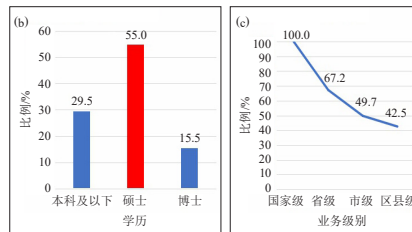
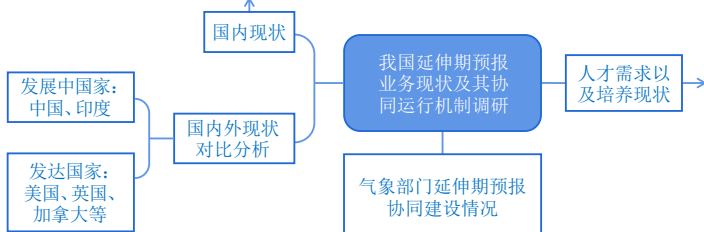
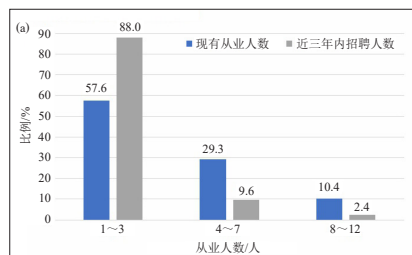
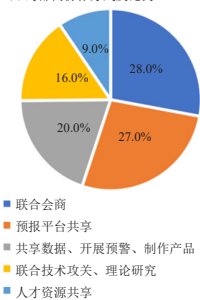


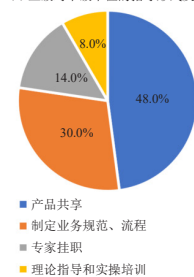
## 发展中的延伸期预报业务



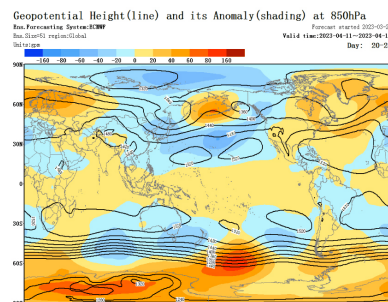
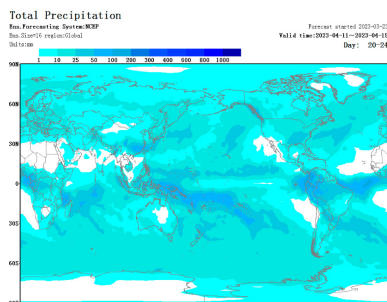
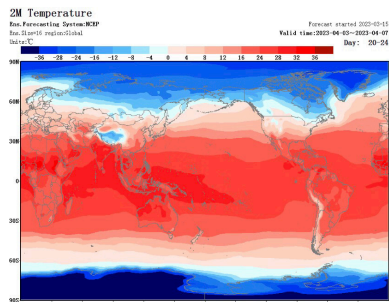
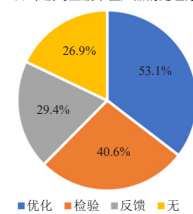
(a) 跨部门协作方式及比例



(b) 上级对下级单位的指导形式及比例



(c) 下级对上级单位产品的处理方式及比例



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

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

**副主编**

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

**常务编委** (按音序排名)

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

**编委** (按音序排名)

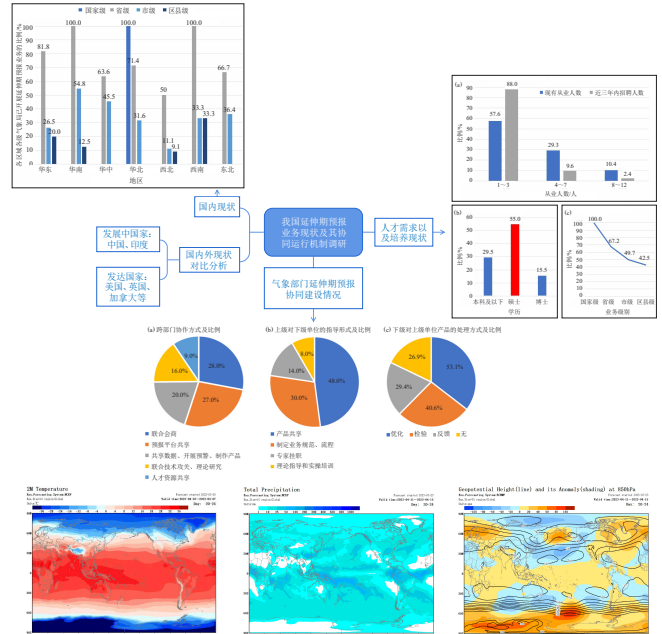
毕宝贵 陈镜明 陈云峰 陈振林 崔春光  
崔讲学 董文杰 杜钧 封国林 何金飞  
何清 胡欣 胡跃文 姜彤 金飞  
雷小途 李集明 李俊 李良福 李耀辉  
李跃清 李忠明 梁旭东 刘晶森 刘黎平  
刘立成 刘实 刘征宇 卢乃锰 陆日宇  
罗亚燕 马舒庆 马耀明 陆莹辉  
浦一芬 王斌 王斌(海) 王东海 王建林  
万齐林 王卫丹 王延青 王迎春 王元  
王式功 卫晓莉 温敏 翁富忠 吴立广  
王自发 卫冠华 延晓冬 杨萍 杨崧  
谢志辉 闫立祥 张立祥 张跃堂 赵广忠  
杨昭明 张立祥 张小玲 张跃堂 赵广忠  
张广俊 周建华 周凌晔 周显信 朱定真  
周定文 朱玉洁 祝燕德 邹立尧 邹晓蕾

**编辑部**

郑秋红 卢冰 李莉 侯美亭 崔晓军  
地址: 北京市中关村南大街46号,  
中国气象局气象干部培训学院 100081  
电话: (010) 58993291/68409927  
邮箱: qxkjjz@163.com  
网址: <http://cmalibrary.cn/amst>  
投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>  
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 卢冰 郑秋红

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

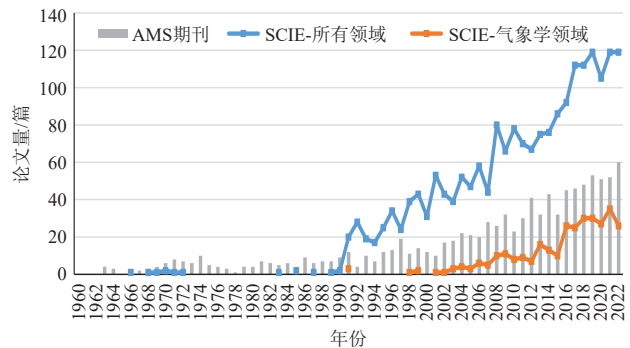


本刊已被万方数据、中国知网(CNKI)以及《中文科技期刊》(维普网)全文收录,相关著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为(除事先声明外)视为同意文章被上述数据库收录。

# 目次

第13卷 第2期 2023年4月20日

- 1 许小峰: 主编语
- 科学观察
- 2 贾朋群, 李婧华: 不朽的经典: 克劳修斯-克拉珀龙方程走过190年
- 封面报道
- 5 杨艳茹, 邓星辰, 虞越越, 周玉, 谈佳铭, 谷金穗: 我国延伸期预报业务现状及其协同运行机制分析



## 主编语

气象学能发展成为一门独立的科学分支，取得今日的进展和成就，离不开诸多先行者的辛勤耕耘，特别是近 200 年来在基础和应用科学领域不断取得突破的学者们，为大气科学奠定了扎实的理论基础。其中，克劳修斯-克拉珀龙方程的建立就是最具代表性的成果之一，其重要价值在实践中经受住了检验，其影响也在持续增加。本期科学观察栏目(P2)对克劳修斯-克拉珀龙方程的诞生和影响力进行了梳理和分析，认为它将在地质学领域后续相关研究中保持持久魅力。

延伸期预报是构建“无缝隙预报”的重要环节，在业务服务中有着广泛且重要的需求，但在预报理论和技术上却还是一块短板。在这一领域，我国除在预报方法和技术方面存在差距外，在人才队伍上也较薄弱，预报体制也存在不完善问题。本期封面文章(P5)对比分析了国内外延伸期预报业务现状，提出了制约我国延伸期预报业务发展的可能因素，并从业务统筹布局、人才队

伍建设、合作交流、激励机制等方面提出了应对建议。本期气象发展前沿报告文章(P16)提出，为了进一步提升海洋气候监测数据支撑能力，亟待加强多源海平面观测数据的收集、评估及加工处理与业务应用等工作，积极开展验潮站及卫星反演海平面观测数据评估及对比分析，在此基础上，逐步构建可自主更新的海平面高度序列数据。

本期气象科技史专题(P80)从清代灾害信息奏报制度的确立、灾害奏折的形式、奏报的内容，以及奏报人员的身份等方面，对清代旱涝灾害的奏报制度进行了研究。进入 21 世纪，中国在人工影响天气领域已与美国、俄罗斯等许多国家建立了良好的双边交流与合作关系。中国的人工影响天气技术逐渐走出国门、走向世界。本期阅读文章(P89)介绍了中国与阿拉伯国家人工影响天气交流合作情况与进展。

许小峰

## 气象发展前沿报告

- 16 陈丽凡, 曹丽娟: 海平面观测及数据产品研制进展及展望
- 26 赵艳霞, 陈思宁: 天气风险管理理论及实践进展

## 研究进展

- 38 张霏燕, 姜盈, 张日佳: 杭州亚运会皮划艇和赛艇项目气候背景分析
- 44 张捷, 张小龙, 陈泊舟, 陈子凡: 基于数据挖掘的气象三要素空间一致性检验方法

## 专题 基层气象现代化

- 49 尹恒, 夏金, 尹欣, 文强, 邹莹, 黄锐: 武当山北坡气温的垂直变化特征
- 53 包苏伦高娃, 王一飞, 阿荣: 气象因子对滑雪运动发展的影响
- 58 张亚男, 罗浩: 贵阳机场低空风切变成因初步分析
- 67 姚镇海, 江春, 姚叶青, 丁浩, 诸葛杰, 马邵翔: 民用无人机作业气象标准制订及气象保障体系构建浅析

## 论坛

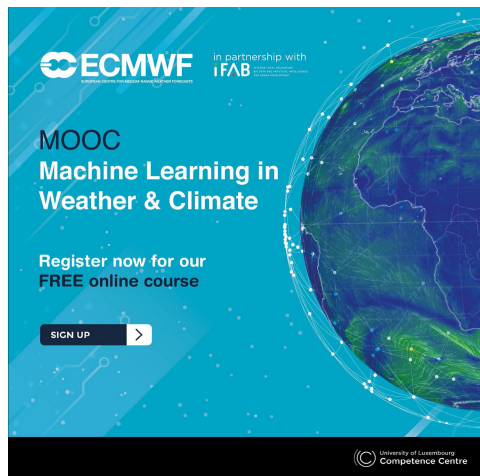
- 73 杨涵洧, 陈奇, 孙兰东, 吴蔚, 刘苏潇: 碳达峰和碳中和行动方案——国内外“双碳”实现路径的典型案例分析与启示

## 往事钩沉

- 80 万金红, 孙大兵, 张葆蔚: 清代旱涝灾害奏报刍议

## 阅读

- 89 姚展予: 中国与阿拉伯国家人工影响天气交流合作
- 91 会评 李超, 鲍雅芳: 从第一届天气与社会会议看社会科学和气象服务的融合发展
- 96 会评 李傲, 徐明: 2023年暴雨东湖论坛: 推动暴雨前沿科学研究
- 封三 魏晓敏 AI助力数据驱动是否会改变NWP? ——ECMWF-ESA 主题会议评介



封三

# 不朽的经典：克劳修斯-克拉珀龙方程走过190年

■ 贾朋群 李婧华

克劳修斯-克拉珀龙方程的出现，帮助人类洞察到空气中的水汽存储能量是怎样随着温度变化而改变的。方程中用对数表达的关系带来一个关键点：即空气中水汽含量的变化与温度之间是非线性的指数关系，意味着曲线越靠近上端就越陡。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.001

在地球系统科学领域，气象和大气物理科学是最早利用数值模拟，认识和预测其主要研究对象——地球大气层的学科之一。实际上，在20世纪50年代数值天气预报（NWP）模式取得成功之前，控制大气运动和大气中水汽相态变化的很多以方程或定理等方式的表达，已经被不同学者研究和发现。这些物理定律，大多来自20世纪前物理、化学和工程等方面的学者，而且这些成果具有更好的普适性，气象和大气科学仅是其应用领域之一。本文介绍的具有190年历史的克劳修斯-克拉珀龙方程（在气象学领域常被称为C-C方程），就是其中最具代表性的公式之一，其意义和启发性近200年来不仅没有弱化，反而在增加，在学科很多新拓展的领域，C-C方程常常被引用和作为理论依据。

## 1 克劳修斯-克拉珀龙（C-C方程）的诞生

经典物理学中的热力学发展，是一个比较缓慢的过程，其中的重要原因之一是相比更早发展和成熟的力学，热力学更加抽象，一些概念来自感觉（如冷暖），且热力学主要变量的值，无法直接观测，只能从对“代理量”的测量间接得到，如通过观测热膨胀系数或电阻得到温度等。

热力学里的一些关键概念或变量，正是因为其抽象性，酝酿、反复和认可经历了漫长时间，其中很多著名学者对现代概念或变量的建立做出了贡献。例如，能量（Energy）一词，惠更斯等3位学者早在1668年就独立提出动量的最初阐述；1686年，莱布尼兹引入了质量与速度平方乘积（为动能的2倍）作为变量；1788年，拉格朗日第一次用符号“ $T$ ”表示能量，并修正了莱布尼兹的表达式（ $T=mv^2/2$ ），但他依然没有给 $T$ 命名为动能；1829年，科里奥利首次将“ $mv^2/2$ ”称为“功的量（quantity of work）”。因此，最早在1802年提出的“能量”的概念，直到50年后的19世纪中叶，才

被科学家广泛接受和开始使用。科学界对温度和热量等热力学基本概念的认知，也有类似的过程，而1865年由克劳修斯定义的“熵”，则是热力学中最早定义的无法直接测量确定的物理量。

抽象的热力学在大约200年前快速发展，一个重要的推动力就是蒸汽机的发展。1698年，第一台蒸汽机出现，但这种没有活塞的机器效率低下，经历多位物理、工程学者超过100年的改进，直到1824年“卡诺机”才出现。而克劳修斯-克拉珀龙方程（C-C方程）的建立，前期主要受到了卡诺机的启发。

1834年，C-C方程的作者之一克拉珀龙正是在扩展卡诺的工作中，给出了C-C方程最初的模样。随后，另一位作者克劳修斯于1850年将能量守恒加入克拉珀龙的方程里，他还发展了潜热理论，让水汽等相变的热效应在方程中得以体现。

C-C方程虽然在热力学形成和发展中处于非常重要的地位，但方程的形式却相对简单。当考虑到水汽的比容远大于水，并引入理想气体状态方程等近似，C-C方程可以表为：

$$E = E_0 \cdot 10^{7.5t/(237+t)}, \quad (1)$$

式中， $E$ 为饱和水汽压， $E_0$ 为0℃时饱和水汽压（ $E_0=6.11$  hPa）， $t$ 为温度（℃）。

在气象学领域，C-C方程瞄准的最重要问题，就是大气中的水：水的相变带来的能量交换过程。水在大气中是唯一以气体、液体和固体三种相态存在的要素，任何2种相态之间发生转变并达到平衡时，即所谓平衡相态遵循的压强和温度之间的关系，被C-C方程准确地描述。

C-C方程的出现，帮助人类洞察到空气中的水汽存储能量是怎样随着温度变化而改变的。方程中用对数表达的关系带来一个关键点：即空气中水汽含量的变化与温度之间是非线性的指数关系，意味着曲线越

资助信息：国家自然科学基金（42142009）

靠近上端就越陡。

## 2 C-C方程的影响

早期曾钟爱实验物理研究并在1905—1921年任英国气象局局长的内皮尔·肖，在1934年发表的一篇文章中，将C-C方程称为开尔文-克劳修斯-克拉珀龙方程，强调了1848年创立了绝对温度温标的开尔文对C-C方程的贡献，同时感叹基于热力学第二定律的C-C方程与实验室结果吻合令人称奇，也给了开尔文于1851年全面表述的热力学第二定律最有力的支持。

实际上，早已写入教科书的C-C方程在近60年来开始在气象和其他领域的研究中不断得到新的应用。借助美国气象学会(AMS)出版的期刊文献库，以C-C方程为关键词，查找相关的文献，发现该方程被1300多篇文献提及。这个在19世纪20年代初得到的方程，直到20世纪，才在AMS期刊上被提及。然而，神奇的是，该方程被文献提及的次数，随着岁月流逝，不仅没有减少，反而不断增加(图1)。从这些文章主要来源期刊(《气候杂志》672篇次、《大气科学》326篇次、《应用气候》76篇次、《每月天气评论》56篇次)可以大致看出，该方程的影响力已经超出大气科学基础研究，主要跟随气候变暖的步伐，成为科学认识全球气候的经典支撑理论之一。

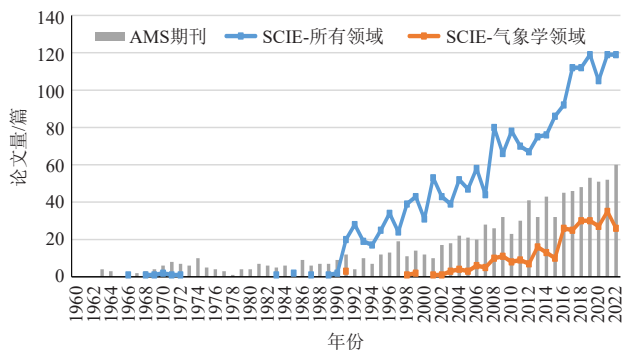


图1 1960—2022年涉及C-C方程的AMS期刊论文和以C-C方程为主题的SCIE论文年度分布

当我们放大视角，审视以C-C方程为主题的SCIE论文(图1)，相似的结果依然再现。SCIE数据库收录以C-C方程为主题的论文共有2036篇。20世纪90年代以后，以C-C方程为主题的SCIE论文迅速增长，且涉及领域广泛。化学、工程、物理学、气象学、热力学、材料学和环境科学等是探讨C-C方程的主要学科。表1中给出全领域的主要微观引文主题<sup>①</sup>，可以看到这些主题大部分集中在化学、工程和物理学的范畴，如渗透脱水、有机框架、磁热效应、升华焓、气液平

衡、天然气水合物和形状记忆合金等。

表1 以C-C方程为主题的SCIE论文在所有领域和气象学领域的微观引文主题Top10

所有领域		气象学领域	
微观引文主题	论文数/篇	微观引文主题	论文数/篇
渗透脱水	210	蒸散	115
蒸散	184	ENSO	101
ENSO	131	热带气旋	32
有机框架	118	多氯联苯	14
磁热效应	93	云	9
升华焓	92	气溶胶	7
气液平衡	87	内波	4
天然气水合物	87	液态水	1
形状记忆合金	75	气液平衡	1
多氯联苯	68	电离层	1

在C-C方程主题SCIE论文快速增长的20世纪90年代，气象学领域的C-C方程主题SCIE论文(图1)初露头角，1991年共有3篇，分别是*Atmospheric Environment Part A-General Topics*上的“*Aerosols, clouds and radiation*”、*Journal of the Atmospheric Sciences*上的“*The stationary wave response to a midlatitude SST anomaly in an idealized GCM*”以及*Journal of Atmospheric Chemistry*上的“*Application of physical adsorption thermodynamics to heterogeneous chemistry on polar stratospheric clouds*”。2016年后，气象学领域每年均有超过20篇的C-C方程主题SCIE论文发表。1991年至今，C-C方程为主题的气象学领域SCIE论文共发表了317篇，这些论文的研究主题主要涉及蒸散、ENSO和热带气旋等。

此外，在IPCC最新发布的第六次评估报告《气候变化2021：自然科学基础》中，着重介绍了气候变化背后的物理原理，C-C方程在其中出现了36次，也表明C-C方程对于研究气候变化及其影响的重要性。

## 3 结语：C-C方程的持久魅力

C-C方程被发现前后的1835年，年轻的达尔文在安第斯山脉的高山上考察，他的伙伴抱怨由于用新锅，导致土豆在沸腾的水中无法煮熟。这时，这位杰出的博物学家就想到，土豆不熟是因为海拔高度让沸点温度降低，与厨具无关。

达尔文的智慧，被德国物理学家克劳修斯和法国工程师兼物理学家克拉珀龙用更加美妙和以他们名字共同命名的C-C方程准确和量化地表达出来，从而提升了科学家对气压与水汽相变之间联系的认知，并且

<sup>①</sup> 利用科睿唯安InCites Benchmarking & Analytics™ Citation Topics(引文主题)功能进行分析，通过文献之间的引用关系，提供宏观、中观、微观等不同颗粒度层级，微观引文主题的名称通过使用算法工具根据最重要的关键词进行标注。

从20世纪初开始，被认为是可写入教科书的严谨科学结果。

19世纪中后期，正是通过C-C方程2位作者和开尔文等其他学者的不懈努力，共同推进了热力学的建立、发展和成熟。那时的学者发现，虽然热力学最早的推动来自蒸汽机效率的提升，但考虑到那时定义的所谓“理想气体”概念，热力学的思想也能应用于实际大气中。换句话说，C-C方程所涉及的物理过程不仅能发生在气缸里，还无时无刻在地球大气层中演绎着，地球大气也是物理意义上的一部“热机”。因此，可以说早期热力学的研究不仅推动了蒸汽机带来的工业化进程，还被物理和气象学者应用到气象科学的研究中，让大气层这个自然“热机”的很多属性露出端倪。例如，哈雷受到大气热膨胀的启发，讨论信风的起源，指出太阳在赤道提供了最大的热量。

更为重要的是，19世纪末热力学的快速发展，实现了与之前几百年主要借助天文学成果发展起来的运动动力学的“同步”，成就了经典物理学当时对运动和能量等动力要素的“全覆盖”，为20世纪初控制大气运动的偏微分方程组的建立奠定了坚实的物理学基础。其中，C-C方程是这组方程中热量守恒方程的基础。

进入20世纪，C-C方程最早在讨论水面、冰面饱和和水汽压，到30年代在讨论积云对流和降水率关系等更广泛问题时被提及。进入NWP时代，该方程被应用的领域更加丰富：从露点到雾、冰雹形成的数值试验，到海上降水、干旱区蒸散；从积云参数化、湿对流，到热带气旋的3D模拟；从海洋积云，到ENSO、季节内振荡和海-气耦合。

20世纪下半叶开始，C-C方程的持续“闪光”，在很大程度上是人类对气候变化导致的全球升温的关注。C-C方程的一个直接结果，就是更热的大气能够容纳的水汽就更多，这会给天气气候灾害的分布、强度等变化带来机会。例如，基于C-C方程，气温升高1℃，空气中的水汽含量可以增加7%。学者们认为，这个简单规律在全球面积广大的海洋上，更容易实现，而大气环流能够将这些源自海洋的水汽，带到世界各地。因此，尽管C-C方程并不能控制降雨，但却控制着大气中的水分含量，即潜在或可能的降水量的极限。

包括C-C方程在内的热力学等经典物理学成果，最早被大量中国学者知晓，与洋务运动时期西学东渐

活动有关。例如，江南制造局翻译馆在1900—1903年翻译出版的多卷本《物理学》，包含了大部分当时最新的西方热力学严谨成果。

C-C方程属于物理学中热力学分支。这门还没有产生过诺贝尔奖学者的领域，却是早期著名物理学家玻尔兹曼加盟其中的领域。该领域贡献了“熵”等物理学概念，背后体现的是热力学联通微观与宏观的本质：看不见摸不着的东西，却是从哲学角度解释自然不可或缺的概念。而C-C方程的两位主角，克劳修斯和克拉珀龙，以及其他一些学者，通过熵概念的引入，在19世纪中叶的几十年里，快速推进了热力学领域的发展。

实际上，带动热力学快速发展的驱动力，最初来自枪炮制造和蒸汽机的改进。恩格斯在评价工业革命时指出：“蒸汽机教我们把热能变成机械运动。”C-C方程被气象学界重视，是因为地球大气循环本身就是一个卡诺机，而水相态的变化在天气和气候研究中始终是关键过程。

地球大气层，乃至包括了多个圈层的整个地球系统，水的存在决定了其宜居性，而水的3个相态之间的转变，更是自然界丰富多彩的变化，是联通不同圈层行为的主要驱动机制之一。这样一个及其重要的自然界中最活跃的过程，即水通过3个相态的转变适应和驱动圈层内和圈层间的交换，在大约200年前就被C-C方程准确地描述，无疑是众多地学领域后续相关研究的一个重要支撑：大自然转化的哲学属性，蕴含在C-C方程之中！

#### 深入阅读

- 弗·卡约里. 物理学史. 戴念祖, 译, 2002. 桂林: 广西师范大学出版社.
- 胡浩宇, 2008. 江南制造局翻译馆与西方物理学知识在华传播. 南昌航空大学学报, 10(1): 70-75, 118.
- 刘兵, 杨舰, 戴吾三, 2006. 科学技术史二十一讲. 北京: 清华大学出版社.
- Sears. 物理学(第二册). 王子昌, 译, 1953. 上海: 龙门联合书局.
- Adam D, 2023. What a 190-years-old equation says about rainstorms in a changing climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(14): e2304077120.
- Shaw N, 1934. The March of meteorology. *Random recollections. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 60(254): 101-120.
- Saslow W M, 2020. A history of thermodynamics: The missing manual. *Entropy*, 22(1): 77.

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

# 我国延伸期预报业务现状及其协同运行机制分析

杨滢茹 邓星辰 虞越越 周玉 谈佳铭 谷金穗

(南京信息工程大学大气科学学院/气象灾害教育部重点实验室(KLME)/气象与环境联合研究中心(ILCEC)/气象灾害预报预警与评估省部共建协同创新中心(CIC-FEMD), 南京 210044)

**摘要:** 10~30 d延伸期预报是构建“无缝隙预报”的必然要求,在防灾减灾工作和各行业气象保障服务中起着至关重要的作用。我国自2002年起,对延伸期预报业务进行了多方面的探索,但仍存在预报方法和技术不纯熟、人才队伍较薄弱、预报体制不完善等问题,当前的延伸期预报业务仍较难满足业务需求。通过文献调研法、问卷调研法、访谈调研法对比分析了国内外延伸期预报业务现状、人才队伍以及协同运行机制建设现状,提出了制约我国延伸期预报业务进一步发展的可能因素,并提出了若干对策,为延伸期预报业务相关决策提供科学的支撑和依据。

**关键词:** 延伸期预报业务,现状分析,人才队伍,协同运行机制

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.002

## Investigation on the Current State of Extended-Range Forecast and Its Cooperative Operation System in China

Yang Yanru, Deng Xingchen, Yu Yueyue, Zhou Yu, Tan Jiaming, Gu Jinsui

(School of Atmospheric Science/ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education (KLME)/ International Joint Laboratory on Climate and Environmental Change (ILCEC)/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorology Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

**Abstract:** As a necessary component of the seamless weather and climate forecast system, the 10–30 day extended-range forecast plays a crucial role in disaster prevention and mitigation as well as in meteorological services for various industries. Since 2002, the operational extended-range forecast has been explored from multiple aspects in China. However, because of the limitation in forecast methods and techniques, the shortage of the specialist team and the incomplete forecast system, the current extended-range forecast cannot satisfy the demand of meteorological service. Through literature review, questionnaire and interview with experts, this study compares and analyzes the current states of operational extended-range forecast, specialist team and collaborative system and mechanism in China and at abroad, puts forward the possible factors restricting the further development of extended-range forecast in China, and offers several improvement measures. This study provides scientific support and basis for the decision-making of operational extended-range forecast.

**Keywords:** operational extended-range forecast, current state analysis, specialist team, collaborative system and mechanism

### 0 引言

随着全球气温增暖,近年来气象灾害天气事件频发<sup>[1]</sup>,国际上对极端灾害事件的关注日趋增加。我国作为世界上受灾影响较大的国家之一<sup>[2]</sup>,近年来极端气候事件发生的频次也呈现上升趋势<sup>[3]</sup>,由极端事件引发的气象灾害也愈加显著。2021年河南郑州“21·7”

特大暴雨就是近期发生在我国的最为典型的一次灾害性事件,此次暴雨灾害造成重大人员伤亡以及高额经济损失。同时,夏季大范围持续性高温、东北夏季低温冷害、华西持续秋雨、寒潮、台风、霜冻等灾害性天气无一不表明现代社会对提高灾害天气的延伸期预报时效及准确率的迫切需求<sup>[4]</sup>。另外,从天气影响社会经济高质量发展的角度来看,提高气象服务水平也是保障工业生产、满足民生需求、提高经济效益的必然要求。

10~30 d延伸期预报作为数值天气预报和短期气候预测之间的桥梁,是搭建无缝隙、一体化气候预测系统的关键与挑战<sup>[5]</sup>,也是提高防灾减灾能力<sup>[6]</sup>和稳定各行各业运转的重要保障。然而,相比于短中期预报

收稿日期:2021年12月6日;修回日期:2022年6月16日

第一作者:杨滢茹(2001—),Email:1731961980@qq.com

通信作者:虞越越(1987—),Email:yuyy@nuist.edu.cn

资助信息:中国气象局软科学基金项目(2021ZZXM43);国家重点研发计划(2019YFC1510201)

和季节预测, 延伸期预报的研究相对偏少<sup>[7-10]</sup>。直至近几年, 延伸期预报业务才开始逐渐得到关注。世界气象组织以及国内外气象业务部门和研究机构一致认为, 更好地认识与次季节尺度相关的物理过程、寻求次季节尺度可预报性来源、建立和发展次季节尺度预测系统, 是大气科学领域未来研究的重点问题之一<sup>[11-12]</sup>。2014年, “世界气象研究计划(WWRP)”和“世界天气研究计划(WCRP)”两大科研团体共同发起的“国际次季节至季节尺度预测计划(S2S)”正式启动。

近年来, 我国气象业务部门开始发展延伸期预报业务。从2002年开始, 国家级气象中心研发了国家级延伸期监测应用和预报模型, 并建立了延伸期预报业务系统。2005年9月, 延伸期预报业务开始准业务化。2008年开始, 国家气象中心进一步推进延伸期预报业务的建设, 开发新的预报方法, 制定了预报规范和预报流程。2010年5月, 国家气象中心和国家气候中心建立了联合会商机制和流程, 统一了延伸期预报业务规范、流程和产品等。目前, 已有研究从延伸期预报的预报因子、预报方法等方面系统分析了我国延伸期预报业务现状和进展, 普遍认为10~30 d预报时段存在一些可预报源, 可作为延伸期预报因子, 主要包括: 季节内振荡(MJO/ISO)、ENSO等准周期性模态变率<sup>[13]</sup>, 平流层和对流层相互作用<sup>[14-17]</sup>, 下垫面异常(如海温、积雪、土壤湿度等)<sup>[18]</sup>, 火山喷发、人为排放气溶胶等外部强迫<sup>[13]</sup>。延伸期预报采用的预报方法主要包括动力学方法、统计学方法和动力-统计方法, 其中动力统计相结合的方法是当前国际上延伸期预报最通行的预报技术<sup>[1]</sup>。其中, 采用的统计方法主要有低频天气图法<sup>[19]</sup>、长短时记忆神经网络法<sup>[20]</sup>、多种回归模型(如: 偏最小二乘回归方法、多变量时滞回归模型、扩展复数自回归模型等)<sup>[21-23]</sup>等。延伸期天气预报作为一项新的预报业务, 仍存在理论不够完善、预报产品较为单一、预报技术不够成熟等问题, 往往较难满足当前业务需求<sup>[6]</sup>。

除了延伸期预报方法、技术、手段等方面亟待科研攻关, 人才培养体系和协同运行机制建设对延伸期预报业务的发展也至关重要。高层次、专业化人才是气象事业发展的核心竞争力, 是推进气象现代化建设的关键和紧缺资源。因而, 全面推进气象人才工程的建设工作是构建术业有专攻、创新有活力的延伸期预报人才体系的重点。同时, 进一步完善气象科技运行机制, 优化资源配置, 加强技术产研融合, 提升跨级别、跨部门间协作, 营造良好的气象科技创新和落地应用联动环境, 搭建科学合理的延伸期预报业务布局、规范化的预报流程, 对延伸期预报业务发展也至

关重要。然而, 我国延伸期预报人才队伍的外引与内培仍有所欠缺, 预报规范以及跨级别、跨部门间的协作仍不够完善也是影响和制约我国气象科技实现突破的基本问题之一。针对延伸期预报人才队伍以及各部门、级别间协同机制建设现状, 目前鲜有系统性的调研以及客观定量的分析研究。

本文通过文献调研法、问卷调研法、访谈调研法对比分析了国内外延伸期预报业务现状、人才队伍以及协同运行机制建设现状, 提出了制约我国延伸期预报业务进一步发展的可能因素, 并提出了若干对策, 为延伸期预报业务相关决策提供科学的支撑和依据。

## 1 研究方法

为了解我国延伸期预报的现状, 分析我国事业单位对该方面人才需求情况, 并进一步研究各级气象业务单位的延伸期预报能力协同建设机制, 调查组采用文献调研法、问卷调研法、访谈调研法对延伸期预报业务开展了系统性调研。

### 1.1 文献调研

通过查阅延伸期预报业务的相关文献资料, 浏览美国国家环境预报中心(NCEP)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)以及中国天气网等多个业务单位官方网站搜集相关资料, 获取反映我国和发达国家和地区延伸期预报能力现状的基本信息。

### 1.2 问卷调研

基于文献调研成果, 设计针对我国气象业务单位延伸期预报业务的调查问卷, 调研我国延伸期预报业务现状, 并了解我国延伸期预报的人才队伍现状和需求, 以及跨级协作程度和指导交流方式等相关信息。向我国各级气象业务单位的工作人员发放问卷, 开展线上随机抽样调查, 共回收有效问卷244份。问卷参与者分布全国各个地区(图1a), 其中华东地区填写人数最多, 占比28.7%; 填写人员遍布各级气象业务单位(图1b), 其中市局局参与人数最多(占比54.5%); 各级填写单位主要来自气象台、气象探测中心/观测站、气候中心, 也有来自气象信息中心、气象服务中心、生态与农业中心、突发事件预警信息发布中心、气象灾害防御技术中心、气象科学研究所等部门(图1c)。因此调研对象具有一定的广泛性和差异性, 在一定程度上保证了本问卷调研结果的代表性和可信性。

### 1.3 访谈调研

调查组走访了延伸期预报业务基础较好的国家气候中心和浙江省气候中心, 围绕延伸期预报业务的人事政策、落实情况以及面临的问题与挑战等方面与上述两个单位的延伸期预报员展开了访谈调研。

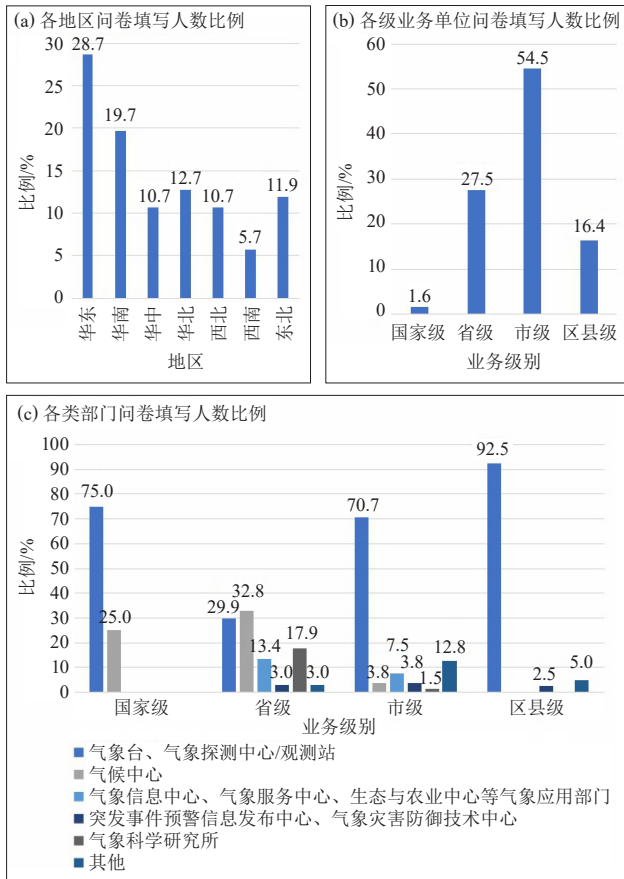


图1 各地区 (a)、各级业务单位 (b)、各级气象局各类部门 (c) 参与问卷人数比例

Fig. 1 Proportion of participants in the questionnaire for different regions (a), different levels (b), different departments of national, provincial, municipal, and county level meteorological bureaus (c)

## 2 主要调研结果

### 2.1 国内外延伸期预报业务现状

#### 2.1.1 国内现状

我国延伸期预报业务相较于发达国家和地区而言起步较晚<sup>[2]</sup>, 但自2002年开展以来, 业务水平得到快速发展。访谈浙江省延伸期预报员得知, 从2013年开始, 国家要求各省发布延伸期预报产品, 自此延伸期预报业务作为常规性预报业务开展。基于调研结果, 从延伸期预报业务在我国的覆盖率、预报产品、预报时效、预报频率、预报所采用的方法和预报因子以及延伸期预报未来发展方向几个方面阐述我国延伸期预报业务现状。

##### 1) 延伸期预报业务覆盖率

问卷调查结果显示, 目前延伸期预报业务普及度仍不高, 各级、各地区气象业务单位之间的差异较大。244名参与问卷调查人员中有43.4%的填写者所

在气象局开设了延伸期预报业务。对于同一地区省、市、区县级气象单位 (图2), 省局开展延伸期预报所占比例最大, 其中华南、西南地区参与调查的所有省级业务单位都开展了相关业务; 市级业务单位开展比例明显减少; 区县级最少, 东北、华中和华北地区区县级气象局几乎没有独立开展延伸期预报业务。以上调研内容与浙江省气候中心延伸期预报员所说的“该业务主要为国家级和省级部署”情况一致。

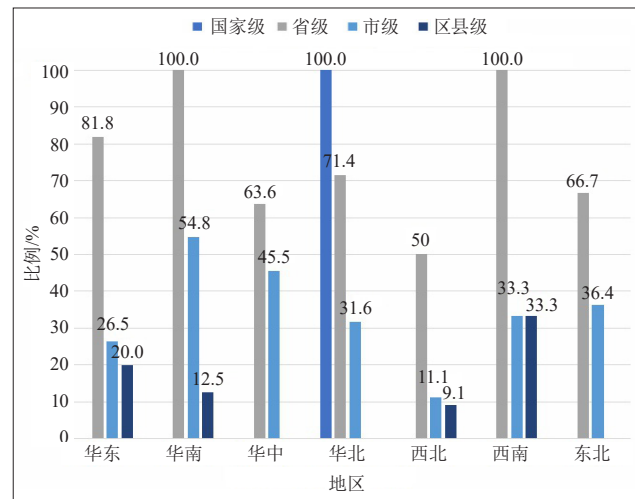


图2 各区域各级气象局已开展延伸期预报业务的比例  
Fig. 2 Proportion of meteorological bureaus at different levels in each region that issue operational extended-range forecast

##### 2) 延伸期预报的预报产品

问卷调查研究分析表明, 我国延伸期预报产品类型较为集中 (图3), 主要为降水量、温度距平、降水距平百分率, 部分业务单位也对强降水、强降温、高温等极端天气进行预报。少数业务单位对台风、大气扩散条件、季度性展望验证、PM<sub>2.5</sub>等影响环境空气质量的大气污染物浓度<sup>[24]</sup>等产品展开。而针对日较差、紫外线指数、酷热指数、土壤湿度、MJO预报、风寒指数、帕尔默干旱指数等的延伸期产品较少。

基于文献调研、中国气象网等网站公开信息查询, 国家气候中心的延伸期预报在近两年的预报产品中, 除了对温度和降水的常规延伸期预报, 还创新性地利用智能网格实况及集合预报产品, 采用滚动建模和格站融入技术, 新增了延伸期气温距平 (逐候、逐旬) 网格预报产品和降水网格预报产品。经专家评审, 延伸期预报日最高 (低) 气温预报精度有改善、气温距平预报产品的效果较集合预报已有一定的提升, 基于多模式统计订正技术的11~30 d延伸期降水网格预报产品实现了延伸期时段的定量降水精细, 报强降水

的预报效果有提升<sup>①②</sup>。

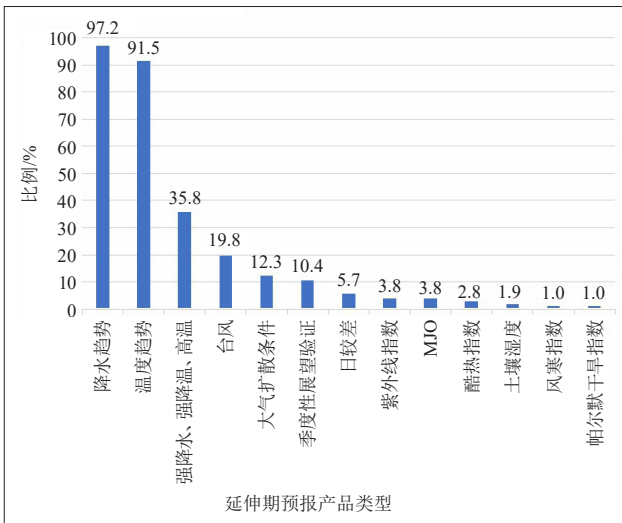


图3 各类延伸期预报产品比例

Fig. 3 Proportion of various extended-range forecast products

### 3) 延伸期预报的预报时效和发布频率

在预报时效方面，延伸期预报的时间尺度通常为10~30 d。问卷调查结果（图4a）也表明，绝大部分业务单位发布延伸期预报时效为10~20 d或21~30 d，仅有12.7%的业务单位提供预报时效超出30 d的预报产品。

在预报产品的发布频率方面，被访谈的延伸期预报员指出，省级气象局于2015年开始便开展了对降水和气温的逐日延伸期预报。文献调研表明，中国气象局目前已经实现逐日发布多项预报产品<sup>[1]</sup>，成都市气象局对于大气污染物浓度的发布频率为每3 d一次<sup>[24]</sup>。但问卷调查结果（图4b）显示，我国大部分地区延伸期预报产品还是以逐旬发布为主，占比达47.2%。19.9%的气象单位逐周发布。在发布逐日预报产品的单位（占比17%）中，按地域划分，华东地区占比最多；按业务单位级别划分，国家级逐日预报占比100%，这与金荣花等<sup>[2]</sup>在中国气象局延伸期预报业务预报频率方面的调研结果吻合。此外，有16%的业务单位仅提供重要天气过程的10 d以上的预报，主要分布于市局和区县局。

### 4) 延伸期预报的预报方法和预报因子

相关资料表明，目前，中国气象局主要采用月动

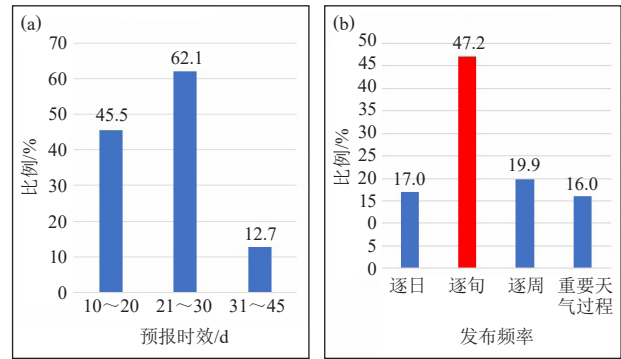


图4 各业务单位延伸期预报时效(a)、发布频率(b)比例

Fig. 4 Proportion of various forecast range (a) and frequency (b) of issuing extended-range forecast products

力延伸集合预测二代产品DERF2.0对10~30 d天气进行预测，此外，我国自主研发的次季节-季节-年际尺度一体化第三代气候模式预测业务系统（BCC-CPSv3）于2021年通过评审<sup>③</sup>，并逐步形成延伸期、月、季节到年际的客观化气候趋势预测业务体系。以气候模式为代表的客观化气候预测核心技术有了长足发展，客观化预测水平大大提升<sup>④⑤⑥</sup>。同时，我国多个省市级气象部门依据各自地区的天气特征，开发了具有地方特色的延伸期预报方法，采用可以较好表征10~30 d时段天气特征的因子作为可预报源开展业务。如：上海市气候中心以采用孙国武等提出的低频天气图法为主<sup>[25]</sup>，将MJO信号与数值模式预报得出的信息作为预报源<sup>[26]</sup>，在延伸期天气过程预报方面取得了进展。同时，基于动力相似模式识别，从大气非线性动力系统演变相似性着眼，结合机器学习方法，实现对动力模式历史回报、预报数据和降水历史观测资料等大数据融合运用，建立起对上海气候中心延伸期降水客观化预报的有效技术支撑<sup>[27]</sup>。四川省采用动力应用法，利用第二代气候预报系统（Climate Forecast System version 2, CFSv2），建立延伸期高温、降水和强降温过程的预报模型，预报延伸期逐日环流场和四川省台站逐日降水、最高温度和最低温度。3次预报试验和回报结果表明：该方法可以实现提前11~30 d报出大型天气的主要发生时段、落区和强度<sup>[28]</sup>。山东省自2017年起，开展延伸期高温过程的预测业务试验，采用CFSv2/WRF嵌套的动力降尺度方法，对山东省高温过程进行了逐旬滚动预报，建立了相应的业务流程<sup>[29]</sup>。天津市气象

① 国家气象中心三项成果通过业务化评审. [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxkj/2011xkjdt/202112/t20211229\\_4337305.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxkj/2011xkjdt/202112/t20211229_4337305.html).

② 中央气象台开展预报产品业务化评审. [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/ywfw/202112/t20211227\\_4327719.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/ywfw/202112/t20211227_4327719.html).

③ 国家气象信息中心. [http://data.cma.cn/dataService/cdcindex/datacode/A.0012.0001/show\\_value/normal.html](http://data.cma.cn/dataService/cdcindex/datacode/A.0012.0001/show_value/normal.html).

④ 气候趋势预测产品应用前景看好. [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/ywfw/202112/t20211229\\_4335792.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/ywfw/202112/t20211229_4335792.html).

⑤ 气候预测：奔“早”而行 向“准”发力|2021我们的答卷. [https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2021zt/20211227/202204/20220411\\_4748641.html](https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2021zt/20211227/202204/20220411_4748641.html).

⑥ 北京冬奥会气象服务盘点系列报道·科技.“国之重器”显锋芒 洞悉风雪啸长空. [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxw/2011xqxw/202203/t20220307\\_592822.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxw/2011xqxw/202203/t20220307_592822.html).

局依托延伸期尺度过程预测研究成果,将环流相似、低频关键区分析、DERF2.0气候模式解释应用等预测方法应用到海河流域延伸期强降水过程预测中,用于预警灾害性天气<sup>①</sup>;同时,天津市气象局目前正重点研发基于时空投影模型的京津冀延伸期天气过程预测技术,期望进一步提升京津冀地区10~30 d天气过程的预测预报能力<sup>②</sup>。福建省气候中心率先将大气低频理论运用于延伸期预报方法研究和业务<sup>③</sup>,以ISO作为对持续性异常事件的主要预报源,对前汛期持续性暴雨进行预测<sup>[30]</sup>,并以海温、季风槽等预报因子对台风活跃期展开监测,提高了对暴雨和台风等灾害性天气过程的延伸期预报能力<sup>[31]</sup>;同时利用低频扰动增量法,抓住大气低频信号,以此提高华南地区冬季低温延伸期预报的准确率<sup>[32]</sup>。江苏省气象局自主研发统计和动力相结合的延伸期预报技术,其中统计方面主要基于大气低频振荡特征,通过建立低频天气图的方法研发了多变量的时滞回归模型,动力方面主要基于国内外主流气候模式结果,通过可预报分量提取技术,进行误差订正,插值到站点或分辨率更高的格点上来得更精确的延伸期预报产品<sup>④</sup>。粤港澳大湾区采用机器学习算法,建立了更为客观的延伸期预报技术体系<sup>⑤</sup>。

问卷分析结果进一步印证了上述延伸期预报业务的相关研究。总体而言,我国各业务单位在延伸期预报业务中采用的预报方法多样(图5)。其中采用国内外模式预报方法的业务单位占比达50.9%,相似分析预测、概率统计、解释应用预测、多元回归、低频图等统计方法的使用也较普遍。对于延伸期预报的预报因子使用,大部分单位采用大气低频振荡因子,少部分采用土壤湿度、海温等地表缓变信号和平流层极涡季节内缓变信号作为可预报源展开该时段内的预报。我国目前仍存在用于业务预报的预报因子单一的问题。

### 2.1.2 国内外现状对比

通过阅读国内外延伸期预报相关文献,浏览各国、各地区气象局以及S2S官方网站的资料等调研方法<sup>⑥</sup>,对美国、欧洲、加拿大、英国、韩国五个发达国家和地区以及发展中国家印度的延伸期预报业务现状分别展开了调研,并结合我国业务现状进行对比分析。调研结果如表1所示。

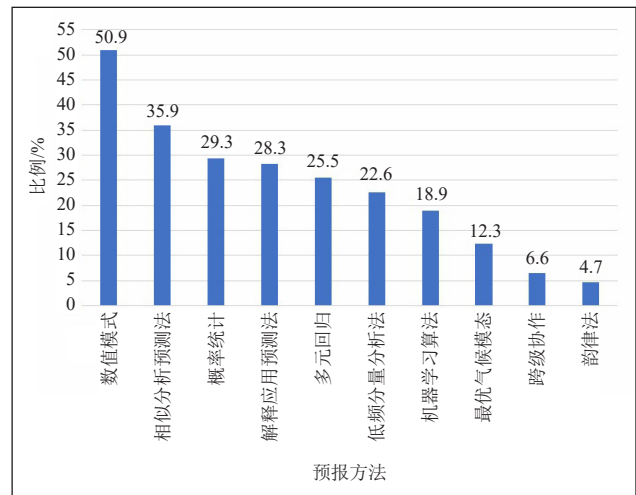


图5 各业务单位延伸期预报采用的预报方法比例  
Fig. 5 Proportion of usage of forecast methods for extended-range forecast

欧洲中期天气预报中心(ECMWF)是当前国际领先的中期预报数值中心<sup>[33]</sup>,预报水平一直处于国际前沿地位<sup>[34]</sup>。预报方法及预报频率:ECMWF基于海气耦合模式<sup>[35]</sup>(前10 d采用大气模式,10 d以后的延伸期预报将中期天气预报延伸,考虑海气耦合作用),以每周两次的预报频率发布未来0~46 d的预报产品。预报产品包括:1) 12 h累计降水量<sup>[35]</sup>、海表温度、850 hPa比湿;2) 距平(周平均):地表温度场距平、地表2 m气温场距平、总降水量、平均海平面气压、200/500/700/850 hPa高度场、2 m最高/最低气温距平、10/200/500/700/850 hPa温度距平值、地表气压及距平、10/100 m和10/200/500/700/850 hPa风场距平、日照时数、海表面温度距平;3) 绝对值:200/500/700/850 hPa高度场;4) 概率分布(周平均):地表面温度场、地表2 m气温场、总降水量、平均海平面气压;5) 距平概率:地表面温度场、地表2 m气温场、总降水量、平均海平面气压、降水距平百分率;6) 极端预测指数(EFI)和尾部偏移(SOT):地表2 m气温场、总降水量;7) 周平均海平面气压场、每月预测集合平均值的周平均值、地表2 m气温周平均距平大于零的概率<sup>⑦</sup>。在预报效果方面,随着天气数值模式不断发展,嵌入了海温、陆面等外强迫信息,ECMWF模式相应预报时效和水平不断提升<sup>[36-38]</sup>,10 d内ECMWF模式预报准

① 天津:提升海河流域水旱监测预报及风险预警能力. [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xgzdt/201907/t20190724\\_530863.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xgzdt/201907/t20190724_530863.html)。

② 天津:组建延伸期预测创新团队. [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xgzdt/201911/t20191104\\_538952.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xgzdt/201911/t20191104_538952.html)。

③ 福建省气候中心:青年勇担当 风雨砺初心. [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202009/t20200929\\_564113.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202009/t20200929_564113.html)。

④ 江苏省延伸期预报业务. [https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2019zt/20190513/2019051308/201905/t20190513\\_524481.html](https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2019zt/20190513/2019051308/201905/t20190513_524481.html)。

⑤ 粤港澳大湾区气象发展规划(2020—2035年). [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202110/t20211030\\_4090559.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202110/t20211030_4090559.html)。

⑥ <http://s2s.cma.cn/climate>。

⑦ <https://apps.ecmwf.int/webapps/opencharts>。

准确率稳步提升(图6a)。同时,集合预报的运用也使得可预报时效水平逐步提升(图6b)。近些年来延伸期时效模式预报水平的变化,不难看到12~18 d预报技巧在2005年后进步明显。

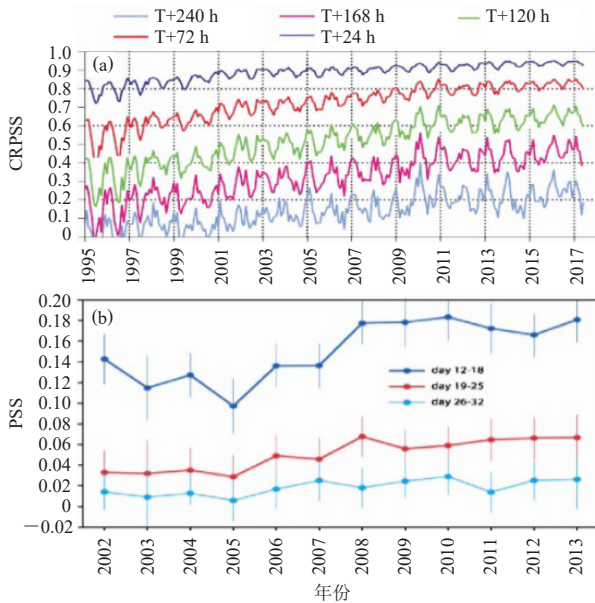


图6 ECMWF模式不同预报时效的预报评分(a)、周平均500 hPa高度场的预报评分(b)时间序列<sup>[36]</sup>

Fig. 6 Time series of prediction score at various forecast range (a), and prediction score for weekly mean 500 hPa height field (b) by ECMWF model<sup>[36]</sup>

美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属的美国气象环境预报中心(NCEP)<sup>①</sup>在延伸期预报方面,致力于深入延伸期预报前沿方法的研究,提高预报精确度和预报时效,以增强对极端天气的预报能力。预报方法及频率:NCEP采用海气耦合模式进行延伸期的数值预报部分,其中大气部分利用全球预报系统(GFS),海洋部分采用普林斯顿地球物理流体动力学实验室(GFDL)海洋模式<sup>[35]</sup>。并以逐日的预报频率发布未来0~44 d的预报产品,主要发布预报时效为6~10 d和8~14 d的延伸期预报产品。其中,对于8~14 d业务预报,NCEP采取的方法包含统计方法(如:神经网络等机器学习算法、遥相关等基于经验模态分解、对主成分(PC)的回归、滞后多元线性回归、自然相似、经验位相传播EPP等)和数值方法(如:中期集合预报、高分辨率的中期模式<sup>[35]</sup>)等。其延伸期预报产品,除逐日发布地表2 m气温、降水量距平和百分率、200/500/700/850 hPa高度场及距平、200/500/700/850 hPa和10 m风场<sup>[1]</sup>、极端温度、极端

降水、极端风速等常规的预报产品外,还对遥相关指数<sup>[39]</sup>、MJO指数<sup>[40]</sup>、风暴路径和阻塞高压等环流系统<sup>[41]</sup>以及外强迫条件(如海温等)进行了有效的监测<sup>②</sup>。

加拿大环境和气候中心(ECCC)的延伸期预报基于全球集合预报系统<sup>[19]</sup>,逐周发布未来0~32 d的预报结果。延伸期预报产品包含温度、降水、风场以及位势高度场等常规产品,如:温度的偏低、偏高和正常<sup>[35]</sup>、海表面温度及距平、2 m气温及距平、2 m最高/最低气温距平、200/500/700/850 hPa高度场及距平、总降水量、降水距平百分率、地表气压及距平、平均海平面气压及距平、200/500/700/850 hPa和10 m风场。

英国气象局(UKMO)延伸期预报主要采用HadGEM3气候模式中的海气耦合模式,同时也会采用欧洲中期天气预报中心和美国等模式预报产品的全球预报模式,并按照逐周的预报频率发布未来5~31 d的预报产品。其中预报产品除了温度、降水、风场以及位势高度场等常规产品外,还有4~10 d、11~17 d、18~31 d的累计降水、日照、风速、风向和能见度<sup>[41]</sup>。

日本气象厅(JMA)利用全球集合预报系统<sup>[6]</sup>,逐周发布0~33 d预报产品,对累计降水量及其距平、平均海平面气压及距平;2 m气温及距平、2 m最高/最低气温距平、海表面温度及距平<sup>[1]</sup>、200/500/700/850 hPa温度距平、总降水量、降水距平百分率、地表气压及距平、200/500/700/850 hPa和10 m风场、200/500/700/850 hPa高度场及距平、850 hPa比湿进行预报。

韩国气象局(KMA)多采用动力和统计相结合的方法来驱动全球谱模式<sup>[40]</sup>,逐周发布0~30 d预报产品,对海表面温度及距平、2 m气温及距平、2 m最高/最低气温距平、200/500/700/850 hPa温度距平、200/500/700/850 hPa高度场及距平、总降水量、降水距平百分率、200/500/700/850 hPa和10 m风场进行预报。

对于发展中国家印度<sup>[41]</sup>而言,印度气象局(IMD)采用物理统计法(如:相似法、大尺度环流参数与降水的非线性关系<sup>[41]</sup>)对5~20 d的周最高、最低温度和距平值、周范围内日均降水量与距平、850 hPa风场的周平均和距平值、20~25 d印度夏季风的变化<sup>[42-43]</sup>进行逐周预报。其针对印度夏季风的预报,常采用相似法将预报的主成分和对应空间模态进行重组,来预报20~25 d的印度夏季风变化。

国内外延伸期预报业务现状的对比分析表明,国内外延伸期预报业务产品均包含对基本气象要素(降

① <https://mag.ncep.noaa.gov/model-guidance-model-parameter.php>.

② <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/forecasts/>.

水、温度、风场、气压)趋势变化的预报,部分国家和地区还对持续性环流造成的重大天气过程进行预报。发展中国家(印度、中国)延伸期预报产品虽然涵盖面较广,但相比欧美等发达国家和地区,缺少对部分外部强迫条件及风暴路径和阻塞高压等环流系统的监测。但另一方面,对比印度,中国气象局延伸期预报除含有MJO的监测和大气污染过程等的预报产品外,延伸期预报发布频率与预报时效更为领先,与主要发达国家和地区持平。在延伸期预报技术和方法方面,国内外气象部门均大多采用动力-统计相结合的预报方法。其中,欧洲中心、美国、英国、加拿大等发达国家和地区多采用海气耦合模式和全球集合预报系统相结合的预报方法,将动力-统计相结合的方法应用于延伸期预报业务中,实时业务模式主要以向公众发布未来2周的预报产品为主。而我国国家级气象部门主要采用由我国自主研发的月动力延伸预测模式系统与NCEP、ECMWF的预报模式资料相结合的国内外模式,并针对各地区的区域特色,采用不同的预报方法(如:韵律方法<sup>[44]</sup>等相似分析法、概率统计、解释应用预测法、低频波图、多元回归、CFSv2模式<sup>[45]</sup>、时空投影模型<sup>[13, 45]</sup>、MJO降尺度模型<sup>[46-47]</sup>等)来制作针对性的延伸期预报产品,将其应用于实际的业务中。

### 2.1.3 延伸期预报未来发展方向

目前,WWRP和WCRP两大科研团体共同发起的S2S预测已经进入第二阶段(S2S预测改进),国内外延伸期预报研究重点主要包含MJO预测和遥相关、土地初始化和配置、海洋海冰初始化条件和配置、气溶胶影响、平流层以及S2S的集合分析<sup>①</sup>。延伸期预报领域通过研究MJO和高影响天气的关系以及热带-温带间的相互作用来发掘延伸期预报在2周到2个月时间尺度内的预报潜力。此外,陆气相互作用、关键海冰过程、气溶胶的可预报性、平流层和对流层的耦合作用等方面的相关研究均有序开展,旨在提高延伸期预报的能力与准确性<sup>②</sup>。

我国除参与该方面相关研究外,还计划以大城市为引领,加深对延伸期预报业务的研究。北京将作为大城市代表着重发展5 km分辨率11~30 d延伸期预报,并分区提供15 d逐日、10 d逐15分钟精细化预报产品,对日益频繁的极端天气展开预报,推动气象信息向生产要素转变,为中国气象现代化建设做出卓有成效的贡献<sup>③</sup>。

① ECMWF. A new book on the challenges of extended-range prediction. <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/science-blog/2019/new-book-challenges-extended-range-prediction>.

② WWRP/WCRP Sub-seasonal to Seasonal Prediction Project (S2S) ([wcrp-climate.org](http://wcrp-climate.org)). <https://www.wcrp-climate.org/news/wcrp-newsletter/wcrp-news-articles/1373-s2s-phase-ii>.

③ 北京:大城市气象保障服务能力提升工作方案印发. [https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xgzdt/202112/t20211229\\_4337245.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xgzdt/202112/t20211229_4337245.html).

## 2.2 人才协同培养

根据中国气象局于2015年印发的《关于加强气象人才培养工作的指导意见》以及《全国气象现代化发展纲要(2015—2030年)》,我国对气象人才协同培养的重视程度大幅提升。近三年来,在理论政策的指导下,我国的人才协同培养机制已经在局校合作<sup>[55]</sup>的带动下趋于成熟,为气象部门输送了大批气象预报业务人才,但是人才资源在各预报领域的分配还处于不断调整和完善阶段。因此,为了解延伸期预报人才储备情况及发展策略,探究延伸期预报未来发展的趋势,本研究基于各气象业务单位延伸期预报业务人才队伍现状和需求、经费支持、培训情况三方面的调研结果,揭示了人才协同培养现状以及业务单位对高质量专业化人才的需求状况。

图7中给出了基于问卷调查的人才需求情况。其中,延伸期业务从业人数是指气象业务从业人员中,主要职责或具体的业务岗名称是延伸期预报的人数。人才需求比例来源于问卷调查,是指需要延伸期预报人员的单位与同级别参与问卷的所有单位之比。如图7a所示,多数气象业务单位延伸期预报业务现有从事人员与近三年内招聘的定向人才较少,为1~3;极少数业务单位该项业务的从事人员为8~12人,主要分布于华东和华南地区。学历方面(图7b),延伸期预报业务从业人员学历普遍较高,硕士学历及以上占比70%,其中博士率15%,表明延伸期预报业务对高精尖人才的需求较大。另外,通过分析各级业务单位的人才需求情况,业务单位对延伸期预报定向人才的需求随着单位级别的升高逐渐增多(图7c),这也从侧面说明,各级单位对于延伸期预报业务的关注度随单位级别的升高呈现上升趋势。

除了人才外引,延伸期预报人才队伍的内培也很重要。开展相关业务培训和专项经费支持是培养人才的两大有效途径:延伸期预报相关业务培训能让气象工作者更好地了解此业务,激发兴趣,培养能力;专项经费可保障和促进与延伸期预报业务相关研究的开展。本研究较难获取所有气象局对于经费以及培训业务的资料,因此仅根据问卷调查数据进行讨论。调查问卷分析结果显示,我国延伸期预报业务相关培训的开展情况不容乐观,专项经费支持不足。其中仅有27.5%的气象业务单位近三年来开展了有关延伸期预报的培

表1 国内外延伸期预报现状对比

Table 1 Comparison of current state of extended-range forecasts between China and foreign countries

国家和地区	预报方法	预报时效	预报频率	预报产品
中国气象局 (CMA)	基于第2代动力延伸预测模式系统的BCC_CSM1.2模式 <sup>[6]</sup> 、CFSv2模式 <sup>[45]</sup> 、大气低频振荡 <sup>[46-51]</sup> 、时空投影模型 <sup>[13, 45]</sup> 、MJO降尺度模型 <sup>[46-48]</sup> 、韵律方法 <sup>[44]</sup> 、时滞回归模型 <sup>[1]</sup>	0~40 d	逐日 <sup>[1]</sup>	1) 降水距平百分率、气温距平、地表2 m气温场; 2) 降水和温度的概率、强降水; 3) 200/500/700/850 hPa高度场; 4) 海平面气压场; 5) 200/500/700/850 hPa风场; 6) MJO实时监测 <sup>②</sup> ; 7) 大气污染过程 <sup>[24]</sup> ; 8) 气温距平(逐候、逐旬)网格预报产品、降水网格预报产品; 9) 海表面温度及距平值、2 m最高/最低气温距平、200/500/700/850 hPa温度距平值、海平面气压距平值、平均海平面气压和距平、地表气压场及距平值、850 hPa比湿
欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)	(中期预报延伸的)海气耦合模式 <sup>[6]</sup> 、全耦合模式 <sup>[6]</sup> 、全球集合预报	0~46 d	每周两次	1) 12 h累计降水量 <sup>[55]</sup> 、海表温度、850 hPa比湿; 2) 距平(周平均): 地表温度场距平、地表2 m气温场距平、总降水量、平均海平面气压、200/500/700/850 hPa高度场、2 m最高/最低气温距平、10/200/500/700/850 hPa温度距平值、地表气压及距平、10/100 m和10/200/500/700/850 hPa风场距平、日照时数、海表面温度距平; 3) 绝对值: 200/500/700/850 hPa高度场; 4) 概率分布(周平均): 地表面温度场、地表2 m气温场、总降水量、平均海平面气压; 5) 距平概率: 地表面温度场、地表2 m气温场、总降水量、平均海平面气压、降水距平百分率; 6) 极端预测指数(EFI)和尾部偏移(SOT): 地表2 m气温场、总降水量; 7) 周平均海平面气压场、每月预测集合平均值的周平均值、地表2 m气温周平均距平大于零的概率
美国国家环境预报中心 (NCEP)	海气耦合模式(GFS, GFDL) <sup>[35]</sup> 、中期集合预报、高分辨率的中期模式 <sup>[35]</sup> 等、结合统计方法 <sup>[52-53]</sup>	0~44 d <sup>[1]</sup>	逐日 <sup>[1]</sup>	1) 地表2 m气温场及距平, 总降水量、降水量距平和百分率 <sup>[1]</sup> ; 2) 200/500/700/850 hPa高度场及距平, 200/500/700/850 hPa和10 m风场 <sup>[1]</sup> ; 3) 极端温度、极端降水、极端风速 <sup>[59]</sup> ; 4) 遥相关指数 <sup>[59]</sup> ; 5) MJO指数的监测 <sup>[40]</sup> ; 6) 海温等外强迫条件监测、风暴路径和阻塞高压等环流系统监测 <sup>[41]</sup> ; 7) 海表温度及距平、2 m最高/最低气温距平、200/500/700/850 hPa温度距平、地表气压及距平、平均海平面气压及距平、850 hPa比湿
加拿大环境和气候变化中心 (ECCC)	全球集合预报系统 <sup>[6]</sup>	0~32 d <sup>[1]</sup>	逐周 <sup>[1]</sup>	1) 温度的偏低、偏高和正常 <sup>[55]</sup> ; 2) 海表温度及距平、2 m气温及距平、2 m最高/最低气温距平、200/500/700/850 hPa高度场及距平、总降水量、降水距平百分率、地表气压及距平、平均海平面气压及距平、200/500/700/850 hPa和10 m风场
英国气象局 (UKMO)	基于HadGEM3气候模式的海气耦合模式 <sup>[35]</sup>	5~31 d <sup>②</sup>	逐周	1) 平均、最高、最低温度; 2) 4~10 d、11~17 d、18~31 d的累计降水、日照、风速、风向和能见度 <sup>[54]</sup> ; 3) 海表温度及距平、2 m气温及距平、2 m最高/最低气温距平、200/500/700/850 hPa温度距平、总降水量、降水距平百分率、地表气压及距平、200/500/700/850 hPa和10 m风场、200/500/700/850 hPa高度场及距平、850 hPa比湿
日本气象厅 (JMA)	全球集合预报系统 <sup>[6]</sup>	0~33 d <sup>[1]</sup>	逐周 <sup>[1]</sup>	1) 累计降水量及其距平; 2) 平均海平面气压及距平; 3) 2 m气温及距平、2 m最高/最低气温距平、海表面温度及距平 <sup>[1]</sup> 、200/500/700/850 hPa温度距平、总降水量、降水距平百分率、地表气压及距平、200/500/700/850 hPa和10 m风场、200/500/700/850 hPa高度场及距平、850 hPa比湿
韩国气象局 (KMA)	采用动力和统计方法来驱动全球谱模式 <sup>[54]</sup>	0~30 d <sup>③</sup>	逐周	海表面温度及距平、2 m气温及距平、2 m最高/最低气温距平、200/500/700/850 hPa温度距平、200/500/700/850 hPa高度场及距平、总降水量、降水距平百分率 <sup>[54]</sup> 、200/500/700/850 hPa和10 m风场
印度气象局 (IMD)	采用物理统计法: 相似法、大尺度环流参数与降水的非线性关系 <sup>[42]</sup>	5~20 d <sup>④</sup>	逐周	1) 周最高、最低温度和距平值; 2) 周范围内日均降水量与距平; 3) 850 hPa风场的周平均和距平; 4) 20~25 d印度夏季风的变化 <sup>[42-43]</sup>

注: 表2中预报产品信息参考各国家和地区相关单位官方网站及S2S(CMA)网站。

训, 23.8%的业务单位含有专项经费发展该业务(图略), 且两者比例均随着业务单位级别的降低而减少(图8a)。不仅如此, 业务培训与经费支持的情况均呈现显著的地域差异(图8b), 其中东北地区开展相关业务培训相较于其他地区更多, 占比34.5%; 东北地区业务单位设置专项经费的占比最多, 达41.4%(此现象可能与东北地区省级业务单位人员填写人数较多

有关)。以上有关业务培训和经费支持的分析可以充分验证图7中得出的结论: 气象业务单位级别越低, 对延伸期预报人才的需求以及人才队伍建设的重视程度越低。

### 2.3 各级单位延伸期预报能力协同建设情况

问卷第三部分基于各气象业务单位延伸期预报的主要开展部门、同级单位内跨部门协作方式、不同级

① [http://cmdp.ncc-cma.net/pred/md\\_gen2.php](http://cmdp.ncc-cma.net/pred/md_gen2.php)。

② <https://www.metoffice.gov.uk/weather/forecast/uk>。

③ <http://web.kma.go.kr/eng/weather/forecast/long-range1.jsp>。

④ <https://mausam.imd.gov.in/>。

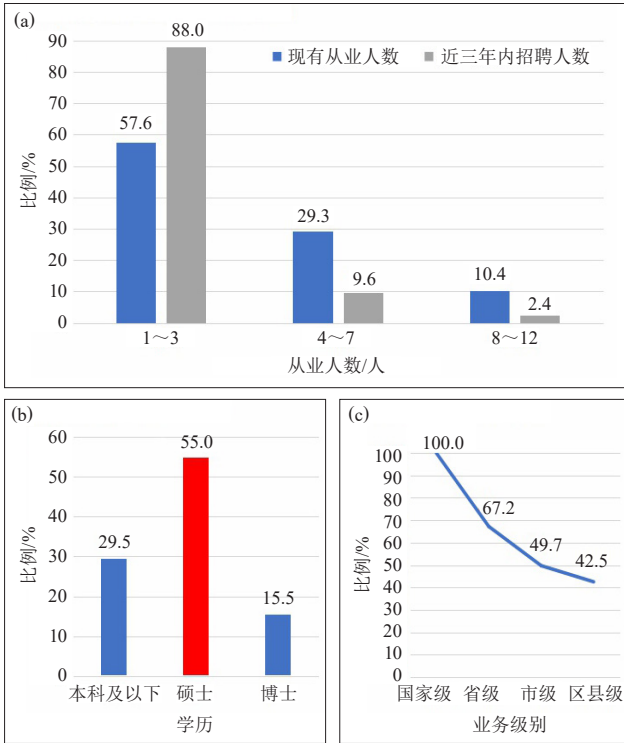


图7 延伸期预报业务从业人数和近三年招聘人数比例 (a)、从业者学历比例 (b)、各级业务单位对延伸期预报人才需求比例 (c)

Fig. 7 Proportion of different numbers of preexisting faculty for making extended-range forecast and recruits in recent 3 years (a), education levels of current faculties in extended-range forecast (b), and proportion of meteorological bureaus at different levels that have demand for talents in extended-range forecast (c)

别单位间的跨级协作方式以及各级业务单位延伸期预报工作范畴四个方面对各级业务单位延伸期预报能力协同建设情况展开调研。

中国气象局延伸期预报员表示，国家级业务单位延伸期预报业务主要在气候中心和气象台开展，与问卷调研结果一致，省级业务单位的气候中心在延伸期预报工作中的参与度相比于气象台更高，市级、区县级业务单位参与延伸期预报业务的主要部门为气象台（图9）。其中，少部分省局、市局、区县局则有信息中心、科研所、科研服务中心和生态农业中心作为辅助部门参与该业务。

国家和省级气象业务单位同级间跨部门协作程度相比于市级和区县级业务单位更高。国家级和省级业务单位中有41.7%开展了跨部门协作，且省级业务单位气候中心间也会就延伸期预报业务展开相关探讨，而市局和区县局中仅有27.5%的气象业务单位有此类协作（图略）。各气象单位跨部门协作方式（图10a）大多为联合会商、预报平台共享，部分单位也采取共享

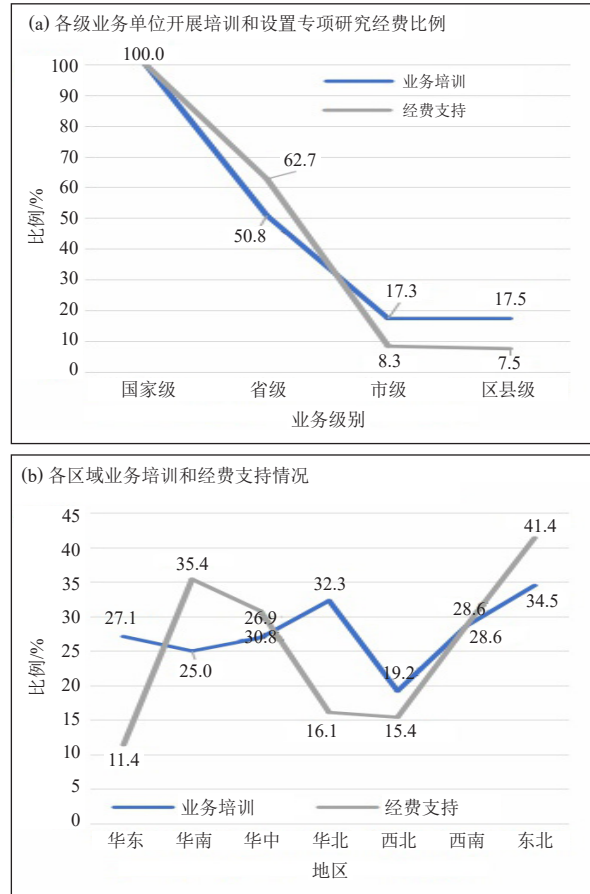


图8 各级业务单位 (a)、各区域 (b) 开展延伸期预报业务培训和设置专项经费发展延伸期预报业务比例

Fig. 8 Proportion of meteorological bureaus at different levels (a) and in different regions (b) that carries out training courses and set up special funds for extended-range forecast

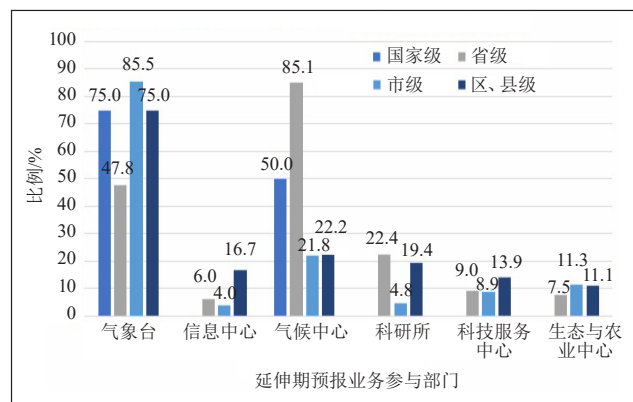


图9 各级业务单位延伸期预报业务的参与部门比例  
Fig. 9 Proportion of participation of various departments in operational extended-range forecast for meteorological bureaus at all levels

基础气象数据预报、开展突发事件预警、制作气象服务产品、人才资源共享、联合技术攻关及理论研究等方式。在跨级协作的方式上（图10b），主要为上级业

务单位将延伸期预报产品与下级单位共享，另外有部分上级单位会指导、协助制定下级业务单位延伸期预报业务的规范、流程、产品种类等，少数则采用延伸期预报人才和专家挂职、关键技术的理论指导和实操培训等方式为下级单位提供相关理论与技术的支持。

而下级单位面对主要来自上级单位延伸期预报产品（图10c），多数会采取优化、检验的二次处理方法对预报产品进行改善，少数单位会将预报评估结果向上进行反馈。

基于上述对各级单位协作的调研，并结合气象工作

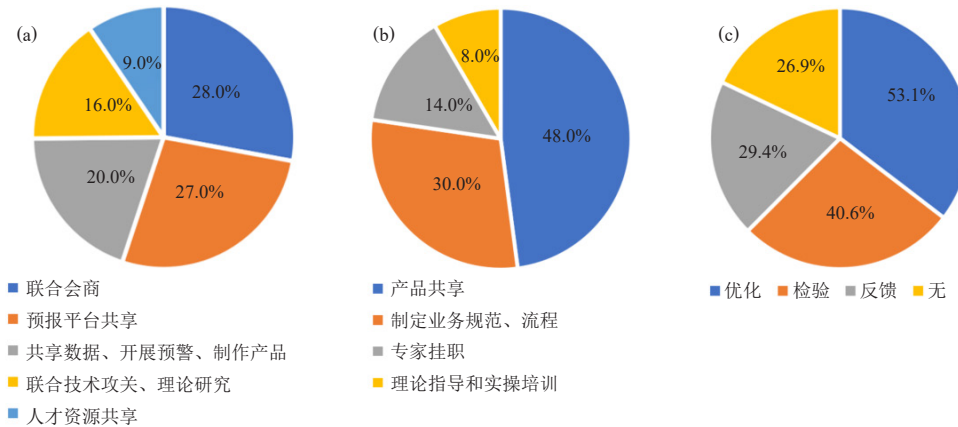


图10 延伸期预报业务跨部门协作方式及比例 (a)、上级对下级单位的指导形式及比例 (b)、下级对上级业务单位产品的处理方式及比例 (c)

Fig. 10 Extended-range forecast operation by cross-department efforts and their respective proportion (a), supervision pathways for the upper-level meteorological bureau to low-level meteorological bureau and their respective proportion (b), processing pathways for the low-level meteorological bureau to the forecast products provided by the upper-level meteorological bureau and their proportion (c)

者的反馈，延伸期预报业务在各单位间的分工主要呈现出以下特征：国家级和省级单位负责开发完善相应技术方法；开展延伸期预报业务的市及区县级单位对上级单位输送的产品进行应用和改善；但较多市级和区县级单位并未开展延伸期预报业务。

### 3 结论

本文采用文献调研法、问卷调研法、访谈调研法，从延伸期预报的预报产品、预报方法和预报因子等方面回顾了国内外延伸期预报业务现状。通过对比分析发现，以欧洲和美国为代表的发达国家和地区发布的延伸期预报产品较为丰富，且欧洲、美国、加拿大、英国等将海气耦合模式结合全球集合预报系统作为核心技术发布10~30 d时段的延伸期预报产品，为各国延伸期预报提供可靠的资料来源。相较于欧美，以中国和印度为代表的发展中国家预报产品涵盖面不够广。我国虽然是发展中国家的一员，延伸期预报业务不够成熟，仍处于探索阶段，但相较于其他发展中国家，又呈现出不同的特点。我国相较于印度，不仅预报产品较为全面，而且预报时效和预报频率也较为领先，与主要发达国家和地区持平。此外，我国虽然仍在采用国外前沿模式系统和资料，但近年来在该领域不断探索，自主研发了一套月动力延伸期预测模式系统，并进行持续性的优化改良。同时，我国各气象

部门针对不同区域的地理差异、业务需求，不断创新方法、变革技术，朝着建立一套预报方法区域化、预报产品多样化、预报结果准确化的特色延伸期预报体系的目标不断前进。

其次，本工作就人才协同培养和各单位延伸期预报能力协同建设展开调研，分析出延伸期预报在当前发展过程中存在的问题：我国业务单位延伸期预报相关培训开展较少、专项经费不足，不利于延伸期预报人才队伍建设及相关科研成果的应用转化。各单位跨级协作以及同级单位跨部门协作程度较低，市级、区县级业务单位应承担的延伸期预报工作任务不明确，导致级别较低的业务单位对延伸期预报业务重视程度不够或并未开展该业务。但本研究较难获取所有气象局对于经费以及培训业务的资料，因此仅根据问卷调查得到的数据进行讨论。数据的缺失可能会使调查准确度欠缺，如：东北地区业务单位设置专项经费的占比最多，此现象与东北地区省级业务单位人员填写人数较多有关。

最后，基于以上结果以及问卷的“制约延伸期预报发展的因素”和“对开展延伸期预报的建议或创新思路”调研结果，为推进延伸期预报业务的发展，促进延伸期预报业务体制机制建设，本文总结提出了延伸期预报业务现存问题和相应的若干对策，详见表2。

表2 延伸期预报现存问题和对策

Table 2 Main problems in the current extended-range forecast and suggestions for possible solutions

现存问题	对策
部分业务单位(尤其是区县级气象局)对延伸期天气预报的关注度较低	1) 加强气象教育培训体系建设。 2) 加强国家级、省级、区县级业务单位的合作深度和广度, 组建上下一体、协同高效的气象科技创新队伍。 3) 以质量、绩效、创新等为导向, 建立延伸期预报考核指标体系。 4) 完善延伸期预报科技创新成果的评价机制和激励机制, 从而鼓励和引导业务单位研发人员对延伸期预报的关注和创新。
延伸期预报业务人才队伍水平偏低	1) 加强气象人才培养, 以国家级气象局为龙头, 带领组建延伸期预报基础理论研究、应用服务研究、前沿技术研究人才队伍。 2) 加强对气象跨学科人才和尖端技术的引进, 深化局校企合作深度与广度, 形成高水平的人才队伍。 3) 选派优秀人才访问进修, 强化气象人才教育培训模式, 推动人才队伍的转型升级。
气象业务单位与高校、科研院所所在延伸期预报技术方法以及人才培养方面交流合作较少, 前沿科研成果在业务预报中的推广应用和转化不足, 专业定向人才培养不足	1) 修订人才培养方案。结合延伸期预报的科研攻关和业务需求, 以“厚基础、专业化、强实践、重创新”为培养目标, 修订优化气象人才培养方案。 2) 搭建局校共享的教学、实习、创新平台和基地, 气象业务单位提供本科生和研究生去负责延伸期预报部门实习的机会。 3) 实施延伸期预报人才培养的双向培训。 高校→业务单位: 定期派高校相关领域专家到业务单位开展延伸期预报专题教育培训, 加强对延伸期预报专项研究人员的预报理论和技术指导, 提升业务能力; 业务单位→高校: 派骨干与高校专家开展交流反馈, 明确对延伸期预报人才的需求。 4) 打造“产学研结合、多元融合”的“双师型”师资队伍。通过邀请科研之星、行业气象名师为教师开展进行项目师资实训和培训、赴地方业务单位挂职培训和开展工程化实践, 提升高校教师工程化实践指导和理论创新能力。并邀请气象业务部门延伸期预报方面的行业专家, 参与授课, 打造丰富多元、密切对接业务的师资队伍, 为人才培养服务。 5) 充分发挥高校、科研院所所在延伸期预报理论研究技术攻关方面的优势, 积极向业务单位输送人才, 以提高业务单位延伸期预报水平。
气象业务单位与气象公司的交流合作较少, 服务产品的细化和拓展不够	1) 加强局企合作, 加强对延伸期预报及其交叉领域领军人才的培养和引进, 支持企业与业务人员的协同攻关。 2) 营造良好的气象科技创新和落地应用联动环境, 从而推动科技成果向气象业务服务的有效转化, 真正实现延伸期预报业务化、专业化。
气象局内部对延伸期预报专项人员的内培不够全面	在隶属于中国气象局的中国气象局气象干部培训学院开设延伸期预报专项培训班, 承担延伸期预报中高级专业技术人员的继续教育, 对延伸期预报业务的高新技术进行推广应用培训, 落实延伸期预报新技术新方法在我国实际业务中的应用。
专项经费、延伸期预报理论技术创新的内部激励机制的缺失	1) 加快设立延伸期预报重大科技创新成果专项资金, 保障延伸期预报业务基础研究和科技攻关的稳定发展。 2) 优化延伸期预报业务科研运行机制, 从而推动延伸期预报业务人才、资金、技术的一体化。 3) 完善延伸期预报理论技术创新科研资金的增长机制, 建立安全可靠的资金保障体系。
未明确设立跨级业务单位协作的制度、规范、流程	1) 加强组织领导, 健全职责明确、目标清晰的协同合作机制, 加快跨级别、跨部门间的有效衔接。 2) 科学规范预报流程、合理筹划业务布局; 加强地、市级预报业务单位(气象台)对延伸期预报产品的监督和评估。 3) 优化不同级别业务单位的职责分工, 推进延伸期预报业务向集约化方向发展。国家级和省级单位侧重该业务的技术支撑与开发, 市、区县级单位负责实际应用和评估反馈, 增加业务培训, 加强地、市级预报业务单位(气象台)对延伸期预报产品的检验。
业务单位内部相关部门工作缺乏针对性的划分和统筹	改进业务单位内部人员的研发分工, 优化延伸期预报岗位研发人员的比例, 逐步建立起职责清晰、上下一体的延伸期预报业务人员分工体系。

## 参考文献

- [1] 周波涛, 钱进. IPCC AR6报告解读: 极端天气气候事件变化. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
- [2] 金荣花, 马杰, 任宏昌, 等. 我国10~30天延伸期预报技术进展与发展对策. 地球科学进展, 2019, 34(8): 814-825.
- [3] 唐黎标. 我国重大气象灾害的应急管理研究. 防灾博览, 2021, (1): 38-41.
- [4] 康志明, 鲍媛媛, 周宁芳. 我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势. 气象科技进展, 2013, 3(1): 18-24.
- [5] 赵佳莹, 李永生, 班晋, 等. 2020年黑龙江省夏季延伸期强降水过程预报检验. 黑龙江气象, 2021, 38(2): 4-5, 14.
- [6] 章大全, 郑志海, 陈丽娟, 等. 10~30 d延伸期可预报性与预报方法研究进展. 应用气象学报, 2019, 30(4): 416-430.
- [7] 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件. 大气科学, 2003, (6): 1018-1030.
- [8] 伍荣生. 前言 台风研究中的一些科学问题. 南京大学学报(自然科学版), 2007, (6): 567-571.
- [9] 贾小龙, 陈丽娟, 高辉, 等. 我国短期气候预测技术进展. 应用气象学报, 2013, 24(6): 641-655.
- [10] 董敏, 吴统文, 王在志, 等. BCC\_CSM1.0模式对20世纪降水及其变率的模拟. 应用气象学报, 2013, 24(1): 1-11.
- [11] 丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 10~30 d延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌. 气象科学, 2010, 30(5): 569-573.
- [12] 肖子牛. 我国短期气候监测预测业务进展. 气象, 2010, 36(7): 21-25.
- [13] 徐邦琪, 臧钰歆, 朱志伟, 等. 时空投影模型(STPM)的次季节至季节(S2S)预测应用进展. 大气科学学报, 2020, 43(1): 212-224.
- [14] 虞越越, 严睿恺, 蔡鸣. 平流层大气质量环流脉冲事件与北半球冬季大陆尺度寒潮低温的次季节尺度预测. 气象科技进展, 2021, 11(3): 92-102.
- [15] Yu Y, Cai M, Shi C, et al. On the linkage among strong stratospheric mass circulation, stratospheric sudden warming, and cold weather events. Monthly Weather Review, 2018, 146(9): 2717-2739.
- [16] Yu Y, Cai M, Ren R, et al. A closer look at the relationships between meridional mass circulation pulses in the stratosphere and cold air outbreak patterns in northern hemispheric winter. Climate Dynamics, 2018, 51(7-8): 3125-3143.
- [17] Cai M, Yu Y, Deng Y, et al. Feeling the pulse of the stratosphere: an emerging opportunity for predicting continental-scale cold-air outbreaks 1 month in advance. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97(8): 1475-1489.
- [18] 何金海, 梁萍, 孙国武. 延伸期预报的思考及其应用研究进展. 气象科技进展, 2013, 3(1): 11-17.
- [19] 孙国武, 李震坤, 信飞, 等. 延伸期天气过程预报的一种新方法——低频天气图. 大气科学, 2013, 37(4): 945-954.
- [20] 焦艳, 黄菲, 高松, 等. 基于长短时记忆神经网络的辽东湾海冰延伸期预报方法研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 1-11.
- [21] 杨晓军, 韩林君, 张君霞, 等. 基于偏最小二乘回归方法的西北区寒潮延伸期预报. 大气科学学报, 2021, 44(3): 371-380.
- [22] 章毅之, 宋进波, 屠菊清, 等. 多变量时滞回归模型在江南地区初夏降水低频分量延伸期预报中的应用. 大气科学学报, 2017, 40(6): 833-840.
- [23] 杨秋明. 2013年长江下游降水低频分量延伸期预报的扩展复数自回归模型. 物理学报, 2014, 63(19): 463-473.
- [24] 杨欣悦, 谭钦文, 陆成伟, 等. 基于CFSv2的延伸期空气质量数值预报技术及效果评估. 中国环境监测, 2021, 37(5): 175-184.
- [25] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报. 高原气象, 2010, 29(5): 1142-1147.
- [26] 陈伯民, 梁萍, 信飞, 等. 延伸期过程预报预测技术及31应用. 气

(下转25页)

# 海平面观测及数据产品研发进展及展望

陈丽凡 曹丽娟

(国家气象信息中心, 北京 100081)

**摘要:** 海平面高度变化对人类的生存环境和生命安全等均会产生巨大影响, 开展海平面观测及数据产品研发, 对于全球和区域(如中国近海)的当前海平面变化状态、长期变化归因及未来变化趋势的分析评估等具有重要意义。当前, 国际上已有较为成熟的海平面观测系统(GLOSS), 其研发的数据产品为全球和区域海平面变化监测与分析等提供有力支撑; 国内, 国家海洋局也在积极推动卫星观测网和验潮站网的建立和加强, 并通过国家海洋科学数据中心公开发布了多套海平面观测数据产品。然而, 目前国内气候监测业务主要依赖国家海洋信息中心逐年提供的中国沿海海平面距平序列, 为了进一步提升海洋气候监测数据支撑能力, 充分发挥海平面观测数据在海洋灾害评估、应对气候变化等研究中的作用, 亟待加强多来源海平面观测数据的收集、评估及加工处理与业务应用等工作, 积极深入开展验潮站及卫星反演海平面高度数据的对比分析与有效融合, 在此基础上, 逐步构建可自主更新的全球和区域海平面高度序列。

**关键词:** 海平面高度, 验潮站, 卫星高度计, 海平面高度序列

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.003

## The Progress and Prospect of Sea Level Observing System and Data Product Development

Chen Lifan, Cao Lijuan

(National Meteorological Information Centre, Beijing 100081)

**Abstract:** Rising sea levels are global threats because they have huge impacts on human living environment and life safety. The development of sea level observing system and follow-up data products are particularly important to the analysis of global and regional sea level change, drivers of long-term sea level change and future trend. The global sea level observing system (GLOSS), as a relatively mature international sea level monitoring program, has been designed to provide data products for global/regional sea level observations and analyses. Meanwhile, the State Oceanic Administration of China is also actively promoting the establishment and strengthening of satellite altimetry and tide station networks, and has released multiple sea level data products. However, the domestic climate monitoring mainly depends on the annual coastal sea level anomaly series provided by the National Marine Information Center. Hence it is necessary to reinforce data collection, evaluation, product processing and operational application of the multi-source sea level observations so as to further enhance the supporting capacity of marine climate monitoring data and elaborate the application of sea level observation data in marine disaster assessment and climate change response. Moreover, the comparative analysis and fusion of sea level data from tide station and satellite observations deserve more attention, based on which it is feasible to construct self-renewable global/regional sea-level time series.

**Keywords:** sea level, tide station, satellite altimetry, sea-level time series

### 0 引言

地球四分之三的表面被海洋覆盖, 伴随着人类探测能力和技术水平的提升, 海洋正在逐步揭开其神秘面纱。我国是海洋大国, 拥有1.8万 km的大陆岸线、1.4万 km的岛屿岸线和约300万 km<sup>2</sup>的管辖海域, 加强对海洋的认识水平对国防、运输、经济及气候都有其重要的影响<sup>[1]</sup>。其中, 海洋水位观测在经济生产建设、科学研究、自然灾害预防等方面都起着至关重要

的作用, 其观测数据可用于: 1) 海平面变化、海洋环流等研究: 海平面变化趋势是全球气候变化系统的重要参考指标之一, 通过长序列海平面观测数据了解过去的海平面变化规律、预测未来的海平面变化趋势, 有助于预报海洋现象和应对海洋灾害; 2) 海洋和海岸工程设计: 海防和其他沿海基础设施设计过程中, 往往需要估算沿海极端海平面事件的发生频次等, 从而评估洪水风险等级; 3) 国家和地区的高程基准建立: 基于特定时期的平均海平面数据统计所得的国家和地区高程基准信息可用于土地调查、国界线的界定等; 4) 风暴潮、海啸等灾害性事件的监测: 近实时海平面

收稿日期: 2021年9月15日; 修回日期: 2022年1月1日  
第一作者: 陈丽凡(1989—), Email: chenlf@cma.gov.cn  
资助信息: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004200)

观测数据可用于海洋模式同化过程,从而提供洪水警报和海啸预警等信息;5)潮汐表制作和港口作业:潮汐表是海平面观测数据的主要产品之一,其在航运、军事和生产方面均有重要作用,如沿海的渔业、水产养殖业、农业、盐业、资源开发、港口工程建设、测量、环境保护和潮汐发电等,都需要掌握潮汐变化的规律<sup>[2]</sup>。

在全球变暖日益加剧的背景下,海平面上升已成为全球性的重大环境问题,全球及区域海平面变化研究是当前国内外海洋科学研究的热点问题<sup>[3]</sup>。自1990年来,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)先后发布了六次评估报告,均对海平面变化情况进行了描述,报告指出,全球变暖背景下,全球平均海平面上升的证据是确凿的,且明显加速,其中,海平面的上升速率从1901—1990年的1.4 mm/a,增加至1970—2015年的2.1 mm/a,再到1993—2015年的3.2 mm/a,并进一步增加至2006—2015年的3.6 mm/a(高信度)<sup>[4]</sup>。《中国应对气候变化的政策与行动》(2008年)中明确要求:要通过加强对海平面变化趋势的科学监测以及对海洋和海岸带生态系统的监管,提高沿海地区抵御海洋灾害的能力。自2000年以来,国家海洋局几乎每年开展一次我国沿海海平面监测、海平面变化影响调查与评价,分析结果表明,我国沿海海平面上升速率高于全球同期平均水平,面临的海平面上升影响风险更大<sup>[3, 5]</sup>。此外,中国气象局每年编制的《中国气候变化蓝皮书》也对中国沿海海平面变化情况进行评估,其2021年的报告指出,2020年,中国沿海海平面较1993—2011年平均值高73 mm,为1980年以来的第三高位<sup>[6]</sup>。

不断上升的海平面会对人类的生产、生活造成一定的影响,对人类的生存环境和国家安全等造成威胁。在生态环境方面,海平面上升会引发海岸侵蚀、海水入侵和土壤盐渍化等严重威胁到沿海和岛屿生态系统的灾害性事件,如,已有研究表明,正在上升的海平面已经对我国长江中下游的湿地生态环境构成了威胁,使得长江中下游湿地生态变得更加脆弱<sup>[7-8]</sup>。在经济发展方面,海平面上升减少了海岸带面积,从而影响沿海农业等相关经济的发展,此外,海平面上升带来的极端天气也会给沿海地区带来直接经济损失,如,研究表明,如果没有采取有效的适应措施,受极值水位上升影响的经济损失将随着海平面的上升而显著增加,到21世纪末可能达到全球国内生产总值(GDP)的10%。在民生安全方面,随着海平面上升,风暴和洪水发生将更频繁、更剧烈,风暴潮将到达更

远的内陆,从而威胁人类的生命财产安全,此外,海平面上升会导致咸水入侵沿海陆地的含水层、地表水和土壤,影响地下水的质量,进而影响饮用水的供给等<sup>[4]</sup>。在国家安全方面,海平面上升会导致小岛屿国家的国土受到被淹没的威胁,全球沿岸国家的领土面临逐渐流失风险,进而引起人口的跨境迁移、国籍和海洋边界变化等问题,如,由于海平面上升,2001年,太平洋岛国图鲁瓦发布申明,该国对抗海平面上升的努力失败,其国居民将逐步撤离,举国搬迁新西兰<sup>[9-10]</sup>。

海平面不可逆转的持续上升趋势,以及海平面上升对沿海地区和岛屿的自然环境、社会经济和生态系统等多方面的重大影响和严重威胁强调了海平面变化研究的重要性,而海平面上升的分析预测结果的可靠性直接源于观测数据集的质量<sup>[11]</sup>。为科学应对全球气候变化及海平面上升的影响、加强海平面上升对中国海洋灾害的风险管理和海洋环境的监测能力、满足《中国气候变化蓝皮书》及气候变化评估等业务科研的应用需求,需加强自主研发、追加更新的海平面气候数据及序列产品等的研发,从而加深对海平面变化规律及其影响的认识与理解,而这一切,需要我们对海平面的观测手段/设备、国内外海平面数据产品情况等有一定的了解,从而更好地部署相关监测系统及产品研发计划等<sup>[12]</sup>。

## 1 海平面观测

海面是指处于不停运动中的海洋表面,海平面则是指消除海洋中波浪和潮汐等波动后一定时间内海面高度的平均,是通过海面高度的观测数据统计得到的,目前对海面高度的观测手段主要包括验潮站和卫星高度计两大类<sup>[3-4]</sup>。

### 1.1 验潮站

验潮站是指在选定的地点,通过设置自记验潮仪或水尺来记录水位变化的观测站。随着现代科技的发展,各种不同原理的验潮方式不断涌现,从传统的水尺、浮子式验潮到新发展的压力式、雷达、声学等验潮,各种验潮方式各有其优缺点。其中,水尺验潮通过在选定的验潮水域打桩或利用现有港湾设施固定安装验潮水尺,其水位数据由人工目视观测并进行记录。该方法简单方便,可长时间免维护,设备费用低,但耗费人力,且观测数据受人为主观因素影响较大,目前多用于固定验潮站自记水位计的潮位校核或临时应急观测。浮子式验潮利用漂浮于海面的浮子,它随海面上下浮动,其随动机构将浮子的上下运动转换为记录纸滚轴的旋转,从而在记录纸上留下水位变

化曲线,其测量精度较高,稳定性好。目前我国主要采用浮子式水位计进行潮位测量。声学式验潮利用声波反射原理实现对水位高度的测量,根据传感器的安装位置,分为空气介质和水介质型验潮仪。这种潮汐观测方法设备成本低,但不便在离岸较远的海上验潮点进行验潮,其在美国的潮位观测中应用较多。压力式验潮将验潮仪安置于水下固定位置,通过检测海水的压力变化而推算出海面的起伏变化。该种验潮方式适用于远岸、近岸以及深海的潮汐观测,但对传感器的防护性要求高,测量过程中还需要水温、盐度、大气压力等信息进行潮位数据修订。雷达验潮通过测量电磁波往返海面的时间,结合雷达波传播速度,即可推算得到被测水面与雷达的相对距离<sup>[13]</sup>。

验潮站的观测数据最早可追溯至18世纪初,其具有长期稳定的特点,是研究20世纪以来海平面变化最主要的数据来源,在研究海平面局部特征和长期趋势方面具有不可替代的优势<sup>[3]</sup>。此外,利用验潮站近海精度高、数据长期稳定等特点,可以改正卫星近海数据精度及校正卫星测高数据的低频信号漂移等。但验潮站也有明显的使用缺陷,例如其空间分布和数量具有局限性。验潮站大多分布在海洋沿岸及岛屿上,在深海及开阔的海面分布较少,且总体呈北半球多南半球少的分布状态。其次,验潮站观测的海平面是以水准尺零点或者某一水准面为基准的相对海平面,其容易受到局部地壳垂直运动的影响,且最早采用固定水准尺验潮方法,其验潮数据由人工记录,难免存在记录过程中一些人为因素带来的误差<sup>[12, 14]</sup>。

全球海平面观测系统(GLOSS)是由政府间海洋学委员会(IOC)在1985年成立的一项国际间的合作计划,代表了世界水位观测技术的前沿,它的目标是建立一个高质量的全球和区域的海平面观测网,用于海平面气候变化和气象预警等科学研究和业务应用<sup>[2]</sup>。GLOSS主要包含6个全球验潮站资料中心:持久海平面中心(PSMSL)、延时资料中心(BODC)、快速资料中心(UHSLC)、水位联合档案中心(JASL/UHSLC)、水位实时资料监控中心(VLIZ)及验潮站的全球导航卫星系统资料中心(SONEL),各中心可提供不同采样频率(小时、天、月)的验潮站观测资料集,具体如表1所示。以PSMSL为例,其管理并发布全球近2000个验潮站的月尺度海平面数据,站点覆盖世界大部分海岸线(图1),各测站的资料长度从几十年到几百年不等。此外,GLOSS还有一个全球核心工作网(GCN),由均匀分布在全球的约300个潮位站组成,这些验潮站对全球性海平面变化趋势和上升速

表1 GLOSS观测网的6个全球数据中心<sup>[2]</sup>  
Table 1 Six GLOSS data centers<sup>[2]</sup>

	资料中心	职责	数据持有	更新实效
月均值	PSMSL	研制最终的月均海平面数据产品	GCN, GLOSS-OC, GLOSS-LTT	每年
延时模式	BODC	研制最终的高频海平面数据产品	GCN, GLOSS-OC, GLOSS-LTT	每年
快速模式	UHSLC	研制临时的质量控制数据产品	GCN, GLOSS-OC	每4~6周
小时数据产品	JASL/ UHSLC	研制最终的高频订正数据产品	GCN, GLOSS-OC	每年
海平面监测系统	VLIZ	原始数据监控	GCN, GLOSS-OC	近实时
GNSS数据	SONEL	GLOSS潮位站附近的GNSS数据收集	GCN, GLOSS-OC, GLOSS-LTT	每年

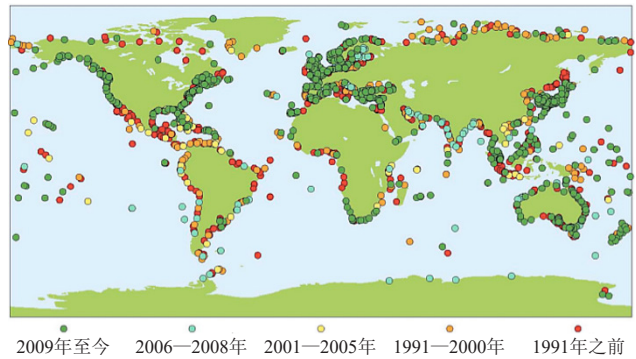


图1 全球潮位站分布示意图<sup>[2]</sup>  
Fig. 1 Distribution of tide stations<sup>[2]</sup>

率进行监测,并为长期气候变化研究提供帮助,如为IPCC报告中的海平面分析评估提供数据支持等。

中国的潮位观测历史可追溯至1860年,系统的验潮站工作始于1964年,重要的长期验潮站包括塘沽、烟台、青岛、吴淞、厦门和广州等<sup>[3]</sup>。随着《“一站多能”海洋(中心)站“十三五”实施方案》的落实,近年来,我国海平面观测站点逐渐增多,布局日趋合理,观测能力稳步提升。同时,业务化开展基准潮位核定工作,进行验潮系统相关技术培训,逐年对海洋站站址变迁、环境变化、零点调整和仪器更换等引起的资料均一化问题进行核定,形成了长期、连续、稳定的高质量海平面数据序列,为海平面与气候变化研究、海洋防灾减灾和海洋生态文明建设等提供重要支撑。目前,中国海平面观测网拥有100余个海平面观测站<sup>[15]</sup>,观测序列长度自1942年至今不等。《2020年中国海平面公报》资料显示,近海有15个空间分布均匀的站点可提供1980年至今的完整的海平面历史序列数据<sup>[16]</sup>。

## 1.2 卫星高度计

卫星测高是脉冲测距中主动式测距的一种,它利用卫星上装载的测高仪、辐射计和合成孔径雷达等仪器,通过发射天线向星下点发射一定频率的脉冲信

号, 并接收来自海面发射信号, 从而实时测量卫星到海表的距离; 进而结合已有的定轨方法获取精确的卫星高度, 再利用各种算法或模型给出各种误差源的改正项, 就可以确定出相对于椭球参考系的海表面高度值, 即绝对海平面。卫星测高最初只是为了确定海面形状, 现已广泛地应用于全球海平面监测、中尺度涡及环流的探测等领域的研究<sup>[7, 14, 17]</sup>。

卫星测高技术最早于1969年由美国著名的大地测量学者Kaulat提出, 随着现代计算机技术和空间技术的发展应运而生并趋于成熟(表2)。1973年, NASA在Skylab上搭载了测高计, 尽管该测高数据的精度较差, 甚至无法使用, 但其为卫星测量海面高度开创了先河, 证明了卫星测高的可行性。随后NASA在1975

年发射了测高卫星Geo-3, 该卫星轨道倾角为115°, 轨道高度为840 km, 测高精度为0.25~0.50 m, 为后续测高卫星的发射打下了坚实的基础。1978年, NASA发射了测高卫星SeaSat, 该卫星测高计使用了高压压缩比脉冲压缩技术, 由于电源故障问题, 该卫星只运行了3个月, 但获得了大量的海洋数据。随着卫星定轨及测高数据处理技术的发展, 卫星测高的测量精度也不断提升。1985年, 美国海军发射了测高卫星GeoSat, 该卫星执行了三年多的重复周期任务和18个月的大地测量任务, 为海洋时变及动态变化的研究提供了丰富的海洋信息。1998年, GeoSat的后继测高卫星GFO(GeoSat-Follow-On) 腾空, 该卫星的测高精度高达35 mm<sup>[14]</sup>。

表2 卫星高度计发展现状(截至2018年)<sup>[20]</sup>  
Table 2 Development of satellite altimeter (as of 2018)<sup>[20]</sup>

卫星平台	雷达高度计	运行时间	模式	波段	重访周期/d	轨道间距/km	测高精度/cm
Skylab	S-193	1973年	1	Ku	-	-	85~100
Geos-3	ALT	1975—1979年	1	Ku	23	-	25~50
SeaSat	ALT	1978年	1	Ku	17	-	10
GeoSat	Radar Alt	1985—1990年	1	Ku	17	8	4
ESR-1	RA-1	1991—1995年	1	Ku	35	80	3~4
TOPEX/Poseidon	ALT/Poseidon-1	1992—2006年	1	Ku和C	10	315	2~3
ERS-2	RA-1	1995—2003年	1	Ku	35	80	3~4
GFO	Radar Alt	1998—2008年	1	Ku	17	165	3.5
Jason-1	Poseidon-2	2001—2013年	1	Ku和C	10	315	2
ENVISAT	RA-2	2002—2012年	1	Ku和S	35	80	2
ICESat-1	GLAS	2003—2009年	4	1064 nm和532 nm	183	15	10
Jason-2	Poseidon-3	2008—2019年	1	Ku和C	10	315	2
Cryosat-2	SIRAL	2010年至今	1、2、3	Ku	369或30	7.5	1~3
HY-2A	HY-2A	2011—2022年	1	Ku和C	14	208	4
SARAL	Altika	2013年至今	1	Ka	35	80	2
Jason-3	Poseidon-3B	2016年至今	1	Ku和C	10	315	2
Sentinel-3A	SRAL	2016年至今	2	Ku和C	27	104	1
Tiangong-2	InIRA	2016—2018年	3	Ku	-	-	-
ICESat-2	ATLAS	2018年至今	4	532 nm	91	-	-
Sentinel-3B	SRAL	2018年至今	2	Ku和C	27	104	-
SWOT	KaRIN	2022年至今	1、3	Ka、Ku和C	20	-	-

继GeoSat发射之后, 测高卫星迎来了大的发展热潮。1991年, 欧空局成功发射了欧洲第一颗遥感卫星ERS-1, 该卫星的平均轨道为785 km, 轨道倾角为98.5°, 测高精度约为30~40 mm。1995年, ERS-1的后续卫星ERS-2发射成功, 该卫星主要执行精密重复周期任务。2002年, 欧空局又成功发射了ERS系列的后继卫星ENVISAT, 该卫星的轨道及测高计的测距模式都得到了较大的完善, 测高精度可达20 mm<sup>[14]</sup>。基于测高技术的发展, 为了更好的监测全球海洋变

化, NASA和法国空间局(CNES)于1992年联合发射了测高卫星T/P(Topex/Poseidon), 由于T/P测高卫星载有GPS接收机, 且对流层延迟和微波辐射均得到了良好的改正, 该卫星的测高精度为20 mm左右, 是目前公认测高精度最高的测高卫星之一, 其后继卫星Jason-1、Jason-2和Jason-3分别在2001、2008和2016年成功发射。这四颗卫星提供了迄今为止近30年连续的卫星测高数据, 是研究海洋环流及其变化、海面地形及海表高度长期变化最完整、精度最好的测高数据,

同时也是各区域海面高模型及全球海面高模型的基准数据。2013年, CNES和印度空间研究组织 (ISRO) 联合发射了测高卫星SARAL, 该卫星搭载Altika测高计, 是首次搭载Ka波段高度计的测高卫星, 提高了工作频率、垂直分辨率和脉冲重复频率, 可获得更高精度的测高数据<sup>[14]</sup>。

国内, 2011年, 中国空间技术研究院 (CAST) 在太原成功发射了中国首颗海洋观测卫星HY-2A, 该卫星的主要任务是监测海洋动力环境。2018年, 我国成功发射了HY-2A的后继卫星HY-2B, 该卫星可以覆盖世界90%的海域。2020和2021年, 我国又成功发射了HY-2C和HY-2D卫星, HY-2B、HY-2C与HY-2D测高卫星组网运行, 组成中尺度海洋动力环境监测系统, 共同构成中国海洋动力环境监测网, 实现对全球海面高度等要素的全天时、全天候高精度观测<sup>[14, 18]</sup>。

上述卫星测高计覆盖的海洋范围约为81°S—81°N, 在对海平面变化有着不可忽略影响的两极区域, 其数据还是空白的。由于激光在冰面的反射性较好, 2003年, NASA成功发射第一颗激光测高卫星ICESat-1, 主要研究两极冰盖的消融情况, 其后继卫星ICESat-2在2018年成功发射。2010年, 欧空局成功发射了测高卫星CryoSat-2, 其任务的目的在于测定冰冻圈的变化趋势, 该卫星有低分辨率、合成孔径雷达与合成孔径雷达干涉测量模式, 提升了测高数据的空间分辨率。其中, 合成孔径雷达干涉测量模式由于采样密度的增加, 能够监测冰盖边缘复杂的地形。欧空局还于2016年发射测高卫星Sentinel-3A, 该卫星采用合成孔径雷达技术, 其测高精度达到了7 mm, 并于2018年发射了Sentinel-3 (哨兵-3卫星) 系列的后续卫星Sentinel-3B<sup>[14, 19]</sup>。

卫星测高具有全天候、覆盖范围广、高频次、数据质量较高等优势, 是海洋领域重要研究数据之一。随着卫星测高技术的改进和完善, 其测量精度由米级到厘米级, 分辨率由百千米到几千米, 观测对象由最初的海洋扩展到冰面等区域, 如可在潮位站极度缺乏的南大洋地区开展全天候的重复、准确的观测。国际上, 通过卫星上搭载的雷达高度计, 已经形成了1992年至今的连续海平面监测能力。但是由于卫星测高仪观测条件的限制, 卫星测高在深海海域的精度虽然可达厘米级, 但在近海接收的测高回波受陆地和地球物理环境的综合影响, 其反射波形会发生改变, 数据质量大大降低, 甚至无法使用, 而验潮站主要分布于近海沿岸, 近海数据测量精度较高<sup>[14]</sup>。此外, 卫星测高数据存在轨道采样时空不规则的缺点, 给其使用带来

了很大的不便, 针对轨道随机获得的实测数据通过插值获得时间和空间规则的网格化数据是极为必要的<sup>[7]</sup>。

### 1.3 全球导航卫星系统 (GNSS)/验潮站联测

在采用验潮站相对海平面数据分析海平面长历史变化趋势时, 要考虑除气候变化因素外的陆地沉降对其影响。陆地垂向运动的普遍原因是冰川均衡调整, 此外, 一些局地性的因素也会造成陆地的垂向运动, 如大河三角洲沉积压实效应以及沿海高层建筑物修建、地下水过度抽取等都会造成局域性陆地沉降, 从而加剧相对海平面上升, 还有一些偶发因素如地震、板块运动等也会导致区域性的陆地升降, 从而影响沿海的相对海平面变化<sup>[14, 21]</sup>。因此, 需要建立与验潮站参考面点联测的GNSS站, 用于验潮站高程变化的监测。此外, 卫星测高测得的是绝对海平面, 想要让验潮数据与卫星测高数据的参考面相一致, 也需要建立与验潮站参考面点联测的GNSS站, 求出验潮站参考面的大地高, 进而求出验潮站测得的绝对海面高。

1997年, 根据科学研究和业务应用的需要, 以及在数据使用中暴露出来的一些问题, GLOSS工作组确立了4个工作重点, 其中一项就是将全球定位系统GPS对陆地高程变化的监测纳入到计划中来。2012年, GLOSS再次强调将加强其核心网络所有验潮站配备GNSS站的工作计划, 这一升级主要用于配合卫星测高数据的校准, 更好地确定相对于地心的海平面上升速度以及局地海平面变化。根据GLOSS技术材料说明, GPS接收器要尽量安装在接近验潮站的地方, 距离大约几百米以内, 要定期 (至少每年) 进行GPS水准点和验潮零点、基本水准点之间的连测<sup>[21-22]</sup>。

最近几年国内对基准核定工作给予了高度重视, 技术得到了很大提高, 管理也越来越完善, 取得了不少的成果。2009年始, 国家海洋局在沿海56个长期验潮站陆续增设GNSS观测设施, 建立了中国沿海GNSS业务化观测系统 (2010年建成)。但目前我国的验潮站基准核定工作还需进一步加强和完善, 例如: 我国海洋站从2008年开始开展GPS观测, 但由于时间序列短、稳定性差等问题, 到目前为止其还没有充分发挥应有的作用; 我国各验潮站水准联测时采用的联测基点不同, 联测时间不一致, 无法在全国范围内统一基准下分析各验潮站的地壳垂直形变。目前, 我国对沿海长期验潮站地壳垂直形变现状的了解仍相对匮乏, 制约着我国近海海平面变化研究工作的深入开展。进一步提高我国GNSS观测技术、资料处理能力、加强GNSS资料的应用, 对于提高近海验潮站基准核定能力有很大的帮助<sup>[22-23]</sup>。

## 2 国际海平面观测数据产品

目前, 国际上海平面高度数据产品主要有GLOSS的全球验潮站资料中心发布的从实时到历史、从定时到月尺度的验潮站相对海平面观测数据产品, GNSS/验潮站联测的垂直位移数据产品, 以及多个机构研发的多源卫星海平面融合数据及其全球平均海平面序列产品, 具体如下。

### 2.1 实时验潮站监测资料

VLIZ实时监控系統 (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php>) 提供全球和区域验潮站的实时运行状况监测, 并提供相关信息以快速检查各个站点的原始数据流, 此外, 该系统还提供全球实时验潮站相对海平面数据。整体上, 该系统不仅接收GTS传输数据, 同时还接收包括FTP等频道的传输数据, 但这些数据均没有经过质量控制处理, 数据质量不能得到保证。

### 2.2 定时值/日尺度验潮站资料

UHSLC数据库提供了两个质量控制级别的包含定时/日等不同时间分辨率的海平面观测数据 (<https://>

[uhslc.soest.hawaii.edu/datainfo/](https://uhslc.soest.hawaii.edu/datainfo/)), 两个质量控制流程分别对应快速交付(FD)和研究质量控制(RQD)两套资料集。其中, FD数据是在数据收集的1~2个月内发布的, 其只关注大级别转移和明显异常值的基本质量控制。在FD基础上, JASL结合其他一些海平面观测信息, 对获取到的数据开展综合质量控制, 形成RQD资料集, 该资料集每年更新, 更新后提交给PSMSL进行月尺度海平面数据的生成。其中, RQD资料集是目前经过质量控制的、数据量最大的全球定时值海平面数据集, 其质量控制过程主要包括: 1) 粗大误差(如数据跳变和时间偏移)检查和订正; 2) 对缺测小于25 h的数据进行插补; 3) 对相对海平面观测数据的参照面变动等问题进行订正; 4) 编制可描述性的站点信息及其质量评估结果。RQD的日均值海平面数据是在定时值数据上开展两步滤波生成的: 1) 从质量控制后的定时值数据中过滤掉全日潮和半日潮成分; 2) 采用卷积滤波器剔除残余的高频成分。最新资料显示, JASL可提供超900个站点的数据, 各站点的资料长度主要集中在5~30 a, 部分站点可提供超过70 a的数据(图2)。

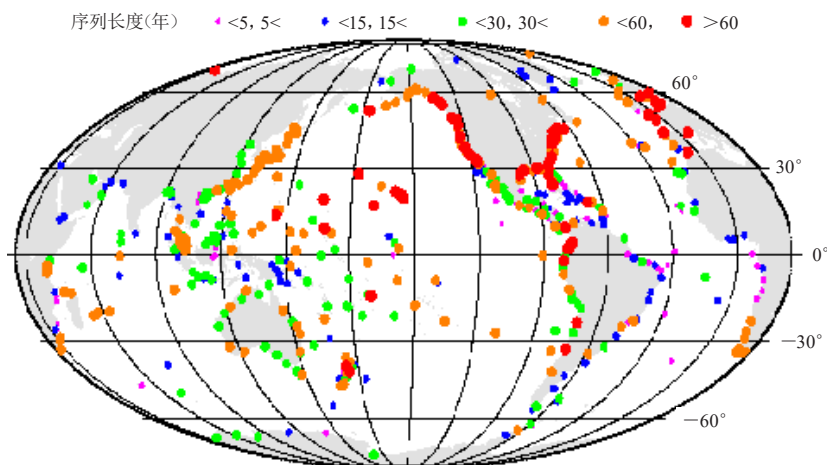


图2 JASL资料中各验潮站的数据长度(截止到2018年3月)<sup>[24]</sup>  
Fig. 2 Lengths of the sea-level time series in the JASL (as of March 2018)<sup>[24]</sup>

在JASL的定时值海平面数据基础上, BODC进一步整合了海平面观测记录对应的基准面等元数据信息, 从而发布了一套GLOSS观测网的“最终版”验潮站相对海平面定时值资料集, 其补充提供的基准面信息可用于海平面数据的均一化订正。

### 2.3 月尺度验潮站资料

PSMSL接受并发布全球约2000多个潮位站的月均和年均海平面数据 (<https://www.psmsl.org/>), 其中110多个含1900年以前的数据, 最早的记录可追溯至1806年(法国的一个站点), 其数据产品每年度追加更新一次。为保证发布的海平面数据质量, PSMSL会对接收

到的海平面资料进行检查, 以避免在数据中混入类似抄报错误或大的基准变化引起的误差等, 具体包括: 1) 检查月均海平面的年均值是否与接收的年均值一致; 2) 对资料进行“常识性”的一致性检查, 包括接收到的相对海平面数据的基准面与以前所用的基准是否一致; 3) 对长度超过20年的资料进行线性拟合, 通过分析观测值相对拟合值的偏离程度, 从而判断异常值; 4) 针对时间跨度 $\geq 20$ 年的资料所提供的基准面订正系数, 对其年均值进行线性回归, 以找出不正确的基准面信息; 5) 通过对比月均、年均海平面与临近年份的对应值, 从而判断突变值; 6) “颠倒”检查, 即

对月均海平面进行季节性波动检查，以判断季节波动是否“颠倒”；7)“伙伴”检验，即通过与邻站(“伙伴”，相距不到400 km)进行对比，以进一步判断并标记海平面异常值。

PSMSL提供两种类型的数据，分别是Metric和RLR。当其接收的月均和年均海平面资料通过以上质量检查后，将被整合成Metric资料集，其目前约含2300多个站点资料。由于Metric数据直接收集自各个国家和地区，其相对海平面观测数据的参考面不统一，即使是同一站点，不同年份的参考面也可能不相同。在Metric资料中，如果海平面资料能够对应到其验潮水准点，则结合这些参照面元数据信息，将海平面观测数据校正到同一参考面，从而保证同一站点的的海平面数据都相对一个参考点，该环节即为对质量控制后的Metric资料中的海平面数据进行均一性订正。订正后的数据将被整合成RLR资料集，其目前约有1548个站点的资料。此外，PSMSL的月均海平面是对日均值数据进行传统的均值统计，且当验潮站一个月含 $\geq 15$  d的实测数据时，才编制月均海平面；年均海平面则是对月均值数据进行加权平均，若验潮站有 $\geq 11$ 个月平均值观测数据时，则计算相应年均值，其中，每个月的权重对应为该月有实测数据的天数。为了避免月均值和年均值数据出现负值，每个验潮站的基准面被定义为低于平均海平面约7000 mm。目前，仅RLR资料集可以用于时间序列分析，如区域或全球范围的海平面长期变化研究，不在RLR资料集内的Metric站点资料则仅应用于不超过一年时间范围的海平面季节性波动分析<sup>[25-26]</sup>。

## 2.4 GNSS/验潮站基准联测资料

国际GNSS/验潮站基准联测工作组(TIGA-WG)是GLOSS全球验潮站观测网中的一个重要组成部分，它可以提供潮位站位置和垂直沉降速率，是国际GNSS服务为全球大地测量观测系统(GGOS)、全球气候观测系统(GCOS)和世界气候研究计划(WCRP)总体目标的实现做出的重要贡献。TIGA-WG的数据产品除可用于评估验潮站基准点的垂直沉降速率外，还可应用于卫星高度计数据的订正(<https://www.igs.org/wg/tiga/>)。TIGA对验潮站GNSS联测的精度要求是：站点位置误差在5~10 mm范围，站点垂直位移速率误差小于1 mm/a。

SONEL是GLOSS的GNSS数据汇编中心(<https://www.sonel.org/?lang=en>)，它通过与PSMSL和UHSCLC密切合作，开发了一个集成的全球观测系统，该系统可将潮位计和GNSS数据库连接起来，从而提供相关

数据服务。SONEL的目标是通过验潮仪(相对海平面)和现代大地测量技术(垂直地面运动)，为海平面长期趋势的研究以及卫星高度计的校准等，提供近海岸高质量的海陆连续测量。SONEL网站上GPS天解的解算结果是由拉罗谢尔大学(ULR)利用目前高精度GPS数据处理软件GAMIT/GLOBK解算的，其时间分辨率为定时值，要素包括验潮站坐标、卫星轨道、地球定向参数、天顶对流层延迟参数等。此外，SONEL网站还收编了三个数据分析中心提供的联测的GNSS站点观测得到的验潮站垂直沉降速率，包括：1)由美国内华达大地测量实验室(NGL)生产的NGL14，它提供了全球904个验潮站附近的、覆盖1996年1月至2019年4月的地面沉降速率；2)由美国喷气推进实验室(JPL)生产的JPL14，它提供了全球366个验潮站附近的、覆盖1994年1月至2019年12月的地面沉降速率；3)由德国地球科学研究中心(GFZ)生产的GT2，它提供了全球579个验潮站附近的、覆盖1994年1月至2015年12月的地面沉降速率。这三套资料集都满足各站点最短资料长度为3 a、整体上数据缺失不超过30%的条件。

## 2.5 多卫星融合产品

卫星测高数据有零级(Level 0)、一级(Level 1)及二级(Level 2)产品，分别对应直接从仪器上获取的原始数据、用一定的算法将Level 0产品转换成工程单位的产品及用重新跟踪将数据转换成地球物理学单位的地球物理数据。一般科学研究、业务应用等使用的是Level 2级及其后续处理产品<sup>[1, 14, 27]</sup>。其中，Level 2级产品包含：1)FDGDR，快速发布的地理记录数据，一般在3 h之内发布，主要用来进行天气预报、实时海况和海洋环流监测等；2)IGDR，中间临时的GDR数据，在约3 d后发布，主要用来对海洋环流进行监测、预报等，比FDGDR精度高；3)GDR，最终产品，约30~50 d内发布，包含了精密的仪器订正和轨道订正等。不同卫星的GDR数据可从不同机构的相关网页上进行下载，如：PO.DAAC发布的Version c的变轨后的Jason-1 GDR-D产品、ESA发布的变轨后的ENVISAT GDR-V2.1+产品、NOAA发布的Jason-2 GDR-D产品，以及国家卫星海洋应用中心分发的HY-2T版本IGDR产品<sup>[1]</sup>。

单卫星任务沿轨GDR数据存在轨道采样时空不规则的缺点，此外，由于单颗卫星大于100 km的轨道间隔，以及10~30 d不等的运行周期，极大地限制了卫星高度计沿轨数据在海洋中尺度涡、中尺度环流等科学研究中的直接应用。随着高度计卫星更新换代，其运行数量始终维持在3~4颗以上，充分利用多颗卫星

沿轨数据,在规则网格上融合产生二维数据产品,是克服沿轨数据局限性的有效方法<sup>[28-29]</sup>。相比沿轨GDR数据,融合数据可明显提高空间分辨率,且其空间分布均匀,时间序列可得到一定的延伸,数据可利用性更高,有利于联合其他气候数据进行海洋研究分析<sup>[7]</sup>。此外,多卫星融合数据经过了必要的标准化改正,如对流层干湿分量改正、电离层延迟改正、海潮和固体潮改正、极潮改正、海洋负荷潮汐改正、仪器改正以及反变气压计改正等。研究显示,基于多卫星融合数据分析得到的海面变化相对单卫星高度计分析得到的结果,其误差明显下降<sup>[1]</sup>。

目前,国际上应用最广泛的多卫星融合高度计产品为法国国家空间研究中心卫星海洋学存档数据中心(AVISO)对外发布的海表高度距平值资料,该资料主要基于TOPEX/POSEIDON、Jason-1和ERS/Envisat等多颗高度计卫星资料融合而成(<https://www.aviso.altimetry.fr/index.php?id=1526>)。AVISO卫星高度计产品可以分为两类:准实时资料和延时资料。准实时资料可以为业务应用提供准实时的高度计资料,而延时资料则可以为海洋学研究提供质量更高的延时高度计产品。两类AVISO高度计产品的制作过程大体都包含:资料获取、资料预处理、质量控制、交叉校正、生成沿轨资料、生成融合的网格资料、输出检测等7个步骤。AVISO高度计产品的空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,空间覆盖范围为全球,时间分辨率为天,延时资料长度为1993年至今,其距平值相对1993—2012年的均值统计而成。

此外,国际上还有多家机构基于多卫星融合生成全球月尺度海平面高度序列产品,如:1)美国NOAA的海平面序列产品,其融合了TOPEX/Poseidon、Jason-1、Jason-2和Jason-3等卫星高度计数据,资料长度为1992—2022年([https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries\\_global.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_global.php));2)美国科罗拉多大学(CU)的海平面序列产品,其融合了TOPEX、Jason-1、Jason-2和Jason-3等卫星高度计数据,资料长度为1992至今(<http://sealevel.colorado.edu/>);3)澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的海平面序列产品,其资料长度为1880—2014年,1993年开始其融合了验潮站和卫星高度计数据(<https://research.csiro.au/slrwavescoast/sea-level/>);4)美国NASA的海平面序列产品,其融合了OPEX/Poseidon、Jason-1、OSTM/Jason-2和Jason-3等卫星高度计数据,数据更新为4个月延迟,资料长度为1992年至今([\[sea-level/key-indicators/global-mean-sea-level\]\(#\)\)。](https://sealevel.nasa.gov/understanding-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

## 2.6 多源融合最新发展方向

海平面变化的低频率多尺度特征一直是国际上研究的热点问题,获取长时间序列是研究这一问题的唯一途径,联合验潮站和卫星测高等数据进行重构是目前获取长时间全球平均海平面变化序列的主要方法。传统的验潮站观测数据虽然具有长时间跨度的连续性,可用于分析海平面变化的年代际周期特征及长时间尺度变化趋势,但其观测站点离散、分布不均,在全球平均海平面变化分析中,不确定性较大<sup>[30]</sup>。相较而言,卫星测高可提供全球更广范围内的海平面高度观测,但其观测历史较短。因此,联合卫星测高和验潮站观测数据可获得长时间、高精度全球平均海平面变化序列。

联合验潮站和卫星测高开展海平面重构主要采用正交函数,包括经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)以及循环平稳经验正交函数(Cyclo Stationary Empirical Orthogonal Function, CSEOF)等。其原理均是将卫星测高等格网海平面变化序列进行EOF或CSEOF分解,以得到表征空间变化特征的模态和表征时间变化特征的主成分。在假定空间变化特征模态是稳定的前提下,选取一定数量的空间变化主模态,并结合最小二乘法对选取的长时间观测的验潮站相同格网内的平均海平面序列进行最优求解,从而得到验潮站数据的表征时间变化特征的主成分,最后重构空间模态和主成分得到验潮站数据有效时间内的全球格网海平面变化序列,继而得到全球平均海平面变化序列<sup>[31]</sup>。

## 3 我国海平面观测数据产品

我国海平面观测数据产品主要来自国家海洋科学数据中心(隶属国家海洋信息中心)公开发布的全球、区域及中国近海的验潮站观测数据。

### 3.1 全球验潮站资料

国家海洋科学数据中心公开发布的全球水位综合数据集(<http://mds.nmdis.org.cn/pages/dataViewDetail.html?dataSetId=35>),该数据集由国家海洋信息中心制作,其涵盖了国内外多个大型合作项目和计划,包括全球海平面观测系统(GLOSS)、政府间海洋学委员会/国际海洋资料与信息交换委员会(IOC/IODE)、东北亚海洋观测系统(NEAR-GOOS)以及香港天文台等发布的全球海域范围内的水位资料。数据经过预处理、分类筛选、质量控制、排重处理与人工审核、整合处理等一系列处理过程,最终形成的全球水位综合数据集按年存放,其观测要素为逐时水位,数据集时

间范围为1846—2020年，空间范围为全球海域。

### 3.2 区域验潮站资料

国家海洋科学数据中心公开发布的中国月平均水位延时数据产品 (<http://mds.nmdis.org.cn/pages/dataViewDetail.html?dataSetId=5>)，其包括中国近海大连、吕四、坎门、闸坡、西沙、南沙6个海洋站自2000年1月以来的数据，经过解码、格式检查、代码转换、标准化、自动质量控制、可视化检查、校准等处理，形成标准化数据集。其中，质量控制包括范围检验、非法码检验、相关性检验、季节性检验、站代码检验和可视化图形检验等，该数据每月更新一次，数据格式为ASCII（字符）格式。

## 4 总结与展望

海平面高度变化对人类的生存环境和生命安全等均会产生巨大的影响，开展海平面观测及数据产品研发，对于全球和区域（近海）的当前海平面气候变化状态、气候变化归因及未来气候变化趋势的分析评估等具有重要意义，海平面高度也是全球气候监测系统（GCOS）提出的7个重要全球气候监测指标之一。

目前，国际上已有较为成熟的海平面观测网（GLOSS），其研发的数据产品为全球和区域海平面变化监测等提供有力支撑；国内，国家海洋局也在积极推动验潮站和卫星观测网的建立，通过国家海洋科学数据中心公开发布了多套海平面观测数据产品。目前，气候监测业务主要依赖国家海洋信息中心逐年提供的中国沿海海平面距平序列，为了进一步提升海洋气候监测数据支撑能力，亟待加强多来源海平面观测数据的收集、评估及加工处理与业务应用等工作，积极开展验潮站及卫星反演海平面观测数据评估及对比分析，在此基础上，逐步构建可自主更新的海平面高度序列。为此，未来几年亟待加强如下工作。

1) 持续开展海平面观测数据挖掘及提升海平面观测数据基础加工处理能力。近年来，中国气象局通过国际GTS、双边交换等形式获得全球海洋潮位观测资料及近海部分潮位站观测资料，然而近海仍有大片海域尚无共享的海平面观测。此外，验潮站观测的是相对海平面，其观测数据所参考的水准点可能随着时间发生变动，未来需进一步加强海平面观测元数据的收集，为开展资料序列订正提供基础。此外，目前业务尚未实现对收集获取的海平面观测数据的完全解码和数据质量控制，未来需要在进一步加强各来源海平面观测数据的发掘及收集基础上，加强已收集到的海平面观测数据的解码处理能力及质量控制能力，从而有望进一步提高入库的数据量以及数据质量等，以提供

更广泛、更有效的海平面观测基础数据。

2) 加强多来源海平面观测数据的处理技术研发。PSMSL的月尺度海平面观测资料是目前开展全球海平面气候变化分析评估等应用最广泛的数据源，基于其可进行相关站点数据的分析处理从而形成全球和区域海平面变化序列；PSMSL已实现业务应用的数据处理技术，包括质量控制技术、日/月尺度均值统计方法及参照面的均一性订正方案等均可借鉴于中国近海海平面观测数据的处理。此外，卫星高度计在近海受跟踪算法和误差校正的局限，观测到的海平面数据误差相对较大，因此，未来可更多的纳入沿岸的验潮站数据和GNSS的地面沉降信息等，对基于卫星的近岸海域海平面观测数据进行订正，从而进一步攻关基于国外、国内多颗卫星的海平面融合产品研发，有效将卫星遥感观测与近海站点观测相结合，将近海海平面和大洋海平面变化相衔接。

### 参考文献

- [1] 崔伟. 多源卫星高度计海面高度异常数据融合研究. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2016.
- [2] Merrifield M, Holgate S, Mitchum G, et al. The Global Sea Level Observing System (GLOSS) Implementation Plan 2012. Paris: Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), 2012.
- [3] 王慧, 刘秋林, 李欢, 等. 海平面变化研究进展. 海洋信息, 2018, 33(3): 19-26.
- [4] 蔡榕硕, 谭红建. 海平面加速上升对低海拔岛屿、沿海地区及社会的影响和风险. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 163-171.
- [5] 常乐, 孙文科. 全球及中国近海海平面变化趋势研究进展及展望. 地球与行星物理评论, 2021, 52(3): 266-279.
- [6] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021). 北京: 科学出版社, 2021.
- [7] 汲俊生. 基于多源卫星高度计数据的中国近海海平面变化研究. 青岛: 青岛理工大学, 2017.
- [8] 徐曜. 多代卫星测高数据处理及其在海平面变化监测中的应用. 杭州: 杭州师范大学, 2017.
- [9] 吴涛, 康建成, 王芳, 等. 全球海平面变化研究新进展. 地球科学进展, 2006, 21(7): 730-737.
- [10] 冯寿波. 领土丧失与国家地位: 海平面上升对小岛国的挑战. 西部法学评论, 2019, (3): 103-114.
- [11] 王慧, 范文静, 刘克修, 等. 对美国潮位观测数据核定的研究及应用. 海洋信息, 2013, (4): 15-22.
- [12] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 全球变暖和海平面上升. 气候变化研究进展, 2019, 15(6): 700-703.
- [13] 郭婷婷, 陈泽宗, 陈应峰, 等. 基于压力式验潮仪的潮汐应急观测可行性研究. 海洋技术学报, 2018, 37(6): 41-48.
- [14] 牛余朋. 基于卫星测高、验潮和GNSS的日本海及邻近海域海面高模型建立及海平面变化预测. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [15] 国家海洋局. “一站多能”海洋(中心)站“十三五”实施方案. 北京: 国家海洋局, 2016.
- [16] 自然资源部海洋预警监测司. 2020年中国海平面公报. 北京: 自然资源部海洋预警监测司, 2021.
- [17] 李青. 基于卫星测高技术的高纬度海冰厚度时空变化研究. 武汉: 武汉大学, 2015.
- [18] 蒋兴伟. 发展海洋卫星组网观测 助力海洋强国建设. 长沙: 第十九期钱学森论坛, 2019.
- [19] 林明森, 张有广, 袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望. 海洋学报, 2015, 37(1): 1-10.
- [20] 廖静娟. 星载雷达高度计数据处理及陆地应用. 北京: 科学出版社, 2020.
- [21] 谢书谊, 陈美香, 张建立, 等. 陆地垂向运动对沿海相对海平面变

- 化的影响. 海洋科学进展, 2019, 37(2): 187-198.
- [22] 骆敬新, 刘克修, 范文静, 等. 全球海平面观测系统现状及对我国海洋站观测的启示. 海洋开发与管理, 2014, (7): 9-14.
- [23] 周东旭, 周兴华, 张化疑, 等. 利用GPS连续观测进行中国沿海验潮站地壳垂直形变分析. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(4): 516-522.
- [24] Caldwell P C, Thompson P. Joint Archive for Sea Level Data Report: March 2018. The Joint Archive for Sea Level (JASL), 2018.
- [25] Woodworth P L, Player R. The permanent service for mean sea level: an update to the 21st century. Journal of Coastal Research, 2003, 19(2): 287-295.
- [26] Holgate S J, Matthews A, Woodworth P L, et al. New data systems and products at the permanent service for mean sea level. Journal of Coastal Research, 2013, 29(3): 493-504.
- [27] 宿春鹏. 联合卫星测高、GRACE和温盐资料研究海平面变化. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [28] 刘冰石. 利用多源观测数据分析2011年来全球平均海平面加速上升成因. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [29] 刘磊, 蒋星亮, 费建芳, 等. 多源卫星高度计新融合产品的研发与评估. 科学通报, 2020, 65: 1888-1897.
- [30] Frederikse T, Jevrejeva S, Riva R E M, et al. A Consistent sea-level reconstruction and its budget on basin and global scales over 1958-2014. Journal of Climate, 2018, 31(3): 1267-1280.
- [31] 金涛勇, 肖明宇, 王锴. 近百年全球平均海平面变化重构研究进展与分析. 中国科技论文在线精品论文, 2017, 10(20): 2314-2319.

## (上接15页)

- 象科技进展, 2017, 7(6): 82-91.
- [27] 李震坤. 基于动力相似模式识别的延伸期降水预报方法. 上海: 上海市气候中心, 2020.
- [28] 董雪峰, 赖欣, 杨淑群, 等. 基于CFSv2的四川省延伸期三类天气过程预报研究. 成都信息工程大学学报, 2021, 36(04): 413-424.
- [29] 伯忠凯. 基于CFS模式的山东省高温过程动力降尺度预测. 济南: 山东省气候中心, 2018.
- [30] 高建芸, 陈彩珠, 周信禹, 等. 2010年福建前汛期典型持续性暴雨过程的低频特征分析. 气象科技进展, 2013, 3(1): 39-45.
- [31] 池艳珍, 何芬, 唐振飞. 2016年登陆和影响福建台风成因分析及预测. 气象, 2017, 43(10): 1287-1295.
- [32] 杨德南, 高建芸, 陈锦鹏, 等. 低频扰动增量法在华南冬季低温延伸期预报中的应用研究. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 10-19.
- [33] 王宇, 钟琦. 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)2014年报性能. 气象科技进展, 2015, 5(4): 68-69.
- [34] 纪立人. 欧洲中期天气预报中心情况简介. 气象科技, 1983, (2): 28-30.
- [35] 金荣花, 马杰, 毕宝贵. 10~30d延伸期预报研究进展和业务现状. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(2): 1-5.
- [36] 马杰, 金荣花, 宗志平, 等. 延伸期预报中的可预报性浅析. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 137-143.
- [37] 王延. S2S多模式资料在海洋性大陆区域及我国延伸期降水预报中的应用. 成都: 成都信息工程大学, 2020.
- [38] 何欢然. ECMWF S2S试验对中国东部夏季次季节降水的预报技巧评估及误差订正. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [39] 湛芸, 董全, 田付友, 等. 美国NCEP集合预报最新进展. 天气预报, 2014, 6(5): 68-74.
- [40] 朱玉祥, 俞小鼎, 赵亮, 等. 10~30d延伸期预报及其策略思考. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(4): 38-44.
- [41] 康志明, 鲍媛媛, 周宁芳. 我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势. 气象科技进展, 2013, 3(1): 18-24.
- [42] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸期预报. 气象, 2010, 36(7): 111-122.
- [43] 杨秋明. 10~30d延伸期天气预报方法研究进展与展望. 地球科学进展, 2015, 30(9): 970-984.
- [44] 林纾, 惠志红, 郭俊琴, 等. 150天韵律方法月内过程预测系统简介及应用检验. 气象科技进展, 2013, 3(5): 48-51.
- [45] 张东方, 成青燕, 何慧根, 等. CFSv2模式资料在成都市延伸期降水预测中的应用评估. 气象研究与应用, 2021, 42(2): 1-6.
- [46] 信飞, 马悦, 王蔚, 等. 2020年上海梅雨异常特征及延伸期预报分析. 暴雨灾害, 2020, 39(6): 578-585.
- [47] 罗布. MJO在西藏夏季降水延伸期预报中的应用. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [48] 吴胜安. 基于MJO的海南延伸期气候预测技术研究. 海口: 海南省气候中心, 2018.
- [49] 孙国武, 李震坤, 信飞, 等. 用低频天气图方法进行延伸期预报的探索. 气象科技进展, 2013, 3(1): 6-10.
- [50] 贾旭伟, 李旭, 张莹, 等. 基于低频振荡的西北地区中西部延伸期降水预报研究. 干旱气象, 2016, 34(3): 553-559.
- [51] 孙昭莹, 马振峰, 杨小波, 等. 低频天气图方法在四川盆地夏季延伸期强降水预报中的应用. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 20-26.
- [52] Seo K, Wang W, Gottschalck J, et al. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models. Journal of Climate, 2009, 22(9): 2372-2388.
- [53] Jones C, Carvalho L M V, Wayne Higgins R, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. Journal of Climate, 2004, 17: 2078-2095.
- [54] 贾旭伟. 基于低频振荡和相似技术的西北地区中部降水过程延伸期预报研究. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [55] 蔡金玲, 何勇, 林巧, 等. 气象领域局校合作的经验与启示. 科技中国, 2019, (1): 17-21.

# 天气风险管理理论及实践进展

赵艳霞<sup>1,2</sup> 陈思宁<sup>1,2</sup>

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2 气象风险与保险联合开放实验室, 北京 100081)

**摘要:** 从天气风险的概念、分类、特点、管理策略及管理措施等方面对相关理论进行了梳理, 深入介绍了两种典型的天气风险管理产品——天气指数保险和天气衍生品的联系与区别及其在国内外的的发展进程, 同时, 辅以典型案例对两种产品的设计及使用进行了详细说明。详细总结了气象科技在天气风险管理中的作用: 1) 不断完善的气象观测网络为天气风险管理提供了坚实的数据基础; 2) 气象可以为天气风险管理提供不同时空尺度的天气预报信息; 3) 气象可以为天气风险管理提供多元化的气象信息服务产品; 4) 气象可以支撑天气风险管理产品技术研发。最后, 进一步指出应促进气象部门与不同行业的深化合作, 开发专业化的天气风险管理产品, 为各行各业有效规避天气风险及良性发展赋能。

**关键词:** 天气风险管理, 天气指数保险, 天气衍生品

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.004

## Progress in the Theory of Weather Risk Management and Its Practice

Zhao Yanxia<sup>1,2</sup>, Chen Sining<sup>1,2</sup>

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Joint Open Laboratory of Meteorological Risk and Insurance, Beijing 100081)

**Abstract:** This paper summarizes weather risk theories from the perspectives of concept, classification, characteristics, management strategies and management measures. It also introduces the relationship and differences between two typical weather risk management products-weather index insurance and weather derivatives as well as their development at home and abroad. At the same time, the design and utilization of the two products are explained in detail with typical cases. Furthermore, the role of meteorological technology in weather risk management is elaborated as follows: (1) The constantly improving meteorological observation network provides a solid data base for weather risk management; (2) weather forecast information of different time and space scales is available for weather risk management; (3) diversified products of meteorological information services are offered for weather risk management; (4) the research and development of weather risk management products are supported by meteorological technology. Finally, for effectively avoiding weather risks and for benign development, it is necessary to promote the cooperation between meteorological departments and different industries and develop specialized weather risk management products.

**Keywords:** weather risk management, weather index insurance, weather derivatives

### 0 引言

风险是指在某一特定时期或环境内, 人们希望实现的目标和实际产生的结果间的偏差, 即产生某种损失的可能性<sup>[1]</sup>。天气风险通常用来表达经济体遭受异常天气事件侵袭的可能性, 这种侵袭是非灾难性的, 通常它影响的是经济体的收益而非财产<sup>[2]</sup>。为降低与天气问题相关的经济损失, 对天气风险必须进行有效管理。统计数据表明, 全球每年约有超过70%的公司遭受天气风险的危害<sup>[3]</sup>。美国有约25%的国内

生产总值(GDP)相关产业会遭受天气条件变化的危害, 其直接影响约占10%, 每年由于天气风险因素使企业所蒙受的直接经济损失超过2.2万亿元。我国天气灾害造成的经济损失约占所有自然灾害造成总损失的70%以上, 每年由于天气灾害造成的经济损失约占GDP的1%~3%, 受重大天气灾害影响的人口达4亿人次, 因天气灾害造成的农作物受灾面积达5000万 $\text{hm}^2$  (1  $\text{hm}^2=10000 \text{m}^2$ , 下同)<sup>[4-5]</sup>。联合国减少灾害风险办公室近期发布题为《减少灾害风险全球评估报告2022》的报告表明, 由于气候变化和人类行为等因素, 全球灾害数量快速攀升, 过去20年间全球每年发生大中型灾害350~500次; 预计到2030年全球大中型灾害的发生频率将达每年560次, 日均1.5次。过去10年间,

收稿日期: 2023年1月16日; 修回日期: 2023年2月7日

第一作者: 赵艳霞(1968—), Email: zhaoyanxia@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点研发计划(2019YFD1002201); 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2021Z010)

全球灾害造成的损失平均每年达1700亿美元,受冲击最严重的是发展中国家。联合国常务副秘书长阿明娜·穆罕默德呼吁各方携手应对全球灾害风险,降低可预防灾害的发生率。

## 1 天气风险导论

### 1.1 天气风险的概念

天气风险是天气的不确定性变化导致商品的生产成本和市场需求的明显变化,给经济主体带来现金流和利润的变化的可能性,如温度、降水、日照、大风等日常天气变动,给企业主体的财务绩效、股票价格和利润等带来的不良影响,还有一些非正常天气条件,如狂风、暴雪、台风和龙卷等带来的灾害性影响,使得企业主体的最终利润出现了较大风险<sup>[6-7]</sup>。因此,在天气市场的背景下,天气风险被定义为一个实体(个人、政府或公司)对可观测的天气事件或可测量的天气变化的财务风险造成财产损失或利润损失的指数。因为这些风险都能够使用实际可观测到的气候事件或气象指标来评估,从而能够把这些风险由客户产品转化到有兴趣以天气风险的形式承担这些风险的组织管理产品。天气风险管理产品是指以天气风险为对象的一个资产管理方案,更具体地说,天气风险管理产品也可能是保险产品或者衍生商品<sup>[1]</sup>,而这两种工具的特点涉及监管、会计、税务和法律方面的不同问题,但风险转移的特点和收益是相似的。

2013年,世界气象组织(WMO)为了实施和持续改进风险管理,构建了WMO风险管理框架(WMO Risk Management Framework),通过框架给出了风险管理的程序和结构。该框架与该组织的战略目标以及WMO公约的原则保持一致,其核心要素包括了建立风险理念、促进风险意识、开展风险评估(风险定义、分析和评价)、实施风险管理、风险信息交流、培训、风险成熟度以及风险监控与审查等。

### 1.2 天气风险的分类

天气风险按成因可分为灾害性天气风险、一般天气风险与气候变化风险<sup>[8]</sup>。

灾害性天气风险是指出现可能引发财产损失和危害人民安全的灾害天气(如地震、暴雨、龙卷、飓风等)的可能性,其发生概率远低于其他两类风险,但所造成的生命及经济损失却是最严重的<sup>[9]</sup>。对于灾害性天气风险,人们最开始运用的工具是保险,且仅由一家保险公司单独承担的保险,但由于这样操作的风险过大,于是就有了再保险公司的加入。然而,随着近年来巨灾出现的频率增加、程度加深,保险公司难以承担,因此人们又把目光转向了资本市场,证券化

的保险产品应运而生<sup>[10]</sup>。

一般天气风险又称为非灾害性天气风险,主要是指一般(非灾害性)天气变化带来的风险,其出现的可能性比灾害性天气风险更小<sup>[11]</sup>。气温、降雨、大风、冰雹、雪、雾等这些常见的天气事件就是所谓的一般天气,它们并未造成直接或严重的经济损失,却常常引起市场供需的巨大波动,进而间接地影响经济环境。针对概率大、损失小的天气事件的衍生品自20世纪90年代末在美国出现以来,市场发展迅猛。芝加哥商品交易所(Chicago Mercantile Exchange, CME)的天气衍生品合约从2000年仅成交了87笔到2006年合约交易量达80万笔<sup>[12]</sup>。鉴于全球气候的多样性和复杂性,在讨论与天气有关的风险时很难一概而论。从天气状况变化的角度来看,有两种主要类型的风险需要考虑:1)突然发生、不可预见的事件(如暴雨、台风等);2)长时间内发生的累积事件(如干旱)。

气候变化风险指因全球气候变化对地球大环境造成的负面效应日益显著,如高温、暴雨、干旱等极端天气条件造成的干旱化、沙漠化、水资源短缺或海平面上升加剧海岸带的淹没风险等,这将改变国家政策与战略方针的制定,因此对经济社会发展产生很大的不确定性<sup>[13]</sup>。随着全球气候变暖,气候变化幅度加剧,企业收益的波动幅度也相应变大。

### 1.3 天气风险管理策略

首先意识到风险,然后对其进行评估,接下来的问题是处于风险中的一方(或多方)如何设法管理该风险。应注意的是,风险管理应在事前(即在事件实现之前)进行规划,一些事前计划(财务或其他)提供事后行动(如保险赔付和政府救济计划)。仅事后管理已出现的风险不被视为风险管理,毕竟,如果已经发生了某些事情,则不再是风险(尽管将来可能会再次发生)。关于风险管理这一主题有大量的文献,而且使用了大量不同的术语,本节主要介绍三种明确的风险管理策略<sup>[14]</sup>,这三种策略也是农业风险管理中的关键战略。

**减缓(mitigation):**减缓是指减轻或限制相关灾害的不利影响。风险减缓方案多种多样(如作物和牲畜多样化、收入多样化、土壤排水、覆盖、使用抗性种子、避免风险措施和作物日历等)。

**转移(transfer):**转移是指将特定风险的潜在财务后果从一方转移到另一方。虽然保险是最著名的风险转移形式,但在发展中国家,在家庭和社区内使用非正式风险转移是极其重要的。

**应对(coping):**应对是指通过事前准备和利用非

正式和正式的机制，提高抵御和管理事件的能力，以维持事件发生后的生产和生计。虽然我们注意到应对是一种事后活动，但可以事先计划和准备应对活动。这在财政上往往是有利的，因为快速应对事件的能力通常会减少损失。

#### 1.4 天气风险管理措施

为降低与天气相关的不良影响，有必要对天气风险进行管理和监控。按照运作模式的不同，天气风险管理工具可分为天气衍生品、天气保险和证券化的天气产品<sup>[15]</sup>。

##### 1.4.1 天气衍生品转移非灾害性天气风险

天气衍生品是用来防范非灾害性天气风险给经济实体的财务状况和收益带来严重影响的金融工具，主要用于管理非灾害性天气风险<sup>[15]</sup>。非灾害性天气状况一般不会直接对企业财产造成影响，而是在一段时间内逐渐影响企业的生产或销量，使相关企业在气候异常变化中遭遇了损失。天气衍生品合约通过灵活规定相关气象要素及支付标准，对非灾害性天气风险加以划分与整合，可有效的避免非灾害性天气对企业经济的不利影响。在天气衍生品的加持下，企业面对天气风险时能够主动、积极的管理或防御，进而降低非灾害性损失<sup>[15-16]</sup>。

##### 1.4.2 天气保险转移灾害性天气风险

天气保险是指投保人以可能遭受的灾害性天气为标的向保险公司投保，将灾害造成的可能的损失风险给保险公司。与天气衍生品相比，天气保险具有更大的灵活性和覆盖范围，保单可以被设计为各种模式来承保多种天气风险。如果保险标的使投保人遭受损失，保险公司就要向其赔偿<sup>[17]</sup>。

##### 1.4.3 证券化的天气产品将巨灾型天气风险经过重新组合转移给投资者并保障其利益

证券化天气产品通过向投资者发行巨灾型风险债券的形式保障其利益，若天气风险事件没有发生，投资者将获得本金返还及利息收入；反之，债券本金将用于补偿投保人的损失<sup>[18-19]</sup>。

#### 1.5 天气指数保险和天气衍生品的区别

天气衍生品和天气保险本质上都是金融衍生品<sup>[20]</sup>，其区别在于：1) 管理天气风险的类型不同：管理发生频率低、高影响的灾害性天气风险通常使用天气保险；管理发生频率高、低影响的非灾害性天气风险应使用天气衍生品（表1）。2) 管理天气风险的机制不同：天气保险受商品交易法严格管制，而天气衍生品只要符合一定要求就可以不受商品交易法的管制。3) 理赔是否基于实际损失：天气衍生品的理赔是基于

天气指数而不管购买者是否真正遭受损失，若通过气象观测数据证实了合约上天气事件确实发生了，购买者即得到赔付；而天气保险是购买者必须遭受与灾害性天气有关的实际损失且能证明该损失属于保险合同中规定的保险责任，才可得到赔付<sup>[21-26]</sup>。

表1 天气衍生品和保险在天气风险转移中的应用  
Table 1 The application of weather derivatives and insurance in weather risk transfer

天气风险管理措施	天气风险类型	影响程度	发生频率
天气保险	灾害性天气风险	高	低
天气衍生品	非灾害性天气风险	低	高

## 2 天气指数保险

伴随着极端天气、气候事件强度、频率及其对社会经济负面影响的增强，人类对天气风险管理的需求在不断加大。传统的保险产品，由于核损赔付手续繁杂，经常引发法律纠纷，产品的规避风险效率较低，且以往的经验表明，政府灾后救助支持力度往往不够、保险赔付常常滞后<sup>[27]</sup>。此外，在开展风险评估的基础上，确定了特定的天气风险并选择了相应的风险管理策略（如风险减缓、转移、应对等），仍发现传统的保险产品可能不是最合适的解决方案，因此，天气指数保险（Weather Index Insurance, WII）应运而生<sup>[28]</sup>。

### 2.1 天气指数保险的概念

天气指数保险是将保险标的产量或损失与一个或者几个气象要素形成的指数（天气指数）结合起来，依据不同的指数等级进行赔付的保险形式<sup>[29]</sup>。由于每个天气指数都会引发对应的保险标的物的损益情况，因此，可以通过天气指数的变化来判定生产者的损失，并根据保险条款写明的标准进行赔偿。它的基本原理是：如果农作物产量损失与灾害性天气条件相关性比较大，则以产量和气象历史数据为依据，通过统计方法，估计出天气指数与农作物产量和损失的统计关系，特别是在巨灾情况下，两者通常会有很强的相关性，因此，天气指数保险也是产量保险的一种类型。天气指数保险的赔偿是基于在预定时间段内特定气象站观测到的具体天气参数实现的，所以，天气指数保险不是以灾害性天气造成的实际损失作为保单的设计基础和理赔依据，而是基于灾害性天气事件与实际损失风险间的相互关系而确定的估计值<sup>[30]</sup>。需要注意的是，天气指数不能百分之百地反映投保方的实际灾害损失，在使用指数保险产品时，保险公司及投保方都要面对基本风险，有可能发生投保人损失大但只能得到一小部分赔付，或投保人在没有损失时也能得到赔付的现象<sup>[31]</sup>。赔偿金额是根据预先确定的每单位

指数的保险金额计算得出的。随着卫星遥感技术的发展,一些基于遥感数据反演获取的指数(如植被指数等)也被用作畜牧业遭受气象灾害的保险指数<sup>[32]</sup>。也有将河流水位作为暴雨洪涝灾害保险指数的,这些都是天气指数的间接表达。

## 2.2 天气指数保险的优势

天气指数保险较传统的农业保险的优势主要表现在:降低道德风险,避免逆向选择,简化保险程序,增加了理赔透明度,减少了信息需求,降低经营成本、尤其是降低查勘定损的巨大成本,促进再保险,促进获得金融服务的机会等。

发展中国家的农业保险实践表明,在现有的农业生产技术水平下,气象灾害仍然是造成农业损失的主要原因之一<sup>[33]</sup>。气象数据相对于农作物产量数据更易于获取,且比农作物产量数据具有更高的准确性。从成本角度看,建设一个高时空分辨率、高精度的气象观测网要比搭建一个可信的农作物产量观测体系成本更低。鉴于此,在发展中国家推广农业天气指数保险更容易取得良好的成效。

## 2.3 天气指数保险的发展

### 2.3.1 国外天气指数保险的发展

天气指数保险最初起源于天气衍生品市场,用于帮助企业在该市场对冲天气风险,本质上属于金融风险转移衍生品工具。1997年,天气指数保险产品最早开始在美国得到应用,随着需求的不断扩大,在日本、加拿大等发达国家也开展了广泛的实践,在亚洲、非洲和拉丁美洲的一些发展中国家也获得了较快的发展,除世界银行在全球范围内大力推动农业天气指数保险外,联合国世界粮食计划署(WFP)、国际农业发展基金(IFAD)等也积极推动天气指数保险在农业中的应用<sup>[30]</sup>,Skees等认为天气指数保险显著降低了农业保险的运营成本,并将逆向选择和道德风险最小化,对于缺乏高额补助的发展中国家来说,天气指数保险也被越来越多的研究学者和保险公司看成是传统农业保险更有效的替代品<sup>①</sup>。2002年,发展中国家首个农业天气指数保险产品在墨西哥实施。2003年,印度商业保险公司开始销售天气指数保险产品<sup>[34]</sup>,作为亚洲第三大农险市场,印度目前有超过60%的农业保险采取天气指数保险的模式。迄今为止,许多发展中国家也研发了天气指数保险产品,如马拉维开发了专门用于花生栽培的天气指数保险可以帮助农户降低因旱灾所带来的产量损失,2006年在蒙古开展的大型家畜

巨灾指数保险可以协助牧民减轻因为严冬所造成的大规模家畜伤亡等。实践证明,天气指数保险更适合出售给中小农户甚至是独立的散户,而不必监控中、大型农场的整体损失<sup>[35]</sup>;另外,在鼓励农业投入、提高技术适应能力、平衡消费、全面改善被保险农村人口的基本利益和增强其弹性方面也具有积极影响<sup>[36-38]</sup>。因此,天气指数保险在过去20年中得到了越来越多的关注。目前,发达国家的天气指数保险已发展的相对成熟,而在发展中国家,通常通过政府主导的项目研发并推广天气指数保险,并以不同形式得到大量政府补贴<sup>[39-40]</sup>。目前,国际上天气指数保险市场正处于深化发展阶段,相关的研究正在进行。主要有如何克服指数保险缺陷的理论和方法、气象指数保险关键技术以及效果评估等方面的研究<sup>[41-45]</sup>。

### 2.3.2 国内天气指数保险的发展

2007年,我国保险业开始逐步试点研发天气指数保险,安信农业保险公司的甜瓜梅雨强度指数保险项目以上海为试点进行了研发<sup>[46]</sup>。2009年11月,在农业部、联合国世界粮食计划署(WFP)、国际农业发展基金(IFAD)的共同主导下,我国首款作物旱灾指数保险产品安徽省长丰县部分乡镇开展试点工作,这也标志着我国农业在天气指数保险上的实践正式开始<sup>[30]</sup>。截至2009年,全国有许多地区已经进行了天气指数农业保险的试点工作,已开展的天气指数农业保险产品已逐渐涵盖了粮食作物、特色作物、瓜果蔬菜、烟草、水产等多种领域。另外,浙江气象部门研究了对水稻保险气象理赔指数并搭建了应用平台,而福建、陕西、河南也先后研发了台风气象灾害指数、苹果天气指数、小麦干旱指数等保险产品。我国天气指数农业保险工作基本已形成了由政府主导,气象、农业、保险等部门以及国际组织参与的局面,表明了我国天气指数保险已成为降低农业气象灾害风险、保障农民基本利益的重要手段<sup>[47]</sup>。

2004—2022年的19个中央一号文件均对农业保险的全面发展提出了更新的要求。中央财政从2007年开始实施保费补贴,促进我国农业保险进入快速发展时期<sup>[48]</sup>。2021年我国农业保险保费高达151.7亿美元,跃居全球第一。从发展趋势看,今后一段时间我国农业保险的保费将会在全球范围内一直领先。2014年8月,《国务院关于加快发展现代保险服务业的若干意见》——保险业“新国十条”明确提出了探索天气指数保险等是农业保险创新的方向。2022年的中央一号

① Skees J R, Hazel L E, Miranda M. A New Approaches to Crop Yield Insurance in Developing Countries. International Food Policy Research Institute, EPTD Discussion Paper No.55, November, 1999.

文件提出加强农业再保险体系建设。作为拥有巨大潜力的创新型险种，气象指数保险发展亟须提速。同年4月，中国人民大学中国普惠金融研究院（CAFI）发布了《发展农业气象指数保险，优化农村金融服务体系调研报告》<sup>①</sup>。该报告指出，95%的农户曾因气象灾害受损，气象指数保险有助于农业生产的防灾减灾，极大地补充了农业金融服务体系。该报告是世界银行集团国际金融公司（IFC）数字农业气象指数保险项目（简称China WII）与合作伙伴的重要成果之一。该项目于2019年启动<sup>②</sup>，为普惠金融助力乡村振兴提供了丰富的案例和富有成效的建议。

在天气指数农业保险实践的基础上，国内研究人员在农业保险风险区划、农业保险费率的厘定、天气指数保险产品设计与应用，以及关于克服天气指数保险“基差风险”问题等方面也有了一些尝试性的研究<sup>[49-70]</sup>。

## 2.4 天气指数保险典型案例

### 2.4.1 国外天气指数保险案例

#### 2.4.1.1 墨西哥天气指数保险产品

墨西哥政府通过指数保险的形式为该国的两种自然灾害救济基金（FONDEN和FAPACC）开展了再保险支持<sup>[71]</sup>。FONDEN主要是为没有再保险支持的基建维修项目提供灾害救济资助，以及对低价收入受害者进行救助。FAPACC则是对由于旱灾、强降雨、洪涝、冰雹、霜冻以及大风等受到破坏的农业生产设施进行赔付，以协助农户恢复他们赖以维生的农业生产。通过指数保险为政府应急响应提供再保险，助力政府维持灾害救济的可持续性。墨西哥实施的气象指数保险计划针对洪涝和干旱两种灾害性天气事件，以不同作物在不同生长发育期的降雨量为触发值<sup>[72]</sup>。鉴于作物种类、发育阶段以及所在地区不同，因此对应的触发值也不同。墨西哥指数保险以各州政府为推广对象，共计保障耕地面积达120万 hm<sup>2</sup>，保费总额达1700万美元<sup>[73]</sup>。

#### 2.4.1.2 印度天气指数保险产品

2007年开始，印度的“天气型作物保险计划”（WBCIS）为全国1300余万农户进行投保，保险范围涵盖各类气候风险，如干旱、洪涝、高温、高湿、大风等<sup>[74-75]</sup>。WBCIS的保险区间是从作物的播种期到成熟期，即当年冬季10—11月播种到次年4月采收的部分作物。WBCIS依据区域方法（Area Approach），即在参考气象站附近一定地理区域选取参考单位区域作

为保险中风险承担和赔偿评估的同质保障单元，投保人在参考单位区域种植指定作物，每个投保人的保险条款和赔偿评估都是一致的，其中，参考气象站是指定的为保险赔偿评估提供天气数据的气象站。

### 2.4.2 国内天气指数保险案例

据不完全统计（截至2019年初），全国已有20多个省（自治区、直辖市）气象局开展农业保险气象服务，有19个省份形成了较完善的天气指数保险产品并进行推广应用，以浙江、安徽、内蒙古、江西等为代表（表2）。本节选取几个国内开展天气指数保险比较有代表性的省份的案例做简要介绍。

表2 天气指数保险标的、分布省份及主要影响因子  
Table 2 Subjects, distribution provinces and main impact factors of index-based weather insurance

保险标的	分布省份	主要影响因子
玉米	山东、河北、黑龙江、安徽	干旱、低温、强降水
小麦	安徽、山东、江苏、河南	干热风、倒春寒、干旱
水稻	浙江、安徽、湖北、江西	高温
茶叶	浙江、安徽、江苏、江西	低温
小龙虾	湖北	高温、低温
羊群	内蒙古	雪灾、旱灾

#### 2.4.2.1 浙江省天气指数保险产品

浙江气象部门在天气指数保险方面的研究起步较早，推广应用成果也较为成熟。重点开发了茶叶、柑橘、水稻、杨梅、枇杷、核桃等气象指数保险产品，并投放市场，基本解决了传统农业保险定价不科学、保障水平低、道德风险高、查勘定损及赔付成本高、时效低等弊病，避免了农户与保险公司甚至当地农业管理部门产生纠纷，促进了农户灾后积极自救、恢复生产。

浙江省气候中心基于茶叶处于不同开采期的最低气温风险评估结果设计了精细化到乡镇级别的茶叶霜冻指数保险。2021年，浙江省气候中心又结合当地农险实际需求，深化技术研发，设计了“茶叶综合气象指数保险”，与此前仅面向单一灾种的茶叶指数保险相比，综合指数保险产品覆盖了茶叶生产过程中容易遭受的多种灾害（高温热害、低温灾害及干旱），可为茶农抵御气象灾害风险提供更有利的支撑。茶农可根据自身需求，定制化的自主选择投保方案，且每亩最高保额可达4000元，该险种一经投放到农险市场，即受到了广大茶农的欢迎，推广应用成效显著。

#### 2.4.2.2 广东省天气指数保险产品

巨灾保险是指对因发生地震、洪水、海啸、飓风

① 中国普惠金融研究院课题组. 发展农业气象指数保险, 优化农村金融服务体系调研报告. 2021年12月。

② [https://business.sohu.com/a/509909968\\_121123887](https://business.sohu.com/a/509909968_121123887), 2021-12-19。

等自然灾害,可能造成巨大财产损失和严重人员伤亡的风险,通过巨灾保险制度分散风险<sup>[76]</sup>。广东巨灾保险项目自2016年试点以来,以政府财政救灾资金为保障标的、依据气象指数作为计算赔款方式,是全国首创的省域巨灾保险制度的创新模式。2016—2021年,中国人保财险广东分公司承保巨灾指数保险项目累计保费收入6.65亿元,支付赔款6.34亿元。截止到2022年,广东全省(不含深圳)共有19个地市(佛山除外)开办了巨灾保险。2022年广东各地受持续“龙舟水”强降雨影响,全省多地触发暴雨指数巨灾赔付,并快速支付赔款,第一时间帮助地方政府救灾救助、灾后重建,有效纾解应急救灾资金短缺问题,提高政府救灾效率。

广东是渔业大省,2021年,阳江市政府引入了政策性对虾饲养天气指数保险制度,按照投保方法,当对虾饲养户所在区域的雨量、风速、气温等超过一定指数时,将触发保险理赔。以气象指标作为保险理赔的惟一依据,不但能够做到快速定损,还能够有效解决传统的水产养殖保险定损难、争议大的问题。2022年,珠海市实施了政策性淡水水产气象指数保险,该保险条款分别约定了对在保险期间内水产因遭受高温、低温、大风及暴雨而产生的保险责任,仅2022年上半年,珠海市金湾区淡水水产养殖承保面积达到7559.97亩(1亩 $\approx$ 666.7 m<sup>2</sup>),为众多水产养殖企业及个体养殖户提供了有效保障。

### 3 天气衍生品

世界经济论坛(WEF)《2022年全球风险报告》指出,未来10年最严重的三大风险为气候行动失败、极端天气事件、生物多样性丧失与生态系统崩溃<sup>[77]</sup>。天气衍生品是作为对冲天气风险而开发出的以天气指标为标的的金融衍生工具,是天气风险管理体系的重要组成部分<sup>[78]</sup>。

#### 3.1 天气衍生品的概念

天气衍生品是通过衍生合约对天气风险进行分割、重组和交易的证券化产品,并能将企业和个人的天气风险转移到有决心和有能力和管理风险的第三方以帮助他们规避天气风险<sup>[79-80]</sup>。区别于传统金融衍生品,天气衍生品的交易对象是天气指数,是通过对冲特定区域出现的实际天气风险和合约中商定的天气风险的偏差,实现对天气风险的规避和转移。

#### 3.2 天气衍生品的特点

##### 3.2.1 天气衍生品的优势

天气衍生品作为管理天气风险的金融工具具有

客观性、公平性、有效性、灵活性以及流动性等特征<sup>[15]</sup>,具体体现如下。

第一,制定天气衍生品合约是根据气象部门提供的气象观测数据,如温度、降水量、湿度、降雪量、风力等数据,这些数据都是科学、客观、较易获取且具有时间序列长等特点,可以满足天气衍生品合约制定的需要。

第二,天气衍生品的赔付是基于天气指数,如降水量、温度、降雪量、风力级别或风速及其出现的频次等,这与天气指数保险产品类似,但不同于传统的天气保险,传统的天气保险赔付是基于已证明的实际损失。

第三,可以依据交易者自身需求灵活开展天气衍生品场外交易和场内交易,其实施、管理的成本远低于天气保险查勘定损及理赔的成本。

第四,天气衍生品扩大了天气风险分散和转移的范围<sup>[81]</sup>。除种植业以外,还涵盖了能源业、建筑业、交通业、餐饮业、保险及再保险业等行业。同样,由于金融市场扩大的规模和效率及其高风险敏感性等特点,也吸引了更多的社会投资、基金等金融机构的加入,引导了大批的社会资本参与转移或稀释天气风险,把天气风险分散给更有能力或意愿承担风险的企业<sup>[13, 82]</sup>。

#### 3.2.2 天气衍生品的局限

首先,应用天气衍生品存在的主要问题是基差风险和信用风险。目前,天气衍生品合约一般是采用场内交易,所以基差风险仍是主要风险<sup>[83]</sup>,即由于分地区小气候等造成基于天气数据计算的赔款与被保险人的实际损失程度有偏差。

其次,天气衍生品合约确定的补偿是依据天气事件而非实际损失,购买者获得的补偿只是依据实际损失与天气变化的相关程度,所以有时会出现天气衍生品收益不足以弥补损失或者补偿超过损失的情况<sup>[16]</sup>。

第三,迄今为止,市场上还没有一个统一的天气衍生品定价模型,由于天气衍生品与传统的金融衍生品仍存在一定差异<sup>[2, 16]</sup>,故传统的金融定价模型并不适用于天气衍生品。

### 3.3 天气衍生品的发展

#### 3.3.1 国外天气衍生品的发展

天气衍生品市场的诞生源于美国20世纪90年代对于能源行业的自由化改革<sup>[84]</sup>。天气状况的改变是影响能源消耗的关键因素之一,当能源领域从垄断改变为自由竞争之后,市场的不确定性就变成了左右能源价

格稳定性的最直接原因，并使更多的能源公司明显地感觉到了市场自由竞争所产生的影响。虽然美国对能源市场的解禁导致了该领域的运行环境更为合理，但同时也增加了市场的定价压力<sup>[78]</sup>。1997—1998年厄尔尼诺事件造成的暖冬使得许多企业获利减少，也吸引了更多公司开始关注气候问题。为了规避非预期天气条件变化给企业运营带来的不利影响，1997年美国安然(Enron)公司与美国科氏(Koch)工业签订了世界上第一笔天气衍生合同<sup>[5]</sup>。这笔交易是在场外市场上完成的，旨在保护特定地区内冬季里温度超过往年平均气温、夏季里温度低于往年平均气温的特殊情况下造成的损失<sup>[85]</sup>。从某种意义上说，天气衍生品是资本市场和保险市场结合的产物。

随着天气衍生品市场的不断发展，为降低交易费用且便于操作，天气衍生品合同也逐步发展成了具备固定格式和明确内容的标准化合约。1998年后期，在欧盟和亚太地区又相继出现了天气衍生品交易市场。当时的交易模式一直为场外交易，由买卖双方通过经纪人进行交易。直到1999年，芝加哥商品交易所(CME)才开始把天气衍生产品带入场内进行交易，推出了四个城市取暖指数(Heating Degree Days, HDD)和制冷指数(Cooling Degree Days, CDD)现货和期货期权合约<sup>[3, 5]</sup>。在2001年，伦敦市国际财政期货交易所(LIFFE)发行了伦敦、巴黎和柏林各城市的每日天气汇编指数合约，并使用其电子商务平台LIFFE Connect完成交易。尽管这种场内交易的最初尝试都以失败收场，但也标志着天气衍生品开始进入场内交易阶段。同时，也正是因为这种最初的尝试，才会有现在CME天气交易指数的迅速发展。2006年，CME的天气合约成交量达到80万手，合约总额也达到了210亿美元<sup>[5]</sup>。

随着资本市场与保险市场的结合，投资在天气风险相关产品上的可观收入吸引了更多的资本，包括银行、保险公司和对冲基金，他们都在寻找可以分散投资组合又可以提高收益的方法，这有力地促进了天气衍生品流动性的提高<sup>[7]</sup>。与此同时，当今社会对管理天气风险的需求逐渐从能源行业延伸到了其他领域，对冲资金不断涌入市场。成立于1999年的天气风险管理协会(Weather Risk Management Association, WRMA)有力地推动了天气衍生品的发展，该协会的任务主要包括制定天气衍生品的标准化合约和其他便于交易的法律文件，调研该行业的发展情况和存在问题等<sup>[15]</sup>。

近年来，国际天气衍生品发展较快，CME天气

衍生品的交易量呈现上升趋势。2020年，天气期货和天气期权合约名义持仓金额分别为7.5亿美元和4.8亿美元；2020年9月是过去两年多来交易量最高的月份(图1)，日均交易量超过1000份；截至2020年12月，持仓量超过29000份，同比增长175%。美国商品期货交易委员会(CFTC)气候相关市场风险咨询委员会(MRAC)指出，交易量上涨主要是利用天气衍生品市场管理气候相关风险的需求快速增长所致。

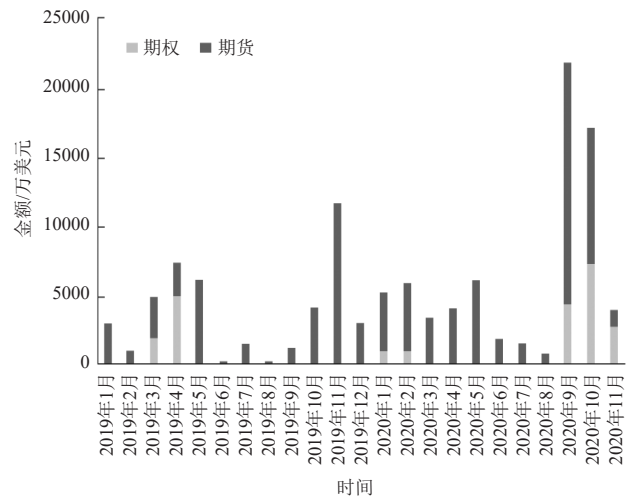


图1 CME天气期货和期权每月交易量(数据来源: CME Group)

Fig. 1 Monthly trading volume of CME weather futures and options (From: CME Group)

随着天气风险对经济发展的影响日益凸显，公司的风控部门开始从一个新的视角审视过去那些无法被保险公司受理的风险，天气风险管理已成为企业风控的重要组成部分<sup>[86]</sup>。目前，天气衍生品的交易产品已涵盖了几乎全部的气候变量，时间跨度从一周到几年，交易额也从数千美元到上亿美元。天气衍生品交易市场的繁荣发展，不仅表现在能够对冲的天气风险品种越来越丰富，同时，也有更多来自各地的企业参与到这种金融市场的交易中来。虽然美国的市场参与者还是占大多数，但随着各国经济的迅速发展，越来越多的其他国家，包括英国、法国、德国、澳大利亚、挪威、瑞典、墨西哥、日本等都陆续引入天气衍生品进行交易<sup>[87]</sup>。

### 3.3.2 国内天气衍生品的发展

气象灾害造成我国直接经济损失约占GDP的1%~3%，据预测，未来这一比例将上升至2%~8%，约为全球平均水平的8倍。根据美国Weather Bill公司公布的一项数据显示，我国有超过一半的人口居住在具有一定天气风险的地区，且我国经济因天气风险而

造成的损失每年接近2000亿元<sup>①</sup>，所以，发展天气衍生品市场对保障我国经济社会良性发展有重要意义。

我国目前场内还未正式推出标准化的天气衍生品，场外也缺乏天气衍生品的交易实例，天气衍生品尚处于研发阶段<sup>[88]</sup>。近年来，国内学者在关注天气衍生品的同时，也着重于天气期货的理论和实践研究。于力介绍了天气风险管理的基本理论，特别介绍了CME和LIFFE两个期货交易所的期货产品<sup>[89]</sup>。李国华翻译的Eric Banks的《天气风险管理》一书较为完整的阐述了天气风险管理领域的现状、应用技术、管理方法、相关法规以及财务问题等，是目前我国有关天气风险管理领域较早且比较完善的一本译著<sup>[24, 90]</sup>，具有很强的代表性。迄今为止，国内已有的研究主要集中在天气衍生产品的作用机理和特点、天气衍生品在特定领域（农业、能源等）管理天气风险的优势及方式、天气衍生品的设计与开发、天气衍生品的建模及定价研究<sup>[53, 91-100]</sup>。

从2002年开始，大连商品交易所（以下简称“大商所”）开始对天气衍生品展开全领域的探索和研究，包括理论知识的培训和对现实需求的考察和测试。同年，大商所与国家气象中心签订了一项长期的合作协议，大商所选取了国内80余个大中型城市和有气候代表性的城市作为主要研究对象，从多方位、全角度挖掘天气衍生品在我国的可行性，研究了在我国不同的农业产区，不同的人口数量和密度条件下，对电力能源和天然气的需求量变化情况；同时，了解这80多个城市降雨量及气温变化的特征及特大自然灾害发生情况等，为天气期货合约的设计提供了可靠的科学参考。2006年，大商所还和东京金融期货交易所签订了合作谅解备忘录，双方共同开发天气衍生品市场，但目前尚未开展标准化的天气衍生品交易<sup>[101]</sup>。2012年11月，香港特区政府和香港证券交易所也开始就建立天气衍生品市场的可能性展开调研，同时根据各地的天气特征，研究了开发基于不同天气指标衍生品的可行性进行，并准备适时推出相关产品<sup>[86]</sup>。2014年8月，国务院出台《关于加快发展现代保险服务业的若干意见》，提出“将保险纳入灾害事故防范救助体系，探索天气指数等新兴产品和服务”等，从保障社会民生的战略高度确定了天气衍生品的地位<sup>[102]</sup>。2021年7月，河南省遭遇极端强降雨，郑州市多个国家级气象观测站日降雨量突破有气象记录以来历史极值，超强暴雨让极端天气的危害再次引发关注。越来越多的国内学

者意识到发展天气衍生品有助于提升我国天气风险管理水平。同年，大商所与国家气象中心续签战略合作协议，聚焦积温、降水等主要作物产量预报指数的设计和衍生品开发<sup>[103-104]</sup>；国家气象信息中心与郑州商品交易所（以下简称“郑商所”）签署战略合作框架协议，联合开展天气指数期货等天气衍生品的可行性论证、品种设计、意见征求及上市等研究工作<sup>[105]</sup>。

由于起步较晚，我国在天气衍生品上尚为空白，衍生品市场仅有不足30年的历史，目前共有四家期货交易所，它们分别是：上海期货交易所、大连商品交易所、郑州商品交易所以及中国金融期货交易所（以下简称“中金”）<sup>[106]</sup>。其中前三家主要从事商品期货交易，比如黄金、大豆、白糖等，而中金所将承接股指期货等金融期货的交易<sup>[106]</sup>。另一方面，我国自古以来都是一个农业大国，农业生产存在着较大的天气风险，为了让农民收入保持一个较为稳定的增长速度，不仅需要通过农产品期货来规避价格波动带来的风险，还应积极研究天气衍生品，在遇到不利天气条件时，可以规避掉农作物在产量方面的风险。天气衍生品种类越多，为农业生产经营者提供的天气风险管理工具就更为丰富，农业保险公司可以通过市场化的途径转移天气风险，这样，农业保险公司可以不用完全依赖国家财政而是通过市场化的方式，规避自身的风险<sup>[107-108]</sup>。

### 3.4 天气衍生品典型案例

由于国内目前尚未推出比较成熟的天气衍生品，本节仅通过埃塞俄比亚农作物降雨期权合约对天气衍生品做简要介绍，表3为该期权合约细节。

表3 埃塞俄比亚农作物降雨期权合约<sup>[109]</sup>  
Table 3 Ethiopian crop rainfall option contract

指数形式	累计降雨期权
合约期限	3~10个月
合约类型	看涨期权
标的指数	水分胁迫指数
保费	93万美元

如果农作物的水分胁迫指数超过了约定水平，则表示这个时期天气是干旱的，世界粮食计划署就会选择行权，因为通过这个方法可以做到资金尽快到位，便于世界粮食计划署及时提供援助；但如果农作物的水份胁迫指数低于约定水平，则说明这个时期天气并不是干旱的，世界粮食计划署就会放弃行权。2006年由于埃塞俄比亚的降水量已经超过了历史平均水平，

① <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1703788412113031418&wfr=spider&for=pc>, 2021-06-28。

② <https://jingyan.baidu.com/article/ca00d56c2a1e56a89febcbf56.html>, 2022-12-06。

因此世界粮食计划署并没有选择行权<sup>[85]</sup>。

## 4 天气风险管理产品关键技术研发

### 4.1 灾害风险评估

灾害风险评估是指对灾害或损失的可能性评价，是灾害风险管理的核心内容。在城市规划、城镇建设、重大工程建设以及工农业生产和人民群众生活中，都需要进行灾害风险评估，预期达到灾害损失最小的目的。风险评估可以是定性或定量的，通常使用定性化描述，如“高”“中”“低”，这是基于风险的不可预测性以及难以量化的特征。

作为天气风险管理产品设计的一个关键步骤，推荐采用风险评估流程，通过对某地区天气风险的科学调查，并通过其他调研的方式收集该地的相关信息，以补充任何可用的定量数据。值得注意的是，经历过以往极端事件的当地利益相关者往往清楚地了解该地区的家庭和企业是如何受到影响的，并经常评估其社区在未来灾难性事件中的脆弱程度。风险评估确定了影响作物、农场和企业等的主要风险，并系统地开发了表征风险的模型。通常，通过量化三个主要变量，即表征风险的三个重要特性来评估风险及其影响：危险性、脆弱性和暴露性。危险性是考虑风险类型的分类，例如天气、价格、害虫、政策或市场。脆弱性是考虑了当前管理水平的能力下对受影响的资产给予的已发生风险的影响估计。暴露性是识别出来的对可能直接受到危害影响的农作物、牲畜和农场区域，及由于供应链中的相互依赖性导致的其他方的间接风险。这种风险评估过程涉及许多假设和变量的使用，因此越来越多地使用风险建模作为一种工具。

### 4.2 产量损失评估

在天气指数农业保险设计过程中，天气指数和作物灾害损失定量关系模型的构建是难点问题，也是核心问题。虽然天气指数保险的理赔过程中气象指数与理赔金额直接相关，但是天气指数保险依然是一种产量保险。在设计天气指数保险产品时，首先构建模型测算气象指数与农作物产量的对应关系，然后测定气象指数对应的农作物产量损失价值，最后换算出理赔金额。因此，农作物产量是非常重要的转化变量。

常见的灾损模型的构建主要基于统计模型、灾害试验和作物模型等方法。目前国内外的研究主要基于统计模型，但统计模型的构建需要长序列的气象、作物损失等配套完整的数据，因此经常存在数据不足和气候变量生物学意义不明确的问题，并且很难分离出特定阶段气象因子对作物生长和产量的影响。作物模型在模拟正常气候条件下的作物产量较为准确，但在

对极端天气对作物影响的模拟能力还比较有限。在农业气象学中，通常利用作物小于0的相对气象产量来表达作物的因灾减产率，即通过对气象数据的计算弥补作物产量或灾损数据的不足，这也是用气象解决天气指数农业保险产品设计的优势和关键技术之一。

### 4.3 纯费率评估

以农业保险为例，气象部门提供的气象信息，如当地各种气象灾害的出现频率，以及各种农作物的受灾频率和程度等，可以为设计具体险种和确定费率水平提供科学的基础数据。为使保险价格可持续，保险从业人员必须准确地估计保险单的预期赔付价值，也称为纯费率(pure premium)或纯风险(pure risk)。为了做到这一点，首先对覆盖期内的历史天气数据拟合一个概率分布，用概率来描述事件的可能频率和严重程度。概率分布有时可以用一个已知的分布来估计，例如高斯分布，或者用天气观测的经验分布的核平滑程序来估计。纯费率是通过将概率分布乘以由合同阈值确定的赔付率，最后乘以保险金额得到的。因此，纯费率是投保期内天气事件分布的函数，支付开始和结束的指数的阈值和限制，以及所需的总覆盖量。需要注意的是，在估计概率分布时，从业者还必须评估历史数据的趋势和其他系统性变化，概率分布严重依赖于采用的数据所在的时间范围，在该时间点使用的历史数据可能会严重歪曲当前或未来的天气风险。

评估纯费率是保险产品设计的 key 一环，适合进行纯费率评估的数据源需考虑以下5个特征：1) 历史数据长度；2) 空间特异性；3) 时间特异性；4) 数据完整性；5) 数据有效性。

### 4.4 天气衍生品精算定价

在实践中，启动一项天气衍生品合约之前，会对天气衍生品进行精算定价。当气象预报不可得时，使用相应的精算定价方法计算得到的值称为票面值。启动合约之前获得的相关气象预报的时间，在美国是6个月，而在欧洲则是3个星期。精细化的气象预报改变了天气合约定价的方法，在这里，精细化的气象预报是指气象输出结果的范围缩小了，也改变了概率。当预报结果不够准确时，这种范围缩小就很微小，而预报结果很准确时，这种范围缩小很明显。

基于气象预报定价最简单的例子是当预报能够覆盖合约涉及的整个时间段时，这类合约即可依据预报结果来定价。然而，在大多数案例中，气象预报结果不能覆盖整个合约期，因此就需要综合考虑历史数据和预报结果。一般情况下，气象从业者倾向于分开提供天气预报和季节预报结果，而这两者在格式上存在

较大差异，它们通常出自完全不同的来源。如，天气预报结果通常是以日度数据的形式给出，而季节预报的结果更多地是通过月度数据展示。尝试将这些预报结果合并为在所有的的时间尺度上单一连续的预报是天气衍生品精算定价必须解决的一个技术问题。通常，在讨论如何在定价模型中应用天气预报时往往优先考虑天气预报，然后会适当地讨论季节预报的使用，这个结果仅仅对在美国境内和日本部分范围的合约有影响。尽管我国的气象预报产品类型日益丰富、预报精度也不断提高，但是如何最大限度的发挥天气预报的功能便于开展天气衍生品精算定价仍是未来我国在发展天气衍生品过程中必须考虑的关键问题之一。

## 5 气象科技在天气风险管理中的作用

长期以来，我国政府一直把减轻自然灾害作为基本国策之一，因此，加强天气风险管理显得尤为重要，气象与天气风险管理有着密不可分的联系。气象事业是科技型、基础性、先导性社会公益事业。党的十八大以来，在以习近平同志为核心的党中央坚强领导下，各地区各有关部门不懈努力，推动我国气象事业发展取得显著成就<sup>①</sup>。在全球气候变暖背景下，我国极端天气气候事件增多增强，统筹发展和安全对防范气象灾害重大风险的要求越来越高，人民群众美好生活对气象服务保障的需求越来越多样<sup>②</sup>。

### 5.1 不断完善的气象观测网络为天气风险管理提供了坚实的数据基础

面向不同的行业需求、使用目的和客户群体，天气风险管理产品的设计和使用需要不断开发基于不同时空分辨率、不同尺度、不同气象要素、形式多样的服务产品，这就对我国气象观测网络的建设提出了更高的要求。我国综合气象观测能力达到世界先进水平：目前已建成近7万个地面站、216部雷达、7颗风云气象卫星组成的地-空-天一体化综合观测体系<sup>③</sup>，2020年全面实现地面观测自动化，全国卫星遥感应用体系基本建成，为我国气象防灾减灾、应对气候变化和生态文明建设做出了重大贡献，显著提升了我国在气象领域的国际地位和话语权。

### 5.2 气象科技可以为天气风险管理提供不同时空尺度的天气预报信息

“十三五”期间，我国气象预报能力稳步提升：实现了从站点落区到数字格点的跨越，数值预报完成了从引进消化吸收到自主研发的重大转变。预报预测准

确率稳步提升，特别是中短期重大灾害性、关键性、转折性天气过程预报准确率逐年提高<sup>[110]</sup>。目前，我国24小时晴雨预报准确率为85.9%，且客观化汛期降水预测准确率突破80分。同时，已建成覆盖全球的气象要素网格预报产品体系，初步建立了短时到延伸期的无缝隙智能网格预报业务体系，空间分辨率达到5 km、时间分辨率达1~3 h<sup>④</sup>。精度日益提高的天气预报产品不仅大大地提升了气象灾害预报、预警的准确率，也为天气风险管理产品的研发和推广提供了越来越可靠的科技支撑。世界气象组织(WMO)指出，应对气候灾害的重要措施之一是建立多灾种的早期预警系统、加强气象预报。研究显示，世界上有1/3的人口，尤其是在最不发达国家和小岛屿发展中国家，仍然无法获得早期预警系统提供的预警信息。为此，联合国和世界气象组织于2022年3月共同宣布，将在未来5年内，推动实现早期预警服务的全民覆盖，应对日益极端的天气和气候变化。

### 5.3 气象科技可以为天气风险管理提供多元化的信息服务产品

在逐步完善的气象观测网络和天气预报技术的支持下，气象部门可以为天气风险管理提供越来越多元化的、具有重要参考意义的气象信息服务产品，这些服务产品大致可以分为两类。

一类是传统的气象信息服务产品，主要包括：天气预报产品、气候产品、农业气象产品、气象指数产品。其中，基于权威气象数据研发的气象指数类产品及后续衍生品，不仅在气象灾害预报、预警、农业天气指数保险推广应用中大受欢迎，也在助力落实国家应对气候变化战略部署、推动能源气象服务体系建设 and 能源绿色低碳转型，帮助能源行业更加准确把握资源状况、规避投资和生产风险方面起到积极的推动作用，破解了“靠天吃饭”的不稳定难题。

另一类是根据用户需求提供的定制化的气象信息服务产品。近年来，随着各行各业对气象信息的需求日趋丰富，气象部门可以根据用户的需求对气象信息进行加工处理，从而形成满足客户所需的定制化的气象信息服务产品。气象服务精细化多模式集成预报服务产品(简称OCF)基于多个全球数值模式预报，采取地形空间降尺度、趋势拟合时间降尺度、模式误差滚动订正、动态权重集成、主客观融合，建立的国内首个直接对外服务的基于位置的全球任意点客观精细

① <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1732020836456130123&wfr=spider&for=pc>, 2022-05-06.

② <http://dangjian.people.com.cn/n1/2022/0905/c117092-32519354.html>, 2022-09-05.

③ [http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/20/content\\_5581210.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/20/content_5581210.htm), 2021-01-20.

④ [http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/30/content\\_5507633.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/30/content_5507633.htm), 2020-04-30.

化预报服务产品,可满足公众、能源、交通、电力、旅游、海岛、机场等行业的个性服务需求。联合国粮农组织建议各国采取多灾种、跨部门的系统性风险管理方法,应对灾害风险。卫星技术和信息技术在灾害监测领域获得广泛应用,包括遥感、无人机和搜救机器人等新型工具及技术可在防灾减灾救灾工作中发挥更大作用。综上所述,研发天气风险管理产品,提供有效的天气避险工具,有助于提升市场资源配置效率,强化行业发展的展性和韧性<sup>①</sup>。正因为气象与商业、农业、能源、旅游等各个行业密不可分的联系,更应促进气象部门与不同行业的深化合作,开发专业化的天气风险管理产品,为各行各业有效规避天气风险及良性发展赋能。

### 参考文献

- [1] 姚梦婷. 我国天气期货产品设计及其应用研究-基于天气影响指数的构建. 上海: 上海师范大学, 2020.
- [2] 马瑞芳. 基于O-U模型的天气衍生品定价研究. 太原: 山西财经大学, 2013.
- [3] 祖晓青. 对天气风险进行管理的措施探讨. 金融经济(下半月), 2006, (2): 3-3.
- [4] 陈信华. 天气敏感性分析与气候衍生品开发. 上海金融, 2019, (11): 20-23.
- [5] 秦大河. 影响我国的主要气象灾害及其发展态势. 见: 中国灾害防御协会. 防灾减灾文集. 北京: 新华出版社, 2007.
- [6] 邢学艳. 天气风险与天气类衍生品. 经济师, 2007, (8): 55-56.
- [7] 胡爱军, 祝燕德, 熊一鹏, 等. 论非灾难性天气风险管理. 金融经济, 2007, (2): 110-111.
- [8] 陈海燕, 雷小途, 潘劲松, 等. 气象灾害风险评估业务发展研究. 气象科技进展, 2018, 8(4): 15-21.
- [9] 裴洁. 我国应对天气风险的保险对策研究. 保定: 河北大学, 2011.
- [10] 施方. 巨灾保险证券化的探讨. 上海大学学报(社会科学版), 2004, 11(1): 55-58.
- [11] 王梓安. 天气保险及其在我国的应用前景研究. 沈阳: 辽宁大学, 2016.
- [12] 田颖楠. 温度指数期货合约产品设计——以京津冀区域气温数据为例. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [13] 张炳炜. 天气衍生品定价研究及实证分析. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [14] World Bank. Weather Index Insurance for Agriculture: Guidance for Development Practitioners. World Bank, 2011.
- [15] 王培. 我国气温指数衍生品定价的实验研究. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [16] 李慧敏. 基于PDE方法的天气衍生品定价. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [17] 胡蓉. 天气风险管理及其在我国的应用前景分析. 上海: 上海大学, 2007.
- [18] 鲁亮涛. 基于降雨指数天气衍生品的建模和定价研究. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [19] 梁昊然. 论我国巨灾保险证券化制度构建. 求索, 2013, (2): 190-192.
- [20] 祝燕德, 胡爱军, 何逸, 等. 天气衍生产品与天气风险管理. 气象软科学, 2008, (1): 94-105.
- [21] Yuriy B, Grzegorz M, Dalia S, et al. Weather risk management in the Weather-VaR approach. Assumptions of Value-at-Risk Modeling. Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research, 2020, 54(1): 31-48.
- [22] Roseman C A, Argrow B M. Weather hazard risk quantification for sUAS safety risk management. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2020, 37(7): 1251-1268.
- [23] 曾小艳. 农业天气风险管理的金融创新路径研究. 武汉: 武汉大学出版社, 2019.
- [24] 埃里克·班克斯. 天气风险管理——市场、产品和应用. 李国华, 译. 北京: 经济管理出版社, 2004.
- [25] 祝燕德, 胡爱军, 熊一鹏, 等. 经济发展与天气风险管理. 北京: 中国财政经济出版社, 2006.
- [26] 李程富, 罗玉中. 天气衍生品在气候风险管理中的应用. 经济视角, 2011, (7): 34-35.
- [27] 于宁宁, 陈盛伟. 天气指数保险国内外研究综述. 山东农业大学学报(社会科学版), 2009, 11(4): 65-69.
- [28] 侯茂章, 吴敏. 天气指数保险研究进展. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2015, 19(6): 37-42.
- [29] 成林, 方文松, 张志红, 等. 一种冬小麦干热风保险天气指数计算方法. 中国专利. CN201810548597.1, 2018-05-31.
- [30] 陈盛伟. 农业气象指数保险在发展中个国家的应用及在我国的探索. 保险研究, 2010, (3): 82-88.
- [31] 姜彤, 王艳君, 翟建青. 气象灾害风险评估技术指南. 北京: 气象出版社, 2018.
- [32] Enrico B, Erik C. Satellite data and machine learning for weather risk management and food security. Risk Analysis, 2017, 37(8): 1508-1521.
- [33] Jerry R. State of knowledge report-data requirements for the design of weather index insurance. Lexington: GlobalAgRisk, 2010: 1-51.
- [34] 朱平安, 郝蒙浩. 天气指数保险及其在农业灾害保险中的运用研究. 时代金融, 2013, (9): 83-84.
- [35] 程静. 农业旱灾风险管理的金融创新路径: 天气指数保险. 世界农业, 2013, (3): 60-64.
- [36] Hansen B, Pedersen Å, Peeters B, et al. Spatial heterogeneity in climate change effects decouples the long-term dynamics of wild reindeer populations in the high Arctic. Global Change Biology, 2019, 25(11): 3656-3668.
- [37] Janzen S A, Carter M R. After the drought: the impact of microinsurance on consumption smoothing and asset protection. American Journal of Agricultural Economics, 2019, 101(3): 651-671.
- [38] Dean K. Savings by and for the poor: a research review and agenda. Review of Income and Wealth, 2014, 60(1): 36-78.
- [39] Willemijn V, Tobias D, Robert F. Index insurances for grasslands-a review for Europe and North-America. Agricultural Systems, 2019, 168: 101-111.
- [40] Shawn C, Xavier G, Jeremy T, et al. Barriers to household risk management: evidence from India. American Economic Journal Applied Economics, 2013, 5(1): 104-135.
- [41] 虞国柱. 论中国及世界农业保险产品创新和服务创新趋势及其约束. 保险研究, 2014, (2): 14-21.
- [42] Skees J R. Challenges for use of index-based weather insurance in lower income countries. Agricultural Finance Review, 2008, 68: 197-217.
- [43] Leblois A, Quirion P. Agricultural insurances based on meteorological indices: realizations, methods and research challenges. Meteorological Applications, 2013, 20: 1-9.
- [44] Olivier M. Hedging in futures and options markets with basis risk. The Journal of Future Markets, 2002, 22: 59-72.
- [45] David Hatch, Iwan van Beurden, Eric W S. Functional safety in the life science industries. Pharmaceutical Engineering, 2008, 9: 1-8.
- [46] 范红丽, 刘玮. 天气指数保险在发展中国家中的应用及启示. 上海保险, 2015, (1): 9-14.
- [47] 鞠海彦. 从太空获得援助的农牧场. 世界科学, 2010, (5): 26-27.
- [48] 蹇筠. 乡村振兴战略下农业保险发展研究. 今日财富, 2021, (6): 23-24.
- [49] 刘丽. 自然灾害保险风险分析. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 87-91.
- [50] 邢鹏, 高涛, 吕开宇, 等. 北京市蔬菜作物生产风险区划研究. 中国农业资源与区划, 2008, 29(6): 55-60.
- [51] 虞国柱, 丁少群. 论农作物保险区划及其理论依据——农作物保险区划研究之一. 当代经济科学, 1994, (3): 64-69, 41.
- [52] 丁少群, 虞国柱. 农作物保险的危单位区划研究——农作物保险区划研究之二. 中国保险管理干部学院学报, 1994, (6): 24-29.

① [https://www.sohu.com/a/471812409\\_99963284](https://www.sohu.com/a/471812409_99963284), 2021-06-12.

- [53] 虞国柱, 丁少群. 农作物保险风险分区和费率分区问题的探讨. 中国农村经济, 1994, (8): 43-48.
- [54] 刘长标. 农作物区域产量保险的精算研究. 北京: 中国人民大学, 2000.
- [55] 王丽红, 杨泊华, 田志宏, 等. 非参数核密度法厘定玉米区域产量保险费率研究——以河北安国市为例. 中国农业大学学报, 2007, 12(1): 90-94.
- [56] 陈泽育. 湖北省兴山县政策性烟叶保险补贴水平测算. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [57] 王克. 农作物单产分布对农业保险费率厘定的影响. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [58] 梁来存. 核密度法厘定我国粮食保险纯费率的实证研究. 南京农业大学学报(社会科学版), 2009, 9(4): 28-33.
- [59] 娄伟平, 吴利红, 陈华江, 等. 柑橘气象指数保险合同费率厘定分析及设计. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1904-1911.
- [60] 丁少群. 农作物保险费率厘订问题的探讨. 西北农业大学学报, 1997, 25(1): 103-107.
- [61] 刘锐金. 湖北省县级水稻产量保险的费率厘定. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [62] 李文芳. 湖北水稻区域产量保险精算研究. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [63] 周玉淑, 邓国, 齐斌, 等. 中国粮食产量保险费率的订定方法和保险费率区划. 南京气象学院学报, 2003, 26(6): 807-813.
- [64] 郭迎春, 闫宜玲, 王春乙, 等. 农业自然风险评估及区域农业保险费率的确定方法. 应用气象学报, 1998, 9(2): 232-238.
- [65] Lou W, Sun S. Design of agricultural insurance policy for tea tree freezing damage in Zhejiang Province, China. *Theoretical Application Climatology*, 2013, 111: 713-728.
- [66] 吴利红, 娄伟平, 姚益平, 等. 水稻农业气象指数保险产品的设计——以浙江省为例. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4942-4950.
- [67] 曲思邈, 王冬妮, 郭春明, 等. 玉米干旱天气指数保险产品的设计——以吉林省为例. 气象与环境学报, 2018, 34(2): 92-99.
- [68] 王月琴, 赵思健, 聂谦. 山西沁县谷子综合天气指数保险研究. 保险研究, 2019, (4): 15-26.
- [69] 梁来存. 巨灾准备金制度下粮食作物巨灾保险政府积累的测算. 广西财经学院学报, 2019, 36(2): 36-44.
- [70] 王月琴. 天气指数保险空间基差风险的量化评估研究. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [71] 于宁宁, 陈盛伟. 气象指数保险在发展中国家的实践与启示. 新疆农垦经济, 2011, (1): 12-18.
- [72] 于宁宁. 农业气象指数保险研究. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [73] Barnett B J, Mahul O. Weather index insurance for agriculture and rural areas in low-income countries. *American Journal of Agricultural Economics*, 2007, 89(5): 1241-1247.
- [74] 王野田, 李琼, 单言, 等. 印度农业再保险体系运行模式及其启示. 保险研究, 2019, (1): 22-34.
- [75] 联合国粮食及农业组织. 2018年农产品市场状况: 农产品贸易、气候变化和粮食安全. 罗马, 2018.
- [76] 徐菊艳, 邓吉硕, 孙宁. 露天采矿业推广天气指数保险可行性分析. 合作经济与科技, 2021, (6): 56-58.
- [77] 王倩, 刘现荣, 贺倩, 等. 迈向自然受益的未来: 三大系统转型的中国机遇与路径. 可持续发展经济导刊, 2022, (1): 98-101.
- [78] 杨宇. 天气衍生品在我国的可行性研究. 中国经贸导刊, 2021, (2): 129-130.
- [79] 谢世清, 梅云云. 天气衍生品的运作机制与精算定价. 财经理论与实践, 2011, (6): 39-43.
- [80] 蔡丽平. 我国降雨指数期权的开发与设计. 成都: 西南财经大学, 2007.
- [81] 尹晨, 许晓茵. 论天气衍生品与农业风险管理. 财经理论与实践, 2007, 28(1): 47-50.
- [82] Ivana Š. Effectiveness of weather derivatives as a risk management tool in food retail: the case of Croatia. *International Journal Financial Studies*, 2017, 5(1): 2, <https://doi.org/10.3390/ijfs5010002>.
- [83] 孙保敬. 农业天气衍生品定价及对冲天气风险的效果研究. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.
- [84] George W B, Klaus B T. How firms should hedge. *Review of Financial Studies*, 2002, 15: 1283-1324.
- [85] 王勇. 冰雪天灾催生我国天气金融衍生品市场. 征信, 2008, 26(3): 78-81.
- [86] 张书杰. 天气期权定价研究. 成都: 西南财经大学, 2013.
- [87] 李程富, 罗玉中. 天气衍生品在气候风险管理中的应用. 经济视角, 2011, (7): 34-35.
- [88] 彭龙, 孙小丽. 天气衍生品中的制冷指数看涨期权定价研究与实证. 北京邮电大学学报(社会科学版), 2013, 15(1): 87-90.
- [89] 于力. 天气风险管理与天气期货. 期货日报, 郑州, 2003-08-01: 第4版.
- [90] 封朝议. 我国企业天气风险管理研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [91] 余沪蓉, 姚从容. 天气衍生产品及在我国的应用前景展望. 生态经济, 2005, (4): 74-76.
- [92] 刘元元. 天气类衍生产品与金融衍生工具功能的再认识. 国际金融研究, 2005, (8): 53-56.
- [93] 齐绍洲, 凌棱. 美国天气衍生金融工具模型及其应用. 证券市场导报, 2003, (11): 25-29.
- [94] 李黎, 张羽. 农业自然风险的金融管理: 天气衍生品的兴起. 证券市场导报, 2006, (3): 49-53.
- [95] 蔡丽平. 我国降雨指数期权的开发与设计. 成都: 西南财经大学, 2007.
- [96] 姜慧勤. 基于降雨指数的天气衍生品的开发及定价. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [97] 刘国光. 天气预测与天气衍生产品定价研究. 预测, 2006, 25(6): 28-33.
- [98] 范宇翔. 基于降雨指数的天气衍生品研究——以南京市为例. 成都: 西南财经大学, 2015.
- [99] 邹楚瑜. 天气衍生品空间基差风险量化及对冲效果研究——以山西省为例. 华北金融, 2020, (10): 66-76.
- [100] 钱利明. 天气衍生品定价及在我国的应用. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [101] 陈百硕. 天气衍生品中气温时变均值回复预测模型与实证研究. 南京: 东南大学, 2014.
- [102] 胡晓玲, 崔莹. 天气衍生品发展的国际经验借鉴. 金融纵横, 2022, (3): 63-70.
- [103] 崔海蓉, 曹广喜, 张京波. 高温天气衍生品设计及其定价模型——以长江中下游地区水稻为例. 系统工程, 2017, 35(4): 79-84.
- [104] 孙礼辉. 农户天气风险防范行为研究. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.
- [105] 胡晓玲, 崔莹. 天气衍生品发展的国际经验借鉴. 金融纵横, 2022, (3): 443-49.
- [106] 王舒文. 国内天气期货的合约设计及应用. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [107] 姜天奕. 民航运输业中的天气风险管理. 中国航班, 2019, (10): 140-141.
- [108] Monika W K. Weather risk management in energy sector: the polish case. *Energies*, 2020, 13: 945, doi: 10.3390/en13040945.
- [109] 马磊. 降雨指数衍生品合约设计及对农业天气风险的适用性研究. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [110] 王云. 气象在生态文明建设中的作用研究. 环境与发展, 2016, 28(4): 88-92.

# 杭州亚运会皮划艇和赛艇项目气候背景分析

张霏燕 姜盈 张日佳  
(杭州市富阳区气象局, 杭州 311400)

**摘要:** 利用杭州亚运会北支江水上运动中心场馆附近的气象观测站2010—2021年逐日和逐小时气象观测资料, 对场馆9月23日—10月8日的天气气候特征进行分析, 并对赛艇、皮划艇赛事进行气象条件适宜性分析。结果表明: 1) 亚运会期间会对比赛成绩影响较大的气温出现频率较低, 从气温角度看, 赛事适宜安排在08:00—11:00和17:00—20:00; 降水概率较大, 每2~3 d就会出现1次降雨天气, 但以小雨为主。2) 亚运会期间会对比赛项目产生影响的大风天气出现次数较少; 逐小时平均风速在13:00—16:00较大, 建议将受风影响较大的比赛项目尽量安排在风速相对较小的上午或傍晚。偏北风为水上运动中心最多风向, 偏东风次之; 15:00—18:00风向摆动角度最小, 从该指标来看, 水上运动赛事适宜安排在15:00—18:00。3) 日平均人体舒适度指数在9月下旬为舒适或偏热等级, 在9月末到10月上旬为舒适等级; 人体舒适度达到4级的天数最多, 3级的天数次之。4) 综合赛事各项气象条件分级指标来看, 赛艇项目和皮划艇项目最适合开展时间为08:00—09:00, 其次为10:00和17:00—20:00。

**关键词:** 亚运会, 适宜性, 皮划艇, 赛艇

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.005

## Climatic Background Analysis for Canoeing and Rowing Event in the 19th Asian Games Hangzhou 2023

Zhang Feiyan, Jiang Ying, Zhang Rijia  
(Fuyang Meteorological Bureau, Hangzhou 311400)

**Abstract:** Using the daily and hourly observational data of the automatic weather station near Beizhijiang water sports center from 2010 to 2021, the climatic characteristics of the venue during 23 September to 8 October 2023 are statistically analyzed to identify the suitability of meteorological conditions for rowing and canoeing events. Research results show as follows: (1) The occurrence frequency of temperature that will have a great impact on canoeing and rowing performance is low. From the perspective of temperature, it is suitable to hold the events at 08:00—11:00 BT and 17:00—20:00 BT. It is rainy in every 2—3 days, but it is mainly light rain. (2) There will be low occurrence frequency of gale weather that will have a great impact on performance. The wind speed is high at 13:00—16:00 BT, so it is recommended to arrange the events greatly affected by the wind in the morning or evening. The dominating wind direction is the northerly, followed by the easterly wind. The smallest wind swing angle occurs during 15:00—18:00 BT. Therefore, from the perspective of wind swing, the time period of 15:00—18:00 BT is the proper choice for the water sports. (3) The daily average human comfort index is comfortable or slightly hot in late September, and comfortable from late September to early October. The number of days when human body comfort index reaches level 4 is the highest, followed by level 3. (4) Based on the overall analysis of the meteorological factors, the most suitable time for rowing and canoeing is 08:00—09:00 BT, followed by 10:00 BT and 17:00—20:00 BT.

**Keywords:** Asian Games, suitability, canoeing, rowing

### 0 引言

第19届亚运会将于2023年9月23日—10月8日在杭州举行。届时, 杭州亚运会北支江水上运动中心场馆将承担赛艇、皮划艇(静水)等赛事。

体育运动与气象的关系密不可分<sup>[1-4]</sup>。气温通常会对运动员的植物神经系统、内分泌功能以及血压等有影响。径赛运动员发挥水平最适宜的气温为

17~20℃, 田赛运动员发挥水平最适宜的气温通常为20~22℃<sup>[5]</sup>。湿度对人体的影响主要是在热代谢和水盐代谢方面, 在空气相对湿度高时运动, 身体的热蒸发受阻, 出汗少, 皮肤调节体温的功能失常, 经常会导致运动员烦躁、疲劳和食欲不振, 而湿度太小又有干渴烦躁的感觉<sup>[6]</sup>。风的作用有利有弊, 其影响包括风速和风向两个方面。首先, 风影响体育运动项目的运动过程以至成绩; 另外, 风对人的呼吸过程、能量消耗、精神状态及新陈代谢等产生影响, 从而影响运动员的体能发挥。风对赛艇、皮划艇等静水项目比赛

收稿日期: 2021年9月9日; 修回日期: 2022年1月17日  
第一作者: 张霏燕(1986—), Email: zjzhangfeiyan@163.com

及赛道选择都有影响,当风速稳定大于3 m/s时,位于水面上风方的赛道可依次设定或调整为有利赛道,而当风速稳定大于6 m/s时,比赛将无法进行<sup>[7-9]</sup>。

目前对于第19届亚运会的气候背景已有相关的研究,但是亚运会期间比赛项目的气象要素特征还没有学者做过研究。本文分析杭州亚运皮划艇和赛艇项目的气象要素特征,以期为相应赛程的安排提供有益参考,同时也可作为亚运会期间的天气预报提供技术指导。

表1 赛艇和皮划艇项目气象条件分级指标

Table 1 Classification index of meteorological conditions for rowing and canoeing

项目	影响要素	等级	小时雨量/mm	平均风速/(m/s)	阵风风速/(m/s)	气温/℃	能见度/km
赛艇	风向、风速、雷电、能见度、降雨、水温、海浪	适宜	0	<2.5	0~8	/	/
		基本适宜	0.1~10	2.5~6	8~12	/	/
		不适宜	>10	>6	>12	>35	<1.5
皮划艇(静水)	风向、风速、雷电、能见度、降雨、水温、海浪	适宜	0	0~2.5	0~20	/	/
		基本适宜	0.1~10	2.5~8	/	/	/
		不适宜	>10	>8	>20	>35	<1.2

象保障服务总体工作方案》)。

## 1.2 方法

本文用数理统计法对相关要素的逐日、逐时分布进行分析,并对照气象条件适宜性标准进行概率统计得出结论。

风向摆动角度采用如下计算公式<sup>[10]</sup>:

$$\Delta W_i = \begin{cases} |W_i - W_{i-1}| & \text{当 } \Delta W_i \leq 180^\circ \\ 360 - |W_i - W_{i-1}| & \text{当 } \Delta W_i > 180^\circ \end{cases} \quad (1)$$

人体舒适度指数采用如下计算公式<sup>[5]</sup>:

$$I = 1.8T - 0.55(1 - H) + 32 - 3.2\sqrt{U}, \quad (2)$$

式中,  $T$ 为气温,  $H$ 为相对湿度,  $U$ 为风速。人体舒适度指数的等级划分标准见表2。

表2 人体舒适度指数的等级划分标准

Table 2 Classification criteria of human body comfort index

舒适度指数	<57	57~60	60~65	65~70	70~76	76~80	80~83	83~85	≥85
舒适度等级	1级	2级	3级	4级	5级	6级	7级	8级	9级
人体感觉	冷	偏冷	凉爽	舒适	偏热	热	闷热	炎热	酷热

另外本文在结合了表1中的气象条件分级指标,并听取了当地文化广电旅游体育局对于赛事气象服务的需求后,定义赛事最佳时次指数和备用时次指数,以期找出开展各赛事的最佳时次和备用时次。

最佳时次指数=降水适宜等级概率×平均风速适宜等级概率×阵风风速适宜等级概率×气温适宜等级概率×能见度适宜等级概率。

备用时次指数=(降水适宜等级概率+基本适宜等级概率)×(平均风速适宜等级概率+基本适宜等级概

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

本文所用的数据为杭州亚运会北支江水上运动中心场馆附近(距离2.66 km,海拔和环境都较一致)的富阳红旗村站2010—2021年9月23日—10月8日的逐日和逐小时气象观测资料,包括气温、降水量、小时降水量(指过去1 h降水)、风速、风向和能见度等,赛艇和皮划艇(静水)的赛事气象条件分级指标见表1(指标来自《浙江省第19届亚运会和第4届亚残运会气

率)×(阵风风速适宜等级概率+基本适宜等级概率)×(气温适宜等级概率+基本适宜等级概率)×(能见度适宜等级概率+基本适宜等级概率)。

## 2 气候特征分析

### 2.1 气温

依据多年气象资料分析,水上运动中心9月23日—10月8日平均温度22.0℃,日平均气温呈现递减的趋势,表明天气逐渐转凉(图1)。极端最低气温10.4℃,极端最高气温36.2℃,≥35℃高温天数年均0.5 d。

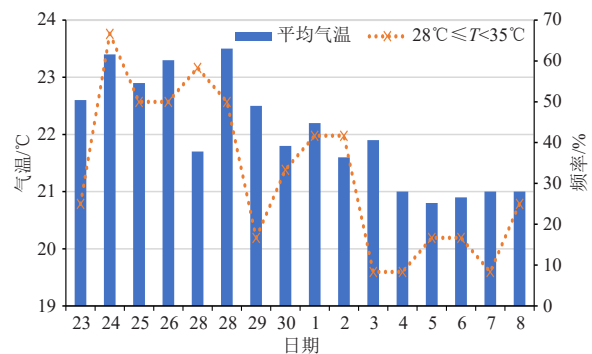


图1 2023年9月23日—10月8日日平均气温和28~35℃日数出现频率逐日变化图

Fig. 1 Daily variation of daily average temperature and occurrence frequency of 28—35℃ from 23 September to 8 October 2023

据研究,15~25℃是运动员发挥成绩的最佳气温。当气温超过28℃,人体就会感觉不适;低于15℃或高于35℃时对体育运动成绩则会产生较大影响<sup>[5]</sup>。统计发现,9月23日—10月8日日最高气温变化

范围为18.7~36.2℃。将日最高气温分为4个等级，分别统计各级日最高气温出现的平均日数(表3)，从表中可以看到，日最高气温在25~28℃的日数最多，年均5.7 d; 28~35℃的日数次之，年均5.4 d，且从28~35℃逐日出现频率的分布图(图1)可以看到10月2日以前28~35℃出现频率较高，10月3日开始出现频率明显降低，因此在亚运会前期容易出现会使运动员人体感觉不适的气温; 高于35℃的天数年均0.5 d，表明会对运动成绩产生较大影响的气温出现次数较少。

表3 2023年9月23日—10月8日各级日最高气温( $T$ )年均出现日数

Table 3 Annual average occurrence days of daily maximum temperature at all levels from 23 September to 8 October 2023

	$15^{\circ}\text{C} \leq T < 25^{\circ}\text{C}$	$25^{\circ}\text{C} \leq T < 28^{\circ}\text{C}$	$28^{\circ}\text{C} \leq T < 35^{\circ}\text{C}$	$T \geq 35^{\circ}\text{C}$
年平均出现日数/d	4.4	5.7	5.4	0.5

从各级气温出现频率的逐小时变化图(图2)可见，15~25℃气温段出现频率最高，且15~25℃在08:00—11:00(北京时，下同)和17:00—20:00出现频率达到了50%以上; 25~28℃和28~35℃两个气温段在12:00—16:00出现频率较高，这与气温的日变化相一致; 高于35℃的气温仅出现在13:00—16:00，且出现频率较低，在1%~2%。因此，08:00—11:00和17:00—20:00的气温较有利于运动员成绩的发挥，12:00—16:00出现使运动员感觉不适的气温的概率增大，且在13:00—16:00可能会出现对运动成绩产生较大影响的气温，但发生频率较低，在正常的气温日变化中，这个时间段也是日最高气温出现的时段，因此该结论与实际情况相符。从气温角度看，赛事适宜安排在08:00—11:00和17:00—20:00。

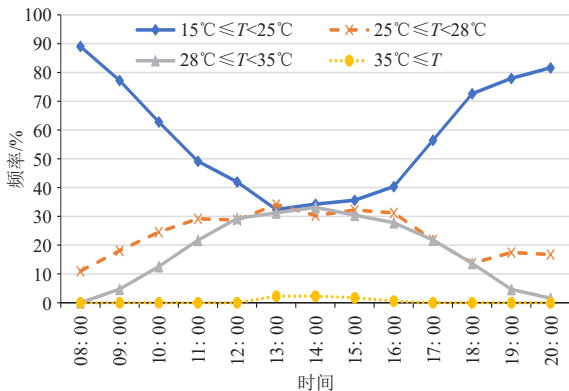


图2 2023年9月23日—10月8日各级气温出现频率逐小时变化图  
Fig. 2 Hourly variation of temperature occurrence frequency at all levels from 23 September to 8 October 2023

## 2.2 降水

水上运动中心9月23日—10月8日平均降水总量为68.9 mm，最大日降水量为254.3 mm，出现在2013年10月7日，为台风“菲特”影响造成的降水; 平均降水日数为6.2 d，且逐日降水出现频率的分布呈现随机性(图3)，因此亚运会期间平均2~3 d就可能出现1次降水天气; 9月23日—10月8日降雨量为小雨量级(0~9.9 mm)的日数年均14.5 d，中雨量级(10~24.9 mm)的日数年均0.8 d，大雨量级(25~49.9 mm)的日数年均0.5 d，暴雨以上量级(>50 mm)日数年均0.2 d。因此，亚运会期间降水概率较大，但以小雨量级为主。

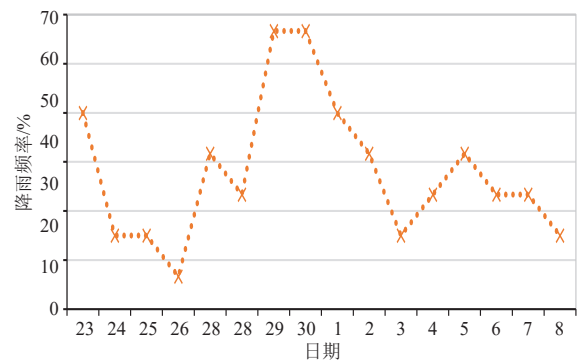


图3 2023年9月23日—10月8日逐日降雨频率序列图  
Fig. 3 Daily variation of rainfall frequency from 23 September to 8 October 2023

从水上运动中心9月23日—10月8日降水日期间白天的逐小时降水变化曲线(图4)可见，逐小时降水量在16:00最大，平均为2.9 mm，降水量的次大值在14:00，平均为2.7 mm; 逐小时降水频率小幅波动，主要集中在08:00—11:00和18:00—20:00，其值在10%~16%，其余时段发生频率均在7%~10%，各个

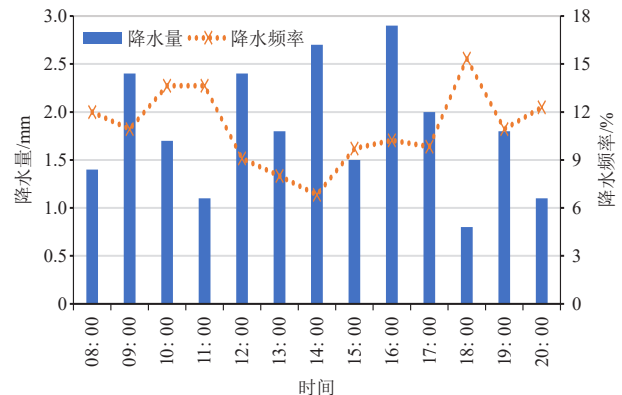


图4 2023年9月23日—10月8日降水日期间逐小时降水量及降水发生频率变化图  
Fig. 4 Hourly variation of precipitation and precipitation frequency between precipitation days from 23 September to 8 October 2023

时次差别不大。总体来说,降水日变化对亚运会赛程安排影响不大。

## 2.3 风向风速变化

### 2.3.1 风速分析

水上运动中心9月23日—10月8日极大风速的最大值为22.0 m/s(9级),出现在2021年9月29日;从表1可见当阵风风速大于12 m/s时不适宜赛艇比赛的进行,大于20 m/s时不适宜皮划艇比赛的进行,因此对水上运动中心6级及以上阵风的出现次数进行分析。统计结果表明,出现8级以上大风的天数年均均为0.2 d,出现7级风的天数年均均为0.2 d,出现6级风的天数年均均为0.4 d,表明亚运会期间会对比赛项目产生影响的大风天气出现次数较少。

从水上运动中心9月23日—10月8日平均风速逐小时变化曲线(图5)可见,08:00—20:00逐小时平均风速在1.2~2.1 m/s。平均而言,13:00—16:00平均风速较大,在1.9~2.1 m/s;其余各个时段的平均风速在1.2~1.9 m/s。因此,在亚运会赛程安排上,应将受风影响较大的比赛项目尽量安排在风速相对较小的上午或傍晚。

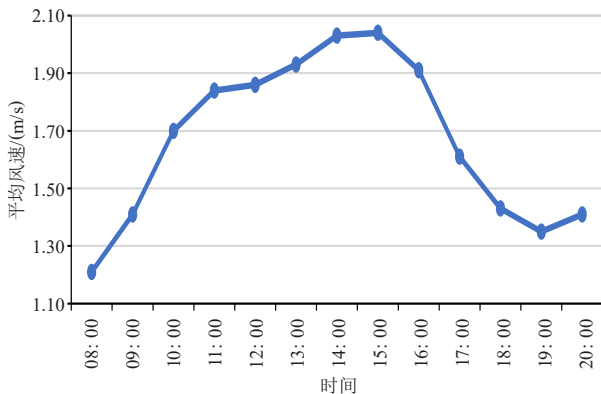


图5 2023年9月23日—10月8日平均风速逐小时变化图  
Fig. 5 Hourly variation of average wind speed from 23 September to 8 October 2023

### 2.3.2 风向频率和风向摆动分析

图6为水上运动中心9月23日—10月8日各种风向随时间的演变特征,统计表明,偏北风为水上运动中心最多风向,其中14:00—19:00偏北风频率达到了50%左右;偏东风频率次之,在30%左右;偏西风 and 偏南风频率分别在20%和10%左右;静风的频率在4%以下。

水上运动项目除了对风速有要求外,比赛选手们对风向的摆动也非常关注,风向稳定,摆动小有助于选手取得好成绩<sup>[9]</sup>。从水上运动中心9月23日—10月8日风向摆动逐小时变化图(图7)可见,风向摆动角度呈现先降后升的趋势,08:00—13:00在55°~64°;

14:00和19:00—20:00的风向摆动角度在50°~55°;15:00—18:00风向摆动角度在50°以下。因此从风向摆动来看,赛事适宜安排在15:00—18:00。

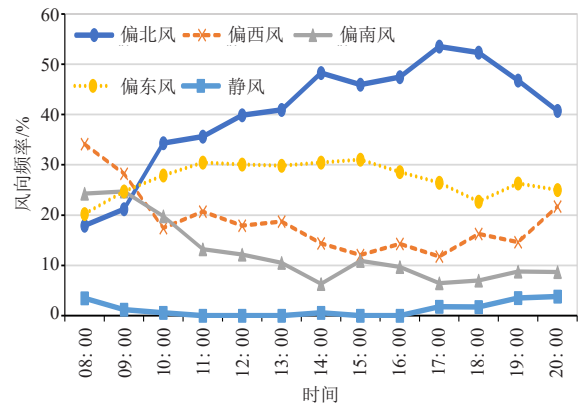


图6 2023年9月23日—10月8日各风向频率逐小时变化图  
Fig. 6 Hourly variation of frequency in each wind direction from 23 September to 8 October 2023

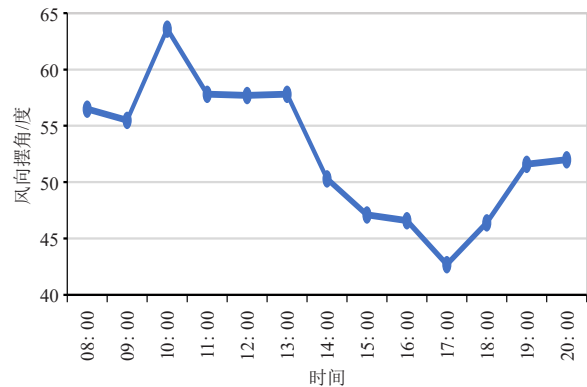


图7 2023年9月23日—10月8日风向摆动逐小时变化图  
Fig. 7 Hourly variation of wind swing from 23 September to 8 October 2023

## 2.4 人体舒适度特征分析

人类机体对外界环境的主观感觉有别于大气探测仪器获取的各种气象要素的观测结果。人体舒适度指数是为了从气象角度来评价在不同气象条件下人的舒适感,根据人类机体与大气环境之间的热交换而制定的生物气象指标<sup>[10]</sup>。图8为水上运动中心9月23日—10月8日日平均人体舒适度指数逐日变化图。可以看出,水上运动中心日平均人体舒适度指数呈现逐日下降趋势,与日平均气温的变化趋势一致,在9月下旬日平均舒适度指数在67~71,为舒适或偏热等级,在9月末到10月上旬日平均舒适度指数降低,在65~69,为舒适等级。

表4给出了水上运动中心9月23日—10月8日各个等级舒适度出现日数和频率情况。9月23日—10月8日人体舒适度达到4级(舒适)的天数最多,年平均为6.1 d,出现频率为38%,在9月下旬4级出现频率高于

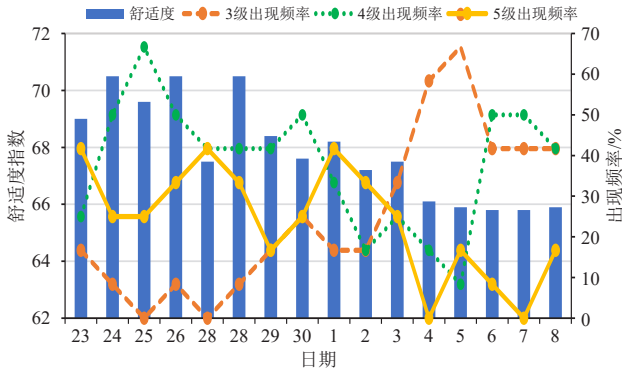


图8 2023年9月23日—10月8日日平均人体舒适度指数逐日变化图  
Fig. 8 Daily variation of daily average human body comfort index from 23 September to 8 October 2023

其它等级(图8), 10月上旬4级出现频率整体呈现下降趋势; 人体舒适度达到3级(凉爽)的天数为第二多, 年平均为4.0 d, 出现频率为25%, 人体舒适度达到5级(偏热)的天数为第三多, 年平均为3.8 d, 出现频率为24%, 且3级和5级出现频率呈现此消彼长的趋势(图8), 在9月下旬5级出现频率高于3级出现频率, 10月上旬开始, 5级出现频率降低, 而3级出现频率大幅上升。出现1级(冷)、2级(偏冷)、6级(热)和7级(闷热)的频率少, 在1%~8%。人体舒适度等级为8级(炎热)和9级(酷热)的天数没有出现。

表4 各个等级舒适度出现日数和频率

Table 4 Occurrence times and frequency of human body comfort index at each level

等级	1	2	3	4	5	6	7	8	9
平均日数/d	0.2	0.6	4.0	6.1	3.8	1.3	0.1	0.0	0.0
频率/%	1	4	25	38	24	8	1	0	0

### 3 赛事气象条件适宜性分析

#### 3.1 赛艇

从赛艇气象条件适宜性分析得出, 9月23日—10月8日水上运动中心08:00—20:00气温、能见度、阵风适宜等级频率较高(图略), 气温和能见度适宜等级频率在98%~100%, 阵风适宜等级频率在92%~98%。小时降水量适宜等级频率在85%~93%(图9), 不适宜率在0%~1%, 总体比例较低, 这表明降水量要素总体还是较有利于赛艇比赛的进行。平均风速适宜率在74%~95%, 呈现V型分布, 两头高中间低, 表明午后平均风速适宜率相对较低; 平均风速不适宜率为0%~1%, 表明平均风速总体也较有利于赛艇赛事开展。

进一步分析得出, 赛艇项目备用时次指数都在95%以上, 总体适合赛艇赛事的开展。从最佳时次指数分布来看(图10), 最适合开展赛艇比赛的时次

为08:00—09:00, 指数在80%以上; 其次为10:00和17:00—20:00, 指数在70%~75%。从第2节的分析中得出午后气温较高, 风速较大, 对于比赛的开展较为不利, 因此该结论与前面的分析相一致。

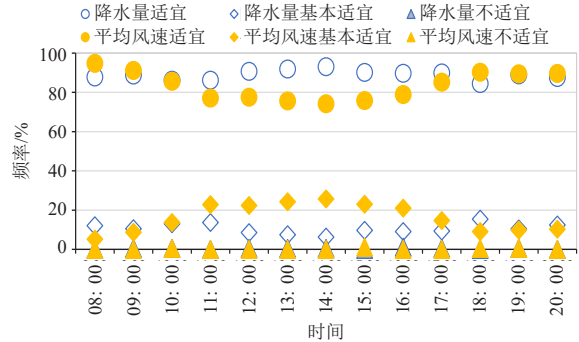


图9 2023年9月23日—10月8日赛艇项目小时降水量、平均风速适宜等级逐小时频率分布图

Fig. 9 Hourly distribution of suitable grade frequency of precipitation and average wind speed for rowing from 23 September to 8 October 2023

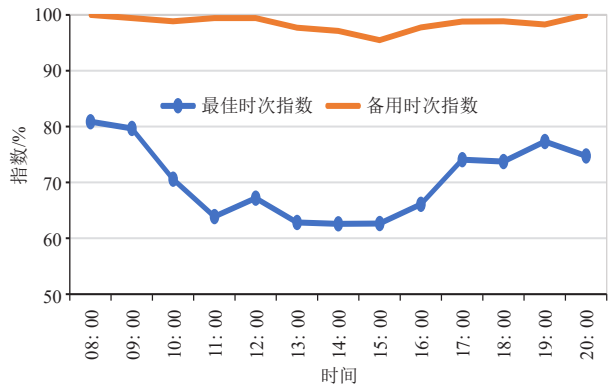


图10 2023年9月23日—10月8日赛艇项目最佳、备用时次指数逐小时分布图

Fig. 10 Hourly distribution of the best time and standby time index for rowing from 23 September to 8 October 2023

#### 3.2 皮划艇

从皮划艇气象条件适宜性分析得出, 08:00—20:00气温、能见度和阵风风速达到适宜等级的频率在98%~100%, 而皮划艇小时降水量和平均风速适宜等级逐小时频率分析结果与赛艇一致, 本节不再赘述。皮划艇项目备用时次指数(图11)都在97%以上, 总体适合皮划艇赛事的开展。从最佳时次指数分布来看, 最适合开展皮划艇比赛的时次为08:00—09:00, 指数在80%以上; 其次为10:00和17:00—20:00, 指数在70%~75%。

### 4 结论

1) 水上运动中心9月23日—10月8日平均温度22.0℃, 日平均气温呈现递减趋势, 表明天气逐渐

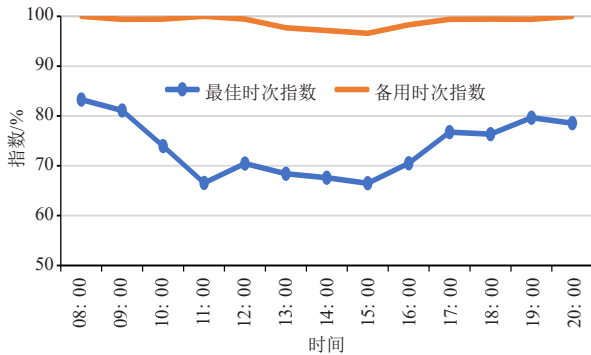


图11 2023年9月23日—10月8日皮划艇项目最佳、备用时次指数逐小时分布图

Fig. 11 Hourly distribution of the best time and standby time index for canoeing from 23 September to 8 October 2023

转凉；亚运会前期容易出现会让运动员感觉不适的气温，但亚运会期间会对比赛成绩影响较大的气温出现频率较低，从气温角度看，赛事适宜安排在08:00—11:00和17:00—20:00。9月23日—10月8日平均降水量为68.9 mm，年平均降水日数6.2 d，平均2~3 d就会出现1次降水，降水概率较大，但以小雨量级为主；逐小时降水发生频率大值区集中在08:00—11:00和18:00—20:00，其值在10%~16%，其余时次发生频率均在7%~10%，降水日变化对亚运会赛程安排影响不大。

2) 水上运动中心9月23日—10月8日出现8级以上大风的天数年均均为0.2 d，出现7级风的天数年均均为0.2 d，出现6级风的天数年均均为0.4 d，表明亚运会期间会对比赛项目产生影响的大风天气出现次数较少。逐小时平均风速在13:00—16:00较大，建议将受风影响较大的比赛项目尽量安排在风速相对较小的上午或傍晚。偏北风为水上运动中心最多风向，偏东风次之。15:00—18:00风向摆动角度最小，因此从风向摆动来看，水上运动赛事适宜安排在15:00—18:00。

3) 日平均人体舒适度指数在9月下旬为舒适或偏

热等级，在9月末到10月上旬为舒适等级。人体舒适度达到4级（舒适）的天数最多，3级（凉爽）的天数次之，5级（偏热）的天数为第三多；在9月下旬4级出现频率高于其他等级，10月上旬4级出现频率整体呈现下降趋势，而3级和5级出现频率呈现此消彼长的趋势，9月下旬5级出现频率明显高于3级出现频率，10月上旬开始5级出现频率降低，而3级出现频率大幅上升。

4) 综合赛事各项气象条件分级指标来看，赛艇项目和皮划艇项目最适合开展时间为08:00—09:00，其次为10:00和17:00—20:00。

#### 参考文献

- [1] 李筱竹, 张晓美, 吕明辉. 大型体育赛事气象服务社会效益评估方法的设计——以青年奥林匹克运动会为例. 气象科技进展, 2020, 10(4): 42-46.
- [2] 孙长征, 高慧君, 黄燕玲, 等. 气象要素对体育项目的综合影响. 山东气象, 2011, 31(2): 23-26.
- [3] Kiktev D B, Astakhova E D, Bllnov D V, et al. Development of forecasting technologies for meteorological support of the Sochi: 2014 Winter Olympic Games. Russian Meteorology and Hydrology, 2013, 38(10): 653-660.
- [4] Rutty M, Scott D, Steiger R, et al. Weather risk management at the Olympic Winter Games. Current Issues in Tourism, 2015, 18(10): 931-946.
- [5] 朱燕君, 陈峪, 李庆祥, 等. 北京奥运会期间的气象条件分析. 应用气象学报, 2006, 17(s1): 35-41.
- [6] 丁向东, 宛钟娜. 气象、气候环境对体育运动的影响. 体育成人教育学报, 2006, 22(6): 49-50.
- [7] 王彦, 李胜山, 李一平, 等. 奥运会赛艇场馆逐时风场特征. 气象科技, 2008, 36(6): 811-813.
- [8] 赵玉洁, 于凤英, 张文琴. 风对赛艇等户外静水项目有利赛道选择的影响. 气象科技, 2011, 39(4): 525-528.
- [9] 王明洁, 张小丽, 李兴荣. 2011年第26届世界大学生运动会海上基地选址的气象条件分析. 热带气象学报, 2010, 26(2): 218-222.
- [10] 洪光, 徐晓亮. 青岛奥帆赛期间天气气候背景分析. 应用气象学报, 2006, 17(s1): 54-59.
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 23-32.
- [12] 朱志强, 王飞, 王东海, 等. 2016—2017雪季冬奥会“窗口期”气象资料分析与建议. 上海体育学院学报, 2019, 43(1): 43-50.
- [13] 王学林, 谢金花, 王志, 等. 基于弹性脆弱性指标的环巢湖自行车赛风险辨识. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(2): 123-128.
- [14] 杨艳娟, 周慧. 奥运期间天津极端天气气候事件背景分析. 气象科技, 2007, 35(6): 890-893.
- [15] 李庆祥, 朱燕君, 熊安元. 北京等6城市奥运期间不利天气的概率统计. 应用气象学报, 2006, 17(s1): 42-47.

# 基于数据挖掘的气象三要素空间一致性检验方法

张捷<sup>1</sup> 张小龙<sup>2</sup> 陈泊舟<sup>3</sup> 陈子凡<sup>4</sup>

(1 新余市气象局, 新余 338001; 2 延安市气象局, 延安 716100; 3 吴起县气象局, 吴起 716600;  
4 十堰市气象局, 十堰 442000)

**摘要:** 质量控制是确保高质量气象观测数据必不可少的重要环节, 空间一致性检验有助于更加精细化的数据质量控制。经典的空间一致性检验方法假设气象要素分布具有连续性、均匀性特征, 但在复杂天气系统中效果不佳。因此, 基于数据挖掘技术提出了一种新的空间一致性检验方法。将邻近5个台站的温度、湿度和2 min平均风速数据分别作为随机森林回归模型的输入, 模型输出测试台站的预测温度, 通过多次试验计算出预测值与真实值的均方误差。试验表明: 随机森林回归算法在温度、湿度和2 min平均风速上都优于空间回归检验算法。同时随机森林算法运行速度快, 并且不用人工手动设置阈值, 它可以有效地降低算法的时间复杂度, 运行时效可以满足实时业务需求, 这为将随机森林算法应用到气象数据质量控制中提供了有力的支撑。

**关键词:** 数据挖掘, 质量控制, 随机森林, 空间一致性检验

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.00.002

## The Spatial Consistency Test Method for the Three Elements of Meteorology Based on Data Mining

Zhang Jie<sup>1</sup>, Zhang Xiaolong<sup>2</sup>, Chen Bozhou<sup>3</sup>, Chen Zifan<sup>4</sup>

(1 Xinyu Meteorological Service, Xinyu 338001; 2 Yan'an Meteorological Service, Yan'an 716100; 3 Wuqi County Meteorological Service, Wuqi 716600; 4 Shiyan Meteorological Service, Shiyan 442000)

**Abstract:** Quality control is essential and indispensable for high-quality meteorological observation data. Data quality control with higher refinement can be achieved by spatial consistency test method. For the classical spatial consistency test method, meteorological elements have to be distributed in a continuous and uniform manner, hence the method is not effective in complex weather systems. This paper proposes a new spatial consistency test method based on data mining technology. The temperature, humidity and 2-minute average wind speed data of five adjacent stations are used as the input of the random forest regression model, and then the model outputs the predicted temperature of the test station. After multiple tests, the mean square error between the predicted value and the real value is calculated. The research results show that the random forest regression algorithm outperforms the spatial regression test algorithm in temperature, humidity and 2-minute average wind speed. Meanwhile, thanks to its high speed and the automatic threshold setting, the random forest method can effectively reduce the time complexity of the algorithm and meet the real-time operational requirements. These advantages are conducive to the application of random forest algorithm in meteorological data quality control.

**Keywords:** data mining, quality control, random forest, spatial consistency test

### 0 引言

质量控制是确保高质量气象观测数据必不可少的重要环节, 传统的地面气象观测数据质量控制方法包括: 气候学界限值检查、台站极值检查、内部一致性检查、空间一致性检查<sup>[1]</sup>。传统的质量控制方法主要根据天气学、气候学原理, 进行极值检查, 或是以气象要素的时间变化规律、或是各要素内部联系为线索, 进行内部一致性检查。这些传统方法只能发现明显异常的数据, 但对于与正确观测数据相差不大(如

温度相差3℃以内)的数据效果并不理想<sup>[2]</sup>。随着计算机技术的发展, 空间一致性检验技术应当被应用于地面自动站数据质量控制流程中<sup>[3]</sup>。

经典的空间一致性检查方法假设气象要素分布具有连续性、均匀性的特点, 将某一观测站的观测资料与其周围其他站点的观测资料进行对比分析, 从而判断其数据是否正常。常见算法有: 反距离加权插值法、空间回归检验法、Madsen-Allerup方法。反距离加权插值法需要知道目标台站与其他台站的距离, 并且反距离加权插值法只考虑了两点之间的距离因素<sup>[4]</sup>, 忽略了地形对天气模式的影响。Madsen-Allerup方法, 假设目标台站与参考台站所处的区域内要素的空间分

收稿日期: 2022年4月15日; 修回日期: 2022年9月22日  
第一作者: 张捷(1997—), Email: 438676610@qq.com

布是均一的<sup>[5]</sup>, 不适用于山区地形。空间回归检验法考虑了邻近台站数据的相关性, 比反距离加权插值法具有更好的检验效果<sup>[6]</sup>, 但是计算过程比较复杂。近年来, 许多研究人员对空间一致性检验提出了诸多新的方法。何志军等<sup>[7]</sup>提出了一种四方位空间一致性检验方法, 对雷暴等小尺度天气系统具有良好的检测性能, 但是这种方法也需要使用到台站的空间位置信息。

随着大数据时代的来临, 越来越多的学者将数据挖掘技术应用到气象数据质量控制当中。数据挖掘是从庞大的数据集中提取有用的数据或信息, 总结这些数据和信息的内在联系, 提出一种简单易懂的数据模型方法<sup>[8]</sup>。周欢乐<sup>[9]</sup>利用关联分析算法对历史气象观测数据学习出一套关联规则, 不满足关联规则的新数据将被判定为异常数据。侯飙<sup>[10]</sup>提出了一种基于粒子滤波的神经网络气象数据质量控制方法, 相对于传统方法性能有所提高。李涛等<sup>[11]</sup>使用关联分析方法提出了一种气象观测设备一致性检测模型, 该方法能够挖掘出所有相关性很强的规则, 还可以利用规则匹配的方法对设备之间进行一致性检测。

数据挖掘技术专注于研究数据之间的相关性而不是因果性, 得到的结果是模糊的而不是精确的<sup>[12]</sup>。因此, 在现有的观测数据无法满足业务需求、布设新的探测设备代价太高或无法布设、尚未完全掌握大气运动规律、无法通过理论推演和方程计算准确预报天气或气候的情况下, 数据挖掘技术不失为一种退而求其次的选择<sup>[13]</sup>。

## 1 算法介绍

### 1.1 随机森林

随机森林算法是在决策树算法<sup>[14]</sup>的基础之上所发展起来的一种算法。CART算法<sup>[15]</sup>是一种经典的决策树算法, CART树既可用于解决分类问题, 也可用于解决回归问题。

2001年, Breiman提出了使用多个决策树来进行投票决策的随机森林算法<sup>[16]</sup>。随机森林算法以随机抽取的方式从整个训练数据集中抽取出一个子集用于生成一棵决策树, 多次重复上述步骤就可以获得多个形态不同的决策树, 最终获得一个决策树森林。决策树生成的随机性以及森林决策的组合性使得随机森林算法相比较于单棵决策树具有更好的泛化能力, 可以有效避免过拟合问题。

### 1.2 K-means 聚类算法

K-means 聚类算法是聚类算法中最经典的算法, 被广泛研究和应用于不同的学科领域, 并发展出大量不同的改进算法。虽然K-means 聚类算法被提出已经

超过50年了, 但目前仍然是应用最广泛的划分聚类算法之一<sup>[17]</sup>。K-means 算法的主要思路如下: 选择K个初始质心, 遍历数据列表, 将每个点指派到最近的质心, 从而形成K个簇。重新计算每个簇的质心, 并重复指派和更新步骤, 直至簇成员不再变化或质心不再变化<sup>[18]</sup>。

K-means 算法中的K是事先给定的, 然而K值的选定有时候是难以估计的。很多时候, 研究人员事先并不知道数据集应该分成多少个类别才最合适。这是K-means 算法的一个不足, 许多学者针对这个问题提出了诸多的改进。Rousseeuw<sup>[19]</sup>提出使用轮廓系数来评价聚类效果的好坏, 平均轮廓系数越大, 表明聚类效果越好, 每个簇之间的分离性越好。虽然这种方法并不总是有效的, 但可以帮助研究者洞察数据中簇的个数。

### 1.3 Apriori 关联算法

Apriori 关联算法是一种最有影响的挖掘关联规则的频繁项集算法。该算法的基本思想如下: 首先找出所有的频繁项集, 这些项集出现的频繁度至少和预定义的最小支持度一样。然后由频集产生强关联规则, 这些规则必须满足最小支持度和最小可信度<sup>[20]</sup>。Apriori 关联算法可以用于发现隐藏在大型数据集中的有意义联系, 所发现的联系可以用关联规则或频繁项集的形式表示。

## 2 试验描述

本次试验使用四川省内145个国家气象站(图1)2020年11月的逐小时观测数据, 试验数据全部来源于中国气象数据网。四川省位于中国内陆西南部, 地貌以山地为主, 具有山地、丘陵、平原和高原四种地貌类型, 地形复杂, 难以对省内各个站点进行精细的天气系统划分。本次试验尝试使用聚类分析与关联分析去发现这145个台站数据之间具有怎样的联系。

### 2.1 四川省各地区地面观测气象数据的相关性研究

从试验数据中随机选取4个时刻的观测数据作聚类分析, 其中横坐标为聚类数量, 纵坐标为平均轮廓系数, 平均轮廓系数越接近1, 表明聚类效果越好。从图2中可以看出, 无论在哪个时刻, 当聚类数量为2时, 平均轮廓系数最大, 此时的聚类效果最好。这表明四川省的地面气象观测数据应当被划分为两个类别, 这正好对应于四川省内的川西高原和四川盆地两个区域。

将聚类数量设定为2, 对四川省2020年11月逐小时观测数据进行聚类分析, 得到A(对应四川盆地)、B(对应川西高原)两个聚类数据集。分别对两个聚类数据集做关联分析, 可以得到对应的频繁项数据集。频繁项数据集包含了经常一起出现在聚类数据集中的

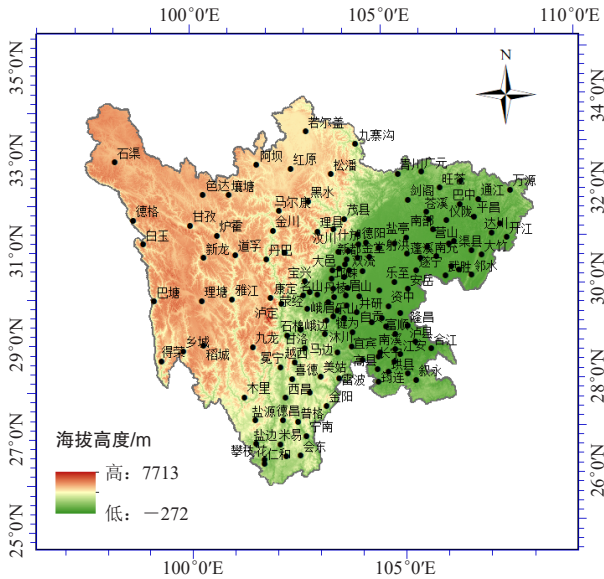


图1 四川省地形及观测点分布

Fig. 1 Topography and distribution of observation sites in Sichuan Province

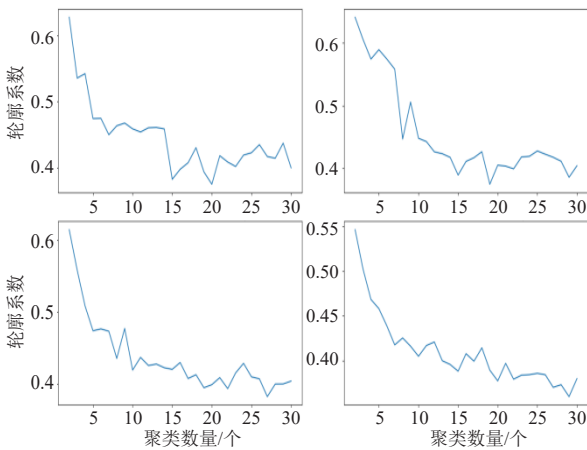


图2 轮廓系数与聚类数量的关系

Fig. 2 The relationship between the silhouette coefficient and the number of clusters

台站名,因此频繁项数据集可以反映出各个台站之间存在的某种相关性。将置信度设定为0.6,对A类数据集进行关联分析并得到频繁项集合 $\alpha$ 。在频繁项集合 $\alpha$ 中,随着维度的增加,该维度下的台站组合数量也随之减少, $\alpha$ 中得到的频繁项组合最高数据维度为6维。

根据站点分布及地形图可以发现,除沐川外,表1中的频繁项组合主要集中于成都周边。结合实际地形来看,这些站点主要位于成都平原。成都平原包括成都市各区县及德阳、绵阳、雅安、乐山、眉山等地的部分区域,地势平坦,四周有群山环抱。Onal等<sup>[21]</sup>指出,相同地形的邻近区域具有相同的气候模式。 $\alpha$ 频繁项集表明成都平原上的自动气象站在同一

表1  $\alpha$ 频繁项集最高维数据

Table 1 Highest dimensional data of  $\alpha$  frequent itemsets

序号	台站位置					
1	大邑	崇州	邛崃	郫县	双流	沐川
2	大邑	崇州	邛崃	郫县	新津	沐川
3	大邑	崇州	温江	邛崃	龙泉驿	郫县
4	崇州	温江	邛崃	龙泉驿	郫县	新津
5	崇州	温江	邛崃	龙泉驿	郫县	沐川
6	大邑	眉山	崇州	邛崃	双流	沐川
7	大邑	眉山	崇州	邛崃	郫县	双流
8	大邑	眉山	崇州	邛崃	郫县	新津
9	大邑	眉山	崇州	邛崃	郫县	沐川
10	大邑	眉山	崇州	邛崃	龙泉驿	郫县
11	眉山	崇州	温江	邛崃	龙泉驿	郫县
12	崇州	芦山	邛崃	天全	蒙经	郫县
13	眉山	崇州	邛崃	郫县	双流	沐川
14	眉山	崇州	邛崃	郫县	新津	沐川
15	大邑	崇州	邛崃	龙泉驿	郫县	新津
16	大邑	崇州	邛崃	龙泉驿	郫县	沐川
17	崇州	邛崃	龙泉驿	郫县	新津	沐川
18	眉山	崇州	邛崃	龙泉驿	郫县	新津
19	眉山	崇州	邛崃	龙泉驿	郫县	沐川

时刻的地面观测数据具有极强的相关性。除成都平原外,其他地区的地形以丘陵为主。受山坡阻隔的影响,其他地区各个台站的地面观测数据的相关性要明显弱于成都平原。值得一提的是,沐川地区的地面观测数据同成都平原地区的观测数据表现出极强的相关性。

对B数据集进行关联分析,得到频繁项集合 $\beta$ 。置信度为0.55时的集合 $\beta$ ,具有的最高维度为3维,且仅有一条数据:[理塘,得荣,巴塘]。川西高原以山地地形为主,地形复杂,地广人稀,观测站点间隔距离亦较大。因此,集合 $\beta$ 中各台站地面观测数据的相关性较弱。

## 2.2 随机森林算法在空间一致性检验上的测试

前一节的试验表明,在四川省的145个国家站中,成都平原内的地面观测数据具有极强的相关性,四川盆地的其余地区次之,川西高原再次之。

本次试验将会分别在三个地区选定一些站点,作为测试台站,将其与周围的地面观测数据用于训练随机森林模型,并做交叉检验。由于地面观测要素中,温度、湿度、风速是比较重要的气象要素,试验中用整点附近的2 min平均风速代替风速,选取邻近5个台站的温度、相对湿度和2 min平均风速数据分别作为回归模型的输入,模型输出测试台站的预测值,通过多次试验计算出预测值与真实值之间的均方误差,试验结果如表2所示。

表2 随机森林算法在空间一致性检验中的均方误差  
Table 2 The mean square error of random forest algorithm in spatial consistency test

序号	测试台站	训练台站	观测要素	均方误差
1	新津	大邑, 崇州, 温江, 邛崃, 龙泉驿	温度	0.147
			相对湿度	0.230
			2 min平均风速	0.172
2	龙泉驿	眉山, 崇州, 邛崃, 郫县, 新津	温度	0.108
			相对湿度	0.219
			2 min平均风速	0.112
3	崇州	大邑, 邛崃, 新津, 温江, 双流	温度	0.201
			相对湿度	0.285
			2 min平均风速	0.189
4	夹江	峨眉山, 洪雅, 青神, 乐山, 峨眉	温度	0.219
			相对湿度	0.375
			2 min平均风速	0.208
5	富顺	荣县, 威远, 自贡, 隆昌, 泸县	温度	0.333
			相对湿度	0.427
			2 min平均风速	0.302
6	南部	苍溪, 阆中, 仪陇, 蓬安, 营山	温度	0.190
			相对湿度	0.317
			2 min平均风速	0.301
7	理塘	稻城, 乡城, 旺格, 道孚, 巴塘	温度	1.159
			相对湿度	1.750
			2 min平均风速	1.233
8	红原	若尔盖, 松潘, 黑水, 阿坝, 马尔康	温度	0.725
			相对湿度	0.961
			2 min平均风速	1.080
9	米易	仁和, 盐边, 攀枝花, 会理, 会东	温度	0.155
			相对湿度	0.533
			2 min平均风速	0.470

结合图1来看, 表2中1、2、3号试验中台站位于成都平原, 4、5、6号试验中台站位于四川盆地的其他地区, 7、8、9号试验中台站位于川西高原。从上表可以看出, 无论是温度、相对湿度还是2 min平均风速, 1~3号试验的均方误差都相对更小, 7~9号试验的均方误差相对较大, 这也印证了上一节试验得到的结论。成都平原地区地形相似, 各个台站大致处于同一个天气系统中, 因此随机森林算法得到的回归误差也较小。其他地区的地形要更为复杂, 相比较而言, 随机森林算法在这些地区得到的回归误差普遍要大一些。

总的来说, 将随机森林算法用于回归分析, 可以获得较好的预测数值。同时, 随机森林算法运行速度快, 并且不用人工手动设置阈值, 它可以有效地降低算法的时间复杂度, 运行时效可以满足实时业务需求, 这为将随机森林算法应用到气象数据质量控制中提供了支撑。

### 2.3 随机森林与空间回归检验的比较

空间回归检验算法是地面气象观测数据在空间一

致性检验中常用的方法。首先选择一批距离目标站最近的台站, 计算它们与目标站一元回归方程的均方根误差。选取5个具有最小均方根误差的台站作为参考站, 给均方根误差小的参考站以大的权重来计算目标站观测值的加权估计值和估计值的加权标准差。再使用加权估计值和加权标准差确定目标站的观测值应属于的范围, 如果观测值不在这个区间内, 则认为观测值异常。

为了方便对比, 本次试验将空间回归检验的加权估计值与随机森林的回归预测值进行比较。以新津作为目标台站, 大邑、崇州、温江、邛崃、龙泉驿作为训练台站。分别以温度、相对湿度和2 min平均风速作为预测对象进行三次试验, 分别计算三种算法的预测值与观测值的平均均方误差, 试验结果如表3所示。

表3 关于温度、相对湿度、平均风速的预测误差比较  
Table 3 Comparison of prediction errors on temperature, humidity, average wind speed

项目	随机森林	空间回归检验
温度	0.17	5.67
相对湿度	0.54	3.02
2 min平均风速	0.28	0.60

从表3可以看出, 无论是在对温度、相对湿度、还是平均风速的预测上, 随机森林算法的平均均方误差要小于空间回归检验算法。这表明随机森林算法在空间一致性检验中能够比较好的预测目标数据, 这为将随机森林算法应用到气象数据质量控制中提供了支撑。同时也验证了空间回归检验算法对如风速空间变化大的要素具有良好的检验效果。

由于空间回归检验方法在很大程度上受到季节、地理环境、站台密集程度等的影响<sup>[22]</sup>, 所以空间回归检验方法更适用于同一季节、地理环境相似且站台密集的地方, 而随机森林检验方法使用范围更广。

### 2.4 基于空间一致性检验的异常检测

周边台站的地面观测数据可以预测出目标台站在当前时刻的数据, 若目标台站实际采集的数据与预测数据出入较大, 则可以认为目标台站出现异常。借用雷达信号的术语来表示, 当一个正常的的数据被判定为异常时, 则称这种情况为虚警; 当一个异常数据被判定为正常时, 则称这种情况为漏报。

试验以查准率和查全率作为本次试验的评价参数, 查准率表示判定为正常的的数据中有大比例是真实正常的, 查全率表示真实正常的的数据有多大比例被判定为正常。

以新津作为目标台站, 大邑、崇州、温江、邛崃、龙泉驿作为训练台站。以温度、相对湿度、2 min

平均风速为预测数据分别进行三次试验。当真实数据与预测数据差值的绝对值小于阈值时，此数据将被判定为正常，反之将被判定为异常。由于历史数据均是经过质量控制之后的正常数据，本次试验将对历史数据进行采样并为其加上随机噪声，以此来制造异常数据。

表4~表6均表明随着阈值的增大，系统对各项数据的查全率均逐渐增加，查准率均逐渐减少。阈值增大之后，将有更多的正常数据被判定为“正常”数据，所以查全率会逐渐上升。同时，也有更多的异常数据被判定为“正常”，因此查准率将会随着阈值的增大而降低。当温度阈值设置为0.5℃，目标台站新津可以获得92.6%的查准率以及87.6%的查全率。相对湿度阈值设置为5%时，目标台站新津可以获得88%的查准率以及92%的查全率。需要指出的是，对2 min平均风速进行异常检测所得到的查准率较低。这表明随机森林算法在对风速进行回归预测时准确度并不理想，事实上风速这一要素的空间相关性较低<sup>[23]</sup>，因此随机森林算法对风速数据进行空间一致性检验时效果差强人意。

表4 对温度异常的检测

Table 4 Anomaly detection of temperature

阈值/℃	查准率	查全率
0.2	0.964	0.532
0.3	0.968	0.690
0.4	0.936	0.816
0.5	0.926	0.876
0.6	0.890	0.880

表5 对相对湿度异常的检测

Table 5 Anomaly detection of relative humidity

阈值/%	查准率	查全率
2	0.960	0.490
3	0.958	0.690
4	0.934	0.770
5	0.880	0.920
6	0.734	0.926

表6 对2 min平均风速异常的检测

Table 6 Anomaly detection of 2-minute average wind speed

阈值/( m/s )	查准率	查全率
0.4	0.631	0.56
0.5	0.627	0.68
0.6	0.603	0.733
0.7	0.605	0.773
0.8	0.580	0.840

### 3 总结与展望

本次试验所研究的基于数据挖掘的气象三要素空

间一致性检验方法相较于现有的数据质量空间一致性检查方法来说，具有更高的精确度，且运行速度快，不用人工手动设置阈值，有效地降低算法的时间复杂度，运行时效可以满足实时业务需求，对数据挖掘技术应用在气象数据质量控制上的研究具有深远意义。

1) 通过聚类分析和关联分析发现可将观测数据粗略划分为两个大类，大致对应于川西高原与四川盆地这两大地形板块。而后通过比较这两种地形的三要素预测误差，验证了四川盆地的地形划分方法。

2) 由于成都平原地形平坦开阔，气象观测数据的空间相关性高于其他地区，预测的误差较小；而川西高原以山地、高原为主，地形复杂，此地区内地面气象观测数据的空间相关性低于其他地区，预测的误差较大。因此，地形划分对空间一致性判断结果起很大作用。

3) 将空间回归检验的加权估计值与随机森林的回归预测值进行比较，无论是在预测温度、相对湿度还是平均风速上，随机森林算法的均方误差远小于空间回归检验算法，这表明随机森林算法比空间回归检验算法具有更高的预测准确度。同时随机森林算法运行速度快，并且不用人工手动设置阈值，它可以有效地降低算法的时间复杂度，运行时效可以满足实时业务需求，这为将随机森林算法应用到气象数据质量控制中提供了有力的支撑。

4) 本文提出的异常检测方法在温度和相对湿度两个要素上具有较好的检测性能。但对于风速这一类空间相关性较低的气象数据，检测性能则不尽如人意。

虽然本研究取得了一定的进展与成果，但并未使用完整一年或者一年中不同季节、月份的数据来进行试验，后续将继续对基于数据挖掘的质量控制方法的季节、极端天气过程的适应性进行研究。

#### 参考文献

- [1] 韩江益, 王立俊, 羊清雯, 等. 南海区域站气象资料质量控制方法改进. 气象科技, 2018, 46(3): 474-478, 496.
- [2] 王海军, 刘莹. 综合一致性质量控制方法及其在气温中的应用. 应用气象学报, 2012, 23(1): 69-76.
- [3] 刘小宁, 任芝花. 地面气象资料质量控制方法研究概述. 气象科技, 2005, 33(3): 199-203.
- [4] 范文波. 地面气象观测数据综合质量控制方法研究与实现. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [5] 熊安元. 北欧气象观测资料的质量控制. 气象科技, 2003, 31(5): 314-320.
- [6] 刘小宁, 鞠晓慧, 范邵华. 空间回归检验方法在气象资料质量检验中的应用. 应用气象学报, 2006, 17(1): 37-42.
- [7] 何志军, 封秀燕, 何利德, 等. 气象观测资料的四方空间一致性检验. 气象, 2010, 36(5): 118-122.
- [8] Tan P-N, Steinbach M, Kumar V. 数据挖掘导论: 完整版. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [9] 周欢乐. 基于关联规则的地面气象观测数据综合质量控制系统设计

(下转57页)

# 武当山北坡气温的垂直变化特征

尹恒<sup>1</sup> 夏金<sup>1</sup> 尹欣<sup>2</sup> 文强<sup>1</sup> 邹莹<sup>3</sup> 黄锐<sup>1</sup>

(1 十堰市气象局, 十堰 442000; 2 南漳县气象局, 襄阳 441500; 3 郧西县气象局, 十堰 442600)

**摘要:** 为探讨武当山风景区北坡气温随海拔高度的分布特征, 利用景区5个不同海拔高度无人自动气象站气温资料, 对2012—2020年气温特征进行对比分析, 结果显示: 随海拔增加, 武当山景区年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温均表现为下降趋势, 年平均气温直减率为 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , 直减率夏季最大, 冬季最小; 气温日较差也表现为随海拔增加而下降趋势, 直减率为 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , 直减率夏季最大; 气温直减率日变化呈正弦振荡, 峰值在06:00—09:00, 谷值在15:00—19:00; 积温同样是随海拔升高而降低, 低山地区表现突出。

**关键词:** 气温, 垂直变化, 武当山

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.007

## Vertical Variation in Air Temperature on the North Slope of Wudang Mountain

Yin Heng<sup>1</sup>, Xia Jin<sup>1</sup>, Yin Xin<sup>2</sup>, Wen Qiang<sup>1</sup>, Zou Ying<sup>3</sup>, Huang Rui<sup>1</sup>

(1 Shiyang Meteorological Service, Shiyang 442000 2 Nanzhang Meteorology Service, Xiangyang 441500

3 Yunxi Meteorology Service, Shiyang 442600)

**Abstract:** In order to study the distribution characteristics of temperature along with the rise of altitude on the north slope of Wudang Mountain Scenic Area, the temperature characteristics in the period from 2012 to 2020 were analyzed by using the temperature data from automatic weather stations at five different altitudes. The results exhibit decreasing trends in terms of annual average temperature, annual average maximum temperature and annual average minimal temperature along with the rise of altitude. The lapse rate of annual average temperature is  $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , with low values in winter and high values in summer. The diurnal temperature change also displays the decreasing trend as the altitude increases, with the lapse rate of  $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  and the highest rate in summer. The daily variation of temperature lapse rate is characterized as sine oscillation, with the peak value from 06:00 to 09:00 and the valley value from 15:00 to 19:00. The accumulated temperature also decreases with the increase of elevation, the pronounced descent occurring in low mountain areas.

**Keywords:** temperature, vertical change, Wudang Mountain

### 0 引言

气候垂直分布是高山地带自然生态研究的重要内容, 它反映了某一区域因海拔高度变化带来的气候差异, 这种由气温、降水等气象要素表现出来的垂直分布特征, 主要取决于不同海拔高度以及所在地理纬度。多年来山地气候要素的垂直特征研究集中在西北地区、青藏高原和东部地区, 大多分析采用国家基本气象站和短期考察资料研究山区气候。管延龙等<sup>[1]</sup>指出天山北麓最高0 cm地表温度以精河为高值中心, 自西向东递减, 最低0 cm地表温度以乌苏、乌鲁木齐为高值中心的中西部地区较高。王朋岭等<sup>[2]</sup>研究表明,

1981—2010年青藏高原地区年和冬、春、秋三季的升温率随海拔高度的升高而增大。王海军等<sup>[3]</sup>研究显示, 祁连山冬季气温直减率较低, 春季气温直减率较大。林之光等<sup>[4]</sup>利用黄岗山地区27个月剖面观测资料研究了武夷山区气温特征, 指出不同季节南、北坡气温垂直梯度存在明显差异。郑成洋等<sup>[5]</sup>利用1年短期资料探讨了福建黄岗山气温垂直分布特点, 指出最高气温随海拔高度变化不明显。黄承标等<sup>[6]</sup>指出大青山林区平均气温直减率低于通常的大气值, 不同海拔高度区间直减率相差一倍以上。丁焯毅等<sup>[7]</sup>研究了浙江四明山区气温的垂直变化特征, 日平均气温 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温随着海拔的升高变化十分明显, 呈二次曲线下降。田杰等<sup>[8]</sup>分析了长白山北坡气温的垂直变化, 积温也随海拔高度呈二次曲线变化。张锦镇等<sup>[9]</sup>指出雁荡山区极端最低气温以向北开口的盆地、山谷为之最。周礼华等<sup>[10]</sup>利用HOBO Onst自动温度记

收稿日期: 2021年11月27日; 修回日期: 2022年6月21日

第一作者: 尹恒(1963—), Email: cnyinh@163.com

通信作者: 尹欣(1990—), Email: 30581698@qq.com

资助信息: 湖北省气象科研基金(2015Y09)

记录仪对金佛山西坡14个海拔高度的气温短期监测数据,分析金佛山气温垂直变化规律,指出金佛山西坡气温直减率的月份间差异较小,极端高温沿海拔梯度的变化不明显。对于地处华中腹地的武当山,其气温垂直分布规律研究不多<sup>[11]</sup>。本研究通过开展较完整的武当山景区气候观测,探讨气温随海拔高度的变化规律,为开展生态保护和开发利用提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本研究所用资料来自布设在武当山景区北坡不同海拔高度5个无人值守自动气象站(图1)观测数据,资料年限为2012—2020年。由于山区建设条件限制,建站时山坡朝向未能充分考虑,但是总体上5个测站在各自高度具有一定代表性,数据为逐小时自动气温记录,进而得到日平均气温、最高气温和最低气温等数据。这5个自动气象站数据资料均经过全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统<sup>[12-14]</sup>筛选和检验,确保了分析数据的质量,近9年自动气象站的气温数据完整率在95%以上(表1)。

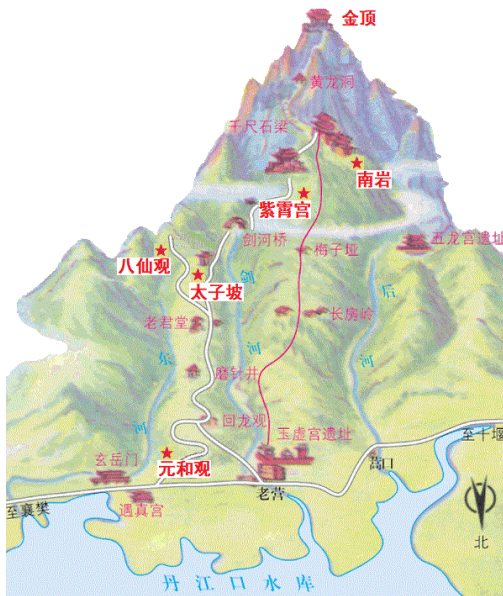


图1 武当山景区地形示意图

Fig. 1 The topographic map of Wudang Mountain Scenic Area

表1 武当山景区自动气象站地理分布  
Table 1 Geographical distribution of automatic weather stations in Wudang Mountain Scenic Area

观测站	站号	海拔/m	经度/°E	纬度/°N	气温缺测率/%
武当山(南岩)	57264	1020	111.00	32.39	3.1
紫霄宫	Q2031	851	111.02	32.43	3.5
八仙观	Q2032	640	111.06	32.43	2.5
太子坡	Q2033	588	111.07	32.45	4.8
元和观	Q2034	396	111.09	32.50	3.6

### 1.2 方法

气候倾向率是研究气候要素变化最常用方法<sup>[15]</sup>,某一要素的气候倾向可以是时间上的,也可以是空间上的,假设气温 $T$ 和海拔高度 $H$ 存在以下函数关系:

$$T_1 = T_0 + \gamma(H_1 - H_0)$$

式中, $T_0$ 为海拔高度为 $H_0$ 的气温, $T_1$ 为海拔高度为 $H_1$ 的气温, $\gamma$ 为气温随海拔变化的直减率,根据最小二乘法可以得到气温随海拔的变化规律 $\gamma$ 。

在对流层大气中,通常认为气温的垂直直减率 $\gamma$ 值为 $0.65\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ <sup>[16]</sup>。对于山地气温直减率 $\gamma$ ,由于受到地形起伏、地面植被和光照等诸多因素的影响,表现出不尽相同的情形,只有针对特定山区微格局气温场进行分析研究,才能得到表征山地气温垂直特征变化的客观情形。

## 2 结果与分析

### 2.1 平均气温垂直分布

结果表明,武当山景区年平均气温在 $12.3\sim 16.1\text{ }^\circ\text{C}$ ,其中元和观站年均值最大,为 $16.1\text{ }^\circ\text{C}$ ,与同期丹江口市气象站人工观测对比偏低 $0.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。其次是武当山(南岩)站,年平均气温为 $12.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,其他测站年平均气温分别为:紫霄宫 $12.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、八仙观 $15.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、太子坡 $14.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。年内各月平均气温呈单峰型分布,最热月(7月)平均气温为 $22.8\sim 27.1\text{ }^\circ\text{C}$ ,最冷月(1月)平均气温为 $0.3\sim 3.7\text{ }^\circ\text{C}$ (图2)。

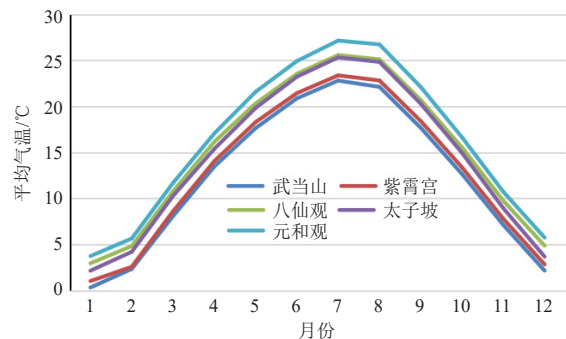


图2 武当山景区平均气温月变化

Fig. 2 Monthly mean temperature changes in Wudang Mountain Scenic Area

武当山景区年平均气温随海拔高度的升高而递减,不同海拔段的直减率存在显著不同,其中海拔 $396\sim 588\text{ m}$ 的直减率为 $0.68\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ , $588\sim 640\text{ m}$ 的直减率为 $-0.38\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ , $640\sim 851\text{ m}$ 的直减率为 $1.00\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ , $851\sim 1020\text{ m}$ 的直减率为 $0.36\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ ,这一结果与其他地区山地气温研究不尽相同<sup>[2-3]</sup>。武当山景区气温垂直变化主要表现在两个方面,一是不同海拔高度的气温直减率差异明显,这

与其他山区气温分布相似；二是海拔600 m附近有一个薄的逆温层，可能与特殊地形有关，从图1看到武当山的北侧为丹江口库区，是一个大型水体，且研究测站分属南北向山脊两侧，该结果待增加监测时空密度进一步验证。

由表2看到，武当山景区随着海拔高度升高平均气温降低，年平均气温由海拔396 m的16.1 °C下降到海拔1020 m的12.3 °C，平均气温直减率0.61 °C/100 m。各季平均气温随海拔高度变化与年平均气温类似，气温直减率不尽相同，直减率夏季最大，为0.71 °C/100 m；其次是秋季和春季，接近年平均直减率；冬季最小，为0.54 °C/100 m。这与夏季太阳辐射垂直加热作用差异大有关，其垂直直减率明显偏大，而冬季太阳辐射垂直加热趋于一致，气温直减率变小。

表2 武当山景区气温(°C)及直减率(°C/100 m)  
Table 2 Temperature (°C) and lapse rate (°C/100 m) in Wudang Mountain Scenic Area

项目	时节	武当山(南岩)	紫霄宫	八仙观	太子坡	元和观	直减率
平均气温	春	13.0	13.6	15.7	15.1	16.8	0.61
	夏	21.9	22.5	24.7	24.4	26.3	0.71
	秋	12.5	13.2	15.3	14.7	16.5	0.64
	冬	1.6	2.1	4.2	3.3	5.0	0.54
	全年	12.3	12.9	15.0	14.4	16.1	0.61
平均高温	春	17.6	18.4	21.3	20.6	22.8	0.83
	夏	25.9	26.7	29.6	29.5	31.8	0.95
	秋	15.4	16.7	19.3	18.6	21.0	0.90
	冬	4.6	5.6	8.4	7.9	9.5	0.79
	全年	15.9	16.8	19.6	19.1	21.3	0.87
平均低温	春	9.9	10.2	11.9	11.5	12.3	0.38
	夏	19.4	19.6	21.4	20.8	22.2	0.48
	秋	10.3	10.8	12.5	11.7	13.1	0.45
	冬	-0.7	-0.4	1.3	0.6	1.8	0.40
	全年	9.7	10.0	11.8	11.2	12.3	0.42
气温日较差	春	7.6	8.2	9.4	9.0	10.5	0.46
	夏	6.5	7.1	8.2	8.7	9.6	0.50
	秋	5.1	6.0	6.8	6.9	8.0	0.46
	冬	5.3	6.0	7.1	7.3	7.7	0.38
	全年	6.2	6.8	7.9	8.0	8.9	0.43

## 2.2 最高(低)气温及气温日较差垂直分布

极端气温变化的原因极其复杂，除了海拔高度、地形状况，还与大尺度环流作用、地表覆盖物的变化等都有密切关系<sup>[17-21]</sup>。图3给出了武当山景区极端气温在不同海拔的分布情况，极端最高气温从低海拔396 m的41.1 °C降至中海拔588 m的38.8 °C，继而变化倾向发生了变化，海拔640 m时上升到39.1 °C，海拔851 m降至35.1 °C，海拔1020 m时为34.1 °C，总体而言，日极端最高气温随海拔高度总体递减的趋势是

明确的，也存在小范围的逆温现象。研究时段的极端高温出现在2012年7—8月，3个观测站点在同一天达到极值。武当山景区日极端最低气温随海拔高度变化存在类似情形，逆温的情况和最高气温及平均气温相同。研究时段的极端低温出现在2012年1—2月，同样是3个观测站点在同一天达到极值，另有一站出现在第二天，反映出极端气温的发生在景区内趋同性特征明显，极端气温发生时节与武夷山相比存在较大差异<sup>[4]</sup>。

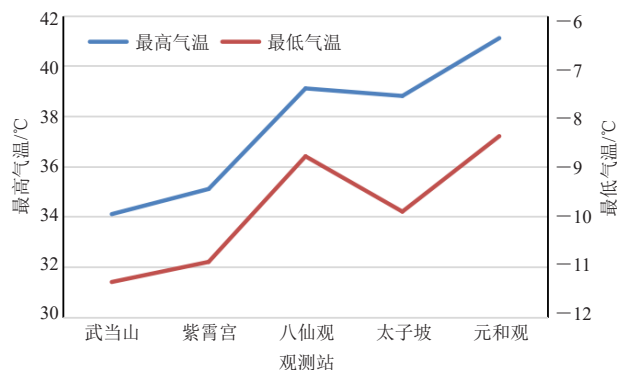


图3 武当山景区最高气温和最低气温分布  
Fig. 3 Distribution of maximum and minimum air temperature in Wudang Mountain Scenic Area

段春锋等<sup>[22]</sup>比对了高山站与其相邻城市气温变化特点，高(低)温和平均气温变化不同。从表2看到，武当山景区平均最高气温随海拔高度的变化态势与平均气温相似，但年平均最高气温直减率比平均气温直减率大0.26 °C/100 m，直减率达到0.87 °C/100 m；各季平均最高气温直减率在0.79~0.95 °C/100 m，随海拔高度升高平均最高气温变化更为突出，同样是夏季变幅最大，冬季变幅最小。随海拔高度的增高武当山景区平均最低气温也与平均气温相似，但年平均最低气温直减率比平均气温直减率小0.19 °C/100 m，其直减率仅为0.42 °C/100 m，海拔高度对平均最低气温影响较平均气温小；从不同季节来看，平均最低气温表现为夏季直减率最大，而冬春二季小。

气温日较差是日最高气温与日最低气温之差，是天气气候变化重要考察指标之一，近半个世纪以来，受辐射、云量、气溶胶、下垫面变化等因素影响，全球日较差出现显著的下降趋势，日较差的变化是这些因素共同作用的结果<sup>[23]</sup>。

从图4看出，太子坡气温日较差最大，其后依次为紫霄宫、元和观、八仙观和南岩站，反映出气温日较差随海拔高度递减过程中其波动振幅大。董丹宏等<sup>[24]</sup>分析中国最高、最低气温及日较差在海拔高度上变化时指出，随海拔高度升高，气温日较差变化幅度

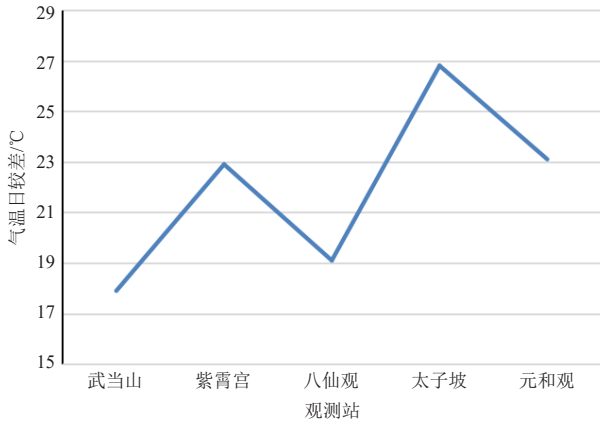


图4 武当山景区最大气温日较差垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of maximum temperature diurnal range in Wudang Mountain Scenic Area

增大，但武当山景区气温日较差与该结论存在差异。由表2统计看出，武当山景区气温日较差随海拔高度的变化趋势与平均气温相似，年平均气温日较差直减率较平均气温直减率小 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ，其直减率为 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ，说明海拔高度对气温日较差影响较平均气温低，直减率依然是夏季最大，冬季最小。

### 2.3 气温直减率日变化

在对流层近地面大气中，某一固定位置不同时刻由于接收的太阳辐射不同，一天中气温的变化也会随之上下振荡，因此，武当山景区各个时刻不同海拔间气温直减率也会不一样。图5给出了武当山景区南岩、紫霄宫、八仙观、太子坡4个观测站相对于元和观站一天不同时刻气温直减率变化曲线。可以看到，一天里南岩站气温直减率变化振幅最小，而太子坡站气温直减率振幅最大，南岩站气温直减率一天中变化平缓，南岩、紫霄宫、八仙观、太子坡4个观测站气温直减率峰值分别出现在06:00、08:00、09:00和09:00（北京时，下同），4个观测站气温直减率谷值

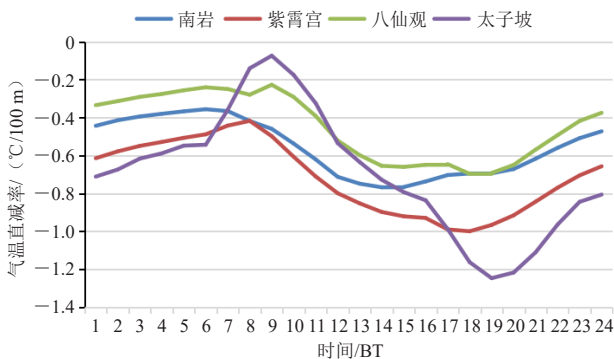


图5 武当山景区不同观测站不同时刻气温直减率

Fig. 5 Temperature lapse rate at different stations and different time in Wudang Mountain Scenic Area

分别出现在15:00、18:00、18:00和19:00，平均气温直减率排序为八仙观站>南岩站>太子坡站>紫霄宫站。

### 2.4 积温垂直分布

积温是考察作物发育快慢的重要指标，有效积温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是衡量一个地区太阳辐射资源的重要指标，其差异性影响着作物的地域分布<sup>[25]</sup>， $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是水的相态转换点，也是影响动植物生长发育的重要指标。武当山景区日平均气温 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温变化态势相近似，均是随着海拔的升高呈下降态势，低山地区变化十分明显，海拔 $851\sim 1020\text{ m}$ 的 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温少有波动，两地数值接近程度很高（图6）。 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温从海拔 $396\text{ m}$ 的 $5318.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到海拔 $1020\text{ m}$ 的 $3991.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，减少超过 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ； $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温从 $5914.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减少到 $4503.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，差值也达到 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上； $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温垂直直减率相近，分别为 $212.71\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 和 $226.22\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

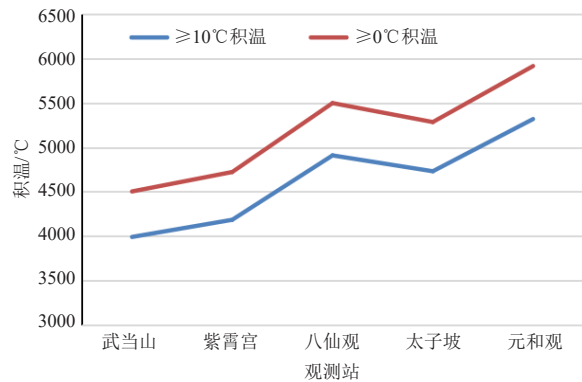


图6 武当山景区积温垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of accumulated temperature in Wudang Mountain Scenic Area

## 3 结论

1) 随海拔高度增加武当山景区年平均气温呈明显下降态势，直减率为 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ，直减率夏季最大，冬季最小， $600\text{ m}$ 附近存在逆温现象。

2) 随海拔高度增加武当山景区平均最高气温、平均最低气温变化态势与平均气温相近，平均最高气温直减率比平均气温直减率偏大，平均最低气温直减率比平均气温直减率偏小。

3) 武当山景区气温日较差的直减率为 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ，海拔高度对气温日较差影响较极端气温和平均气温偏低，其直减率夏季最大。

4) 武当山景区气温直减率日变化呈正弦震荡，其直减率峰值在06:00—9:00，谷值在15:00—19:00，

(下转57页)

# 气象因子对滑雪运动发展的影响

包苏伦高娃<sup>1</sup> 王一飞<sup>2</sup> 阿荣<sup>3</sup>

(1 内蒙古自治区气象服务中心, 呼和浩特 010051; 2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081;

3 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022)

**摘要:** 在全球气候变暖、极端天气发生概率增加的大背景下, 如何以健康绿色可持续的方式发展滑雪运动正在成为一个挑战。主要通过文献调查法和实地调研法探讨与滑雪运动密切相关的气象因子和雪质之间的关系。国内外文献调研发现, 气象条件与滑雪运动之间的关系研究较少, 国内相关研究以定性描述居多, 国外则多侧重于生物力学、气象因素与滑雪摩擦力之间的综合性微观研究。通过考虑在全球气候变暖大背景下如何有效判断气象对滑雪运动的影响, 以及怎样保证雪质、雪量等问题, 从气象的角度探讨了冬季冰雪运动的影响因子, 以丰富该领域的研究成果。

**关键词:** 气象因子, 滑雪运动, 影响

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.008

## Analysis on the Possible Influence of Weather Factors on Skiing

Bao Sulungaowa<sup>1</sup>, Wang Yifei<sup>2</sup>, A Rong<sup>3</sup>

(1 Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Service Center, Hohhot 010051 2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081 3 College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022)

**Abstract:** Under the background of global warming and the increasing probability of extreme weather, the green and sustainable development of winter sports has become a challenge. This paper mainly discusses the relationship between meteorological factors and snow quality closely related to winter sports through literature investigation and field investigation. After collecting the literature at home and abroad, it is found that in China, the study on the relationship between meteorological conditions and winter sports is mostly qualitative description, while in foreign countries, the attention is paid to the micro research on meteorological factors, biomechanics, and ski friction. Under the background of global warming, how to effectively judge the impact of meteorology on winter sports and how to ensure snow quality and snow volume remain as key determinants. This paper discusses the influencing factors of winter ice and snow sports from the perspective of meteorology so as to enrich the research results in this field.

**Keywords:** weather factors, winter sports, influence

### 0 引言

全球气候变暖已经导致我国北方冬季降雪量减少, 雪期缩短。所以如何合理开发利用气候资源、降低成本、实现滑雪场可持续发展, 或建设可持续滑雪场是冬季旅游业关注的热点话题。本文通过用分段法检索“雪质”“滑雪运动”和“滑雪气象”等关键词, 在谷歌学术、百度学术、万方数据与中国知网(CNKI)检索到1992—2019年国内外体育与气象相关专业类期刊上发表的关于滑雪运动-雪质-气象相关的学术论文150余篇, 发现相关领域研究尚处于探索阶段, 存在的问题较多。科学认识气象因子如何影响滑雪运动发展具有重要的现实意义。

收稿日期: 2022年3月21日; 修回日期: 2022年9月18日  
作者: 包苏伦高娃(1987—), Email: 790537770@qq.com

### 1 气象因子对雪上运动发展的影响

据世界气象组织发布的《2020年全球气候状况声明》, 20世纪80年代以来, 每10年比前一个10年更暖, 有记录以来的6个最暖年均出现在2015年以后。气温每升高1℃, 雪线将上升约150 m。由于全球变暖, 雪期开始日推迟与雪期结束日提前, 降雪量减少、滑雪营业期缩短已经是不争的事实。为应对此类问题, 国内即使是降雪充沛的东北也都靠人造雪铺设雪道、保证雪质雪量, 以延长滑雪营业期。

随着人造雪的大量应用, 其对环境带来的负面影响也日益凸显。据杨建英等<sup>[1]</sup>分析, 人造雪融雪造成的土壤侵蚀度为中度, 坡度大时融雪造成的水土流失会更严重。一些欧美国家已经开始不提倡人工造雪, 导致在这些国家随着雪期的缩短, 滑雪人数在减少<sup>[2]</sup>。

## 1.1 气象因子对冬奥会赛事的影响

雪上竞技赛一般在海拔较高、地形较复杂的山野进行，大风、高温、大雪、大雾等致灾性的天气条件直接决定比赛能否正常进行。冬奥会举办城市的选址，有两条硬性气象指标，2月平均气温 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，降雪量 $>30\text{ mm}$ 。主办城市这两项指标中，任一项概率 $<75\%$ 时，则没有资格申请冬奥会。所以，气象指标是历届冬奥会选址的重要依据。

对于成人滑雪，Shih等<sup>[3]</sup>针对高山滑雪人群做调研，认识到滑雪爱好者最关注的气象条件是气温。气温高、雪质不易达标，气温过低又不适宜滑雪。气温过低容易引起滑雪者不适，肌肉收缩，运动受阻，对人体健康产生影响。当日最高气温 $<-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，普通人不宜户外活动<sup>[4]</sup>。而竞技型的滑雪运动员为适应各种气候条件，要求在全国各地训练，适应当地寒冷环境。不同的比赛项目气温临界阈值也有差异，以北京冬奥会为例，如表1。

表1 北京冬奥会雪上赛事气象阈值

Table 1 Meteorological thresholds for snow events at the Beijing Winter Olympics

比赛项目	最高时速/(km/h)	气象阈值	雪质
高山滑雪	140	能见度 $<200\text{ m}$ 、气温 $<-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或气温 $>1\text{ }^{\circ}\text{C}$	冰状雪
跳台滑雪	110	风速 $>5\text{ m/s}$ 、风向变化 $>90^{\circ}$ (侧风) 新增积雪 $>3\text{ cm/h}$	粉状雪(跳前)、 浆状雪(着落与 停止区)
雪橇、雪车 (室内)	130~150	赛道温度： $-2\sim-3\text{ }^{\circ}\text{C}$	冰面雪

滑雪最高时速能达 $140\text{ km/h}$ ，滑雪过程中影响动态平衡的主要气象因子是风速和风向。依“滑雪气象指数”行业标准，对于大众娱乐型滑雪运动最适宜的风速条件为 $<3.5\text{ m/s}$ <sup>[5]</sup>。但竞技型的滑雪运动会根据不同的风速、风向调整赛事。如，全国冬运会跳台滑雪比赛气象要素临界阈值，风速 $>4\text{ m/s}$ ，风向变化 $>90^{\circ}$ 或上下坡风速差 $>4\text{ m/s}$ 。评委在合理的范围内，根据风速和风向来调整最终得分。跳台滑雪当处于适当的逆风条件下时，有利于运动员的起跳高度，因为逆风会延缓运动员身体下降速度，而顺风则会加快下降速度，起跳高度越高越有利于运动员空中动作的完成，这是运动员得分的关键点。但是，对于其他对滑行速度有要求的大部分滑雪项目，合理的顺风，运动员可以借助风势，滑行速度会显著加快，而在逆风条件下，风速阻力占滑行总阻力的 $80\%$ <sup>[6]</sup>，此时滑行速度会大打折扣，从而影响运动员的总成绩。因此为了保证运动员最后成绩的公平性，冰雪体育运动是对气象条件要求最苛刻的运动项目。

河北冬奥会服务团队“2018/19年冬训预报检验

及赛事影响评估”报告中分析单板滑雪U型场地技巧资格赛因平均风指标超过阈值，而取消了该项训练。但是，目前因为国内针对山地地形较复杂的局部精细化预报和短时临近预报技术研究经验较少，做好冬季滑雪多方位精细化智慧气象服务保障工作面临着种种挑战。

## 1.2 气象因子对赛道雪质的影响

雪质是指在降雪过程中和降雪过后因为气象条件不同而形成不同形态的雪沉积，雪的含水率、雪温、吸光颗粒物(黑炭、有机碳和沙尘是大气中三种主要的吸光性颗粒物)的变化导致雪质发生不同的变化<sup>[7-8]</sup>。滑雪爱好者选择滑雪场首先考虑雪道雪质量、滑雪体验感等问题。自然积雪的雪密度一般在 $250\sim300\text{ kg/m}^3$ ，这种粉状雪稳定性差，容易受高温、风沙侵蚀而变成烂泥<sup>[9]</sup>。人造雪是由水滴形成，晶核比自然雪更紧密，所以人造雪与自然雪相比，有含水率高、密度大、抗风沙侵蚀等特点。 $10\text{ cm}$ 的人造雪相当于 $40\text{ cm}$ 的自然雪。因此，滑雪场为保证雪质和雪量，以及延长滑雪营业期而普遍用人造雪。

气温变化过大，会使雪密度产生变化，雪质变硬(软)，滑雪摩擦力变化，导致运动员失去平衡发生摔伤等安全隐患。气温高，雪的含水率增多，雪质过软，滑雪摩擦力、推雪阻力变大，滑雪速度下降，影响比赛最后成绩。例如，对于完成跳台滑雪和自由式滑雪的着落或停止，需要滑雪摩擦力偏大的软雪质。但对于滑雪速度有要求的高山滑雪比赛，国际型赛道为比赛的公平性，赛道表面必须保持结晶状态，在近似于冰面的冰状雪上进行。冰状雪滑雪摩擦力小，雪质较硬，雪道不易被破坏。选手不论第几次出场，赛道雪质都保持良好。所以雪质关系到滑雪者的体验、安全等问题，也会影响到竞技赛的公平性。

### 1.2.1 不同级别滑雪场雪质要求分级讨论

雪质变化指的是雪的硬度和积雪的厚度产生变化，而雪硬度是由雪温、雪密度和雪的含水率决定。以休闲娱乐为主的中高级滑雪道要求坡度 $12^{\circ}\sim30^{\circ}$ 、雪密度一般 $450\sim500\text{ kg/m}^3$ <sup>[10]</sup>。不同等级滑雪场雪道标准要求见表2。

表2 不同等级的高山滑雪雪道标准<sup>[11-13]</sup>

Table 2 Different levels of alpine skiing standards

雪道	雪密度/( $\text{kg/m}^3$ )	坡度/ $^{\circ}$	宽度/m	长度/km
初级赛道	350~450	4~8	$>20$	$>1$
中级赛道	450~500	6~12	$>25$	$>2$
高级赛道	500~540	12~24	$>30$	$>10$
国际赛道	$>540$	一般 $<40$	$>60$	$>18$

初级雪道密度一般 $<450\text{ kg/m}^3$ ，雪质较松软，这

种雪质一般会在中午经过辐射和高温的影响导致表层雪融化,形成粘滞性较高、推雪阻力较大、安全系数较高的雪质。以休闲娱乐为目的的滑雪场雪密度一般在 $350\sim 500\text{ kg/m}^3$ ,滑雪者一般以娱乐为主,雪道密度不能太大,因为初学者由于速度、力量、技巧把握不当而容易擦伤或者摔伤。竞技型滑雪场要求雪道密度 $>500\text{ kg/m}^3$ ,赛道平均雪厚 $50\sim 60\text{ cm}$ ,而世界杯等级更高级别滑雪赛道用雪密度 $540\sim 560\text{ kg/m}^3$ 。

实际雪道厚度一般根据区域常年气候特征,结合不同级别滑雪场赛道标准来增加厚度。比如北京冬奥会和冬残奥会,高温、大风是影响造雪效率和后期保障雪质的主要因素。不同滑雪项目对赛道雪的厚度和密度要求也不尽相同。依据国际单项联合会不同雪上项目赛道的标准要求,结合不同赛区气象风险特征,北京冬奥会对赛道铺设要求主要分成三大类:一类是延庆赛区高山滑雪,包括速降雪道、超级大回转雪道、回转雪道、大回转雪道,雪道密度为 $650\text{ kg/m}^3$ ,厚度从 $1\text{ m}$ 增至 $1.5\text{ m}$ ,以应对气温上升形成的融雪损失;第二类是崇礼冬季两项、越野、跳台等场地,赛道厚度 $1\text{ m}$ 、造雪密度 $450\text{ kg/m}^3$ ;第三是崇礼云顶赛区自由式滑雪和单板滑雪,赛道厚度 $1.25\text{ m}$ ,造雪密度 $450\text{ kg/m}^3$ 。

目前因为对滑雪场的不同雪质的含水率没有标准化定义,对于根据不同滑雪人群和不同级别滑雪场雪道含水率应达到哪个标准更适宜无法量化。国际标准是根据含自由液态水百分率将积雪分为干雪( $0\%$ )、潮(微湿)雪( $<3\%$ )、湿雪( $3\%\sim 8\%$ )、非常湿( $8\%\sim 15\%$ )、雪浆( $>15\%$ )<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2.2 气象条件对雪质变化影响研究进展

气候变化对自然积雪面积以及消融特征研究的较多,关于气象条件对雪道雪质变化研究较少,尤其气象因素对人造雪雪质变化造成的负面影响量化分析较少<sup>[15-16]</sup>。雪量和雪质变化难以预判,历届冬奥会因为灾害性天气导致雪质和雪量的变化而延迟赛事,甚至有些项目被取消。赛道雪温一般要求 $<0\text{ }^\circ\text{C}$ ,当温度 $<-5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,人工造出的雪质较佳<sup>[17]</sup>。湿球温度和湿度越低,越适合人工造雪。从而开发人员一般考虑在冬季气温 $<0\text{ }^\circ\text{C}$ 的天数 $>90\text{ d}$ ,平均湿度 $<80\%$ ,最小坡度 $>7^\circ$ ,高度差 $>500\text{ m}$ 的地段建设滑雪场<sup>[18-19]</sup>。

不同的气温、湿度、辐射、风速综合影响雪温、雪硬度和雪密度,而雪硬度和雪密度的差异会给滑雪者带来不同的体验感。自然雪也叫粉雪,因为含水率低、密度小,舒适度高,滑雪爱好者们比较推崇这种雪质。人造雪因为晶核形成时间短,晶体生长快,雪片含水率高,雪质较硬,舒适度不如自然雪。但随着

造雪技术的提高,微风条件下,当湿球温度 $<-5\text{ }^\circ\text{C}$ ,湿度 $<50\%$ 时,能够造出接近自然雪质的粉雪<sup>[20-21]</sup>。根据不同气象条件,能够造出不同雪温、黏度、摩擦力、颗粒大小的雪晶。因为造雪的过程和造雪后容易受气象条件的影响而雪质发生变化。所以滑雪场造雪的同时还要用造雪机把雪压实、增加雪密度,使雪道滑起来更快,同时能有效抗高温、风沙,保证雪质雪量。

自然积雪容易受到气温、辐射和空气湿度的影响,雪质呈现出颗粒状、浆状、壳状或冰状等60多种形态。在气象预报中雪质划分成五大类,干粉雪、粉雪、软雪、湿雪和冰面雪,根据天气现象、湿球温度、风速、温度等综合气象条件预报雪质状态<sup>[22]</sup>。新下的雪,含水率低,密度小、雪质蓬松,触感舒适。经过午后太阳辐射、风沙侵蚀和雪板不断翻动下,雪的湿度变大、雪质发粘、摩擦力变大,起初雪质属于浆状,随着湿度变大、雪质失去粘滞性而变成泥状雪。壳状雪一般在北方因为不受海洋性气候的影响而湿度小,有一定厚度的自然雪长期被风吹后表面形成一层硬壳状的雪,密度很大,底层普遍发育雪下冰晶。冰状雪一般在昼夜温差大的地区容易形成,雪面经过午后辐射高温的影响导致雪的含水率增多,接近傍晚时分气温骤降导致水分结晶,近似于冰面

## 2 滑雪阻力研究进展

### 2.1 滑雪摩擦系数的确定

滑雪摩擦力是指滑行过程中滑雪板滑行面与雪面之间产生的阻力。摩擦系数是指两表面间的摩擦力和作用在其一表面上的垂直力之比。在无风条件下,滑雪摩擦力越小,滑行速度就越快。滑雪摩擦力与雪硬度、雪面粗糙度、雪温、雪含水率、雪板打蜡厚度和种类有关<sup>[23-25]</sup>。以跳台滑雪为例,跳台滑雪的起跳是关键动作,而助滑速度大小决定起跳的长度,助滑速度的大小会受到雪板与雪面之间的摩擦力的影响,以科学的方式达到最小摩擦力而获得最大的助滑速度是该领域研究的关注点。如果能测算出最小摩擦系数的打蜡方法,就可以获得最大的台端速度。

陈兢等<sup>[21]</sup>根据刚体动力学的理论,通过高速射影方法测算摩擦系数,由质心运动定理得摩擦系数,刚体力学是在比较理想的状态下预测滑雪摩擦系数,此计算方法是最基本的物理计算公式,类似于Kennedy等<sup>[23]</sup>曾提出的干摩擦计算模型。但是,Lozowski等<sup>[26]</sup>认为温度再低也不会存在理想的干摩擦力,因此提出湿摩擦理论,认为滑雪过程中产生的热量传递给雪,如果达到雪熔点,会产生水溶膜起到润滑剂的作用,

减少摩擦力。后来, Nachbauer等<sup>[27]</sup>提出混合模型, 滑雪过程中干(湿)摩擦不会单独存在, 在许多情况下, 雪面和滑雪板可能不会被水膜完全分开, 因此会发生固-固接触以及润滑接触, 即存在混合润滑条件。混合模式考虑了气象、生物力学等综合影响因素。该模型是通过大量的反复实操得出结论, 较符合实际滑行运动。该模型看似简单, 但混合摩擦系数的计算, 干混合怎么界定, 液态融膜厚度的计算等问题仍需要大量的采样, 结合3D模型与GIS技术推进和优化, 做出便于使用和推广的滑雪摩擦系数的预算模型。

## 2.2 空气阻力的确定

滑雪运动员在滑行的过程中受空气阻力(除了顺风滑行)的影响而滑行速度会变慢。普通高山滑雪速度 $>10\text{ m/s}$ 时, 空气阻力就会大于其他阻力<sup>[25]</sup>。空气阻力与迎风面积、形状和滑行速度有关。目前通用的空气阻力计算公式为:

$$F=1/2CPSV^2, \quad (1)$$

式中,  $C$ 为与物体形状有关的阻力系数,  $P$ 是空气的密度, 正常的干燥空气可取 $1.293\text{ g/L}$ , 特殊条件下可以实地监测,  $S$ 为滑行者迎风面积,  $V$ 为人体与气流的相对运动速度。滑雪者通过改变滑行的姿势来减小正面投影面积, 以达到减少空气阻力的效果。试验表明, 物体在空气中流动的形状接近“鸡蛋”形状, 也就是身体与气流接触面是有弧度的逐渐变方向而不是有棱角的方向突变, 这样就能降低空气阻力系数<sup>[28-29]</sup>。相关试验表明, 运动员把身体往前倾, 滑雪杖放在胸前保持低姿势, 既能减少迎风面积, 也达到了最有利的形态, 是最有效的降低空气阻力的姿势。如何减少空气阻力, 目前的研究重点是, 滑雪服怎么能达到紧身、透气、保暖、舒适, 以提高滑雪运动员成绩。试验表明, 穿宽松滑雪服空气阻力增加了40%, 所以滑雪服的设计和材质的选择考虑涂层、透气性、保暖、拉伸等问题<sup>[30-31]</sup>。

以上是空气阻力的基础计算模型, 但实际风速阻力的计算, 复杂程度远远超过理论计算模型, 因为每个滑雪场的地形地貌、气候特征不同。东北林业大学2019年的专利“一种滑雪场运动员风阻耗能评估方法”根据滑雪场地形地貌结合滑雪场风场分布函数特征, 按照运动员典型运动姿态, 通过GIS技术和高分辨率遥感影像数据处理技术, 建立了运动员风阻耗能评估模型<sup>[32]</sup>。

## 3 结论

1) 滑雪运动本身的性质决定了该项运动对气象条件敏感度远超其他运动项目。特别是竞技型的滑雪运动, 为保证比赛前后出场人的公平性, 对雪质、风向、

风速要求较高。大众娱乐型滑雪场、竞技型滑雪场对表征雪质参数的雪硬度、密度、厚度标准要求有差异。

2) 大量相关研究已证实, 全球气候变暖导致降雪量减少、雪线上升、雪期缩短, 冬季滑雪旅游或冰雪竞技体育场所面临规格标准不达标、运营成本加大、参与冰雪活动人数减少等问题, 这些都直接或间接影响到冰雪体育事业的普及与发展。研究气象条件-雪质-滑雪运动之间的联系成为该研究领域的关注点。近5年国内由于冬奥会的成功申办, 气象-滑雪之间的关系研究变得迫切, 越来越多的研究者投入该领域的工作, 逐渐从过去定性描述迈入科学量化阶段。

3) 从微观尺度上, 滑雪阻力有雪板摩擦力和空气阻力。提高滑雪速度, 除了运动员训练程度, 还需介入科学手段去尽量减少滑雪过程中产生的阻力。气象条件是雪板摩擦力、空气阻力产生变化的主要影响因素。提升相关研究领域的深入程度, 直接关系到气象服务智慧化、精细化、精准程度。

## 参考文献

- [1] 杨建英, 梁德栋, 史常青, 等. 滑雪道人造雪融雪产流产沙特征. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(3): 95-102.
- [2] 杨建明, 万春燕. 全球气候变化对冬季滑雪旅游的影响. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 356-361.
- [3] Shih C, Nicholls S, Holecck D F. Impact of weather on downhill ski lift ticket sales. Journal of Travel Research, 2008, 47(3): 359-372.
- [4] 段娅哈. 冰雪旅游气候舒适度评价研究. 上海: 上海师范大学, 2021.
- [5] 王天柱, 吴正兴, 喻俊志. 冰雪运动生物力学及其机器人研究进展. 自动化学报, 2019, 45(9): 1620-1636.
- [6] 闫乃鹏. 影响高山滑雪运动员滑行阻力的主要因素. 冰雪运动, 2006, (5): 18-20.
- [7] 高培, 魏文寿, 刘明哲. 新疆天山积雪稳定期不同下垫面雪物理特性对比. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 15-19.
- [8] 朱志强, 王飞, 王东海. 2022年北京冬奥会造雪关键问题研究. 体育科学, 2020, 40(10): 31-40.
- [9] 庄峰. 积雪硬度及其测试技术的实验研究. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [10] 王世金, 徐新武, 邓婕, 等. 中国滑雪旅游目的地空间格局、存在问题及其发展对策. 冰川冻土, 2017, 39(4): 902-909.
- [11] 张莹, 叶海波, 陈艳霞. 冬奥会背景下崇礼县滑雪场发展现状与前景. 冰雪运动, 2016, 38(2): 78-82.
- [12] 陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 季节性森林积雪融雪期雪层含水率垂直廓线随时间变化特征. 地理研究, 2011, 30(7): 1244-1253.
- [13] 赵求东, 刘志辉, 秦荣茂, 等. 融雪模型研究进展. 新疆农业科学, 2007, (6): 734-739.
- [14] 王萍, 费郁红, 孙洋. 冬奥会背景下我国滑雪旅游产业发展的探析. 哈尔滨体育学院学报, 2017, 35(6): 51-55.
- [15] 许启慧, 范引琪, 于长文, 等. 滑雪场建设气候条件分析. 气象科技, 2014, 42(5): 938-944.
- [16] 刘中新, 陶列. 大别山人造雪滑雪场选址气象条件分析及风险评估. 中低纬山地气象, 2018, 42(2): 81-84.
- [17] 杨占武. 北京冬奥会和冬残奥会人工造雪的研究. 冰雪运动, 2017, 39(1): 1-8.
- [18] 刘道平, 郇志敏, 华泽钊. 雪晶形成过程与人工造雪机技术. 制冷与空调, 2003, (2): 1-5.
- [19] 杨立祥. 造雪机的研究及分析. 机电产品开发与创新, 2010, 23(3): 43-45.
- [20] 曲庚新. 对高山滑降滑雪中身体稳定性的探讨. 冰雪运动, 1984,

- (2): 25-30.
- [21] 陈兢, 李润, 关佐恒. 跳台滑雪运动雪板与雪面间摩擦系数研究. 冰雪运动, 1992, (4): 43-45.
- [22] 张才成. 对影响高山滑雪滑行速度因素的分析. 冰雪运动, 2000, (4): 25-26.
- [23] Kennedy F E, Schulson E M, Jones D E. The friction of ice on ice at low sliding velocities. Philosophical Magazine A, 2000, 80(5): 1093-1110.
- [24] Rist M A. High-stress ice fracture and friction. Journal of Physical Chemistry B, 1997, 101(32): 6263-6266
- [25] 路璐, 刘春玲, 刘琳. 滑雪游客感知价值、满意度与行为意向的关系: 以崇礼密苑云顶滑雪场为例. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5): 202-208.
- [26] Lozowski E, Szilder K, Poirier L. A bobsleigh ice friction model. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2014, 24(1): 52-60.
- [27] Nachbauer W, Kaps P, Mössner M, et al. Effects of ski and snow properties on the turning of Alpine skis—a computer simulation. Journal of Biomechanics, 2006, 39: S188.
- [28] You J, Tarboton D G, Luce C H. Modeling the snow surface temperature with a one-layer energy balance snowmelt model. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 10(12): 15071-15118.
- [29] Baeurle L, Kaempfer U, Szabo D, et al. Sliding friction of polyethylene on snow and ice: contact area and modeling. Cold Regions Science and Technology, 2007, 47(3): 276-289.
- [30] Steiger R, Mayer M. Snow making and climate change. Mountain Research and Development, 2008, 28(3): 292-298.
- [31] Hamilton L C, Brown C, Keim B D. Ski areas, weather and climate: time series models for New England case studies. International Journal of Climatology, 2010, 27: 2113-2124.
- [32] 王才勇, 曹立春. 全球变暖对雪上赛事的影响及对策. 冰雪运动, 2011, 33(3): 72-74.

(上接48页)

- 计与实现. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [10] 侯颀. 气象数据质量控制与监控系统的设计. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [11] 李涛, 郁美辰, 陆正邦, 等. 基于关联规则挖掘的气象观测设备一致性检测算法. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(10): 1568-1573.
- [12] 维克托·迈尔-舍恩伯格. 大数据时代: 生活、工作与思维的大变革. 杭州: 浙江人民出版社, 2013.
- [13] 沈文海. 再析气象大数据及其应用. 中国信息化, 2016, (1): 85-96.
- [14] Quinlan J R. C4.5 Programs for machine learning. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1992.
- [15] Breiman L, Friedman J H, Olshen R, et al. Classification and regression trees. Encyclopedia of Ecology, 1984, 40(3): 582-588.
- [16] Breiman L. Random forests. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [17] Anil K. Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognition Letters, 2010, 31 (8): 651-666.
- [18] 王千, 王成, 冯振元, 等. K-means聚类算法研究综述. 电子设计工程, 2012, 20(7): 21-24.
- [19] Rousseeuw P J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1999, 20(20): 53-65.
- [20] 刘华婷, 郭仁祥, 姜浩. 关联规则挖掘Apriori算法的研究与改进. 计算机应用与软件, 2009, 26(1): 146-149.
- [21] Onal A C, Sezer O B, Ozbayoglu M, et al. Weather data analysis and sensor fault detection using an extended IoT framework with semantics, big data, and machine learning// IEEE International Conference on Big Data. IEEE, 2018.
- [22] 张齐东, 熊雄. 空间回归检验方法在地面气象资料质量控制中的应用——以逐时气温资料为例. 内燃机与配件, 2017(10): 152-153.
- [23] 尹婧姣, 江志红, 吴息, 等. 空间差值检验方法在地面气象资料质量控制中的应用. 气候与环境研究, 2010, 15(3): 229-236.

(上接52页)

平均气温直减率排序为八仙观站>南岩站>太子坡站>紫霄宫站。

5) 武当山景区日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温垂直变化趋势同平均气温相近, 二者随着海拔升高而下降, 在低山地区更突出。

#### 参考文献

- [1] 管延龙, 王让会, 李成, 等. 天山北麓1963—2010年0 cm最高与最低地表温度变化特征. 干旱气象, 2015, 33(4): 587-594.
- [2] 王朋岭, 唐国利, 曹丽娟, 等. 1981—2010年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 313-319.
- [3] 王海军, 张勃, 靳晓华, 等. 基于GIS的祁连山区气温和降水的时空变化分析. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1196-1202.
- [4] 林之光, 安顺清, 吴其勋, 等. 武夷山区气温垂直梯度的研究. 气象, 1983, 9(4): 18-19.
- [5] 郑成洋, 方精云. 福建黄岗山东南坡气温的垂直变化. 气象学报, 2004, 62(2): 251-255.
- [6] 黄承标, 卢立华, 温远光, 等. 大青山林区不同海拔高度主要气象要素的变化. 贵州农业科学, 2011, 39(1): 90-95.
- [7] 丁焯毅, 高益波, 胡波, 等. 四明山区域气温的垂直变化特征分析. 浙江气象, 2017, 38(4): 42-44.
- [8] 田杰, 王庆伟, 于大炮, 等. 长白山北坡气温的垂直变化. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 65-69.
- [9] 张锦斌, 蔡志林, 姚健, 等. 雁荡山区气候垂直变化分析. 浙江农业科学, 2014, 55(3): 403-405.
- [10] 周礼华, 黄力, 钱深华, 等. 金佛山西坡气温的垂直变化特征. 山地研究, 2019, 37(6): 818-827.
- [11] 曾琦, 任国玉. 湖北省主要山系高影响天气指标空间特征分析与建模. 暴雨灾害, 2020, 39(2): 192-200.
- [12] 王海军, 杨志彪, 杨代才, 等. 自动气象站实时资料自动质量控制方法及其应用. 气象, 2007, 33(10): 102-109.
- [13] 任芝花, 张志富, 孙超, 等. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统设计. 气象, 2015, 41(10): 1268-1277.
- [14] 范宏飞. 自动气象站资料质量控制系统设计. 吉林大学学报(信息科学版), 2021, 33(4): 470-478.
- [15] 黄嘉佑. 气候状态变化趋势与突变分析. 气象, 1995, 21(7): 54-57.
- [16] 周淑贞. 气象学与气候学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 1997: 56-58.
- [17] 杨萍, 肖子牛, 刘伟东. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析. 大气科学, 2013, 37 (1): 101-112.
- [18] 王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 中国极端气温季节变化对全球变暖减缓的响应分析. 冰川冻土, 2016, 38(1): 36-46.
- [19] 熊敏. 基于集合预报系统的日最高和最低气温预报. 气象学报, 2017, 75(2): 211-222.
- [20] 陈锋, 董美堂, 冀春晓. 综合分析法在复杂地形气温精细格点化中的应用. 高原气象, 2016, 35(5): 1376-1388.
- [21] 武丽梅, 陈璐, 王凯, 等. 中国大陆1983—2012年极端气温时空变化特征. 干旱气象, 2016, 34(6): 945-951.
- [22] 段春锋, 缪启龙, 曹雯, 等. 以高山站为背景研究城市化对气温变化趋势的影响. 大气科学, 2012, 36(4): 811-822.
- [23] 汪凯, 叶红, 唐立娜, 等. 气温日较差研究进展: 变化趋势及其影响因素. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 417-423.
- [24] 董丹宏, 黄刚. 中国最高、最低温度及日较差在海拔高度上变化的初步分析. 大气科学, 2015, 39(5): 1011-1024.
- [25] 刘少华, 严登华, 翁白莎, 等. 近50 a中国 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温时空演变. 干旱区研究, 2013, 30(4): 689-696.

# 贵阳机场低空风切变成因初步分析

张亚男 罗浩

(中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵阳 550000)

**摘要:** 利用ECMWF ERA5再分析资料、贵阳机场航空器语音报告、贵阳机场自动观测资料等, 通过合成分析及个例分析相结合的方法, 分析了贵阳机场冷锋型、昆明准静止锋型、低空急流型和局地对流型风切变发生时的环流形势、天气系统的配合以及风切变发生时的风场情况。结果表明: 1) 冷锋型风切变需关注偏北风在700 hPa和850 hPa上的东伸情况以及900 hPa上的南压程度, 机场跑道北端风向由南转北是风切变开始的信号; 2) 当准静止锋位于贵州省中西部时, 贵阳机场上空逆温层内的偏南急流及近地面的弱北风往往导致飞机遭遇垂直风切变, 当准静止锋在机场附近来回摆动时容易造成机场跑道南北两端出现对头风, 从而导致风切变; 3) 低空急流型风切变出现时, 低空急流与地面热低压相互配合, 近地面风场受地形影响导致机场跑道两端风速不连续而产生风切变; 4) 局地对流型风切变可结合天气雷达、机场自动观测数据来有效监测。

**关键词:** 低空风切变, 成因分析, 合成分析, 贵阳机场

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.009

## Preliminary Analysis of Causes of Low-Level Wind Shear at Guiyang Airport

Zhang Yanan, Luo Hao

(Guizhou Air Traffic Control Sub-Bureau of CAAC, Guiyang 550012)

**Abstract:** Based on the ECMWF ERA5 reanalysis data, aircraft voice reports and automatic observation data of Guiyang Airport, by using composite analysis and case analysis, this paper analyzes the characteristics of atmospheric circulation, coordination between synoptic systems and wind field conditions when the low-level wind shear occurs at Guiyang Airport, including types of cold front, Kunming quasi-stationary front, low level jet and local convection. The results show that: (1) For the type of cold front, the eastward stretches of the north wind on 700 hPa and 850 hPa, and southward stretches of the south wind on 900 hPa play an important role in the early time. And it's a signal for the beginning of wind shear when the wind direction turns from south to north at the north end of runway. (2) When the quasi-stationary front is located in the midwest of Guizhou Province, the southerly jet in the inversion layer over Guiyang Airport and the weak north wind near the ground often cause the aircraft to encounter vertical wind shear. And when the quasi-stationary front swings back and forth near Guiyang Airport, the opposite wind direction at both ends of runway can lead to wind shear. (3) For the type of low-level jet, the low-level jet and the surface thermal depression cooperate with each other, also, the near ground wind field is affected by the terrain, which results in the discontinuous wind speed at both ends of runway. (4) The type of local convection can be effectively monitored in combination with weather radar and airport automatic observation data.

**Keywords:** low-level windshear, cause analysis, composite analysis, Guiyang Airport

### 0 引言

航空气象中的低空风切变是指发生在600 m高度以下空气层中, 风向和(或)风速突然变化的现象<sup>[1]</sup>。它是航空器起飞和着陆阶段的重要危险因素, 具有持续时间短、尺度小、高度低、强度大、发生突然、预测难度大等特点, 因此被称为“空中隐形杀手”<sup>[2-3]</sup>。早在1978年, Fujita<sup>[4]</sup>首次在多普勒雷达上观测到

了“牛眼”形状的回波, 证实了可以用多普勒雷达探测下击暴流, 从而提取一些参数(如回波功率、谱宽、径向速度)来判定是否存在风切变及其危险级别; Wolfson等<sup>[5]</sup>通过利用二维图像处理追踪单体增长特征和消散特征的方法对低空风切变进行预报; Williams<sup>[6]</sup>提到辐射逆温型的低空急流天气可产生逆温风切变, 并且由于其强度通常较小, 容易被忽视; Harris等<sup>[7]</sup>首次提出了直接计算差值滤波合成切变算法, 合成的切变产品逐步改进后与机载雷达相结合, 建立了早期的机载低空风切变预警系统。国内的相关研究中, 冯彦华<sup>[8]</sup>通过分析广州白云机场低空风切变的时空特点及

收稿日期: 2021年12月22日; 修回日期: 2022年4月13日

第一作者: 张亚男(1992—), Email: ynu\_zyan@163.com

通信作者: 罗浩(1988—), Email: ranally@163.com

其大气环流形势指出,广州低空风切变的发生与高压脊、脊后槽前、锋面低槽和热带环流等4种主要天气形势密切相关;马敏劲等<sup>[9]</sup>统计分析了首都国际机场背景风特征和发生低空风切变时的风特征,表明高空动量下传可能是诱发机场低空风切变的重要机制;单乃超等<sup>[10]</sup>对合肥机场一次雷暴型低空风切变的机理和成因进行了研究,指出机场低空风切变的产生主要是由 $\gamma$ 中尺度对流单体底部的紊乱气流造成;翁雪玲等<sup>[11]</sup>选取了3个大连机场典型低空风切变的天气个例,从个例分析的角度分析了大连机场典型低空风切变时的天气形势特点和低层的风场特征。对于西南地区,沈宏彬等<sup>[12]</sup>分析西南地区低空风切变事件,指出昆明准静止锋是贵阳机场的主要影响系统;刘开宇等<sup>[13]</sup>对2007—2011年发生在贵阳机场的冷锋型低空风切变案例进行了综合分析,揭示切变线和冷锋在低空风切变中的主导作用。

尽管过去已有大量学者<sup>[14-15]</sup>对风切变的形成原因进行过研究,但其形成原因会随着各个机场所处位置的不同而有所差异。贵阳机场的风切变主要有冷锋型、昆明准静止锋型、低空急流型和局地对流型,目前有关贵阳机场四种类型风切变成因的系统分析较少。本文将用合成分析及个例分析相结合的方法对各类型的风切变进行详细分析,初步探讨各类型风切变发生的原因,以期对贵阳机场风切变的预报预警提供依据。

## 1 资料和方法

本文所选用的资料包括:1)2014—2020年贵阳机场接收到的低空风切变事件语音方式航空器空中报告;2)贵阳机场每日逐分钟的风向和风速资料、风廓线雷达资料、多普勒雷达资料;3)贵州省地面常规观测资料;4)08:00贵阳站探空资料;5)ECMWF ERA5  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 逐时再分析资料;6)地形数据GTOPO30是USGS以间隔30 s开发的全球数字高程模型DEM数据,并且经过41点滑动平均处理。本文所涉及的时间均为北京时。

2014—2020年贵阳机场收到的语音方式航空器空中报告的低空风切变事件共计63次,其中有9次风切变事件发生的高度在600 m及以上,因此本文不剔除发生高度在600 m及以上的风切变事件样本。按天气形势分型,冷锋型风切变29次,昆明准静止锋型13次,局地对流型11次,低空急流型10次。本文将对各类型风切变事件的背景场进行合成,以对各类型风切变事件发生的环境场及天气系统的配合情况有一个定性的认识;再挑选各类型的典型个例,从风场变化角

度进行具体分析,从而对风切变事件发生时的风向风速有一个定量的判断。其中背景场合成中,样本的时次以接收到的低空风切变事件语音方式航空器空中报告时间为准,半点为界,报告时间在半点及半点前则向前取前一个整点,报告时间在半点后则向后取后一个整点。

## 2 贵阳机场低空风切变成因分析

### 2.1 冷锋型

贵阳机场冷锋过境时往往伴随明显的风向由南向北的转变,锋线附近极易出现低空风切变。冷锋型低空风切变是贵阳机场发生频率最高的风切变类型,因此冷锋型低空风切变是贵阳机场四种风切变类型之前研究较多的<sup>[13]</sup>。但对于风切变出现前及风切变出现时锋区的特征研究目前仍然较少,因此下文将风切变事件发生时的时间取整点后作为 $t_0$ 时刻,对贵阳机场29次冷锋型风切变事件发生时的 $t_0$ 时刻及发生前4 h的 $t_{0-4}$ 时刻要素场进行合成。

从图1可以看到,风切变发生前4 h(图1a),700 hPa西南地区受槽前西南急流控制,急流核位于湘黔交界处,中心风速达16 m/s,高空锋区位于贵州省中部以北区域;风切变发生时(图1b),随着低空急流控制范围的减小以及急流轴的东移,等温线密集区略微南压,北风控制的区域出现明显的东伸,但向南扩展的程度并不明显。850 hPa上,在风切变发生前4 h(图1c),近地面冷空气主要从西北路径入侵贵州,锋区位于贵州中北部,呈准东西向,偏南风与偏北风形成的切变线位于省西北部,贵阳地区还受6~8 m/s的偏南风影响;而风切变发生时(图1d),锋区虽然只有略微南移,但南北风的交界线已南压至贵阳附近,且控制贵阳地区的偏南风已减弱至2~3 m/s。900 hPa上锋区的位置及变化特征与850 hPa上类似(图1e、图1f),但南北风辐合的位置相对偏东偏南,风切变发生前后,南北风的交界线出现明显的南移,贵阳地区的风向出现由南向北的转换,锋区的南压程度也是三层中最大的。总的来看,风切变发生前4 h,近地层上的锋区已位于贵州省中部,而700 hPa上锋区及南北风的交界线位于贵州省中部以北,在风切变发生过程中,贵州省偏南风的势力减弱,冷空气从西北路径侵入,整层北风控制区出现明显的南压东伸,而温度场上的变化不如风场上明显,因此冷锋型风切变需重点关注偏北风在700 hPa和850 hPa上的东伸情况以及900 hPa上的南压程度。

冷锋型低空风切变出现前后地面及空中风场变化明显。2021年3月19日18:49某航班在贵阳机场跑道上

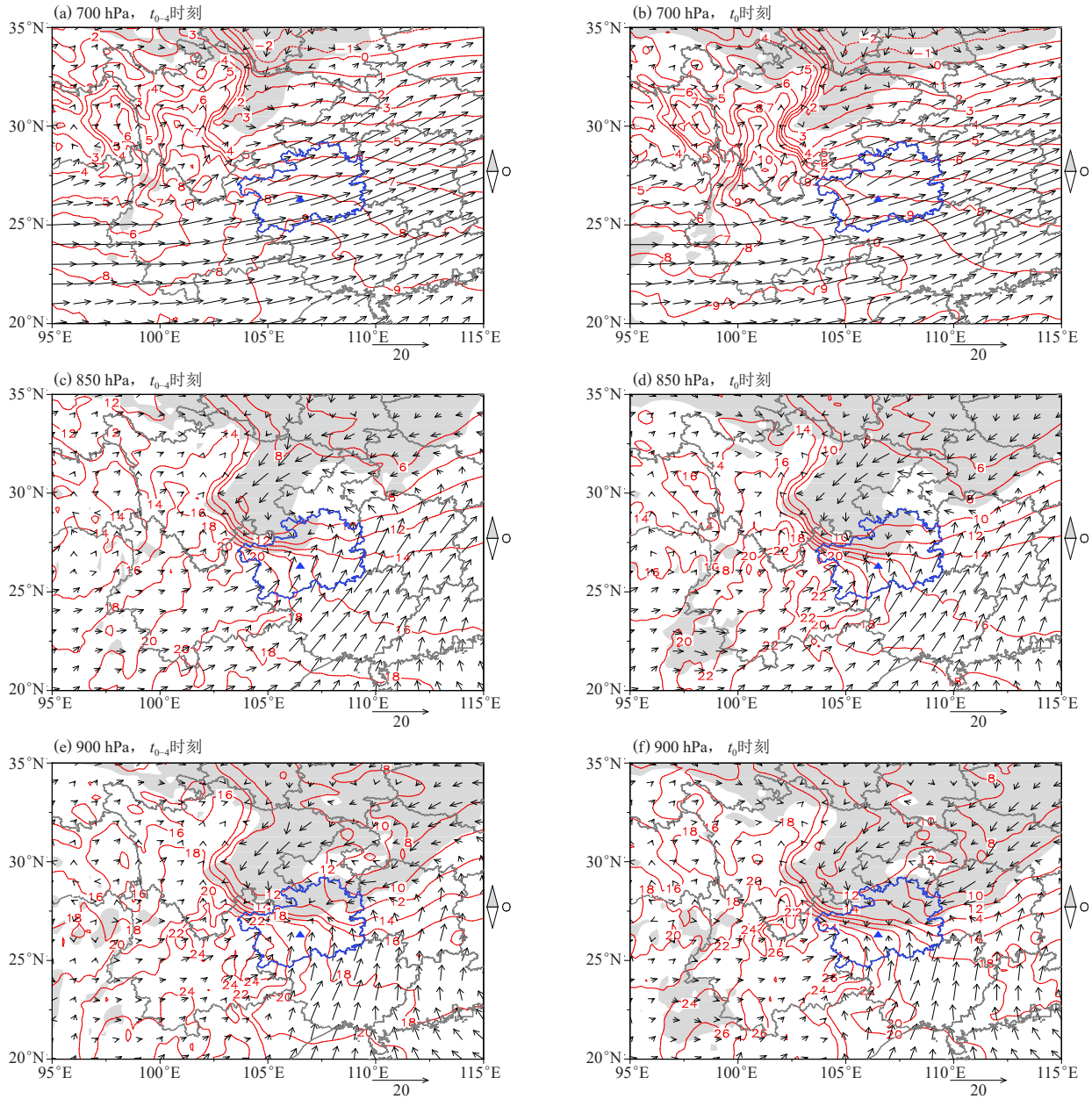


图1 700 hPa、850 hPa、900 hPa温度(等值线, 单位: °C)、风场(风矢量, 单位: m/s)和南北风(灰色: 北风, 白色: 南风, 单位: m/s)合成场(蓝色三角为贵阳机场所在位置)

Fig. 1 Composite temperature (contour, unit: °C), composite wind field (wind vector, unit: m/s) and composite north-south wind field (shade, gray: north wind, white: south wind, unit: m/s) on 700 hPa, 850 hPa and 900 hPa (blue triangle is the location of Guiyang Airport)

空20~30 m遭遇低空风切变复飞。下面, 将针对该个例分析低空风切变发生前后贵阳机场地面及垂直方向上风向风速的变化情况。

从贵州省逐时10 m风场可以看到(图2), 19日17:00地面辐合线位于贵州省中部, 贵阳机场位于辐合线南侧。17:00—18:00, 受冷空气影响, 北风风速增加, 辐合线快速南压至修文县与贵阳市白云区之间, 修文站的风向由偏南风转为东北偏东风(图2a、

图2b); 18:00—19:00, 贵阳云岩区及南明区转为8~10 m/s的偏北风(图2c); 19:00—20:00, 辐合线南压至花溪以南(图2d), 贵阳机场位于冷锋锋后。锋面过境期间, 地面辐合线附近的南北风交汇明显, 风向及风速均存在较大的不连续。

贵阳机场地面风向风速的变化情况可从机场自动观测资料得知(图3), 19日18:29前贵阳机场以150°~200°的偏南风为主, 风速在6 m/s左右; 18:29

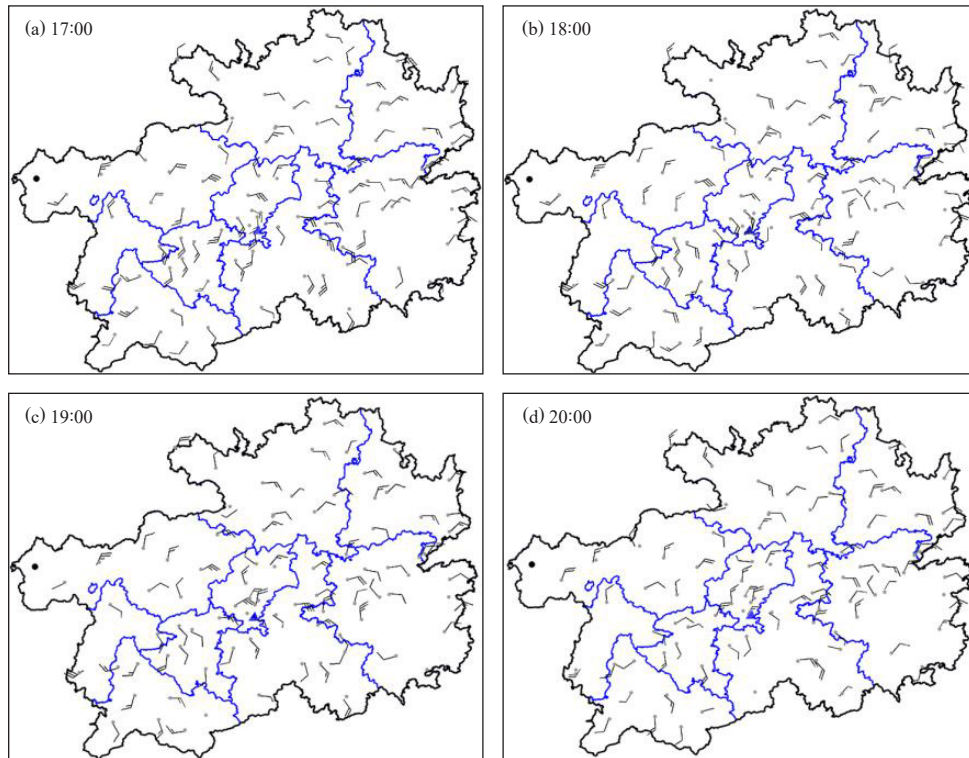


图2 2021年3月19日17:00—20:00贵州省地面常规观测10 m风场(蓝色三角为贵阳机场所在位置)  
Fig. 2 10 m wind field of conventional observations at the surface in Guizhou Province from 17:00 BT to 20:00 BT on March 19, 2021(blue triangle is the location of Guiyang Airport)

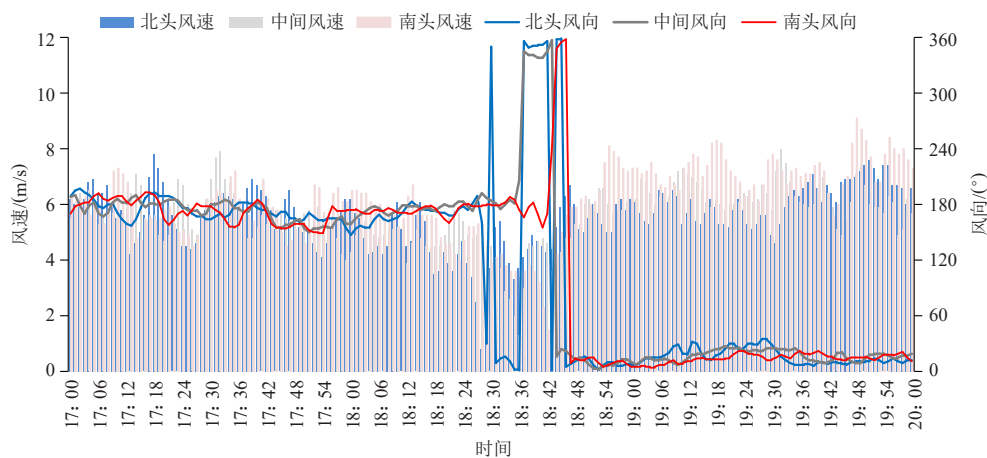


图3 2021年3月19日17:00—20:00贵阳机场逐分钟风向(折线)、风速(柱状)变化  
Fig. 3 Change of minutely wind direction (broken line) and wind speed (columnar) of Guiyang Airport from 17:00 BT to 20:00 BT on March 19, 2021

跑道北端转为偏北风, 18:37跑道中间端转为北风, 18:44跑道南端转为北风, 整条跑道仅在15 min内便全部由南风转为北风, 并且北风的风速也在7 m/s左右。航空器报告风切变的时间在18:49, 即风向完全转为北风以后。

从图4可以看到冷空气从近地面及垂直方向入侵的情况, 由于贵阳机场风廓线雷达位于跑道南端, 19:00近地面依旧为南风, 在19:06才由南风转为北

风控制, 到20:00左右真高500 m以下才全部转为偏北风。因此, 即便整条跑道已经在18:44便转为北风, 但由于冷气团厚度的增加有一个过程, 期间冷暖气团在冷暖空气交界面上存在较强风切变, 使用跑道南端起/着陆的航空器依旧容易遭遇风切变。冷锋型低空风切变的短期预报需根据数值预报及经验订正判断冷锋过境的时间, 临近预报需实时监控机场上游站点的转风情况, 贵阳机场跑道北端风向由南转北是贵阳机

场风切变开始发生的信号。

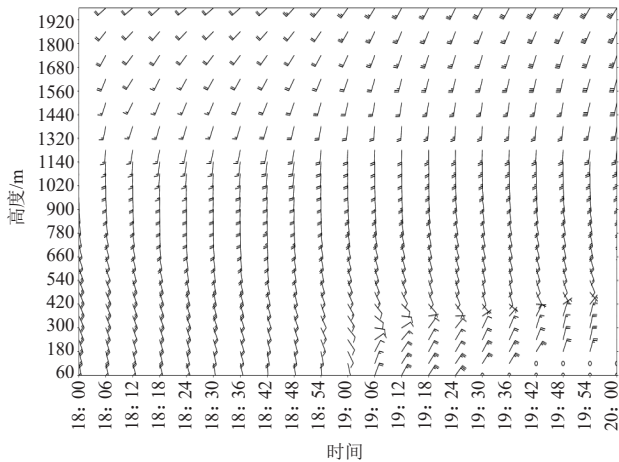
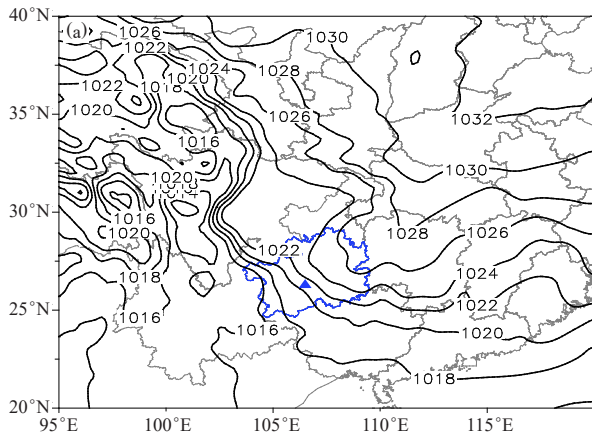


图4 2021年3月19日18:00—20:00贵阳机场风廓线资料  
Fig. 4 Wind profile data of Guiyang Airport from 18:00 BT to 20:00 BT on 19 March 2021

## 2.2 准静止锋型

昆明准静止锋是我国西南地区东部云贵高原上



一个经常出现的天气系统，云贵地区平均每年约四分之一的时间内有昆明准静止锋存在<sup>[16]</sup>，多出现在冬春季<sup>[17]</sup>，对应13个准静止锋型低空风切变样本中有12个出现在冬春季，因此下文将对12个出现在冬春季的准静止锋型低空风切变事件样本进行合成。

昆明准静止锋型低空风切变的判断条件之一是准静止锋已在云贵地区维持至少2 d<sup>[17]</sup>，对其出现时的海平面气压场进行合成可见(图5a)，等压线密集区位于贵州省中西部，准静止锋呈西北-东南向，贵阳虽然位于准静止锋锋后，但离锋面的径向距离通常在1个经度内；等压线高值区位于我国华北地区，高值区经河南-湖北-湖南中北部向贵州东北部扩张，说明此时冷空气来源于高压后部的东北回流，此路径下的冷空气相较西北及正北路径的强度更弱。从垂直方向上看(图5b)，锋面位于106°E左右，锋区内(105°~107°E)等温线密集程度不大，说明锋区强度较小；锋后700~900 hPa存在较厚的逆温层，逆温层的下界面在900 hPa左右，说明此时冷空气的厚度较薄，势力

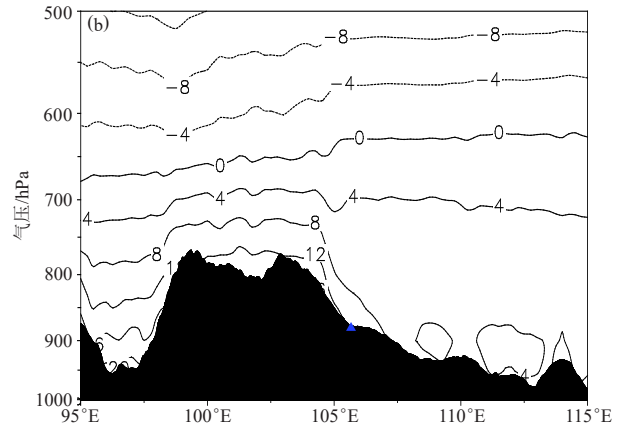


图5 昆明准静止锋在水平方向和垂直方向上的分布(蓝色三角为贵阳机场所在位置)  
(a) 海平面气压合成图(单位: hPa), (b) 温度沿26°N的垂直剖面合成图(单位: °C)

Fig. 5 The distribution of Kunming quasi-stationary front in horizontal and vertical direction (blue triangle is the location of Guiyang Airport) (a) composite sea-level pressure (unit: hPa), (b) composite temperature along 26°N (unit: °C)

较弱。

从风场上看(图6)，700 hPa长江中下游以南的大范围地区为西南-东北向的低空急流控制，急流核位于湖南省，强度达19 m/s，而贵州省中部及以南区域风速均在17 m/s左右。850 hPa的风场则与700 hPa存在较大区别，从风速上看，无明显低空急流，贵州省大部分区域风速在5 m/s左右，相较700 hPa风速显著减小，说明两层之间存在风速的垂直切变。从风来看，全省大部区域的风向偏东，在贵州省西南部存在西南风与偏东风的辐合，省中部地区存在东北风与东南风的辐合，虽然辐合线附近存在风向切变，但是由

于风速较小，水平方向上风切变强度较弱，但若结合700 hPa的风向则可发现，850 hPa上贵州省中部地区的风向刚好与之相反，因此两层之间还存在风向的垂直切变。

2018年12月9日12:53，某航班在起飞阶段861 m处遭遇风切变。受准静止锋锋后的东北回流冷空气影响，贵阳机场近地面冬季盛行风向为东北风，且风速较小。11:00—13:00，贵阳机场整条跑道为一致的偏北风，跑道南端和北端的风向差多数在1°~20°，并且跑道南端与北端的风速差95%在1 m/s及以下，不存在明显的风向或风速切变。下面将针对近地面至中层

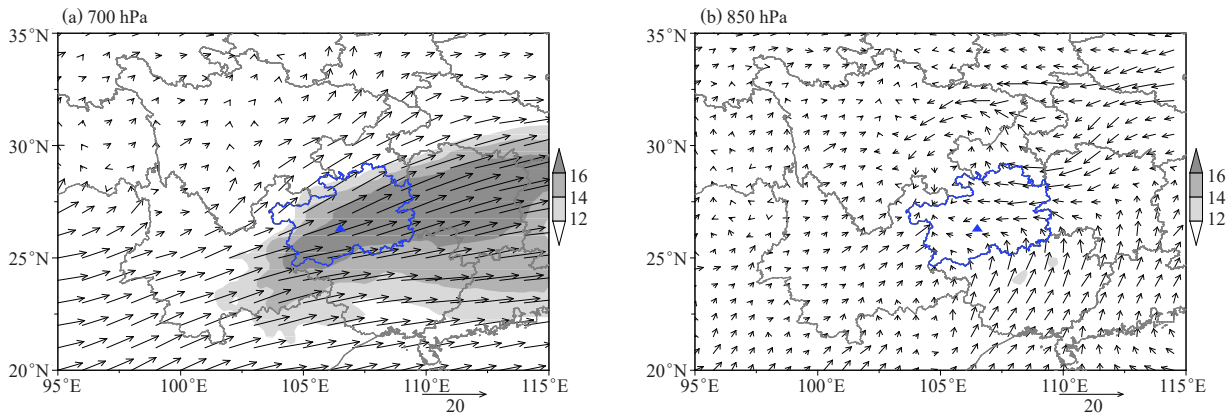


图6 水平风场(风矢量,单位: m/s)以及低空急流(填色,单位: m/s)合成图(蓝色三角为贵阳机场所在位置)  
Fig. 6 Composite horizontal wind field (wind vector, unit: m/s) and low level jet (shade, unit: m/s)  
(blue triangle is the location of Guiyang Airport)

的风场情况进行分析,以探求准静止锋型风切变发生的原因。

贵阳站点的探空图能够更加清晰地看到水平风场的垂直变化,图7a中可以看到,在800 hPa以下贵阳站为弱的东北风。结合图7b可见,在海拔高度1913 m以下为风速不超过5 m/s的偏北风,在海拔高度1913~2131 m风向有一个从偏北风向西南风的转变,风速也由2.1 m/s突增到9.8 m/s,在海拔高度2203 m(约800 hPa)就已达到低空急流的强度(风速在12 m/s及以上)。假设此时有飞机处于进近阶段,由于整条

跑道为一致偏北风,因此航空器将使用跑道南端进近着陆,在2200 m左右偏南风达到急流强度,航空器在进近过程中易出现顺风较大的情况;在进一步下降过程中,航空器从2131 m下降到1913 m,除了出现风速的急剧下降外,风向变化也由南向北转变,此时易出现风的垂直切变。对应图7a中的层结曲线可以看到,820~750 hPa(约1700~2500 m)存在明显的逆温层,此高度涵盖了两种形式产生的风切变,而逆温层的出现一方面受西南低空急流的影响,另一方面由于偏北风在向偏南风转变的过程中有一个减小的过程,导致冷空气的输送较近地面有所减弱;此外,逆温层离地面相对较高,因此准静止锋型风切变出现的高度也是四种类型中相对较高的(据统计,准静止锋型风切变出现在350 m以上的几率为58.3%,而冷锋型风切变、低空急流型风切变及局地对流型风切变出现在350 m以上的几率分别为35.7%、2.0%及18.1%)。除了逆温层内容易遭遇风切变外,当地面辐合线在贵阳机场附近来回摆动时,风向也将随着地面辐合线的摆动而出现南北风的反复转换,此时跑道近地面易出现南北风对吹的情况,出现明显的风向切变。

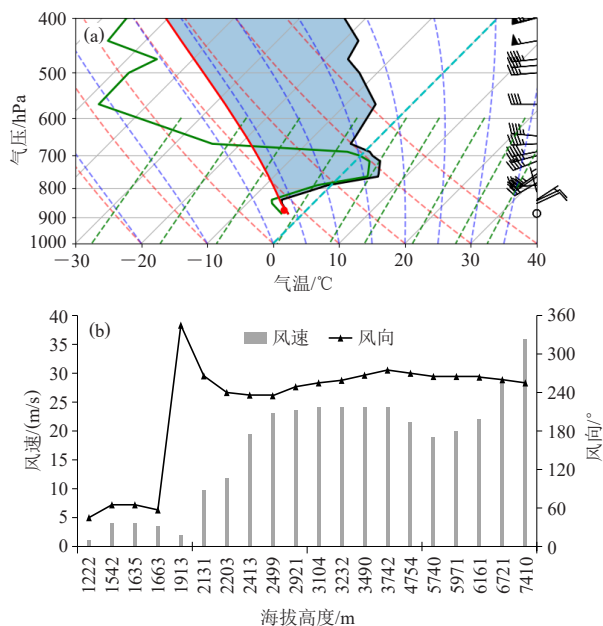


图7 2018年12月9日08:00贵阳站探空图(a)(黑线:层结曲线,绿线:露点曲线,红色:状态曲线)、风随高度的变化图(b)  
Fig. 7 (a)  $T$ - $\log p$  (black line: stratification curve, green line: dew point curve, red line: condition curve), (b) change of wind with height of Guiyang Station at 08:00 BT on 9 December 2018

### 2.3 低空急流型

低空急流型风切变常出现在春季,高度通常在250 m以下。本文从近地面系统及中低层风场的角度进行分析,以便对此类型低空风切变出现的背景场有一个基本的认识;考虑到此类型低空风切变出现高度较低,因此可针对典型个例具体分析近地面的风场情况。

从700 hPa的风场图可以看到(图8a),滇东至湖北整个地区都受西南低空急流控制,急流中心位于湖南中西部,最大风速达17 m/s;贵州省除川黔交界处外均为风速大于12 m/s的急流影响,贵阳位于急流轴

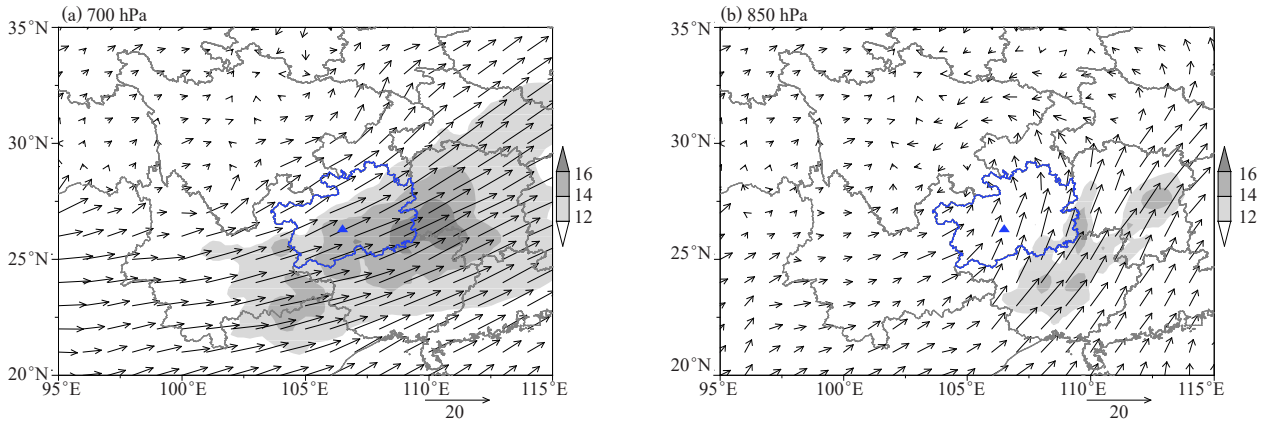


图8 14: 00水平风场(风矢量, 单位: m/s)以及低空急流(填色, 单位: m/s)合成图(蓝色三角为贵阳机场所在位置)  
Fig. 8 Composite horizontal wind field (wind vector, unit: m/s) and low level jet (shade, unit: m/s) at 14:00 BT (blue triangle is the location of Guiyang Airport)

左侧; 850 hPa上(图8b), 贵州省受西南偏南气流控制, 虽未达到急流强度, 但是贵州中部最大风速也高达11 m/s。

从海平面气压场来看(图9), 整个四川、贵州以及云南东部均受低值系统控制, 低压中心位于川黔交界处, 对应在850 hPa上存在低压环流(图8b), 说明地面低压发展相对强盛, 此时贵阳受热低压控制, 且位于中心右侧。整体来看, 当700 hPa存在西南低空急流, 850 hPa存在偏南急流, 且贵阳位于急流轴左侧, 而地面热低压控制川黔区域, 贵阳位于中心右侧时, 贵阳机场常出现偏南大风。

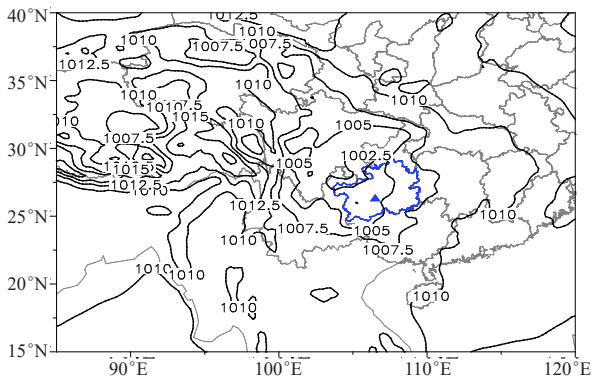


图9 14: 00海平面气压场合成(单位: hPa)(蓝色三角为贵阳机场所在位置)  
Fig. 9 Composite sea-level pressure at 14:00 BT (unit: hPa) (blue triangle is the location of Guiyang Airport)

2018年3月3日18: 03, 某航班在起飞阶段250 m/s处遭遇风切变。2018年3月3日14: 00, 700 hPa上滇东至湖北整个地区都受西南低空急流控制(图略), 急流中心分别位于云贵交界处和湖南中西部。850 hPa上贵州省受偏南气流控制, 在华南至湖南存在西南-东北向的低空急流, 滇东地区也存在最大风速超过14 m/s

的急流核, 而地面贵州受热低压影响, 地面与中低层的配置与合成分析结果一致, 但此配置只能解释贵阳机场出现偏南大风的原因。考虑到风切变的出现具有局地性、突发性和瞬时性, 而低空急流型风切变通常出现在较低的高度, 因此下面将分析贵阳机场跑道南北两端逐分钟的风向、风速及风速差, 初步揭示低空急流型风切变发生的特征及原因。

如图10所示, 17: 30—18: 30, 贵阳机场跑道南北两端均为一致的偏南风, 风向在 $160^{\circ}\sim 200^{\circ}$ , 集中在 $180^{\circ}$ 左右, 风向变化较小; 从风速上看, 56%的风速在8 m/s及以上, 最大风速达14 m/s。在南风情况下飞机使用跑道北端起飞或着陆, 南风风向稳定, 若风速也稳定, 即使风速较大, 水平方向也不易出现风切变, 而垂直方向上低层至中层均为偏南大风, 风速和风向在垂直方向的切变也较小, 此时飞机出现颠簸的可能性更大。但对比跑道南北两端的风速差可以发现, 风切变出现时, 跑道两端的最大风速差达6 m/s; 此外, 风速受地形的影响通常具有阵性的特征, 因此越接近下垫面风速受地形影响越大, 风的阵性特征也更明显, 因此低空急流型在低高度出现风切变的可能性是四种类型中最大的。2014—2020年贵阳机场接收到的低空风切变事件话音方式航空器空中报告中, 低空急流型风切变出现在50 m/s以下的概率为20%, 其次为冷锋型风切变, 出现概率为3.6%, 而静止锋型风切变及局地对流型风切变出现在50 m/s以下的概率均为零。

## 2.4 局地对流型

贵州省下垫面较复杂, 夏季局地对流天气频发, 局地对流通常尺度小、生消迅速、强度变化极快, 如果对流云团位于机场跑道上空或跑道延长线附近, 即便强度和范围不大, 也极易对飞机的起飞或着陆造成

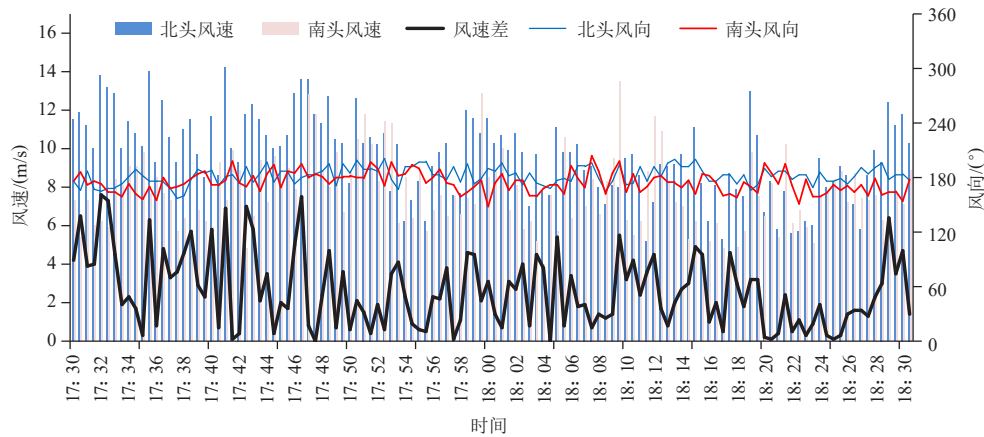


图10 2018年3月3日17:30—18:30贵阳机场逐分钟风向(折线)、风速(柱状)变化

Fig. 10 Change of minutely wind direction (broken line) and wind speed (histogram) of Guiyang Airport from 11:00 BT to 12:00 BT on 3 March 2018

威胁。传统的“流型识别法”基于大尺度环流型，对于有组织的对流风暴具有预报潜势；而对于尺度较小、相对孤立的局地风暴，通常使用“配料法”分析其温、湿、风参量的分布，业务预报中先分型后统计物理量阈值是一种快速有效的预报方法，但边界层辐合线、地形抬升、干线等中尺度系统能迅速而显著地改变局地环境，常常很难诊断<sup>[18]</sup>。目前对局地对流天气的预报还比较困难，临近预报中主要依赖于天气雷达。

2018年8月21日11:45某航班使用跑道南端起飞

时在60 m高度处遭遇风切变。从雷达回波上可以看到(图11)，11:04—11:51，在贵阳机场周围10~120 km范围内有大量孤立对流云团，此消彼长，且几乎是原地生消。距离贵阳机场最近的强对流云团位于中心南侧15 km左右，强度最强为35~40 dBz左右，其余强对流云团距离机场相对较远；影响贵阳机场的回波主要为西北侧的降水回波，范围较大，强度在15~20 dBz，航空器遭遇风切变时强回波中心的范围已经有所减弱。

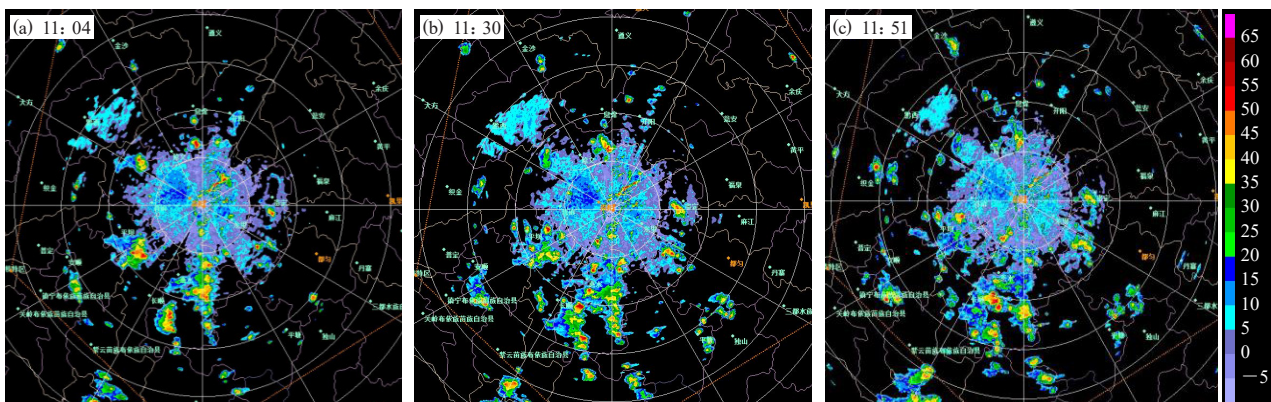


图11 2018年8月21日贵阳龙洞堡多普勒天气雷达组合反射率

Fig. 11 Composite reflectivity of Guiyang Longdongbao Doppler Weather Radar on 21 August 2018

虽然从雷达图上可以监测对流云的位置、强度及移动方向，但是不同强度及范围的对流云对机场的影响情况不同，尤其是当对流云团生消及强度变化都很快的情况下，依旧很难判断是否会出现风切变。然而从贵阳机场自动观测系统采集的风场可以看到(图12)，11:00—11:30，跑道北端受西北侧降水云团的影响以偏北风为主，跑道南端风向不稳定，偏南风居多，但期间两端风速均较小，多数不超过2 m/s；

11:30—11:40，两端风速略微增加，但多数不超过4 m/s，且风向均以偏南风为主；11:40—11:55，跑道两端的风速急剧增加，最大瞬时风速增加到12 m/s，且跑道北端与南端的风向刚好相反，因此极易遭遇低空风切变；12:00以后风速虽未即刻减小，但跑道两端的风向基本一致，不易出现低空风切变。

### 3 结论与讨论

本文通过天气形势分型、统计分析等方法，结合

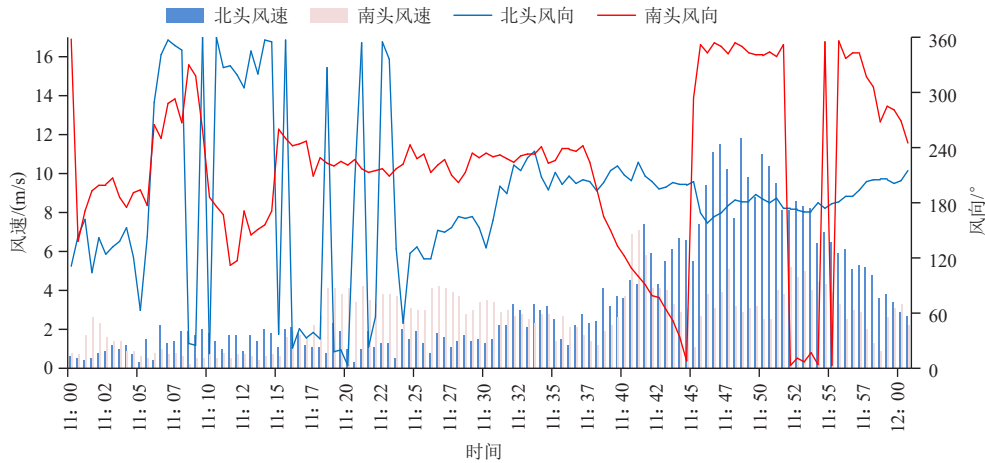


图12 2018年8月21日11: 00—12: 00贵阳机场逐分钟风向(折线)、风速(柱状)变化

Fig. 12 Change of minutely wind direction (broken line) and wind speed (histogram) of Guiyang Airport from 11:00 BT to 12:00 BT on 21 August 2018

典型案例,对贵阳机场冷锋型、昆明准静止锋型、低空急流型和局地对流型低空风切变的环流特征、关键天气系统配置及要素分布进行分型,并初步探究不同类型低空风切变的成因,得出以下结论。

1)冷锋型风切变的预报着眼点在于冷锋过境的时间,前期需关注偏北风在700 hPa和850 hPa上的东伸情况以及900 hPa上的南压程度,机场跑道北端风向由南转北是风切变开始的信号。

2)昆明准静止锋型风切变出现时,当锋面位于贵州省中西部,锋后机场上空700~900 hPa的逆温层内为偏南急流,近地面为弱北风,飞机易遭遇顺风较大和风的垂直切变;当准静止锋在机场附近来回摆动时容易造成机场跑道南北两端出现对头风,从而导致风切变。

3)低空急流型风切变出现时,西南地区700 hPa和850 hPa分别存在的西南及偏南低空急流与川黔区域的地面热低压相互配合,近地面风场受地形影响导致机场跑道两端风速不连续而产生风切变。

4)局地对流通常尺度小、生消迅速、强度变化极快,目前可结合天气雷达、机场自动观测数据来有效监测机场范围内低空风切变的发生发展。

#### 参考文献

[1] 章澄昌. 飞行气象学(第二版). 北京: 气象出版社, 2008.  
[2] Paul M, Yvette R. Observations of vertical wind shear heteroge-

neity in convective boundary layers. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(3): 843-861.  
[3] 李秀连, 付强, 王科, 等. 风切变对飞行的影响及其预报时效分析. *气象科技*, 2010, 38(2): 170-174.  
[4] Fujita T T. Objectives, operation, and results of NIMROD. 11th Conference on Severe Local Storms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1979: 259-266.  
[5] Wolfson M M, Delanoy R L, Forman B E, et al. Automated microburst wind shear prediction. *Lincoln Laboratory Journal*, 1994, 7: 399-426.  
[6] Williams P. Aircraft trajectory planning for terrain following in incorporating actuator constraints. *Journal Aircraft*, 2005, 42(5): 1358-1362.  
[7] Harris F I, Glover K M, Smythe G R. Gust front detection and prediction. 14th Conference on Severe Local Storms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1985: 342-345.  
[8] 冯彦华. 白云机场低空风切变的时空特点及其大气环流形势分析. *广东气象*, 2004, (4): 5-6.  
[9] 马敏劲, 林超, 赵素蓉, 等. 北京首都国际机场低空风切变观测分析和数值模拟. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(3): 70-76.  
[10] 单乃超, 周后福, 陈少清, 等. 合肥机场一次低空风切变机理分析. *气象科技*, 2018, 46(6): 1240-1250.  
[11] 翁雪玲, 于佳松, 徐建文. 大连机场典型低空风切变的成因分析. *气象与环境科学*, 2020, 43(1): 81-89.  
[12] 沈宏彬, 赵润华, 张潇, 等. 西南地区低空风切变事件分析. *高原山地气象研究*, 2013, 33(3): 39-44.  
[13] 刘开宇, 申红喜, 成永勤, 等. 贵阳机场冷锋型低空风切变的合成分析. *云南大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(S2): 392-396.  
[14] 刘开宇, 张映红, 曾维. 贵阳机场低空风切变的气候特征分析. *云南大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(S1): 39-42.  
[15] 遂野. 中川机场一次风切变天气成因分析. *科技风*, 2018, (29): 126-127.  
[16] 段旭, 李英, 孙晓东. 昆明准静止锋结构. *高原气象*, 2002, 21(2): 205-209.  
[17] 许美玲. 云南省天气预报员手册. 北京: 气象出版社, 2011.  
[18] 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.

# 民用无人机作业气象标准制订及气象保障体系构建浅析

姚镇海<sup>1</sup> 江春<sup>1</sup> 姚叶青<sup>1</sup> 丁浩<sup>2</sup> 诸葛杰<sup>3</sup> 马邵翔<sup>4</sup>

(1 安徽省公共气象服务中心, 合肥 230031; 2 中国民用航空华东地区空中交通管理局安徽分局, 合肥 230051; 3 佐格微系统(杭州)有限公司, 杭州 310000; 4 安徽科尔泰智能科技有限公司, 合肥 230000)

**摘要:** 我国民用无人机作业在影视、农林、勘测、安防等诸多领域得到了广泛应用, 作业高度多在低空空域, 属于通用航空(通航)领域的应用分支。气象服务作为飞行最重要的基础保障之一, 日益成为制约我国通航产业发展的瓶颈。该领域尚缺少系统性、针对性的气象指标和保障措施。本文从无人机作业领域、气象影响因素、无人机作业气象标准制订方面提出了“多部门联合”共建无人机作业气象标准的思路。并以无人机作业气象系列标准中的植保作业为例, 给出了作业期间天气实况、预报信息登记表, 为气象服务提供数据记录蓝本。其次, 就当前无人机作业气象保障存在的短板, 从气象指标体系构建、多元数据融合产品研发、通信机制的建立完善等方面提出了展望, 旨在为完善无人机作业气象保障体系提供思路和建议, 并为拓展通航气象服务新领域、创新发展奠定理论基础。

**关键词:** 无人机作业, 气象标准, 多部门联合, 气象保障体系

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.010

## Analysis on Meteorological Standards Setting of Civil UAV Operation and Construction of Meteorological Support System

Yao Zhenhai<sup>1</sup>, Jiang Chun<sup>1</sup>, Yao Yeqing<sup>1</sup>, Ding Hao<sup>2</sup>, Zhuge Jie<sup>3</sup>, Ma Shaoxiang<sup>4</sup>

(1 Anhui Public Meteorological Service Center, Hefei 230031 2 Anhui Branch of East China Air Traffic Administration of Civil Aviation of China, Hefei 230051 3 Hangzhou ZOGLAB Microsystem Co., Ltd., Hangzhou 310000 4 Anhui Kertai Intelligent Technology Co. Ltd., Hefei 230000)

**Abstract:** In China, Civil UAV operation has been used in a variety of fields, such as film and television, agriculture and forestry, survey and security. The operation altitude of UAV operation is mostly in low altitude airspace, which belongs to the application branch of general aviation (GA) field. As one of the most important basic guarantees of UAV operation, meteorological services have increasingly become a bottleneck restricting the development of China's GA industry. Currently there is a lack of systematic and targeted meteorological indicators and support measures. Based on UAV application fields, meteorological influencing factors and the formulation of UAV operation meteorological standards, this paper puts forward the idea of “multi-sectoral cooperation” to build the UAV operation meteorological index system. The plant protection operation is taken as an example, and both the weather information record and the weather forecast record for UAV plant protection operation are provided references for the development of meteorological services. Then, the future outlook of meteorological support for UAV operation, which is still insufficient, is proposed from the aspects of meteorological index system construction, multiple data fusion, and the establishment and improvement of communication mechanism. It is hoped that the research results can not only offer some advice and suggestions for the establishment of meteorological support system for UAV operation but also lay the theoretical foundation for expanding new fields and innovative development of GA meteorological services.

**Keywords:** UAV operation, meteorological standards, multi-sectoral cooperation, meteorological support system

### 0 引言

无人机作业属于通用航空领域的应用分支, 在影

视、农林、勘测、安防等诸多领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。伴随飞控、电池、云台载荷等模块技术的不断成熟, 以大疆创新、3D Robotics、亿航、零度智控等为代表的无人机企业不断推陈出新, 拓展了无人机行业应用普及面<sup>[2-4]</sup>。2019年4月, 人力资源社会保障部、市场监督管理总局和统计局发布了若干新兴职业, 其中无人

收稿日期: 2021年11月19日; 修回日期: 2022年2月25日  
第一作者: 姚镇海(1989—), Email: 18256589121@163.com  
通信作者: 姚叶青(1970—), Email: zmhht@163.com

机驾驶员以新职业的身份登上历史舞台，成为一项实用的专业技能。2020年中国航空器拥有者及驾驶员协会（AOPA-China Aircraft Owners and Pilots Association of China）民用无人机驾驶员报告指出：截至2020年12月31日，民用无人机驾驶员证照总数达88944本，且呈现逐年增加趋势<sup>[5]</sup>，无人机应用培训市场的发展正如火如荼进行中（图1）。虽然我国在低空空域的开放政策、设施建设、保障体系等方面相对西方国家落后，但伴随政策调整、基础设施建设和应用领域需求的不断增加，我国通航领域的发展将焕发无限潜力<sup>[6]</sup>。



图1 安徽省合肥市大圩镇无人机驾驶员训练  
Fig. 1 UAV pilot training in Dawei town, Hefei, Anhui Province

我国民用无人机飞行高度多在1000 m低空空域内，环境复杂多变。易受到雷暴、风切变、能见度、温度和湿度等气象因子的影响<sup>[7-9]</sup>。研究与经验表明：无人机作业受风的影响较大，5级以上的风力会影响操纵稳定性；高、低温天气作业均对电池不利；降水、高湿环境造成电子元器件腐蚀等<sup>[10-11]</sup>。因为气象因素，造成作业失效、摔机、炸机、索赔等损失事件不胜枚举。钟若楣等<sup>[12]</sup>于2018年首次提出“无人机低空公共航路”，即在有人驾驶航空器最低飞行高度以上，预先规划具有一定宽度专供无人机飞行的公共空中通道。国内一些学者如钟若楣等<sup>[13]</sup>、赵磊等<sup>[14]</sup>对无人机航路气象条件进行了初步研究，着眼于气温、风、降水的环境资料模拟分析，得到无人机航路上温度、湿度和风速的分布情况和时间变化规律，并对该区域中飞行安全提供了若干建议。

我国低空飞行安全气象保障和服务体系亟待完善。监测数据、作业气象指标欠缺，信息传输、告警机制不完善等是制约低空飞行气象服务和保障的主要因素<sup>[15]</sup>。大势之下，气象部门机遇和挑战并存。本文针对应用较广泛的无人机作业领域，提出联合共建无

人机作业气象指标体系的思路，并对无人机作业气象保障工作提出了展望。

## 1 共建无人机作业气象标准

### 1.1 围绕通航发展背景，明确无人机作业目标领域

我国通用航空应用领域涉及农业、林业、国土、气象、生态等多部门，覆盖了低空到高空空域范围。民用无人机作业多处和低空空域（1000 m以下）内，涉及影视、监测、农业播撒等众多应用领域。航拍、航测、植保、巡检、安防为应用较为广泛的目标领域。无人机物流技术也在不断发展壮大。

### 1.2 面向从业人员，开展气象影响因素调研

2020年初，采取网络问卷调查形式，对全国范围包含无人机驾驶员、无人机教员在内的群体进行抽样调查。随机面向2577名调查者，最终得到有效问卷反馈2321份（缺失和无效问卷分别占184和72份），问卷有效率超过90%。其中，“无人机作业中出现飞行事故的原因？”这一问题的反馈结果（表1）表明：不熟悉周边环境（27%）、冒险操作（21%）、气象因素（18%）和不清楚理论知识，缺乏系统培训（13%），这几类因素总计占比79%。可见，气象因素（18%）是影响低空无人机飞行安全的重要因素之一。

表1 无人机作业事故原因统计表  
Table 1 Statistics of UAV operation accident causations

事故原因	人数	占有比例/%
不熟悉周边环境	627	27
冒险操作	487	21
气象因素	418	18
不清楚理论知识，缺乏系统培训	302	13
设备质量异常	232	10
反无人机管制	46	2
其他	209	9
总计	2321	100

影响无人机作业的气象因素众多，但通过采纳一些教员的建议，并结合无人机驾驶员们的经验，罗列出影响无人机作业的气象因子。就“结合您实际工作，哪些气象因素对无人机作业产生影响（多选）？”这一问题的统计结果绘制饼图（图2）。可以发现，影响作业的气象首要因素是风（29.3%），其次分别是降水（21.7%）、气温（19.2%）、能见度（14.3%）和相对湿度（10.4%），云和其他因素分别占3.7%和1.4%。

### 1.3 依据调研结果和经验分析制订无人机作业气象标准

以民用无人机作业气象指标体系的构建工作为抓手，秉持“互通有无，博采众长”的合作精神，建立气象部门、空中交管部门、无人机执照培训企业、无

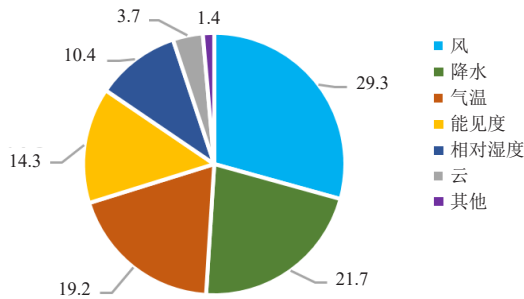


图2 无人机作业气象影响要素比例统计图 (单位: %)  
Fig. 2 Statistical chart of meteorological impact factors for UAV operation (unit: %)

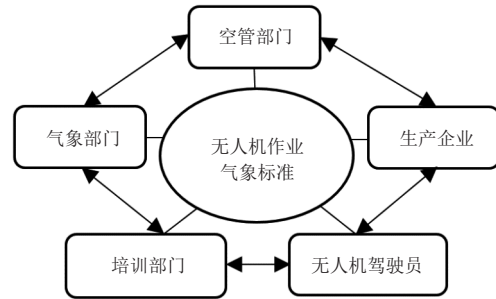


图3 无人机作业气象标准制订工作组  
Fig. 3 Working group for meteorological standards settings of UAV operation

人机应用技术培训等“多部门联合”的常态化、高效沟通机制。以“气象+无人机应用”的服务思路,参考相关著作、标准、文献和专家建议<sup>[16-21]</sup>,细化各类气象影响要素适宜作业的区间和最低气象条件,研究并起草无人机各应用领域的标准规范。在项目调研、讨论、文件起草和总结凝练等过程中,实现无人机飞行、行业应用等知识和经验的汇集,加深专家组对航空气象服务工作的理解。为后续创新工作的开展组建专业团队(图3),搭建好良好的合作平台。

2021年10月,以中国气象服务协会提出并归口,安徽省公共气象服务中心、中国民用航空局华东空中交通管理局安徽分局、清华大学合肥公共安全研究院等无人机应用培训机构,联合起草并发布标准《民用无人机作业气象条件等级 植保》(T/CMSA 0021-

2021)。该项标准确立了影响无人机植保作业的气象条件等级,并就作业保障的气象监测(表2)、预报(表3)提供了标准化信息登记方案,详细的气象要素划分可参考气象标准<sup>[22]</sup>。此项工作的开展,不仅可为无人机作业提供系统性、针对性的法理依据,使之更加规范、有效。同时也为气象标准规范在其他应用领域的推广<sup>[23-25]</sup>,及相关研究工作奠定了基础。

## 2 无人机作业气象保障工程

### 2.1 气象数据应用能力存在不足

就无人机作业气象保障而言,当前气象数据存在如下短板。

1)我国部分地区气象站点密度欠充足。民用无人机作业(如植保、航拍等)半径可达千米级或亚千米级别。此范围内国家站或区域气象站密度欠充足,

表2 无人机植保作业天气预报信息记录表  
Table 2 Weather forecast record of UAV plant protection operation

无人机植保作业天气预报信息记录表											
填表日期: yyyy-mm-dd											
作业地点:											
作物名称:											
无人机型号/动力来源:											
植保药剂名称:											
											填表人( )
时段 hh1: hh2	天气 现象	风力等级		气温等级		能见度等级		相对湿度等级		气象条件 等级	备注 (首要影响气 象要素)
		风速( <i>Ws</i> )/ (m/s)	影响等级 (L1)	气温( <i>T</i> ) /℃	影响等级 (L2)	能见度( <i>V</i> ) /m	影响等级 (L3)	相对湿度 ( <i>RH</i> )/%	影响等级 (L4)		

**填写说明:**

- “填表日期”中,“yyyy-mm-dd”代表:“年-月-日”。“hh1:hh2”代表:“时次1:时次2”。“作业地点”以无人机驾驶员所在的地名,经纬度数值填报,如“\*\*乡 经度,纬度”。“作物名称”填写植保作物名称。“无人机型号/动力来源”填写植保机型号/锂电(或燃油)。“植保药剂名称”填写飞防药剂全名。“填表人”为本次作业的负责人姓名。
- “天气现象”填写现场可能出现的天气。例如:晴,多云,阴,雨,雪。
- 不同气象要素对植保作业的影响等级,分为1级(适宜)、2级(较适宜)、3级(一般)、4级(较不宜)和5级(不适宜)。
- “备注”一栏填写“雨”或“雪”(若有发生),或影响等级最大的1个或多个(若最大值相同)气象要素名称,若无影响作业安全的天气现象,且各影响等级值均为1,可填写“无”。
- 以气象部门公布的精细化预报数据填写各类要素。宜参考近地面1 km×1 km(或更高)空间分辨率数据,和较高时间分辨率的预报数据(宜首选分钟级数据)。当影响等级不能成为作业唯一依据的情况下,应结合现场环境综合研判,谨慎作业。

表3 无人机植保作业天气实况信息记录表  
Table 3 Weather information record of UAV plant protection operation

无人机植保作业天气实况信息记录表											
填表日期: yyyy-mm-dd 作业地点: 作物名称: 无人机型号/动力来源: 植保药剂名称:											填表人( )
时间 hh: mm	天气 现象	风力等级		气温等级		能见度等级		相对湿度等级		气象条件 等级	备注 (首要影响气 象要素)
		风速( <i>W</i> s)/ (m/s)	影响等级 ( <i>L1</i> )	气温( <i>T</i> )/ ℃	影响等级 ( <i>L2</i> )	能见度( <i>V</i> ) /m	影响等级 ( <i>L3</i> )	相对湿度 ( <i>RH</i> )/%	影响等级 ( <i>L4</i> )		
<b>填写说明:</b> 1) “填表日期”中,“yyyy-mm-dd”代表:“年-月-日”。“hh: mm”代表:“时:分”,且在进行每个飞行架次前填写。“作业地点”以无人机驾驶员所在的地图名+经纬度数值填报,如“**乡 经度, 纬度”。“作物名称”填写植保对象名称,如“水稻”“小麦”。“无人机型号/动力来源”填写植保机型号/锂电(或燃油)。“植保药剂名称”填写飞防药剂全名。“填表人”为本次作业的负责人姓名。 2) “天气现象”一栏依据现场环境填写。例如:晴,多云,阴,雨,雪。 3) 不同气象要素对植保作业的影响等级,分为1级(适宜)、2级(较适宜)、3级(一般)、4级(较不宜)和5级(不适宜)。 4) “备注”一栏填写“雨”或“雪”(若有发生),或影响等级最大的1个或多个(若最大值相同)气象要素名称,若无影响作业安全的天气现象,且各影响等级均为1,可填写“无”。 5) 以气象部门公布的精细化实况数据或现场气象监测数据填写各类要素。前者宜参考近地面1 km×1 km(或更高)空间分辨率数据,和较高时间分辨率的实况数据(宜首选分钟级数据)。山区、丘陵等复杂地形下作业,宜参考符合国家标准移动式气象站分钟级观测数据,若缺少现场气象观测数据,则以气象部门公布的精细化实况数据填写。当影响等级不能成为作业唯一依据的情况下,应结合现场环境综合研判,谨慎作业。											

尤其是我国中西部地区,气象站点密度更低。这就需要通过移动设备、天气App等途径获取作业所在地天气实况。

2) 遥感数据存在局限性。气象卫星遥感适用于大范围、长时间的连续观测。如当前的FY-4A可实现时间分辨率为5 min连续观测<sup>[26]</sup>。但受其空间分辨率影响,难以精确监测无人机作业区的天气变化。多普勒气象雷达资料2 h以后外推资料误差增加,且存在监测盲区;激光雷达虽易于部署,但监测区域限于剖面,且监测要素受限<sup>[27]</sup>。

3) 格点再分析资料尚未充分利用。例如:国家气象信息中心下发的“CLDAS(陆面数值同化系统)大气驱动场产品V2.0”1 km×1 km逐分钟精细化数值格网产品在无人机作业保障的适用性尚未得到论证,需在各领域作业保障中确立最优应用方案。

4) 民用无人机作业气象指标体系尚未建立完善。民用无人机作业涉及领域众多,各类作业采用的平台构型、航线规划等参数存在差异,作业过程受气象要素种类和强度的影响亦会发生变化。通过设立近似统一的气象阈值来判断航线或空域适航性好坏将难以适合多领域无人机作业对气象保障的需求。

## 2.2 无人机作业保障平台有待进一步发展

在无人机作业中,系统保障平台起到监视、通信、执行作业等作用,为地面端和空中端的纽带<sup>[28-30]</sup>。行业服务类无人机系统的地面端集成了遥控(remote

control, RC)与地面站(ground station, GS)的协同控制模块,为特定作业开发相关航线规划、载荷算法等功能。当下市面中无人机系统可集成于手机、Pad或桌面端,如大疆公司的DJI N3飞控模块、GS Pro软件,ArduPilot开源系统下的mission planer地面站软件等。优云智翔公司推出了上报飞行数据、空域划拔、云存储等功能为一体的“优云”小黄盒,可满足无人机群体飞行数据管理功能。总体而言,无人机系统保障平台虽种类多样,但依然存在不足,具体如下。

1) 保障平台算法、算力不足。无人机系统保障平台的地面端承担了数据传输、显示、航线规划、载荷作业等多项功能需求。当前我国无人机系统以一机一控(一台无人机,一套控制端)为主,长时间作业中传输中断、运算停滞等状况时有发生。面对海量气象数据的融入,系统软硬件配置水平需进一步提升。

2) 系统续航能力有待提高。受锂电制造技术限制,无人机飞行终端续航时间的突破存在瓶颈。对大范围、长时间作业(尤其是气象监测领域)无人机系统来说,需进一步提高时空续航水平,并发展无人机数据集群技术,提高机群协同作业效率。

3) 地、空、天协同通信水平有待发展。受地区发展能力、空域管制等因素制约,我国民用无人机地、空、天的地基站点、无人机端、用户间通信机制尚未很好建立。在此基础上,还需对作业区域内空域管制、航线冲突、气象预警等重要信息实现高效融合。

与此配套的相关法律、标准规范体系有待逐步建立并更新。

### 2.3 无人机作业气象保障体系构建

目前中国民航局提出的民用无人航空器运行管理系统(UAV operation management system, UOM)、低空公路航路网等云端管理设施建设,将为无人机唯一性标识和安全运行提供技术支撑。为实现“碳达峰”“碳中和”目标,绿色低碳的航空作业体系逐步建立。中国民用航空局2022年2月印发了《“十四五”航空物流发展专项规划》<sup>[31]</sup>,作为首次编制的物流发展专项规划,这将为构建优质高效、自主可控的作业体系提供精准指引。相关气象服务保障工作也将陆续展开,这将极大提高我国物流运送的安全性。综上,对无人机作业气象保障体系的构建做出如下展望。

1) 分类细化无人机作业类别,构建气象指标体系。依据无人机重量(表4)<sup>[32]</sup>、平台构型、作业类别等特点,以无人机作业为服务对象,分类制订气象指数产品。

表4 无人机重量分类等级  
Table 4 UAV weight classification

分类等级	空机重量/kg	起飞全重/kg
I	$0 < W \leq 0.25$	$0 < W \leq 1.5$
II	$0.25 < W \leq 4$	$1.5 < W \leq 7$
III	$4 < W \leq 15$	$7 < W \leq 25$
IV	$15 < W \leq 116$	$25 < W \leq 150$
V	植保类无人机	
XI	$116 < W \leq 5700$	$150 < W \leq 5700$
XII	$W > 5700$	

具体措施如下:对影响无人机作业的气象要素划分影响等级。采取经验法、统计法或专家打分法等方法给出各气象因子影响权重,得到无人机作业气象指数(图4)。用户可采用定义作业类型、机型、确定作业时间等参数,获取所需时间空间范围内个性化气象指标参考依据。在大量作业案例中得到反馈信息,适时修订参数,使之不断完善。

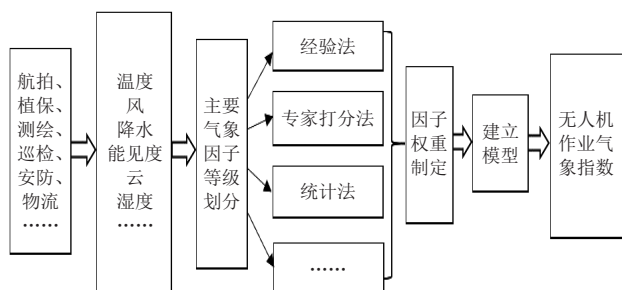


图4 无人机作业气象指数的建立流程  
Fig. 4 Generation of meteorological index for UAV operation

2) 研发多元气象数据融合产品。融合高密度地面观测、卫星数据、北斗卫星实时定位结果,综合考虑起降点、航路网等作业区域地理地形等因素影响。运用多元资料融合产品,预测未来作业逐小时、分钟内气象要素变化。如2022年冬奥会中的气象精细化预报系统实现了分钟级、百米尺度分辨率的气象服务产品<sup>[33]</sup>。该产品的应用或将为无人机飞行提供技术指引。

3) 定制可视化短临气象告警功能。立足无人机不同作业领域,制订告警要素和指标区间。构建无人机低空公共航路规划仿真验证系统,实现基于AR电子沙盘飞行仿真验证,融合气象告警数据,实现风险评估等功能,将其耦合至UOM中。用户可通过定制方式获取预警信息,实现可视化气象告警服务需求。

4) 建立并完善地、空、天通信机制。开发并部署移动观测设备(观测车、船、气象无人机等)系统,实现全作业周期数据中继技术。建立低空无人机、地基点、用户之间的通信机制。完善空域管制、航线冲突、气象预警等重要信息融合,贯穿全作业周期<sup>[34]</sup>。建立低空无人机用户之间的气象信息通信机制,发展从传统ADS-B通信机制到基于5G的地、空端通信、无人机数据集群技术,实现无人机数传图传一体化新格局(图5)。完善无人机系统算力与算法,提高系统续航水平。

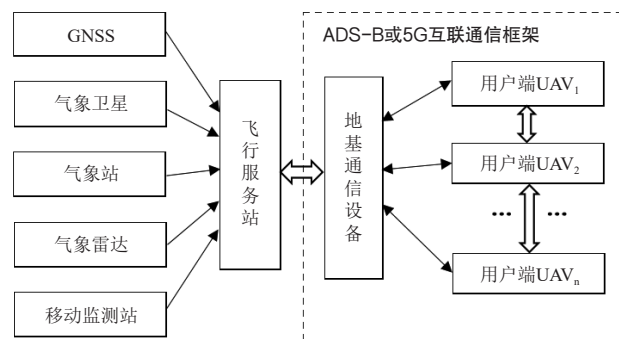


图5 无人机作业气象保障体系  
Fig. 5 Meteorological support system for UAV operation

5) 加强高影响天气知识培训,完善应急处置措施<sup>[35]</sup>。编写无人机作业高影响天气情况处置标准,要求无人机驾驶员遵循SOP(Standard Operating Procedure)准则<sup>[36]</sup>,通过常态化培训体系,增强无人机驾驶员对天气变化的敏感性,冷静地应对各类情况。当气象环境不满足上述一项或多项条件时,根据现场状况制定相应措施,提升作业效率,减少事故发生可能性。使得无人机飞行培训内容更具针对性、规范化。

### 3 结论

无人机技术的发展日新月异,与各领域应用的融合不断加深。立足监测精密、预报精准、服务精细的业务需求,秉持“互通有无,博采众长”的合作精神,基于“多部门联合”的协作模式,以无人机作业气象指标的制订作为通用航空气象服务业务的切入点。从中研发多元数据融合产品,建立并完善地、空、天通信机制及无人机作业用户气象信息个性化定制等需求。搭建“经验+试验+改进”的气象服务模式,实现“气象+无人机应用”的深度融合。这也将进一步促使我国低空空域无人机作业保障体系更加规范、高效地发展。

#### 参考文献

- [1] 孙毅. 无人机驾驶员航空知识手册. 北京: 中国民航出版社, 2014.
- [2] 张天鹏, 周志强, 黄金鑫, 等. 我国农业无人机航空植保技术现状与发展趋势分析. 南方农机, 2021, 52(1): 42-45.
- [3] He X, Bonds J, Herbst A, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in east Asia. *International Journal of Agricultural and Bioengineering*, 2017, 10(3): 18-30.
- [4] 程志义. 植保无人机行业年度发展报告. 深圳: 慧飞无人机应用技术培训中心, 2019.
- [5] 中国民用航空局飞行标准司. 中国民航驾驶员发展年度报告(2020年版). 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2020.
- [6] 安徽省发展和改革委员会. 安徽省民航业发展战略规划(2019—2035年). 安徽: 安徽省发展和改革委员会, 2019.
- [7] 陈婷, 杨泓, 李亚玲. 气象要素对多旋翼无人机飞行的影响. *中国设备工程*, 2018, (1): 170-171.
- [8] 中国气象局. GB/T 35227-2017 地面气象观测规范: 风向和风力. 北京: 中国气象局, 2017.
- [9] 中国气象局. GB/T 33673-2017 水平能见度等级. 北京: 中国气象局, 2017.
- [10] 易哲菁. 中短程无人机飞行气象要素影响及应急措施研究. *中国新技术新产品*, 2016, 9(2): 141-142.
- [11] 李玉华, 褚希, 杨秋彦, 等. 山东省首届无人机大赛气象条件及服务技巧分析. *陕西气象*, 2020, (4): 53-57.
- [12] 钟若媚, 廖小罕, 徐晨晨, 等. 京津冀地区无人机低空航路气象环境模拟研究. *气象科技进展*, 2021, 11(4): 147-155.
- [13] 钟若媚, 文小航, 徐晨晨. 基于高分辨率模式的京津冀地区无人机航路风向风速模拟分析. *地理科学进展*, 2021, 40(9): 1528-1539.
- [14] 赵磊, 谢丰, 徐晨晨, 等. 京津冀地区无人机航路气象因子高分辨率模拟分析. *地理科学进展*, 2021, 40(10): 1691-1703.
- [15] 张华, 李晶. 浅析低空飞行安全气象保障技术. *科技风*, 2020, (15): 8.
- [16] 赵中营. 无人机植保技术. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [17] 林正平, 洪峰, 刘鹤, 等. 浅析影响植保无人机作业效果的主要因素. *中国植保导刊*, 2019, 39(4): 70-72.
- [18] 陈盛德, 展义龙, 兰玉彬, 等. 侧向风对航空植保无人机平面扇形喷头雾滴飘移的影响. *华南农业大学学报*, 2021, 42(4): 89-98.
- [19] 王昌陵, 曾爱军, 何雄奎, 等. 风洞条件下植保无人机喷雾单元雾滴飘移特性试验. *农业工程技术*, 2020, 40(33): 85.
- [20] 中国民用航空局. MH/T 1069-2018 无人驾驶航空器系统作业飞行技术规范. 北京: 中国民用航空局, 2018.
- [21] 内蒙古自治区市场监督管理局. DB15/T 2081-2021 农用植保无人机作业技术规范. 内蒙古: 内蒙古自治区市场监督管理局, 2021.
- [22] 中国气象服务协会. T/CMSA 0021-2021 无人机作业气象条件等级 植保. 北京: 中国气象服务协会, 2021.
- [23] 逯曦, 任晓航, 张华明, 等. 无人机航拍技术在雷电防护中的应用. *气象科技*, 2015, 43(6): 1176-1180.
- [24] 王芝义. 应用无人机森林防火的优势分析与操作规范. *绿色科技*, 2019, (11): 167-168.
- [25] 樊丰新, 孙建军. 基于旋翼无人机的快速倾斜摄影测量作业研究. *地理空间信息*, 2021, 19(7): 24-26.
- [26] 崔林丽, 陈昭, 于兴兴, 等. 风云四号卫星东南沿海热带气旋强度深度学习估算. *遥感学报*, 2020, 24(7): 842-851.
- [27] 华志强, 黎倩, 黄轩, 等. 激光测风雷达在航空保障中的典型应用分析. *激光技术*, 2020, 44(5): 600-604.
- [28] 黄冠. 低空风切变的形成过程以及影响飞行安全的因素. *科技展望*, 2015, 25(15): 150-151.
- [29] Liu C G, Liu Y, Wu H, et al. A safe flight approach of the UAV in the electrical line inspection. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2015, 16(5): 503-515.
- [30] 吴红军, 行鸿彦, 张金玉. 低空飞行安全气象保障技术. *电子测量技术*, 2018, 41(9): 10-15.
- [31] 中国民用航空局. “十四五”航空物流发展专项规划. 北京: 中国民用航空局, 2022.
- [32] 中国民用航空局飞行标准司. AC-61-FS-2018-20R2 民用无人机驾驶员管理规定. 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2018.
- [33] 何亮. 护航冬奥会 气象科技实现两个“首次创新”. *科技日报*, 2021-11-26(02).
- [34] 卢娜, 张亮. 通用航空概论. 北京: 中国民航出版社, 2017.
- [35] Gyongyosi A Z, Kurunczi R, Kardos P, et al. Unmanned aerial observation of the planetary boundary layer for model evaluation and weather prediction purposes in support of UAV operation. *Optimization Letters*, 2013, 4(2): 173-183.
- [36] 中国民用航空局飞行标准司. AC-121-FS-2018-22R1 机组标准操作程序. 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2018.

# 碳达峰和碳中和行动方案——国内外“双碳”实现路径的典型案例分析与启示

■ 杨涵洧 陈奇 孙兰东 吴蔚 刘苏潇

中国实现“双碳”目标面临着巨大的挑战，必须探索适用于中国特色的实现路径。通过调查研究国内外在行政、立法、能源结构调整、绿色经济转型、清洁能源开发利用以及低碳技术创新等方面采取的措施和行动，为中国应对气候变化、提高适应气候变化能力建设，服务“双碳”目标实现提供借鉴。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.011

为了应对全球气候变化，2015年12月《联合国气候变化框架公约》缔约方在巴黎气候变化大会上达成《巴黎协定》。《巴黎协定》旨在约束全球气温升高，尽快达到温室气体排放的全球峰值，其长期目标是将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2℃以内，并努力将温度上升幅度限制在1.5℃以内。最新的IPCC第六次评估报告显示，未来几十年内如果不在全球范围内进行CO<sub>2</sub>和其他温室气体的大幅减排，全球升温将在本世纪内超过1.5℃和2℃。其中，人类活动造成的气候变化已经影响到全球每个区域的很多天气和气候极端事件。自IPCC第五次评估报告（AR5）以来，观测到的热浪、强降水、干旱和热带气旋等极端事件，特别是将其归因于人类影响的证据，均已增强。

2020年9月，中国在第75届联合国大会一般性辩论上提出中国CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和，这是中国向世界做出的庄严承诺。然而，距离2030年实现碳达峰，仅剩不到10年的时间，而且中国承诺实现从碳达峰到碳中和仅有大约30年时间，远远短于发达国家这一进程所用时间，中国实现“双碳”目标面临着巨大的挑战。因此，选择何种路径实现碳达峰、力争碳中和显得尤为重要。中国不仅需要付出艰苦努力，而且因为时间紧迫、任务艰巨，一定要把准时间表和路线图，找准主攻方向，避免走弯路、入误区。

目前，已有54个国家实现碳达峰。德国、俄罗

斯、法国等碳达峰峰值出现在《联合国气候变化框架公约》实施之前，属于自然碳达峰类型；另外一部分碳达峰国家如日本、美国、韩国等，在经济危机造成了不同程度的经济增长速度减缓或经济衰退之后出现碳达峰，属于外力下的波动性碳达峰类型。因此，中国想要实现碳达峰、力争碳中和必须走自己的路径。碳达峰、碳中和作为一个比较宏观的概念，只是为中国未来的经济与环境发展提供了笼统的理论框架与基本理念，具体如何实施还需要进一步探索。

本文着眼于国内外典型国家和地区碳达峰碳中和目标的设立和实现路径，调查研究国内外在行政、立法、能源结构调整、绿色经济转型、清洁能源开发利用以及低碳技术创新等方面采取的措施和行动，为应对气候变化、提高适应气候变化能力建设，服务“双碳”目标实现提供借鉴。

## 1 碳达峰碳中和目标的提出

### 1.1 世界碳达峰碳中和目标的设立

随着全球气候变化，科学家对于气候变化问题的认识不断深化。1990年联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布了第一份评估报告，对政策制定者和广大公众都产生了深远的影响。随后，国际社会在联合国框架下开始关于应对气候变化国际制度安排的谈判，1992年达成《联合国气候变化框架公约》，1997年达成《京都议定书》，2015年达成《巴黎协定》，成为各国携手应对气候变化的政治和法律基础。

收稿日期：2022年1月5日；修回日期：2022年1月10日

第一作者：杨涵洧（1988—），Email: Harvey\_Young@163.com

通信作者：陈奇（1985—），Email: chenq\_sms@126.com

资助信息：上海自然科学基金面上项目（21ZR1457600，23ZR1456600）；上海市科委“科技创新行动计划”（21DZ1201202，23YF1437300）；中国气象局创新发展专项（CXFZ2023J023）；上海市2022年节能降耗项目

① <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?tab=chart>。

根据全球各国和地区CO<sub>2</sub>排放数据<sup>①</sup>，全球已经有54个国家的碳排放实现达峰，占全球碳排放总量的40%。2020年，排名前15位的碳排放国家中，美国、加拿大、俄罗斯、日本、韩国、德国、英国和法国已经实现碳排放达峰。新加坡等国家承诺在2030年以前实现达峰。届时全球将有58个国家实现碳排放达峰，占全球碳排放量的60%。

目前国际上已有126个国家和欧盟以立法、法律提案或政策宣示等方式提出或承诺碳中和目标，其中苏里南和不丹由于低碳排放和高森林覆盖度，已率先实现碳中和目标，其余国家大部分计划在2050年实现碳中和，如法国、英国、欧盟、加拿大、韩国、日本、美国等（表1）。

表1 世界其他主要国家和地区提出的碳中和目标<sup>②</sup>

国家和地区	碳达峰目标时间	承诺性质	承诺碳中和时间
苏里南	/	/	已实现
不丹	/	/	已实现
丹麦	1996		2050
法国	1991		2050
瑞典	1993	完成立法	2045
英国	1991		2050
加拿大	2007		2050
欧盟	/		2050
西班牙	2007	法律提案	2050
韩国	2013		2050
日本	2012		2050
德国	1990		2050
瑞士	2000		2050
挪威	1990	政策宣示	2050
美国	2007		2050
新加坡	2030		21世纪下半叶

## 1.2 中国碳达峰碳中和目标的提出

早在2005年，在我国“十一五”规划纲要中就提出了要节能减排<sup>③</sup>。2015年，习近平总书记在联合国气候变化巴黎大会演说<sup>④</sup>中指出中国将把生态文明建设作为“十三五”规划重要内容，落实创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，通过科技创新和体制机制创新，实施优化产业结构、构建低碳能源体系、发展绿色建筑和低碳交通、建立全国碳排放交易市场等一系列政策措施，形成人和自然和谐发展现代化建设新格局。

2020年9月22日，习近平总书记在第七十五届联

国大会一般性辩论上向世界宣布了中国的碳达峰目标与碳中和愿景<sup>⑤</sup>（表2）：“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。”

表2 中国碳达峰目标碳中和愿景的提出历程

提出时间	目标年份	指标/目标
2009	2020	1) 单位GDP CO <sub>2</sub> 排放较2005年下降40%~45%； 2) 非化石能源占一次能源消费比重达到15%左右。
2015	2030	1) 2030年左右达到峰值并争取尽早达峰； 2) 单位GDP CO <sub>2</sub> 排放比2005年下降60%~65%； 3) 非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右。
2020	2030/2060	中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，CO <sub>2</sub> 排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

## 2 国际碳达峰碳中和路径

目前，世界各发达国家均从自身实际国情出发，制定了针对性的碳达峰碳中和路径。总的来说，各个国家的碳达峰碳中和路径均表现为综合性方案，包括政策/法律法规的制定、节能减排、清洁能源的开发和利用等，涵盖了社会和经济发展的各个方面。从横向上看，各个国家的碳达峰碳中和路径具有各自的特点，如：以综合性路径为主要特征的美国“清洁能源革命和环境正义”、以节能减排为亮点的欧盟《欧洲绿色协议》和英国“绿色工业革命10项计划”、以清洁能源开发利用为特点的日本《2050碳中和绿色增长战略》。

### 2.1 综合性路径——美国“清洁能源革命和环境正义”

2019年，美国现任总统拜登在竞选时提出一项1.7万亿美元的能源和环境的综合性政策计划“清洁能源革命和环境正义”，确保美国实现100%的清洁能源经济，并在2050年之前达到净零碳排放<sup>⑥</sup>。美国的“清洁能源革命和环境正义”主要包括四个方面，即行政命令/立法、减少排放、加强清洁能源的利用以及低碳技术研发（表3），并针对短期和长期提供不同的解决方案。

短期解决方案：1) 使用联邦政府的采购系统（每年花费5000亿美元）来实现100%的清洁能源和零排放车辆；2) 制定严格的新燃油经济性标准，确保100%新销售的轻型/中型车辆实现电动化。

中长期解决方案：1) 未来十年内对能源、气候的研究与创新，以及清洁能源的基础设施建设进行4000亿美元的投资，并专门设立专注于气候的跨机构高级研究机构ARPA-C；2) 加快电动车的推广，在2030年

① <https://eciu.net/netzerotracker>.

② <https://climateaction.unfccc.int/>.

③ 中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_268766.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_268766.htm).

④ 习近平总书记在联合国气候变化巴黎大会讲话. <http://cpc.people.com.cn/n/2015/1201/c64094-27874111.html>.

⑤ 习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话. [https://www.ccps.gov.cn/xsxxk/zyls/202009/t20200922\\_143558.shtml](https://www.ccps.gov.cn/xsxxk/zyls/202009/t20200922_143558.shtml).

⑥ Biden Harris. The Biden Plan for a Clean Energy Revolution and Environmental Justice. 2020. <https://joebiden.com/climate-plan/#>.

表3 美国“清洁能源革命和环境正义”计划战略行动

层面	战略行动
行政命令/立法	1) 建立执行机制以实现2050年的目标; 2) 通过永久性保护北极国家野生动物保护区, 禁止在公共土地和水域上新的石油和天然气租赁; 3) 在2050年之前实现全美国经济范围内的净零排放, 并立法要求污染者承担他们排放的碳污染的全部成本。
联邦层面	1) 对新增的和现有的石油、天然气运营要求严格的甲烷污染限值; 2) 每年花费5000亿美元来实现100%的清洁能源和零排放车辆; 3) 制定更加严格的燃油排放标准, 确保100%新销售的轻型/中型车辆实现电动化。
清洁能源利用	1) 加强环保建设和可再生能源(风电、光伏、水电等)的开发, 目标是到2030年将海上风能增加1倍; 2) 到2035年将美国建筑库存的碳足迹减少50%; 在2030年底前部署超过50万个新的公共充电站。
低碳技术研发	1) 确定了核能的未来。为了实现碳排放中和的目标, 有必要研究所有低碳和零碳相关技术; 2) 未来10年内对能源、气候的研究与创新, 以及清洁能源的基础设施建设进行4000亿美元的投资。
各级州、市政府层面	1) 新墨西哥州承诺到2030年全州温室气体排放量减少45%; 2) 科罗拉多州承诺到2040年实现100%的清洁电力, 同时签署了一项行政命令, 加大电动车的采购和推广力度, 施行更加严格的燃油排放标准; 3) 俄勒冈州议员提出了碳排放上限和交易提案, 该提案将为温室气体排放设定5200万吨*的上限; 4) 超过35个城市设定了到2050年减排80%的目标, 超过400个市长遵守了《巴黎协定》。

注: \*1公吨=1000 kg。

底之前部署超过50万个新的公共充电网点, 同时恢复全额电动汽车税收减免; 3) 制定有针对性的计划, 目标到2030年将海上风能增加一倍。

## 2.2 节能减排——欧盟《欧洲绿色协议》和英国“绿色工业革命10项计划”

节能减排是实现碳达峰碳中和最直接、最经济的手段之一。2019年欧盟委员会公布的《欧洲绿色协议》(表4)<sup>①</sup>在八大领域提出了一系列转型政策与措施, 旨在将欧盟转变为一个公平、繁荣的社会, 以及富有竞争力的资源节约型现代化经济体, 到2050年欧盟温

表4 欧盟《欧洲绿色协议》中涉及节能减排的具体政策(部分)

政策领域	具体政策与措施
推动各产业“可循环”发展	1) 提出《循环经济行动计划》, 将包括“可持续产品”政策, 着重关注纺织、建筑、电子和塑料等资源密集型行业; 2) 积极拥抱数字技术, 欧盟委员会将探索措施, 以确保数字技术最大程度地发挥应对气候变化和保护环境的积极影响。
发展高效建筑	1) 积极推进公共和私人建筑的翻新工作, 应对能效和能耗双提升的挑战; 2) 对成员国的建筑长期翻新政策进行评估; 3) 提出一项新的装修倡议, 确保翻新和新建建筑的能效达标。
加速向可持续智慧交通转变	1) 将通过一项《可持续智能交通战略》, 推动交通部门的脱碳进程; 2) 发展新型多式联运, 发挥交通运输效能, 降低能耗、减少排放; 3) 建议为内燃机车制定更严格的空气污染物排放标准。

室气体达到净零排放并且实现经济增长与资源消耗脱钩。其中, 在节能减排方面采取了主要的措施以期实现碳达峰和碳中和, 涵盖产业清洁循环经济模式发展、高效建筑、可持续智慧交通。

在产业“可循环”发展方面, 提出《循环经济行动计划》着重关注纺织、建筑、电子和塑料等资源密集型行业; 积极拥抱数字技术, 最大程度地发挥应对气候变化和保护环境的积极影响。在建筑节能方面提出一项新的装修倡议, 确保翻新和新建建筑的能效达标, 积极推进公共和私人建筑的翻新工作, 并对成员国的建筑长期翻新政策进行评估。在可持续智慧交通方面, 通过一项《可持续智能交通战略》, 推动交通部门的脱碳进程; 发展新型多式联运, 发挥交通运输效能, 降低能耗、减少排放; 建议为内燃机车制定更严格的空气污染物排放标准。

英国的绿色工业革命10项计划<sup>②</sup>, 在节能减排方面也采取了重要的措施, 在其十项计划中, 节能减排占据了四项, 包括电动汽车, 公共交通、骑行和步行, Jet Zero(喷气飞机零排放)理事会和绿色航运, 住宅和公共建筑, 旨在推动英国在2050年之前消除其导致气候变化的因素(图1)。其中, 在电动汽车领域, 将投资逾28亿英镑(约合37亿美元)。根据严格的零排放标准, 英国将从2030年开始停止售卖新的汽油和柴油汽车及货车, 比早期的计划提前了10年, 并于2035年开始停止售卖混合动力汽车, 这一举措将有助于英国工业向可持续、绿色的未来转变。

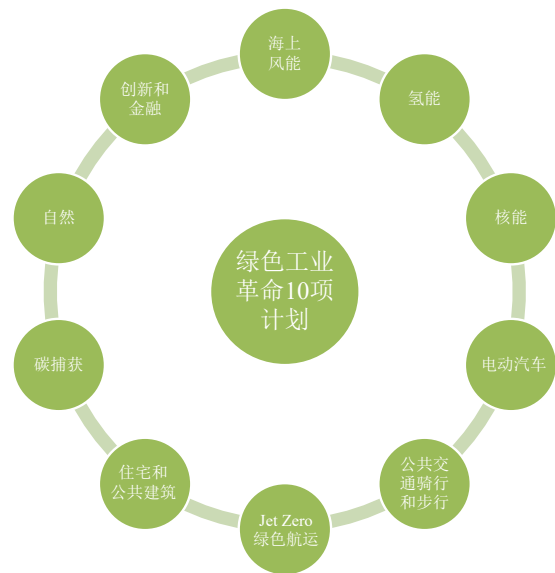


图1 英国“绿色工业革命10项计划”

① The European Green Deal. 2019. [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_en.pdf).

② The ten point plan for a green industrial revolution. 2020. <https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution>.

## 2.3 清洁能源革命——日本《2050碳中和绿色增长战略》

世界能源格局正呈清洁化、低碳化，绿色低碳是未来发展方向，能源电力碳中和也是开展碳中和工作、实现碳中和目标的必由之路。清洁能源的开发利用在各个国家实现碳达峰碳中和的技术层面上的主要方向之一。美国将加强环保建设和可再生能源（风电、光伏、水电等）的开发，目标是到2030年将海上风能增加一倍；英国政府承诺到2030年将海上风电装机容量

提高4倍至40 GW，在风力最强的海域生产1 GW的创新浮式海上风电。

2020年日本经济产业省发布了《绿色增长战略》（表5），确定了日本到2050年实现碳中和目标。2021年更新了《2050碳中和绿色增长战略》<sup>①</sup>。战略指出，需大力加快能源和工业部门的结构转型，通过调整预算、税收优惠、建立金融体系、进行监管改革、制定标准以及参与国际合作等措施，推动企业进行大胆投资和创新研发，实现产业结构和经济社会转型。

表5 日本《2050碳中和绿色增长战略》与旧版战略更新

事件	发展目标	重点任务
海上风电	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 2030年安装10 GW海上风电机组，到2040年达到30~45 GW；</li> <li>2) 2030—2035年将海上风电成本削减至8~9日元/(kW·h)；</li> <li>3) 2040年风电设备零部件的国产化率提升到60%。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 推进风电产业人才培养；</li> <li>2) 完善产业监管制度；</li> <li>3) 强化国际合作；</li> <li>4) 推进新型浮动式海上风电技术研发；</li> <li>5) 参与国际标准的制定工作；</li> <li>6) 打造完善的具备全球竞争力的本土产业链。</li> </ol>
太阳能	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 2030年太阳能光伏发电成本降至14日元/(kW·h)；</li> <li>2) 2030年家用太阳能电池安装成本需控制在7万日元/(kW·h)。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 研究钙钛矿等具有潜在应用价值的材料，开发下一代太阳能电池技术；</li> <li>2) 基于太阳能的分布式能源利用优化；</li> <li>3) 扩大太阳能电池在住宅、建筑等领域的市场化应用；</li> <li>4) 通过合理利用荒废耕地，大力强化农业太阳能发电的引进政策。</li> </ol>
地热	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 2030年实施调查井的钻井试验；</li> <li>2) 2040年验证包括涡轮等地面设备的整个发电系统；</li> <li>3) 2050年在世界上率先开展下一代地热发电技术示范。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 开展超高温、高压环境下材料抗腐蚀技术研究；</li> <li>2) 提供风险担保资金，以促进开发地热资源调查钻井技术；</li> <li>3) 促进地热能多元化利用，结合本地资源进行可持续开发。</li> </ol>
氢能	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 2050年氢能供应量达到2000万t/a；</li> <li>2) 将氢能成本降低到30日元/m<sup>3</sup>，到2050年降至20日元/m<sup>3</sup>。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 发展氢燃料电池动力汽车、船舶和飞机；</li> <li>2) 推进氢还原炼铁工艺技术开发；研发废弃塑料制氢技术；研发新型高性能低成本燃料电池技术。</li> </ol>
新一代热能产业	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 2050年将掺混90%合成甲烷的气体燃料通入供热设施，实现供热气体燃料的完全脱碳；</li> <li>2) 2050年实现年度合成甲烷2500万 t，且合成甲烷价格与当前的液化天然气价格（40~50日元/m<sup>3</sup>）相当。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 推进掺混甲烷等气体实现气体燃料脱碳化的海外供应链建设；</li> <li>2) 2021年制定包括天然气在内的各个领域路线图；</li> <li>3) 提供设备维护等综合服务和脱碳解决方案；</li> <li>4) 推进氢能直接利用，以及碳捕集与利用等技术的应用。</li> </ol>

新版战略主要将旧版中的海上风电产业扩展为海上风电、太阳能、地热产业；将氢燃料产业和氢能产业合并；并新增了新一代热能产业。其中，在海上风电方面，一方面扩大容量，2030年安装10 GW海上风电机组，到2040年达到30~45 GW；另一方面消减成本，将海上风电成本削减至8~9日元/(kW·h)；此外，提升风电设备零部件国产化率至60%，打造完善的具备全球竞争力的本土产业链。

地热和新一代热能产业是日本清洁能源开发利用中的亮点。地热方面，2030年实施调查井的钻井试验，在世界上率先开展下一代地热发电技术示范。新一代热能产业，至2050年将掺混90%合成甲烷的气体燃料通入供热设施，实现供热气体燃料的完全脱碳。

## 3 中国碳达峰碳中和路径

### 3.1 中国碳达峰碳中和路径选择

2020年9月，中国在第75届联合国大会一般性辩论上提出CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和，并于2020年气候雄心峰会上

宣布：2030年单位GDP碳排放强度比2005年下降65%以上，非化石能源占一次能源消费比重达到25%，森林蓄积量比2005年增加60×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>，风电、太阳能发电总装机容量达到12×10<sup>8</sup> kW以上。但是目前中国能源强度依然是世界平均水平的1.3倍，距离2030年实现碳达峰仅剩不到10年的时间。因此，选择何种路径实现碳达峰、力争碳中和显得尤为重要。

首先，减少化石能源占比、提高能源使用率能够最小化碳减排造成的环境损失，从而摆脱“碳锁定”，这是尽早实现碳中和的关键。在经济高速增长转向高质量发展的新时代，中国已经走上了“碳锁定—碳脱钩—碳达峰—碳中和”的低碳发展快车道；作为碳排放的核心源头，能源结构优化、能源转型与能源价格改革位居实现“双碳”目标的关键地位。碳达峰、碳中和的实现可以从提高CO<sub>2</sub>所引起的产出效率来相对降低CO<sub>2</sub>的排放量。全球碳生产率的提升主要来源于技术进步，按照国家碳生产率的增长情况进一步分类发现，经济发展水平与研发效率越高的国家能够表现出更强的碳生产率，能源强度与外贸依赖度越高则碳

① 2050 Carbon Neutral Green Growth Strategy. 2021.

生产率增长效应越弱。

其次，实现“双碳”目标，必须优化能源结构。“十四五”期间，能源行业要走高质量发展的方向，要以较低的能源弹性系数（小于0.4%）满足能源消费2%的增速，需主要依靠“非化石能源+天然气”。另一方面，风能、太阳能等可再生能源将成为“十四五”期间能源增量主体，煤炭消耗不再增长，率先实现“煤达峰”，甚至“煤过峰”。可再生能源将变得举足轻重，从“补充能源”逐步发展为“主流能源”。

最后，碳中和目标倒逼碳达峰水平和排放路径，对我国低碳/脱碳科技创新提出了新要求。碳中和目标的实现要求2030年前达峰的峰值不超130亿t，电力和工业部门必须率先达峰。要确保2060年前碳中和目标的实现，应在2030年前实现能源活动CO<sub>2</sub>达峰且峰值水平控制在105亿t以内。根据已有研究测算，2035年能源活动碳排放需要控制在70亿~90亿t。若“十四五”碳强度下降18%，则“十五五”和“十六五”

期间的碳强度下降幅度需高达25%~35%。碳中和目标要求中国在2035年后实现深度减排，需要提前做好低碳/脱碳新技术储备。

柴麒敏等基于国家自主贡献评估模型，对既有政策、国家适当减缓行动和国家自主贡献三类情景下十五类政策和行动进行了分类研究，发现中国在“十三五”时期所采取的政策措施力度，仅能保障实现到2030年单位GDP碳排放相比于2005年下降60%~65%的目标，但CO<sub>2</sub>排放总量仍将保持缓速上升，能否实现峰值目标仍存在不确定性，且非化石能源占一次能源消费的比重也仅能达到18%左右，并不足以完全支撑自主贡献目标的实现，实现的路径应从当前“强度主导型”的政策体系过渡到“峰值引领型”的碳排放总量管理制度体系。实现国家自主贡献目标的主要领域有：1) 转变经济增长模式和经济结构调整；2) 工业技术升级和能效提高；3) 低碳建筑；4) 低碳交通；5) 优化能源结构（图2）。

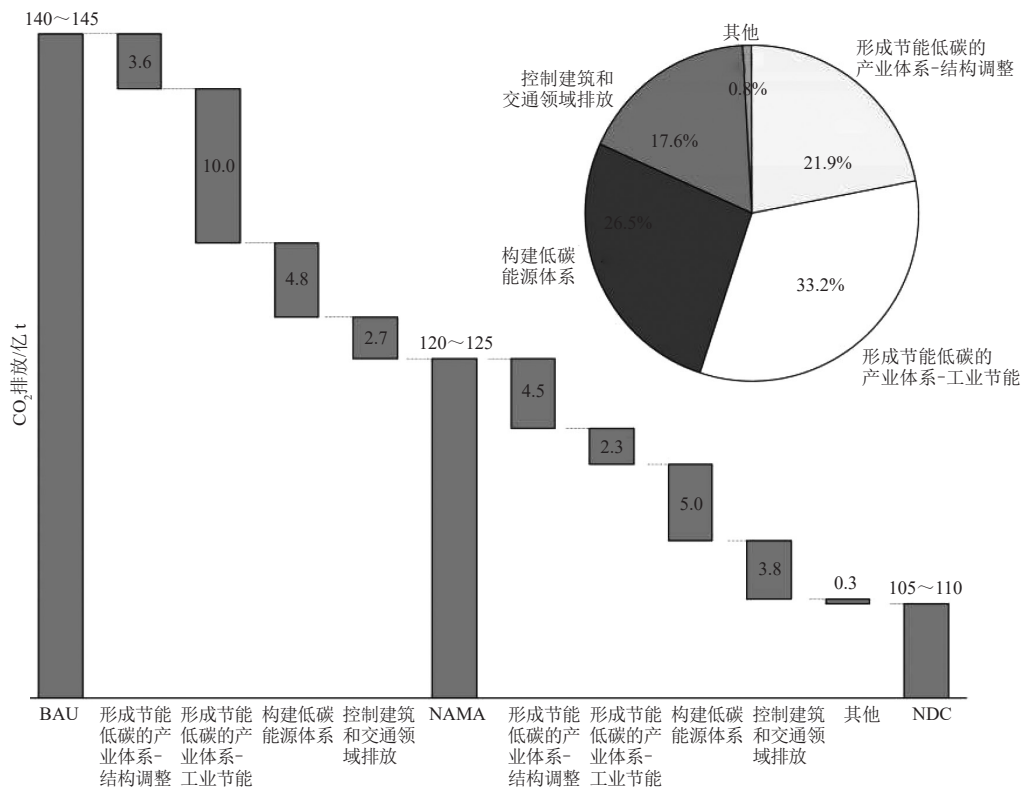


图2 各重点领域在实现2030年国家自主贡献目标中的贡献值

### 3.2 中国碳达峰碳中和方案与启示

2020年12月16—18日，习总书记在中央经济工作会议上发表重要讲话，首次将“碳达峰、碳中和”列入重点任务。会议要求做好碳达峰、碳中和工作。我国CO<sub>2</sub>排放力争2030年前达到峰值，力争2060年前实现碳中和。要抓紧制定2030年前碳排放达峰行动方案，

支持有条件的地方率先达峰。要加快调整优化产业结构、能源结构，推动煤炭消费尽早达峰，大力发展新能源，加快建设全国用能权、碳排放权交易市场，完善能源消费双控制度。要继续打好污染防治攻坚战，实现减污降碳协同效应。要开展大规模国土绿化行动，提升生态系统碳汇能力。

表6 中国各主要省(市)碳达峰、碳中和行动

省(市)	碳达峰/碳中和目标	行动
北京	2012/2050	1) “人文北京、科技北京、绿色北京”的发展战略; 2) “碳中和行动纲要”已趋成熟,即将出台; 3) 终端能源“电气化”和电力供应“脱碳化”; 4) 持续推进机动车“油换电”; 5) 2050年,城市交通实现近零排放,建筑领域基本实现近零排放。
上海	2025/2060	1) 继续推进能源清洁高效利用,研究推进吴泾煤电等容量异地替代,推动宝钢和上海石化自备电厂实施清洁化改造; 2) 2025年煤炭消费总量控制在4300万t左右,煤炭消费总量占一次能源消费比重下降到30%左右,天然气占一次能源消费比重提高到17%左右; 3) 分行业、分领域实施光伏专项工程,稳步推进海上风电开发,到2025年本地可再生能源占全社会用电量比重提高到8%左右; 4) 推行能效对标达标行动,推动主要耗能产品和主要行业能效水平达到国际和国内先进水平; 5) 不断提升建筑能效等级,推广绿色建筑设计标准。
江苏	力争提前达峰/2060	1) 2021年全省碳排放强度下降4.2%; 2) 开展碳排放与环评管理的统筹融合试点,将碳评纳入环评,严控新上高能耗、高污染项目; 3) 协同推进减碳与大气污染防治,推进13个设区市城区基本建成“无散煤区”; 4) 大力发展非化石能源,积极开发分布式太阳能发电和分散式风电; 5) 2021年,全省风电装机增加400万kW,光伏装机增加300万kW; 6) 开展“绿屋顶”“绿车轮”研究。
浙江	2030/2060	1) 推进零碳电力技术创新。到2025年,力争度电CO <sub>2</sub> 排放下降5%,实现百MW级电化学储能技术应用。 2) 推动零碳非电能源技术发展。到2025年,力争建成单套液化能力≥5 t/d氢液化系统,完成MW级掺氢工业燃气轮机样机制造,实现百kW级固体氧化物燃料电池系统长期运行。 3) 推进零碳流程重塑。着力强化低碳燃料与原料替代、过程智能调控、余热余能高效利用等研究,持续挖掘节能减排潜力,加快推进行业绿色转型。 4) 低碳技术集成与优化。着力发展装配式建筑、交通低碳燃料替代、智能交通、综合能源、碳标签认证等关键技术,协同发展非CO <sub>2</sub> 温室气体减排技术,推进全社会节能减排。 5) 超前部署CCUS技术。到2025年,力争实现CO <sub>2</sub> 捕集率≥90%,CO <sub>2</sub> 转化利用率≥90%,碳捕集能耗下降35%以上。

“十四五”是碳达峰的关键期、窗口期。2021年3月11日十三届全国人大四次会议表决通过了关于《国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》<sup>①</sup>的决议,为中国碳达峰的实现指明了方向。“十四五”期间,国土空间开发保护格局得到优化,生产生活方式绿色转型成效显著,能源资源配置更加合理、利用效率大幅提高,单位国内生产总值能源消耗和CO<sub>2</sub>排放分别降低13.5%、18%,主要污染物排放总量持续减少,森林覆盖率提高到24.1%,生态环境持续改善,生态安全屏障更加牢固,城乡人居环境明显改善。

在“双碳”目标指引下,中国各省(区、市)根据实际情况,研究确定各自达峰方案、达峰重点和实施路径,实现差别化和包容式低碳转型(表6)。以举办2008年奥运会为契机,北京形成了“人文北京、科技北京、绿色北京”的发展战略,并于2012年达到了碳排放峰值年<sup>②</sup>;上海市发布了《上海市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》<sup>③④</sup>,制定全市碳排放达峰行动方案,确保在2025年

前实现碳排放达峰,相比于全国提前5年;江苏省印发的《江苏省生态环境厅2021年推动碳达峰碳中和工作计划》<sup>⑤</sup>提出,构建“1+1+6+9+13+3”碳达峰行动体系,力争提前达峰;浙江省发布了国内首个省级碳达峰碳中和行动方案《浙江省碳达峰碳中和科技创新行动方案》<sup>⑥</sup>,依据“4+6+1”总体思路,提出了具体的技术路线图和行动计划。

与国际上各发达国家类似,节能提效减排和清洁能源的开发利用是各省(区、市)碳达峰方案的重中之重。节能提效减排方面,北京将在未来逐步实现终端能源“电气化”和电力供应“脱碳化”,持续推进机动车“油换电”,到2050年,城市交通实现近零排放,建筑领域基本实现近零排放。上海实施能源消费总量和强度双控,着力推动电力、钢铁、化工等重点领域和重点用能单位节能降碳,推行能效对标达标行动,推动主要耗能产品和主要行业能效水平达到国际和国内先进水平;同时不断提升建筑能效等级,推广绿色建筑标准。江苏开展碳排放与环评管理的统筹融合试点,将碳评纳入环评,严控新上高能耗、高污染

① 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要. 2021.  
 ② 北京:碳达峰顺利完成,碳中和目标明确. 人民日报, 2021-6-15.  
 ③ 上海市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要. 上海市人民政府, 2021. <https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20210129/ced9958c16294feab926754394d9db91.html>.  
 ④ 上海市生态环境保护“十四五”规划. 上海市人民政府, 2021. <https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20210818/fc1556f37984428a856b523aba5b6f21.html>.  
 ⑤ 省生态环境厅2021年推动碳达峰、碳中和和工作计划. 江苏省生态环境厅. 2021. <http://hbt.jiangsu.gov.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&filename=19825f757668454d8f165c4222179a3b.pdf>.  
 ⑥ 浙江省碳达峰碳中和科技创新行动方案. 浙江省委科技强省建设领导小组. 2021.

项目,协同推进减碳与大气污染防治;推进13个设区市城区基本建成“无散煤区”。浙江致力于低碳技术创新与研究,推进零碳电力技术创新、零碳非电能源技术发展、零碳流程重塑等。在清洁能源的开发利用方面,上海将优化调整能源消费结构,煤炭消费总量占一次能源消费比重下降到30%左右,天然气占一次能源消费比重提高到17%左右;分行业、分领域实施光伏专项工程,稳步推进海上风电开发,到2025年本地可再生能源占全社会用电量比重提高到8%左右。江苏和浙江也将大力发展非化石能源,积极开发分布式太阳能发电和分散式风电。

结合上述国内外碳达峰、碳中和路径和方案,气象行业在服务国家、地方“双碳”目标的实现,发挥防灾减灾第一道防线方面能够发挥重要的作用。1)构建精细化的“碳”监测网络,开展溯源研究。通过观测站点、碳卫星、气球、飞机以及地面机动车等多种监测手段,编织“天-地-空”多维度高密度观测网络,开展CO<sub>2</sub>精细化监测,并开展溯源研究;2)强化大气环境监测与研究,推动减污降碳协同增效。温室气体与大气污染物具有同根同源、同时排放的特点,强化大气环境监测与研究,能够有效助力能源清洁低碳转型、推进清洁生产和能源资源节约高效利用,实现减污降碳协同增效;3)开展科技创新,提供清洁能源开发利用的一体化解决方案。创新区域气候模式乃至城市尺度模式,实现气候尺度的网格化监测,提高天气-延伸期-气候尺度精准预测水平,为风能、太阳能、天然气等清洁能源的资源评估、选址、建设、调度等全环节提供一体化解决方案;4)加强气候灾害风险管理。即使人类在控制温升方面不断做出努力,但未来气候系统变化造成的影响和风险仍将进一步加剧。随着各类提效减排措施采取和重大工程的建设,高温、干旱、内涝、海平面上升、台风等极端天气气候事件造成的影响也随之增大。因而,尽管长期地、根本地解决应对气候变化的问题要靠减缓,但加强气候变化灾害风险管理,提升适应气候变化能力仍然是必不可少的并且是解决眼前问题的措施。

## 4 结语

2030碳达峰目标和2060碳中和愿景是中国向世界做出的庄严承诺。中国实现“双碳”目标面临着巨大的挑战,必须探索适用于中国特色的实现路径。其中,转变经济增长模式和经济结构调整、工业技术升级和能效提高、低碳建筑、低碳交通等实现节能提效减排,以及加强清洁能源开发利用,优化能源结构是实现国家自主贡献目标的主要领域。目前,多个省(区、市)正在加紧编制碳排放达峰行动相关方案和路线图,各地在经济模式、碳排放总量、结构、行动进展和趋势上均存在差异,需要因地制宜,发挥各自资源环境优势,研究确定各自达峰方案、达峰重点和实施路径,实现差别化和包容式低碳转型。与“双碳”息息相关的气象行业在“碳”监测溯源、减污降碳协同增效、清洁能源的开发利用以及灾害风险管理方面能够发挥重要的作用,充分发挥防灾减灾第一道防线,服务国家、地方“双碳”目标的实现。

### 深入阅读

- 柴麒敏,傅莎,温新元,2019.中国实施国家自主贡献的路径研究.环境经济研究,(2):110-124.
- 陈迎,巢清尘,黄磊,2021.碳达峰碳中和100问.北京:人民日报出版社:88.
- 巢清尘,2021.“碳达峰和碳中和”的科学内涵及我国的政策措施.环境与可持续发展,(2):14-19.
- 丛建辉,王晓培,刘婷,等,2018.CO<sub>2</sub>排放峰值问题探究:国别比较、历史经验与研究进展.资源开发与市场,(6):774-780.
- 李少林,杨文彤,2022.碳达峰、碳中和理论研究新进展与推进路径探索.东北财经大学学报,(2):17-28.
- 王永中,2021.碳达峰、碳中和目标与中国的新能源革命.人民论坛·学术前沿,(14):88-96.
- 张亮,2021.全球各地区和国家碳达峰、碳中和实现路径及其对标准的需求分析.电器工业,(8):64-67.
- 张中祥,2021.碳达峰、碳中和目标下的中国与世界——绿色低碳转型、绿色金融、碳市场与碳边境调节机制.人民论坛·学术前沿,(14):11.
- Bai C, Du K, Yu Y, et al, 2019. Understanding the trend of total factor carbon productivity in the world: insights from convergence analysis. Energy Economics, 81: 698-708.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press.

(作者单位:上海市气候中心,中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室)

# 清代旱涝灾害奏报刍议

■ 万金红 孙大兵 张蓀蔚

作为一个传统的农业国家，我国历代中央政权十分注重收集各地旱涝灾害信息。迅捷、准确、有效的灾害信息传递对于历代中央政府和地方政府开展灾后社会救济与生产恢复十分必要。清政府十分重视各地灾情信息的奏报，并在报灾的时限、灾情信息的校核等方面做了具体的规定。从清代灾害信息奏报制度的确立、灾害奏折的形式、奏报的内容，以及奏报人员的身份等方面阐述清代旱涝灾害的奏报制度，以期当前清代旱涝灾害史研究提供借鉴。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.012

作为一个传统的农业国家，降水的多寡直接影响到区域农业收成丰欠、社会经济发展，乃至国家政权的稳定。同样，作为一个旱涝灾害频发的国家，我国历代中央政权也十分关注各地旱涝灾害情况，迅捷、准确、有效的灾害信息传递对中央政府和地方政府开展灾后社会救济与生产恢复是十分必要的，因此一整套系统的从地方到中央的灾害信息报告制度便孕育产生，并逐渐完善。

灾情信息的向上传递被历朝中央政府所关注。秦代我国就已经建立起明确的灾害信息上报制度。如在秦简《秦律·田律》中就有“早及暴风雨、水潦、螽、群它物伤稼者，亦辄言其顷数。近县令轻足行其书，远县令邮行之，尽八月□□之”的记载。这一制度经汉唐、宋元历代政权的不断发展而逐渐完备。《中国古代报灾检灾制度述论》一文对这一发展历程进行了系统、细致的整理分析。到了明代，这一制度变得更加系统且完善。明太祖朱元璋定都南京后，便下诏书说“祖宗令天下奏雨泽，欲知水旱，以施恤民之政。……自今奏至即以闻<sup>①</sup>”，并确立灾害奏报制度，统一地方奏报旱涝方式。关于如何报灾，明太祖朱元璋定都南京后便下诏规定，“今岁水旱去处，所在官司，不拘时限，从实踏勘实灾，租税即与蠲免<sup>②</sup>”。到了弘治年间（1488—1505）中央政府对灾害的奏报时

限做了进一步精细化处理，即“夏灾不得过五月终，秋灾不得过九月终<sup>③</sup>”。到了万历（1573—1620）时期，考虑到国家幅员辽阔，对于重要经济区和偏远地区报灾的时限进行必要的区分，于是指出“近地五月七月，边地七月九月<sup>④</sup>”。可以说，到了明代之后我国的灾害奏报制度变得更加系统化、规范化和制度化。

## 1 清代灾害奏报制度

与前朝相比，清政府更加重视灾害信息的向上传递。如康熙皇帝十分关注地方水雨情、灾情和粮食收成信息。康熙十二年，康熙皇帝对户部右侍郎马绍曾的面谕说道“尔等回时直隶地方曾有雨泽否？麦苗何如？”<sup>⑤</sup>。同时，康熙皇帝也要求，即使是十分偏远的地方，也应该核实上报这些雨情、水情和灾情信息。在其晚年时候还曾指出：“朕临御多年，无时不矜念民瘼。每岁于直隶各省，凡雨暘期候、丰歉情形，莫不留心访察。虽在僻远，必务周知<sup>⑥</sup>”。到了雍正朝，作为一个勤勉的皇帝，雍正皇帝也说道：“朕抚育烝黎，务期休养宽裕，俾咸臻安阜，故于各省雨暘节候，时时咨访体察，无刻少释于怀。”<sup>⑦</sup>

在继承前朝的灾害奏报制度上，清政府也逐渐确定了报灾、勘灾和赈灾的灾害奏报与救荒制度。比如，顺治朝时就曾对报灾的时限进行规定，“夏灾限六

收稿日期：2021年9月17日；修回日期：2021年11月30日

第一作者：万金红（1980—），Email: roaringwan@sina.com

资助信息：国家重点研发计划项目（2018YFA0605603）

① 《大诰》第二十《雨泽奏启本》，《续修四库全书》第862册，上海：上海古籍出版社，1996。

② [明]徐光启，《农政全书校注》卷44《备荒考中》。

③ 《明史》卷78《食货志二》。

④ 《明史》卷78《食货志二》。

⑤ 邹爱莲：《清代起居注册·康熙朝》，上海：中华书局，2009：584。

⑥ 《清圣祖实录》卷261，康熙五十三年十一月。

⑦ 《清世宗实录》卷31，雍正三年四月。

月终，秋灾限九月终<sup>①</sup>”，如果逾期一月内抚道官员罚奉一月；如果超过一个月，则官职降一级；如果延迟的时间十分长的话，则可能被直接免职。乾隆皇帝更是明确了需要进行灾情的奏报和申请蠲缓的灾害等级和受灾程度，“各省地方，偶有水旱。朕查蠲免钱粮旧例，被灾十分者，免钱粮十分之三；八分七分者，免十分之二；六分者，免十分之一。雍正年间，我皇考特降谕旨，凡被灾十分者，免钱粮十分之七；九分者，免十分之六；八分者，免十分之四；七分者，免十分之二；六分者，免十分之一。实爱养黎元，轸恤民隐之至意也。朕思田禾被灾五分，则收成仅得其半。输将国赋，未免艰难。所当推广皇仁，使被灾较轻之地亩，亦得均沾恩泽者。嗣后著将被灾五分之处，亦准报灾。地方官查勘明确。蠲免钱粮十分之一。永著为例。”<sup>②</sup>由此可见，在康雍时期，农作物受灾六分时，地方政府才可以上报朝廷并申请减免税负，到了乾隆朝便定下规矩，受灾五分就应该启动报灾程序，并可以酌情申请减免税负。到了清代中期以后，政府的报灾、勘灾、救灾工作便相对固定下来。嘉庆十一年，江苏巡抚汪志伊在《荒政辑要》<sup>③</sup>对清代灾害的报灾、勘灾、蠲缓等进行了详细记述，如针对报灾的时限，规定如下：“一地方遇有灾伤，该督抚先将被灾情形、日期飞章题报。夏灾限六月终旬，秋灾限九月终旬（甘肃省地气较迟，夏灾不出七月半，秋灾不出十月半）。题后续被灾伤，一例速奏。凡州县报灾到省，准其扣除程限，督抚司道府官，以州县报到日为始，迅速详题。若迟延半月以内，递至三月以外者，按月日分别议处，上司属员一例处分，隐匿者严加议处。”到了清末对于报灾延迟的规定更加细致，处罚的力度更加严厉。根据光绪朝修订的《大清会典事例》中对报灾延迟时限处罚程度的记载可知，“州县官逾限半个月以内者罚俸六个月，一个月以内者罚俸一年，一个月以外者降一级，两个月以外者降二级，三个月以外者革职。”<sup>④</sup>

为了防止大臣在报送灾情信息过程中存在虚假报送的情况，清政府还建立了多源信息校核制度，如某地的灾害信息与前期的雨雪分寸信息相互验证、本省官员的报送信息与途经该省其他官员的报送信息相校核等。比如，嘉庆二十四年七月初七日江苏布政使杨懋恬的奏折中称，“臣归途经过地方，访察田禾雨水情形，山东兖州、江苏徐州、淮安等属，夏雨沾足，禾

稼茂盛。次及扬州、镇江、常州各属得雨次数多寡不齐，所见近河田亩禾苗俱极畅茂。苏州省城一带，因兼旬未得透雨，望泽较殷。”<sup>⑤</sup>可见，该奏折直接说明杨懋恬在返回江苏任上时，便开始留心沿途的雨水情形，关心各地是否因降雨的多寡而成灾。这样的信息就会在一定程度上校验地方官上报的灾情信息。同期，嘉庆二十四年七月十六日江苏巡抚陈桂生的奏折中称，“江苏省五月中下二旬及六月上旬雨泽频沾，禾苗畅发情形，经臣恭折奏报在案。兹据各府厅州县禀报，六月中下两旬及七月上旬，先后得雨两三次，每次有一二三四寸不等。在田早禾渐次秀实，中禾扬花擢秀，晚禾亦俱长发。惟节次雨势于淮、徐一带较大，大江以南苏、常各府属，自六月中旬以后晴霁日多，间得阵雨不成分寸。飭查各乡近水田亩俱可车庠以资灌溉，高阜之区尚须雨泽滋培。其江宁府属之句容、扬州府属之泰州、兴化、东台，镇江府属之丹阳、金坛等州县近山田亩得雨未能透足。”<sup>⑥</sup>通过上述两件奏折比较，发现杨懋恬和陈桂生对同一时间内江苏省内雨水情信息的报送基本保持一致。由此可见，清代的灾害奏报制度能够确保不同官员间的奏折可以相互校核，在一定程度上可以有效地避免官员谎报灾情。

## 2 奏折的形式与内容

### 2.1 奏折的形式

作为清代独有的官方文书形式，奏折在不同时期的样式也略有不同（图1），但其始终沿袭着特定的格式规定（图2）。一般来说，奏折从首页开始自右向左逐竖行书写，每行十八字。右侧第一竖行自下起要写明某地某官和具体的奏报人臣某某奏（如，直隶总督臣李鸿章 谨奏）；第二竖行奏为某某事（如奏为平巢仓谷恭恳；奏为瑞雪应时恭折驰报仰祈）；第三行开始写具体的奏报事宜，这一行往往采用上提一格或两个格乃至三格写“圣鉴”“圣恩”等语；奏报的具体内容写完，一般条件下还会留三竖行分别写“奏伏乞”“皇上圣鉴训示谨”“奏”等词句，然后留白若干便于皇帝批示，最左侧一竖行一般为年月日（如乾隆二十年四月十一日）。为了更直观表现灾害奏折的具体形式，此处将其奏折实例、文本格式均列于下。

由于奏折篇幅的限制，正文内容往往是一些有

① 《清世祖实录》卷79，顺治十年十一月。

② 《清高宗实录》卷68，乾隆三年五月。

③ [清]汪志伊，《荒政辑要》卷4则例。

④ 《光绪》《大清会典事例》卷288，户部·蠲恤。

⑤ 嘉庆二十四年七月初七日江苏布政使杨懋恬片。

⑥ 嘉庆二十四年七月十六日江苏巡抚陈桂生奏。

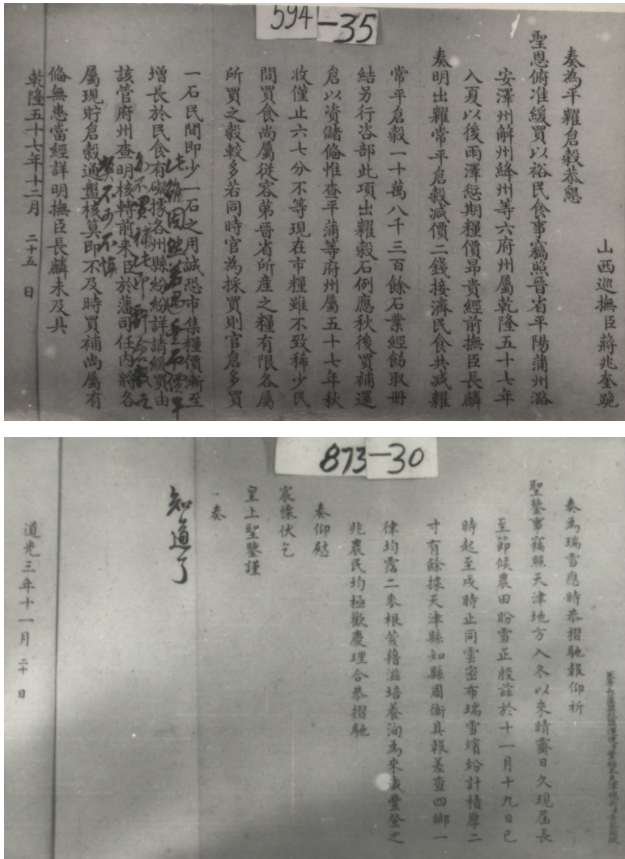


图1 不同时期奏折文本格式示例 (上方为乾隆朝、下方为道光朝奏折影印件)



图2 奏折的文本形式

关灾害全局性的、定性的描述，对于辖区内详细的灾情信息往往不能够悉数记录。这样一来，奏折往往会将具体的灾情信息通过清单的形式表现出来。一般情况，会在奏折的最后写道“后附清单”。在清单第一竖行会写道“谨将……清单恭呈”等语。比如，道光十五年，江西地方夏伏旱相对严重，自农历五月

二十五日以后，得雨稀少。江西省南昌府、袁州府、临江府、吉安府、抚州府、饶州府、九江府等地出现了干旱灾害情况。同年十月，江西巡抚周之琦在晚稻收获后，详加核对了以上各府受灾区域的粮食收获情况，在奏折后面将江西省道光十五年各府晚稻收成成分数开具清单<sup>①</sup>：

……

九江府属德化、湖口二县俱六分，德安、瑞昌、彭泽三县俱五分有余。合计府属收成五分有余。

南安府属大庾、南康、上犹、崇义四县俱七分。合计府属收成共有七分。

赣州府属定南、兴国、龙南、安远四县俱八分，赣县、雩都、信丰、长宁四县俱七分，会昌县六分。合计府属收成七分有余。

宁都直隶州属宁都、瑞金、石城三州县俱七分。合计府属收成共有七分。

通省牵算收成实共六分有余。

从这一份清单中，可以看到周之琦详查了江西省各府县详细的收成情况，并按照府级单元（“合计府属收成共有七分”）和省级单元（“通省牵算<sup>②</sup>收成实共六分有余”）进行了粮食收成的综合统计。这一信息可以清晰直观地让清廷了解旱灾发生后江西省的整体情况，为清廷后续制定救灾政策提供详实的数据基础。

由于奏折具有一事一议的特点，如果想要报告更多的事情，除了撰写奏折、另附清单外，附上一个简短的夹片也是常见的手段。因此，奏折中往往带有一些夹片（图3），或称附片、片奏。一个奏折，一般可带二三个夹片，多的达五六个。一般来说，附片是用来奏报无法用正式奏折奏报的事情，通常没有封面、事由、奏报人员信息、奏报日期等，仅以“再”开头直述其事。因此，奏折的附片是一种附属于正式奏折的夹片，只能与正折一并传递和处理。

通过对现存的2400余件旱灾奏折整理发现，清代有关旱灾的附片至少有203件（图4）。从时间角度上看，18世纪旱灾附片总量为14件，19世纪旱灾附片总量161件，20世纪初的旱灾附片总量27件。一些典型旱灾年份的附片数量明显增加，比如光绪初年的严重旱灾是共有82件附片奏报地方的干旱灾害，其中1876年32件、1877年28件，1878年22件；另外一些小范围的干旱灾害过程中附片数量也比较多，这一般集中在经济相对发达省份，如1813—1814年间长江流域及晋陕地区出现较为严重的旱荒灾害，在1814年间6件附

① 道光十五年十月二十八日江西巡抚周之琦奏附清单。

② 牵算，指计算平均值。

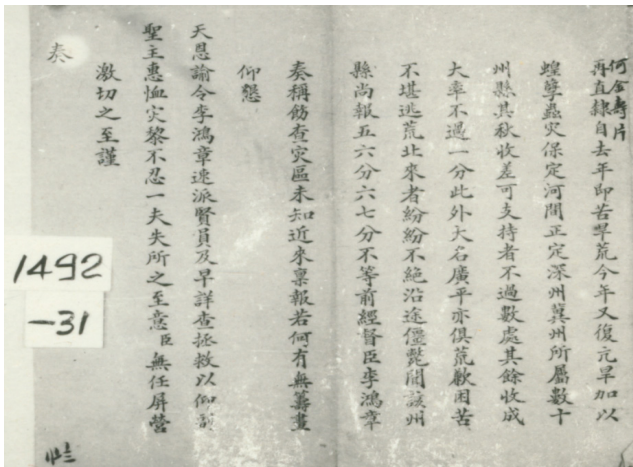


图3 奏折夹片示例

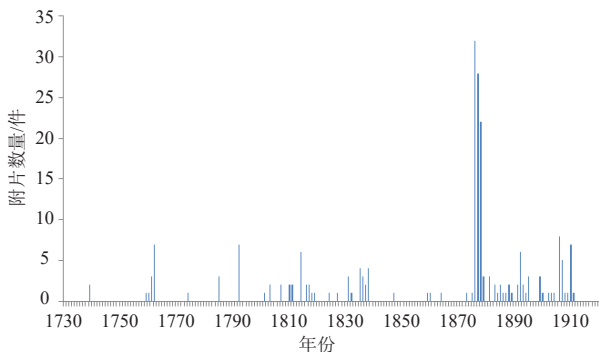
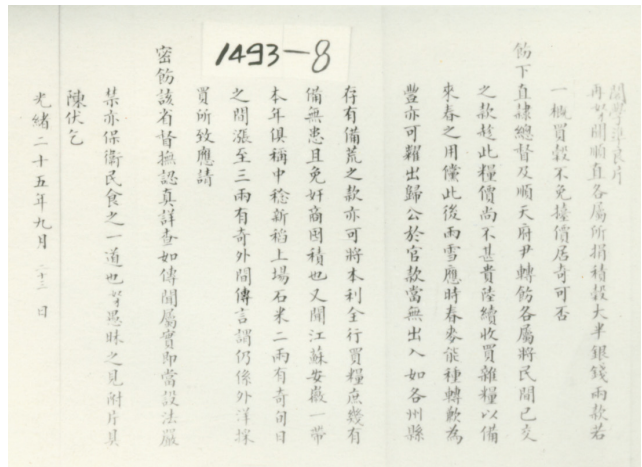


图4 旱灾奏折资料中附片的时间分布情况

片记述干旱灾害，其中两江总督百龄（2件）、安徽巡抚胡克家（1件）、江西巡抚阮元（1件）、陕西巡抚朱勋（2件）。从空间分布上看，黄淮海平原地区的奏折中干旱灾害的附片比较多（表1）。一方面这一地区是传统的农业区，主要靠雨养和引河（或井灌灌溉）为主，天气干旱造成雨水不足或河道来水不足极易给农业生产带来不利影响。另一方面，江苏、直隶等省在当时或是经济中心或是政治中心，社会治理纷繁复杂，在一定程度上造成旱灾情形往往通过附片的形式向上传递。

表1 各地旱灾奏折中附片情况

地区	江苏	直隶	山东	山西	云南	安徽	河南	陕西	江西	黑龙江	甘肃
频次	29	24	22	22	20	17	17	9	7	6	5
地区	湖南	四川	蒙古	贵州	辽宁	新疆	广西	湖北	吉林	台湾	浙江
频次	5	5	4	2	2	2	1	1	1	1	1

## 2.2 奏报的内容

灾害奏报与一般的奏报在文本形式上没有什么差

- ① 乾隆五十九年八月初十日直隶总督梁肯堂奏。
- ② 道光二年九月二十六日浙江巡抚承瀛奏。
- ③ 乾隆十二年九月十五日盛京驻防大臣富俊等奏。
- ④ 光绪二年五月十一日山西巡抚鲍源深附片。

异，仅是在内容上侧重灾害信息，其核心要素大致包括三点：其一是灾害本身的情况，这包括降雨情况，如降水范围、降水量等；河流水文情况，如“河竭”等；其二是因灾害造成的直接或间接影响，如对农作物的长势、收成的影响，对社会经济系统中渴水人数、粮价波动、流民的影响；其三是灾害赈济的情况，如粟兑米粮、设立粥场等。这些奏报内容既有定量的数据统计，也有定性分析。

### 1) 雨雪情信息

雨情信息包括降雨范围、降雨量等，此外降雪也是重要的雨情信息。就降雨范围而言，或以省为单位，“本年直属地方，自春徂夏雨泽愆期<sup>①</sup>”；或以府为单位，“浙江省杭嘉湖三府属本年夏秋之间雨泽稀少，所有嘉兴府属之海盐县、湖州府属之长兴县得雨未能充足<sup>②</sup>”；或以州县为单位，“本年八月十三、十五等日，节经宁远等四州县旗民地方官禀报，据所属各屯乡保等呈称，今岁雨泽愆期，该处田苗自春徂夏未沾溼泽<sup>③</sup>”。

就降雨量而言，或以得雨寸数描述降雨量大小，如“二十四日丑刻密雨至酉刻方止，入土四寸有余。其平阳以南之绛州、解州、蒲州各府州，以北之霍州、汾州、太原暨平定各府所属地方，均报得雨或三四五寸不等，虽未深透，于麦苗多有裨益。<sup>④</sup>”或以降雨的入土寸数描述雨量大小，如“据兰州府属禀报，省成已于五月二十九、三十及六月初一等日得雨，然止近城一带幸获深透。其余各乡及狄道州、沙泥州判等处仅得雨一二三寸不等。其巩昌府属惟洮州厅、陇西县得雨深透。平凉府属惟盐茶厅

得雨深透。平凉县虽于六月十二日得雨一寸，然烈日曝晒旋即干燥，其余庆阳府、泾州、階州等属全未得有透雨。<sup>①</sup>此外，还有用“沾足”（“查明泾阳等十三州县，因春间雨泽未能沾足，二麦半多黄萎<sup>②</sup>”）“渗透”（“……八十五斤州县陆续禀报，自五月二十二三四五八九三十日及六月初一二三等日得雨自一二三四寸至深透不等，其余新郑等二十三州县尚未据报到。<sup>③</sup>”）等词描述降雨量的多寡。另外，降水是否“沾足”还是衡量旱后农作物能否恢复的指标，“若雨水沾足，尚有收成。再，雨水沾足之大麦、小麦，长势皆好。秋禾尚未种，若雨水沾足，即可耕种。<sup>④</sup>”

就降雪而言，多以积雪的厚度表示，如“河南省城于十一月初一日申时得雪起至亥时止，除融化入土外，积厚二寸。<sup>⑤</sup>”“山西省去冬雪未能沾足，虽入春来接续得雪，省南一带均未能深透，麦田稍欠滋培，且正当播种秋禾之时，农民望泽甚殷。<sup>⑥</sup>”降水量大小描述的多样性，一方面反映奏报传递了较为全面和系统的降雨信息，另一方面也体现了清代灾害奏报制度的灵活性与实用性。

## 2) 水情信息

奏折中的水情信息主要是河湖的水位或者水量。就水位变化而言，河道浅涩行船困难是重要的水位变化描述，“因六七月间干旱日久，农田车戽灌溉，腹里支河在在浅涩，米粮重载难行。<sup>⑦</sup>”“九月初一日，据浙江提督钟世臣，宁台道陈守廉等来文内称，宁波地方秋雨不足，村民纷纷抽河水灌溉，致水位甚浅，临村之米不能运至，平时一两银买得之米如今已需一两四五钱矣。<sup>⑧</sup>”就水量而言，塘堰干涸水竭是典型的水量减少叙述，如“至庐州府所属五州县六月以来，竟未得雨，故致堰塘干涸无水戽救，早禾渐形黄萎。而合肥、庐江、巢县为尤甚。<sup>⑨</sup>”

## 3) 农作物受灾信息

降雨的多寡直接关系到农作物的长势和收成。降水的不足直接会造成农作物枯萎、籽实饱满程度差的现象。如，“勘得安乡县围城等官垸高田七处，屈家垸

等民垸高田三处、葛公垸等高田三处，早稻灌荫不及结穗已成空谷，难望复苏。实惠等官垸高田八处、石圭山等民垸高田二十处，大觉湖等高田四十四处、陶家汉等高田十三处，禾苗枯萎，即得透雨收成甚歉。又，勘得巴陵县西乡二十、二十一各都地方高阜禾稻间有黄萎，幸续得雨泽已转青色，且有长发稻孙。至岳州、武左二卫坐落该县被旱屯田与民田情形相同。<sup>⑩</sup>禾苗枯萎与籽实的欠饱满直接导致夏收（秋收）时农作物的歉收，如雍正元年监察御史佟吉图途径直隶、山东、河南一线时写道，“由直隶栾城县至河南、山东雨泽皆未调匀，米谷欠收之处甚多。<sup>⑪</sup>”

稻谷小麦歉收的程度是奏折重点记述的内容，收成的多寡直接关系到地方荒欠程度、粮食价格变动，甚至社会系统的破坏等。如“查得信阳县上年（1735年）夏秋亢旱成灾。麦子止收一二分不等，高粮豆子止收二三分不等，稻子谷子未收颗粒。<sup>⑫</sup>”再细化的条件下，还会将各地具体的收成分数统计在案，如“直属地方本年二麦高地因旱无收。所有洼地园地、约收分数各府州厅卫具报到臣，谨开具简明清折恭呈御览。顺天府属通计约收三分八厘：宛平县一分，大兴县一分，大城县五分五厘，涿州五分，房山县四分，良乡县二分，固安县三分，永清县六分，东安县三分，昌平州七分，顺义县三分，怀柔县五分，文安县五分五厘，密云县五分，平谷县三分，延庆卫四分，霸州五分，保定县二分五厘，香河县一分七厘，通州二分，三河县四分，武清县四分，宝坻县四分，蓟州二分，宁河县六分。<sup>⑬</sup>”又如，乾隆二十四年（1759年），山西地方一月、二月雨雪稀少，冬麦春麦生产受到严重影响，平原地区灌溉条件比较好的情况下长势尚好，山坡旱地的春麦大多没有下种，即便下了几场微雨，赶种的春麦也没有发芽。于是巡抚塔永宁在上奏的奏折上说：“是以今岁二麦收成，省南各属尚有薄收，北路各属惟平原洼下及有水泉之处犹属有收。其余均已改种秋禾，二麦收成甚属稀少。今据布政使刘慥通查开报前来。臣复加查核，内七分收成者

① 嘉庆六年六月二十四日陕甘总督觉罗长麟奏。  
② 嘉庆七年五月十八日陕西巡抚陆有仁奏。  
③ 嘉庆八年六月初八日河南巡抚马慧裕奏。  
④ 康熙五十三年四月初六日山西巡抚苏克济奏。  
⑤ 光绪三年十一月十三日河南巡抚李庆翱附片。  
⑥ 嘉庆十五年三月十六日兼护山西巡抚素纳奏。  
⑦ 乾隆四十年十月十九日江苏巡抚萨载奏。  
⑧ 雍正元年九月十一日闽浙总督觉罗满保奏。  
⑨ 嘉庆十九年六月二十八日安徽巡抚胡克家奏。  
⑩ 道光十五年闰六月初七日湖南巡抚吴荣光奏。  
⑪ 雍正元年三月初四日监察御史佟吉图奏。  
⑫ 乾隆元年四月初三日河南巡抚富德奏。  
⑬ 乾隆二十四年六月初四日直隶总督方观承奏。

永济、临晋、荣河……闻喜、绛县等二十八州县。六分收成者榆次、太谷、徐沟、忻州、定襄等五州县。五分以上收成者太原、文城、岚县……吉州、乡宁等二十六州县厅。其收成自五分以下二麦被旱。现在委员查勘分别已经改种秋禾与不能改种秋禾汇入夏灾秋灾办理者阳曲、岢岚、兴县……蒲县、永和等三十九州县厅，合计通省二麦收成除被旱各属外，约在五分以上。除俟各府州查明确实收成分数再行核实。<sup>①</sup>这一奏折对农作物冬麦和春麦收成进行了详细的报告，与前条直隶总督方观承报送作物收成时略有差异。同时指出，收成五分是确定一个区域是否因旱受灾的重要指标。也就是说，收成大于五成只是说这一区域粮食生产因旱减产，这种减产在一定程度上是可以接受的，只有收成不足五成时才是因旱成灾。

#### 4) 旱涝灾害社会影响信息

旱涝灾害的社会影响是各级政府最为关注的内容。一般来说，灾情包括受灾范围、受灾程度、社会秩序混乱或解体等。就受灾范围而言，比如乾隆二十四年山西巡抚鄂弼的奏折悉数了山西省因旱受灾的区域并用受灾成数对灾区夏旱和秋旱的严重程度进行了空间上的区分，“晋省乾隆二十四年，夏被旱灾者，石楼、应州、怀仁、山阴、丰镇厅、崞县、静乐等七厅州县，被灾十分。秋被旱者：阳曲、岢岚、岚县、兴县、临县、石楼、应州、大同、怀仁、山阴、灵丘、阳高、朔州、马邑、平鲁、五寨、静乐、代州、崞县、保德、河曲、临汾、襄陵、洪洞、太平、曲沃、翼城、汾西、解州、安邑、夏县、平陆、芮城、绛州、稷山、河津、闻喜、绛县等三十九州县并大同等管粮厅经历司征粮地，大同左等十四团操应征尖丁成灾五六七八九十分不等。”<sup>②</sup>光绪二十七年，广西巡抚王之春在奏折中不仅描述受灾范围、严重程度，而且还将旱灾对社会经济系统的影响进行了描述，“左江一带数月不雨，赤地千里，迄未耕耘，旱象已成。米价昂贵，民食维艰。”<sup>③</sup>

旱涝灾害最严重的结果就是人口的非正常死亡。如，在光绪十八年（1892）山西地方水旱灾害十分严重，田禾枯槁，半省州县灾歉，以北路边州各厅及毗连直境之大同府属被灾尤重。“天镇、阳高等处卖男鬻

女络绎于途，而口外七厅灾象更甚，所到之处饿殍盈野，村落成墟，惨苦情形目不忍睹。询因该处歉收已经三年，民贫地瘠，夙鲜盖藏。去岁猝遇奇荒，束手待毙，有力之家初尚能以糠粃果腹，继则草根、树皮均已掘食殆尽，朝不保暮，岌岌可危，每村饿毙日数十人，现在生存饥民率皆鹄面鸠形，仅余残喘。”<sup>④</sup>

旱涝灾害导致的一个重要的结果就是社会秩序的紊乱，自杀、流民徙走、人吃人、结伙抢夺等事件就会频繁发生。比如，光绪三年陕西大部旱灾形势仍旧十分严峻，泾河、渭河濒临干涸，西安等地旱灾严重，“谷价腾踊，穷民无所得食，有取数百钱鬻其爱子者，有老弱妇女绳系投水死者，洛河漂流死尸络绎不绝，其丁壮则百十为群，勒食大户，攫金攘饼，颠过客而夺财物者，比比皆是，加以游勇士匪勾结煽乱，患害岂复可言。”<sup>⑤</sup>

#### 5) 粮价信息

降雨的多寡与作物长势和粮食收成有着明显的关系。清代灾害的灾害奏折中水旱灾害往往与粮价变动一同上报，因此现有的旱灾奏折中存在着大量有关粮价的记述。一方面是受干旱灾害的影响，粮食价格上涨。比如乾隆五十二年直隶宣化地方出现了较为严重的干旱灾害，粮食减产。第二年春干旱形势仍十分严峻，所以地方“民人口食无资，卖鬻子女者甚多，并有逃往口外觅食者，”<sup>⑥</sup>于是直隶总督在上奏朝廷的奏折中写道：“宣属米粮价值素称平减，粟米每石均属一两二三钱以下。今自上年被旱之后已增至一两六七钱及一两八九钱、二两不等。”<sup>⑦</sup>另一方面是由于降水影响旱情缓解，粮价平减的情况。如嘉庆十八年（1813）陕西平原地方各府雨泽稀少，西安、凤翔、同州、邠州、乾州五府州属秋成歉薄，民力不无拮据。到了十九年，冬春雨泽仍旧稀少，以致陕西巡抚朱勋在奏报中说道“榆林、葭州、怀远、神木、府谷并绥德、米脂、清涧等八州县于闰二月二十三及三月十四、十九等日得雨一二寸。春麦不能出土，夏收无望。”<sup>⑧</sup>然而到了6月，陕西平原各地普降甘霖，“平原各属二麦丰收，粮价平减。”<sup>⑨</sup>由此可见，降雨对于平抑旱灾期间的粮价具有显著的效果。

① 乾隆二十四年闰六月二十日山西巡抚塔永宁奏。  
② 乾隆二十四年十月初七日山西巡抚鄂弼片。  
③ 光绪二十七年九月初九日广西巡抚王之春奏。  
④ 光绪十九年三月初七日直督李鸿章奏。  
⑤ 光绪三年九月十五日监察御史梁景先等奏。  
⑥ 乾隆五十三年四月二十三日署山西巡抚明兴奏。  
⑦ 乾隆五十三年三月三十日直隶总督刘峩奏。  
⑧ 嘉庆十九年闰二月二十九日陕西巡抚朱勋片。  
⑨ 嘉庆十九年五月二十五日陕西巡抚朱勋奏。

## 6) 灾害救济与恢复生产信息

灾害救济与生产恢复也经常是灾害奏折中重要的内容。其中分发救济粮、减缓税负、设置粥场等是经常见到的灾害救济方式。比如，乾隆十年山西北部地区的大同、朔州等地夏秋之间出现较为严重的干旱灾害，兼管户部尚书刘於义则上奏朝廷，对灾区“一面委员抚恤，一面查明成灾顷亩区别蠲缓，应赈户口口粮或应银米兼赈，酌定办理题销在案。今该抚阿里充疏称，大同等十八州县被灾五分至九分不等，各色地三万九千七十三顷三十八亩零。除太原、榆次、辽州三州县被灾五分户口例不赈济外，其十五州县被灾六七八九分不等，贫民贫士大小口抚恤加赈应需米四万三千一百九十石三斗，均动各该州县存仓谷石设厂运贮碾米，扣除小建按月对票散给，如愿领谷者照一谷六米折给。<sup>①</sup>”由于常年干旱影响，浙江巡抚觉罗雅尔哈善上奏说道“十六年旱灾之后，小民元气未能全复。仰照圣恩将被旱重者每亩给谷六升，轻者每亩给谷三升。实在无力贫农酌借仓谷资其耕作，秋收免息还仓，新旧钱粮照例蠲缓。其勘明不成灾之处亦属减收，并请将新旧钱粮缓至麦熟征收。无力农民来春酌借仓谷，秋收一体免其加息无庸展赈。<sup>②</sup>”设置粥场对于救济饥民十分重要，《荒政辑要》一书中指出“昔自卫国凶饥，公叔文子为粥与国之饿者，人称其惠。此后，世赈粥之政，所由昉也。<sup>③</sup>”嘉庆十一年正月初四日上谕“惟念今春青黄不接之际，民力不无拮据。所有该省现设粥厂，著加恩展煮至三月底止，俾各欠户粒食有资。现在省北州县及本镇厅等处存谷尚多，即著拨谷五万石碾米运赴灾区，以资接济。<sup>④</sup>”

在古代社会设坛祈雨禳灾也是一种重要的灾害救济工作，通过水神祭祀的形式达到一种心理上的安慰。比如：“据……济南、东昌、曹州、武定、青州、临清各府州未得春雨滋培，土脉颇形干燥。经臣率属斋戒设坛虔诚步祷，虽省城于本月十六日得雨二寸，近省州县亦报同日均沾，而晴霁太久，田畴尚未优渥，现仍敬谨祈祷。当此麦苗长发之时倘能于月内普被甘霖，尚不失为中稔。<sup>⑤</sup>”山东巡抚崇恩上报的奏折显示，咸丰九年山东济南、东昌、曹州、武定、青州、临清等府州冬春之际降水稀少，于是崇恩便率领地方百官设坛祷告。

救济对于解决灾区一时的救灾需求是十分有效，但从长远来说还是应该快速恢复生产，比如直隶总督高斌在乾隆九年八月二十日奏称，“直隶天津、河间二府深、冀二州所属各州县上年被旱成灾，荷蒙圣恩逾格赈恤并钦遵……令民间广种秋麦，为来岁资生之本计。经臣查明，被灾最重次重共二十六州县并续报偏灾五州县内，有地无力之户，按其应种麦地每亩借给五仓升，有欲自买麦种者，每亩借给银一钱，于麦收后均照原借银麦各数追还，免其加息。又，贫民缺乏牛力者，每亩借给制钱二十五文，以为雇牛耕种之资，收成时照数还项。又贫民牛只喂养无资，欲图变卖者，借给收费每只每月银五钱，八九两月共银一两于麦熟后还半，秋后通完。均于司库正项内动支等因题准在案。其借给麦种及牛力等银两俱委道府大员督率巡查，实领实种。<sup>⑥</sup>”光绪二年江淮地区春夏严重干旱，二麦歉收同时又发生了严重的荒灾，淮海徐扬等地灾害严重，流民扶老携幼，百十为群，身无完衣，面皆菜色。两江总督沈葆楨作为近代重要救荒代表人物，与漕运总督和辖区的巡抚研究灾害救济之策，提出灾害救济的四种方法，即“留养、资遣、工赈、典牛”。留养者多为老幼妇孺，这些人“或千里或数百里，逾淮逾江而来，早已筋疲力尽，听其远徙，终于无以自存。遇之北归，不啻夺之生路，只得随处留养，俾获旦夕之安<sup>⑦</sup>”；如果留养的人太多的话，势必给地方带来巨大的压力，而且新的难民还源源不断，于是给部分钱粮资遣流民让其归赴原籍；同时，流民青壮年劳动力数量巨大，留养、资遣势必造成很大的浪费，于是沈葆楨结合当时运河漕运水道浅涩的情况，提出采用工赈的方式让青壮年流民参与大型工程建设，既缓解了漕运的压力又可以让流民有事可做；针对灾荒过程中农民毁坏生产工具，屠杀耕牛现象，官府应该开展收牛工作，等待旱灾过后再把耕牛卖给恢复生产的农民。针对这次干旱灾害，沈葆楨协调“上海道商捐四万两，淮南商捐五万两，以应扬州留养资遣之需。江藩库五千两，运库五千两，苏厘局一万两，以应海州煮赈之需。江藩库旧存商捐一万一千一百九十三两有奇，运库商捐一万三千八百六两有奇，以应高宝运河工赈之需。江藩库一万三千两，苏厘局一万两，沪厘局二万两，以

① 乾隆十年十二月二十六日吏部尚书兼管户部尚书事务刘於义奏。

② 乾隆十八年十月二十七日浙江巡抚革职留任觉罗雅尔哈善奏。

③ [清]汪志伊，《荒政辑要》卷4则例。

④ 嘉庆十一年正月初四日上谕。

⑤ 咸丰九年三月二十七日山东巡抚崇恩奏。

⑥ 乾隆九年八月二十日直隶总督高斌奏。

⑦ 光绪二年十二月十四日两江总督沈葆楨奏。

应金陵、浦口、扬州、清江、海州典牛之需。<sup>①</sup>”上述政策的实施，有效缓解了江淮地区干旱的影响，为灾后的恢复生产提供了帮助。

### 3 奏报官员的身份

奏折诞生之初，只是皇帝的宠臣和亲信用于谢恩表忠、请安问好，以及密告民情之用。奏折内容形式相对不固定。随着国家的稳定和社会经济的高速发展，中央政府也急切需要知道地方的信息。雍正时期逐步放宽了奏报的权限，王公督抚大员等逐步可以奏报。乾嘉以后，有权上奏折的官员多达千人以上。这样一来，清廷获取地方各类信息能力大为提升。为了便于理解灾害奏折奏报人员职位差异，兹选取乾隆二十四年的旱灾奏折，分析奏报官员的身份职位差异性。乾隆二十四年我国北方地区发生了相对较为严重的干旱灾害，表2显示该年度有45件奏折奏报各地的干旱情况，涉及的奏报人员职位身份包括总督、巡抚、府尹、布政使、盐政、总兵等六种官职身份，其中70%以上的奏折由总督和巡抚两类官员报送的，仅有10件奏折由其他官职人员报送。由于灾害季相的差别，45件奏折中有34件反映的是夏秋两季的干旱和旱灾情形，还有9件冬季上奏的有关灾后救济蠲缓的奏折。

表2 乾隆二十四年旱灾奏折奏报官员身份情况

官职	总计	总督	巡抚	府尹	布政使	盐政	总兵
总计	45	15	20	2	5	2	1
春季	2	2	0	0	0	0	0
夏季	21	10	8	0	1	1	1
秋季	13	1	10	0	1	1	0
冬季	9	2	2	2	3	0	0

通过分析清代现存2400余件旱灾奏折的奏报官员身份，我们发现1689—1911年，共有41类官员向皇帝奏报了各地的干旱和旱灾情况。但是80%以上的灾害奏折都是各地督抚奏的（图5）。这与清初确立奏折制度的功能有很大关系，康熙皇帝多次指出督抚要及时奏报地方四时情况，“凡督抚上折子，原为密知地方情形，四季民生、雨旸如何、米价贵贱、盗案多少等事，尔并不奏这等关系民生的事，请安何用？甚属不合！”可见，让皇帝及时掌握地方灾欠情形是封疆大吏基本责任。

纵观1689—1911年，现存的旱灾奏折的奏报人员的身份也有一定的波动性（图6），这种波动性在一定

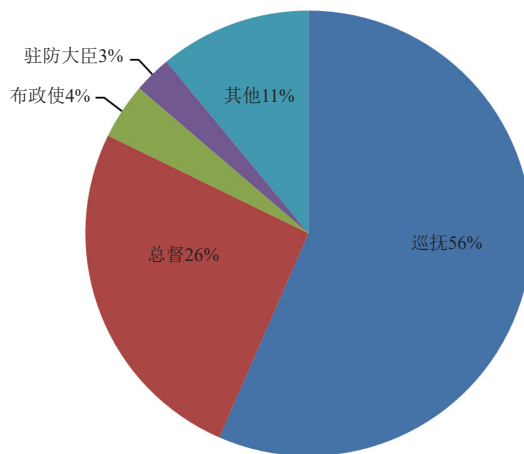


图5 旱灾奏折官员身份分布

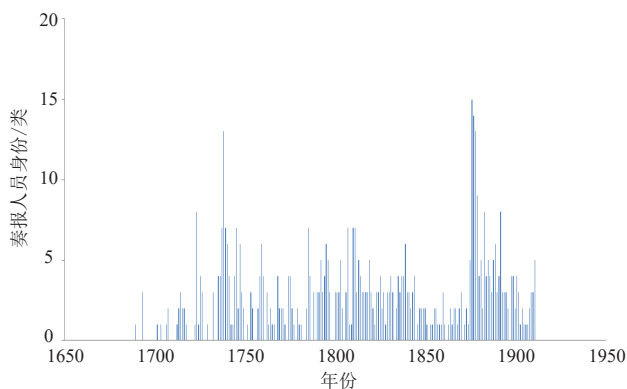


图6 奏报人员身份年际变化

程度上反映出特定年度旱灾事件的社会影响力或让有关官员的关注程度。当然如光绪初年这种百年罕见的干旱灾害，会吸引十余种不同身份的官员上报旱灾信息，同时像乾隆三年这种干旱并不十分严重的年景也会吸引超过十种不同身份官员关注。但总的来看，干旱旱灾较为严重的时段，就会有更多的官员关注。

### 4 结语

上下通畅的灾情信息传递是政府有效开展灾害治理的重要保障，正如康熙皇帝指出的，“凡雨旸时候、丰歉情形，莫不留心访察。虽在僻远，必务周知。”<sup>②</sup>由此可见，清廷要求各地按照规定及时报告灾害荒欠，以便根据灾情发展采取妥善措施做好准备和预防。也就是说，以灾害奏报制度为代表的基层信息向上传递的路径，在一定程度上确保重大灾害发生后中央政府能够以最快的速度对灾害做出反应，进而实施有效的灾害应急治理。事实上，清代灾害奏报制度也确实在州府道省的灾情信息传递上起到至关重要的

① 光绪二年十二月十四日两江总督沈葆楨奏。

② 《清圣祖实录》卷261，康熙五十三年十一月。

作用。由此可见，清代的旱涝灾害奏报制度具有以下特点。

其一是灾害奏报的时效性。规范的奏报程序与时限，多途径的奏报渠道，确保了中央政府能够在第一时间得到州府道省的灾情信息，及时地处理正在发生或者可能发生的灾害和荒欠。因此，无论雨泽丰欠、旱涝蝗灾害，还是收成多寡、粮价升降，都可以通过奏报的方式让中央政府及时了解变动情况，以备不时之需。

其二是灾害奏报的客观性。奏报的信息，无论是雨雪分寸、旱涝情形，还是收成分数、粮价情形等都是自下而上层层上报汇集而成，时间准确、范围明确，而且数量统计相对客观，可以较为准确地反映灾害发生时的实际状况，便于上级部门决策。

其三是灾害奏报的广泛性。灾害奏报涵盖空间范围广，加之时效上的优势，使奏折资料可以追踪典型灾害事件的全过程，反映更加丰富的灾害信息，构建

起灾害发生区域基层社会的真实面貌。

#### 深入阅读

方修琦, 苏筠, 尹君, 等. 冷暖—丰歉—饥荒—农民起义: 基于粮食安全的历史气候变化影响在中国社会系统中的传递. 中国科学(地球科学), 2015, 45(6): 831-842.

毛阳光. 唐代灾害奏报与监察制度略论. 唐都学刊, 2006, (6): 13-18.

睡虎地秦简整理小组. 睡虎地秦墓竹简. 北京: 文物出版社, 1978: 24-25.

张文. 中国古代报灾检灾制度述论. 中国经济史研究, 2004, (1): 60-68.

张卫明. 两江灾荒与沈葆楨防治灾荒的思想及其实践//中国近现代史史料学学会. 沈葆楨生平与思想研究——沈葆楨巡台130周年学术研讨会论文集. 北京: 中共党史出版社, 2004: 251-261.

朱金甫. 清代奏折制度探略. 历史档案, 1981, (2): 131-132, 135. 中国第一历史档案馆. 乾隆朝上谕档. 南宁: 广西师范大学出版社, 2008: 448.

(作者单位: 万金红, 中国水利水电科学研究院; 孙大兵, 芜湖市气象局; 张葆蔚, 应急管理部防汛抗旱司)

# 中国与阿拉伯国家人工影响天气交流合作

■ 姚展予

进入21世纪,中国在人工影响天气领域已与许多国家建立了良好的双边交流与合作关系。中国的人工影响天气技术逐渐走出国门、走向世界。过去20年,中国与一些阿拉伯国家建立了人工影响天气科技合作意向。与阿拉伯国家在人工影响天气领域的深入合作,让中国人工影响天气技术更好地服务阿拉伯国家,助力构建人类命运共同体,服务“一带一路”建设。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.013

进入21世纪,中国在人工影响天气领域已与美国、俄罗斯、以色列、古巴、沙特、智利、韩国、印度、斯里兰卡、阿联酋、阿曼、埃及、印度尼西亚、马来西亚、伊朗、蒙古、泰国、越南、缅甸、西班牙、澳大利亚、委内瑞拉、玻利维亚、塞浦路斯、津巴布韦、哥伦比亚、日本等许多国家建立了良好的双边交流与合作关系。中国的人工影响天气技术逐渐走出国门、走向世界。

中东地区属于干旱-半干旱(热带沙漠)气候,常年降水量偏少,温度偏高,水资源短缺问题非常严重。中东地区的阿拉伯国家多年来一直寻求解决水资源短缺问题的有效途径,不少阿拉伯国家设立了海水淡化、沙漠绿化、人工增雨等计划。一些阿拉伯国家迫切希望借鉴中国的人工影响天气技术开展人工增雨作业以缓解本国的缺水现状。过去20年,中国与一些阿拉伯国家建立了人工影响天气科技合作意向,中国帮助沙特阿拉伯王国(以下简称沙特)利用中国的飞机和人工增雨技术在其国内开展了人工增雨试验,取得明显增雨效果,获得多方赞誉。阿拉伯联合酋长国(以下简称阿联酋)近年来多次引进中国地面燃烧炉等设备进行暖云催化增雨试验,力求解决干旱缺水问题。阿曼苏丹国(以下简称阿曼)根据中国提供的人工增雨技术设计方案,启动了人工增雨研究计划。埃及也在积极寻求与中国合作,在其国内开展人工增雨试验以及开展机场人工消雾试验。这些中国人工影响天气技术和服 务赢得了很多阿拉伯国家的赞誉,卓有成效地服务于国家“一带一路”的合作倡议。

## 1 回顾

### 1.1 沙特

2007年1月24—29日,中国气象局人工影响天气

专家组访问沙特,向沙特王子及沙特有关部门的专家详细介绍了中国人工影响天气活动,向沙方展示了中国人工影响天气技术,沙特方面表示期望在人工影响天气领域与中国开展合作。

2007年4月12日,沙特政府代表团一行3人访问了中国气象科学研究院,双方讨论了沙特气象环境部(PME)关于在沙特开展人工增雨工作的前期合作。中国气象局局长郑国光会见了沙方代表团,会谈中沙方表达了希望中国气象局能够组织人工增雨专家赴沙特进行人工增雨作业。

2007年10月24日,沙特驻华大使馆与中国气象科学研究院在北京签署了“沙特利雅得地区人工增雨试验”项目合同。2007年11月27日—2008年5月27日,中国气象科学研究院牵头,贵州省气象局、贵州双阳通用航空公司等国内多家单位参与的沙特人工增雨试验项目在沙特境内实施。中国工作组18人携一架中国Y12飞机和机载作业设备在沙特首都利雅得地区进行了为期6个月的飞机人工增雨试验,顺利完成了试验任务,取得了良好的增雨效果,得到了沙特方面的好评。项目实施期间,阿联酋、阿曼等周边国家多次派人到沙特观摩人工增雨外场试验(图1)。

### 1.2 阿联酋

阿联酋地属热带沙漠气候,年降水量不到100 mm,是一个严重缺水的国家,多年来一直寻求与包括中国在内的许多国家开展人工影响天气技术交流合作,以期缓解水资源短缺问题。

2016年5月30日和2018年4月20日,阿联酋国家气象和地震中心代表团两次访问中国气象局人工影响天气中心,充分调研和全面了解中国的人工影响天气技术现状。通过技术能力、服务能力、性价比等方面的

收稿日期: 2022年12月14日; 修回日期: 2023年4月21日  
第一作者: 姚展予(1964—), Email: yaozy@cma.gov.cn



图1 2007—2008年中国专家和设备帮助沙特利雅得地区人工增雨试验工作场景

国际对比，阿联酋2019年从中国购买了6套地面燃烧炉（5套固定式，1套车载移动式）和2300根地面暖云焰条，用于在阿联酋山区开展地面燃烧炉暖云催化增雨试验（图2）。2022年，阿联酋再次从中国购买6套地面燃烧炉和1台地面自动化火箭发射架及若干火箭弹，用于阿联酋暖云催化增雨试验。



图2 阿联酋引进中国地面燃烧炉设备开展暖云催化增雨试验（阿布扎比，2019年3月）

### 1.3 阿曼

2010年7月21日，中国气象局副局长矫梅燕与来访的阿曼地方市政和水资源部大臣鲁瓦斯一行就双方开展人工影响天气工作方面开展交流。中国气象科学研究院张人禾院长率领的中国气象局代表团于2011年3月17—24日赴阿曼访问，就帮助阿曼开展人工增雨工作的可行性和实施条件进行实地考察和交流（图3）。



图3 中国专家组就阿曼开展人工增雨工作的可行性和实施条件进行实地考察（阿曼，2011年3月22日）

2011年7月，中国气象局向阿曼驻华大使馆提交了一份在阿曼开展人工增雨试验计划，详细分析了阿曼人工增雨作业条件，科学设计了阿曼人工增雨试验方案。阿曼根据中国提供的人工增雨技术方案，启动了人工增雨相关研究计划。  
(下转95页)

# 从第一届天气与社会会议看社会科学和气象服务的融合发展

■ 李超 鲍雅芳

第一届天气与社会会议共9个主题，交流了天气预报价值链的社会学研究。基于影响的极端天气预报和预警、估计和提高天气信息的社会经济效益是报告和墙报数目最多的主题。此次会议的重点是“科学地服务”，结合国内嵌入式气象服务的发展要求，提出三点建议：一是提倡气象服务“第一千米”理念；二是适时引入不确定信息；三是开展预警级别的跨学科研究。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.014

WMO世界天气研究计划(WWRP)成立于1998年，旨在通过科学工作组确定和开发的预报研究进展来应对高影响天气事件日益增长的社会影响，以及专注于特定高优先领域的项目。WWRP活动由WMO天气、气候、水和环境研究委员会(以前由大气科学委员会)监督。过去几十年，WWRP在国际研究及其业务框架构建中发挥了重大作用，包括开启了奥林匹克预报示范项目(FDP)先河，自2000年以来，每一个FDP都展现了地方到区域范围内天气科学和服务的最新进展；2003年全球观测系统研究和可预报性试验(THORPEX)成就并确定了未来地球系统无缝预报(Seamless Prediction from Minutes to Months)的研究议程。

近年来，极端水文气象事件正在以人类历史上前所未有的方式影响着社会、经济和环境。政府、科研机构、应急管理人员和决策者在降低公众和社会风险方面面临着前所未有的挑战。人们越来越认识到，社会科学同样重要，在预报天气时，我们实际上是在预报“大气的社会后果”。站在天气和气候科学的最前沿，必须将社会科学越来越多地纳入我们的思维和战略。为此，WWRP扩大了社会和经济研究应用(SERA)工作组，在2006年2月成立时致力于THORPEX，现在，负责与WWRP有关的所有时空尺度的研究问题。工作组致力于推进天气相关信息和服务的社会和经济应用科学，审查和协助开发和促进社会经济示范项目，目标是为决策者和公众提供更多有用的信息。

会议共9个主题，交流了天气预报价值链的社会学研究。基于影响的极端天气预报和预警、估计和提高天气信息的社会经济效益是报告和墙报数目最多的主题(图1)。会议主题报告主要来自系统开发和气象业务人员。做主题报告的学术专家中，自然科学背景的专家和社会科学的各占一半，体现了大会对自然科学和社会科学的同等重视与促进跨学科交流合作的期许(图2)。

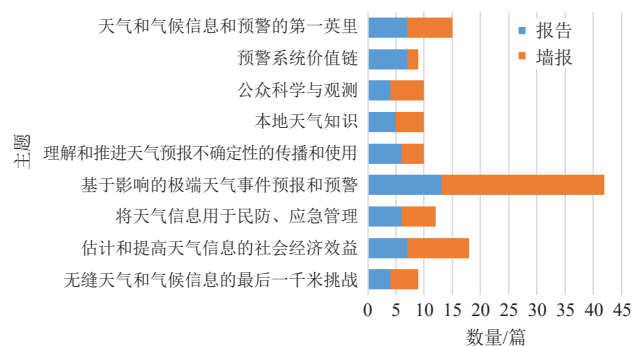


图1 会议交流主题和类型

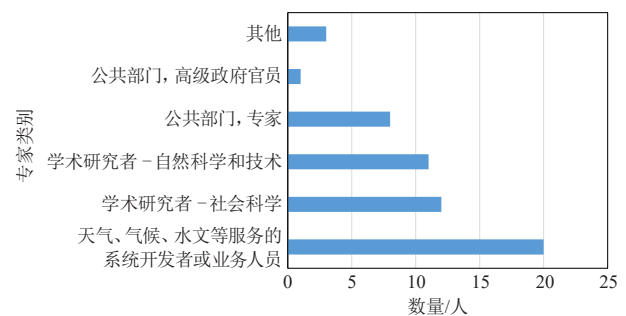


图2 会议主题报告人员背景

收稿日期: 2022年4月12日; 修回日期: 2022年5月13日  
 第一作者: 李超(1981—), Email: lichao@cma.gov.cn  
 通信作者: 鲍雅芳(1985—), Email: baoyafang1985@126.com

社会科学方法已经被应用于解决全球或不同地区的实际问题(图3)。覆盖全球的研究主要是数据库建设、框架建立和应用。欧盟的研究主要得益于开放数据集的可用性,以及WMO第六区协项目的大力推动。德国和印度尼西亚的大学和研究部门支撑了水文气象部门的业务发展。

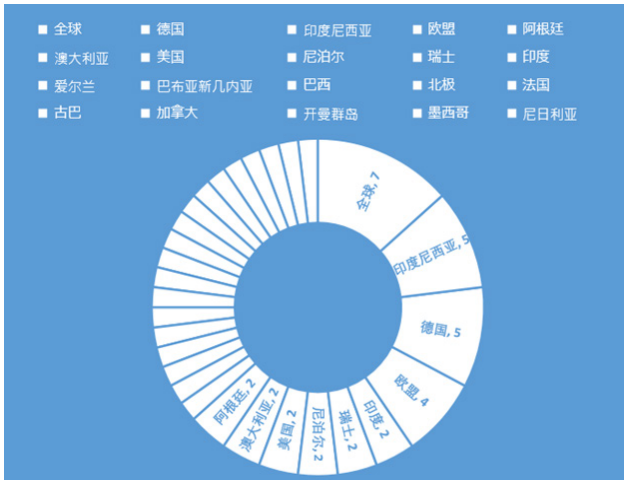


图3 关于全球、国家或区域问题的会议报告的数量(单位:篇)

## 1 研究进展

### 1.1 天气和气候信息和预警的第一英里

解决天气和气候信息的预警的第一英里,就是回答“谁向谁分享什么”(Who share what with whom)这一信息传播中的经典问题。这一问题影响信息传播和沟通的广度、速度和准确度。提供天气和气候警报应当从使用信息并受警告影响的人开始。从一开始,人就应当是开发产品和服务过程的一部分,并一直是定义和实施信息需求和开展预报预警的核心。

爱尔兰国家气象水文局开展了公众对当前和未来天气服务需求的调查。4451份在线问卷结果表明,从确定性预报向概率预报的转变,向更加基于影响的天气预警系统的转变受到公众的青睐。公众熟悉颜色编码的天气警报系统,对较高级别的橙色和红色警报表示满意,但对黄色警报发布频率过高不满。公众忽视警告并且没有采取适当准备行动的主要原因在于警告内容缺乏本地化。

巴西探讨了复杂信息链妨碍及时备灾的案例。在巴西,国家自然灾害监测和预警中心监测洪水、滑坡和干旱相关的灾害风险,分析风险情景并向国家民防部门发送警告。国家民防部门负责将其转发给州和市政府,再由政府向公民传达。2012年的灾难性的拉包尔女王号沉没事件中,尽管气象局提前几天发布了适当的季风警报,但该船的船东有蔑视地方当局

历史,安全纪录不佳,与气象部门没有任何联系,使用了其他来源数据编写了自己的预报。船长利用该预报,无视实际情况,将不安全的船只驶入汹涌的大海,最终导致船舶倾覆,导致146~165人丧生。

### 1.2 预警系统价值链

由于天气预警和气候服务的生成在技术上和组织上都变得更加复杂,价值链或循环的概念已成为试图评估此类服务的使用和净收益的研究中的流行概念工具。天气信息价值链描述所有利益相关者在涵盖天气和灾害监测、建模和预报、风险评估、通信和准备活动和系统的端到端预警系统中的信息生产、交流、使用和流程。WMO世界天气研究计划(WWRP)高影响天气项目(HIWeather)预警价值链工作组建立了价值链数据库、问卷模板及指南,构建了价值链术语表。

新西兰开展了2021年部分案例的预警绩效比较。构建了绩效比较模板用于收集预报和预警性能的数据。一旦完全填充,此数据集将能够对警告链性能进行比较分析,并提高将价值归因于链中每个贡献的可能性。目前,已收集了2021年几场天气灾害的可用数据,包括太平洋西北地区的热穹顶、希腊的野火、美国得克萨斯的寒潮、中国的河南洪水、西班牙的降雪、德国的洪水、印度尼西亚的洪水和山体滑坡和飓风艾达。

### 1.3 公众科学与观测

公众科学(Citizen Science)描述的是公众和职业科学家之间的合作关系,通常指公众成员参与收集、分类、记录或分析科学数据的项目。公众科学起源于物理科学,但已经扩展到其他领域,包括自然灾害研究。它有不同的名称,包括参与式研究、参与式科学、社区科学、基于社区的研究、基于社区的/自愿的监测等。公众科学项目的动机、设计和产出差别很大。有些项目是高度参与性的,公众参与项目设计、数据收集和分析。在另一些项目中,公众仅为由科学机构设计和协调的项目提供数据。

公众科学为水文气象灾害造成的社会经济影响提供影响数据。欧洲强风暴实验室(ESSL)自2006年起运营和管理欧洲灾害性天气数据库(ESWD)就建立了众包报告交换平台EWOB。通过EWOB,互连网使用者、志愿者(团体或个人)可以编写众包报告,这些报告经由人工检查后升级为经过验证的ESWD报告。

英国气象局开展了公开数据源的影响数据的偏差研究。在欧洲,这类数据主要来源于国际组织、政府、学术机构和新闻网站。但各机构在收集目的、方法、格式和质量方面的差异限制了它们的效用。英国

气象局针对公开数据源的地理、危险、时间、阈值和系统偏差等方面进行了分析。研究发现，在所调查的每个数据源中都存在不同类型的偏差。偏差会影响数据的覆盖范围、严重性、时间、地理范围和准确性，从而影响其在IBF评估中的效用。并且，危险术语不一致，唯一事件标识符采用率低，使影响数据与特定的危险事件的关联困难，建议多种数据源结合使用。

#### 1.4 理解和推进天气预报不确定性的传播和使用

当前，数值天气预报模型在提供可靠的概率预报以及预报的不确定性的量化方面已经相当成熟。将这些信息包含在天气预报和警报的传播中，并将其整合到下游模型和决策过程，已成为越来越普遍的做法。这不仅意味着在集合预报中解释“原始”不确定性信息、对其开展后处理和可视化，还意味着整合广泛的非气象信息，如用来评估风险的脆弱性和暴露度数据，以及社会、心理和经济等影响人类决策和福祉的信息。

欧洲气象水文部门及其用户对概率预报预警提出建议。欧洲气象服务网络(EUMETNET)临近预报计划(E-NWC)于2019年组织了两项调查：一项针对参与的国家气象和水文部门(NMHS)，另一项针对NMHS的用户。14个国家的NMHS和18个专业用户的反馈对概率预报预警提出了不同的建议。NMHS建议：布设更高密度的自动气象站观测；扩展集合预报系统为用户提供附加值；开发和使用有效的解释工具。专业用户建议：开发影响预报产品作为传统预报的补充信息；注重影响预报的呈现方式；开发面向用户的概率预报。

#### 1.5 基于影响的极端天气事件预报和预警

气象和水文部门通常根据气象参数(如风速或降水量)的固定阈值对恶劣天气事件发出警告。然而，预防措施的社会决策取决于天气事件的预期影响。为了更好地为此类预防行动提供信息，气象部门目前正在努力将预期影响纳入其警报。2020年，WMO发布了第2版《基于影响的多灾种预报和预警服务指南》，强调国家气象水文部门需要从发布传统天气预报和预警转向提供基于多灾种影响的预报和预警服务，并优化和梳理了最佳实践案例。

德国基于雷达的强降雨事件目录评估未来降水事件的影响。基于德国地区20年的气候雷达数据，德国气象局开发了基于雷达的暴雨事件目录(CatRaRE)。除了各种极端属性，如重现期或极端天气指数，该目录还包含了其他气象、地理和人口变量(如天气类型、前期降水指数、人口密度、土地覆盖、不透水程度、

地形位置指数等)。将CatRaRE与每个事件的影响信息(例如损坏或消防队行动)相结合，从而预估在类似环境中可能引发的具有可比结构的事件的影响。

瑞士开发了冬季风暴对建筑物损坏的影响预报系统。将数值集合天气预报模型与暴露和脆弱性数据相结合，提前2天预报预期的建筑物损失的货币价值(以瑞士法郎为单位)，空间精度为500 m网格。将预报的建筑物损坏与苏黎世州的保险索赔进行比较，发现雷暴和焚风风暴的漏报、误报率较高。敏感性分析表明，与暴露和脆弱性相比，集合预报的不确定性对总体不确定性的贡献最大。

澳大利亚开发了大风对住宅的影响预报系统。澳大利亚地球科学中心的国家暴露信息系统提供了暴露度信息，包括全国住宅的属性和地理位置。影响预报由一套启发式函数提供，这些函数将损坏程度定义为不同住房类型的入射阵风风速的函数。目前已形成了一套风险服务的工作流程。

新西兰讨论了影响预报和影响预警的数据需求。使用扎根理论(GT)，对新西兰59名危害、影响、脆弱性和暴露(HIVE)数据的用户和创建者进行了访谈和召开研讨会。发现HIVE主要数据源包括：网络众包数据、社区志愿者报告、来自响应者和应急管理人士的隐性知识、社交媒体帖子、福祉调查等。研究为利益相关者构建了概念框架，以识别实施水文气象IFW系统所需的数据源和伙伴关系。

孟加拉国评估沿海地区的危害、脆弱性和暴露程度的案例。使用31个核心指标来评估最低行政单位(即工会)的整体风险值。根据风险评分，每个工会都被分配到一个风险类别下。风险评分大于6.5被归类为非常高风险类别，而风险评分低于2被归类为非常低。同样，高、中、低风险等级由风险评分定义，分别介于5.0~6.5、3.5~5.0，以及2.0~3.5。结果显示，在Patuakhali区76个工会中，7个工会被认为是非常高风险的，21个是高风险的，21个是中等风险的，3个是低风险的，1个是非常低风险。为降低社区风险提供了重要指标。

#### 1.6 将天气信息用于民防、应急管理

在灾害性天气事件的准备和缓解阶段，最重要的参与者之一是应急管理界。气象服务部门与更广泛的应急管理社区(例如，民防、应急管理、消防、道路和航空安全)成员的协作、合作和相互理解越来越深入。

瑞士开展应急管理专家和专家的需求的研究。结果显示，不确定性信息的需求有三种格式：1)用于快

速和准确概览的图形（自然灾害专家尤其需要）；2）有助于解释的书面描述并为后续沟通提供词汇（应急管理人员尤其需要）；3）预报员提供的口头咨询服务。最重要的不确定性信息类型是超过阈值的概率，然后是预报值的分布，还包括特定情景（例如，最佳和最坏情景）的更具体信息。此外，参与者不仅对强度的不确定性感兴趣，也关注事件的时间过程。

欧盟开发了多灾害专家建议系统ARISTOTLE。欧盟民事保护机制（ERCC）旨在加强参与国之间在民事保护领域的合作，以改善欧洲及其他地区的灾害预防、准备和应对工作，需要一个多灾种、跨境灾害响应系统。可操作的多灾种专家系统ARISTOTLE用于向ERCC提供建议。系统处理6种不同的危害，包括来自15个国家的19个合作伙伴，24/7全天候为应急响应和定期例行评估，提供影响为导向的快速专家建议。

### 1.7 估计和提高天气信息的社会经济效益

气象部门或企业的存在是为了观察、建模、预报和传播有关天气、水和气候的数据和信息以造福社会。多年来，天气信息服务过程已转变为完整的天气预报价值链，包括天气信息的传播、接收、理解和使用，需要开发有利于实现社会成果和社会价值的方式、方法和指标。

苏黎世抗洪联盟开发了度量社区热浪恢复力的框架。社区参与者成功地使用该框架和工具衡量了全球数百个易受洪水影响的社区（主要是发展中国家的农村地区）的抗洪能力。

德国评估了洪水早期预警对个体的经济效益。应用经典评估工具量化了灾害对个体的经济影响。德国六次洪水致灾事件的4468个案例的分析结果表明，平均建筑损坏率为11%，平均建筑损坏价值48000欧元。只有当人们在收到警报时知道该怎么做（至少提前1小时通知），洪水早期预警才能有效减少经济损失。物品损坏平均减少4%，相当于减少3800欧元。建筑损坏率平均减少2%，相当于减少10000欧元损失。

## 2 需求和挑战

通过投票和讨论，会议确定了社会科学推动气象科学进步的需求和挑战。从公众科学、基于影响的预报预警、天气预报不确定性、价值链四个方面总结。

### 2.1 公众科学

1) 社交媒体数据（例如影响数据）的验证，及其一致性使用。

2) 公众科学的双向信息流动与互惠互利。如何平衡科学家/研究的利益，同时又确保公民从参与中受益？

3) 验证公众科学的价值。

4) 关注参与偏见。使用不同的方法收集数据会吸引不同的用户群体，这是“真实”社会影响的一种有偏见的表现。

### 2.2 基于影响的预报预警

1) 设计标准化方法收集影响的定性和定量数据。

2) 理解和整合复合事件。

3) 引入动态的脆弱性和暴露度信息。

4) 评估用户的感知和理解，确定信息在动员行动和避免损失方面的有效性。

5) 确定实施机制、相关利益方的角色和责任。

6) 使用传统社会科学方法和新的参与式方法（参与式技术、同伴建模、社交媒体、众包数据等），让用户和从业者参与整个预报预警的开发过程。

### 2.3 天气预报不确定性

1) 小概率极端事件的预报信息的内容和呈现方式。

2) 帮助用户理解不确定性信息。

3) 量化人们对不确定性的理解和感知的评估和验证。

4) 寻求不同用户群体的最优沟通方式。

5) 弥合社会科学嵌入预报和预警链中的制度差距。

### 2.4 价值链

1) 评估通过预警得以避免的影响与预报和预警之间的联系。

2) 将结果（影响和避免的影响）与价值链上的价值度量联系。

3) 在合作、设计中包含最脆弱的群体。

4) 维护和制度化用户驱动的过程，尤其是预警系统实施后。

## 3 讨论和建议

气象服务融合了丰富的专业知识，特别是在自然、物理和数据科学方面。社会科学仍是一个相对新的部件。第一届天气与社会会议的重点是“科学地服务”，结合国内嵌入式气象服务的发展要求，提出三点建议：

一是提倡气象服务“第一千米”理念。国内，许多与预警相关的工作都提到了“最后一千米”，即在正确的时间向正确的人提供正确的信息。这可能会产生两个缺陷：首先，它强调外部信息，赋予从外部专家到不知情用户的自上而下、单向传递的特权。其次，它让人们参与到最后一步为止，这意味着用户可

能需要遵守信息提供者开发的产品和服务。作为替代方案，国际上已经在探讨天气和气候信息的“第一千米”，即从使用信息和受警告影响的人开始，提供天气和气候警报。“第一千米”保留了“最后一千米”的精神，即确保正确的人在正确的时间获得正确的信息以发出他们需要的警告。它颠倒了顺序并改变了起点，从需要和使用信息和警告的人开始，关注他们的理解和知识，在社会环境中构建技术。从操作和技术的角度来看，警告和信息本身当然有可能最终是相同的，但“第一千米”通过让受影响的人自始至终参与，提高了接受度、信任度和可信度。

二是适时引入不确定信息。我国预报预警的公众和专业服务大多不包含不确定性信息。一方面，不确定性信息可以增加公众对预报的信心并支持决策过程，通过自我评估风险促进知情决策。如果没有这些信息，外行人只能猜测事件发生的可能性有多大。另一方面，不确定性信息很容易被误解。受众有可能会将（发生的）数值概率误解为空间或时间信息。如果没有数字信息，使用日常短语，对其的解释差异也会

很大。建议区分公众、行业、决策服务用户，找出适合不同用户的不确定信息需求和服务流程。

三是开展预警级别的跨学科研究。气象预警通常使用警报级别系统(ALS)发出。ALS在全球范围内被用作一种速记法，向各种各样的使用者传达简明、清晰的信息。它们通常遵循红绿灯的颜色结构或数字顺序，可以跨行政、跨区域标准化。同时，标准化过程艰难，不仅涉及针对特定危险或脆弱性的科学基础，也要受到文化、政治和生计因素的影响。目前，国内关于ALS的设计、使用和实现的研究还很有限。这可能是因为前期研究主要关注政策法规，而其社会科学属性的研究需要的跨学科团队较难组建。

#### 深入阅读

Brunet G, Jones S, Ruti P M, 2015. Seamless prediction of the earth system: from minutes to months. Geneva: World Meteorological Organization.

Henderson G, 2015. Masters of uncertainty: weather forecasters and the quest for ground truth-by Phaedra Daipha. Chicago: The University of Chicago Press, 2015.

(作者单位：中国气象局公共气象服务中心)

(上接90页)

## 1.4 埃及

2007年4月2日，埃及环境事务部一行6人访问了中国气象局，就人工影响天气工作情况与中国气象局进行了交流。2008年11月，中国气象局人工影响天气专家组访问埃及，埃及方面表达了希望能够与中国气象局合作，在埃及开展人工影响天气作业，以及相关技术交流和转让意愿。此后，埃及从中国人工影响天气设备生产厂家引进了相关设备，借助中国的人工影响天气技术在其国内开展人工增雨试验以及在其国内机场开展人工消雾试验。

## 2 小结和展望

中东地区的阿拉伯国家水资源短缺问题尤为严重，历史上曾发生过多次为争夺水资源而引发的冲突甚至战争，解决水资源短缺问题是保障阿拉伯国家可持续发展的重要举措。随着人工影响天气技术的不断发展，开发空中水资源以缓解水资源短缺问题已逐渐成为阿拉伯国家的普遍需求。由于阿拉伯国家在云降水过程理论研究和人工影响天气技术实施等方面缺乏基础积累和实践经验，强烈的需求促使阿拉伯国家寻求国际合作，借助国际人工影响天气先进技术为本

国服务。近年来，一些阿拉伯国家通过国际交流与合作等途径与美国、俄罗斯、中国等人工影响天气技术发展较快的国家开展了一些联合科学研究和试验，促进了本国相关领域的研究和技术发展。阿联酋从2015年起实施了一项人工增雨科学研究计划(UAERP)，2015—2017年(分3期)每年提供500万美元进行国际招标，每期资助3个研究项目；2021年(第4期)和2023年(第5期)又分别提供300万美元进行国际招标，每期资助2个研究项目。这些中标的研究项目要求其研究成果能够在阿联酋得到具体推广应用。

中国与阿拉伯国家的友好交往源远流长，进入21世纪以来，中国人工影响天气技术逐渐走出国门，走进阿拉伯世界，与沙特、阿联酋、阿曼、埃及等阿拉伯国家多次开展交流访问，达成人工影响天气科技合作意向，开展人工增雨试验和服务。未来，应抓住中阿关系健康发展的良好契机，进一步加强与阿拉伯国家在人工影响天气领域的深入合作，让中国人工影响天气技术更好地服务阿拉伯国家，助力构建人类命运共同体，服务“一带一路”建设。

(作者单位：中国气象局人工影响天气中心)

# 2023年暴雨东湖论坛：推动暴雨前沿科学研究

■ 李傲 徐明

2023年举办的第三届暴雨东湖论坛聚焦暴雨核心领域的科学问题和关键技术以及“卡脖子”问题，围绕暴雨中尺度机理、暴雨监测预警、洪水及暴雨次生灾害等，谋划设计暴雨研究的科研方向以及科研目标和技术目标。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.015

暴雨东湖论坛于2019年创办，每2年举办一次。2023年3月19—20日举办了第三届论坛。2023年论坛安排了60余个特邀报告、近400个口头报告和350余个墙报交流，1200余名线下代表和近万名线上代表参会，聚焦暴雨核心领域的科学问题和关键技术以及“卡脖子”问题，谋划设计暴雨研究的科研方向以及科研目标和技术目标。2023年暴雨东湖论坛主要关注以下几个方面。

## 1 暴雨中尺度机理的研究成果

暴雨中尺度机理方面主要围绕梅雨锋暴雨、暖区暴雨、地形暴雨等触发和维持机制开展了深入的研讨。中国气象科学研究院徐祥德院士认为，一方面，全球变暖不仅改变了地球陆地大气温度状态及其分布格局，而且引起海洋热力状况发生变化，进而引起气候状态变化加剧，打破原天气气候稳定状况，导致极端暴雨等极端灾害性异常天气多发、频发；另一方面，从人类活动影响大气环境角度来看，如人类活动排放气溶胶对降水气候格局改变也起到一定作用。他举例指出，观测发现，气溶胶可导致雨滴变小，无法落地成雨，反而升上高空，当动力条件合适时，包裹着气溶胶的小雨滴在高空碰并，形成大雨滴，出现突发性降水。

中国科学院大气物理研究所孙建华研究员提出，山区、山麓和平原降水的时空分布特征差异明显，认为地形作用对总降水的增强有一定影响，在山麓地区最显著。暖季降水的日变化在5—8月具有从清晨降水向午后降水转变的特征，这与季风环流和季风雨带南北移动密切相关，且在不同的大尺度环流背景下，降水对地形强迫作用的响应也存在差异。中国气象局武汉暴雨研究所崔春光研究员强调了在“梅雨强降水—异常环流”对应关系、降水云系水凝物存在双峰结构及其热动力结构特征、水汽和冷池对梅雨锋上中尺度对流系统激发和维持的动力作用、边界层急流、非绝热加热对梅雨锋及其降水的作用机制、降水云微物理过程与地面降水关系等梅雨锋降水云发生发展方面的机理研究取得了新的认识。

## 2 暴雨监测预警研究

中国气象局许小峰研究员指出，全球的云雨分布并不仅是在陆地或人类活动较多的区域，更多发生在广大的海洋洋面上，理想的选择是将雷达安装在卫星上，若能实现，则会改变对全球降雨缺少系统性完整测量的局面。国家气象卫星中心谷松岩研究员介绍了2023年发射升空的风云三号07星作为国内首颗低倾角轨道降水测量卫星，主要用于灾害性天气系统强降水监测，提供全球中低纬度地区降水三维结构信息。中国气象科学研究院刘黎平研究员讨论了X波段相控阵天气雷达的数据质量控制和临近预报方法，认为该雷达作为现有的S波段雷达网的补充和加强，能够实现雷达数据的高时空分辨率探测，提高快速变化的小尺度对流系统的监测和预警能力（如龙卷、下击暴落、冰雹等），提高复杂地形区域的降水估测能力，同时，提高雷达的稳定性和可靠性。

## 3 洪水及暴雨次生灾害研究

洪水及暴雨次生灾害主要围绕水文气象预报服务业务、定量降水预报/估算产品在水文中的应用、水文集合预报、暴雨诱发地质灾害机理及预警系统等展开。国家气象中心根据《现代气象预报业务发展规划（2016—2020年）》，完善了水文气象预报模型，开展水位流量预报业务，建立了基于智能网格的流域气象风险预评估模型，搭建了集综合分析、会商支撑和产品制作系统平台于一体的国家级水文气象业务系统，提出了基于“一个平台”“两个模型”“三大重点”和“四个拓展”的国家级链条式水文气象业务的行动规划，旨在进一步强化智能网格降水业务体系的建设和融合发展。中国气象局武汉暴雨研究所构建的集实时水文气象监测、预报于一体的流域水文气象实时预报系统，2020年作为中国气象局四大代表性成果入选科技部支撑防汛救灾科研成果。武汉大学等单位基于TIGGE集合预报数据，引入贝叶斯模型开展了集合预报统计后处理技术研发，将单一确定性预报转化为可能发生的概率预报，发展了水文概率预报方法。

（作者单位：李傲，湖北省公众气象服务中心；徐明，中国气象局武汉暴雨研究所）

# AI助力数据驱动是否会改变NWP? ——ECMWF-ESA主题会议评介

■ 魏晓敏

2022年11月14—17日，欧洲两家最重要的气象及相关机构——欧洲中期天气预报中心（ECMWF）和欧洲空间局（ESA）共同主办了以“机器学习用于地球观测和预报”为主题的学术会议。ECMWF关注的数值天气预报（NWP）和ESA关注的地球观测，都是人工智能（AI）技术应用最为活跃的领域。两家机构共同促成了该主题学术交流活动，到2022年已经是第3次（2020年10月首次举办，近400人参会）。这项旨在展示这一快速发展领域的最新发展前沿、促进科学家和业务人员之间交流的活动，是两家机构最为重要的年度学术系列活动之一，影响越来越大，成为促进AI技术气象业务化应用的重要推动。

此次为期4天的研讨会涵盖4个专题，即用于地球观测的机器学习、数据同化中的混合机器学习、用于模式模拟和模式发现的机器学习，以及面向用户的地球科学应用的机器学习等，吸引了大量学者。会议包括43个口头报告，40个墙报，内容十分丰富。

从会议开幕仪式上ESA领导人的致辞中可以看出，机器学习（ML）所代表的AI技术会更加全面地在地球系统观测和预报（ESOP）中得到应用。不仅如此，ML在ESOP领域的应用，将过渡和落地至AI在数字孪生地球的应用，从而贯穿数据、资料同化、模式模拟和数字孪生这一地球系统应用全链条的主要环节。

与传统的动力学研究思路不同，利用AI技术开展以数据驱动为特征的全新地球系统研究，是一个涉及多领域AI技术、多圈层地球观测以及数字融合多个机制和结构研发的宏大系统。在该系列会议的3年时间里，无论从参会专家分布，还是会议内容来看，全球已经完成了将AI技术融入科技创新活动并得到初步成效的转变。可喜的是，这样的转变从一开始，就是构建在学界与商业界共同努力的基础上，双方发挥各自优势并有机融合，展现了针对地球系统这一更复杂的系统学商联合创新攻关的新格局。在这样的新格局中，以ECMWF为代表的欧美主要气象中心，依然保持创新活力并引领着这样的转变；以谷歌等公司为代表的高科技企业积极贡献算法和智能计算等优势和智慧，共同成就AI快速走进气象应用。这一点，从本次会议参与者中有部分是来自企业和气象业务中心的学者可见一斑。

本次会议的4个主题中，地球观测ML涉及领域甚广，从太阳能、野火探测、云探测、降水反演到海洋学/叶绿素探测和测地学，涵盖了地球科学各个学科。正因为涉及面广，ML对多样性变量和参数观测结果的重复能力及可解释性是一个严重挑战；其次是业务化和社会可用性问题，理论上与物理感知ML的先验物理知识和约束有关，还涉及互用性与已有非ML工具的融合。

另外，鉴于混合数据同化主题的重要性和价值显而易见，会议强调：1）有必要完全基于AI的分析更新，如利用神经网络进行分析更新，并采用对抗性的方法绕过高斯假设；2）采取混合ML/DA（Data Analysis）方法，如模型杂交、将基于物理的模型与统计模型相结合；3）采用预报/订正的AI，包括使用ML对观测值进行预处理；4）应用ML重建过去的气候。

用于模式模拟和模型发现的机器学习，是直接挑战NWP模式的一个研究方向。在模型发现方面，本次会议专门报告不多，但可以推断以AI模型为工具的新发现，或许远远超过NWP模式成功后带来的成果。

最后一个主题：面向用户的地球科学应用ML，是直接研究ML的业务化和具体应用。首次亮相的应用领域是短临降水预报和极端事件的探测和预报，如热带气旋预报；其次是气候事件预测与气候风险。此外，更多的应用来自太阳能、能源分配、水圈、环境预测、野火预测和河流流量预测、公共卫生和工业应用、航空飞行计划等丰富领域，凸显了AI与数字化碰撞的广泛影响。

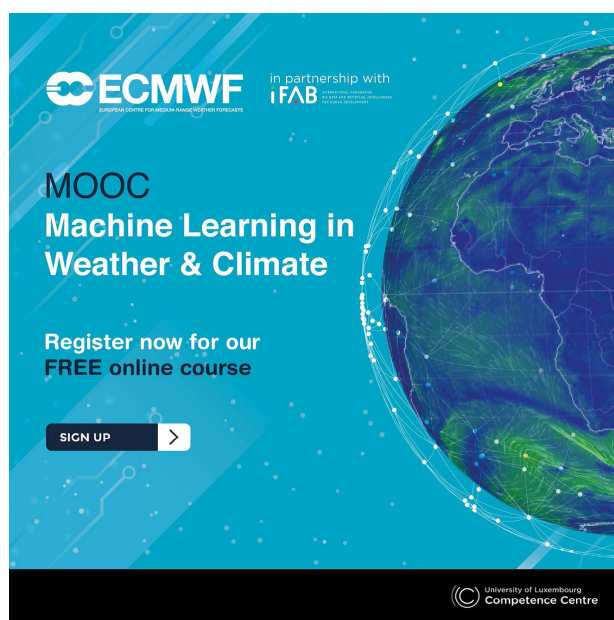


图1 ECMWF开发的机器学习应用慕课

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

**Supervisor** China Meteorological Administration (CMA)  
**Sponsor** CMA Training Centre  
Chinese Meteorological Society  
**Published by** Editorial Office of Advances in Meteorological  
Science and Technology

**Honorary Editor** Chou Jifan, CMA Training Centre

**Editor-in-Chief** Xu Xiaofeng, CMA

### Associate Editors-in-Chief

Wang Zhiqiang  
Wang Jinxing  
Xiao Ziniu  
Zhai Panmao  
Yao Xuexiang  
Li Weijing  
Hu Yongyun  
Tan Zhemin  
Sun Jian  
Fei Jianfang  
Zhao Licheng  
Zhang Peng  
Guan Zhaoyong  
He Jianxin  
Huang Jianping  
Liao Xiaohan  
Zhang Meng (executive)

### Managing Editors

Chen Jinyang, Cheng Xiuhu, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang,  
Jia Pengqun, Li Bai, Li Guoping, Luo Yunfeng, Ni Yunqi, Qu Xiaobo,  
Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang  
Huaigang, Wu Bingyi, Xiong Shaoyuan, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding,  
Zhang Chaolin, Zhang Qingyun, Zhao Ping

### Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin,  
Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He  
Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu,  
Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming,  
Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu  
Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing,  
Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang  
Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin,  
Wang Shigong, Wang Weidan, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang  
Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang,  
Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang  
Zhaoming, Yi Lan, Yu Yubin, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang  
Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao  
Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou  
Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou  
Liyao, Zou Xiaolei

### Editorial office

Zheng Qiuhong, Lu Bing, Li Li, Hou Meiting, Cui Xiaojun

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

Tel: +86-10-58993291/68409927

Email: qxkjz@163.com

http://cmalibrary.cn/amst

### Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

## Main Contents

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

### Survey

2 Jia Pengqun, Li Jinghua/ Clausius-Clapeyron Equation Passing 190  
Years: A Forever Classical Rule Across Physic World

### Cover Story

5 Yang Yanru, Deng Xingchen, Yu Yueyue, Zhou Yu, Tan Jiaming,  
Gu Jinsui/ Investigation on the Current State of Extended-Range  
Forecast and Its Cooperative Operation System in China

### Progress

16 Chen Lifan, Cao Lijuan/ The Progress and Prospect of Sea Level  
Observing System and Data Product Development  
26 Zhao Yanxia, Chen Sining/ Progress in the Theory of Weather Risk  
Management and Its Practice  
38 Zhang Feiyan, Jiang Ying, Zhang Rijia/ Climatic Background  
Analysis for Canoeing and Rowing Event in the 19th Asian Games  
Hangzhou 2023  
44 Zhang Jie, Zhang Xiaolong, Chen Bozhou, Chen Zifan/ The Spatial  
Consistency Test Method for the Three Elements of Meteorology  
Based on Data Mining

### Special

49 Yin Heng, Xia Jin, Yin Xin, Wen Qiang, Zou Ying, Huang Rui/  
Vertical Variation in Air Temperature on the North Slope of Wudang  
Mountain  
53 Bao Sulungaowa, Wang Yifei, A Rong/ Analysis on the Possible  
Influence of Weather Factors on Skiing  
58 Zhang Yanan, Luo Hao/ Preliminary Analysis of Causes of Low-  
Level Wind Shear at Guiyang Airport  
67 Yao Zhenhai, Jiang Chun, Yao Yeqing, Ding Hao, Zhuge Jie, Ma  
Shaoxiang/ Analysis on Meteorological Standards Setting of Civil  
UAV Operation and Construction of Meteorological Support  
System

### Forum

73 Yang Hanwei, Chen Qi, Sun Landong, Wu Wei, Liu Suxiao/  
Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality Action Plan: Typical  
Cases and Enlightenment of Domestic and Foreign Achievements

### History

80 Wan Jinhong, Sun Dabing, Zhang Baowei/ Reporting System of  
Drought and Flood Disasters in Qing Dynasty

### Reading

89 Yao Zhanyu/ Exchange and Cooperation between China and Arab  
Countries on Weather Modification  
91 Li Chao, Bao Yafang/ The Perspective of the Integrated  
Development of Social Sciences and Meteorological Services from  
the 1st "Weather and Society" Conference  
96 Li Ao, Xu Ming/ 2023 East Lake Forum on Rainstorm: Promoting  
Frontier Research on Rainstorm  
Inside Back Cover Wei Xiaomin/ ECMWF-ESA Conference  
Review: Will NWP Be Changed by AI-Facilitated Data Driven  
Technologies?