaxEnt 贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
最干季度平均温度	25.4	25.4
最暖季度降水量	21.3	46.7
降水量变异系数	11	57.7
温度季节性变化标准差	10.1	67.8
最冷季度降水量	9.9	78.7

低温度（bio6）对该虫分布影响较大，训练增益均超过1.5。平均日较差（bio2）、最暖月最高温度（bio5）、最湿季度平均温度（bio8）和最暖季度平均温度（bio10）对华山松大小蠹分布影响较小，它们的训练增益都小于0.5。

目前研究中，一般采用ROC曲线分析方法对物种潜在分布预测模型进行评价^[13-14]，它通过将连续变量设定出多个不同的临界值，从而计算出一系列敏感性和特异性，AUC值在0~1，值越大表示模型预测效果越好。本研究所得的AUC值为0.995（图3），比随机分布模型的AUC值（约为0.5）大，说明本实验的预测结果具有较高的可信度。

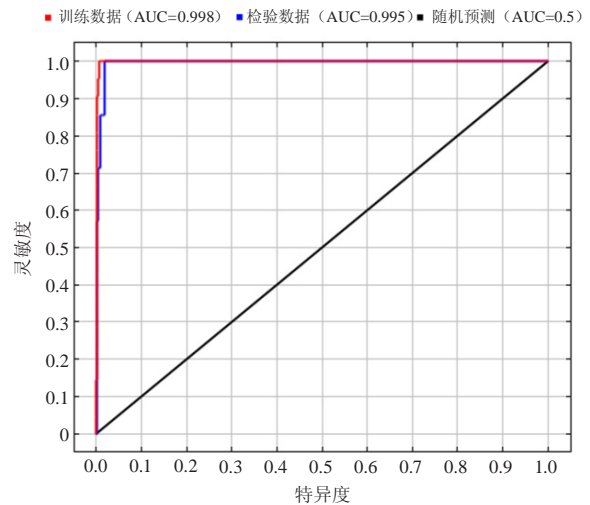


图3 ROC曲线及AUC值
Fig. 3 The ROC curve and AUC value

冷季度降水量（9.9%）。这5个气候因子的累积贡献率达到78.7%，可以认为这5个气候因子是影响华山松大小蠹分布的关键主导因子。

图4反映了5个主要气候因素对华山松大小蠹分布的影响。图4a曲线显示出当最干季度平均温度约0~4℃时，华山松大小蠹分布概率均超过0.6，达到2℃时的分布概率为最大值。图4b曲线显示出最暖季度降水量在约200~1000mm时，华山松大小蠹分布概率变化显著，在约300mm时上升至最大值0.7，降水量超过500mm后分布概率迅速下降，分布概率小于0.5。图4c曲线显示出分布概率与降水量变异系数呈负相关，小于约30时，分布概率超过0.9，随着变异系数的增加，分布概率逐渐降低。图4d曲线显示出温度季节性变化标准差值在约7500时，分布概率达到最大值。图4e曲线显示出最冷季度降水量在300~500mm时，

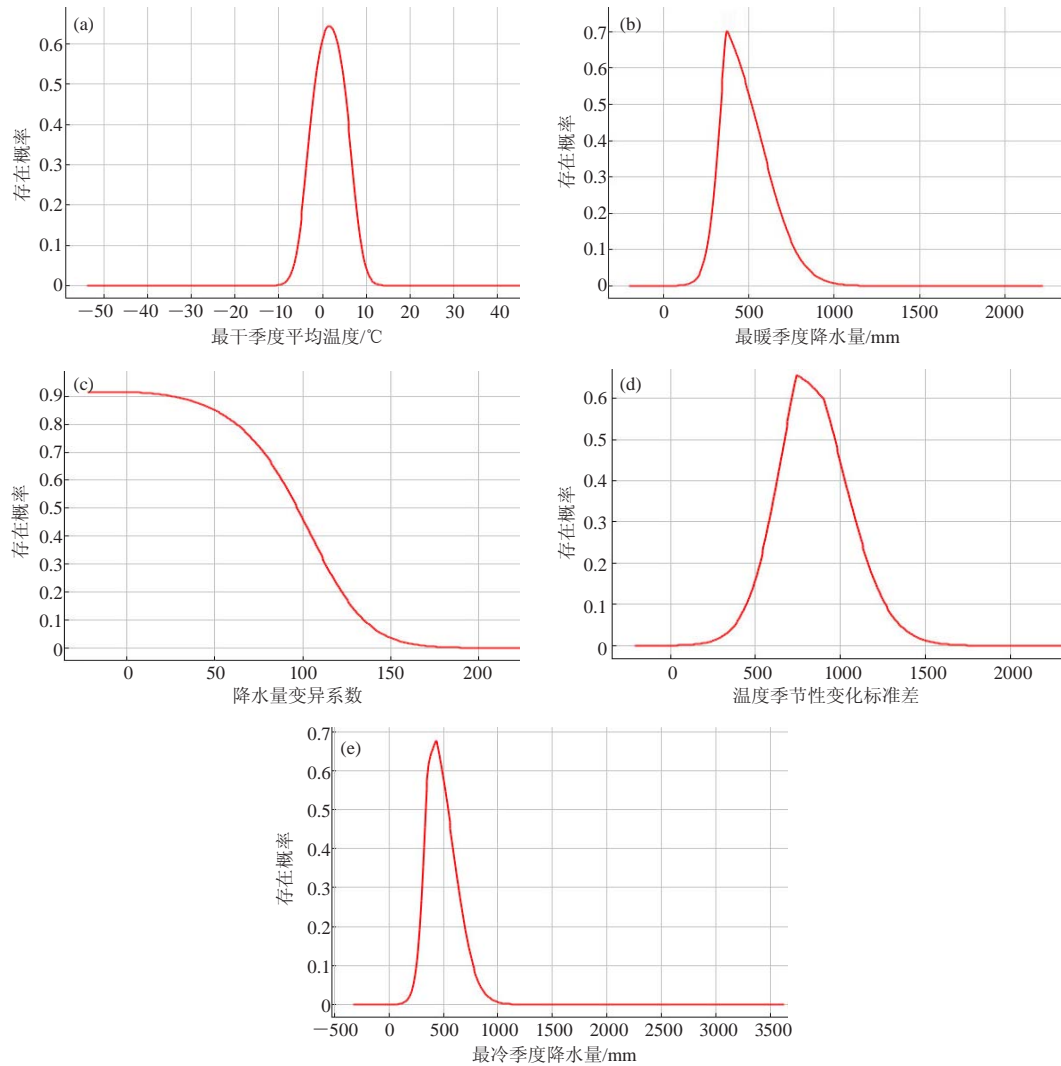


图4 华山松大小蠹分布概率对5个重要气候因子的响应曲线

Fig. 4 Response curves of the *Dendroctonus armandi* to environmental variables resulted from the MaxEnt models

分布概率超过0.6。

3 讨论

MaxEnt模型是一种基于机器学习和数学统计的生态位模型，是目前常用的物种适生区预测软件，相对于其他一些常用预测模型有其独特的优势^[15]。本研究使用DIVA-GIS软件将MaxEnt的预测结果进行分级显示，直观地表示出华山松大小蠹在我国的潜在适生区。

研究表明：1) 华山松大小蠹发生的高度适生区，即高风险区，主要集中在我国的四川、陕西、甘肃和湖北等地，而这些区域也是该虫时常爆发成灾的地区，说明预测结果有较高的可信度；2) MaxEnt模型的AUC值为0.995，表明预测效果非常好；3) 分析各生物气候因子对华山松大小蠹潜在地理分布的贡献率，筛选出了影响华山松大小蠹分布的主导气候因子，即最干季

度平均温度、最暖季度降水量、降水量变异系数、温度季节性变化标准差和最冷季度降水量。其中，最干季度平均温度训练增加超过2.0，表明此因子对华山松大小蠹分布影响最大，此结果有助于深入理解华山松大小蠹与气候变化的关系，对于科学的制定华山松大小蠹的防控措施具有重要的意义。

四川省农村经济综合信息中心2011年开展了基于本体知识库的气象灾害实时预警分析与生成，应用于气象服务客观自动化分析。在中国天气网四川站和成都公共气象服务网开通了耕作气象、山地气象、灾害气象等栏目，取得了良好的运行效果^[16-17]。本研究分析了影响华山松大小蠹分布的主导气候因子，并得到了各影响因子与存在概率的分布曲线，计划在下一步工作中，借鉴气象灾害本体设计的思路，针对主导气候因子进行风险等级的划分，将得出的风险等级数据

经过地理信息系统处理，可以得到有关华山松大小蠹的近实时入侵风险本体分析图。目前这部分研究还处于探索阶段，还有大量工作有待完成。

通过本研究，对华山松大小蠹在全国的潜在适生分区有了明确直观的了解，为避免该害虫的进一步扩大，林业部门在华山松大小蠹高度适生区域（四川、陕西和甘肃等省份）应进一步加强预测预报，建立针对该虫的更加完善的监测预警体系，注意加强检疫，通过科学有效的预测及防治手段，把该虫的发生风险控制发生在发生阈值以下，这样才能更加有效的保护我国的华山松林。

参考文献

- [1] 王茹琳, 杨伟, 杨佐忠, 等. 华山松大小蠹对9种植物挥发物的EAG和行为反应. 中国森林病虫, 2011, 30(1): 23-26.
- [2] 王茹琳, 杨伟, 杨佐忠, 等. 华山松大小蠹对几种寄主挥发物组成的EAG和行为反应. 生态学杂志, 2011, 30(4): 724-729.
- [3] Phillips S J, Dudik M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling. Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning. New York: ACM Press, 2004.
- [4] 张建新, 包云轩, 李芬, 等. 林业有害生物发生发展与气象条件关系研究进展. 世界林业研究, 2010, 23(1): 33-38.
- [5] 曲伟伟, 李志红, 黄贵修, 等. 利用MAXENT预测橡胶树棒孢霉落叶病在中国的适生区. 植物保护, 2011, 37(4): 52-57.
- [6] 曾辉, 黄冠胜, 林伟, 等. 利用MaxEnt预测橡胶南美叶疫病菌在全球的潜在地理分布. 植物保护, 2008, 34(3): 88-92.
- [7] 房锋, 张朝贤, 黄红娟, 等. 基于Maxent的麦田恶性杂草节节麦的潜在分布区预测. 草业学报, 2013, 22(2): 62-70.
- [8] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics. Physical Review, 1957, 106(4): 620-630.
- [9] 殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 等. 辽东栎林潜在地理分布及其主导. 林业科学, 2013, 48(8): 10-14.
- [10] Brotons L, Thuiller W, Araujo M B, et al. Presence-absence versus presence-only modeling methods for predicting bird habitat suitability. Ecography, 2004, 27(4): 437-448.
- [11] Elith J, Graham C H, Anderson R P, et al. Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. Ecography, 2006, 29(2): 129-151.
- [12] 殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 等. 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值. 生态学报, 2013, 33(1): 103-109.
- [13] Berger A L, Della Pietra S A, Della Pietra V J. A maximum entropy approach to natural language processing. Computational Linguistics, 1996, 22(1): 39-71.
- [14] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学中的应用. 生物多样性, 2011, 19(3): 295-302.
- [15] 陈晨, 龚伟荣, 胡白石, 等. 基于地理信息系统的红火蚁在中国适生区的预测. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2093-2097.
- [16] 何险峰, 雷升锴, 张祥锋, 等. 本体化气象服务实现与应用. 计算机应用, 2012, 32(S2): 226-231.
- [17] 何险峰, 张祥锋, 郑利娟, 等. 气象灾害本体设计. 气象科技, 2012, 40(6): 1007-1012.

《应用气象学报》创刊30周年纪念刊出版

■ 本刊编辑部

2016年9月，由中国气象科学研究院等多家单位联合主办的大气科学综合性学术期刊《应用气象学报》出版了创刊30周年纪念刊。杂志刊载了11篇综述性论文，内容涵盖了降水预报、农业气象、高性能计算机与气象卫星的应用、污染观测等多个领域的研究进展。

纪念刊收录的文章和主要作者如下。

中国冬季积雪特征及欧亚大陆积雪对中国气候影响——张人禾等

适应气候变化的国际行动和农业措施研究进展——周广胜等

定量降水预报技术进展——毕宝贵等

高性能计算技术在气象领域的应用——赵立成等

华南暖区暴雨研究进展——何立富等

雷暴闪电放电活动对电离层影响的研究进展——张义军等

中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展——李维京等

气象卫星可见光红外光学成像仪发展沿革——杨忠东等

我国霾和光化学污染观测研究进展——徐晓斌

农业气象灾害监测预测技术研究进展——郭建平

江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展——翟盘茂等

武汉天河机场一次下击暴流天气的多普勒雷达分析

潘彭刚 田霄

(民航湖北空管分局, 武汉 430100)

摘要: 利用常规气象资料、跑道自动观测资料(AWOS)、自动观测站资料和多普勒天气雷达资料等,对武汉天河机场的一次下击暴流天气过程进行了分析。结果表明:1)本次下击暴流发生在副热带高压减弱,西风槽向东移动,地面辐合线相配合的天气背景下;2)下击暴流影响机场期间,具有气压陡升、温度骤降、风向变化和风速突增等气象要素的演变特征;3)阵风锋与雷暴之间距离的变化一定程度上可以预示未来雷暴的强弱;4)本次下击暴流与阵风锋有紧密的联系,阵风锋北移过程中激发出 β 中尺度对流单体, β 中尺度对流单体产生了下击暴流,并且雷达速度图上沿雷达径向的正负大值速度对是下击暴流发生的典型特征之一。

关键词: 下击暴流, 阵风锋, 大风

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.006

Analysis of Doppler Radar Data when a Downburst Event Occurred in Wuhan Tianhe Airport

Pan Penggang, Tian Xiao

(Air Traffic Management Bureau of Middle & Southern Region in Hubei, Wuhan 430100)

Abstract: Combining the Doppler radar data with conventional weather records, AWOS data and automatic meteorological station data, a downburst event occurred in Wuhan Tianhe Airport is analyzed. The results show that: (1) The synoptic background featured that the subtropical high weakening, the slot line moving eastward and the surface wind converging. (2) Meteorological elements changed obviously during the downburst, such as pressure rising, temperature dropping, and wind speed increasing. (3) The variation of the distance between the gust front and thunderstorm may indicates the future trend of the thunderstorm somewhat. (4) The gust front closely linked with the downburst event, the meso- β scale convective cells were inspired when the gust front moving northward, then the meso- β scale convective inspired the downburst, and especially, the contrast of high values between the positive and negative radial velocity is one of the typical characteristics in the downburst.

Keywords: downburst, gust front, strong wind

0 引言

Fujita等^[1]将下击暴流定义为地面上水平风速大于17.9m/s、中空气流向下、地面气流为辐散或直线型的灾害性风,并根据外流的灾害性范围大小,又把下击暴流分为宏下击暴流(尺度大于4km,持续时间大于10min)和微下击暴流(尺度大于4km,持续时间大于10min)。由于下击暴流尺度小,生命史短,目前主要依靠多普勒雷达来观测和推断下击暴流发生的可能性。

本文以常规资料为基础,利用湖北省气象局多普勒雷达资料重点分析2013年8月11日发生在武汉天河机场的一次下击暴流过程,为今后类似天气过程的临近预警提供参考。分析使用的多普勒雷达资料来自于湖北省气象局,其多普勒雷达位于武汉天河机场,为

了便于分析,本文在雷达图上标注了天河机场,图上的“本场”即代表“天河机场”。

1 天气实况及地面气象要素分析

2013年8月11日,湖北省东南一带对流云强烈发展,引起阵风锋,然后在阵风锋前沿激发出 β 中尺度的对流单体和下击暴流,从而使得武汉天河遭遇雷雨大风的侵袭。18:00(北京时,下同),天河机场突然刮起强风,平均风速11m/s,阵风16m/s,与此同时,天河机场出现干雷暴和扬沙,能见度从17:00的10000m,迅速下降到5000m,并伴有气压突升、温度骤降、湿度升高等气象要素变化。18:17,强雷雨开始侵袭天河机场,阵风风速上升到28m/s,能见度进一步下降为2000m,此时在机场跑道南面出现风切变。18:21,能见度下降到了200m,18:30,阵风风速达到34m/s,创造了天河机场开航以来风速之最。19:20,强降水结束,转为干雷暴,风速下降到了4m/s。

收稿日期: 2015年2月4日; 修回日期: 2015年7月5日
第一作者: 潘彭刚(1987—), Email: 407076371@qq.com

此次下击暴流过程具有气压陡升、温度骤降、风速突增、风速变化的特点。17:00, 机场风向偏西北, 风速3m/s, 气压1003hPa, 温度39℃。18:10, 由阵风锋激发的β中尺度对流单体开始影响本场, 下击暴流也随之产生, 风向转为西南, 瞬时风速激增为16m/s, 气压升幅2hPa, 温度为32℃。18:21, 瞬时风速达到28m/s, 温度降至24℃。18:21—18:30, 9min内气压升幅达到3hPa, 瞬时风速达到34m/s, 温度降至21℃, 此时也是下击暴流最强的时刻。

2 天气形势分析

2.1 副热带高压边缘的西风带低槽

在2013年8月11日, 在08时500hPa天气图上(图略), 588dagpm线位于湖北以西(107°E左右), 副热带高压(以下简称副高)脊线位于31°N左右, 整个湖北省基本在副高的控制之下, 在河套地区以及湖北以西皆有高空低槽在缓慢东移。在20时500hPa图上(图略), 588dagpm线出现明显东退, 位于113°E左右, 武汉天河机场刚好位于其边缘, 并且西部冷槽也随之加速东移, 湖北大部开始受槽前西南气流影响。一般地, 以500hPa图上的588dagpm等高线的向北、向

西扩展来表示副高的向北、向西推移。所以, 由此可以表明, 副高当天出现了明显的减弱东退, 抑制对流活动的下沉运动也因此有所减弱。当副高位置有明显西进或东退, 副高西北侧有高空低槽活动时, 容易出现强对流天气^[2], 这就是武汉天河机场当日出现强雷雨大风天气的环流背景。

2.2 动力条件

通过分析2013年8月11日14、17以及20时的地面图(图略)发现, 武汉天河机场强对流发生前, 河套地区以西有一地面辐合线逐渐东移南下, 并于当日17—20时影响到武汉地区, 这与武汉机场出现强对流的时间段基本一致, 因此可以判断, 地面辐合线是本次强对流天气发生的重要触发条件。通过分析11日17和18时的湖北自动气象站观测资料(图1)后进一步发现, 当地面辐合线影响武汉地区时, 由于太阳辐射加热的不均匀, 在武汉及其南部地区出现由北指向南的地面温度锋区, 相距100km左右的武汉站与咸宁站, 温度差达到了13℃。分析当日武汉周边强对流多普勒回波的发生发展以及移动后发现, 强对流回波主要是在武汉南部生成, 并在上层西南气流引导下, 北移影响武汉机场, 这与地面温度锋区有很好地对应。

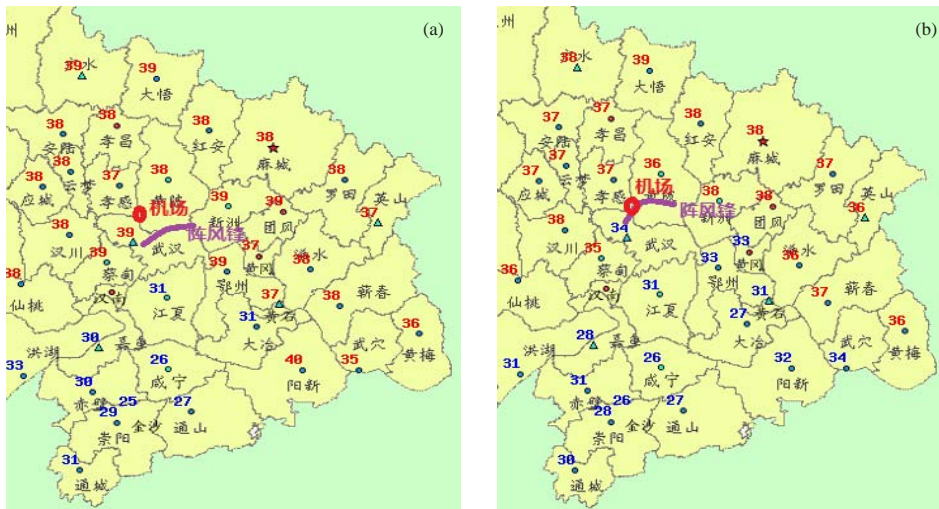


图1 2013年8月11日17时(a)和18时(b)湖北自动气象站观测温度资料以及相应时刻阵风锋的位置(紫色实线)
Fig.1 The temperature data at Hubei automatic observation and the gust front at 17:00 (a), 18:00 (b), 11 August 2011

3 热力条件

天河机场位于武汉北部, 所以用汉口探空资料(图2)分析大气稳定度等气象环境条件具有较好代表性。分析发现, 2013年8月11日08时, 武汉地区低层存在逆温, 这可能为对流性天气的发生储存了能量。而后经过午后的加热, 破坏了原有的逆温层, 在

一定的触发机制下能使不稳定能量迅速释放。08时, 汉口站K指数为38℃, 沙氏指数为-3.95℃。至20时, 汉口站K指数为41℃, 沙氏指数为-4.42℃, 不稳定状态有一定程度的加强。这是由于下垫面受加热影响, 午后整个鄂东皆为35℃以上的高温天气, 从而加强了整个大气的不稳定状态。08时CAPE为2708.1J/

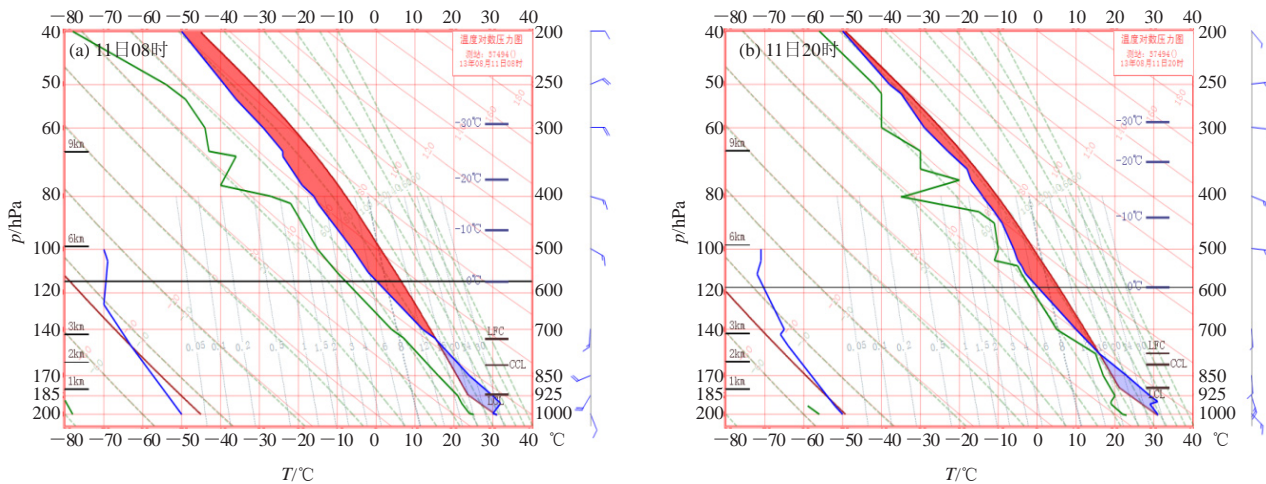


图2 2013年8月11日08时 (a) 和20时 (b) 汉口站的 T -log p 图
Fig.2 The T -log p diagrams at 08:00(a) and 20:00(b), 11 August, 2011 at Hankou Station

kg, 20时CAPE为1290.6J/kg, CAPE有所下降, 这是由于下午强对流天气的发生发展, CAPE产生了一定的损耗。从温度层结曲线和露点曲线的形态来看, 08时, 两条曲线在低层靠得较近, 在400hPa附近有干空气卷入, 形成喇叭口形。分析还发现, 08时, 850hPa以下, 温度层结曲线接近平行于干绝热线, 20时, 这一现象更加明显, 800hPa以下, 温度层结曲线更加平行于干绝热线。中高层干空气卷入以及低层温度层结曲线接近平行于干绝热线, 均有利于雷雨大风的形成。

4 多普勒天气雷达回波特征

4.1 阵风锋演变过程

在适当的环境条件下, 强风暴内部的下沉气流到达地面以后向四面散开, 其与环境空气交汇形成的界面, 称为阵风峰, 又称雷暴的出流边界。

8月11日下午, 鄂东南出现多个 β 中尺度的对流单体, 强度都在50dBz以上。随后, 这些对流单体开始整合合并, 逐渐发展成为一条明显的宽带状回波, 并开始向北移动。16:18, 弓形回波移动到武汉的南面100km左右(图3a和3g)。在回波上可以清晰地分析出多个雷暴单体, 最大强度达到了55dBz。在带状回波前面20km处出现一条长约60km、宽约5km的弱而窄呈东西向的带状回波, 强度10~15dBz, 与宽带状回波一起向偏北方向移动(图3a和3g), 这就是阵风锋。阵风锋在对应的反射率产品上表现为弱的窄带回波, 这是由于阵风锋的温压湿场在水平和垂直方向上分布不连续, 造成折射指数的突变, 导致对电磁波的散射或反射形成回波, 使其能被灵敏的多普勒雷达探测并以窄带回波表现出来^[3]。

阵风锋具有阵性风大和低空风切变显著的特

点^[4], 对飞机起降和航空安全有很大影响。此次天河机场大风就是阵风锋到达机场附近后所激发的。

阵风锋前推过程中, 出流的抬升作用对上升气流进入风暴有加强效应, 会促使新单体发展^[5], 并且在本次过程中, 阵风锋移动方向是由南向北, 即沿温度锋区的梯度移动, 所以阵风锋前后温度的冷暖对比更加强烈, 更有助于阵风锋前方暖空气的强迫抬升, 从而有利于新单体的生成。在本次阵风锋向北移动过程中, 其周围不断有 β 中尺度的雷暴单体生成。17:32, 阵风锋离天河机场只有20km左右, 在其西段新生出3个小直径5km左右的雷暴单体(图3b和3h)。17:38, 阵风锋西段的3个雷暴回波强度都有不同程度的加强, 最北边的雷暴单体A的强度达到了55dBz, 并且3个雷暴单体有合并的趋势(图3c和3i)。17:44, 阵风锋到达天河机场南端5km左右, 此时先前的3个雷暴单体已经合并加强, 形成直径18km、强度60dBz的雷暴B。然后, 雷暴B随阵风锋移向天河机场(图3d和3j)。18:00左右, 雷暴B与阵风锋移至天河机场(图3e)。此时, 天河机场出现雷雨天气并伴随16m/s的阵风, 气压升至1005hPa, 气温由17时的39℃降至32℃, 大风开始侵袭天河机场, 并在18:30, 风速达到历史性的34m/s。由于新的雷暴在阵风锋的前面新生, 导致原阵风锋出现断裂。随着雷暴B发展成熟, 其下沉气流又在机场东南面形成了一条新的阵风锋(图3f)。

4.2 边界层辐合线与多单体雷暴的演变

关于边界层辐合线, 国内进行过大量的研究, 定义为多普勒天气雷达强度场上的一条细线或速度场上的辐合线, 其宽度约为1~3km, 长度大于10km, 持

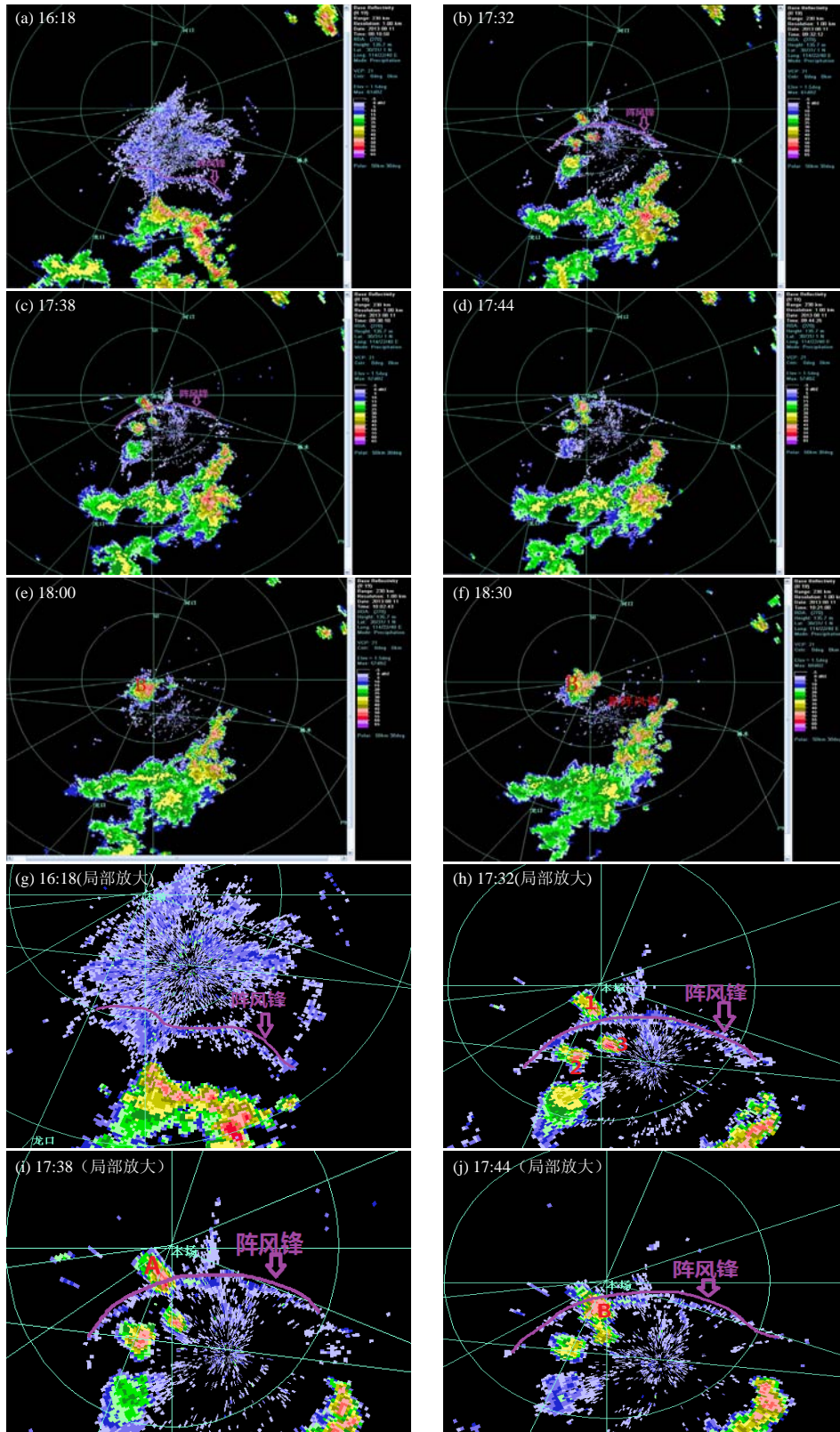


图3 2013年8月11日16:18 (a, g), 17:32 (b, h), 17:38 (c, i), 17:44 (d, j), 18:00 (e) 和18:30 (f) 武汉多普勒雷达基本反射率因子 (a—f, 仰角1.5°) 及局部放大 (g—j) 图
Fig.3 The evolution of reflectivity in Wuhan Doppler radar at 1.5° elevation, at times 16:18 (a, g), 17:32 (b, h), 17:38 (c, i), 17:44 (d, j), 18:00 (e), 18:30 (h), respectively on 13 August, 2013

续时间15min以上。边界层辐合线包括阵风锋、天气尺度的锋面、地形引起的环流、加热不同引起的环流等。按此定义，本次过程也多次伴有边界层辐合线。

阵风锋在移动过程的前期，与其后多单体雷暴回波的距离基本保持10~15km，并且由于阵风锋对暖湿气流的抬升作用，在阵风锋周围也不断地激发出新的雷暴单体（图4a和4b）。8月11日16:49以后，阵风锋与其后带状回波的距离逐渐达到了60km左右（图4c和4d），带状回波的强度也随之减弱，其大部分回波强度都下降到了20~25dBz。这是因为雷暴前阵风锋逐渐远离风暴时，会逐渐切断雷暴的暖湿入流，使原有雷暴减弱；而当阵风锋与雷暴保持一定距离时，阵风锋对前方的暖湿气流起抬升作用，被抬升的暖湿气流形成新的雷暴，新的雷暴与原有雷暴连成一体，逐渐代替原有雷暴，也产生下沉气流，使得阵风锋得以维持，而阵风锋的维持又使得新的雷暴得以生成。

4.3 径向正负速度对

当下击暴流到达地面时会产生强烈的辐散外流，多普勒天气雷达速度图上常有正负速度对出现^[6]。阵风锋在径向速度图中呈现出正负速度交界的辐合带，并且辐合带呈狭窄的弧线回波^[7]。

8月11日17:19，在0.5°径向速度图（图略）上，在机场南边20km处，观察到一条与阵风锋相对应的弧状辐合线，并且随阵风锋北移（图略），这是边界层辐合线在速度图上的表现。8月11日17:50，辐合线北移至机场附近，可以看出低层为西南气流，此时低层已经出现辐散型正负径向速度对，大小在1~10m/s，即底层出现下沉辐散气流，之后此辐散气流越来越明显（图5a和5e）。18:14，正径向速度最大值在15~20m/s，负径向速度最小值在10~20m/s。而下击暴流也随着阵风锋不断向本场移动（图5b和5f）。18:21，天河机场阵风达到30m/s（图5c）。18:30，机场瞬时阵风甚至达到了34m/s，为天河机场开航以来风速之最。之后，随着原有阵风锋的断裂消失，此正负风速对也不断减弱。18:51，负径向速度只有5m/s，最大正径向速度为10~15m/s（图5d）。19:00，天河机场风速降到了16m/s。

5 结论

1) 副高东退、地面弱冷空气南侵是2013年8月11日武汉天河机场下击暴流过程发生的大背景。午后下垫面加热，增强了大气的不稳定性，也有利于强风暴的发生。

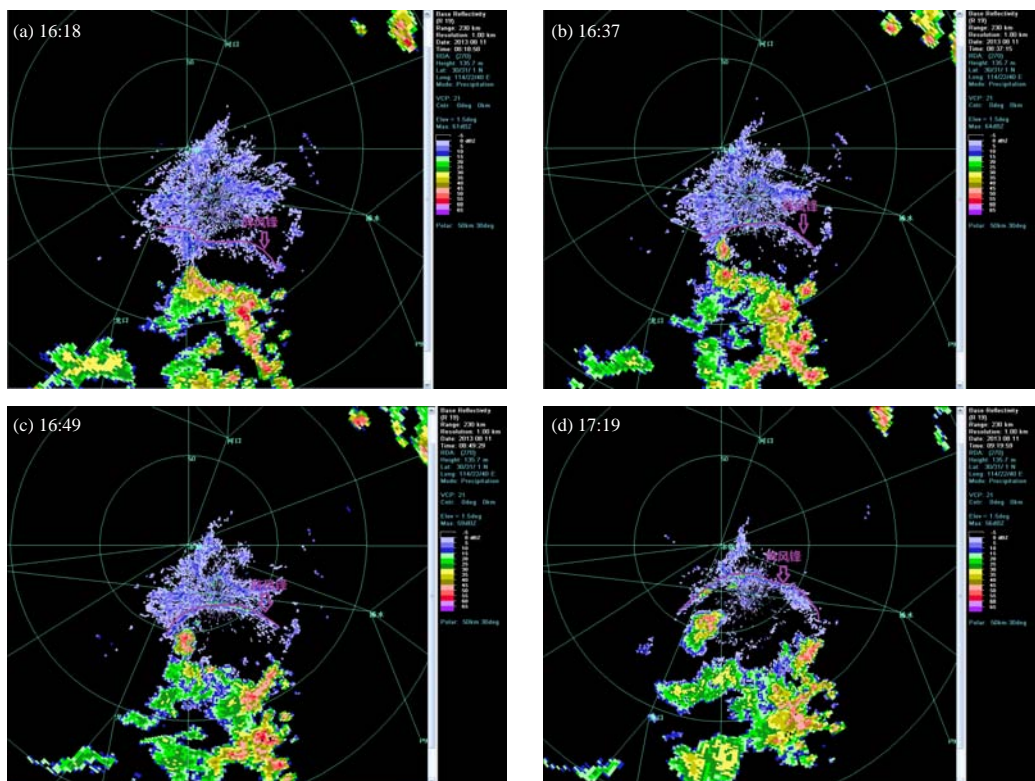


图4 2013年8月11日16:18 (a)，16:37 (b)，16:49 (c)和17:19 (d) 武汉多普勒雷达基本反射率因子（仰角1.5°）
Fig.4 The reflectivity in Wuhan Doppler radar at 1.5° elevation, at 16:18 (a), 16:37 (b), 16:49 (c), 17:19 (d) respectively on 11 August, 2013

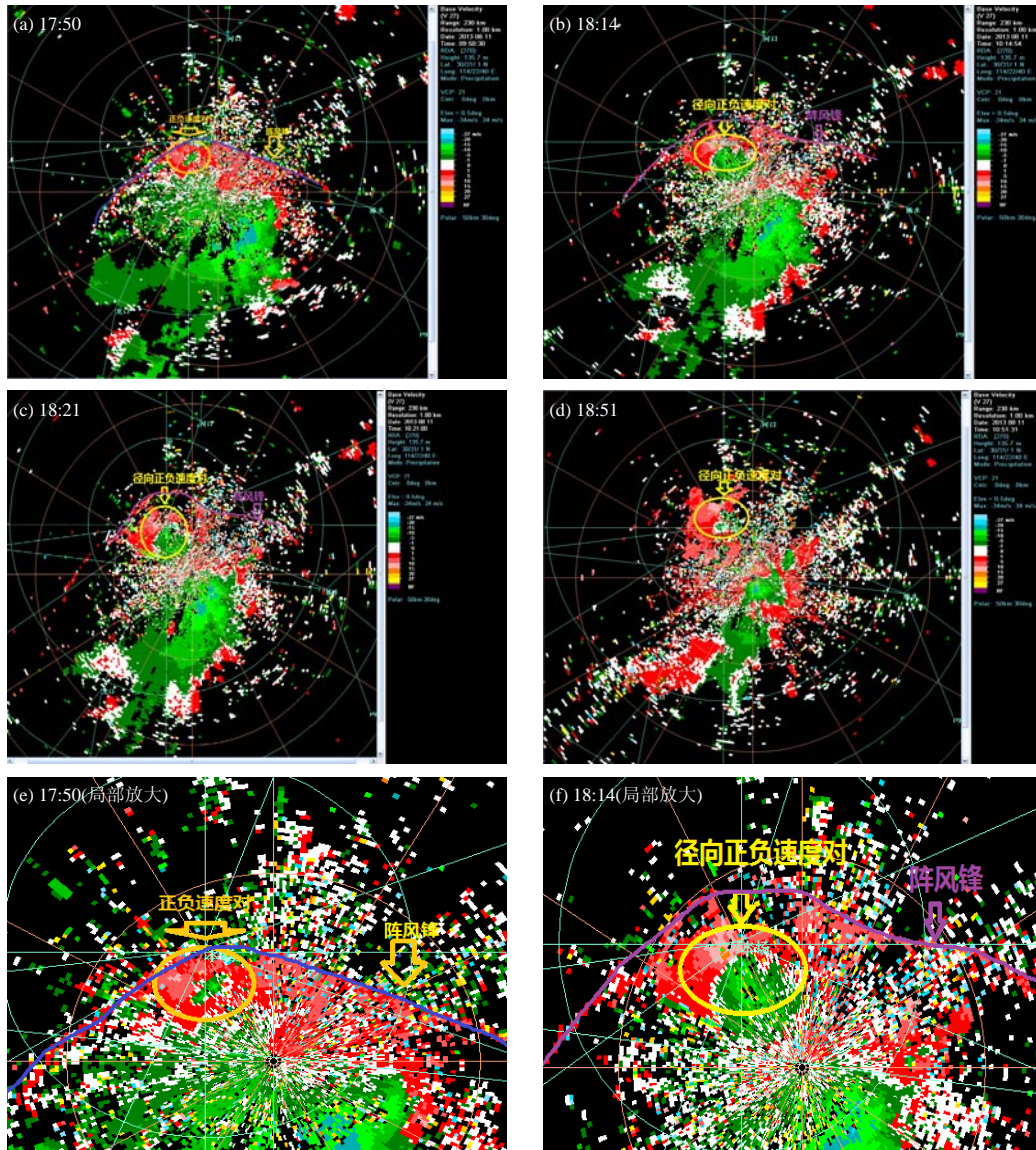


图5 2013年8月11日17:50 (a, e), 18:14 (b, f), 18:21 (c) 和18:51 (d) 武汉多普勒雷达基本速度图 (仰角1.5°)
Fig 5 The radial velocity shown in the Wuhan Doppler radar at 1.5° elevation, at 17:50 (a, e), 18:14 (b, f), 18:21 (c), 18:51 (d) respectively on 11 August, 2013

2) 由于太阳辐射加热的不均匀, 在武汉地区及其南部地区出现由北向南的地面温度锋区, 地面温度锋区与对流系统的移动有很好的对应关系。下击暴流影响机场期间, 具有气压陡升、温度骤降、风向变化、风速突增等气象要素的演变特征。

3) 阵风锋与其后雷暴回波的距离变化一定程度上可以预示未来雷暴回波的强度变化: 阵风锋远离雷暴时, 雷暴将减弱; 阵风锋与雷暴的距离基本保持不变, 则雷暴的强度也基本保持不变。

4) 下击暴流与阵风锋有紧密的联系, 阵风锋北移过程中激发出 β 中尺度对流单体, β 中尺度对流单体产生了下击暴流, 并且雷达速度图上的径向正负大值

速度对是下击暴流发生的典型特征之一。

参考文献

- [1] Fujita T T, Byers H R. Spearhead echo and downburst in the crash of an airliner. *Mon Wea Rev*, 1977, 105: 129-146.
- [2] 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法. 北京: 气象出版社, 2014.
- [3] 朱敏华, 周华根. 多普勒天气雷达在阵风锋监测中的应用. *气象科学*, 2006, 26(1): 13-18.
- [4] 孙继松, 陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题. *气象*, 2012, 38(2): 164-173.
- [5] 张涛, 李柏, 杨洪平, 等. 三次雷暴导致的阵风锋过程分析. *气象*, 2013, 39(10): 1275-1283.
- [6] 张家国, 王平, 吴涛. 鄂东一次下击暴流天气的中尺度分析. *气象科学*, 2010, 30(2): 239-244.
- [7] 张利平, 王清平, 陈阳权, 等. 乌鲁木齐国际机场一次阵风锋天气成因分析. *气象科技*, 2013, 41(2): 320-325.

热带大西洋暖海温促使拉尼娜事件发生的可能性研究

严欣¹ 任菊章² 琚建华³

(1 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明 650031; 2 云南省气象科学研究所, 昆明 650034;
3 云南省气象局, 昆明 650034)

摘要: 首先, 通过对多年冬、春季节热带大西洋海温、夏季大气季节内振荡 (MJO) 异常活动特征和冬季太平洋 ENSO 之间的分析研究, 发现三者之间存在显著的相关关系。其次, 1951 年以来最强的两次厄尔尼诺年 (1982 和 1997 年) 后都跟随着拉尼娜年。因此对 1983、1998 和 2016 年大西洋春季海温及 MJO 信号进行的分析和比较表明, 2016 年初大西洋关键区海温异常偏暖, 与 1998 年情况较为类似。2016 年夏季, MJO 可能出现在印度洋异常活跃的情况, 并可能导致热带太平洋秋、冬季节出现中等强度的拉尼娜事件。

关键词: 大西洋海温, MJO 持续异常, 拉尼娜事件, ENSO

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.007

A Possibility of the Warm Sea Surface Temperature in Tropical Atlantic to Promote La Niña Events

Yan Xin¹, Ren Juzhang², Ju Jianhua³

(1 College of Resources Environment and Geosciences, Yunnan University, Kunming 650031 2 Yunnan Research Institute of Meteorology, Kunming 650034 3 Yunnan Provincial Meteorological Bureau, Kunming 650034)

Abstract: First of all, we did find that there are obvious correlations among the Atlantic SST in spring, the MJO anomalies in summer and the Pacific ENSO in winter. Secondly, two La Niña events respectively followed the top 2 powerful El Niño events in 1982 and 1997 after 1951. Thirdly a super strong El Niño event appeared in 2015. In this paper, the characteristics of the spring Atlantic SST and the summer MJO signals in 1983, 1998 and 2016 are compared. Then the changes of SST in autumn and winter 2016 are forecasted. The results show that the SST in defined key area of Atlantic occurred an abnormal warmer status in spring 2016, and was similar to that in 1998; the MJO may likely be abnormally active in Indian Ocean in summer 2016, in a much greater extent. These mean that a moderate La Niña event in tropical Pacific will probably occur in the autumn and winter 2016.

Keywords: Atlantic SST, persistent anomaly of the Madden Julian Oscillation (MJO), La Niña event, El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

0 引言

厄尔尼诺 (El Niño) 是热带太平洋中东部海温出现异常偏暖的一种气候现象, 对全球的天气与气候会造成较大的影响。一般说来, 强 El Niño 后都跟随着拉尼娜 (La Niña), 即热带太平洋中东部海温的异常偏冷。人们将 El Niño 和 La Niña 这两者一起并称为 ENSO 事件。Ham 等^[1]认为, 春季热带大西洋的海表面温度 (SST) 可能是 ENSO 事件的触发器。他们的研究表

明, 热带大西洋北部海温的春季升温可能会诱发秋、冬季节太平洋的 La Niña 事件。反之, 热带大西洋春季的偏冷, 则可能使得的秋、冬季节形成 El Niño 事件。之后虽然关于春季热带大西洋海温和冬季 ENSO 关系的研究不断出现^[2-5], 但其发生机制仍不够明确。特别是在从春季到冬季的时间跨度中, 海洋信号的具体传播过程仍不清楚。这是目前研究的热点问题。而本文作者在前期的研究中, 发现了春季热带大西洋海温异常偏暖会影响夏季热带印度洋季节内振荡 (MJO) 的持续异常^[6], 进而激发和促进冬季 La Niña 事件的形成^[7], 三者之间具有非常显著的相关关系。

自 1951 年以来, 一共出现了三次超强 El Niño 事件: 1982, 1997 和 2015 年, 具体情况如表 1 所示。

收稿日期: 2016 年 7 月 25 日; 修回日期: 2016 年 9 月 2 日

通信作者: 琚建华 (1956—), Email: jujh@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目 (41375059); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201306022)

表1 1982—1983年、1997—1998年、2015—2016年ONI指数 (单位: °C)
Table 1 The Oceanic Niño Index (ONI) in 1982–1983, 1997–1998 and 2015–2016 (unit: °C)

年	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1982	-0.1	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	1	1.5	1.9	2.1	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.2	0.9	0.6	0.2	-0.2	-0.5	-0.8	-0.9	-0.8
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.2	0.7	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.4	2.3
1998	2.2	1.8	1.4	0.9	0.4	-0.2	-0.7	-1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5
2015	0.5	0.4	0.5	0.7	0.9	1	1.2	1.5	1.8	2.1	2.2	2.3
2016	2.3	2.0	1.6	1.0	0.5							

注: 红字代表El Niño事件发生, 蓝字代表La Niña事件发生。

ONI (Oceanic Niño Index) 是国际上通行的ENSO指数, 使用3个月滑动平均的Niño 3.4区 (5°N—5°S, 120°—170°W) SST来表示ENSO事件强弱。1982, 1997和2015年El Niño事件强度都超过了2.0°C。1982和1997年这两次强El Niño事件的后一年, 太平洋都出现了La Niña事件, 但Niño 3.4区SST偏冷的强度有差异。1983年La Niña事件较弱, 冬季ONI均未超过1°C。而1998年La Niña事件极强, NDJ (11月—次年1月) 滑动平均ONI已达-1.5°C, 这两次La Niña事件对全球气候都造成了较大影响。2016年同样作为2015年强El Niño事件的后一年, 是否还会形成较强的La Niña事件呢? 下面分析比较1982—2016年不同季节和不同大洋海洋温度变化与夏季MJO活动之间的相互关系, 并特别对1983, 1998和2016年情况进行对比分析, 由此判断2016年ENSO发生发展的趋势。

1 重要机理概述

统计了1982—2015年冬、春季节热带大西洋海温和MJO指数之间的相关关系, 发现冬、春季节 (FMAM) 热带大西洋海温异常、夏季 (JJA) MJO持续异常、冬季 (DJF) ENSO三者之间有着非常好的相关关系 (图1a)。MJO是一种存在于赤道附近的向东传播的大气季节内振荡。前期的研究^[6]发现, 在夏季MJO会出现不传播而停滞在热带印度洋或太平洋的持续异常情况, 并定义了描述夏季MJO持续异常的指数 I_{ip} 。图1b为夏季 (JJA) MJO的持续异常指数 I_{ip} 和前期冬、春季节 (FMAM) 热带大西洋海温的相关图。冬、春季节热带大西洋海温的异常偏暖 (偏冷) 首先增强 (减弱) 了沃克环流 (赤道太平洋纬向环流圈) 的次生环流, 之后使得赤道地区出现沃克环流加强 (减弱), 进而导致了夏季MJO在印度洋 (太平洋) 持续异常。通过统计发现, 冬、春季节热带大西洋海温异常指数A1 (图1b中矩形区域平均海温) 与 I_{ip} 之间的相关为-0.67。前期的研究^[7]还发现, 夏季MJO的持续异常能激发并促进ENSO事件的发生发展, 夏季MJO的持续异常与冬季

ONI指数的相关高达0.89。因此, 以MJO这个热带大气中强有力的系统作为冬春季节热带大西洋海温异常与秋、冬季节太平洋ENSO的中间桥梁, 很好地解释了春季大西洋海洋信号传递到夏季大气中, 进而再传递到冬季太平洋海洋的过程 (如图1a所示, 春季热带大西洋海温异常指数A1和冬季ENSO指数之间的相关系数为-0.53)。

2 预测依据——指标和信号

由图1c可见, 春季热带大西洋最强的高海温年份与冬季La Niña事件年份对应都是较好的 (如1988, 1998, 2008和2010年)。在了解了春季热带大西洋海温偏暖与夏季MJO在印度洋持续异常、秋冬La Niña事件之间较显著的关系之后, 选择强El Niño年份的后一年 (1983, 1998和2016年) 进行对比。众所周知, 强El Niño事件之后, 常常跟随着La Niña事件的发生。1983, 1998和2016年热带大西洋海温关键区指数A1已标明为红色 (图1c), 可见1983年春季热带大西洋海温增温并不显著, 所以该年夏季MJO持续异常和冬季La Niña事件亦不是特别显著。1998年春季热带大西洋海温偏高, 夏季MJO持续异常显著, 冬季为典型La Niña事件。而2016年2—3月SST都偏高。由此可以推测2016年夏季MJO在印度洋持续活跃的可能性较大, 冬季La Niña事件生成可能性较大。

将所对比的1983, 1998和2016年2—5月 (FMAM) 大西洋关键区SST与图1b的SST关键区定义相比: 1983年 (图2a) 热带大西洋SST信号并不显著, 而1998年 (图2b) 则表现出了热带大西洋SST偏暖的特征。2016年平均的情况 (图2c) 与1998年平均较接近。与图1相比, 进一步证明了2016年前期热带大西洋SST的异常偏暖, 可能导致2016年夏季MJO在热带印度洋持续活跃。

同时, 分析对比夏季MJO及秋冬ENSO的情况。使用美国气候预测中心定义的MJO指数, 经15d滑动平均, 计算出了其前一年6月—次年12月的演变图 (图3a—3c)。指数的负值 (蓝色) 代表MJO活

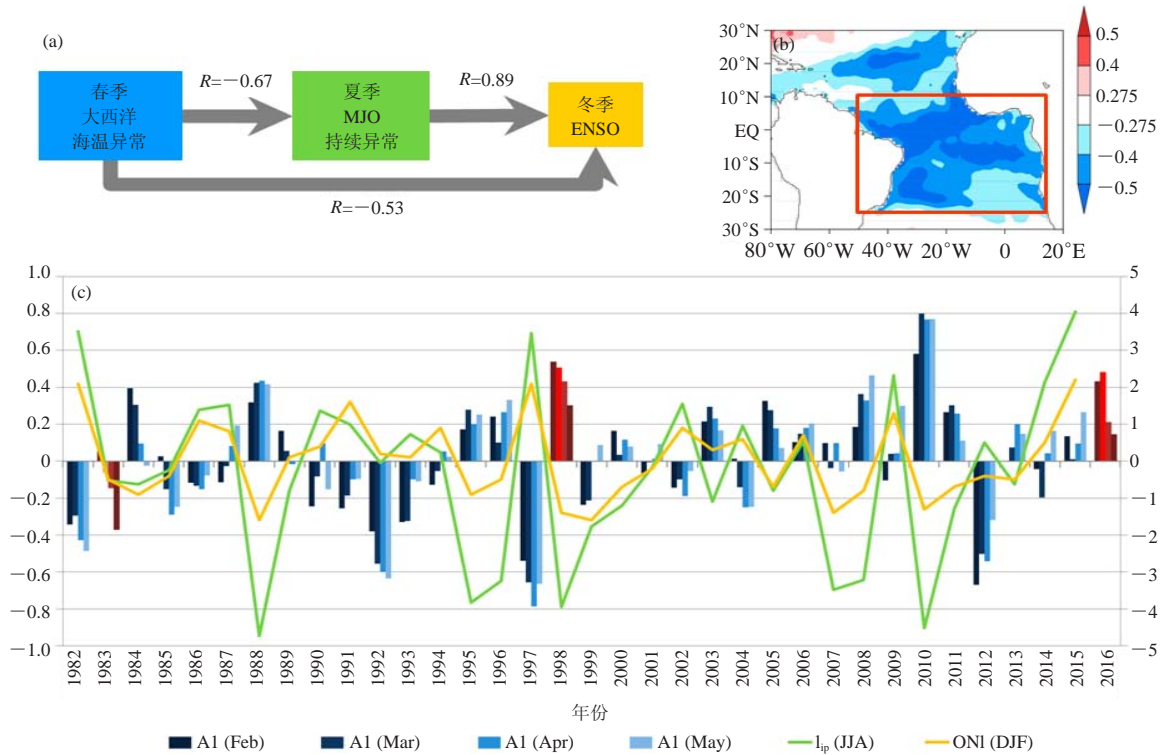


图1 (a) 冬、春季节 (FMAM) 热带大西洋海温异常、夏季 (JJA) MJO持续异常、冬季 (DJF) ENSO相关示意图 (相关系数 R 均超过了99.9%信度检验); (b) 冬春季节 (FMAM) 热带大西洋海温与夏季MJO持续异常指数 I_p 的相关, (填充色区域均通过了90%显著性检验); (c) FMAM逐月热带大西洋海温关键区异常指数A1 (蓝色柱状图) (本文讨论的1983, 1998和2016年降水以红色特别标明)、夏季 (JJA) MJO持续异常指数 I_p (绿色折线) 与冬季 (DJF) ENSO指数 ONI (黄色折线) 逐年序列

Fig. 1 (a) Diagram of correlation among the tropical Atlantic SSTA in winter– spring (FMAM), the persistent anomaly of MJO in Summer (JJA) and the ENSO in Winter. The correlation coefficients are all over 0.01 significance; (b) Distribution diagram of correlation coefficients between the tropical Atlantic SST in winter and the persistent anomaly of MJO index I_p . The shadowed areas passed at 0.1 significance; (c) Time series of monthly Index (FMAM): the Tropical Atlantic key region SSTA in blue histogram, of which, the 1983, 1998, 2016 we discussed are particularly marked in red; the persistent anomaly of summer MJO index I_p in green line; and the winter (DJF) Oceanic Niño Index (ONI) in yellow line

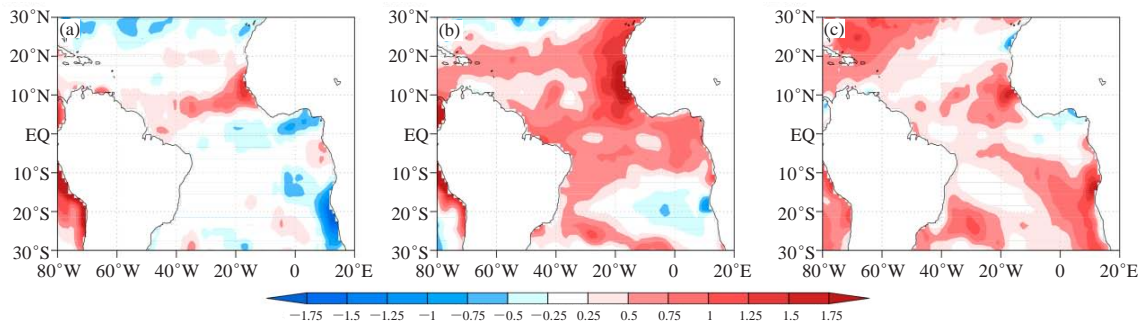


图2 热带大西洋海温距平2—5月 (FMAM) 平均: (a) 1983年, (b) 1998年, (c) 2016年
Fig. 2 The tropical Atlantic SSTA in FMAM: (a) 1983, (b) 1998 and (c) 2016

跃, 正值 (红色) 代表MJO受到抑制。1982年 (图3a)、1997年 (图3b)、2015年 (图3c) 夏季MJO都出现了在太平洋持续异常活跃的相似特征 (如红框所示), 并且在当年秋冬 (图3d—3f) 赤道太平洋次表

层 (5~303m) 均有暖海水向东传递, 因此激发和促进了El Niño事件在冬季的发生。与前面讨论的次年冬春季节热带大西洋海温异常相对应, 次年赤道太平洋次表层海温的发展趋势则有较大的差异: 1983年夏季

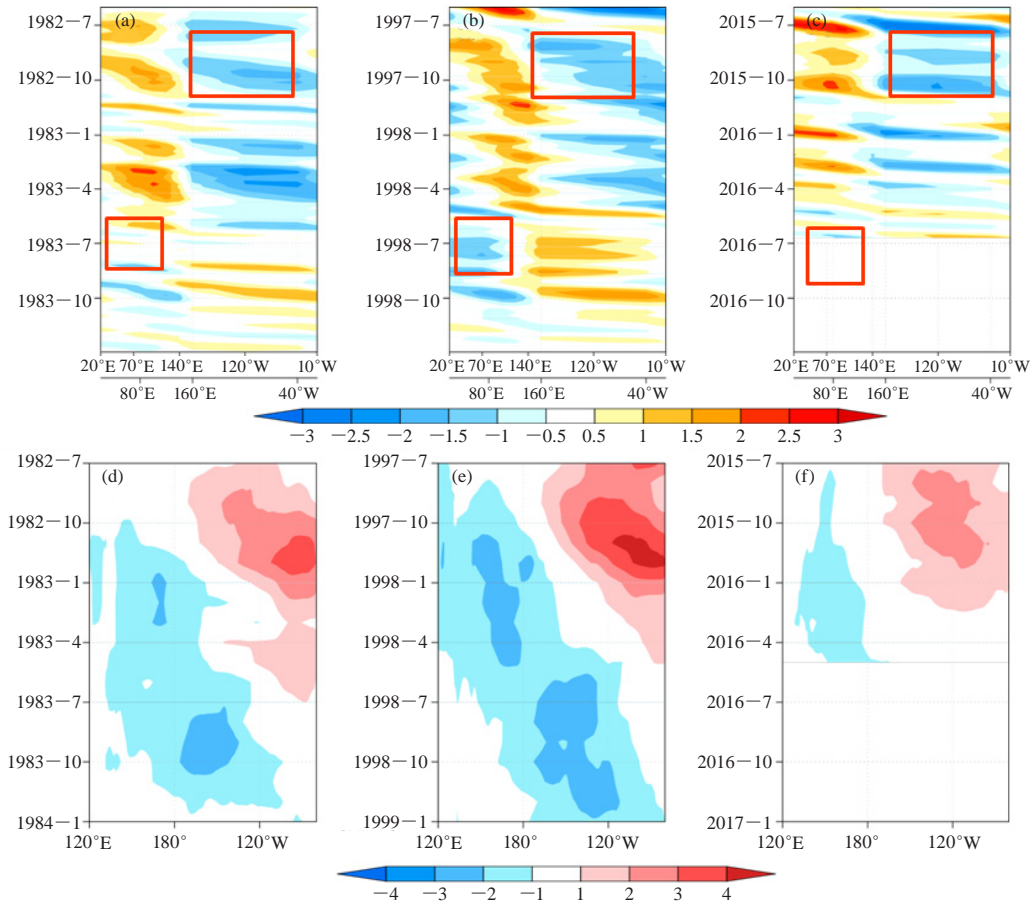


图3 前一年六月—次年12月的MJO演变情况：(a) 1982年6月—1983年12月，(b) 1997年6月—1998年12月，(c) 2015年6月—2016年12月；及前一年八月—第三年二月赤道太平洋5~303m平均次表层海温的演变情况：(d) 1982年8月—1984年2月，(e) 1997年8月—1999年2月，(f) 2015年8月—2016年5月

Fig. 3 The MJO indices for June 1982 to December 1983 (a), for June 1997 to December 1998 (b), for June 2015 to December 2016 (c); the equatorial Pacific subsurface ocean (5–303m) temperature anomaly (SOTA) for August 1982 to February 1984 (d), for August 1997 to February 1999 (e), for August 2015 to May 2016 (f)

MJO在印度洋持续异常，但异常特征较弱（图3a）；而冬季太平洋东部次表层冷海水衰退快， -1°C 并未传递到 120°W ，因此当年La Niña事件强度较弱（图3d）；1998年夏季MJO在印度洋持续异常特征则较为显著（图3b），之后冬季太平洋东部次表层冷海水东传更强，最终发生了较强的La Niña事件。

3 结论

通过研究结果和前面的比较发现，2016年的海气热力状况与1998年更为接近。由于2016年前期冬、春季热带大西洋海温偏暖，较可能使得夏季MJO在印度洋持续异常活跃。因此，太平洋次表层冷海水向东部的传递会增强，可能导致2016年秋冬季节发生中等强度的La Niña事件。

参考文献

- [1] Ham Y, Kug J, Park J, et al. Sea surface temperature in the north tropical Atlantic as a trigger for El Niño/Southern Oscillation events. *Nature Geoscience*, 2013, 6(2): 112-116.
- [2] Polo I, Martín-Rey M, Rodríguez-Fonseca B, et al. Processes in the Pacific La Niña onset triggered by the Atlantic Niño. *Climate Dynamics*, 2015, 44(1-2): 115-131.
- [3] Martín-Rey M, Rodríguez-Fonseca B, Polo I, et al. On the Atlantic-Pacific Niños connection: A multidecadal modulated mode. *Climate Dynamics*, 2014, 43(11): 3163-3178.
- [4] Ham Y G, Kug J S, Park J Y. Two distinct roles of Atlantic SSTs in ENSO variability: North tropical Atlantic SST and Atlantic Niño. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(15): 4012-4017.
- [5] Sasaki W, Doi T, Richards K J, et al. Impact of the equatorial Atlantic sea surface temperature on the tropical Pacific in a CGCM. *Climate Dynamics*, 2014, 43(9-10): 2539-2552.
- [6] 严欣, 琚建华. 夏季MJO持续异常的主要特征分析. *大气科学*, 2016, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1601.15248, 待发表.
- [7] Yan X, Ju J, Gan W. The influence of persistent anomaly of MJO on ENSO. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, DOI:10.16555/j.1006-8775.

影响气温直减率变化的物理过程讨论

朱禾 王秀明

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 对流层中大气温度垂直递减率是决定大气静力稳定度的主要因素。基于气温直减率(γ)倾向公式, 讨论了影响 γ 变化的主要物理过程, 包括温度平流的垂直差异和垂直运动。“上冷下暖”的温度平流垂直差异导致气温直减率增大, 大气层结趋于不稳定, 对与之密切相关的气温直减率平流, 特别是混合层平流, 进行了讨论。垂直运动对气温直减率的影响往往被忽视, 且常被视为抬升条件, 重点讨论了天气尺度系统强迫的缓慢垂直运动对气温直减率的影响。

关键词: 气温直减率, 差动温度平流, 垂直运动, 大气静力稳定度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.008

A Discussion About the Physical Process of Environmental Temperature Lapse Rate Tendency

Zhu He, Wang Xiuming

(China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081)

Abstract: The environmental temperature lapse rate is the critical ingredient of static stability for tropospheric atmosphere. Base on the lapse rate tendency equation, the relevant physical processes that affect the local rate of change of lapse rate are discussed, including differential temperature advection and the vertical motion. Warm temperature advection decreasing with height lead to γ increase and stratification tends to instable. This paper discusses the lapse rate advection which is differential temperature advection in essence, especially the mixed layer advection downstream. The influence of vertical movement on the lapse rate is often ignored, and is often regarded as the lifting mechanism. This paper pay more attention to the effect of slow vertical movement, which forced by synoptic scale systems, on the lapse rate.

Keywords: lapse rate, differential temperature advection, vertical motion, static stability

0 引言

对流层中大气温度随高度增加逐减降低, 一般用高度每增加100m或1km温度降低的度数来描述, 称为气温直减率, 用 γ 表示, $\gamma = -\frac{\partial T}{\partial Z}$ 。在对流层内, 大气平均气温直减率为 $6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ 。比较环境气温直减率与气块干湿绝热递减率的大小是诊断大气静力稳定度的方法之一。假设低层水汽状况相同的情况下, 基于气块理论, 气温直减率越接近干绝热递减率(γ_d), 大气层结越不稳定, 因而气温直减率演变分析在雷暴潜势预报中是不可或缺的环节。Doswell等^[1]提出的“配料法”, 即给出了基于雷暴发生三要素(层结不稳定、水汽和抬升)诊断雷暴发生潜势的思路。为了使雷暴构成三要素相互独立, 从而能分别考虑其演变对

雷暴发生条件的影响, Doswell等^[1]提出的静力不稳定(instability)仅指温度层结处于条件不稳定状态。尽管严格意义上三要素并不完全独立^[2], 为了简化问题本文仅考虑影响气温直减率变化的物理过程。

预报员常基于流型识别法做雷暴潜势预报, 对高空槽后冷平流及低层偏南暖湿气流尤为关注, 认为这种“上冷下暖”的差动温度平流是不稳定层结建立的基本方式。本文从气温直减率局地变化公式入手, 对影响 γ 的物理过程进行了较为全面的讨论, 对差动温度平流的不同表现形式做了进一步的讨论, 并试图对不同物理过程对气温直减率的影响大小进行讨论。

1 水平运动对气温直减率的影响

气温直减率局地变化公式^[3-4]为:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = -V \cdot \nabla \gamma + \frac{\partial V_h}{\partial z} \cdot \nabla_h T + \frac{\partial w}{\partial z} (\gamma_d - \gamma) - w \frac{\partial \gamma}{\partial z} - \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{dQ}{dt} \right) \quad (1)$$

式中, $\gamma = -\frac{\partial T}{\partial Z}$ 为气温直减率, γ_d 为干绝热递减率, w

收稿日期: 2015年2月5日; 修回日期: 2015年9月15日
第一作者: 朱禾(1962—), Email: zhuh@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406002),
国家自然科学基金项目(41175043, 41475042)

表示垂直速度， Q 为非绝热加热， c_p 为定压比热。式(1)右边第一项为气温直减率平流，第二项为随高度变化的风的温度平流，第三项为拉伸项，第四项为气温直减率垂直输送，第五项为非绝热加热。由于引入了关系式 $\frac{dP}{dt} \approx \rho g w$ ，其中隐含了静力平衡关系，式(1)

适用于大尺度运动和非深对流的中尺度运动。式(1)右边前两项与温度平流有关，第三、四项与垂直运动有关。

$$\text{式(1)右边第一、二项可合并为} -\frac{\partial}{\partial z}(-V_h \cdot \nabla_h T),$$

即温度平流随高度的变化(差动温度平流)^[4]，说明上层冷平流、下层暖平流使大气层结趋于不稳定，也是预报员常说的“上冷下暖”，大气层结不稳定。尽管如此，差动温度平流对层结的影响是一个缓慢积累的过程，层结不稳定区并不一定同时可诊断出差动温度平流，很可能差动平流过程在诊断时刻之前发生。若将大尺度运动界定为准地转运动，则式(1)中第二项为热成风温度平流，而热成风温度平流为0，因而该项对气温直减率变化几乎无贡献。这说明温度平流的影响主要表现为气温直减率的平流[即式(1)右边第一项]。对大气尺度运动，量级分析也表明，气温直减率平流项比其他项大一个量级^[4]，在灾害性强对流天气过程中，该项对气温直减率的改变可以达到3h增加 $1^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

近乎干绝热递减率的温度层结可以由高原边界层混合作用形成，也可以由于下沉运动形成，天气尺度系统强迫的下沉运动通常都是干下沉。有利于雷暴发生一种流型为：高原地区深厚的混合层由强偏西风平流到下游的平原地区，形成平原高架混合层(elevated mixed layer, EML)^[5]。高架混合层实际上是上游高原地区的边界层混合层，只是高原地区水汽含量少，混合层相对深厚。该混合层(表现为气温直递减率几乎干绝热递减率，位温相同)会在气流作用下平流到平原地区，叠加在平原湿舌之上而形成强不稳定。对高原而言，是抬升混合层，对平原地区而言是“高架”(elevated)的。因而雷暴天气常发生在靠近高原的平原地区，如：美国的落基山脉东部平原，我国的华北平原和黄淮地区。美国一般用700~500hPa(简称“T75”)气温直减率和显著流线配合分析高架混合层平流^[6]。根据对北京周边探空的分析，影响北京及其下游平原地区的高架混合层的底部通常在700hPa以下，而不在700hPa之上^[7]，这与上游的地形高度有关。因而在华北平原地区高架混合层分析的层次不能拘泥于“T75”。槽后干冷下沉运动亦能形成气温直

减率近乎干绝热的层结，同时形成强逆温，抑制对流发生。干绝热气层平流到下游平原地区叠置在暖湿气团之上有利不稳定层结形成。另一方面，干绝热气层平流下游平原地区同时也形成较强的逆温(常被称为干暖盖，即Lid或Cap)，随着逆温层以下低层气团水汽和热量的累积，气团增温增湿，对流有效位能增大，如果存在中尺度系统强迫抬升或上游有对流系统移来，较强的抬升揭开“盖子(Lid)”，将出现灾害性强对流天气^[8]。气温直减率大值区东移叠加到低层湿区之上，形成不稳定的物理过程，这在我国东北龙卷等强对流天气个例中较为多见^[9]。

2 垂直运动对气温直减率的影响估计

Doswell^[10-11]认为大尺度系统强迫的垂直运动对大气层结有重要影响，指出天气尺度上升运动对雷暴的作用一般不是克服对流抑制的“抬升”作用，而是使大气层结向不稳定演化。式(1)中第三、四项分别为垂直速度分布不均匀造成的拉伸项和气温直减率垂直输送项。下面先讨论垂直拉伸项。如图1，初始气层厚度为1km，其底部为 10°C ，假设环境气温直减率为大气平均态，即 $6.5^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ，则顶部为 3.5°C 。假设顶部垂直速度大于底部，天气尺度系统强迫的上升速度一般在500hPa无辐散层最大，量级为 $10^0\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，在不失一般性的情况下，假设顶部垂直速度为 $2\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，底为 $1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。以干绝热过程抬升一段时间后，顶抬升了1km，则温度下降约 10°C ，即顶抬升后为 -6.5°C ；底抬升0.5km，温度下降 5°C ，抬升后为 5°C 。由于拉伸气柱厚度由1km变为1.5km。假设从底至顶气层垂直速度均匀递增，则气层平均气温直减率由 $6.5^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 增至 $7.7^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ，增加了 $1.2^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 。所需时间约为14h($1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的垂直速度上升0.5km所需要的时间)，大致相当于12h增加 $1^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 。这样的气温直减率增幅导致

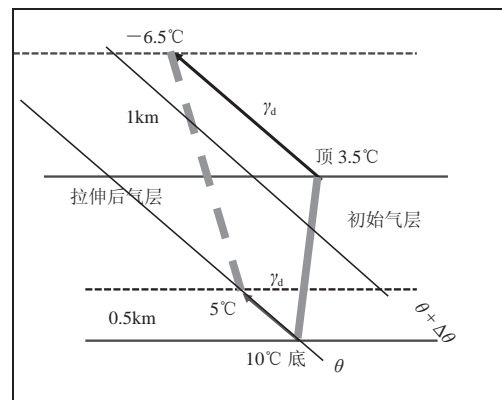


图1 拉伸项对大气气温直减率影响估计示意图
Fig. 1 The diagram to evaluate the influence of the stretching term on the lapse rate

的正浮力增量可使风暴垂直速度增加 $7\sim 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ [10]。

当气温直减率垂直分布不均匀且有垂直运动时,会产生垂直输送。当气温直减率随高度减小时,上升运动使上层气温直减率增加。2011年8月8日20时,北京周边700~500hPa受上升气流控制(图2a)。在上升运动的作用下,气温直减率近乎干绝热递减率的气层由8日20时的850~650hPa抬升至769~550hPa

(图2b中灰色粗虚线处),同时700~500hPa温度差由 17°C 增至 21°C ,对应气温直减率增幅为 $1.1^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 。从图2b可知,8日20时—9日08时700hPa增温 1°C ,500hPa降温 3°C 。由探空资料诊断不出明显的温度平流。由NCEP $1^\circ\times 1^\circ$ 分析资料诊断出500hPa以下气温递减率从8日20时—09日08时亦增大,且北京站点处850~500hPa为 $10^0\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级上升运动。

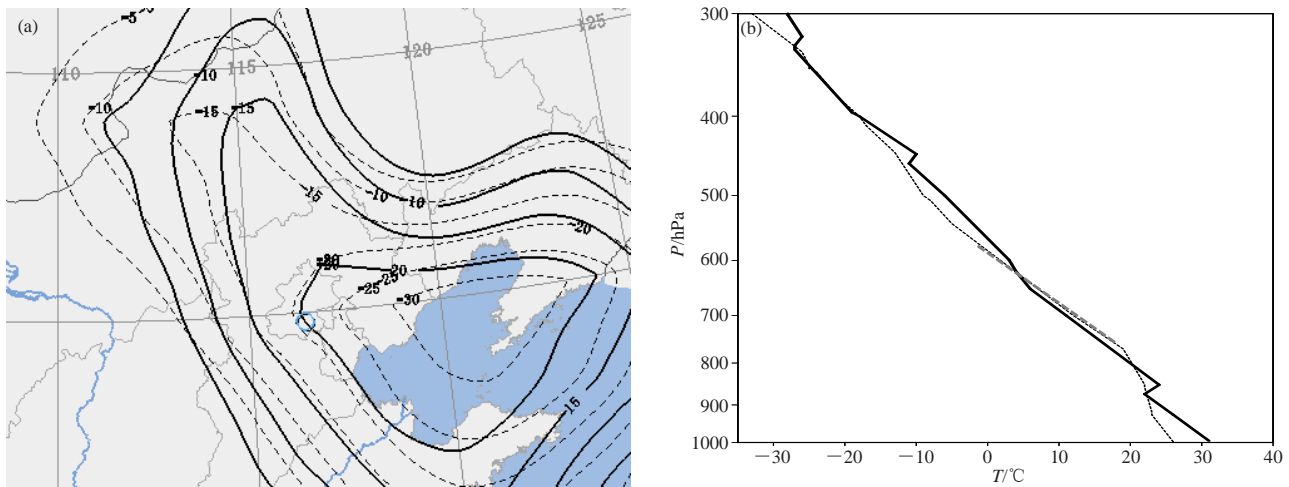


图2 (a) 2011年8月8日20时500hPa (实线)与700hPa (虚线)垂直速度(单位: 10^{-2}Pa/s),圆圈标记处为北京探空站点;(b)北京站8日20时(实线)和9日08时(细虚线)温度廓线(单位: $^\circ\text{C}$)

Fig.2 (a) The vertical velocity at 500hPa (solid line) and 700hPa (dotted line) at 12 UTC, 8 August, 2011 (unit: 10^{-2}Pa/s); (b) The temperature profiles at 12 UTC 8 August, 2011 (solid line) and 00 UTC 9 August, 2011 (dotted line) (unit: $^\circ\text{C}$). The blue circle locates the Beijing sounding station

图3给出了9日02时由NCEP资料给出的700~500hPa温度平流。8日20时—9日02时700hPa为弱冷平流,600hPa为弱暖平流,500hPa温度平流不明显,因此温度平流的垂直分布为“下冷上暖”,其作用是使得气温直减率减小。综上,北京站对流层中低层气温递减率增大不是由温度平流造成,而是由 $1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级的垂直运动造成。需要指出,本文所讨论的垂直抬升是大尺度系统或次天气尺度系统所强迫的缓慢垂直运动对整层大气的抬升,而非中尺度系统强迫的较强垂直运动对局地气块的抬升,因而不是讨论的抬升条件而是大尺度环流对气温直减率的影响。

对于边界层而言,由辐射和湍流混合造成的非绝热加热作用明显。白天地表辐射升温,通过感热和湍流混合使得边界层气温直减率增大,因此午后到傍晚低层气温直减率明显增大,而夜间减小(图2b)。

3 结论与讨论

对流层中大气温度垂直递减率是决定大气静力稳定度的主要因素,本文从影响气温直减率局地变化公式入手,讨论了影响大气温度垂直递减率的物理过

程,即差动温度平流和垂直运动。差动温度平流即通常业务预报中提到的“上冷下暖(平流)”——上层冷平流、下层暖平流。实际上,差动温度平流由气温直减率平流项主导,近乎干绝热递减率的混合层的层结不会因垂直运动而改变,因此其平流到下游地势平坦地区对层结不稳定的作用尤为显著。

一般来说,差动温度平流项占主导,但垂直运动对气温直减率的影响亦不可忽视,拉伸项和气温直减率垂直输送项对气温直减率的改变都可以达到每12h增加 $1.0^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 。本文给出了一次由垂直运动造成温度递减率增大的过程。高空槽前上升运动导致环境气温直减率增加是雷暴常在高空槽前发展的原因之一。

非绝热项包括辐射增温和凝结潜热释放都是很重要的且不可以忽略的,非绝热加热与绝热加热常常同时出现且部分抵消,限于篇幅和非绝热加热问题的复杂性,本文未做讨论。

参考文献

- [1] Doswell C A III, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology. Wea Forecasting, 1996, 11:

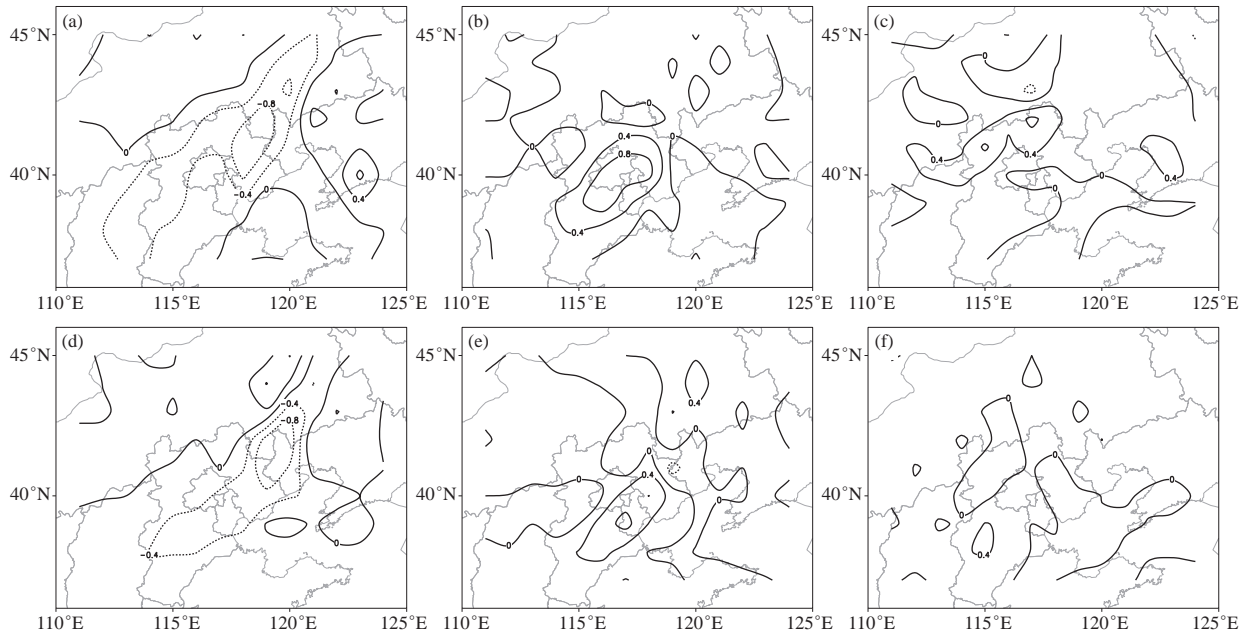


图3 2011年8月8日20时 (a, b, c) 与9日02时 (d, e, f) 700hPa (a, d)、600hPa (b, e) 和500hPa (c, f) 温度平流 (单位: $10^{-4}K \cdot s^{-1}$)

Fig. 3 The temperature advection at 700hPa (a, d), 600hPa (b, e) and 500hPa (c, f) at 12 UTC, 8 August, 2011 (a, b, c) and 18 UTC, 8 August, 2011 (d, e, f) (unit: $10^{-4}K \cdot s^{-1}$)

560-581.

- [2] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论. 气象, 2014, 40(4): 389-399.
- [3] 斯公望. 暴雨和强对流环流系统. 北京: 气象出版社, 1988.
- [4] Markowski P, Richardson Y. Mesoscale meteorology in midlatitudes. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell Publication, 2010.
- [5] Carlson T N, Benjamin S G, Forbes G S, et al. Elevated mixed layers in the regional severe storm environment: conceptual model and case studies. Mon Wea Rev, 1983, 111: 1453-1473.
- [6] Crisp C A. Training guide for severe weather forecasters. AFGWC/TN-79/002, Air Weather Service, U S Air Force, 1979.
- [7] 章丽娜, 王秀明, 熊秋芬, 等. “6·23”北京对流暴雨中尺度环境时空演变特征及影响因子分析. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 1-9.
- [8] Thomas M G, Carlson T N. A statistical evaluation of lid strength on deep convection. Wea Forecasting, 1987, 2: 127-139.
- [9] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. 气象学报, 2015, 73(3): 425-441.
- [10] Doswell C A III. The operational meteorology of convective weather. volume I: operational mesoanalysis. NOAA Technical Memorandum NWS NSSFC-5, 1982.
- [11] Doswell C A III. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: a case study example. Wea Forecasting, 1987, 2: 3-16.

人工影响天气作业人员安全风险评价

邵洋¹ 侯喜良² 孙锐¹ 赵志强¹

(1 中国气象局应急减灾与公共服务司, 北京 100081; 2 福建省安溪气象站, 泉州 362400)

摘要: 人的心理状态与不安全行为密切相关, 是安全管理中的重要因素。运用心理状态分析法, 构建由生活事件、社会支持、应对方式三方面要素组成的人员安全风险评价模型。设定人工影响天气作业人员的40项生活变化值, 根据社会支持、应对方式得分高低分别赋予贡献系数, 建立作业人员风险评价的定量化计算方法。对335名人工影响天气火箭、高炮作业人员的调查结果表明, 样本人群的社会支持总分为 45.94 ± 7.94 , 积极应对维度得分为 2.00 ± 0.49 , 消极应对维度得分为 1.26 ± 0.54 。不同年龄段的作业人群之间存在明显差别, 与低龄组和高龄组相比, 中龄组更善于运用社会支持资源和积极应对生活挑战。此方法可以提供人工影响天气作业人员风险分级评价结果, 为有效预防作业过程中的人因安全事件提供判别依据。

关键词: 人工影响天气, 人员安全风险, 心理状态分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.05.009

Operator's Safety Risk Assessment in Weather Modification Implementation

Shao Yang¹, Hou Xiliang², Sun Rui¹, Zhao Zhiqiang¹

(1 Department of Emergency Response, Disaster Mitigation and Public Services, China Meteorological Administration, Beijing 100081 2 Anxi County Meteorological Office, Quanzhou 362400)

Abstract: Human's psychological status, which closely related to unsafe behavior, is an important factor in safety management. By analysis of psychological status of weather modification (WM) operators, a safety risk assessment model is constructed by using three elements of life events, social support and coping style. Setting 40 life changing units for WM operators, the contribution coefficients of social support and coping style were set up respectively according to their values. Then the quantitative calculation formula was deduced. Investigation results of 335 artillery and rocket operators for WM show that the total social support score is 45.94 ± 7.94 , the active respond dimensions score is 2.0 ± 0.49 , and the negative is 1.26 ± 0.54 . Significant differences exist among operator groups in different ages: comparing to the younger and the elderly groups, the middle age group is more adept at using social support resources and actively respond to the challenges of life. The operator's safety risk assessment results in WM implementation may be regarded as determining criterion for effective prevention of security incidents in field operations induced by human factors.

Keywords: weather modification, operator's safety risk, psychological status analysis

0 引言

人工影响天气作业主要利用飞机、火箭、高炮等设备, 具有专业化和高安全风险的特征。《国务院办公厅关于进一步加强人工影响天气工作的意见》(国办发〔2012〕44号)要求, 加快建立责任明确、操作规范、制度严格、措施到位的安全生产监督管理体系, 特别提到要加强作业人员安全等重点环节的管理与监督检查。据统计, 我国现有人工影响天气作业

人员3.7万余人, 绝大多数分布在县乡和农村。人贯穿于人工影响天气作业过程的所有环节, 是作业实施中最活跃的因素。20世纪初, 美国著名安全工程师Heinrich提出了著名的海因法则, 从理论上揭示了事故发生的根本原因在于人的不安全行为和物的不安全状态, 而且人的因素占据主导地位。因此, 控制生产活动中自由度极大的人, 减少人的不安全行为, 是安全生产的关键所在。按照“安全第一、预防为主”的安全生产方针, 减少人的不安全行为, 除了要加强人工影响天气作业人员的操作技能素质和安全意识培训之外, 还要建立作业人员的安全风险评价方法, 采取针对性措施, 加强有效监管。

收稿日期: 2016年5月20日; 修回日期: 2016年6月27日
第一作者: 邵洋(1983-), Email: shaoyang@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局气象软科学研究重点项目(2016JD09)

心理状态分析法是研究行为方式的重要科学手段，最初产生于健康疾病相关研究，后来逐步应用到交通、煤炭等行业的人员安全管理。Holmes等^[1]编制了社会再适应评定量表（SRRS），将生活事件归纳为43种，用生活变化单位（LCU）来衡量各种事件的心理紧张和危害程度。Sarason等^[2]编制了生活遭遇调查表（LES），认为正负面的生活遭遇和社会支持与病症相关。Villalonga-Olives等^[3]研究发现，青少年近期经历的不良生活事件达到200起以上时，将对健康生活质量产生重要影响。Youngsig等^[4]评估分析了LCU因素对工业事故和工作相关疾病的影响。陈静等^[5]、宋琦等^[6]、Zhang^[7]利用生活事件分析法，提出了煤矿、铁路等人因事故控制预防的评价思路。由此可见，采用心理状态分析法来构建人工影响天气作业人员安全风险评价模型并进行定量预测是可行的。

1 人工影响天气作业人员安全风险评价模型构建

人的行为活动及生理状态在很大程度上受到心理状态的影响。人的心理状态受到内外因素的影响，可主要分为生活事件、社会支持和应对方式三方面要素。其中，生活事件是指近期发生的重要生活遭遇，社会支持反映社会资源可利用情况，应对方式体现对生活事件的应对反应。一定时期的个体心理压力可以归纳为生活事件、社会支持和应对方式的综合表现，由此构建人工影响天气作业人员安全风险评价模型（图1）。

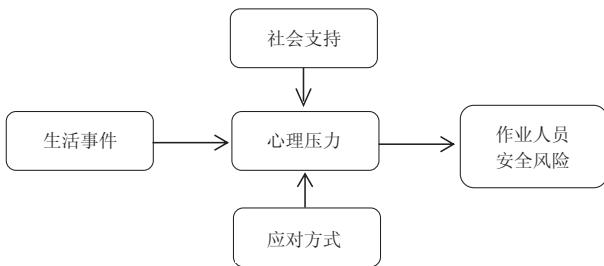


图1 人工影响天气作业人员安全风险评价模型

Fig. 1 Operator's Safety Risk Assessment Model in WM Implementation

健康平稳的心理状态有利于减少不安全作业行为，而复杂、较大的心理压力则会对作业安全有着直接的不利影响，容易导致作业不安全事件的发生。在过去的一段时期内，当一个人的心理压力值达到或超过某一阈值时，就很可能造成焦躁情绪，进而导致行为安全事故。

1.1 生活事件

人们生活状况的变化会增加人的思想负担，对

个体的精神造成一定的影响。不同的事件、不同的关系，所引起的后果及影响程度是不一样的。在Holmes等^[1]编制的社会再适应评定量表（SRRS）基础上，结合人工影响天气作业人员的特点，采用专家咨询法并经过规范化处理，设定由40项生活事件构成的人工影响天气作业人员LCU表（表1）。

表1 人工影响天气作业人员生活变化单位（LCU）表
Table 1 List of life changing unit for WM operators

序号	生活事件	LCU平均值	序号	生活事件	LCU平均值
1	丧偶	100	21	一万元以上欠款	31
2	离婚	73	22	抵押或借出的钱荒账	30
3	夫妻分居	65	23	升职加薪或降级减薪	29
4	牢狱之灾	63	24	子女离家出走	29
5	近亲死亡	63	25	介入法律纠纷	29
6	家人或自己伤病	53	26	实现个人目标	28
7	结婚	50	27	配偶就业或停职	26
8	失业	47	28	身体状态不佳	25
9	婚姻和解	45	29	生活条件改变	25
10	退休	45	30	遭抢失窃	23
11	家人健康变化	44	31	与上级不和	23
12	怀孕、生子	40	32	与同事、邻居不和	22
13	婚恋危机	39	33	工作时间和条件变化	20
14	事业变化	39	34	迁居	20
15	经济状况恶化	38	35	社会关系变化	18
16	亲友死亡	37	36	一万元以内欠款	17
17	听到别人议论自己	37	37	家人团聚次数变化	15
18	子女升学就业困难	36	38	生活习惯变化	14
19	与家人争吵	35	39	春节等重要节日	13
20	意外惊吓、自然灾害	31	40	轻微违反法律	11

表1列出的生活事件包括正面的和负面的，但皆会导致个体的心理压力值增加。LCU平均值越大，说明对应的生活事件变化给作业人员带来的心理压力越大。如果一个人在过去一段时期中遭遇表1中的n个生活事件，可用下式来反映总体生活变化：

$$L = \sum_{i=1}^n LCU(i) \quad (1)$$

式中，L表示总体生活变化值，等于n个生活变化值的总和。

1.2 社会支持

社会支持反映个体通过社会联系能够获得的减轻心理压力、缓解精神紧张状态、提高社会适应能力等关心和帮助的状况。目前多采用肖水源^[8]于1986—1993年设计的社会支持评定量表（SSRS），其主要指标见表2。

表2包括3个维度10个条目，分别为客观支持（能接受到的实际支持）、主观支持（能体验到的或情

表2 社会支持评定量表 (SSRS) 主要指标
Table 2 Main indexes of social readjustment rating scale

维度	评定条目	分值
客观支持	群体居住情况	1~4
	急难遭遇的经济等方面支持帮助来源	0~9
主观支持	急难遭遇的关心安慰来源	0~9
	可以得到支持和帮助的朋友数量	1~4
	邻里关系	1~4
	同事关系	1~4
支持利用度	家人给予的支持和照顾	5~20
	烦恼倾诉方式	1~4
	烦恼求助方式	1~4
	团体组织活动	1~4

感上的支持) 和对社会支持的利用度 (主动利用情况)。量表设计合理, 具有较好的信度和效度, 能较好地反映个体的社会支持水平。

$$S = \sum_{i=1}^{10} S(i) \quad (2)$$

式中, S 表示总体社会支持度。总得分为所有条目得分之和, 分值越高, 说明社会支持程度越好。不同地区、不同人群的社会支持存在一定的差异。

1.3 应对方式

生活事件带来的压力对个体会产生一定的心理影响, 但相同的压力水平对不同人的影响程度是有较大差别的, 这种差别主要取决于个体采用什么方式来应对。应对方式是个体对刺激的固定反应, 是解决问题或危机时的习惯性或偏爱的方式, 既有积极的一面, 也有消极的一面。应对方式是应激与压力的调节剂, 积极的应对方式会减轻心理压力, 而消极的应对方式则可能加剧心理压力。采用解亚宁^[9]编制的简易应对方式问卷 (SCSQ), 包括积极应对和消极应对2个维度 (表3)。

简易应对方式问卷反映出人群不同应对方式特征及其与心理压力之间的关系, 应对方式 (C) 为积极应对维度平均分和消极应对维度平均分之差。

$$C = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} C(i) - \frac{1}{8} \sum_{i=13}^{20} C(i) \quad (3)$$

积极应对评分较高时, 有助于减轻心理压力; 而消极应对评分高时, 心理压力会被一定程度的加剧。

2 作业人员安全风险评价定量判别

运用前文的作业人员安全风险评价模

型, 以社会支持 (S) 和应对方式 (C) 对生活变化值 (L) 进行调节修正, 建立作业人员安全风险 (R) 的定量预测关系:

$$R = \sqrt{\beta_S \cdot \beta_C} \times L \quad (4)$$

式中, β_S 、 β_C 分别为社会支持和应对方式的贡献系数。

对于一定数量的对象群体或样本, 计算出每个作业人员的SSRS和SCSQ得分, 然后将得分由小到大进行排序, 按照四分位法分别找出两组数列中前、后各25%的特征值 S_1 和 C_1 、 S_2 和 C_2 。得分低于 S_1 和 C_1 的作为低分组, 高于 S_2 和 C_2 的作为高分组, 介于两者之间的作为常规组。低分组的社会支持和应对方式显著偏差, 会加剧作业人员的心理压力。高分组的社会支持和应对方式显著偏良, 有助于减缓作业人员的心理压力。由此, 对3组人员的 β_S 、 β_C 采取以下方式进行赋值:

$$\beta_{S,C} = \begin{cases} 1.2 & S < S_1 \text{ 或 } C < C_1 \\ 0.8 & S > S_2 \text{ 或 } C > C_2 \\ 1.0 & S_1 \leq S \leq S_2 \text{ 或 } C_1 \leq C \leq C_2 \end{cases} \quad (5)$$

结合人工影响天气作业人员的实际情况, 将生活事件计算周期设定为12个月。对作业人员安全风险 (R) 按以下阈值进行分级评价:

表3 简易应对方式问卷 (SCSQ)
Table 3 Simplified coping style questionnaire

序号	项目	不采取	偶尔采取	有时采取	经常采取
积极应对维度					
1	通过工作学习或一些其他活动解脱	0	1	2	3
2	与人交谈, 倾诉内心烦恼	0	1	2	3
3	尽量看到事物好的一面	0	1	2	3
4	改变自己的想法, 重新发现生活中什么重要	0	1	2	3
5	不把问题看得太严重	0	1	2	3
6	坚持自己的立场, 为自己想得到的斗争	0	1	2	3
7	找出几种不同的解决问题的方法	0	1	2	3
8	向亲戚朋友或同学寻求建议	0	1	2	3
9	改变原来的一些做法或自己的一些问题	0	1	2	3
10	借鉴他人处理类似困难情景的办法	0	1	2	3
11	寻求业余爱好, 积极参加文体活动	0	1	2	3
12	尽量克制自己的失望、悔恨、悲伤和愤怒	0	1	2	3
消极应对维度					
13	试图休息或休假, 暂时把问题 (烦恼) 抛开	0	1	2	3
14	通过吸烟、喝酒、服药和吃东西来解除烦恼	0	1	2	3
15	认为时间会改变现状, 唯一要做的便是等待	0	1	2	3
16	试图忘记整个事情	0	1	2	3
17	依靠别人解决问题	0	1	2	3
18	接受现实, 因为没有其它办法	0	1	2	3
19	幻想可能会发生某种奇迹改变现状	0	1	2	3
20	自己安慰自己	0	1	2	3

$$\begin{cases} R < 150 & \text{正常心理状态, 微度安全风险} \\ 150 \leq R < 300 & \text{轻度心理压力, 轻度安全风险 (6)} \\ R \geq 300 & \text{严重心理压力, 重度安全风险} \end{cases}$$

可以看出, 当作业人员的安全风险 (R) 高于150时, 尤其是高于300时, 其沉重的心理压力, 导致作业安全事件发生的风险很大。

3 人工影响天气作业人员安全风险评价分析

3.1 总体表征

运用上述方法, 来自河北、安徽、陕西等19个省的335名人工影响天气火箭和高炮作业人员填写了调查问卷, 基本情况见表4。

表4 人工影响天气作业人员调查群体基本情况 (单位: 人)
Table 4 Primary information of the WM operators investigated

	气象职工	劳务派遣人员	农民	其他	合计
30岁以下	49	11	2	9	71
31~45岁	122	28	16	7	173
46岁以上	74	2	14	1	91
合计	245	41	32	17	335

人工影响天气作业人群的总体社会支持 (S) 和总体应对方式 (C) 统计结果为:

$$\begin{cases} S = 45.94 \pm 7.94 \\ C_a = 2.00 \pm 0.49 \\ C_n = 1.26 \pm 0.54 \end{cases} \quad (7)$$

式中, C_a 、 C_n 分别表示应对方式的积极维度、消极维度得分。与以往研究^[9-12]的调查测试结果比较发现, 人工影响天气作业人员的总体社会支持和总体应对方式得分是相对较高的。按照四分位法, 分别找出人工影响天气作业人群的总体社会支持和总体应对方式特征值:

$$\begin{cases} S_1 = 41, & S_2 = 52 \\ C_1 = 0.208, & C_2 = 1.167 \end{cases} \quad (8)$$

3.2 不同群体的安全风险评价分析

按照年龄, 将作业人员划分为低龄组 (30岁以下)、中龄组 (31—45岁)、高龄组 (46岁以上) 三个群体, 其风险评价特征值见表5。该表中, N 为样本数, \bar{S} 、 $\sigma(S)$ 、 \bar{C}_a 、 $\sigma(C_a)$ 、 \bar{C}_n 、 $\sigma(C_n)$ 分别为总体社会支持 (S)、应对方式积极维度 (C_a)、应对方式消极维度 (C_n) 的平均值和均方差。对比发现, 在社会支持方面, 中龄组得分最高, 高龄组次之, 低龄组最低; 在应对方式方面, 中龄组得分最高, 低龄组和高龄组基本相当。总体来看, 中龄组无论是社会支持还是应对方式, 得分都是最高的, 说明了这一群体更善于运用社会支持资源和积极应对生活挑战, 整体心理压力

较低。

表5 不同年龄段的作业人员安全风险评价特征值
Table 5 Feature values of safety risk assessment for WM operators in different ages

	N	\bar{S}	$\sigma(S)$	\bar{C}_a	$\sigma(C_a)$	\bar{C}_n	$\sigma(C_n)$
30岁以下	71	42.94	7.98	2.01	0.45	1.32	0.63
31~45岁	173	47.62	7.22	2.03	0.51	1.22	0.51
46岁以上	91	45.10	8.47	1.96	0.49	1.30	0.51

4 小结

综合运用生活事件、社会支持和应对方式等理论, 尝试构建人工影响天气作业人员安全风险评价模型和计算方法, 可以提供客观定量的安全风险分级评价结果。我国人工影响天气作业人员的总体社会支持和总体应对方式是较为良好, 但不同群体之间存在明显差别。相比低龄组和高龄组, 中龄组更善于运用社会支持资源和积极应对生活挑战。

为提高评价结果的有效性, 需要建立重要生活事件及时报告制度。在作业人员遭遇心理压力和困难时, 针对性地开展心理咨询、关心和帮助等积极干预活动, 提前做好必要的预防准备措施。生活事件中的积极性事件是否对消极性事件产生对冲效果, 也值得进一步研究。在实际应用中, 可以普查当地作业人员基本情况, 建立基础数据库, 确定相应的阈值指标, 设计计算程序, 实现作业人员安全风险自动化评价。

参考文献

- [1] Holmes T H, Rahe R H. The social readjustment rating scale. J Psych Res, 1967, 11: 213-218.
- [2] Sarason I G, Sarason B R, Antoni M H. Life events, social support, and illness. Psych Med, 1985, 47: 156-163.
- [3] Villalonga-Olives E, Vilagut G, Rojas-Farreras S, et al. Impact of recent life events on the health related quality of life of adolescents and youths: the role of gender and life events typologies in a follow-up study. Health Qual Life Outcomes, 2010, 8: 71-79.
- [4] Youngsig K, Hyojoon H, Sunghwan Y, et al. Application of the Life Change Unit model for the prevention of accident proneness among small to medium sized industries in Korea. Industrial Health, 2008, 46(5): 470-476.
- [5] 陈静, 曹庆贵, 匡开宇. 生活事件分析法在煤矿企业中的应用. 安全与环境学报, 2006, 6(7): 67-69.
- [6] 宋琦, 寇玮华, 田志强. 改进的生活事件分析法在铁路安全管理中的应用. 安全与环境工程, 2009, 16(2): 74-78.
- [7] Zhang W H. Causation mechanism of coal miners' human errors in the perspective of life events. Inter J Mining Sci Tech, 2014, 24: 581-586.
- [8] 肖水源. 社会支持评定量表. 中国心理卫生杂志, 1999 (增刊): 127-133.
- [9] 解亚宁. 简易应对方式量表信度和效度的初步研究. 中国临床心理学杂志, 1998, 6(2): 114-115.
- [10] 肖水源, 杨德森. 社会支持对身心健康的影响. 中国心理卫生杂志, 1987, 1(4): 183-185.
- [11] 汪向东, 沈其杰. 深圳移居者心理健康水平及有关因素的初步研究. 中国心理卫生杂志, 1988, 2(5): 193-197.
- [12] 苏莉, 韦波, 凌小凤, 等. 社会支持评定量表在壮族农民中的信效度和常模. 现代预防医学, 2009, 36(23): 4411-4413.

谈谈气象要素(压、温、湿、风)的物理意义和预报应用价值

■ 陶祖钰 范俊红 李开元 刘淑媛 杨引明

形形色色的气象变量，本质上都是由“气压、温度、湿度和风”这四个基本“元素”组成的，所以只有这四个量才被称为气象要素。

天气预报中用到的气象变量(有时也称为物理量、诊断量)，其数量之多数以十计、百计，但是只有气压、温度、湿度和风这四个量被称为气象要素，简称“压、温、湿、风”。要素的英文名称是“element”，它也可翻译成“元素”。也就是说，形形色色的气象变量，本质上都是由这四个基本“元素”组成的，所以只有“压、温、湿、风”才被称为气象要素。既然如此，气象要素在天气预报中也必定最具应用价值，而且还有直接、明了、方便的特点。

要用好气象要素，首先必须真正理解气象要素的物理意义，因为其中包含了做天气预报必备的基础知识。本文将概要地介绍压、温、湿、风的物理含义，并从这些基础物理概念出发，讨论它们在天气预报中有哪些应用价值，以及它们之间的关联。最后用“地面气象要素四线图”的实例介绍具体的应用方法。

一、气压

气象站观测的地面气压(也称为本站气压、场面气压)，它代表该地单位面积上空整个大气层的总质量。这是因为，除了在对流云中，大气在垂直方向都处于静力平衡状态，所以真空水银气压表中水银柱的重量就等于大气柱的重量，其数值在海平面上约为760mm高的水银柱重量，约1000hPa。

最常使用的是海平面气压。这是因为地面高低起伏，大气柱的长度不同，所以海拔高的地面气压总低于海拔低的。要比较不同气象站气压的高低，必须先要将地面气压都订正成海平面气压。订正的方法就是加上地面以下到海平面的气柱质量。计算这个虚拟气柱的质量时需要假设气柱的温度就是地面温度，因此地面温度偏低的测站，订正出来的海平面气压就一定偏高，尤其是冬季海拔较高的测站，例如冬季蒙古高原常出现海平面气压偏高的情况。

大气的总质量取决于空气的密度。温度低时，空气密度大，气柱的总质量就大，反之亦然。这就是我

们常说冷高压和暖低压的物理依据。同样道理，气压水平梯度的大小和温度水平梯度也密切相关。海平面气压场中等压线的密集带，也应是大气层中温度水平差异较大的区域，即锋区。因此根据地面天气图上等压线的密集带可以很快地大致判定锋区的位置。

气压倾向，即地面气压随时间的变化，如3h或24h变压，也同样和温度变化相关联。气压升高表示整个大气层中有冷空气活动，即比较冷的空气代替了原来比较暖的空气；反之，气压下降则反映有暖空气活动。温度平流是表征冷暖空气活动的物理量，所以根据静力学关系，正负变压应与空中的冷暖平流相对应，正负变压越大，反映冷暖平流越强(虽然我们不能确定空中温度平流所在的高度和厚度)。更有价值的是，动力学理论证明，冷暖平流是导致下沉和上升运动的原因，所以气压倾向也与晴雨密切相关。气压下降天气转坏，气压上升天气转好。所以早年人们将气压表称为晴雨表。

理论上，短时间内发生的气压变化，如3h或1h气压倾向，有助于我们迅速、及时地掌握空中冷暖空气的活动。但在预报中应用时遇到的最大困难是，地面气压有很明显的日变化，它与温度的日变化和地球大气圈的半日弹性波有关。所以只有明显的、非日变化的气压倾向才有预报价值，这就需要在预报中用心体察。

空气中的气压在天气分析中用等压面高度来表示。等压面的高度高，就表示相应等高面上的气压高，如500hPa等压面上的高度偏高，就表示该地5.5km左右高度的水平面的气压偏高。

因为大气的总质量约为1000hPa，所以500hPa等压面把大气层大致分为质量几乎相等的上下两部分。500hPa的高度 H_{500} 等于1000hPa的高度 H_{1000} 加上1000hPa等压面和500hPa等压面之间的厚度 $H_{1000,500}$ ，即：

$$H_{500} = H_{1000} + H_{1000,500} \quad (1)$$

由于1000hPa等压面的高度变化很小，只有50m左右的起伏，而500hPa等压面的起伏高达500m。所以相对于500hPa等压面，1000hPa等压面几乎可以看作水平面。因此， H_{500} 主要由 $H_{1000,500}$ 决定。按照静力学关系，厚度与两个等压面之间的平均温度成正比，温度越高、密度越小，等压面之间的厚度就越大。500hPa高度偏高，表示500hPa以下大气层下半部的温度偏高，反之亦然。所以高层等压面与海平面气压场不同，通常表现为冷低压和暖高压的温压场配置。500hPa正、负变高与对流层下部的暖、冷平流相联系。

预报员都很重视分析500hPa等压面图上的小槽，并称之为“抓冷空气活动”是完全符合上述原理的。这里只需再强调一点，与500hPa小槽相关联的是500hPa以下低层大气中的冷空气，而不是高层的冷空气。即使在500hPa等压面温度场上分析不出与高度槽相配合的冷温度槽，500hPa小槽活动仍可说明在对流层下半部有冷空气活动。

对于925，850和700hPa这些较低的等压面情况就不同于500hPa以上的高层等压面。以850hPa等压面的高度 H_{850} 为例，由下式可见：

$$H_{850} = H_{1000} + H_{1000,850} \quad (2)$$

由于1000hPa等压面到850hPa等压面之间的空气质量只占大气总质量的一小部分，所以 H_{850} 更多地与1000hPa等压面的高度有关，即与整个气柱的质量相关联。故850hPa的变高和地面变压相同，负变高表示有暖平流，正变高表示有冷平流。

500hPa以上和以下等压面高度的意义不同，这是在预报中需特别注意加以区别的，千万不可混淆。它也可从冷暖空气气柱的重心高低不同来解释。同样质量为1000hPa的空气柱，暖空气的气柱高，重心也高；冷气柱则相反。

当然必须注意，上面的气压（或等压面高度）与温度的关系都是从静力学关系得出的，但并不是全部。实际上二者的关系要更复杂一些，例如地面上的温带气旋当然是低压系统，但里面既有暖气团，也有冷气团，故它不是热低压，而是半冷半暖的低压；到锢囚阶段则是冷低压。气压和温度的复杂关系，一方面是因为气压系统的热力结构并不总是对称的。另一方面，气压的变化除了热力因子（也可称为静力学因子）外还有动力因子，如涡度平流。但前面说的的气压和温度的关系是最基本和最常用的，也是最容易理解的。

二、温度

天气分析中，温度的物理意义有两个，一是质量，二是能量。质量是指单位体积的质量，即空气密度（ ρ ）。因为根据气体状态方程：

$$P = \rho RT \quad (3)$$

等压面上气压（ P ）是常数，故温度分布就是大气的密度分布，即质量的分布。所以温度的三维分布就表示大气质量（密度）的空间分布。它和气压不同的地方是，温度代表的是三维空间中每一个点的质量（单位体积的质量，即密度），而气压则代表垂直方向一定体积内的总质量。正因为两者都和重量有关，所以如上节所讨论的，气压的分布和变化与温度的分布和变化之间有密切的关联。

温度另一个重要意义是能量，即大气的热能。大气如一台机器在不停地运转，它需要消耗能量才能维持。热能是大气运动的能量来源。天气预报中关注温度就是关注能量。温度高，表示能量高；温度低，表示能量低。大气中的温度随高度递减，每1000m温度降低约6.5℃，所以高空的温度比地面要低得多。如500hPa等压面的温度要比海平面的温度低35℃以上。所以能量主要位于低空，天气预报中最应该关注的是低空温度，特别是1km以下最靠近地面的边界层内的温度。

热能必须通过一定的物理过程才会转化为动能，例如当地面温度升高到一定程度（即达到对流温度）就会产生对流，暖空气上升、冷空气下沉，热能转变为动能。这是垂直温度梯度引起的“能量释放”。

另一种热能转换为动能的过程是水平温度梯度引起的。这种情况不需要地面温度达到对流温度，但需要存在水平温度差异，热能也可转换为动能，例如海陆风、山谷风和锋面环流。它们可统称为斜压力管环流。这种转换过程的本质是偏暖的空气上升，偏冷的空气下沉，造成大气的重心下降，使位能转换为动能。总之，天气预报中应重点关注低空的温度，包括低空的垂直温度递减率和水平温度梯度。

地面气象要素中，温度是一个容易受各种因素影响的要素。除了大尺度天气过程引起的温度变化外，太阳短波辐射和长波辐射使温度有明显的日变化；天空云量会显著改变温度日变化；地面风速大小不同所以乱流垂直交换强度不同也影响地面温度，预报中需要随时仔细体察温度的分布和变化。

三、湿度

与其他的气象要素不同，湿度这个要素包括两个不同的内容，一个是绝对湿度，它表征空气中包含的水汽质量；另一个是相对湿度，它表征空气接近饱和的程度，二者虽有联系，但性质不同，使用时需要严格区分，不可随意混淆。

1. 比湿

比湿（ q ）是绝对湿度的常用单位，其定义是1000g湿空气中所含的水汽质量，所以它的单位是g/kg。水

汽在大气中不是独立存在的，它总是和其他空气成分（即干空气）混合在一起。水汽在整个空气的质量中只占极少一部分，最多时也只占2%左右（即20g/kg左右），少的时候则可以少到几乎为零。下图为2014年6月26日08时沿115°E，从高纬度（60°N）到低纬度（20°N）的比湿垂直剖面图，图中实线为等比湿线，间隔2g/kg，它大致可以代表对流层中水汽分布基本特点。从等比湿线的分布可见，水汽主要集中在对流层的下半部，300hPa以上比湿几乎为零，可以忽略不计。

平流层中水汽极度稀少，几乎为零，故被称为痕量气体。对流层中水汽随高度按指数减少。据估计，500hPa以上对流层上半部的水汽只占水汽总量的7%左右，即绝大部分的水汽（约93%）都在对流层的下半部。最大的比湿位于850hPa以下的边界层中。图中华南沿海地面的比湿高达20g/kg以上；在40°N有一个比湿14g/kg的比湿中心位于边界层内925hPa的高度上。因此，水汽分析的重点应放在地面图、925和850hPa等压面图上。

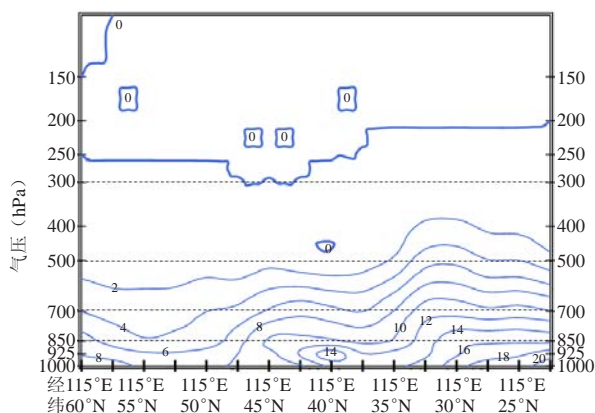


图1 2014年6月26日08时沿115°E，60°—20°N的比湿垂直剖面图（单位：g/kg，间隔：2）

2. 露点温度

比湿的优点是物理概念明确，而且在干绝热过程中保持不变，即具有守恒性。但常规天气分析中用露点温度（ T_d ）表示绝对湿度，它是湿空气的温度下降到开始有露凝结生成时的温度，所以它的优点是比较直观。与露点温度相对应的比湿为饱和比湿（ q_s ），即一定温度下空气中可以容留的最大水汽质量，温度越高，饱和比湿越大。 T 和 T_d 相等时， $q=q_s$ 。

从图2a可见，在0°C以下，饱和比湿随露点温度增加得很慢，但是在10°C以上，比湿随露点温度迅速增大。根据天气图上的露点温度，可以在 T - $\ln P$ 图上的等饱和比湿线很方便地查到相应的比湿值。当空气中水汽很少时，温度必须降得非常低才会达到饱和而凝结，所以露点温度可以非常低，如零下数十摄氏度。

但是我们几乎没有看到过超过30°C的露点温度，这是因为空气中的水汽来源于海洋，海面的温度决定了洋面空气的饱和比湿，即使是夏季热带洋面的温度，最高也只有29°C左右（图2b）。

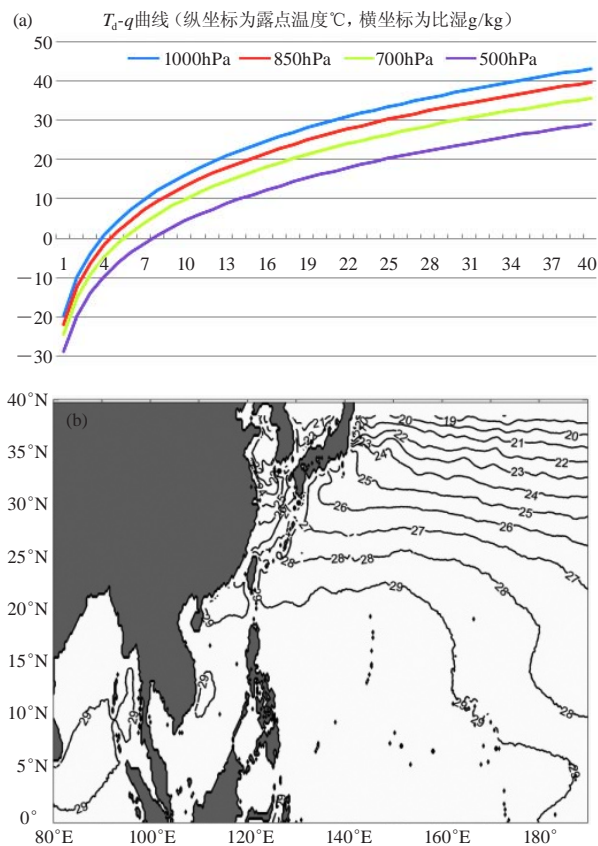


图2 (a) 各标准等压面上饱和比湿随露点温度变化的曲线；(b) 2000—2008年夏季平均海温（单位：°C）

注：绝对湿度的单位还有混合比 w ，即湿空气中水汽质量和干空气质量之比，其单位和比湿相同，两者在数值上的差别也不大，以及水汽压 e ，即空气中水汽分子热运动所单独产生的分压力。

降水来源于空气中的水汽，所以降水量的大小和绝对湿度的大小有直接关系。华南前汛期常有日雨量达200mm以上的大暴雨，它与华南露点温度常常高达26~28°C有关；长江流域梅雨期常见的暴雨日雨量为50~100mm，它与长江流域露点温度常常达到和超过24°C有关；华北和东北也会发生日雨量50~100mm的暴雨，此时露点温度也通常超过24°C。相反，如果露点温度低于20°C，无论什么季节，一般都不会有暴雨发生。总结气象要素的定量概念对预报是很有帮助的。

露点温度的优点是它的日变化比温度小很多，因为辐射引起的温度日变化不会改变空气中的水汽含量，即绝对湿度（如比湿、露点温度）。因此，露点温度的显著变化往往反映局地气团性质的变化，这一特点在单站要素分析中非常有用。

绝对湿度和对流也有密切关系，这是因为地面

的露点温度和对流有效位能 (CAPE) 的大小关系非常密切。从对流温度示意图 (图3) 可见, 抬升凝结高度、自由对流高度和对流凝结高度都是由地面露点温度及其相应的等饱和比湿线所决定, 因此也就在很大程度上决定了 CAPE 的大小。当地面露点温度小于 15°C 时, 一般不会有强雷暴; 如果露点温度达到 20°C 或更高, 就有可能发展成强雷暴并产生雨强 $20\sim 40\text{mm/h}$ 的短时强降水。

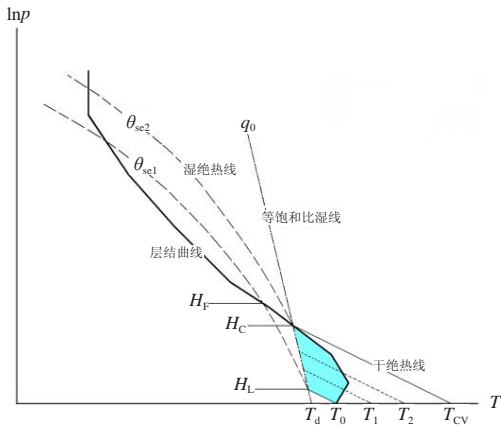


图3 修正后的对流凝结高度和对流温度示意图 (图中填色区视为与探空对应的初始状态的对流抑制能量) (来源: 李耀东等, 2014)

3. 相对湿度

相对湿度是表示湿空气接近饱和程度的量。在一定的温度和气压下, 单位质量空气中所能包含的最大水汽质量为饱和比湿 (q_s), 如果超过, 就有凝结发生。实际比湿和该温度下的饱和比湿之比就是相对湿度 RH, 用 $0\sim 100\%$ 表示。

相对湿度也可用温度-露点差 ($T-T_d$) 表示。饱和时的温度就是露点温度, 即 $T=T_d$, 因此 $T-T_d=0$ 就表示达到饱和, $T-T_d$ 越小表示空气越接近饱和。由于探空中湿度观测的误差较大, 在天气分析中很少看到 $T-T_d=0$ 的情况。通常高空图上 $T-T_d\leq 4^{\circ}\text{C}$ 的区域就可看作是饱和区, 它和云区或雨区的位置基本重合。在 40 年前没有卫星云图的条件下, 它是了解大范围云雨区分布的基本方法。

需要特别强调的是, 同为 $T-T_d\leq 4^{\circ}\text{C}$ 的区域, 其水汽的含量 (即绝对湿度) 可以相差非常大。因为两个同样是 $T-T_d\leq 4^{\circ}\text{C}$ 的区域, 如果温度 T 相差显著, 其露点温度 T_d 也一定相差显著, 故水汽的含量也相差很大。如图 2 所示, 1000hPa 温度 0°C 时的饱和比湿约为 3.5g/kg , 温度 10°C 时增大到 7.5g/kg , 温度 20°C 时约为 14g/kg , 30°C 时约为 26g/kg 。

相对湿度和露点温度不同, 它有很明显的日变化, 呈现出与温度日变化反位相的特征。所以, 相对

湿度的变化不能反映气团性质的变化。但是相对湿度也有一个很突出的优点, 就是对垂直运动非常敏感。如果有上升运动, 哪怕相当微弱, 则由于绝热膨胀冷却会使相对湿度显著升高 (如 70% 以上); 反之, 如果有下沉运动, 则由于绝热压缩温度升高而使相对湿度显著降低 (如 30% 以下)。由于垂直运动是天气分析中最难掌握的, 所以相对湿度的这个优点非常值得我们在工作中总结和应用。

从大气环流的角度看, 湿度的重要性也是显然的。因为大气运动所依赖的太阳能, 有超过 $1/3$ ($24/70$) 是通过水汽间接获得的 (图 4)。此外, 水汽也是发生对流的根本原因, 因为对流所依靠的浮力也是由于水汽凝结释放的潜热才使得云内的温度高于环境的温度。总之, 在天气分析和预报中应该十分重视湿度的分析, 特别是天气图上露点温度的分析。

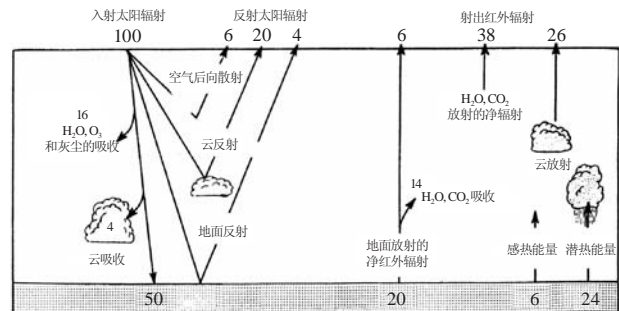


图4 大气能量收支平衡图 (左为短波辐射, 右为长波辐射) (来源: 巴里 R G 等, 1982)

注: 太阳辐射是大气的唯一能量来源, 到达大气层上界的太阳辐射中有 70% 用于加热大气 (其中 50% 用于加热地表, 只有 20% 直接加热大气; 加热地表中近一半 (24%) 用于蒸发地面的水 (主要在热带洋面), 然后通过凝结再加热大气。所以可以这样认为: 水汽是大气热机的主要燃料之一 (占 $24/70$, 即超过 $1/3$)。

四、风

天气学中, 风专指空气的大规模水平运动速度, 即空间范围内移动距离可达成百上千千米的空气运动速度。移动范围很小, 只有数十或数百米的小尺度湍流运动速度不包括在内。以图 5 给出的北京 5 个小时的一段风速记录可见, 在 $20:50$ 风速显著加大以后, 瞬时风速 (黑色) 围绕平均风速线 (蓝色) 摆动非常明显, 说明瞬时风速存在脉动, 有时大于平均风, 有时小于平均风。极大瞬时风速 (红色) 则明显大于平均风速, 有时甚至比平均风大一倍 (图中绿色虚线所指), 说明地面风的湍流脉动非常强。地面天气观测记录的风采用两分钟平均的办法就是为了将湍流脉动的速度平滑掉。

从图中可以看到, $20:50$ 以后风向也发生系统性变化, 由无持续性风向转为稳定的西北偏北风。地面风向的系统性变化显示了一次空气的大规模运动过程,

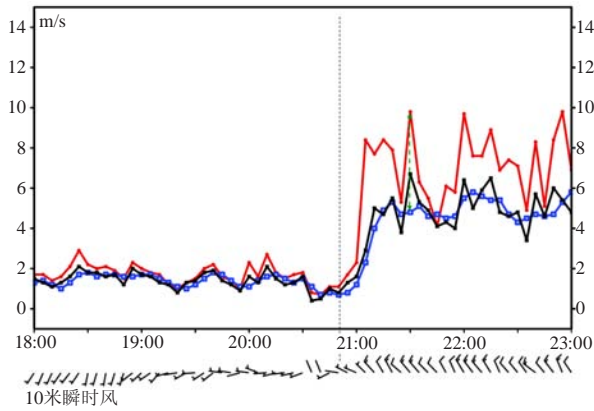


图5 2014年12月11日18—23时(北京时)北京风速变化曲线(黑色为瞬时风速,蓝色为10min平均风速,红色为1min内的极大风速;横坐标时间间隔为5min。原始数据时间分辨率为1min)

即有冷锋移过本站。空气大规模运动中垂直运动的分量非常小(量级为 10^{-2} m/s),只有水平运动分量的千分之一,不是常规测仪器能直接测量的。所以天气学中的风不包括空气的垂直运动。

在压、温、湿、风四大气象要素中,气压和温度是气体状态方程中的两个变量,故称为状态变量,即

表征大气热力学状态的变量。湿度是表征大气中某一成分(即水汽)的物质变量。只有风,是表征大气运动的变量。温度和湿度分布都因大气的运动而改变,因此风在四大要素中具有特殊的地位。一定意义上可以认为,风决定了温湿的分布,所以风也被称为动力学变量。由于水汽中所含有的相变潜热是大气运动的主要能量来源之一(图4),所以温度和湿度一起也被称为大气的热力学变量。在数值预报的初值中,风起决定性的作用,它会引起温湿场的迅速改变。

五、地面气象要素四线图

在地面单站气象要素分析中,压、温、湿、风四要素的时间变化曲线(常称为四线图)是预报中很有用的工具。在四线图中经常可以看到风的变化引起温湿的急剧变化,或者说,利用风的变化来认识温湿变化的原因。例如在图6a中,2014年12月11日21时以后(图中黑色虚线右方),北京的地面风从西南偏西风转为西北风,同时风力也从1~2级加强为4~5级。在风转变后,露点温度(绿色线)在1h内急剧下降6~7℃,显示出北京上空气团的更替,转变为受干冷的极地气团控制。单站气压表现出显著的上升(黑色虚线箭头所指),也证明冷气团的到来。但是,与此

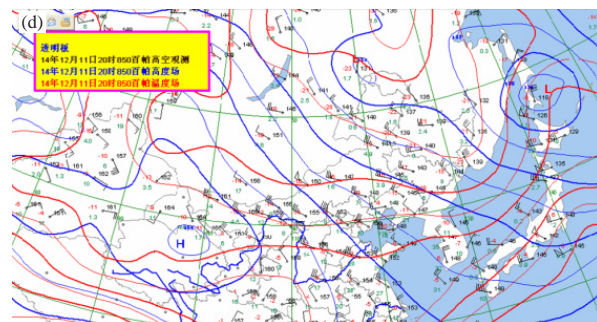
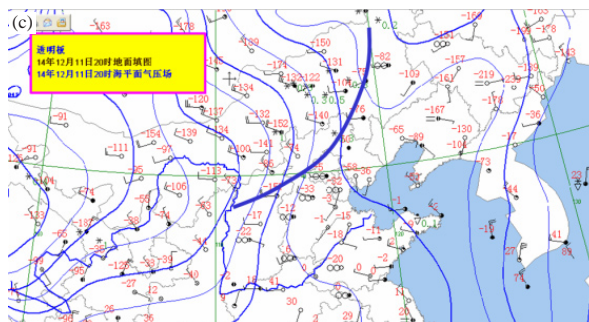
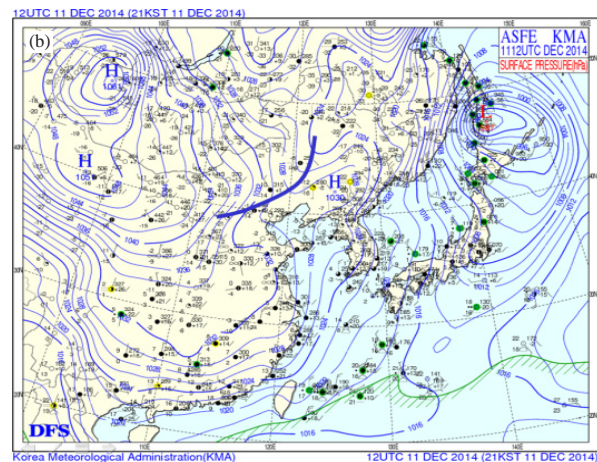
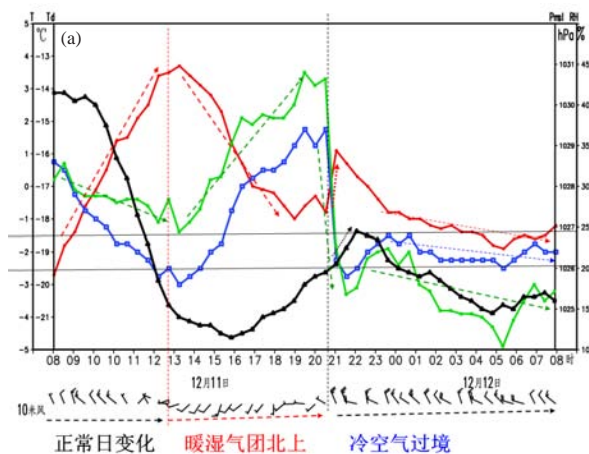


图6 2014年12月11日08时—12日08时北京地面气象要素变化(a)、相关的地面图(b、c,其中c为b局部放大的华北区域地面图),以及850hPa天气图(d)(红色线为温度,绿色线为露点温度,蓝色线为相对湿度,黑色线为气压)

(下转64页)

世界气象组织战略规划动态及其经验启示

■ 陈鹏飞 朱玉洁 陈正洪

及时跟踪世界气象组织（WMO）战略规划发展动态，借鉴其目的意义、总体思路、内容框架和保障措施等方面的先进理论和实践经验，提出了对我国气象事业发展战略的启示。

世界气象组织（World Meteorological Organization, WMO）成立于1950年，是联合国下属的一个专门机构，一个国际性政府间组织，总部设在瑞士日内瓦，其经费主要由其会员国提供。WMO主要通过制定一套业务技术规范、条例、标准、规程等来实现其管理和协调职能，重点在天气、气候、水文和水资源及相关环境领域的专业知识和国际合作方面发挥世界领导作用，从而为全世界人民的安全和福祉、为各国的社会经济利益做出贡献。经过多年实践，WMO在国际组织中的地位和声誉日益提高，之所以能取得如此骄

人的成绩，在很大程度上得益于它各种计划的科学制定和顺利实施。WMO战略规划就是其中最为重要的计划之一。

一、WMO战略规划流程及战略规划历史进程

1 WMO战略规划流程

WMO战略规划流程（图1）最初是在计划文件草案中融入会员的意见，并提交WMO大会审议和批准。该流程产生的三个基础性文件分别是：WMO战略规划、WMO运行计划和WMO预算。

（上接63页）

同时，温度并未出现下降，反而出现接近2℃的小幅升温。一方面有冷锋过境，同时又发生在上半夜正常日变化的温度下降时段，这样的小幅升温显得尤其异常。其原因也与风有关，因为地面风力的突然增大，边界层内垂直方向的湍流混合也相应增强，其绝热过程使温度不降反升。

从常规天气图分析可见，这是一小股冷空气的补充南下影响北京的过程。在20时的地面图（图6b、6c）上可以分析出有一条副冷锋已非常接近北京，但这种小股冷空气在高空图上很难辨认，只表现为持续的、一致的西北气流和冷平流，如图6d所示。但是在单站要素四线图上这股冷空气的活动却清楚地得到反映。在四线图（图6a）的左边，11日上午气温的日变化非常清楚，到13时，温度上升超过6℃（图中红色虚线箭头所指），而露点温度曲线非常平稳只有1℃左右的变化（图中绿色虚线箭头所指）。当13时地面风向由西北风转为西南风以后（图中红色虚线右方），露点温度转变为持续上升，说明北京转为受来自南方相对潮湿的变性气团控制。气压曲线由10时以前的平稳转为持续下降，则反映北京从高压后部转为低槽控制，直到21时偏北风突然增大，说明冷空气补充南下已影响北京。12日00时以后，温度、露点温度、相对湿度的变化都趋于平稳，表明已转入比较均

匀的冷气团内部。

总之，仔细考察地面要素的变化，如三线图或四线图，可以帮助我们及时掌握最新发生的变化，从而对天气预报做出必要的补充或修正。日常工作中经常可以发现这类例子，经常总结，对提高天气分析和预报的能力一定大有裨益。

致谢：本文由国家自然科学基金（41475040）和公益性行业（气象）科研专项（GYHY201306023）共同资助。此文得益于和多位学长及同事若干年来不拘形式的讨论，如周晓平、陈受钧、秦瑜、毛节泰、郑永光、俞小鼎、郑媛媛、许爱华、何立富、孙继松等，不能一一列举，在此一并表示感谢。

延伸阅读

- 巴里R G, 乔利R J. 1982. 大气、天气和气候. 北京: 高等教育出版社.
- 李耀东, 刘健文, 吴洪星, 等. 2014. 对流温度含义阐释及部分示意图隐含悖论成因分析与预报应用. 气象学报, 72(3): 628-637.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2005. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社.
- 张建春. 2012. 雷雨天气的单站物理条件分析. 北京: 北京大学.

（作者单位：陶祖钰，北京大学；范俊红，河北省气象局；李开元，中国气象局气象干部培训学院保定分院；刘淑媛，空军气象中心；杨引明，上海市气象局）

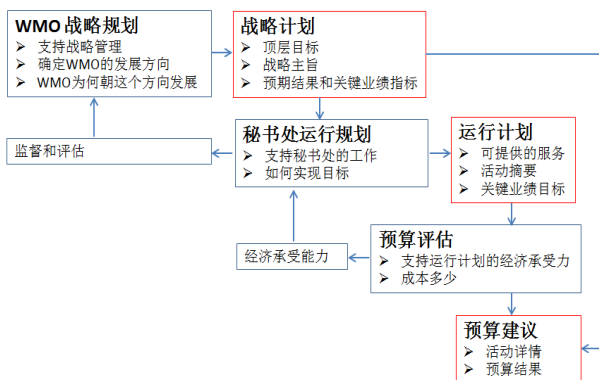


图1 WMO 战略规划流程图

其中，WMO战略计划是一份由会员参与制定的确定方向的文件，主要用于确定WMO的宗旨、需求和优先发展领域及其四年财期的重点等；WMO运行计划是将战略计划中叙述的顶层目标和预期结果转变成具有时限的具体计划活动和项目，为资金分配以及为监督与评价奠定基础；WMO预算是基于结果的预算，预算过程（秘书处与区域协会和技术委员会一起）最终需给出资金理由，并决定WMO各项计划活动的经济可承受性。

2 WMO战略计划历史进程

战略意味着一种灵活性，良好的战略计划总设法避免最坏的不测事件，使国家、组织或个人处于可能的最优地位，以便对变幻不定的环境做出最灵活的有利反应。WMO战略计划可谓良好，作为WMO战略规划流程产生的基础性文件之一，是针对其未来发展方向和优先项目形成的高层声明，同时也为各国水文气象部门（NMHS）制定自身的发展计划及国际合作提供广泛的指导，以便使WMO及其成员国和地区可以更好地提供气象水文服务；也是一份机动灵活的文件，在滚动规划框架内，通过定期规划、实施、评估和更新而得到进一步发展。

1983年5月，第九届世界气象大会审议通过WMO制定的第一个战略计划（1983—1992年）。截至目前，WMO已制定了九个战略计划。WMO每四年重新修订一次战略计划，适时对战略重点进行调整，在每个财务期开始的前一年由世界气象大会正式审定发布。其中，在20世纪实施的前五个均为十年期的长期计划，且前后计划有六年重叠期，以保证计划的连续性；进入21世纪后，2003年5月举办的第十四届世界气象大会通过了WMO制定的第六个战略计划（2004—2011年），为八年期，以适应WMO的四年财务期和两年计划与预算期；从2007年的第七个战略计划（2004—2011年）开始，以后的计划都变为了四

年期，并取消了前后的重叠期。目前，正在执行的第九个战略计划（即WMO strategic plan 2016—2019，以下简称“新一轮战略计划”）是于2015年5月举行的第十七届世界气象大会审定发布的。

二、WMO战略计划主要特点

不同时期的WMO战略计划都带有当时的历史印记，WMO战略计划由20世纪相互重叠的十年期计划逐步调整为目前的不重叠的四年期计划，更好地适应了WMO的财务期和预算期，不同时期的战略计划内容有所不同，但在总体结构上相似。以下主要通过系统分析近期的战略计划的制定目的意义、总体思路、主要内容框架、保障措施等方面特点，总结出WMO制定和实施战略计划的一些先进经验。

1 目的意义

WMO战略计划的总目标是确定其高层和长期的目标及战略，以便有效地制定和协调付诸实施的各项计划和项目，使其会员主要通过它们的NMHS相互合作，开展各项重点活动，如监测、评估和预报天气、空气质量、气候、海洋状况和全球水循环以及水文气象灾害等。它广义确定了WMO的重点、计划和活动以及它们之间的相互关系，而且为会员及其NMHS提供了明确的指南，指导他们解决各自在气象、水文及相关学科的需求，并寻求将这些科学应用于可持续发展和保护人民生命、财产和资源免受自然灾害和环境危害的影响。

WMO战略计划也反映了历届世界气象大会的协商结果和WMO执行理事会、技术委员会和其他重要机构的贡献，为确保WMO上下步伐一致，重点突出，提供了指南和方向。具体来说，它是制定其运行计划的基础，并支持秘书处及有关的组织机构基于业绩和结果的预算，从而为WMO的战略管理提供保障；可有效指导、协调和激励各会员、执行理事会、区域协会、技术委员会和秘书处的活动；有助于全体会员能力加强，进一步满足社会对天气、气候、水和相关环境信息和服务的需求，以便管理自然风险和促进社会经济发展。

2 总体思路

从2008—2011年战略计划开始，WMO以基于结果的管理（RBM）理念为基础制定战略计划，基于结果的管理原则还用于指导秘书处的计划设计和计划实施管理，这有助于WMO更好地实现其目标宗旨，帮助会员落实各自的可持续计划。WMO战略计划是以其会员确定的需求和优先重点为基础的。首先确定有关目标、战略和预期结果，广泛吸收会员的意见，然后制定一系列的规划文件，最终制定战略计划——提

表1 WMO 2016—2019年战略计划优先重点

序号	重点领域	主要内容
1	减少灾害风险	提高对从热带到极地高影响气象、水文和相关环境灾害的基于影响预报以及多灾种早期预警的准确性和有效性，从而促进减灾、抗灾和防灾方面的国际努力，尤其是应对与增加的人口暴露度相关的风险。
2	全球气候服务框架	通过：1)建立区域气候中心；2)确定用户对气候产品的需求；3)开发气候服务信息系统；4)推进次季节到季节预测技巧等措施，实施GFCS下的气候服务，特别是针对缺乏这类服务的国家和地区。
3	WMO全球综合观测系统	通过WIGOS和WIS的全面实施，加强各全球观测系统，以便对相关地球系统进行稳健、标准化、综合、准确和保质的观测，从而支持WMO的所有优先重点和预期结果。
4	航空气象服务	通过：1)加快实施ICAO/WMO能力与资格标准和质量管理体系；2)应对有关2013—2028年全球空中导航计划的新需求和挑战，特别是关于ICAO组块一升级；3)借助完善服务提供框架的成本回收机制和适当商业模式，加强航空气象服务提供的可持续性和竞争力等措施，提高NMHS的能力，以提供可持续高质量服务，支持全球空中交通管理的安全、高效和正规，并相应考虑环境因素。
5	极地及高山地区	通过：1)全球冰冻圈监视网业务化；2)更好地了解这些地区的变化对全球天气和气候形势的影响；3)推进全球综合极地预测系统下的极地预测等措施，改进极地、高山地区及其他地区的业务气象和水文监测、预测和服务。
6	能力开发	通过发展和改善恰当的人力资源、技术和机构能力及基础设施，加强NMHS完成其使命的能力，特别是发展中国家、最不发达国家和小岛国等。
7	WMO治理	基于对WMO的结构、运行安排和预算编制做法的战略评估，通过采纳持续改进的措施和建议，提高WMO的效率和效果。

注：本表内容主要引自“WMO strategic plan 2016–2019 (WMO–No.1161)”。

出重点、方向和丰富的前景评估信息。

3 内容框架

从历次规划的文本内容可以看出，每期规划的框架结构均有所不同，但正文内容基本包括以下五个方面：

1) 引言。一般从对WMO的展望作简要陈述入手，抓住基本目标和期望。主要重申WMO在维护世界人民的安康和福祉、使各国获得并保持社会经济利益方面所担负的职责，其实质紧扣领导、技术和合作三个方面。WMO的展望作为达成共识的基础，对确定预期结果具有实际意义。例如，2008—2011年战略计划的引言中主要介绍了战略计划的宗旨、为什么要采取行动、WMO是什么组织、战略计划及其背景等；2012—2015年战略计划的引言中阐述了天气、气候和水服务的社会效益、全球社会需求、战略计划的目的和背景、WMO的成就、全球气候服务框架等。新一轮战略计划变化比较大，结构有所调整，无“引言”这一章，而是将上一轮战略引言中的“全球社会需求”作为一章，包含了以往战略中引言部分的相关内容，具体包括背景、可持续发展、国家和地区气象和水文部门的作用、WMO的作用和成绩等内容。

表2 WMO 2016—2019年战略计划的全球社会需求和预期结果

全球社会需求	预期结果
提高对生命财产的保护水平	1.改进服务质量与服务提供 2.减少灾害风险
消除贫困、确保可持续的抗灾生活、粮食安全、水和能源的获取、健康生活、性别平等、经济增长以及抗击气候变化	3.改进资料加工、模拟和预报 4.改进观测和资料交换 5.推进有针对性的研究
可持续利用自然资源并提高环境质量	6.加强能力开发 7.加强伙伴关系 8.提高效率 and 效果

注：本表内容主要引自“WMO strategic plan 2016–2019 (WMO–No.1161)”。

2) 顶层目标。可以说，这是WMO的当务之急。主要对规划流程的结果加以归纳总结，其中对优势与不足以及机遇和挑战做出评估；确定需求、问题和优先重点；制定协商一致的解决办法——战略思考与顶层目标。而且，由于某些能力的发展需要更长的时间提前量，战略思考会以概念的形式拓展到未来，以研究可能影响其目标的社会和技术问题。例如，2004—2011年战略计划提出了9项战略及相关目标，同时，明确了10个重点工作计划；2008—2011年战略计划中“战略思考和顶层目标”为一章，主要从信息和产品质量、提供服务、支持政策及相关的决策三个方面进行重大思考，构成了WMO顶层目标的基础。2012—2015年战略计划和新一轮战略计划没有直接将“战略思考与顶层目标”单列一章，而是将相关内容有机地融入其他部分进行阐述，如在新一轮战略计划中“新的挑战”独立成章。

3) 战略主旨。WMO对各具体需求的响应，包括拟采取行动的战略举措。一般根据战略目标确定大概5项左右战略主旨，例如，2008—2011年战略计划提出5项战略主旨：科技开发和应用、提供服务、能力建设、伙伴关系和有效管理及善政。2012—2015年战略计划提出5项战略主旨：提高服务质量和服务水平；推进科研、应用和技术开发与实施；加强能力建设；建立并加强伙伴关系和合作；加强有效管理和善政。但在新一轮战略计划中没有明确指出战略主旨，只强调7项“优先重点”，并制定一系列与预期相对应以实现这些目标的举措。涉及主要内容详见表1。

4) 预期结果和关键业绩指标。强调财务期内产生的最终结果以及衡量为争取这些结果取得的进展。战略主旨及与预期相对应应以实现这些目标的举措，均已融入结果或成果，称为预期结果，是WMO在规划期

间希望实现的目标。如2004—2011年和2008—2011年战略计划均提出11项；2012—2015年和新一轮战略计划均提出8项，新一轮战略计划的预期结果详见表2。为了指导WMO运行计划的制定和实施，设计了一套与各预期结果相对应的关键业绩指标，以确定更为具体的产品和目标，衡量为实现目标所取得的进展，为采取行动和编制相应的预算奠定基础。关键业绩指标的重点是衡量各项预期结果成功与否。如2008—2011年战略计划中以列表形式给出了与11项预期结果对应的32项具体业绩指标；2012—2015年战略计划在战略主旨章节中对相应的预期结果和关键业绩指标进行了阐述；新一轮战略计划中关键业绩指标都融入在优先重点和预期结果中阐述。

5) 其他相关内容。与以上四部分相对固定的内容不同，根据不同时期的重点关注内容不同，每期都会灵活增加或补充一些相关内容。以近三期的战略计划为例，2008—2011年战略计划主要涉及了监督评估、组织机构、规划流程等内容；2012—2015年战略计划主要涉及了运行计划、预算、监督评估、参考文献等内容；新一轮战略计划主要涉及了影响WMO 2016—2019年优先重点工作的内部和外部因素，优先重点及其预期结果之间的关系，天气、气候、水和相关环境服务的效益等内容。这些涉及的内容一般都是简单概述或以图表及附件（或附录）等形式列出。例如，2008—2011年战略计划有两个附件，新一轮战略计划有两个附录。

4 保障措施

1) 部门分工明确。战略计划将通过计划活动付诸实施，其中，会员（191个）、执行理事会（1个）、技术委员会（8个）、区域协会（6个）和秘书处（1个）分别承担不同的作用和职责，分工明确。会员主要通过运行大部分属于NMHS的国家气象基础设施和相关设施做出各自的贡献，而且还提供专家协助开展WMO的科技活动。执行理事会评估计划的实施进展，提供指导并确定优先重点，以确保可用资金得到最佳利用，并适时采取修正行动。技术委员会确保其负责的计划活动得到实施，将根据科学和技术的进步对其进展进行监督，并在交叉性问题上与其他委员会进行协作。区域协会将监督计划活动在各自区域的实施情况，促进本区域的会员为战略计划的实施做出贡献，特别是在支持区域优先项目方面，也推动区域和次区域的合作。秘书处为计划的实施提供适当的支持，特别是在本组织各机构间的协调方面。

2) 资金保障有力。在计划涵盖的时期，融集财务和其他物质资源是对WMO的一个重要挑战。WMO

抓住每一个机会挖掘潜在的新的捐助渠道和提升已有资源的贡献。其中用于落实战略计划的费用主要来自各会员的国家资金、WMO的正常预算和其他各种预算外资金。国家资金，在全世界已有大量承诺的资金通过双边或多边协议用于支持国家的NMHS及其有关机构的工作。WMO的正常预算，主要来自会员的会费，例如，2016—2019年的预算为2.66亿瑞士法郎，比2012—2015年增加2%；比2004—2007年增加4.8%；比2000—2003年增加5.4%。预算外资金，支持性资金包括UNDP项目预算、WMO自愿合作计划、信托基金、合作项目协议和特别自愿基金等，由这类资金支持的活动通常与正常预算支持的工作计划密切相关。

3) 监督和评估到位。在基于结果的管理中，监督和评估是有助于提高业绩和取得成果的重要工具。执行理事会负责战略计划的监督和评估。年度业绩报告负责对落实战略计划顶层目标取得的进展和所采用的战略举措的针对性进行评估。会员、区域协会、技术委员会和秘书处都须对该过程做出具体的、协调一致的贡献。通过边执行计划边监督其业绩，一般定期地在战略计划实施的中期和末期进行评估，评估对战略规划过程是一个重要支持。WMO运行计划对战略计划的战略主旨和举措进行不间断的监督，它针对在落实预期结果中存在的问题评估实施战略的效果，评估结果可用于调整战略发展方向和需要优先考虑的工作重点。2008—2011年和2012—2015年的战略计划中“监督和评估”均是独立的一章，新一轮战略计划中也提出“WMO运行计划草案给资源调配奠定了基础并确定了风险和绩效测量标准，可使用该标准通过WMO监测和评估系统来评估实现区域结构的进展情况”，可见WMO规划对监督和评估工作的重视。目前，WMO已构建了比较完善的监督和评估体系，明确了监督和评估的程序和规范。

三、WMO战略计划稳步推进的先进经验

1 战略规划体系不断完善，及时调整战略定位

2008—2011年WMO战略计划中就明确了WMO战略规划流程，WMO不是单一的规划，而是比较完善的战略规划体系。新一轮战略计划进程由三个互相关联的关键部分组成，包括系统的战略规划、运行计划、基于结果的预算等；同时，WMO注重开放的评议、监督评估，注重与国际计划和公约结合以及与会员国规划接轨等。以往的战略目标虽然也涉及社会需求，但重点是气象自身的顶层设计。2012—2015年战略计划首次提出“全球社会需求”，这绝不只是术语的变化，而实质上是战略导向的改变。目前，天气、气候、水和环境状况对社会和经济的影响是巨大的，

并在不断加剧，政府、机构与公民对更加有用与更加可靠的信息、产品与服务的需求不断升级。所以，新一轮的战略计划将“全球社会需求”作为第一章内容单独来展开论述，这更加意味着WMO把气象与保护全球人民生命和财产安全、实现联合国千年发展目标、可持续利用自然资源和保护环境紧密联系起来，以满足这三大社会需求来牵引新时期气象事业的发展。

2 气象服务内涵不断丰富，注重用户群体反馈

2012年以前的WMO战略计划的战略主旨中，总是把“气象科技研发和应用”放在首位，从2012年开始，“提高服务质量，改进服务的提供”则作为五项战略主旨之首。2012—2015年WMO战略计划强调在服务提供方面，与用户群体进行互动是成功的关键，如开放对全球天气、水体和气候相关资料的访问，开放对知识和影响类产品和服务的获取。当前，气象服务呈现出服务概念更深刻、内涵更丰富、涉及面更广、与经济社会重点领域的对接更聚焦的时代特征。新一轮战略计划的七个优先重点中有三个是直接关于气象服务的内容，分别是“降低高影响灾害风险服务”、“全球气候服务框架”和“航空气象服务”；明确指出，在未来的研究重点中的高影响天气、季节至次季节预报、极地预测和城市气象，可作为有助于改进业务服务提供的措施。可见，气象服务已成为新时期气象事业发展的重中之重，气象服务整体战略的实施将推动并指导各国气象和水文部门为公众和决策者更好地提供与天气、气候、水和环境有关的各项气象服务。

3 重点领域更加优先发展，促进气象科技创新

在以往的WMO战略计划中，只是在战略主旨和预期结果中提出了若干业绩指标，没有明确战略优先重点领域。2012—2015年战略计划则提炼了气候服务，减轻灾害风险，航空气象服务，极地气象，全球综合观测系统和信息系统，发展中国家、最不发达国家和地区的能力建设等战略优先重点；新一轮战略计划则勾画了2015年后WMO的全球议程的优先次序，7项优先重点详见表1，同时也对城市气象和海洋天气活动给予了更多的关注。可见，WMO对世界范围加强应对气候变化、防灾减灾和气象服务，促进气象科技创新和推进气象现代化建设给出了鲜明的导向。

4 自身能力建设不断加强，提升气象服务效益

WMO战略主旨早在2008年以来就明确了“能力（开发）建设”和“加强有效管理和善政”两项，新一轮战略计划优先重点中也再次明确了“能力开发”和“WMO的治理”。WMO一直就注重自身能力发展，提高NMHS的能力，特别是发展中国家、最不发达国家和地区，使他们能够履行各自的职责。同时，

WMO战略计划越来越注重服务的社会、经济和环境效益的提升，2012—2015年战略计划将“天气、气候和水服务的社会效益”内容作为开篇，而新一轮战略计划则是将有关内容作为附录单列，可见对相关内容更加注重。WMO未来在注重自身能力建设的同时，将坚持发展速度和质量效益的有机统一，努力实现速度和效益同步增长。

5 组织管理科学更加有效，强调合作伙伴关系

如果没有与合作伙伴积极建立关系，决策者和专家便无法利用全方位的信息和服务，因而会削弱其社会效益。2008年以来，“建立伙伴关系，并加强合作”就是WMO战略计划中五项战略主旨之一，与国际机构、其他组织、学术界、媒体和私人部门合作，扩大重要环境信息和服务的范围并提高服务质量为主要内容。新一轮WMO战略计划中继续强调“新建伙伴关系并加强活动”，旨在改进NMHS服务提供绩效，并提高WMO在联合国系统、相关区域组织、有关国际公约和各国战略中所贡献的价值。

四、对我国气象事业发展战略的启示

1 战略研究和顶层设计

WMO战略计划从某种意义上讲就是新时期气象现代化的总体规划。WMO战略计划围绕全球社会需求，确立战略主旨、预期结果、战略优先重点领域和一批重大科技计划，实际上就是新时期在全球推进气象现代化的蓝图。就我国气象现代化而言，2006年，国务院印发了《关于加快气象事业发展的若干意见》（国发〔2006〕3号文件），就是对气象现代化的顶层设计，为我国气象事业发展指明了方向。目前中国气象局发展研究中心成立了战略研究室，局党组对战略研究的重视也可见一斑。建议我国气象部门强化气象相关智库建设，有效提高战略研究能力。加强对气象现代化的顶层设计，加强发展改革的统筹力度，对气象事业发展的各个层面、当前目标和长远目标、气象行业内部和其他行业、需求和适应等方面进行全盘考虑，统筹规划，特别加强对5年规划和专项规划的指导。

2 规划编制和实施监督

编制和实施规划对实现行业部门的战略目标，有效配置资源，促进行业共同进步等具有十分重要的意义和作用。WMO战略规划流程呈现了其规划工作的系统、完善性。当前，我国规划编制和实施的体制环境已发生较大变化，新时期规划的性质和作用也与“十五”之前有所不同，国家和行业部门的规划体系在不断完善，就气象规划体系而言，中长期战略规划、年度计划以及评估监督体系是其短板。建议我国

气象部门加强和完善气象事业发展中长期规划的定常化、规范化,并根据形势的发展和工作的进展滚动修订;增设年度计划,以年度计划落实5年规划和中长期规划,并以年度计划指导年度预算,加强规划、计划与预算的衔接;健全评估监督体系,完善战略规划制定和评估流程,对规划、计划和项目执行情况进行监督和评估,提供年度和专项评估报告。

3 科技引领和创新驱动

发达国家近年来借助高性能计算机及其网络技术,气象现代化呈加速发展趋势。在WMO战略计划中,把科技创新作为事业发展的引擎和基石,围绕战略目标提炼了系统的科技计划,而且特别注重原始创新和科技成果在业务发展中的应用。目前我国已制定了中长期科技发展规划,气象部门应不失时机地制定气象科技中长期发展规划。建议我国气象部门要瞄准国际先进水平,强化气象科技引领发展,深入实施国家气象科技创新工程,着力实现气象科技重大核心技术的突破。既注重发挥科技在全面创新中的引领作用,又注重气象发展理念、方式、模式和制度创新,全面部署原始创新、集成创新和引进吸收再创新,强调“从业务中来,到业务中去”的科研导向,统筹集约地设计系列重大科技计划,进一步充分发挥多种现代科学技术在天气预报等技术中的综合应用水平,提高气象现代化的整体效益。

4 社会管理和公共服务

在WMO战略计划中,强调决策者、利益相关者要参与气象决策和服务,各国气象部门要加强国家、区域、局地相关的社会管理。同时,强调“提高服务质量和水平”,已将其自身的发展融入了社会经济的发展,把公共服务工作放在了前所未有的重要位置,并制定了长远发展的方针和措施。中国气象局公共气象服务中心于2008年5月挂牌成立,目前从国家到31个省(自治区、直辖市)气象部门都有公共气象服务中心或气象服务中心,公共气象服务的社会满意度不断提高。2012年,中国气象局出台了《中共中国气象局党组关于推进县级气象机构综合改革的指导意见》,进一步强化了我国气象公共服务和社会管理职能。建议我国气象部门依法明确气象社会管理的职责和职权,界定政府、部门和社会气象管理的分工,健全气象社会管理法规和标准,完善气象社会管理的体制和机制,统筹规划公共气象服务与气象社会管理工作。同时,应建立并完善与社会主义市场经济体制相适应的现代化气象服务体系。制定公共气象服务的长远规划,引导将公共气象服务纳入各级政府相关发展规划中;加强和拓展基本公共气象服务,逐步放开非

基本公共气象服务;拓展水文(流域)、海洋、环境等专业气象服务的领域。

5 开放发展和合作共赢

WMO本身就是多国成员构成的联合国下属组织,所以一直非常注重国际合作,重视发挥合作伙伴的作用,使会员和合作组织在决策和实施中更广泛地利用天气、气候和水产品。WMO开放合作的工作模式有很多优势值得我们借鉴学习。改革开放以来,气象部门在我国各行各业中始终处于开放发展的“前列”,最早广泛开展与国际组织、国家和地区的双边和多边气象科技合作,引进国外先进技术,大量送培气象科技人才,大大提高了我国气象的国际地位。建议气象部门继续坚持开放发展,拓展气象发展新空间;积极融入国家开放发展新布局,主动服务国家战略需求,整合和合理配置行业资源,完善全行业、跨部门的互动合作机制;扩大对外开放与深化改革互动,加强完善全方位、宽领域、多层次、合作共赢的气象国际交流与合作格局,为全面建成小康社会提供优质气象保障。

五、结语

中国气象局积极参与了WMO的各项活动,有力促进了国内气象工作的开展。本文及时跟踪研究WMO战略计划的发展动态,深入了解和借鉴国际气象相关领域在重大规划方面的先进经验,准确把握了未来国际气象发展的战略重点和优先领域,提出了我国气象事业发展战略启示,为中国气象局及国内相关领域的研究学者及时地提供可靠的情报和信息,为气象事业科学发展提供有力支撑。

致谢:感谢中国气象局气象软科学面上研究项目([2015]M32号)、中国气象局气象软科学研究自主申报项目([2016]M21号)对本文的资助。

深入阅读

- WMO. 2015. Draft WMO strategic plan 2016-2019. Geneva: the 17th World Meteorological Congress.
- WMO. 2000. WMO long-term planning: past, present and future. WMO Bulletin, 49: 50-55.
- 陈正洪, 杨桂芳. 2014. 我国气象规划的历史回溯与启示. 阅江学刊, (4): 29-35.
- 汤绪. 2014. 气象服务发展框架、方向与青年人的参与基于气象服务相关战略及计划的分析与思考. 气象, 40(3): 261-268.
- 王守荣, 申丹娜, 刘冬. 2012. WMO和NOAA战略规划解析. 气象软科学, (1): 84-94.
- 袁凤杰, 王金星. 2001. WMO的长期计划. 气象科技, 29(1): 15-18.

(作者单位: 陈鹏飞、朱玉洁, 中国气象局发展研究中心; 陈正洪, 中国气象局气象干部培训学院)

高被引论文选编

“北极涛动/ENSO”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2014—2015年

目前的北极放大效应和中纬度极端天气——Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, 2014, Vol. 7, No. 9.

北极放大效应，是指近几十年北极的变暖趋势比全球平均变暖趋势的两倍还要多。快速的北极变暖已经导致北极海冰和春季雪覆盖的大量消融，这种消融幅度比气候模式的模拟结果要大。北极气候系统的这些变化几乎与北半球中纬度地区更加频繁的极端天气事件（包括寒冷的冬季）同时发生。美国大气与环境研究公司（AER）的Cohen等根据以往研究，汇总指出了将北极放大效应与中纬度天气联系在一起的三种潜在的动力途径：北大西洋风暴路径的变化、极地急流特征的变化、触发异常行星波配置的对流层环流的区域变化。然而，对于高纬度气候变化如何影响这些现象依然缺乏足够了解，再加上稀疏的、短时间的数据记录，以及模式的局限性，这都使得北极放大影响究竟在多大程度上影响了中纬度天气保持了很大的不确定性。

北极海冰减少对天气和气候的影响综述——Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review. *Surveys in Geophysics*, 2014, Vol. 35, No. 5.

近几十年来，北冰洋和近海的海冰面积、密度和厚度明显地下降，但寒冷、多雪的冬季自2005年以来在中纬度地区非常常见。为此，芬兰气象研究所的Vihma综述了海冰减少对天气和气候的局地及遥相关影响。显然，海冰的减少增加了秋季和早冬季节从海洋到大气的热通量。这已经导致当地的气温、湿度和云量有所增加，减少了对流层低层的静力稳定度。一

些基于观测、大气再分析和模式试验的研究表明，海冰减少与欧亚大陆积雪的增加导致环流模式类似于北大西洋涛动（NAO）和北极涛动（AO）的负位相。这暗示着大尺度气压型包括欧亚大陆高压的发生，它有利于欧洲和欧亚大陆东北部寒冬的发生。同时也暗示了北美西部的高压和北美东部的低压的发生，这会促进北极气团向北美洲的平流。然而，中纬度冬季天气受到其他一些因素的影响，这些因素具有很大的年际变率，经常掩盖海冰减少的影响。另外，在海冰大量减少的少数年份里，区分海冰状况的直接影响变得非常困难。一些研究表明，随着全球变暖的发展，中纬度大陆的寒冬在21世纪中叶变得不再常见。近来的研究也表明，海冰减少与欧洲、地中海和东亚地区的夏季降水有着因果关系。

气候模式（从CMIP3到CMIP5）对ENSO的表现能力——ENSO representation in climate models: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 2014, Vol. 42, No. 7.

法国IPSL的Bellenger等分析了CMIP3和CMIP5中的全球海气耦合模式（CGCMs）对热带太平洋平均态和厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）的模拟能力。CMIP5多模式集合虽然对于西太平洋普遍偏冷的误差减少了30%，但与CMIP3相比，在ENSO方面没有出现重大突破。因此，CMIP3和CMIP5可以被看作一个大的集合（CMIP3 + CMIP5）进行多模式的ENSO分析。CMIP3模拟的ENSO振幅的较大差异在CMIP5集合中减少了50%，并且ENSO生命周期（表层温度反常区域的位置，ENSO季节锁相）也有所改善。其他ENSO的基本

特征，例如中太平洋降水偏差依然表现的很差。海表温度（SST）—潜热通量反馈在CMIP5集合中略有改进，但风—SST反馈仍然被低估了20%~50%，短波—SST反馈被低估了50%。因此，ENSO振幅的改进可能由于误差补偿引起。CMIP模式模拟SST—短波反馈的能力是CGCMs中ENSO模拟误差的主要来源。在观测中，该反馈是强烈非线性的，因为真实大气在年内和年际变化的影响下存在从下沉（正反馈）到对流（负反馈）的转变。仅1/3的CMIP3+CMIP5模式能重现这种转变。模拟的短波反馈的非线性随着ENSO振幅的增加而上升，并且该反馈的振幅在春季与模式模拟ENSO季节锁相的能力密切相关。最后，为了综合CMIP3和CMIP5每一个模式模拟ENSO主要特征和关键大气反馈的能力，本研究提出了一系列指标。

El Niño-La Niña循环和近来陆地蒸发的趋势——El Niño-La Niña cycle and recent trends in continental evaporation. *Nature Climate Change*, 2014, Vol. 4, No. 2.

响应于全球变暖，水循环被认为有所增强。然而，全球尺度上，几乎没有明确的证据来证明这一点，尤其是代表了从地面到大气的水分输送的陆地蒸发过程。英国布里斯托大学的Miralles等使用卫星观测揭示了北半球的陆地蒸发在增加，速率与由温度趋势计算得到的相一致。然而，全球尺度上，厄尔尼诺/南方涛动（ENSO）主导着年代际变率。厄尔尼诺发生时，陆地水分供应短缺导致澳大利亚东部和中部、非洲南部和南美洲东部的植被水分胁迫和蒸发减少。相反的情况发生在拉尼娜年。研究表明，近年来全球平均陆地蒸发的减少反映了向厄尔尼诺年的过渡，这不是陆地水循环固有的再分配的结果。陆地蒸发将来的变化将由ENSO对全球辐射强迫变化的响应所决定，而对于该问题仍然具有很大的不确定性。

近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因——《大气科学》2014年第38卷第4期

吕俊梅等利用测站降水观测资料分析过去一百多年中国东部华北、长江流域以及华南夏季降水的年代际变化特征发现, 尽管这三个地区的夏季降水具有不同的年代际转折时期, 但是均同时在1910年代初期、1920年代初期、1940年代中期、1960年代中期、1970年代末期以及1990年代初期发生了跃变。近一百年间不同年代际时期东部夏季降水的分布型主要以南正北负或者南负北正的偶极型为主, 并且无论是偶极型分布还是三极型分布, 两个相邻年代际时期中国东部降水分布型发生完全反向变化的概率较高(60%)。此外, 夏季的PDO、冬季的AO以及春季的北极海冰也同时在1920年代末期、1940年代中期、1970年代末期以及1990年代中期左右发生了跃变, 这几次跃变时期与中国东部三个不同地区夏季降水发生跃变的时期一致, 表现出近百年来太平洋年代振荡(PDO)、北极涛动(AO)以及北极海冰这三个因子对中国东部夏季降水年代际变化的协同作用。在年代际时间尺度上, 夏季的PDO与华北夏季降水显著负相关。PDO的年代际变化能够在500hPa位势高度场中激发出太平洋—日本(PJ)型年代际遥相关波列; 同时在850hPa风场中激发出类似于影响华北夏季降水年代际变化的大气环流型, 从而影响华北降水的年代际变化。冬半年的AO与长江流域夏季降水存在显著正相关关系。冬季到春季正位相的AO导致亚洲大陆南部处于湿冷状态, 土壤湿度的记忆性可将这种状态延续到夏季。因此, 夏季海陆热力对比减弱, 东亚夏季风发生年代际减弱, 相应地长江流域的降水年代际增多。春季北极海冰与华南夏季降水显著负相关, 北极海冰的年代际异常能在500hPa位势高度场中激发出与静止Rossby波异常传播相联系的欧亚—华南年代际遥相关波列, 从而影响华南降水的年代际变化。

甘肃临夏地区过去195年最高温度历史重建——基于紫果云杉树轮宽度资料——《第四纪研究》2014年第34卷第6期

任军莉等通过对甘肃临夏松鸣岩地区紫果云杉树轮宽度的分析, 发现研究区树轮标准宽度年表与降水、PDSI相关低, 而与当地3—10月平均最高温度(3—10月月平均最高温度的算术平均值)相关最高($r=0.578$, $p<0.0001$, $n=62$)。在此基础上, 利用多元回归技术设计转换方程, 重建了研究区1818年以来3—10月平均最高温度, 重建序列的方差解释量达40% (调整自由度后为38%)。重建序列中高温年与低温年的年份大致相当, 分别为14.9%和12.9%; 重建时段可以分为4个温暖期(1818—1854年、1882—1900年、1937—1966年和2001—2012年)和3个寒冷期(1855—1881年、1901—1936年和1967—2000年), 可与秦岭西部的温度重建结果进行良好的对比; 研究区在20世纪后期(2001—2012年平均最高温度比1970—1980年平均最高温度)有明显的升温趋势, 上升0.77℃。空间分析表明, 临夏地区3—10月平均最高气温变化具有一定的空间代表性, 可以反映黄土高原西部地区气温的历史变化。功率谱分析(MTM)检测出该重建序列在过去195年中存在42.74a, 7.79~3.18a和2.77a的准周期震荡, 可能与PDO和ENSO大尺度海洋耦合作用有关。

基于SPEI的西南地区近53a干旱时空特征分析——《自然资源学报》2014年第29卷第6期

王东等基于标准化降水蒸散指数(SPEI), 统计分析西南地区128个测站1960—2012年的气象数据, 从干旱年际变化趋势、四季变化趋势、干旱强度、干旱事件频次、干旱频率以及与ENSO的关系, 对西南地区近半个世纪的干旱时空特征进行了分析。结果表明: 1) 西南地区及子区域近53a来呈干旱化趋势, 21世纪初干旱发生最频繁, 干旱强度、极端干旱及中等

干旱的频次均呈增加趋势。2) 四季大部分区域呈干旱化趋势, 以秋季最为突出。3) 春季, 干旱发生频率最高且集中在横断山地、四川盆地东部和云贵高原中部; 夏季, 横断山地北部、若尔盖高原和广西丘陵西北部易发生干旱; 秋季, 云贵高原、广西丘陵及四川盆地部分区域干旱频率较高; 冬季, 干旱易发区集中在若尔盖高原、四川盆地西南部一线。4) 各区域四季的干旱指数与ENSO指数相关性不同, 并且ENSO事件强度与四川盆地和横断山地的SPEI在年变化趋势方面存在明显负相关, 与其他区域呈正相关。此外, 西南地区在厄尔尼诺年和拉尼娜年都会出现干旱, 但前者爆发干旱灾害的概率比后者高。而且各区域存在差异, 四川盆地、若尔盖高原在厄尔尼诺年易发生干旱, 而云贵高原在拉尼娜年发生频率较高, 广西丘陵、横断山地没有明显规律和特征。

2013年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响——《气象》2014年第40卷第4期

司东等对2013年海洋和大气环流异常特征进行分析, 讨论这些异常特征对中国气温和降水的主要影响。结果表明: 2012/2013年冬季, 北极涛动持续维持负位相, 500hPa位势高度场上, 欧亚大陆中高纬环流呈“两槽一脊”的环流形势, 乌拉尔山的高压脊持续偏强, 而东亚槽也异常偏强, 导致全国平均气温较常年同期偏低。季内, 西伯利亚高压强度变化显著, 与之相对应, 我国气温季内阶段性变化大, 前冬冷、后冬暖。进一步研究表明, 前秋北极海冰的大幅偏少是造成东亚冬季风偏强的重要原因。2013年冬季至夏季, 赤道中东太平洋海温异常偏低而海洋性大陆至西太平洋海温异常偏高, 受此影响, 夏季西太平洋副热带高压位置明显偏北, 导致我国北方夏季多雨。与此同时, 受西太平洋副热带高压下沉气流的控制, 我国南方大部高温持续。2013年南海夏季风爆发偏早两候, 结束偏晚4候, 强度偏弱。

编辑选编

亚洲的气溶胶和季风气候交互
——Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Reviews of Geophysics*, 2016, in press.

日益严重的干旱/洪涝灾害和气溶胶增加导致的空气质量恶化,是居住有60%世界人口的亚洲季风区所面临的两个最严重威胁。过去十年里,大量研究已经关注了气溶胶对亚洲季风天气和气候产生的影响。基于此,美国马里兰大学的李占清等对亚洲气溶胶、季风及其相互作用进行了综述。亚洲季风区是多种人为和自然气溶胶的一个主要源地。气溶胶的分布与天气和气候条件相互影响。在大陆尺度上,气溶胶减少了地表太阳辐射,减弱了海陆热力差异,因而抑制了季风的发展。在局地尺度上,气溶胶辐射效应改变了低层大气的热力学稳定性和对流潜力,导致温度降低、大气稳定度增加,并削弱了风和大气环流。亚洲季风区的吸收气溶胶(如黑碳和沙尘)还可能诱发动力反馈过程,从而加强早期的季风,并影响季风的后续演进。以往研究已经提出了关于气溶胶如何调节不同季风气候变量的振幅、频率、强度和阶段的很多机制。在一种关于气溶胶与季风相互作用的新的模式中,天然气溶胶(如沙尘、生物质燃烧产生的黑碳和植被生物气溶胶)被认为是气溶胶季风气候系统的一种内在组成部分,受到全球变暖、人为气溶胶、土地利用变化等外来强迫的影响。

全新世晚期的气候:自然的还是人为的?——Late Holocene climate: Natural or anthropogenic? *Reviews of Geophysics*, 2016, Vol. 54, No. 1.

十多年来,科学家一直在争论当前间冰期的温暖气候是自然变率还是人为引起的。确切来说,关于

全新世的气候变暖,目前有两种观点:一种认为工业化前全新世的温暖气候源于自然因素,地球轨道变化仍然没有导致地球进入一个新的冰期状态;另一种认为早期农业活动释放的温室气体在很大程度上影响了地球气候系统。美国弗吉尼亚大学的Ruddiman等总结了一些新的证据,以检验这两种观点。他们主要通过对比全新世晚期和上一个间冰期期间的一些响应差异,以评价全新世晚期的响应是否看起来是不同的(因而,可认为是人为因素)或者是相似的(自然因素)。对比结果显示出了一些异常信号(人为因素),主要是 CO_2 、 CH_4 、 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的趋势变化体现了全新世晚期的异常。另外,研究指出一些反映早期人为温室气体释放的古生态学和考古学证据记录了与冰芯人为异常一致的相当大的早期人为排放量。

基于贝叶斯模型平均方法重建区域平均气候:以中国云贵高原的温度重建为例——Reconstruct regional mean climate with Bayesian model averaging: a case study for temperature reconstruction in the Yunnan-Guizhou Plateau, China. *Journal of Climate*, 2016, Vol. 29, No. 14.

区域平均气候可以反映一个地区的平均气候特征。在全球气候变暖的背景下,不同区域的平均气候存在不同的变化趋势。认识长期的区域气候变化有助于了解该区域气候的低频变化趋势。重建过去的长期区域平均气候变化对于认识区域气候变化特征具有重要意义。树木年轮是重要的过去气候变化的代用资料。基于年轮可以重建出长期的逐年气候变化特征。然而,利用年轮重建区域平均气候时,一般利用将该区域所有样点的数据平均或者主成分分析的方式进行。利用平均方法可以基于年轮重建部分区域的平均气候,然而并不是在很多区域利用年轮平均的方式都能达到重建气候的阈值。同时,主成分方法处

理的是年轮信号,不能反映年轮和气候之间的关系。为了克服上述方法的缺陷,沈阳农业大学的张先亮等利用贝叶斯模型平均方法将各个样点的年轮样本,根据其气候的关系进行加权平均,得到重建的区域平均气候变化,并以云贵高原的树木样本为例进行了说明。研究发现,基于云贵高原所有采样点的年轮平均值无法进行区域气候的重建,而利用贝叶斯平均方法可以重建出过去400年的温度变化特征。因此,贝叶斯平均方法能很好地为各个年轮样本加权以重建区域平均气候。

过去30年(1982—2012年)全球陆表物候的变化——Variability and evolution of global land surface phenology over the past three decades (1982–2012). *Global Change Biology*, 2016, Vol. 22, No. 4.

检测地表物候对于理解生态系统对气候系统的响应和反馈、以及在陆地生物圈模型中准确地描述它们具有重要意义。而且,通过识别不同尺度上的物候趋势,有可能弥补传统的基于点的物候观测和大尺度全球模型之间的差异。瑞士苏黎世大学的Garonna等以生长季长度、生长开始期和结束期为评价指标,分析了全球过去30年卫星反演的植被物候变化特征。结果发现,1982—2012年,全球生长季长度(GSL)平均延长了0.22~0.34d/a,不过空间差异明显。全球陆地区域的13%~19%显示出了显著的GSL变化,其中的30%发生在北半球北方森林和高山地区(boreal/alpine biome),在这个群系中,“寒冷、中等湿度”环境带的GSL变化又最为显著。研究进一步分析了生长开始期和结束期改变对GSL变化的影响,发现生长结束期变化的贡献普遍要强于生长开始期。这些发现为识别植被物候变化的驱动因子、从而改善陆地生物圈模型提供了必要信息。

ENSO冷暖位相影响东亚冬季风与东亚夏季风联系的非对称性——《大气科学》2016年第40卷第4期

东亚冬季风 (East Asian Winter Monsoon, 简称EAWM) 和东亚夏季风 (East Asian Summer Monsoon, 简称EASM) 作为东亚季风系统的两个组成部分, 它们之间存在显著的转换关系。前人的研究表明EAWM与次年EASM的转换关系只有在ENSO事件发生时才显著, 然而这些研究都是基于ENSO对大气环流的影响是对称的这一假设下进行的。徐需强等的研究表明EAWM和次年EASM的转换关系在ENSO冷暖事件存在着明显的不对称性。通过将EAWM分为与ENSO有关的部分 (EAWM_{EN}) 和与ENSO无关的部分 (EAWM_{RES}), 发现在强EAWM_{EN}年 (即La Niña年), 在西北太平洋会存在一个从冬季维持到次年夏季的气旋性环流异常 (the anomalous western North Pacific Cyclone, WNPC), 从而造成EASM偏弱; 而在弱EAWM_{EN}年 (即El Niño年时), 在西北太平洋会存在一个从冬季维持到次年夏季的反气旋性环流异常 (the anomalous western North Pacific anticyclone, WNPAC), 从而引起次年EASM偏强。比较而言, WNPAC的位置比WNPC的位置偏南, 且强度更强, 因而在El Niño年能够引起次年EASM更大幅度的增强。造成这一不对称联系的主要原因是热带太平洋和印度洋异常海温的演变差异。在强EAWM_{EN}年, 热带太平洋的负海温异常衰减地较慢, 使得在次年夏季仍然维持着显著的负异常海温; 相反, 在弱EAWM_{EN}年, 热带太平洋的正海温异常衰减地较快, 以至于在次年夏季的异常海温信号已经基本消失, 但此时印度洋却有着显著的暖海温异常。海温演变的差异进一步造成了大气环流的差异, 从而导致EAWM与次年EASM联系的不对称性。

GlobeLand30地表数据对北京气候中心气候模式的影响——《中国科学 (地球科学)》2016年第46卷第9期

地表覆盖是陆面及气候模式中的重要基础变量, 其数据质量对气

候模式性能有显著影响。史学丽等基于一套中国自主研发的全球30m地表覆盖数据 (GlobeLand30), 利用北京气候中心气候系统模式 (Beijing Climate Center Climate System Model, BCC_CSM) 中的陆面过程和大气环流分量模式, 开展GlobeLand30数据对气候模式性能影响的研究。首先通过GlobeLand30和其他卫星遥感等辅助数据融合细化植被功能型 (Plant Function Type, PFT) 类型数据满足BCC_CSM模式需求, 然后利用基于面积比例的升尺度方法得到适合于全球模式的不同覆盖类型及其面积百分比数据。GlobeLand30与模式原有覆盖数据都能合理描述全球地表覆盖基本分布特征, 但也存在一定差异, 其中植被PFT类型的差别最明显。通过数值模拟试验全面评估GlobeLand30数据对模式结果的影响, 结果表明在BCC_CSM的陆面模式和大气模式中采用GlobeLand30数据可以合理再现陆面与大气的本气候特征; 更新植被PFT数据的气候效应大于更新冰川和水体类型, 综合更新所有覆盖类型数据对模拟结果的影响最大。引入GlobeLand30数据可降低BCC_CSM大气模式对北半球中高纬地区降水的正偏差和南美亚马逊等地区模拟降水的负偏差, 以及南半球部分地区大气温度模拟的负偏差, 因此GlobeLand30数据适用于BCC_CSM分量模式并对改善模式性能有正贡献。

基于WRF模式的青藏高原斜坡和平台加热影响亚洲夏季风的模拟研究——《地球物理学报》2016年第59卷第9期

青藏高原大地形的热力强迫作用对亚洲夏季风的形成和发展具有重要的影响。王子谦等利用较高分辨率的WRF区域模式, 探讨了高原不同区域 (斜坡和平台) 的地形加热分别对南亚夏季风和东亚夏季风的影响。结果表明: 高原南部喜马拉雅山脉的斜坡地形加热对其周围局地的环流形势和降水影响十分明显, 是南亚夏季风北支分量形成和维持的主导因子, 也是斜坡上气流爬坡和降水发生的必要

条件。斜坡加热对东亚夏季风也有明显的增强作用, 它不仅加强了我国东部低空西南季风环流, 还会造成北部南下的异常干冷空气的响应。斜坡上的地形加热作用也是对流层高层暖中心位置维持在斜坡上空的一个重要原因。而高原平台加热对季风环流和降水的影响虽然没有喜马拉雅山脉斜坡加热那么显著, 但是对南亚夏季风的影响范围更广, 对经向哈得来环流影响更明显, 能够调控高原以外更远处热带洋面上的西南季风环流。通过比较高原不同区域地形加热条件下的多种季风指数, 进一步表明了高原地形加热对南亚和东亚夏季风均有增强作用, 但是高原不同区域的地形加热对两类夏季风子系统又会产生不一样的影响。

中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究——《气象学报》2016年第74卷第4期

景丞等基于中国1960—2014年771个气象站的逐日降水资料, 选取有效降水序列95百分位数作为极端降水阈值, 将既定持续时间尺度和连续面积上超过阈值的降水事件定义为区域性极端降水事件。采用强度—面积—持续时间 (Intensity-Area-Duration, IAD) 法, 根据极端降水事件空间和时间上的连续性特征, 对不同持续时间的区域性极端降水事件演变趋势及暴露于极端降水事件下的人口和国内生产总值进行研究。结果表明: 1) 相对强度最大的区域性极端降水事件主要集中在1960—1968、1991—1999和2006—2013年3个时段; 2) 区域性极端降水事件最强中心主要分布在长江以南和东北地区, 发生在北方的多为单日极端降水, 南方多为持续多日的极端降水; 3) 1960—2014年区域性极端降水事件影响面积有所增大, 相对强度变化不明显; 4) 暴露于极端降水事件影响区域内的人口和国内生产总值均呈显著增大趋势, 暴露人口最多的年份在1983年, 达到2408万人/d, 暴露国内生产总值最多的年份在1998年, 达到20亿元/d。

国民政府时期的福建气象业务进展

气象史料挖掘与研究工程项目组^①

一、创立

1933年，福建省教育厅聘请东北大学教授赵修乾筹办福建省立科学馆。同年10月23日，福建省立科学馆在福州成立，该馆隶属省教育厅，内设生物学部、物理学部、化学部和地质矿物学部。赵修乾命其研究生林龚谋

（时任物理学部指导员）筹建福建省立科学馆福州测候机构，1934年^②，福建省立科学馆测候室正式成立，隶属于物理学部，1935年8月1日改称省立福州测候所^③，是政府举办测候机构之始。

抗战之前，共设立福州（1934年7月，图1）、南平（1935年7月）、浦城（1935年12月）、长汀（1936年1月）和福安（1937年4月）等5个测候所。由福州测候所负责审核全省四个测候所的地面观测月总簿（始于1936年）。

图1 1934年7月福建省立科学馆测候所观测记录，这是福建省现存最早的气象观测记录

二、抗战时期

1937年“七七事变”，日本悍然发动全面侵华战争。淞沪抗战失败，日本人占领上海后，很快就占领了浙闽沿海一些城市。地处福建省中部偏西山区的永安，



福建是全国最早在报纸上发布天气预报的省份。那时候，利用电台接收“全球天气形势预报”，福建省气象局预报科接收下这些英文数据后翻译成中文，画天气图，分析天气形势，得出预报结论。

交通不方便，日本人不容易打进去，所以当时福建的省会就从福州搬到了永安。其时，福建省立科学馆内迁沙县。1938年春^④，省立福州测候所也迁到永安县，同年夏改名为福建省会测候所，同年11月又改名为福建省测候总所，由陈遵鼐任负责人^⑤。同年10月，永安测候所在茅坪建立后，即着手气象测报工作。1939年4月，福建省测候总所改名为福建省气象局，隶属福建省建设厅，石延汉就任局长。

据陈遵鼐^⑥回忆，气象局位于永安县城关羲和山上，几座木头房子，包括了办公与生活区。虽然房子不多，但在抗战时期已经算是不错的了。最难能可贵的是，气象局还设有一个几十平方米的图书馆，桌椅齐全，并专门雇有一个人管理图书馆。石延汉很重视学术，图书馆里收藏的除了气象书籍外还有天文、农业方面的，也有很多大学教材。从某种意义上说，当时的气象局也像是一个学术机构，让年轻人有机会学习各方面的知识^⑦。

当时，全国只有福建省才有“气象局”这个名词，福建成为了全国第一个设立气象局的省份。整个局有职员50余人，下设总务、技术（后改测政、气象）、天文、统计等组，机构在当时算是相当庞大。其中，气象组后扩大改为气象课，负责全省测候所建立的计划、所址勘定，人员培训、调动及管理，仪器的购置配备和保管等。统计室负责各测候所资料和全省雨量站雨量记录的审核、整理、上送及出版。

气象局成立后，业务快速发展，增设了邵武（1939年1月）、沙县（1939年3月）、连城（1939年7月）、龙岩（1939年10月）、闽清（1940年1月）、建阳（1940年

① 执笔：陈云峰。

② 《福建气象志》为1935年，但据福建省立科学馆气象观测记录上记载的日期推断应为1934年。

③ 福建省立科学馆。福建省立科学馆工作简报，1936。

④ 测候所迁永安具体时间未见详细记载，作者由《福州市志》记载推断不晚于1938年5月，当为春天。见《福州市志》之“六、国民党办的期刊”。

⑤ 诸仁海。福建近代气象史概述//王世平。中国近代气象史资料。北京：气象出版社，1995。

⑥ 陈遵鼐先生出生于1927年，为陈遵民堂弟。1944年7月，刚刚初中毕业的陈遵鼐到福建省气象局气象课当技术生。1944年10月，被选入美国空军第十四航空队第十测候队与福建省气象局合办的气象测报训练班培训，随后分往浙江省云和测候所当观测员，为美“飞虎队”轰炸日本的航行作气象保障服务。

⑦ 见陈遵鼐研究报告。

10月)、崇安(1940年11月)、漳州(1941年4月)、莆田前沁(1941年9月)、东山(1941年11月)、惠安山腰(1944年5月)、福鼎(1945年8月)等测候所。其中永安为一等测候所,福州、南平、浦城、长汀为二等测候所,其余为三等测候所。

一等测候所观测员为2~4人,观测时间为06—21时,每日观测16次。夜间22时—次日05时,由21和06时实测值与自记值比较后求等差级数,订正于自记值做24次记录进行统计。各种报表不下10余种。观测项目有气压、气温、雨量、日照、蒸发、地面温度、地中温度、风向、风速、云状、云向、云速、能见度和天气现象等。二等测候所设观测员2人(其中1人为主任兼观测),观测项目、次数、统计报表等都与一等所相同。三等测候所只有观测员1人,每天只做06、14和21时三次观测,统计报表比较简单。一等所仪器有水银气压表、空盒自计气压计、干湿球温度表、最高最低温度表、自记温度计、自记湿度计、雨量器、虹吸管自记雨量计、大小蒸发器、风向器、达因自记风速计、测云杆、测云镜、康氏日照计、约氏日照计和垂链式地温表等;二等所仪器设备略少于一等所;三等所只配基本仪器,没有自记仪器。

民国时期,福建省气象人员分为高级、中级和初级三个档次。中、高级气象人员多数来自外省沦陷区,少数来自大学毕业生,初级人员除一部分来自厦门集美航海水产学校的毕业生外,大部分来自两种渠道,一是气象部门内部培训,二是由“福建省地方行政干部训练团”设班训练出的具有高、初中文化程度的社会青年。凡大学毕业或虽非大学毕业却有较长技术经历者为技士,技士上一级技术人员称为技正,从“福建省地方行政干部训练团”毕业的人员,具有高中文化程度的称技佐,可任测候所主任,具有初中文化程度的称技术生,技术生一律为观测员^①。

1940年春,省气象局兼理天文事业,历时四载,测定本省一等天文点5点,二等天文点11点,授时24700次,出版《福建天象》、《福建日食》、《谈时》、《恒星图》,编纂《北纬24度至28度观测星表》等。

学术研究活动也频繁开展。1941年春和1946年夏两次参加工程师学会主办的展览会,承办气象展馆。1941年5月,“中央研究院”地理研究所海洋组主任马延英,研究员唐世凤,研究生成荫等3人组成福建海洋考察团到永安,会同省气象局和省研究院技术人员6人组成观测海岸和采集生物两个队赴东山,对福建沿海海岸地形构造、渔产、盐分、海温、海流等进行调查。

1941年9月21日,日全食,福建可见,经长期准备

在武夷山进行观测,气象局天文课课长沈文候、副研究员林龚谋等参加。同年冬,中国天文学会在永安举行年会,由气象局主持,与会者均有论文报告。福建省参加的有林龚谋的《太阳射影轨迹》和沈文候的《恒星测量与授时》等。

同年,省气象局为探实本省地层内质,与“中央研究院”物理研究所合作,历时6个多月,测定了崇安、永安、将乐、德化、屏南和霞浦等16个县(市)的地磁要素。主持该项测定工作的是“中央研究院”副研究员陈志强和省气象局天文组组长舒盘铭^②。

1940—1945年相继出版了《天气》等数种刊物,还编印了《雨和雨量》、《蒸发与湿度》、《日照》等一批气象科普小册子。这在当时全国都十分罕见。《天气》和《气象通讯》是福建省气象局在永安时期出版的不定期刊物。《天气》(双月刊)1941年6月10日创刊于永安,省气象局编译委员会编,同年12月停刊。是综合天文、气象两门科学的学术性刊物,《气象通讯》1938年6月创刊于永安,省气象局俱乐部学术股编,为油印本,1943年10月终刊。是登载系统内部生活、学习等活动的报导。此外尚有《福建气象月刊》,1936年5月创刊于福州,除登载每月观测的所有资料外,卷首还有一篇论著,由省立福州测候所编行。1938年5月迁永安,不久由省测候总所编。1942年12月终刊。《气象论丛》(不定期),1938年创刊于永安,省气象局编,1941年终刊。《福建气象年报》,1938年11月在永安创办,省测候总所编,仅出两卷。《气象月讯》,1939年创刊于永安,省气象局编,1940年12月停刊。《福建气象简报》(月刊),1940年1月25日创刊于永安,是为了适应服务的及时性,篇首有一月气候综述,省气象局编,1942年12月终刊。《福建天象》(月刊),1940年4月10日创刊于永安,省气象局编、油印本。1941年10月终刊^③。

至1944年,福建省气象局组织机构日趋完善。局内分设总务、气象、天文三课,统计、会计两室。天文课分研究、时政两股,气象课分观测、设计两股,统计室分编辑、记录两股,此外尚有仪器工场和气象台。

三、中美气象合作^④

1944年,国内抗日战争走到了高潮阶段,日本人推行南下政策,大范围攻打东南亚地区。当时整个中国除了重庆等西南几个地区外,几乎都被日本人所占领。此时,以日本帝国为首的轴心国和以美国为首的同盟国的太平洋战争激战正酣,美国担心中国火力不集中,会被日本人打败,进而影响整个战局。于是,美国组织了飞虎队,带着一批飞机援助中国,根据地设在昆明,活动

① 福建省立科学馆.福建省立科学馆工作简报,1936。

② 见《福建气象志》。

③ 见《福州市志》之“六、国民党办的期刊”。

④ 陈遵庸.抗日战争时期中美气象合作的组织——中国东南气象学会//朱祥瑞.中国气象史研究文集(二).北京:气象出版社,2005。

范围为东西从缅甸到台湾，南北从日本到南回归线。

这支航空队进驻云南各个机场后，针对日寇轰炸机性能优于美军歼击机的实际情况，大队长陈纳德制定了“拔高、俯冲、打了就走”战术原则。这一战术的有效执行，需要充分的气象情报工作支持。当时，日本已经占领了大部分中国的国土，美国的飞机要从昆明飞到日本去进行轰炸，如果从中国大陆直线过去，肯定会遭日本的高射炮射击。只能尽量避开被日本人占领的中国国土上空，从海南岛、广东沿海、福建沿海、浙江沿海一带再北上日本。所以，沿海的天气信息成为了飞虎队执行这一战术的重要保障。

由于当时国民党政府比较混乱，负责飞虎队沿海安全飞行和作战的气象保障任务，美国方面没有跟国民党政府合作，而是直接找到福建协和大学（美国教会办的学校，1938—1946年，抗日战争爆发，学院迁至邵武）气象专业讲师王仁煜，由他负责整体气象保障工作。

1944年夏，美国空军第十四航空队第十测候队派空军上尉、气象硕士彭惠立等2人先到邵武私立协和大学找王仁煜，后通过王仁煜介绍到永安找到福建省气象局长石延汉。石延汉指派气象课课长陈遵民与王仁煜、彭惠立具体商讨合作事宜。

美方要求，在闽浙沿海和安徽内陆建立若干测候所，每天定时提供气象情报。但考虑到要到浙江、安徽等省建所，用福建省气象局名义是不行的，用美空军名义也不合适，最后决定由美空军第十测候队与福建省气象局联合成立一个叫作“中国东南气象学会”的组织（英文简称“MASEC”）。此组织经福建省政府批准，于1944年10月初正式成立，就在永安羲和山上。

该学会不是学术团体，其主要功能是培训观测和通信人员。在福建、浙江、安徽等省设临时测候所，其中福建设有东山、莆田、福鼎临时测候所^①。

此后，在各省建立的测候所，挂牌名称均为“中国东南气象学会XX测候所”。测候所的所有气象、电信设备、业务经费、人员工资均由美军按月发给。当时在永安福建省气象局还专门为美军和翻译等六七人盖了一座木结构平房，配有厨师等为他们服务。

中国东南气象学会成立后，立即开办短训班。首期短训班学员主要由登报公开招生（初、高中毕业或同等学历均可）以及由气象局内抽调几个年轻人参加，共十几人。短训班学习3个月，实习1个月。由彭惠立亲自讲授国际气象电码，特别是低、中、高云系电码的识别，其他基础理论和收发报技术课均由省气象局专业技术人员讲授。实习时，除地面测报、国际气象电码和常规业务外，重点是实习美国最新制造的无线电报/电话两用机（可以无线发报，也可用无线电话对讲），另配手摇发电机一部，这是当时最先进的收发两用的报话机，一个人可

以背着走，较轻便。翻译由厦门大学毕业生陆怡担任。

短训班原定1945年2月结业，后因为任务紧，要求在1945年1月中结业。由美空军第十四航空队第十测候队颁发一份中英文版的结业证书。

根据飞虎队的安排，这些接受过气象训练的训练班学员，在1945年春节前分别前往各个测候所去开展工作，陈遵甯被安排到浙江云和测候所。当时，云和是浙江战时省会，测候所的地址在云和狮山一个师范学校内。

由于当时交通条件不便，只要有公路可达的地方都由美军开吉普车送达。东南气象学会在浙江省三地设立测候所，在石延汉、彭惠立（开车）的带领下，陈遵甯等几个人到达云和，受到浙江省建设厅厅长接见。设所事宜，由浙江省建设厅下属负责测候工作的部门人员具体筹划。

在那里，陈遵甯每天要进行8次观测工作，其中美方要求观测并发报的时间为06、08、10、14、16、18、20时，共7次，省气象局为配合常规气候观测，要求增加21时观测，但不发报，合计一天8次观测。观测内容有气温、湿度、气压、风速、云等。

当时天气预报的时效性很强，每次观测都要及时发报。云和测候所由于还负责定时抄收浙皖各所的气象电报，所以专门配了一个专职报务员，其他测候所只配测报员1人，另配两名工友负责手摇发电机的手摇工作，并兼炊事、杂务工作。

每次气象观测结果都要编成气象电码，经加密处理后，浙皖两省各所即向云和所电台发报（电台呼号XD21），云和所抄收完后即向永安福建省气象局内总台（电台呼号XDA）发报，XDA台收完闽浙皖各所电报后，即发给在永安的美国新闻处电台，由他们转昆明盟军总部。总部的美国专家根据陈遵甯他们观测到的云的种类、云高和云量等天气数据分析未来天气形势，及时做出天气预报，为飞机飞行提供天气信息，保障飞行的安全。

除以上东南气象学会测候所发气象电报外，还指定若干测候所也要发国际气象电报，如福建浦城测候所、南平测候所等。因为这些所没有配无线电设备，当时是通过邮电局按OBS（气象电报）向永安福建省气象局发报。一直到抗战胜利，这些观测和预报才结束。

美国的“飞虎队”到1945年9月3日日本宣布投降才回国。陈遵甯等也结束了气象保障任务，回到福建，在浦城测候所等待分配。

气象合作为二战后期包括飞虎队在内的飞行员们在执行东南沿海频繁的空中任务时能够安全地完成使命、有效打击日寇提供了重要保障。飞虎队在东南沿海的活跃，打击了日寇的嚣张气焰，原先行驶在东南海上的日寇舰船顿时销声匿迹。

^① 高时彦. 福建近代气象机构沿革// 朱祥瑞. 中国气象史研究文集（二）. 北京: 气象出版社, 2005.

四、战后

1945年10月气象局从永安迁回福州西门外祭酒岭，建立福州测候所^①。

日本投降，台湾光复，原国民党福建省政府主席陈仪（当时已离任）被任命为台湾省行政长官（属类似于特区的性质，不同于其他省，故不称省主席，具有一定的自治色彩，如使用台币，不用全国通用的法币），到台湾接收日本统治50年后的台湾政务。带去的人员多由福建就近抽调，其中就有福建省气象局局长石延汉。11月11日，日治时期的末任市长丸冈道夫遵令将关防、簿籍、图册、财产等市役所各项公物，分别造册移交给行政长官公署指派的市长石延汉及其下属官员。

石延汉同时兼台湾省气象局局长，福建省气象局则由陈遵民代理局长（1945年10月—1947年3月）^②。

日本统治时期的台湾省气象局主要人员都由日本人充任，中国人则只担任不很重要的角色，接收以后大部分日本人被遣送回国，只留下极少数人维持手中的工作，如预报科科长西村等，一年多后全部遣送时才离开。因此，石延汉又从福建气象台调去一二十人赴台任职，所以接收后的台湾气象局的主要骨干都是原福建省气象局的人，如总务科长饶顺昌、观测科长王仁煜、天文科长林荣安、调查科长刘宝成、秘书林茂安等以及一些中下级人员。因而台湾省气象局的一些工作作风多沿袭福建省气象局在永安时期的做法。例如，设调查科，除其基本任务为气象资料的审核、整理和出版保存之外，还仿照永安时期，气象局与“中央研究院”地理研究所合作设立海洋考察团，在东山附近海面进行了调查、考察，返回福州后进行闽江口海港调查，同时在台湾也进行了玉山高山考察和拟议中的澎湖列岛的海洋调查。以上皆由调查科主办，邀请有关单位派人共同进行的。总之，当时两省气象工作起到了相互影响、相互促进的作用。但在另一方面由于人员的抽调，在一定程度上削弱了福建气象工作的力量。

石延汉身兼两省气象局长，在福建虽由陈遵民代局长，但事务仍由石延汉亲自遥控，每天均由政务电台或无线电话，通报通话频繁。图书资料等交流，当时由台湾寄赠的图书资料、仪器颇多，如日文版的气象学巨著、五十年台风分析研究、探空仪及各种图表，其中探空用的不同要求的多种温度对数压力图数量不少。除了这些局与局间频繁联系外，其他人员间或由于亲戚关系，或同仁友谊，或工作需要，也不断相互寄赠书刊、交流经验。这些联系随着王宪钊接任局长，石延汉不再兼福建气象局局长，以至石延汉调离台湾省气象局等都

有不同程度的削弱，但下级人员间的关系仍然不断，直到福州解放才完全隔绝。

1946年1月，福建省气象局另辟乌石山王家祠新址建立一等测候所。该处位于福州市区乌石山东麓，场地四周开阔，仪器比较齐全，调换、补充也较及时，观测时次多，技术力量较强，观测记录符合要求。

由于台湾省技术条件优越，石延汉又兼福建气象局长等有利因素，因此石延汉颇有以台湾带动福建气象工作的发展以达到两省在全国领先的雄心。但由于国民党腐败，福建经费极其枯竭，台湾又无法在经济上给予支援，要想全面发展谈何容易。因而，只能退而求其次，先从设备要求不高，投资不大的预报工作着手（图2）。于是在1946年8月由福建局派出陈则铄、方妙玉（女）、陈宝华3人前往台湾学习天气预报工作，预定为期一年。3人到台后除学习预报工作外，还同稍后到台的王仁煜夫人刘永聪，福建协和大学新毕业的林深思等共5人，一道学习了解台湾气象局的全面工作，有些方面还实地见习操作（如测风、探空、地震等），以期有朝一日福建也能开展。



图2 1946年9月17日05时天气图，这是福建省现存最早的气象图

① 高时彦. 福建近代气象机构沿革// 朱祥瑞. 中国气象史研究文集(二). 北京: 气象出版社, 2005.

② 陈遵庸. 抗日战争时期中美气象合作的组织——中国东南气象学会// 朱祥瑞. 中国气象史研究文集(二). 北京: 气象出版社, 2005

《《 涓流细雨 》》

“This partnership is a demonstration of the fundamental role that oceans play in the weather and climate system from local to global scales. It is critically important that the Met Office models, which we use to predict weather and climate risk, represent the fundamental role that the ocean places across time and space scales.”

“这个合作显示了海洋在从局地到全球的天气和气候中所起的基本作用。对于英国气象局用于预报天气和气候风险的模式来说，表示海洋跨时间和空间尺度的这种基本作用至关重要。”

——英国作为一个岛国，海洋的重要性毋庸置疑。2016年初，英国成立了海洋预测国家合作（The National Partnership for Ocean Prediction, NPOP）组织，该组织由英国气象局、普利茅斯海洋实验室、环境、渔业和水产科学中心及国家海洋中心共同组成。该组织的科学合作将致力于提供和改进涉及海洋环境方面的认识和预测，如渔场、海洋安全、

海洋运行、海洋可再生能源生产、沿海食品预警等。英国气象局首席科学家Dame Julia Slingo用上述话表达了这个合作对气象部门的意义所在。

“Scientific advances mean we can now capture the size and shape of raindrops as well as their composition (ice, water, snow), which will lead to improvements in accuracy of rainfall measurements, particularly during high impact weather events. The new radar network has also begun to capture wind speed measurements.”

“科学进步意味着我们现在能够捕捉到雨滴的大小和形状以及其组成（冰、水、雪），这将带来降水观测准确性的改进，特别是在高影响天气事件期间。新雷达网还开始了风速观测。”

——2016年8月初，英国气象局在东北部的桑德兰安装最新双极化雷达，以替代原来服役达30年的英国最古老的天气雷达。这也是该局更新其总计包含16座雷达的雷达网，从而获取更准确预警所需信息工作的一部分。该项目的负责人Richard Bennett针对更新的雷达网，做出如上表示。

（上接77页）

1947年3月，王宪钊离开中国航空公司来闽接任气象局局长，到任后看到颇有名气的福建气象局只有寥寥二三十人住在破庙里，经费无着落，很难有所作为，也只能就已拟议中的预报工作先行开展，首先是抽调福州测候所主任王荫桐成立了预报科，由王宪钊亲自主持，边教边学边干。1947年2月台湾发生了“2·28事件”，陈则铄于3月先期返闽，陈宝华则到8月返回（方妙玉则留在台湾工作）。王宪钊任职期间，福建预报工作的操作模式多沿袭英美方法，后来则多模仿台湾的日本作法。前者先用炭条勾画，事后才用钢笔墨水描实，后者直接用铅笔绘实。虽说，初期的预报工作确实极为简陋，但除台湾外能在一省开展该项工作的，在大陆福建算首创。

当时的预报工作是，每天傍晚做出福州市24小时天气预报，在第2天的《福建时报》上刊登，有台风时在吉祥山了望台（当时为市内制高点）上悬挂台风警报旗，因此，福建是全国最早在报纸上发布天气预报的省份。那时候，利用电台接收“全球天气形势预报”，福建省气象局预报科接收下这些英文数据后翻译成中文，画天气图，分析天气形势，得出预报结论。

开始做预报的初期，预报员一般只有2人（短时间3人），并兼填图送预报、警报等（当时毫无交通工具）。1948年3月，王宪钊调往广州气象台任台长，并带走了王荫桐。

1948年王宪钊离闽后，福建省气象局改称福建省气象所，隶属省建设厅，下设测候、预报、总务课和福州

气象台，并设气象电台和仪器工厂^①。由江西水文总站主任兼工程师汪国瑗任所长。汪国瑗接手后增设了预报课，由陈则铄任课长，并调进填图1人（短时间2人）。从事测报工作的陈遵鼐被任命为测候组主任。

那时候，每天只绘08时、14时两次东亚地面天气图，图面记录稀少，底图为双面印刷、双面绘制。高空图为11时、23时1500、3000和5000m点各3张。地面图和高空点绘图报告收自何台不清楚；情报则有日本的NPI台，菲律宾的NPO台和关岛的NPN等的英文分析和预报，这些分析预报多着重遥远海区，平时作用不大，只有有台风时对台风的位置、强度变化及路径等有较重要的参考作用。另外，还抄收上海徐家汇和台湾的分析预报，有较大的参考意义。

1948年5月气象所迁至乌石山山顶邻霄台。该所工作一直延续到1949年新中国成立。

由于福建气象机构归属不一，有民国政府“中央气象局”，也有地方政府部门，还有海关、军队、民航、学校和农（茶、盐）场等，测候所所址大多租用民房、祠堂、庙宇等，有的还随着观测人员居住地的搬迁而迁移。至中华人民共和国成立时，全省仅剩有省气象所和县测候所8处，分别是武夷山、福鼎、沙县、莆田、建阳、浦城、龙岩和龙溪，气象技术人员和职工约40人，勉强维持日常的地面测候工作。永安、长汀、南平、崇安、福安、邵武、闽清、连城、东山、惠安和厦门11个测候所，在新中国成立前夕先后停止工作。

① 高时彦. 福建近代气象机构沿革//朱祥瑞. 中国气象史研究文集（二）. 北京: 气象出版社, 2005.

“Our plan is to launch new satellites every nine months and take advantage of all the camera tech that continues to improve. In March 2018 there will be six [satellites flying] and nine months after that, in the beginning of 2019, there will be hundreds flying — depending on funding of course, but that is the plan.”

“我们计划每9个月发射新卫星，发挥持续改进中的所有照相机技术的优势。2018年3月将有6颗[轨道卫星]，之后9个月，即2019年初，将有数百颗卫星环绕——当然取决于经费，但目前就是这么计划的。”

——SpaceVR公司计划在2017年发射世界上第一颗虚拟现实卫星。这颗计划从国际空间站上发射的卫星，被命名为“概观1号 (Overview 1)”，SpaceVR公司的CTO, Blaze Sanders先生接受采访时指出该公司发射虚拟现实卫星，是一个系列计划。

“We are excited to have been awarded this contract and look forward to continuing our close working relationship with HE over the next 3 years. In choosing the Met Office, HE has recognised not only the excellent support we have delivered to them over the last 10+yrs, but also our ability to lead innovation and development in the future. Our world-leading weather and climate science means we are well placed to deliver national and local services, ensuring a targeted operational response in advance of and during severe weather.”

“我们很兴奋获得这份合同，期待今后3年里继续我们与HE (英格兰高速网)的合作关系。选择英国气象局，HE认可的不仅是过去10余年来我们向他们提供的卓越支持，还有我们在未来引导创新和开发的能力。我们在天气和气候科学的世界领先地位意味着能很好地提供国家和地区服务，确保在激烈天气发生之前和发生期间做出有针对性的应对。”

——2016年8月，英国气象局与英格兰高速公路网 (HE) 续签至少今后3年的天气气候服务合同，这份始于2016年7月，价值约为100万英镑的合同，涉及国家和地区的7个天气预报中心，明年服务区域还将拓展。英国气象局战略关系主任Jodie Wild对这份合同的最终签订，喜悦和自信之情，溢于言表。

“We can spend hours flying where we want. A glider is an incredible scientific platform as there's no other way to get this sort of data.”

“我们能够在希望的高度飞行数小时。滑翔机是一个难以置信的科学平台，因为没有其他方式获得这类数据。”

——在空中客车等企业的支持下，命名为Perlan 2的滑翔机2016年8月的飞行力争打破滑翔机飞行高度15445米的记录，同时其携带的仪器能够对平流层的臭氧、甲烷和水汽等进行观测，获取对流层与平流层气体和能力交换的信息。大气物理学家，同时也是预报服务公司WeatherExtreme 创始人的Austin先生这样描述滑翔机高空大气探测的意义。

“I didn't think it would work. But, it turns out, it provides a very accurate approximation over the time gaps that we were filling in ... I think it surprised everyone.”

“我没想到这个方法能行，可它就奏效了，给出了一个非常准确的近似，克服了我们一直想要填补的时间间隔……我想这让每个人震惊。”

——美国气象卫星研究合作所 (CIMSS) 的科学家研究出一个新的技术，能让预报员改进激烈天气预报。这种方法基于该所科学家大约10年前提出的一个用卫星信息更好模拟“总可降水量 (TPW)”的算法，源自科学家依据的极轨卫星计算TPW时，因任一地点每1~18个小时才有卫星经过一次带来的时间间隔，为了填补这个时间间隔而提出的算法，最初仅用于海洋上，现在也能够用于陆地。预报员得到TPW对于预报热带气旋和发生在高湿的热带的激烈天气带来的降水，会有很多帮助。算法的提出者之一Tony Wimmers用惊喜表达了其研究的价值所在，认为找到了一个改进预报的新方向。

“The challenges of climate change, extreme weather and water resources means that the need for innovative, effective meteorological and hydrological services is greater than ever before. The executive management team will strengthen WMO's support of Members and provide leadership to an efficient and service-oriented Secretariat.”

“气候变化、极端天气和水资源的挑战，意味着对创新、有效的气象和水文服务的需求程度前所未有的。行政管理团队将强化WMO对成员的支持，并领导好一个有效的服务型秘书处。”

——新的WMO行政管理办公室2016年9月1日正式运行，Elena Manaenkova女士作为副秘书长和张文建作为秘书长助理被任命为新办公室的负责人。就新办公室的运行，WMO秘书长Petteri Taalas发表了上述看法。据介绍，来自俄罗斯的Manaenkova女士2003年1月加入WMO并出任大气观测和环境司司长，2006年3月出任内阁和对外关系司长，自2010年6月起任WMO秘书长助理。张文建是WMO观测和信息司和空间项目主任，2006—2008年担任中国气象局副局长。对两人的任命，2016年WMO执行委员会上通过。

“It is highly noteworthy that the 10 years with the lowest extent of Arctic sea ice have all been within the last 10 years. Despite a record low winter ice extent in March, this year's figure isn't an absolute record. But this shouldn't detract from the fact there has been a substantial decline in the extent of Arctic sea ice over the last few decades. The current rate of loss of Arctic summer sea ice of 13% per decade is equivalent to an annual loss greater than the size of Scotland.”

“值得高度关注的是，北极海冰范围最低的10年全部发生在过去10年。尽管3月份记录到冬季海冰范围低值，但今年的数据不是一个绝对记录。然而，过去几十年北极海冰范围的大量折损的事实还是让这个记录沉甸甸。目前北极海冰每10年减少13%的损失率，相当于每年损失的面积大于苏格兰。”

——NOAA宣布2016年夏季北极海冰范围，与2007年一道为1979年有卫星监测以来历史第二最低值年。英国气象局在报道这条消息时，引用该局极地气候组负责人Ed Blockley博士如上评论。

“Last week, NOAA's efforts to build a "weather-ready nation" took a major step forward with the National Weather Service's launch of a new, highly-sophisticated National Water Model. Unprecedented in its reach, the new system pulls in data from over 8,000 U.S. Geological Survey stream gauges, leverages NOAA's investment in

第80页评刊

来信截至 2016年10月10日

 丁一超

请问《超大城市气象观测网的设计与应用》一文的作者，上海徐家汇测站已经拥有144年的历史，周围高楼林立的环境已经和当初建造该观测站时有了大的变化，那么这样的环境对于徐家汇测站的数据是否会有大的影响？

回复（from作者）

随着城市扩张，尤其是近年来中国经济的快速发展，测站周边的环境必然会发生变化。从气候观测的角度来讲，这个站已经不能作为传统意义上的气象观测站了，但是，其观测数据却能反映人类活动和城市化影响的气候变化趋势。同时也能反映天气系统与城市边界层相互作用的特征。因此，这个站仍然具有特定的使用价值。特别是其长达一百多年的连续气象数据对于分析人类活动和城市化与气候变化的关系是具有十分重要的意义的。

另外，正如文中所指出的“城市冠层的复杂结构形成的特殊流场（孤立粗糙流、尾流绕流和爬越流）使得冠层与边界层的交换过程异常复杂”，因而获得典型城市环境下的观测信息是深入了解城市地气耦合及其对天气过程影响的难点和关键问题之一。

同时，从应用上考虑，城市基础设施与城市生态、人类活动的高影响要素与气象参数之间的协同观测及其相关大数据的获取越来越成为未来城市观测、数据应用系统设计与业务的导向。

还应该看到，目前复杂地形环境下的灾害性天气监测和预报是国际大气科学研究的热点问题。由于城市复杂的中小尺度地形环境以及下垫面条件对大气动力、热力、水文、气溶胶和云物理等过程以及降水产生重要影响，因此相对于大尺度天气过程引发的降水，对城市暴雨的预报成功率还不是很高。这也是超大城市（城市群）气象观测网需要关注的一个重点，徐家汇观测站在推动灾害天气预测预报和机理研究中发挥了重要作用。

因此徐家汇站作为一个典型的城市观测站在超大城市气象观测网中所起的作用是非常关键的。

 潘彭刚

作为一名航空气象预报员，拜读了贵刊2016年第二期的《航空气象要素以及基于数值模式的低能见度和雾的预报》一文后，深以为然。无云微风的冬夜，没有一个航空气象预报员会睡得踏实。多少次，在半睡半醒中，一个急促的电话通报，“起雾了”，给我带来的是一种深深的绝望。白居易的“花非花雾非雾。夜半来，天明去。来如春梦不多时，去似朝云无觅处。”也是我对大雾最深的感触。换句话说，大雾喜欢不按套路出牌。现今的大雾预报，确实按文中所言，主要依赖于预报员的经验，大雾预报的客观产品较为贫乏，而预报员的经验也主要针对的是辐射雾这种较为按套路出牌的实诚雾，而一旦遇到平流雾或平流辐射雾，预报员的经验将无处着力。通过本文，让我了解到了大雾预报研究的最新进展，特别是NCEP所作的前沿研究，让我又对大雾预报的未来前景有了一丝希望。我们特别殷切地希望，拥有较高准确率的大雾数值产品早日投入到民航一线工作当中，以便进一步提高航班的正点率以及安全运行工作。

（上接79页）

atmospheric prediction, produces simulations for 2.7 million stream reaches and extends coverage to the homes and businesses of 100 million Americans who live in coastal communities.”

“上周NOAA建设‘天气有序国度’的努力前进了重要一步，国家气象局推出一个新的、高度复杂的国家水模式。新系统前所未有地输入超过8000个美国地质调查局水文站数据，利用了NOAA在大气预测上的投入，获得对270万个河流、溪段，以及覆盖有1亿美国人居住和工作的沿海地区的水文模拟。”

——就美国气象局推出的国家水模式，2016年8月23日，美国商务部部长Penny Pritzker女士在媒体发表专栏文章，热情肯定NOAA的工作，指出了新的创新模式给美国社会带来的巨大效益。

“My company looks forward to demonstrating that commercial data can enable the unmatched efficiencies of the private sector to help NOAA accomplish its vital mission to protect and inform the public.”

“我的公司期待展示商业数据能够使得私人企业界的无以伦比的效率，来帮助NOAA实现其保护和告知公众的使命。”

——2016年9月15日，NOAA与两家公司，即Spire

Global和 GeoOptics分别签订了价值37万和69.5万美元的卫星数据购买合同，依据合同这两家企业向NOAA提供无线电掩星数据直到2017年4月，而NOAA将在2017年10月左右，给出两家提供数据的质量的评估报告。这是NOAA历史上第一次向企业购买气象卫星数据，GeoOptics公司的CEO，也是NOAA前任局长Conrad Lautenbacher表达了上述看法。

“This is a way to identify colleges that have a history of producing major impact, it gives us a new way of thinking about and evaluating what makes an undergraduate institution great. What these smaller schools are doing might serve as important undergraduate models to follow in terms of selection and training.”

“这是确定学院是否具有产生重要影响历史的途径，也昭示我们看待和评价如何把本科学院做大的新途径。这些较小规模学院的模式，或许可以在选择和调整本科教育时作为重要的学习对象。”

——当前有很多方法对大学进行排名，而来自巴黎高等师范学院和加州理工学院的2位研究者另辟蹊径，他们统计了1901—2015年世界范围内至少有3位毕业生获得诺奖的81个学术机构，发现每年学生数量在250人以下的小型名校的毕业生获得诺奖的机会更多。研究者对他们研究结果的意义进行了如上解释。



《气象文集》
2016年10月

令包括中国学者在内的全球气象学者记忆犹新的由美国气象学会出版的期刊式学术专著《气象文集》(Meteorological Monographs)在2008年出版了第55卷之后一直没有推出新版。2015年美国气象学会决定继续出版该系列出版物，并且通过网络以在线和完全免费的方式出版。2016年新出版的第55和56卷已和读者见面，主题分别为“热带多尺度对流耦合系统”和“大气辐射观测项目：前20年”。

有关2本文集更详细的报道，见本期P23。

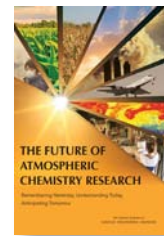


《解释海洋变暖：原因、规模、影响和结果》
2016年9月25日

这份由国际自然保护联盟推出的报告，作者包括了来自12个国家的80位专家。报告瞄准海洋升温带来的挑战，指出20世纪70年代以来，在人类活动导致的气候变暖中，有97%的热量被海洋吸收。这表明在某种意义上，海洋和大气一样甚至更有过之，是受到气候变暖损害的地球环境要素。

《空气污染的成本》
2016年9月8日

世界银行的这篇依据2013年数据完成的报告，将空气污染列为全球“第四大死因”。报告还认为中国是受害最深的国家，空气污染导致中国损失国内产值的10%。



《大气化学研究的未来》
2016年9月

美国科学院最新发表的这份报告，以回忆昨天、认识今天、预期明天为副标题，探讨了美国大气化学领域研究状况，指出在实验室、场地、卫星和模拟研究等领域大气化学的发展趋势。

媒体扫描

MEDIA SCAN



《TPOS 2020》
2016年8月

热带太平洋观测系统(TPOS)2020项目推出的第一份报告(第2草稿版)继续听取科学界的意见。按照计划，年末第一份报告将定稿发布，2018年出版中期报告，该项目的最终设计报告在2020年出炉。

《变化的力量》
2016年9月

美国科学院发布的这篇报告：《变化的力量：日益增加的清洁能源技术的开发和实现中的创新》，瞄准了新能源技术中的创新，梳理了美国在该领域优势所在：世界级大学和国家实验室，以及实力雄厚的企业等。报告就促进清洁能源的市场，指出了5条路径。



《30秒气象》
2016年

这本160页，由Ivy出版社最新出版的新书，用50个世界上最重要天气现象的解释，抓住读者。图书用精美的画面诠释这些天气的生成机制和可预报性，同时辅以这些天气现象被认知过程和科学家贡献的描述，让读者体会到天气现象背后众多科学家和气象学者的探索。

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
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

Xiao Ziniu
Zhai Panmao
Luo Yunfeng
Wang Huijun
Li Weijing
Hu Yongyun
Tan Zhemin
Fei Jianfang
Guan Zhaoyong
He Jianxin
Huang Jianping
Liao Xiaohan
Lü Shihua
Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Peng, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Feng Guolin, Guo Hu, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yurong, Hu Yuewen, Jiang Tong, Lei Xiaotu, Li Hui, Li Jiming, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Shi, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Li, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Mao Hengqing, Peng Yinghui, Pu Yifen, Shi Guangyu, Song Yan, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Xiaoyun, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zaizhi, Wang Zifa, Wen Min, Wen Hongtao, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Hua, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yande, Zou Liyao

Overseas Editors

Chen Jingming, Li Jun, Liu Zhengyu, Jin Feifei, Wang Bin, Weng Fuzhong, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Jiang Jianmin

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

<http://library.cma.gov.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
Article
 - 6 Chen Shangfeng, Chen Wen/ Progress in the Study of the Influence of Arctic Oscillation on ENSO
 - 14 Liu Bainian, Huang Qunbo, Zhang Weimin, Cao Xiaoqun, Zhao Jun, Zhao Yanlai/ Research Progress in Ensemble Four-Dimensions Variational Data Assimilation
 - 24 Fei Haiyan, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming/ The Development and Application of Doppler Radar Mesocyclone Criterion and Algorithm
 - 30 Lin Zhiqiang, Lu Hongya, Ma Yanxian/ Snowstorm Intensity Assessment in the Grassland over Northern Tibetan Plateau Based on Daily Snow Depth Forecasting
 - 36 Wang Rulin, Yu Huabin, Wang Yanli, Jiang Gan, Lin Shan, Shen Zhanhong/ Potential Geographical Distribution of *Dendroctonus armandi* in China Based on the MaxEnt Prediction
 - 41 Pan Penggang, Tian Xiao/ Analysis of Doppler Radar Data when a Downburst Event Occurred in Wuhan Tianhe Airport
 - 47 Yan Xin, Ren Juzhan, Ju Jianhua/ A Possibility of the Warm Sea Surface Temperature in Tropical Atlantic to Promote La Niña Events
 - 51 Zhu He, Wang Xiuming / A Discussion About the Physical Process of Environmental Temperature Lapse Rate Tendancy
 - 55 Shao Yang, Hou Xiliang, Sun Rui, Zhao Zhiqiang/ Operator's Safety Risk Assessment in Weather Modification Implementation
- ### Forum
- 59 Tao Zuyu, Fan Junhong, Li Kaiyuan, Liu Shuyuan, Yang Yinming/ On the Physical Meaning of 4 Basic Meteorological Elements and Applicability to Weather Forecasting
 - 64 Chen Pengfei, Zhu Yujie, Chen Zhenghong / WMO Strategic Plan and Its Inspiration

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Reading

- Information
72 Selected Papers

History

People/Event

- 74 The Goup for Mining and Research on the Meteorological History/ The Meteorological Service in Fujian During the Period of Kuomintang Government