

气象科技 **进展** Advances in Met S&T



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

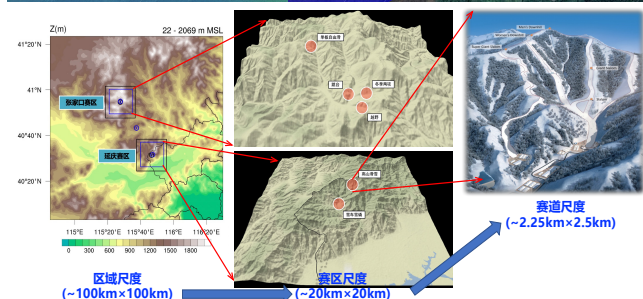
**常务编委** (按音序排名)  
陈金阳 成秀虎 龚建东 郭虎 郭学良  
李柏 李云平 罗云峰 倪允琪 曲晓波  
任国玉 任小波 沈文海 王存忠 王怀刚  
武炳义 熊绍员 杨修群 俞小鼎 张朝林  
张庆云 赵平

**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 何金海  
何清 胡欣 胡跃文 姜彤 金飞辉  
雷小途 李集明 李俊 李良福 李耀平  
李跃清 李忠 李旭东 刘晶森 刘黎平  
刘立成 李实 梁征宇 卢乃锰 陆宇辉  
罗兵 罗亚丽 马舒庆 马耀明 陆彭莹  
浦一芬 宋燕 索沙清 汤绪 田红林  
万齐林 王斌 王斌(海外) 王海元 王建林  
王式功 王延青 王迎春 王元  
王自发 卫晓莉 温敏 王翁富 吴立广  
谢志辉 闫冠华 延晓冬 杨萍 杨崧  
杨昭明 伊兰 于玉斌 翟武全 张大林  
张广俊 张立祥 张玲 张跃堂 赵广忠  
周定文 周建华 周凌晔 周显信 朱定真  
朱小祥 朱玉洁 祝燕 邹立 邹晓蕾

**编辑部**  
张萌 马杰 李莉 侯美亭 武欣蕊  
崔晓军 韩国琳  
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) 58993291/68409927/68409933  
邮箱: amst@cma.gov.cn  
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: 张萌 马杰

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



本刊已被万方数据、《中国学术期刊网络出版总库》和CNKI系列数据库以及《中文科技期刊》(维普网)全文收录,相关著作使用权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11卷 第6期 2021年12月20日

### 科学观察

- 2 许小峰: 相伴而生、相依同行的航空与航空气象

### 封面报道

- 8 陈明轩, 付宗钰, 梁丰, 金荣花, 薛红喜, 李靖, 刘凑华, 甘璐, 孙超, 时少英, 王宗敏, 陈昊明: “智慧冬奥2022天气预报示范计划”进展综述

### 气象发展前沿报告

- 14 闫伟兄, 李剑萍, 金燕, 张永霞, 赵俊芳: 土壤湿度模拟研究进展

### 研究进展

- 21 宋燕, 周雅清, 李智才, 张薇, 孙必云, 索琳, 毕训强, 肖天贵, 张红英: 高原积雪对太阳活动响应及其放大作用的研究进展  
31 汪靖, 张少波, 袁利平: 西南地区极端降水变化特征分析

## 主编语

奥林匹克运动会分夏季和冬季运动会，同样都是每4年举行一次，曾经是在相同年份举办。从1994年起，冬奥会与夏奥会以2年为间隔交叉举行，为了将时间错开，1992年冬奥会与1994年冬奥会仅相隔2年。北京在2008年成功举办了夏季奥运会后，2022年又将与河北省张家口市一起，作为冬季奥运会的主办城市，奥运历史上第一个主办过夏季和冬季奥运会的“双奥之城”就此落户北京。北京能荣获此殊荣，首先得益于其有利的地理位置，位于中纬度，受季风气候影响而四季分明。夏季的温暖有利于运动员调节体能，冲击运动的极限；冬季的寒冷则受到冰雪运动员的喜爱，也有助于留住赛场上洁白的积雪。

然而，冬奥会大量雪上项目要在自然环境下进行，这对气象条件提出了较为苛刻的要求，气象保障能力成为考验一座奥运城市科技底蕴的重要条件。本期封面和与封面相关的研究论文(P8)，展示了历经多年准备，北京冬奥会气象保障工作的全

景图，相信会让读者对北京冬奥会的成功，又多了一份自信。飞机作为各国运动员参加奥运会最重要的交通方式，同样也离不开气象保障。本期科学观察栏目就航空与航空气象相依相生的发展历程进行了阐述。而另外两篇与冰雪有关的文章，涉及高原积雪的气候放大作用研究(P21)和对国家气候标志“中国雪都”效益的分析(P65)，诠释了能让液态水固化的低温带给我们生活的星球更丰富的景观和多样的生活环境。针对5G(P61)、智慧气象(P71)和“满铁”时期气象观测(P76)等主题文章，则体现了科技发展前沿性和让历史气象信息在大数据时代被充分挖掘的意义。而针对土壤湿度(P14)、低温(P38)和极端降水(P31)、作物产量(P49)的研究，从不同侧面揭示了气象要素和气象事件的本质以及它们之间的各种可能的联系。

许小峰

## 专题 基层气象现代化

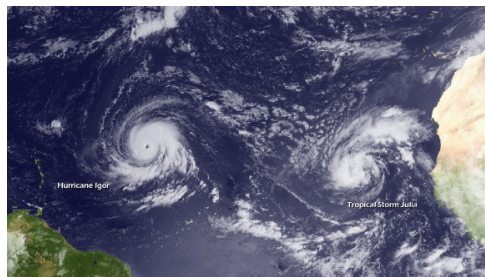
- 38 李晓霞, 李常德, 马真, 赵慧, 高玲: 甘肃省平凉市春季一次罕见寒潮低温天气的极端性分析
- 44 郭青, 李源锋, 高国靖, 郭春辉, 郭志萍, 曾惠娟: 广东一次强飏线过程的地闪变化特征分析
- 49 彭丽英, 麦宗鉴, 王华, 武君, 黎坚, 李英: 基于积分回归的花生产量气候影响因子研究
- 52 邓见英, 曾海鹏, 黄卓禹, 吴艳林, 刘臻婧: 娄底市生态旅游气候资源分析
- 57 周英, 袁久坤: 三峡水库分流域面雨量预报检验系统研究

## 论坛

- 61 刘珺, 张寅伟: 5G时代气象媒体融合的发展与服务创新
- 65 李冬梅: 国家气候标志“中国雪都”产生的旅游综合效益分析
- 67 耿蓉: 基于气象服务大数据洞察平台的用户行为分析
- 71 段文广, 范飞勇, 刘燕, 张玲, 王骥, 石永玮: 智慧气象服务融入智慧城市时空信息云平台的思考与探索

## 阅读

- 74 王元红, 戚兴宇: 一次集体书写气象历史的有益尝试——《雪域风云路》统稿体会
- 80 AMS词汇 韩国琳, 王春竹: 大地水准面(geoid)
- 80 AMS词汇 沈悦, 王春竹: 地中海涡流(MEDDY)
- 封三 AMS词汇 王春竹: 藤原效应(Fujiwhara effect)
- 封三 AMS词汇 王春竹: 电离层突扰(Sudden ionospheric disturbance)



封三

## 台站巡礼

- 76 陈杰, 吴杨, 谭昕, 徐亚琪, 宋文锦: “满铁”时期建立的气象站网及其气象资料的主要应用

# 相伴而生、相依同行的航空与航空气象

■ 许小峰

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.001

## 1 相伴而生

没有航空的出现,显然也谈不上航空气象保障,从这一简单推论出发似可以得出结论,航空应早于航空气象出现,时间上有先后。但若从另一个角度分析,如果将航空气象保障作为航空作业的必要条件,时间发生顺序或许就会改变。具体考察两类活动发生的时间节点,可以发现有一定重合性,至少若从现代动力飞机试飞成功那一刻算起,气象保障也同时启动了,应该说航空与航空气象相伴而生应算是客观的。

1903年12月17日,美国北卡罗来纳州的基蒂霍克(Kitty Hawk)天气寒冷,刮着大风,空旷的沙滩上停放着一个带着巨大双翼的怪家伙,这是美国发明家莱特兄弟(Wright Brothers)设计的动力飞机——“飞行者一号”(图1)。10时35分,哥哥奥维尔(Orville Wright)爬上“飞行者一号”的下机翼,手中紧握着木制操纵杆,弟弟威尔伯(Wilbur Wright)开动发动机并推动它滑行。飞机达到一定速度后,威尔伯松开手,飞机升起,飞行了12 s,共36.5 m,又落回到沙滩上,这一短暂的腾空标志着人类历史上第一架动力飞机首飞成功,人们梦寐以求的动力航空时代由此拉开帷幕,莱特兄弟创造了历史。当天,莱特兄弟又轮流进行了3次飞行。最后一次,威尔伯用59 s飞了260 m。不幸的是,几分钟后,一阵狂风把“飞行者一号”掀翻

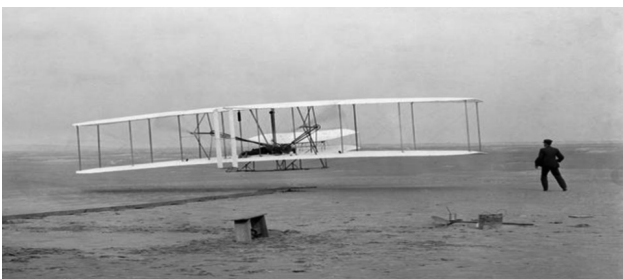


图1 1903年12月17日世界上第一架动力飞机首飞成功

### 【编者语】

航空气象保障是气象业务服务中最重要的领域之一,其中存在的一些问题也是大气科学领域所关注的难点。航空业的发展与气象条件密不可分,同时也为气象科技与业务提供了大量宝贵信息。文章通过对一些史实的回顾和分析,梳理了航空与气象发展的密切联系,揭示了一些重要事件发生的因果关系,并对当前和未来如何进一步加强航空与气象服务保障的关系和推进航空气象发展进行了探讨。

了,飞机严重损坏,但已经完成了历史使命。

美国天气局在这次首飞中发挥了重要作用,1875年1月北卡罗来纳州在基蒂霍克建立气象台。为了确定试飞的最佳位置,莱特兄弟在实施试飞的三年前就写信给基蒂霍克气象台进行咨询,希望提供预期天气状况的信息,并收到了气象台工作人员多舍尔(Joseph Doshier)

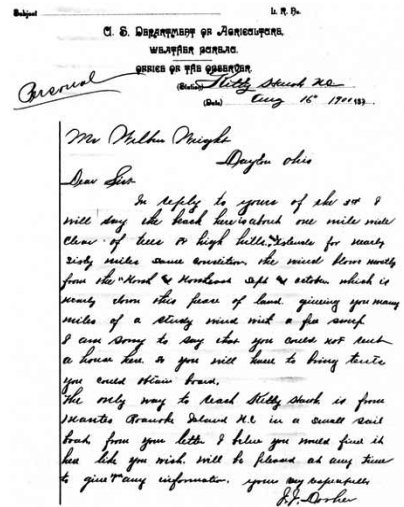


图2 基蒂霍克气象台多舍尔1900年8月给莱特兄弟的回信,介绍了基蒂霍克海滩的基本情况

的积极回应(图2),预计9月和10月会有大约60英里(1英里 $\approx$ 1.609km)宽的海滩,盛行东北偏北风,几乎直吹海滩,存在数英里的一致风向。这一预测促使莱特兄弟确信基蒂霍克是实现他们梦想的最佳场所<sup>[1]①</sup>。1903年12月17日下午近傍晚,奥维尔步行至基蒂霍克气象台,向其父亲发送一封电报(图3),详细介绍了当天的成功。

从动力飞机首次试验成功的完整过程看,至少发生了这样几件事:试飞之前莱特兄弟向气象台进行了咨询;气象台提供了及时气象服务,对试飞地点的选

收稿日期:2021年11月1日

第一作者:许小峰(1957—),Email: xuxf@cma.gov.cn

资助项目:国家自然科学基金项目(42142009);中国气象局气象干部培训学院科研项目(重2021-015)

① OAA's National Weather Service. December 17, 2013 Marks the 110th Anniversary of the Wright Brothers' First Flight, 2013. <https://www.weather.gov/mhx/FirstFlight>.

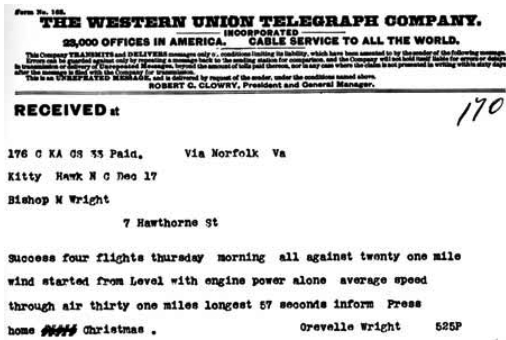


图3 奥威尔从气象台向其父亲发出的试飞成功电报

择和天气状况做了分析；飞机首次试飞成功；后续再试时遭遇了天气袭击，发生气象事故；试飞成功的重要消息通过气象台的通信系统对外发出。这些事件都可作为首飞成功的一部分，若硬要区分前后，判定气象保障在前与史实也是吻合的，但若将试飞成功与气象保障都作为一个完整过程来看待，相伴而生则更为准确。重要的是从首飞成功遇到的情况人们已认识到天气对飞行的重要性，从而伴随航空业在需求与技术的双重推动下快速发展的同时，航空气象保障也迅速成为气象业务最重要的组成部分之一。1909年，美国陆军通信兵从莱特兄弟那里以25000美元的价格购买了第一架飞机，军队的需求对航空和航空气象的发展起到了极大的推动作用。

## 2 相依同行

航空气象一般会被认为是气象如何适应航空需求并有效提供服务保障的科学与业务体系，实际上，航空业的发展对气象而言并不仅是单纯的依赖关系，同时也为气象提供了重要支持，可谓是关联密切的命运共同体。

在20世纪初，与动力航空试飞成功相近的时间阶段，也正是气象科学的发展开始从关注地面天气变化转向探索三维立体大气的整体演变规律的转折时期，欧、美、俄罗斯等一些国家的气象学家通过各种方式探索高空探测的有效方法，风筝、系留气球携带探测仪器等方式等都被作为试验选项。1894年，在美国波士顿Blue Hill观象台放飞了第一支携带测量大气环境记录仪的风筝，标志着高空观测业务的开始，但风筝或系留气球的探测高度都受到限制，一般不会超过3~4 km。1902年，德国气象学家理查德·阿斯曼（Richard Assmann）最早发明用橡胶气球探测大气，通过对橡胶球皮进行特殊处理，使气球升空后可以膨胀到直径达到释放前两倍以上才爆炸，探测高度可提高到20 km以上<sup>[2]</sup>。这项技术为最终在业务上选择气

球携带无线电探空仪放飞升空，有效获取高空大气垂直廓线信息做出了重要贡献，也对促进航空气象的发展具有重要价值。

气象学家阿斯曼与航空气象有不解之缘，他在地球大气高空探测领域做出了许多贡献，这些成果也是航空科技发展必不可少的基础性工作。阿斯曼也被认为是科学航空学的创始人之一。1887年，他加入了成立于1881年航空促进协会，在动力飞机发明之前，所谓航空主要是通过热气球实现。1888—1899年阿斯曼发起并组织了该协会的科学航空，通过载人自由气球上升来探索大气层。为了获得航空所需的气球，阿斯曼多方筹集资金，最终获得德皇威廉二世5万马克的资助，1893年，制造出了洪堡气球（Ballon Humboldt）（图4）。洪堡载人气球的第一次升空为1893年3月1日，阿斯曼亲自参加了飞行。整个过程都还算顺利，但在着陆时出现了小故障，阿斯曼为此付出代价，摔断了右腿。从中可以看出，当时所谓航空的一个重要任务就是研究大气活动。1888年6月2日，柏林普鲁士气象研究所所长威廉·冯·贝佐德（Wilhelm von Bezold）在德国航空促进协会第100次会议上发表了题为“航空对气象学的意义”的演讲<sup>[3]</sup>，描绘了气象与航空在高层大气探测方面的合作前景，也反映出航空与气象的密切关系。1892年，阿斯曼与飞艇设计师鲁道夫·汉斯·巴奇·冯·西格斯菲尔德（Rudolf Hans Bartsch von Sigsfeld）一起开发了一种用于精确测量大气湿度和温度的干湿表，能够保护其测温元件免受太阳辐射，是第一台能够为高空气球提供可靠温度记录的仪器。

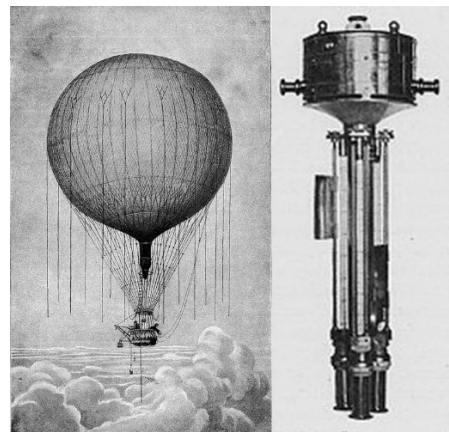


图4 洪堡气球与阿斯曼干湿计

阿斯曼在研究高空大气过程中也取得不少原创性进展，其中最重要的成果之一是发现了对流层顶和平流层。1902年5月1日，他向普鲁士科学院提交了一篇

题为《关于10~15 km暖气流的存在》的论文<sup>①</sup>，与同时发现这一现象的法国气象学家莱昂-菲利普·泰瑟伦德·博尔特（Léon Philippe Teisserenc de Bort）共享了这一突破性成果。阿斯曼1905—1914年担任著名的德国林登伯格气象观测台台长，2005年10月16日，该观测台成立100周年时，增加了一个新名称：理查德-阿斯曼观测台（Richard-Assmann-Observatory）。

从航空发展看，1903年莱特兄弟首飞成功后，动力飞行器发展迅速，很快进入到实用阶段。1911年6月，32岁的卡尔布雷斯·佩里·罗杰斯（Calbraith Perry Rodgers）向奥维尔学习了90 min的飞行课程，并从奥维尔那里购买了一架飞行器，这架飞机的26 kW发动机可以在1000英尺（305 m）上空以每小时50英里（80 km/h）的速度飞行。飞机以一种软饮料Vin Fiz命名，目的是为完成横跨美国东西大陆飞行获得经费支持。罗杰斯于1911年9月17日下午从纽约布鲁克林的羊头湾赛马场架机起飞（图5），沿途落地检修75次，包括16次因遭受严重碰撞，罗杰斯也多次受伤，甚至遭受脑震荡和脊椎扭曲。最终，在地面支持团队的护驾下，飞机最终于12月10日降落在加州海滩上，罗杰斯完成了这次创纪录的航程，飞行距离超越4000英里（即6400 km）<sup>[4]</sup>。1919年，美国海军的一架飞机经两次停靠后完成了首次跨大西洋飞行。

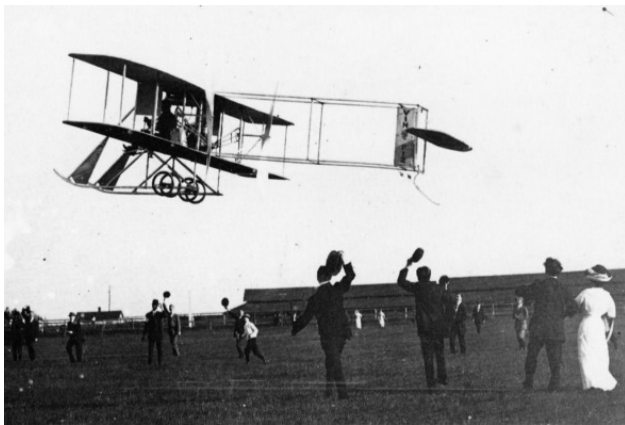


图5 1911年9月17日，罗杰斯驾驶的“Vin Fiz”飞机（莱特模型EX双翼飞机）从纽约布鲁克林的羊头湾赛马场起飞，第一次横穿美国大陆的航班的开始

罗杰斯长距离飞行成功的轰动效应及动力飞行技术的快速发展，为飞机的使用打开了广阔空间，也产生了两类与气象相关的直接需求：一是如何确定适合于飞行的天气信息，二是如何利用飞行器获取空中气象信息，这也进一步印证了航空与气象的密切关联。而对动力飞机发展起到了刺激作用则是战争，首次将飞机用于战争的是意大利人。1911年，在的黎

波里附近对抗土耳其人时，意大利的朱利奥·加沃蒂（Giulio Gavotti）中尉（图6）驾驶飞机向对方部队投掷了一枚炸弹<sup>[5]</sup>。而在随后不久的一次世界大战期间（1914—1918年）则广泛使用了飞机，英、法、德、俄、美等国都在战争中迅速发展了其空中力量，投入战争的各类飞机总量超过20万架，从最初的仅用于侦察，到后来用于轰炸和扫射攻击，敌对双方都体会到了空中优势的重要性。除战斗外，飞机也成为提供战场环境天气观测的重要工具，当时一个重要需求来自于要满足远程火炮准确射击，高炮发射需要掌握大气信息来确定炮弹轨迹，而配备气象传感器的飞机可以探测到从地面到4000多米高度的气象要素变化。同时，飞机的出行也必须掌握天气信息，自身不安全，也无法发回准确信息。



图6 朱利奥·加沃蒂 (Giulio Gavotti) 中尉在控制法曼双翼飞机 (1910年, 罗马)

气象与航空在合作发展中确实做到了相互促进，受益共赢。

### 3 国际航空气象保障体系的确立

一战结束后，航空技术的发展和影响受到空前重视，1919年10月13日，26个国家在巴黎签署了《关于管理空中航行的公约》，即《巴黎公约》。主要解决了领空主权、外国航空器通行权等问题，该公约1922年经批准生效，并在公约基础上创建了国际空中航行委员会（International Commission for Air Navigation, ICAN）于1922年12月在巴黎设立总部。

面对激增的军用航班和新开辟的邮件航线，对天气预报的需求也随之增长，美国天气局从1918年逐步为每个机场都安装广播电台，所有的飞机都可通过无

① Assmann R. Ber die Existenz eines wrrmeren Luftstromes in der Hhe von 10 bis 15 km. 1902.

线通信接收到天气报告。1925年美国国会正式批准邮局可以授权民用航空企业可以提供邮件服务，为航空业的发展开辟了持续的经费支持渠道。1926年美国国会通过了《航空商务法》（Air Commerce Act），通过立法要求气象局提供航空天气报告、预报和警告，促进空中航行的安全和效率，主要影响飞行安全的危害性天气包括积冰、雪、雾和低云、风、湍流和雷暴。可以看到航空业起步较早的美国对于航空气象保障的理解是比较到位的，保障重点分为机场和航线，并对引发航空灾害的天气现象做了重点划分。特别是到了20世纪30年代，客运航班逐渐成为普遍性业务，但通常飞机只能搭载10~15人，且只能在较低的高度飞行，既带来了交通上的便利，也存在较大风险，或者说乘飞机既有乐趣，也是冒险。其中，除飞机本身的问题外，对天气的依赖度非常高，存在很大不确定性。1939年，跨大西洋客运航班开始，到1941年，每周飞越北大西洋的飞机达数百架，进一步加大了对气象保障的需求，包括对高空天气信息的获取。且随着飞行高度的增加，一些新的需求也随之出现，如对高空风的影响，特别是急流区的存在，对飞行的影响很大，如风切变、晴空湍流等。1944年，一支盟军轰炸机群前往柏林，预计最大风力为20 m/s，实际遇到的风速达54 m/s，导致72架飞机坠毁的重大损失。若果缺少高空观测，或对高空风的分布与变化缺少足够认识，类似的事件就难以避免。

由于二战期间空军的作用与一战期间已不可同日而语，成为影响战争胜负的重要力量，一些国家的有识之士和政策制定者预计到战争结束后，商业航空将面临难以估量的发展态势，形成全球范围的广泛需求，而这一即将来临的民用航空新时代需要扎实的国际合作基础。为此，美国政府邀请了55国代表（54国到会）于1944年11月在美国芝加哥召开了富有远见的国际航空会议（International Aviation Conference in Chicago），那时战争还未结束。会议从11月1日—12月7日（图7），最终由52个国家签署了《国际民用航空公约》，即著名的“芝加哥公约”（Chicago Convention on International Civil Aviation）。这一具有里程碑意义的协议为建立全球标准和规范、和平推进全球民用航运奠定了基础，并确定要建立一个负责协调全球航运规则的国际民用航空组织（ICAO）。由于《公约》的批准需要时间，先建立临时国际民航组织（PICAO）作为临时咨询和协调机构。1946年6月在加拿大蒙特利尔举行了第一届PICAO大会，蒙特

利尔以27票支持被确定为国际民航组织永久总部所在地。1947年4月4日，《芝加哥公约》获得足够签约国批准后生效，同日，国际民航组织（ICAO）正式成立，第一次大会于当年5月在蒙特利尔举行<sup>①</sup>。如今已有190多个成员加入了ICAO，签署了12000多个项国际标准和措施（SARP），这些SARP为推动国际航空网络的发展和相关技术进步发挥了重要作用，堪称二战后最有成效的国际合作项目之一。



图7 1944年11月首次国际民航会议在美国芝加哥举行

芝加哥公约原有18个附件，包括各类标准和措施，2013年新增了附件19《安全管理》。附件3为《国际航行气象服务》（Meteorological Service for International Air Navigation），对机场和航线上的气象保障提出了具体要求，包括各类气象要素、天气系统及通信方式等。

芝加哥公约生效后不久，发生了另一件与其相关的重要事件，1947年9月在华盛顿召开的各国气象局长会议，有45个国家和30个地区气象组织机构负责人参加的这次会议，决定把已成立了70多年的国际气象组织（IMO）改组为政府间机构：世界气象组织（WMO）。10月11日签署了《世界气象组织公约》，1950年3月23日该公约批准生效，1951年，联合国大会通过决议，将世界气象组织作为联合国的一个专门机构。这一变化的主要原因是考虑到建立全球气象业务体系所需的国际气象合作需要在各国政府支持下才有可能实现。

在联合国统一框架下，ICAO与WMO很快建立了工作联系，在航空气象服务领域明确了各自分工，ICAO负责制定对国际航空气象服务的要求，WMO负责建立满足这些要求的方式并制定提供服务的标准。这些需求、标准及服务方式会随着时间有所调整，需要经过ICAO和WMO理事会批准，一般三年

① Travel C A. Chicago Convention on International Civil Aviation.

会审议一次，若是需要做出重大变化，则应由ICAO的气象司和WMO航空气象学委员会(CAeM)召开联合会议审议，这样的联合会议通常每十年举行一次<sup>[6]</sup>。从ICAO和WMO这两大国际组织的建立与合作可以看到，航空与气象虽都有了各自的发展领域和方向，但仍保持着密不可分的联系，有着无法分割的相互需求。

#### 4 世界气象组织与国际民航组织的两项重要合作

WMO与ICAO自成立以来，一直保持着富有成效的合作，取得了多方面的成果，其中有两个项目对保证航空运输安全和气象科技水平提升具有重要作用。

##### 1) 飞机资料中继下传 (Aircraft Meteorological Data Relay, AMDAR)

19世纪60年代末至70年代，为了研究全球大气对流层和平流层的物理过程变化，WMO与国际科学联合会(ICSU)共同组织了一项全球大气研究计划(GARP)，其中包括第一次全球试验(FGGE)、大西洋热带试验(GATE)、气团变性试验(AMTEX)、季风试验(MONEX)、西非季风试验(WAMEX)和极地试验(POLEX)等若干分计划。其中FGGE计划中包含了当时全球几乎所有可以调用到的大气探测手段，包括地面观测、高空探测、船舶观测、浮标站观测、志愿船舶探空、飞机下投探空、极轨卫星、静止卫星等，其中，将商用飞机探测信息的收集纳入到了计划当中，即AMDAR项目。当时至少有80架装有气象探测仪器的飞机参与了试验。为了实现飞机资料实时传递的目的，还开发出了两个通信支持系统，基于卫星传播的ASDAR系统和基于标准甚高频通信的ACARS系统，这一信息获取方式迅速获得世界范围认可，并持续发展至今<sup>①</sup>。为了实现既定目标，WMO与ICAO进行了密切合作，包括相关文件和标准的制定，必要的资金支持等。WMO执行理事会在1997年第四十九届会议上决定设立一个AMDAR专家组，由运行或打算参与该项目的国家级WMO会员组成，1997年11月在荷兰德比尔特召开筹备和成立会议后，AMDAR专家组的第一次正式会议于1998年在日内瓦WMO总部举行。从那时起，全球AMDAR计划的发展非常迅速，许多WMO会员已经建立了国家AMDAR计划或参与了区域AMDAR计划，这导致建立了一个全球飞机探测资料获取计划，目前参与

AMDAR计划的飞机达数千架，每天可以获取80多万条观测信息，通过WMO的全球通信系统(GTS)进行国际交换(图8)，这已成为全球大气观测系统的重要组成部分<sup>[7]</sup>。

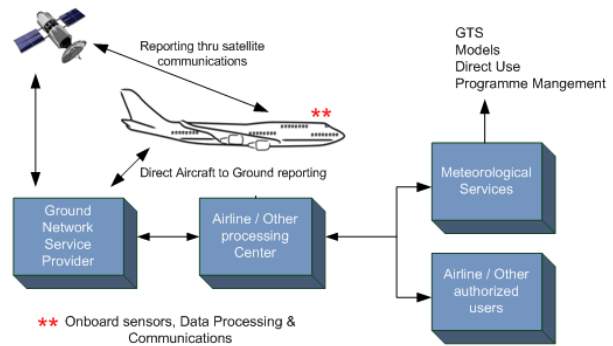


图8 AMDAR信息流程图

##### 2) 世界区域预报系统 (WAFS) 与世界区域预报中心 (WAFc)

AMDAR最初是WMO从提升大气科学研究与业务水平的需求角度出发，对及时获取飞机探测资料提出计划，在ICAO的支持下，最终逐步转化发展成为受到各国欢迎的重要气象信息获取系统。而气象科技水平的提高显然有助于保障全球航空系统的高效安全运行，这是每个发展航运国家都面临的共同需求，但从提供及时准确的全球航空气象服务的能力角度，国家之间的水平差异很大，基于这一发展不平衡的状况，ICAO提出了构建全球统一的高水平航空气象预报服务系统的计划，且得到WMO的配合支持。1982年，ICAO与WMO协商，提出了面向航空用户服务的世界区域预报系统(World Area Forecast System, WAFS)计划，其主要内容是统一制作全球航空天气预报，并将这些预报信息迅速传递给航空用户。同时将一些原由若干个地区航空预报中心(RACF)的业务转移到WAFS。

统一制作全球预报的任务分别由设在气象科技与业务发展水平较先进的美国华盛顿和英国伦敦的两个世界区域预报中心(World Area Forecast Center, WAFc)承担，两个中心的预报产品都可以覆盖全球，形成互为备份，产品形式包括报文、图形、数值预报格点资料和重要天气报告，按照统一格式通过位于大西洋、太平洋和印度洋上空的商业通信卫星向国际民航组织成员国发送。伦敦中心和华盛顿中心分别于1995年4月和1995年5月开始发布产品(图9)<sup>②</sup>，构

① Gauber J M. Currently Developing and Future Communications and Technology Impact on AMDAR. World Meteorological Organization, 2016. <http://www.amc.namem.gov.mn/juram/wmo/26.pdf>.

② Johnson A. The world area forecast system. APANPIRG WAFS Service Specification, 2004.

成了目前全球范围提供和获取航空气象服务产品的总体格局。

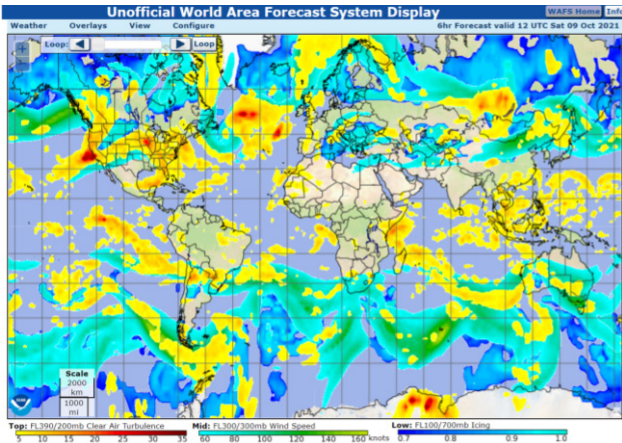


图9 华盛顿中心发出的不同高度格点预报图像产品,包括200 hPa湍流、300 hPa风场和700 hPa积冰

## 5 几点讨论

1) 航空业的快速发展仍然对气象有着广泛的需求

航空技术与航空业的快速发展,很大程度上提升了飞机抗击危险天气的能力,但仍不能说在任何天气条件下都能确保航行安全,一些航班在恶劣天气下遇险的情况仍时有发生。强雷暴、下击暴流、风切变、积冰、大雾、湍流等仍是需要尽量规避的天气;航空遇险的起因往往不是单一因素,但坏天气往往会伴随其中推波助澜,需要格外关注;航运的发展也面临着越来越高的需求,如准时起飞与到达、空中的平稳与舒适、节能减排等,美国学者曾通过对2000年影响美国航运系统航班出发与到达延误的各类因子进行了统计计算分析,包括交通量、飞机类型、飞机维护、航空公司运营、天气条件、途中程序变更、容量限制、客户服务问题及飞机或机组人员到达晚点等因素,结果显示,天气仍是造成航班延误的首要原因,占比为69%<sup>[8]</sup>。其他一些分析也表明,天气因素在航班延误中的占比一般都会超过50%;另外,通用航空的快速发展也会对气象服务提出更多需求,需要时空分辨率更高的精细化产品来支持。因此,加强对各类天气的监测与预报,仍是高质量发展航运业务需要关注的重点问题之一。

2) 飞机探测仍将是大气探测领域的重要信息来源

从进一步提升气象科技与业务水平的角度出发,发展海、陆、空、天立体观测体系是必要的基础条件。从目前的现状看,空基观测是相对薄弱的环节,特别是在缺乏无线电探空资料的广阔海域上空,飞机

资料就更加珍贵。检验飞机观测资料重要性的一个重要例证是2020年新冠疫情爆发后大量航运飞机停飞,造成飞机资料缺失,对全球天气预报准确率产生显著影响。2020年2月和3月初,欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)每天使用大约60万份飞机报告,而4月下半月每天只有不到15万份报告,减少约75%<sup>[9]</sup>。据ECMWF专家分析,飞机资料在预报中的各类资料的贡献率占比则从15%左右降至约5%。这一变化可以清晰表明飞机探测资料对提高天气预报水平的重要性,是空基观测的主要信息源。

3) 航空技术的变化将为气象业务提供新的支撑

近几十年来,天气预报准确率的稳步提升为航运业务提供了重要支持,同样,航空科技的发展也为气象业务的提升带来新的机遇,如近年来无人机的快速发展,预计将成为空基大气探测的重要补充。我国气象部门已开始进行各种试验或业务试用,通过不同性能的无人机针对实际需求获取各类信息,弥补空基探测的不足。在国际上,这类试验起步更早,如美国NOAA在2014—2016年期间就曾开展过利用全球鹰(Global Hawk)无人机对热带风暴进行观测评估的试验项目,结果表明,对风暴路径预报效果有了显著改进<sup>[10]</sup>。相对于陆基和天基观测,空基观测具有一定灵活性,特别是小型无人机,可以针对具体任务目标进行观测,相信在未来的大气探测领域会有其特定的发展空间。

4) 气象科技的发展也将为航空提供更好的保障

近年来,气象科技的快速发展和业务水平的提高对提升航空的安全、高效运行提供了越来越有力的支持和保障,特别是在基本探测和预报预测领域的提高效果显著。气象卫星的发展,使对全球大气进行完整的监测。中国、美国、欧洲和日本的静止气象卫星联手,可以每半小时进行一次全球范围的观测,配合低轨卫星的信息,中尺度以上的天气系统大多可以捕捉到。全球数值预报准确率不断提升,可用时间尺度已达9 d以上,空间分辨率可达千米级,区域精细化预报模式的分辨率可达百米。有了这些技术的支撑,航空气象的保障水平也会随之显著提升。

5) 中国需要建立航空与气象更为有效的协调机制

在中国,由于气象和航空气象管理分属两个部门,尽管已建立了较好的合作关系,但从充分、合理利用各方资源,不断提升航空气象预报服务能力,特别是瞄准世界先进水平,为我国蓬勃发展的庞大航空体系提供高质量气象保障服务的角度看,在体制机制

(下转20页)

# “智慧冬奥 2022 天气预报示范计划” 进展综述

陈明轩<sup>1</sup> 付宗钰<sup>2</sup> 梁丰<sup>2</sup> 金荣花<sup>3</sup> 薛红喜<sup>3</sup> 李靖<sup>4</sup>  
刘凑华<sup>5</sup> 甘璐<sup>4</sup> 孙超<sup>6</sup> 时少英<sup>4</sup> 王宗敏<sup>7</sup> 陈昊明<sup>8</sup>

(1 北京城市气象研究院, 北京 100089; 2 北京市气象局, 北京 100089; 3 中国气象局预报与网络司, 北京 100081;  
4 北京市气象台, 北京 100089; 5 国家气象中心, 北京 100081; 6 国家气象信息中心, 北京 100081;  
7 河北省气象台, 石家庄 050022; 8 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 简要介绍了“智慧冬奥2022天气预报示范计划”的主要目标、组织方式、产品情况, 阐述了为组织本次示范计划所开展的平台技术研发成果和在2021年冬奥测试活动中的初步应用成效, 也总结了执行示范计划目前所存在的主要问题和下一步计划, 为示范计划成果支撑即将到来的冬奥气象服务保障实战提供指导, 也为气象部门实现预报精准和服务精细的气象现代化目标提供借鉴。

**关键词:** 智慧冬奥, 预报示范, 精准预报, 气象服务保障

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.002

## A Review of SMART2022-FDP Progress

Chen Mingxuan<sup>1</sup>, Fu Zongyu<sup>2</sup>, Liang Feng<sup>2</sup>, Jin Ronghua<sup>3</sup>, Xue Hongxi<sup>3</sup>, Li Jin<sup>4</sup>,  
Liu Couhua<sup>5</sup>, Gan Lu<sup>4</sup>, Sun Chao<sup>6</sup>, Shi Shaoying<sup>4</sup>, Wang Zongmin<sup>7</sup>, Chen Haoming<sup>8</sup>

(1 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089 2 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089 3 Department of Forecast and Network, China Meteorological Administration, Beijing 100081 4 Beijing Weather Forecast Office, Beijing 100089 5 National Meteorological Center, Beijing 100081 6 National Meteorological Information Center, Beijing 100081 7 Hebei Weather Forecast Office, Shijiazhuang 050022 8 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** This paper briefly introduces the main objectives, organization form and products of Sciences of Meteorology with Artificial-intelligence in Research and Technology for Beijing 2022 Winter Olympics-Forecast Demonstration Project (SMART2022-FDP), describes primary technology R&D achievements carried out to organize the demonstration project and the preliminary application results for the 2021 Winter Olympics test activities, and also summarizes the main problems existing in the implementation of the project and the next step plan. The review can provide guidance for the ongoing demonstration plan to support real-time meteorological forecast and service for the upcoming 2022 Winter Olympics, and provide reference for meteorological departments to achieve modernization goals aiming at accurate meteorological forecasts and fine meteorological services.

**Keywords:** SMART2022, forecast demonstration, accurate meteorological forecasts, meteorological service and support

## 0 引言

天气是冬奥会成功与否的决定因素, 精准气象预报是现代冬奥会成功举办的最重要条件之一。冬奥会雪上项目主要在地形复杂的山区举办, 赛事安排与赛场天气状况密切相关, 需要根据天气预报找到价值万金的“窗口期”<sup>①</sup>, 精确的风、温、湿度、能见度等的预报预警直接影响到运动员发挥, 甚至影响到比赛安全。冬奥会外围保障、赛事观赏、交通、媒体转播、应急救援等均会受到不同气象条件的直接影响,

相关的气象预报预警也极为关键。

鉴于山区地形复杂、气象数据稀少等原因, 小尺度山地气象监测预报一直是国际气象科技难题<sup>[1]</sup>。近几届冬奥会举办前, 主办国均开展了气象保障服务的示范计划, 荟集国内外的先进气象研发成果提供冬奥气象监测、预报和服务的科技支撑。2010年温哥华冬奥会, 加拿大环境部组织实施了SNOW-V10示范计划<sup>[2]</sup>: 通过在赛场周边建立稠密立体气象监测网, 并针对山区暴雪等敏感气象条件建立多种特殊气象仪器, 开展冬季连续观测试验; 在预报技术方面, 开发包括1公里分辨率数值预报系统等多种针对冬奥会气象保障的精细预报系统, 并开展复杂地形下降降水相

收稿日期: 2021年8月27日; 修回日期: 2021年12月12日  
第一作者: 陈明轩(1974—), Email: mxchen@ium.cn  
通信作者: 付宗钰(1978—), Email: fuzongyu1126@126.com  
资助信息: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z013), 国家重点研发计划(2018YFF0300100、2018YFF0300102)

① 本文中“窗口期”是指对“造雪”等赛事保障、比赛日程安排及调整或某个比赛中气象条件有利于活动进行的时间段。

态、低能见度等关键问题的深入研究。2014年索契冬奥会，俄罗斯水文气象中心组织实施了FROST-2014示范计划<sup>[3]</sup>：在赛场周边增加常规气象观测，布设与冬奥密切相关的特殊气象要素观测，在前期数据分析基础上，实现分钟到小时间间隔的冬奥特殊气象监测数据服务；开展赛场周边冬奥高影响天气研究，通过局地资料同化、高分辨率数值模式和集合预报等技术研发，提高冬奥赛区客观气象预报水平，局地分辨率达 $0.25\text{ km}\times 0.25\text{ km}$ 。2018年平昌冬奥会，韩国气象厅组织实施了ICE-POP 2018示范计划<sup>[4]</sup>：组建稠密立体观测网提高赛场及周边气象探测能力；开展山地和海洋对赛区气象条件综合影响研究，加强冬季山地数值预报技术研发，CMA、ZAMG等 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 分辨率数值模式产品及Roshydromet $1\sim 0.55\text{ km}$ 分辨率数值模式产品提升低能见度和降水相态等预报精度；推进气象服务展示形式网络化、智能化，服务内容也涉及不同类型冰雪运动。从近三届冬奥会气象示范计划来看，稠密气象监测与数据分析、高时空分辨率无缝隙客观预报、智能化预报服务成为冬奥气象技术的重点发展方向。

以往冬奥会的举办地大多为海洋性气候控制，其气象预报服务的关注重点是降雪（降雨）和能见度。而北京冬奥会是近20年来唯一一届在大陆性冬季风主导的气候条件下举办的冬奥会，与往届冬奥会气候条件不同，导致中小尺度天气特征不同，从而面对的气象监测、预报、服务的关注重点也不同。从北京冬奥会气候风险评估结果来看<sup>[5]</sup>，对于冬奥会张家口赛区、延庆赛区和北京赛区的不同室外赛事和相关外围保障服务来说，大风、低温、暖湿融雪、降水、低能见度等多种气象风险均不同程度的存在，特别是不同的室外赛事对风、温等气象条件的临界阈值要求差异较大，因此对于大风、低温和暖湿融雪等的预报预警，需要给与特别关注。

基于调研和分析，根据北京冬奥组委“一项一策”的保障需求，中国气象局提出了“百米级、分钟级”的冬奥气象科技目标，力争到2022年冬奥会举办时，用最先进的气象科技手段、最精准的气象预报，为赛事运行提供精确到分钟级、百米级的气象监测、预警预报及赛事专项服务产品。

## 1 智慧冬奥2022天气预报示范计划

为满足北京冬奥会高精度天气预报服务刚性需求，在做好既有的冬奥气象科技研发的同时<sup>[1]</sup>，中国气象局组织实施“智慧冬奥2022天气预报示范计划（SMART2022-FDP）”（以下简称“示范计划”），广泛征集国内优秀的精细化气象要素客观预报技术方法和系统，通过在2021年北京冬奥测试活动

和2022年北京冬奥会正式赛期期间开展天气预报示范的方式，为冬奥气象保障提供更多更好的高时空分辨率气象科技产品支撑，示范计划遴选出的优秀客观数据产品，将成为冬奥会气象保障服务的重要支撑和预报参考依据。通过示范计划，也可对目前国内不同单位、不同部门研发和运行的高分辨率数值天气预报模式以及快速融合与集成预报、数值降尺度预报、统计释用预报、人工智能天气预报等各种技术、系统和方法进行平行评估和对比检验，从而推动我国精细化天气预报技术的深入发展，提升人工智能技术在高精度天气预报服务中的融合应用水平，促进相关核心技术在国家重大活动气象保障服务及气象防灾减灾等方面的深化应用。

示范计划在中国气象局冬奥气象服务领导小组（中国气象局冬奥气象中心）统一领导下，由中国气象局预报与网络司主办、应急减灾与公共服务司和科技与气候变化司协办，冬奥北京气象中心（北京市气象局）具体承办，其具体组织机构如图1所示。成立示范计划管理组，负责示范计划总体组织协调和重大事项决策，下设协调办公室，负责具体工作协调。成立示范计划指导专家组，负责技术咨询、指导和评估。成立四个示范计划专项工作组，负责为示范计划的筹备和组织实施提供支持：1）系统示范组，负责示范计划总体技术方案制定、总体技术协调，统筹组织解决示范计划执行中出现的技术问题；2）数据保障组，负责数据技术规范的制定，负责向参加示范系统提供示范计划所需各种数据，负责示范系统数据产品的收集、分发；3）产品集成组，负责组织开发统

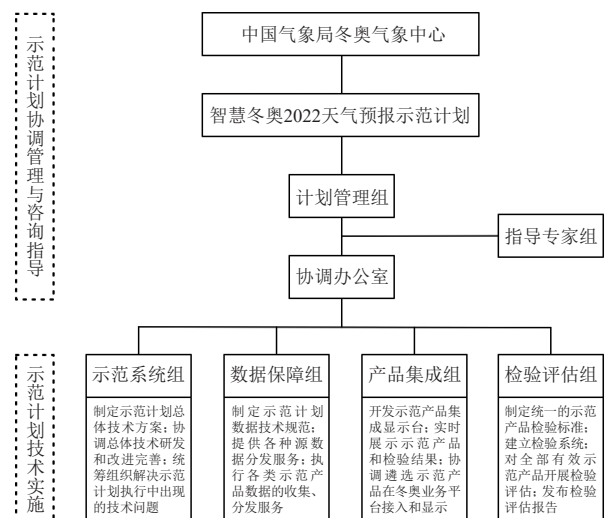


图1 智慧冬奥2022天气预报示范计划技术体系图  
Fig. 1 Technical system diagram of 2022 weather forecast demonstration plan for smart Winter Olympics

一的示范计划产品集成显示平台，对全部有效示范产品和检验结果进行展示；4）检验评估组，负责制定统一的示范产品检验标准，建立检验系统，对全部有效示范产品开展检验评估，发布检验评估报告。

2020年3月，示范计划正式启动，向全国广泛征集参加者，共征集到22家单位（气象部门内11家，气象部门外11家）研发的38个系统报名参加。总体来说，参加示范计划的系统均采用的是目前最先进的高精度天气预报技术方法，主要包括以下4大类：次千米级分辨率数值模式和多源资料快速同化技术，次千米级分辨率和次百米级分辨率多源数据快速融合与集成预报技术，次千米级分辨率和次百米级分辨率数值降尺度预报技术，基于人工智能（机器学习和深度学习）的次百米级格点及站点预报技术。需要特别指出的是，上述次百米级预报技术和人工智能预报技术是国际上第一次在冬奥会气象服务保障中获得应用，体现了复杂地形下高精度天气预报技术方法的发展趋势。另外，区域数值天气预报也正在向着千米级甚至更高分辨率发展。根据计划安排，示范计划分为五个阶段：2020年3—12月为各参加系统的技术准备期；2021年1—4月完成第一次实时运行测试和检验评估，筛选出进入第二次实时运行测试的系统；2021年5—9月，系统改进完善，并于9月1—15日参加第二次实时运行测试，确定最终示范系统；2021年10月—2022年3月开展正式预报示范；2022年4—6月总结评估。

## 2 前期技术准备工作

### 2.1 示范产品和检验规则

#### 2.1.1 示范产品

按照支持冬奥实战应用、切实为冬奥会气象预报服务提供强有力科技支撑产品的原则，此次示范计划的产品紧密围绕冬奥气象预报团队的需求，重点提供预报员可直接参考的高分辨率近地面气象要素预报、高精度三维实况分析、冬奥关键点位气象要素垂直廓线等产品，主要分为站点产品和网格产品两大类，其中网格产品又分为次千米级分辨率和次百米级分辨率两类。

1) 站点产品，包含冬奥组委最终确定的张家口赛区、延庆赛区和北京赛区所有场馆预报站点，预报要素17个左右，预报时效至少达到72 h（最长240 h）；预报间隔为：0~24 h为 $\leq 1$  h，24~72 h为 $\leq 3$  h，72~240 h为 $\leq 6$  h；预报更新频率 $\leq 3$  h。

2) 次千米级网格产品，覆盖范围为京津冀区域，网格分辨率 $\leq 1$  km，预报时效 $\geq 24$  h，预报间隔 $\leq 1$  h，预报更新频率 $\leq 24$  h。

3) 次百米级网格产品，覆盖范围为冬奥山地

赛区（包括张家口赛区和延庆赛区）。网格分辨率 $\leq 100$  m，预报时效 $\leq 24$  h，预报间隔 $\leq 1$  h，预报更新频率 $\leq 6$  h（如果仅提供客观实况分析产品，更新频率 $\leq 30$  min）。站点数据产品格式统一为XML格式文件。次千米级和次百米级网格数据产品统一为经纬度网格格距的NetCDF格式或GRIB2格式。

除了上述基本产品外，也鼓励各参加单位提供其他能够支撑冬奥赛事保障的特色精细化预报产品。如提交特色示范产品，应同时给出相应检验评估方法、实时检验结果和集成显示建议等信息。

#### 2.1.2 检验规则

为了更加科学地评估示范计划各模式、系统的分析和预报产品，需要开展相关的常规和非常规多维度检验评估。目前，对于冬奥赛场站点预报产品，取每日11、17时（北京时）起报的张家口赛区、延庆赛区和北京赛区的共计29个冬奥站点预报进行检验，包括冬奥组委确定的北京赛区、延庆赛区和张家口赛区的预报核心点位，以及北京观象台、延庆站和河北张家口站。最长预报时效为未来10 d，计算时间间隔为1 h、3 h的整点量和统计量、逐日统计量，检验要素包括近地面气温、湿度、平均风速风向、阵风风速风向、能见度、降水、降雪、积雪深度等及其相关统计量。对于次千米级网格预报，检验时段为24 h内逐小时，检验要素为近地面气温、平均风向风速，阵风风向风速、能见度，地面降水、降雪、积雪深度等，以及上述要素相关统计量，检验站点包括京津冀范围内现行网格预报业务检验站点和冬奥预报站点。对于次百米级短时临近预报，检验时段为6 h内逐10 min，检验要素为近地面气温、平均风向风速，阵风风向风速、能见度，地面降水、降雪、积雪深度等，以及上述要素相关统计量，检验站点包括延庆和张家口赛区范围内的冬奥预报站点，以及数据质量较好的区域自动站站点（国家级区域考核站）。上述检验策略是：选择距离站点最近的格点预报作为站点预报值，有多个距离相等的格点取东北角格点，将该站点预报值与站点实况对比进行检验。对于检验指标来说，除了常规的统计指标，还引入多种时空多维度、多要素检验指标进行综合评判。

### 2.2 数据准备和示范平台开发

鉴于参加示范计划的单位和系统较多，各家模式和系统对冬奥高精度静态数据、冬奥加密观测和数值预报背景场数据的需求差异显著，各家模式和系统给出的产品种类、数据类型、预报性能、数据传输性能等也同样存在很大差异，因此为做好示范计划的实

施,需要设计完整的数据链路,并开展多项关键技术的研究及相关平台的设计开发。

(1) 数据保障组完成了示范计划所需基础数据及产品的保障方案和相关技术的研究开发,如:多源数据结构设计、多源数据存储方案设计、数据快速多路分发技术研发、数据实时监控技术设计开发、数据共享方案设计开发等。2020年2月,制作完成示范计划22家参与单位所需的6类36种数据资源的测试数据集,数据量合计6 TB,并为各单位提供数据咨询服务126次,保障了各参与单位在获取气象资料的同时,能够公平、正确使用数据。同时,面向示范计划的源数据需求特点,结合数据开放共享政策,定制化编制了数据使用协议,并全部完成气象部门内外22家参与单位的内容洽谈、咨询服务与协议签署,为示范计划的顺利开展与数据的合法合规使用提供了法律保障。

(2) 产品集成组完成了示范产品集成方案的设计和集成显示平台的开发、测试,如:产品需求分析、产品类型设计开发、集成显示方式设计、集成显示平台开发和测试等。按照面向支持冬奥实战应用的目标,集成显示平台开发过程中充分与冬奥气象预报

团队沟通,根据团队试用意见反复修改、完善。2020年10月,平台测试版本内部上线运行;其后又对平台的数据流程和核心技术进行了多次优化,大幅提升了后端数据多维度实时处理及前端各类产品实时显示的效率和稳定性。2021年1月25日,示范计划集成显示平台实现正式上线运行(互联网地址:smart2022-fdp.iium.cn)。平台采用B/S架构开发,实现了气象部门内外网同步方式运行,内容包括项目介绍、实况分析、格点预报、场馆预报、检验评估、数据监控等六个版块。

(3) 检验评估组完成了示范计划多源产品的评估检验技术研发和对比分析,如:实时检验和后期检验的对象选取、指标设计、检验方法研发、检验产品多维度交互显示的设计开发,以及实现各类格点和站点数据产品的实时检验和结果集成显示等。

2020年10月30日基本形成最终版本的《智慧冬奥2022天气预报示范计划(SMART2022-FDP)技术保障方案》<sup>[6]</sup>,成为指导示范计划技术研发和运行保障的重要文档。示范计划实时运行的整体架构流程以及实时数据流参见图2。

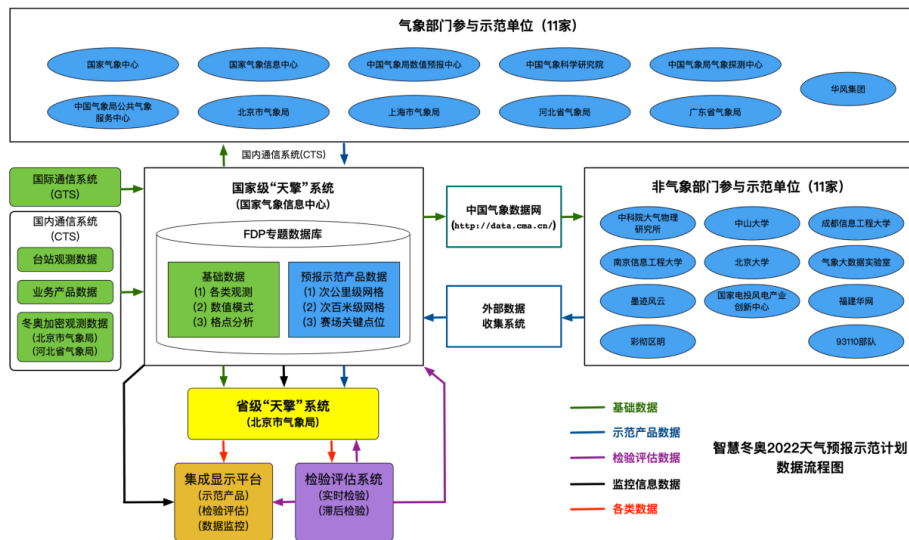


图2 示范计划实时运行的整体架构流程以及实时数据流

Fig. 2 The overall architecture flow and real-time data flow of the demonstration plan in real time

### 3 第一次实时运行测试和检验评估

为配合支撑2021年“相约北京”冬季系列体育测试活动气象服务保障,在2021年2月1日—3月15日,示范计划开展了第一次实时运行测试(以下简称第一次测试),示范产品提供给北京赛区、延庆赛区和张家口赛区参加“相约北京”测试活动气象服务保障的预报团队试用,各参加示范的单位也可以通过示范计划集成显示平台实时查看示范产品和实时检验结果。

#### 3.1 源数据分发和产品数据接收

第一次测试期间,基于中国气象局的国家级“天擎”气象大数据云平台,为11家气象部门内部参与单位提供实时数据接口服务;基于“天擎”公共云环境,为11家气象部门外部参与单位提供实时基础数据服务。22家示范计划参与单位的各系统和技术方法均实现了实时运行,示范产品分为赛场站点预报产品、次公里级网格产品(100 m < 网格分辨率 ≤ 1 km)、

次百米级网格产品（网格分辨率 $\leq 100$  m）三类，也包含少量的特殊产品，合计38类57项。其中，赛场站点预报以气象大数据统计订正以及人工智能方法为主，次千米级网格产品以数值预报模式结合局地资料同化技术为主，次百米级网格产品以多源数据快速融合、多模式集成、数值和统计降尺度预报、人工智能等方法为主。

第一次测试期间，3家示范计划参与单位所有数据产品到报率达到100%，17家示范计划参与单位数据产品到报率达90%以上；2家单位示范产品及时率达到100%，8家单位产品及时率达90%以上。

### 3.2 平台运行及产品应用

实时监控及信息统计显示，第一次测试期间示范计划集成显示平台（包括后台多维度数据快速处理模块）均实现了正常和稳定运行，各类实时示范产品被冬奥预报团队广泛使用，为2022年2月“相约北京”冬季系列体育测试活动期间的气象服务提供了有力支撑。集成显示平台可以在线调阅第一次测试期间的全部数据、产品和检验结果。

### 3.3 示范产品的检验评估

示范计划的检验评估以各参与单位数据产品在冬奥29个站点的检验结果为主要依据，并开展以研究测试为目标的格点检验。本文重点介绍站点检验的总体情况，更详细的检验可参见《智慧冬奥2022天气预报示范计划（SMART2022-FDP）第一次测试运行期综合评估报告》<sup>[7]</sup>。

#### 3.3.1 站点检验方法

主要针对两类站点预报产品进行检验：1）专项站点预报产品，主要针对冬奥站点，专门进行的人工智能或统计建模得到的解释应用后处理产品；该检验主要用于评估冬奥复杂地形下站点预报产品性能以及人工智能等站点解释应用新技术方法的技巧；2）数值模式预报产品，主要指根据示范计划技术方案规定的统一插值算法，将数值模式或客观系统格点输出的数据，在冬奥站点进行统一标准插值处理后的产品；该检验主要用于评估高分辨率数值模式或客观系统在冬奥复杂地形下的预报性能。

因参与单位的产品预报时效和时效间隔不同，结合冬奥赛事预报服务的重点关注时段以及精细化预报服务的需求，将本次测试活动的检验预报时效及检验时间间隔分别约定为：0~2 h/1 h、2~12 h/1 h、12~24 h/1 h、24~72 h/3 h、72~240 h/6 h，所有预报示范产品数据的检验都与上述时效及间隔的时间点相对应。根据示范产品和赛事关注情况，本次主要对

近地面的风、温度、能见度、相对湿度以及地面降水的预报进行检验。检验指标包括：综合预报评分、均方根误差、平均绝对误差、TS评分、Bias评分等。检验分为三个赛区29个站点的综合平均检验、三个赛区各自站点的平均检验，也包括针对冬奥气象服务各要素的关键阈值的上述各类指标检验。另外，为研究分析各类产品对不同高度上温度和风的预报效果以及日变化特征等的预报情况，根据测站高度、测站环境以及赛事关注等，经咨询冬奥预报团队，也选取了如下的各赛区代表站进行独立站点的检验：张家口赛区2站（云顶1号站、冬两1号站）、延庆赛区3站（竞速1号站、竞速5号站、竞速8号站）、北京赛区2站（首钢1号站、国家体育场站）。也开展了第一次测试期间的典型天气个例的站点检验评估，分析了大风、低温、低能见度、融雪暖温、降雪等天气过程期间各示范产品的实际表现。下面针对本次检验的主要结论进行简述，各类详细检验指标的定义以及详细检验结果可分别参考《智慧冬奥2022天气预报示范计划（SMART2022-FDP）技术保障方案》<sup>[6]</sup>、《智慧冬奥2022天气预报示范计划（SMART2022-FDP）第一次测试运行期综合评估报告》<sup>[7]</sup>。

#### 3.3.2 站点检验的主要结论

风要素的预报检验：①从平均风速 $\geq 4$  m/s的赛区综合预报评分来看：专项站点预报产品0~24 h预报评分最优在0.68~0.71，24~72 h预报评分最优为0.69，72 h以上预报评分最优为0.59；模式产品0~12 h预报评分最优在0.67~0.71，与专项站点预报产品相近，12 h以上预报评分最优约为0.45，低于专项站点预报产品。专项站点预报产品预报评分整体上比模式产品有提升。专项站点预报产品和模式产品对张家口赛区各时效预报评分高于延庆赛区和北京赛区。不同赛区专项站点预报产品预报评分较优的产品差异不大，而对于模式产品，除个别系统产品对各赛区预报效果均较好以外，其他产品对不同赛区预报效果差异较大。②从阵风风速赛区综合预报评分来看：专项站点预报产品0~24 h预报评分最优在0.77~0.82，24~72 h预报评分最优为0.73，72 h以上预报评分最优为0.66；模式产品0~72 h预报评分最优在0.60~0.65。对于阵风风速总体预报评分，专项站点预报产品优于模式产品。从阵风风速6级以上的预报评分来看，专项站点预报产品明显优于模式产品。

温度的预报检验：从专项站点预报产品在赛区综合的气温平均均方根误差（RMSE）来看：RMSE随预报时效在2.34~6.22  $^{\circ}\text{C}$ ；预报效果在短时临近至短期时段（0~72 h）相对较为稳定，在中期时段

(72~240 h) 随预报时效的延长而明显下降。三个赛区随时效的变化趋势与赛区综合的一致,但从整体预报效果来看,北京赛区检验好于三个赛区综合检验,张家口赛区与赛区综合接近,延庆赛区最差。除个别产品外,模式产品的预报效果整体上差于同时效的专项站点预报产品。另外,从气温的垂直预报效果来看,专项站点预报产品和模式产品均反映出产品对高海拔站点的预报误差大于低海拔站的特征。综合来看,高海拔站的预报难度相对较大。

**降水的预报检验:**专项站点预报产品在赛区综合的平均降水( $\geq 0.1\text{mm}$ ) TS评分在0.02~0.35,预报效果随时效延长呈现下降趋势。三个赛区随时效的变化趋势与赛区综合基本一致;从整体预报效果来看,北京赛区最好,延庆赛区与赛区综合接近,张家口赛区最差。模式产品的预报效果整体上略高于专项站点预报产品,表明对于冬季降水来说,目前的站点解释应用技术并未达到提升冬奥复杂地形下降水预报准确率的目标。此外, Bias评分显示,大多数专项站点预报产品在0~24 h对降水存在漏报、在24~240 h对降水存在空报现象;模式产品大多对降水存在空报现象,且在不同时效及赛区的效果差异较大。

**能见度的预报检验:**从专项站点预报产品赛区综合的能见度分级( $\leq 1\text{ km}$ 、 $1\sim 5\text{ km}$ 、 $5\sim 10\text{ km}$ 以及 $> 10\text{ km}$ )检验来看,平均TS评分在0~24 h时效上分别约为0.18、0.11、0.03以及0.43。由此可见,专项站点预报产品对于高能见度等级( $> 10\text{ km}$ )的预报效果最优。各家专项站点预报产品基本上对于能见度的预报效果差别不大,但整体对低能见度等级( $\leq 1\text{ km}$ )的预报能力有限。模式产品效果与客观预报产品类似,但除了0~24 h时效内 $\leq 1\text{ km}$ 的低能见度事件外,模式产品对其他时效上的低能见度事件几乎无预报能力。

**相对湿度的预报检验:**从相对湿度的赛区综合预报情况来看,专项站点预报产品0~24 h预报平均绝对误差(MAE)最小区间在8.4%~10.3%,24 h以上MAE最小区间约为12.6%~18.3%。大部分产品的误差较集中,但个别产品误差明显偏大。模式产品0~24 h预报MAE最小区间在10%~13%,24~72 h预报MAE最小约为13.9%,均略大于专项站点预报产品。无论是专项站点预报产品还是模式产品,对三个赛区的预报趋势相对一致,总体来看对张家口赛区和延庆赛区的预报误差略小,而对北京赛区的预报误差略偏大。专项站点预报产品相对于原始模式产品来说,预报准确率有一定提升度。

#### 4 结论

智慧冬奥2022天气预报示范计划是中国气象局首

次面向国内从事数值天气预报和客观预报技术研发的主要行业单位、高校院所和企业开展的实时预报技术示范竞赛。相比于当前方兴未艾的各种人工智能天气预报大赛,它的技术门槛更高、专业性更强。需要持续数月、严格按时限提供复杂地形区的定时、定点、量化的气象要素预报,远非针对历史个例进行模拟研究,或是使用历史数据进行拟合调优可比拟。根据示范计划第一次测试运行情况,给出以下初步结论。

本次检验结果表明,高分辨率数值天气预报模式仍然是提升定时、定点、定量预报能力最不可或缺的核心技术,特别是对于地形复杂、观测资料缺乏地区的冬季降水预报,目前的站点解释应用技术、人工智能建模技术与高分辨率数值模式直接预报相比,并无显著优势。

本次检验结果也指出,对于温度、湿度、风和能见度等近地面气象要素,在数值模式产品基础上的解释应用技术(包括多源数据融合、数值和统计降尺度、人工智能建模、传统统计释用等),能够显著降低数值模式在地形复杂区域的系统性预报误差,提高数值模式产品的末端预报性能。

在预报检验方面,对高频次更新预报和高分辨率网格预报的检验技术存在明显短板,缺乏公认的检验方法和标准,高精度网格“真值”的确定也存在困难。随着智能数字预报业务的发展,这方面的研究亟待加强。

随着高时空分辨率的客观预报产品越来越多地提供给预报员使用,高效、便捷的数据传输、存储、调用和产品多维度集成显示变得越来越重要,在未来支撑实时预报业务的信息系统设计中,必须考虑这些需求。

#### 参考文献

- [1] Chen M X, Quan J N, Miao S G, et al. Enhanced weather research and forecasting in support of the Beijing 2022 Winter Olympic and Paralympic Games. *WMO Bulletin*, 2018, 67(2): 58-61.
- [2] Joe P, Chris D, Wallace A, et al. Weather services, science advances, and the Vancouver 2010 Olympic and Paralympic Winter Games. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91: 31-36, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2998.1>.
- [3] Kiktev D, Joe P, Isaac G A. FZOST-2014: The Sochi Winter Olympics International Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98: 1908-1929, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00307.1>.
- [4] Lee G, Kim K. International Collaborative Experiments for Pyeongchang 2018 Olympic and Paralympic winter games (ICE-POP 2018). *American Geophysical Union, Fall Meeting*, 2019.
- [5] 王冀,等.北京2022年冬奥会和冬残奥会赛区气象条件及气象风险分析报告(2017—2021版).北京:气象出版社,2021.
- [6] 冬奥气象中心.智慧冬奥2022天气预报示范计划(SMART2022-FDP)技术保障方案.北京:冬奥气象中心,2020.
- [7] 冬奥气象中心.智慧冬奥2022天气预报示范计划(SMART2022-FDP)第一次测试运行期综合评估报告.北京:冬奥气象中心,2021.

# 土壤湿度模拟研究进展

闫伟兄<sup>1,4</sup> 李剑萍<sup>1</sup> 金燕<sup>2</sup> 张永霞<sup>3</sup> 赵俊芳<sup>4</sup>

(1 宁夏回族自治区气象科学研究所/中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室/宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002; 2 云南省气候中心, 昆明 650034; 3 宁夏环境科学研究院(有限责任公司), 银川 750004; 4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 准确和高分辨率的土壤湿度数据是深入了解地气过程、研究生态环境演变、水文循环和气候变化, 以及预测天气气候和评估水旱灾害等的基础性资料, 受到多学科学者的广泛关注。近年来, 全球土壤湿度观测计划及利用遥感反演和模式模拟具有高时空分辨率的土壤湿度得到长足发展, 从最初的研究层面逐渐应用到实际业务中。简要介绍了模拟土壤湿度的主要陆面模式, 以及陆面过程参数化方案比较计划(PILPS)和全球土壤湿度项目(GSWP)的相应结果; 从数据同化算法和陆面同化系统两个方面介绍了国内外陆面数据同化系统模拟土壤湿度的进展; 最后, 归纳了土壤湿度验证的主要方法、验证指标和表现形式。文末从4个方面进行了展望: 1) 升级观测系统以获得高质量实地观测数据; 2) 研发高精度气象驱动数据和制备陆面参数以提升模式结果; 3) 增加地气系统的认识以完善模式物理过程; 4) 改进数据同化算法以最大限度鉴别和利用观测数据。

**关键词:** 土壤湿度, 陆面模式, 数据同化, 研究综述

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.003

## Recent Advances in Soil Wetness Simulation

Yan Weixiong<sup>1,4</sup>, Li Jianping<sup>1</sup>, Jin Yan<sup>2</sup>, Zhang Yongxia<sup>3</sup>, Zhao Junfang<sup>4</sup>

(1 Ningxia Institute of Meteorological Sciences/Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions/Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002 2 Yunnan Climate Center, Kunming 650034 3 Ningxia Academy of Environmental Sciences Co., LTD, Yinchuan 750004 4 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Due to the fact that soil wetness plays an important role in the global hydrological cycle and climate system, it has been widely concerned. Accurate and high-resolution soil wetness data are the basic data for in-depth understanding of the earth atmosphere process, ecological environment evolution, hydrological cycle and climate change, as well as the prediction of weather and climate and the assessment of flood and drought disasters. In recent years, the global soil wetness observation program, as well as grid soil wetness with high spatial and temporal resolution through remote sensing retrieval and model simulation has developed rapidly, especially in the field of hydrologic cycle and weather and climate, which have been gradually applied from the initial research level to the practical business. Firstly, the article briefly introduces the main land surface models for simulating soil moisture, as well as the corresponding results of the Land Surface Process Parameterization Scheme Comparison Plan (PILPS) and the Global Soil Moisture Project (GSWP). Secondly, introduces the progress of land surface data assimilation system to simulate soil wetness from two aspects: data assimilation algorithm and assimilation system. Finally, summarize main methods, indexes and forms for soil wetness verification. In the end, the article makes prospects and suggestions from four aspects: (1) upgrading the observation system to obtain high-quality in-situ observation data; (2) Improving the ability of remote sensing detection to expand the application of products; (3) developing high-precision meteorological driving data and preparing land surface parameters to improve the model results; (4) increasing the understanding of the earth and atmosphere system to improve the physical process of the model.

**Keywords:** soil wetness, land surface model, data assimilation, review

收稿日期: 2020年9月15日; 修回日期: 2021年3月26日  
第一作者: 闫伟兄(1976—), Email: laobencau@163.com  
通信作者: 赵俊芳(1977—), Email: zhaojfcams@163.com  
资助信息: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BBF03009);  
宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BBF03024);  
宁夏回族自治区自然科学基金项目(2020AAC03467);  
中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放研发基金(CAMF-202004)

## 0 引言

全球气候观测系统(GCOS)将土壤湿度定义为基本气候变量之一, 虽然土壤湿度占地球总水量的比例非常低, 但其在全球水文循环、能量平衡及天气气候研究中扮演着重要角色, 受到生态、水文、地理、气象等多学科众多研究者的关注<sup>[1-3]</sup>。土壤湿度是水文循环的重要组成部分, 陆地上35%的降水来自于海水蒸发的风力输送, 65%的降水来自于陆地表面蒸

发<sup>[4]</sup>, 而陆地表面的蒸发与土壤湿度密切相关。土壤湿度影响地气之间的水分、能量以及碳交换, 故而天气预报和气候预测数值模式的准确性很大程度上取决于上述交换的正确表征<sup>[5]</sup>。土壤湿度的异常会导致地表反射率、土壤热容量、地表蒸发及植被生长状况的变化, 从而改变地表向大气输送的感热、潜热和长波辐射通量, 最终影响气候变化<sup>[6]</sup>。土壤湿度偏低极易引起干旱和森林草原火灾, 土壤湿度偏高亦可能形成洪涝。土壤湿度对植物的重要性更是不言而喻。世界气象组织(WMO)2008年在其“未来气候变化研究和观测”报告中从理解陆气相互作用、建立季到年代际气候预测、验证和改进陆面模式的物理参数、开发和验证基于卫星技术的土壤湿度算法、监测和检测气候异常及气候变化等5个方面指出收集土壤湿度数据的重要性<sup>[7]</sup>。

土壤湿度包含了天气和气候的“记忆”, 一种类似于海洋中的热量向气候系统提供的惯性, 将气候预测的时间尺度从1~2周扩展到月至季<sup>[8-9]</sup>, 这是土壤湿度与气候关系研究的基础, 得到国内外诸多相关研究的支持。在大气边界层中, 土壤湿度对气候的影响仅次于海温; 而在陆地上, 土壤湿度的作用甚至超过海温的作用<sup>[10]</sup>。地气系统出现异常, 系统内部的各种反馈和自反馈过程使异常减弱, 这些反馈主要是由土壤湿度状况及与之有关的地气水分和能量交换的特性控制<sup>[11]</sup>。有研究表明, 在我国春季从长江中下游到华北的土壤湿度正异常, 造成东亚夏季风减弱, 西太平洋副热带高压发展西伸, 从而阻挡了东亚夏季风的北上, 使得中国夏季雨带偏南, 长江流域降水偏多, 华北和南方降水偏少<sup>[12]</sup>。2020年7月长江流域降水异常偏多, 是否与该研究吻合, 后续可做相关验证研究。此外, 还有研究提出青藏高原季风前的土壤湿度较强的年际变异性, 可能为理解南亚季风的变异性提供重要的意义<sup>[13]</sup>。

就上述认识和研究而言, 获得高时空分辨率的土壤湿度数据极其重要。实地观测、遥感反演和模式模拟是当前获取土壤湿度的3个手段。实地观测虽能获得直接和准确的第一手数据, 但耗时耗力, 且因土壤湿度的巨大空间异质性, 很难得到较大空间上较为完整的信息。随着20世纪60年代末卫星遥感对地观测技术的发展, 大尺度的土壤湿度获取相关计划、项目及产品等大量涌现, 如全球土壤湿度计划(GSWP)、土壤水分和海洋盐度卫星(SMOS)、土壤湿度主被动探测任务(SMAP)、风云三号卫星(FY-3), 以及欧洲空间局气候变化倡议(ESA CCI)土壤湿度计

划、全球陆面数据同化(GLDAS)等<sup>[14-16]</sup>。

基于测站的原位土壤湿度数据科研和业务工作者均较为熟悉, 且航空和地面遥感在土壤湿度方面的应用并不广泛, 卫星遥感反演土壤湿度拟在它文中叙述, 故这里综述了国内外土壤湿度模拟技术, 指出提高模拟土壤湿度精度的几个方面, 以期为土壤湿度相关研究和业务应用提供一些支撑。需要提醒的是, Dirmeyer<sup>[9]</sup>曾在2011年指出土壤水分(Soil moisture)和土壤湿度(Soil wetness)有一定区别, 但二者经常混淆使用, 实际应用中需要注意。本文为便于阅读, 统一表述为土壤湿度。

## 1 土壤湿度模拟

基于站点的原位土壤湿度观测虽多为例行观测, 但测站少而分散, 且在自动土壤湿度观测出现之前其时间间隔较长, 难以满足大尺度和高频分析需要。20世纪80年代以来, 土壤湿度自动观测虽极大改进了观测的空间密度和时间频次, 但相对于土壤属性的空间异质性, 至少从空间上仍难满足地气过程研究、生态环境及天气气候等服务需要。自20世纪60年代卫星遥感反演土壤湿度以来, 虽能提供大范围、周期性的面上土壤湿度观测信息, 但其探测深度极为有限(1~5 cm), 且受太阳光、天气和地表等状况影响较大。因此, 模拟土壤湿度成为另外一种获取土壤湿度的方式。

### 1.1 陆面模式模拟

20世纪70年代左右, 人们开始尝试陆面模式在全球网格化气象要素的驱动下模拟土壤湿度, 这是当前土壤湿度模拟最主要的方式之一。陆面过程(LSP)是影响大气环流和气候变化的基本物理、生物化学过程之一, 在地气下垫面的研究中扮演着重要的角色<sup>[17]</sup>。陆面过程最初的研究侧重对大气模式(GCM)敏感性试验, 证实陆面参数的变化对GCM模拟结果有很大影响, 从而引发对在大气模式中详细描述陆面过程的重视<sup>[18]</sup>。发展适合不同大气模式的陆面过程并将它们分别耦合在相应大气模式中是大气模式发展和完善的必然趋势<sup>[19-20]</sup>。气候模式中, 早期引入陆面过程是为更好理解地表能量转化, 后来逐渐认识到土壤湿度对改善长期气候预测准确性至关重要, 特别是作为模式的初始场。

陆面过程的发展自20世纪60年代末到70年代至今, 经历了4个阶段, 先后代表性的模式有水桶模式(Bucket Model)、简单能量平衡模式、简单生物圈模式(Simple Biosphere Model, SiB)、陆面过程模式(LSPM)、诺亚模型(Noah), SiB2, 通用陆

面模式（Common Land Model, CLM）、Noah-MP等<sup>[21]</sup>。国内也有一些陆面模式的研制，如SVA模式（Soil-Vegetation-Atmosphere Model）<sup>[22]</sup>、AVM模式（Atmosphere-Vegetation-Model）<sup>[23]</sup>、中国科学院大气物理研究所的IAP94、CLM 2L模式等<sup>[24]</sup>。

陆面模式主要以离线和耦合两种模式运行。离线模式下陆面模式以大气驱动数据驱动单独运行，耦合模式下陆面模式会被耦合到气候模式中。现有陆面模式虽然多达至少30多种，但其出发点多是土壤温度和水分守恒方程，最终目的是得到地表感热通量和潜热通量。模式中土壤湿度与水势关系多采用Brooks-Corey、Clapp-Hornberger、Van Genuchten等经典土壤水分特征曲线经验模型。土壤水流模拟多采用Darcy定律、Richards方程、Philip-de Vries水热运动耦合方程等。

Manabe<sup>[25]</sup>在1969年最早将土壤湿度作为大气环流模式的状态变量进行模拟，其做法是利用水桶模式将每个陆地表面网格视为一个可以捕捉降水、并使降水通过蒸发返回大气的150 mm深的洼地，超过网格洼地容量的降水则成为地表径流。由于陆面模式种类繁多，参数化方案差别大，为了比较不同陆面模式参数化方案异同及探寻土壤湿度模拟不一致的原因，已开展了一些比较计划，其中陆面过程参数化方案比较计划（PILPS）和GSWP国内外介绍较多。经比较参与PILPS的14个陆面模式模拟的土壤湿度发现：利用模式自身的参数得到的土壤湿度差别较大，而调整参数后，模拟结果会有很大改进；大气强迫数据的不确定性是导致模拟结果不确定的主要原因之一；土壤湿度与观测吻合较好时不能保证通量预报值也好，而且土壤湿度不准确也不一定导致得出的通量就差，这暗示土壤湿度和通量间关系的参数化方案有待提高<sup>[26]</sup>。GSWP曾利用两年（1987—1988年）的气象观测数据驱动10个不同陆面模式，用前苏联、美国亚利桑那州、中国和蒙古4个区域的农田和草地的土壤湿度观测数据，对模式模拟的土壤湿度进行了评估，表明模式并不能很好地模拟上述4个区域的土壤湿度，模拟偏差因地而异<sup>[27]</sup>，从而推动了GSWP-2的实施。参与GSWP-2的陆面模式有15个，模拟时间增加到10年（1986—1995年），通过11个模式间互相比较发现，陆面模式模拟土壤湿度绝对值的能力较差，但其能很好地再现土壤湿度的季节性循环和年内变异；同时表明驱动陆面模式的气象数据在土壤湿度离线模拟中扮演者重要角色。外部气象驱动数据对陆面模式敏感性研究证实了上述结论，即耦合了实际土壤湿度观测数

据的再分析资料，极大提高了土壤湿度模拟能力；不管是同一模式用13套不同的气象驱动数据，还是11个模式用同一气象驱动数据，其模拟的土壤湿度数据变幅一样大。利用实测土壤湿度验证模拟结果，需要二者做一些适当的转换，GSWP项目中曾提到Cressman插值法，但其在评估时采用了Kagan的最优平均算法，将测站原位观测转换到格点上<sup>[27]</sup>。我国学者对陆面过程的研究很多，不仅有观测试验，还有模式模拟研究<sup>[28]</sup>，其中黑河流域和青藏高原相关研究较为典型；另外还有一些不同来源土壤湿度对比研究<sup>[29-31]</sup>，因为土壤属性的高度变异性，当模拟的格点内有多个实测值时，利用格点内实测值的平均验证模拟值<sup>[32]</sup>。

北京大学在土壤-植被-大气耦合模式的基础上，发展了新一代北京大学陆面过程模式（Peking University Land Model, PKULM），使用“中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验”平凉站的资料对模式进行了检验表明，该模式能够较好地模拟西北半干旱区农田下垫面地气交换过程<sup>[33]</sup>。BCC\_AVIM是中国气象局国家气候中心研发的BCC\_CSM（Climate System Model）全球气候模式中的陆面模块，对陆面过程具有一定的模拟能力。该模式融合了CLM3.0的土壤水热传输模块以及AVIM2生物化学模块，同时修订了积雪覆盖率参数化方案，改进了地形起伏较大地区积雪覆盖率的模拟<sup>[34]</sup>。

## 1.2 再分析和水文模型模拟

自20世纪90年代以来，美国国家环境预报中心（NCEP）和美国国家大气科学研究中心（NCAR）联合研发的NCEP/NCAR Reanalysis I（R1）、与美国能源部（DOE）研制的NCEP/DOE Reanalysis II（R2）、气候预测系统再分析（Climate Forecast System Reanalysis, CFSR）数据，欧洲中期天气预报中心（ERA5, ERA15, ERA40, ERA-Interim），日本气象厅（JRA-25和JRA-55）和美国国家航空航天局（MERRA, MERRA-2）等的再分析产品相继问世，为土壤湿度模拟提供了广阔前景。2021年年初，中国气象局推出了业务化的全球大气再分析产品（CRA-40）。近年来，针对再分析系统模拟土壤湿度的研究逐渐增多，主要集中在对比分析再分析资料的区域适用性。如Wang等<sup>[35]</sup>利用ERA-Interim和CFSR再分析资料，结合地球系统模式CESM的模拟结果，考察了1979—2016年全球表层土壤湿度次季节变率的基本特征后发现，在中国东部、北美、南非、澳大利亚的夏季，土壤湿度有较大的次季节方差，CFSR和CESM中的土壤湿度变率强于ERA-Interim。邹永成等<sup>[36]</sup>对

ERA-Interim、JRA55、NCEP-DOE R2和20CR这4套土壤湿度再分析资料在中国西北东部—华北—江淮区域的适用性进行分析后得出,4套再分析资料中 ERA-Interim 资料同观测资料接近, JRA55、NCEP-DOE R2资料次之, 20CR资料最差。不同的再分析系统模拟的土壤湿度其空间和时间分辨率及深度和层次上均有一定差异, 但就模拟土壤湿度而言都是由陆面模式产生的, 尽管各自采用的陆面模式不同。如ERA-Interim使用的陆面模式为TESSEL, 中国科学院大气物理研究所新一代大气环流模式(IAP-AGCM4.1)采用的是CLM4陆面模式。

陆面水文模型侧重从水文响应单元模拟水热状况和水热传输, 国外研究和应用较多的有VIC模型(Variable Infiltration Capacity)、SWAT模型(Soil and Water Assessment Tool)等, 其运行多需要气象驱动数据、土壤参数、植被参数等控制性文件。孟现勇等<sup>[37]</sup>在新疆精博河流域用大气同化驱动数据集(CMADS)驱动SWAT模型, 得到流域包括土壤湿度在内的其他地表分量, 表明CMADS+SWAT模式可有效提高SWAT水文模型在我国西北干旱区的表现能力。焦振航等<sup>[38]</sup>分析了VIC水文模型模拟土壤湿度对LAI的敏感性, 发现模拟土壤湿度全年对LAI敏感, 且夏天高于冬天。由于水文模型适用于流域水文过程模拟, 针对性更强, 故土壤湿度方面的研究与陆面模式和再分析的相比要少得多。

离线陆面模式、再分析系统及水文模型与卫星遥感反演土壤湿度最大的区别在于前者能提供格点化土壤湿度数据, 并具有地气过程的物理、化学、生物等理论基础。但不同模式模拟土壤湿度能力差异巨大, 模式本身、参数化方案、驱动数据等影响均较大。已有研究表明, 耦合实际观测土壤湿度数据的再分析数据, 能有效提高陆面模式的土壤湿度模拟能力。此外, 随着高时空分辨率卫星遥感和数据同化技术的发展, 人们开始将眼光转向数据同化, 以获得全球和区域性数据同化集, 当然包括产生准确性更高的土壤湿度数据。

## 2 土壤湿度同化

数据同化核心思想是把不同来源、不同分辨率、直接和间接观测数据与模式模拟结果集成, 生成具有时间一致性、空间一致性和物理一致性的各种地表状态的数据集<sup>[32]</sup>。Richardson在1922年首次把观测资料手工插值到网格点上, 作为数值预报的初始场<sup>[39]</sup>, 这可能是最早的同化思想。数据同化中, 同化的观测数据可分为直接观测数据和间接数据两类。直接数据即观

测量和希望得到的物理量一致, 如温度、空气湿度; 间接数据其希望得到的物理量与观测之间一般是通过函数转换得来, 如遥感反演的土壤湿度。

### 2.1 同化算法

数据同化算法是数据同化的重要组成部分, 它连接了新的观测数据与模式模拟预测, 提高了模拟精度, 也就是说利用模式预测当前状态, 然后利用先验状态估计作为初始条件, 结合观测数据, 对先验预报进行订正, 以获得当前状态的最佳估计<sup>[40]</sup>。数据同化算法从最早的二维插值算法、最优插值算法到当前的四维变分(4-DVar)、卡尔曼滤波法(KF)等, 经历了从简单到复杂的过程<sup>[41]</sup>。

数据同化算法走过了近70年的历程, 尽管出现了很多算法, 但从纯算法角度可分为序列同化和变分同化两类<sup>[42]</sup>。顾名思义, 序列同化是按顺序进行同化, 且一次仅能调整同一时刻的值。这种方法最初是直接利用观测数据替代网格预测值, 目前已很少见; 后来发展到以预报场作为初始场, 用观测数据做客观分析<sup>[43]</sup>。20世纪后半叶, 序列同化方法是唯一用于数值天气预报业务的同化方法。随着学科的交叉和多源数据的应用, 如何同化不同来源的数据, 成为数据同化中需要解决的问题。变分同化的出现, 将数据同化转化为求解表征分析场与观测场及背景场之间偏差的目标函数的极小化问题, 从而摆脱了观测和分析量之间存在线性关系的限制<sup>[39]</sup>。数据同化的主要方法有插入法、四维最优插值法、三维变分、隐式四维变分、显式四维变分<sup>[44-45]</sup>、卡尔曼滤波法、牛顿张弛法<sup>[46]</sup>、神经网络法、粒子滤波等<sup>[47]</sup>。

### 2.2 主要同化系统

当前, 同化和模拟土壤湿度的陆面数据同化系统绝大部分未与大气模式耦合。陆面数据同化系统可根据区域大小分为国家、区域和全球系统; 根据分辨率分为高分辨率和低分辨率系统; 根据陆面模式与大气模式关系分为非耦合与耦合系统等。陆面数据同化系统流程如下: 1) 利用大气数据同化系统产生气象驱动数据; 2) 利用遥感和地表观测数据获得陆面参数; 3) 气象驱动数据与陆面参数进入陆面模式, 生成当前时刻的状态变量; 4) 同化当前时刻的各种可同化的观测资料, 估计背景场误差, 优化状态变量; 5) 陆面同化与大气同化继续向前推进, 生成下一时刻的背景场<sup>[48]</sup>。上述过程中, 耦合系统的驱动数据为大气模式预测变量和观测数据, 且陆面数据同化系统的一些输出量作为初始场或边界条件重新运行耦合系统, 而非耦合系统没有此过程。

全球陆面数据同化系统开始于1998年，主要包括NASA GLDAS，NCEP GLDAS和ECMWF GLDAS。NASA GLDAS是一个非耦合系统，NCEP GLDAS和ECMWF GLDAS是一个弱耦合系统。当前该系统已发展到第二阶段，即GLDAS-2。其同化算法包括四维变分、卡尔曼滤波、集合卡尔曼滤波；陆面模式为Mosaic, CLM2, Noah, VIC, Catchment LSM；驱动数据多达12种。国内外对该系统输出的土壤湿度相关对比研究较多<sup>[49-53]</sup>。

我国陆面数据同化系统主要有两个，一个是中国科学院寒区旱区环境与工程研究所联合兰州大学大气科学系在2003年开发的陆面数据同化系统（CLDAS），其官方网站称为中国西部地区陆面数据同化系统<sup>[54]</sup>，以CoLM模型作为模型算子，耦合针对土壤（包括融化和冻结）、积雪等不同地表状态的微波辐射传输模型，集合卡尔曼滤波（EnKF）同化被动

微波观测（SSM/I和AMSR-E），系统输出较高精度的土壤湿度、土壤温度等同化资料。该系统输出的时间分辨率虽为小时，但因是国家自然科学基金支持的研发项目，数据范围仅为2002年。

另一个是中国气象局国家气象信息中心发展的陆面数据同化系统（CMA CLDAS），起步较晚，2013年发布第一版（CLDAS-V1.0）同化数据，2015年第二版（CLDAS-V2.0）实时发布亚洲区域逐时和逐日 $0.0625^{\circ} \times 0.0625^{\circ}$ 分辨率包括土壤湿度在内的陆面要素分析产品和大气驱动场。其后，在CLDAS-V2.0的基础上研发了高分辨率中国气象局陆面数据同化系统（HRCLDAS-V1.0），产品分辨率提高至 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ <sup>[55]</sup>。我国陆面数据同化系统的主要技术及输出数据见表1。我国陆面数据同化模式虽起步较晚，但后发优势非常明显，尤其是中国气象局国家气象信息中心研发的系统均已在业务中应用。

表1 与土壤湿度相关的中国主要陆面数据融合与同化产品  
Table1 Main land surface element merging products in China

机构	名称	主要技术	产品要素	起止时间	时空分辨率
中国气象局国家气象信息中心	CLDAS	多重网格变分；空间格点拼接、离散纵坐标短波辐射遥感反演；CLM, Noah-MP, CoLM多陆面模式集合模拟	气温、气压、湿度、风速、降水、短波辐射、土壤湿度、土壤温度、地表温度、土壤相对湿度	2008—	1 h, $0.0625^{\circ}$
中国气象局国家信息中心	HRCLDAS	多重网格变分；离散纵坐标短波辐射遥感反演和融合；CLM陆面模式模拟	气温、气压、湿度、U/V风、风速、降水、短波辐射、土壤湿度、土壤温度、地表温度、土壤相对湿度	2015—	1 h, $0.01^{\circ}$
中国科学院寒区旱区环境与工程研究所	中国西部陆面数据同化系统	陆面模式模拟	土壤水分、土壤温度、积雪、冻土	2012—	1 h, $0.25^{\circ}$
国家青藏高原科学数据中心	基于微波数据同化的中国土壤水分数据集	陆面同化系统（ITPLDAS）；SIB2；AMSR-E亮温	土壤体含水量	2020—2011	1 d, $0.25^{\circ}$
广东省科学院广州地理研究所	全球土壤水分产品融合数据集	ESA-CCI土壤湿度、SMA土壤湿度、时空序列插补、重投影、重采样	土壤体含水量	2015—2019	1 d, $0.25^{\circ}$
中国科学院青藏高原研究所	中国区域地面气象要素驱动数据集	双线性空间插值；Hybrid Model辐射估算	气温、气压、湿度、风速、降水、太阳辐射	1979—2018	3 h, $0.25^{\circ}$

### 3 展望及建议

除基于测站的原位观测、遥感反演和陆面模式模拟的土壤湿度外，20世纪90年代，以美国国家环境预报中心（NCEP）和国家大气研究中心（NCAR）为代表的再分析资料研制工作取得了长足发展。卫星反演、模式模拟和再分析资料虽能一定程度上解决土壤湿度观测数据时空连续性差的问题，但这些资料能否真实反映土壤湿度状况，是近年来国内外开展较多的研究工作之一<sup>[56-59]</sup>。不管是地基还是天基或空基观测系统，大气、陆面和海洋模式的物理过程，参数化方案和同化算法等均会影响反演和模拟的包括土壤湿度在内的其他产品的可靠性。如NCEP/DOE和ERA-40再分析产品中，由观测系统变化和模式缺陷所引起的误差是其主要质量问题。模式误差不仅体现在一些重要参数化方案和物理过程所存在的不足，更重要的是会

放大观测系统所引入的误差<sup>[60]</sup>。目前，面或格点化的土壤湿度产品已在生态环境、水文循环、气候预测、气候变化和能量平衡、水旱灾害评估等诸多领域展现出非凡的应用前景。

近年来，我国在卫星遥感反演、陆面数据同化及再分析方面的进展，极大推动了我国地气系统、生态环境演变、气候变化和天气气候预报等领域的研究和业务服务。减小反演和模拟误差，提高时空分辨率和模拟质量是土壤湿度产品研制和应用中的核心问题和主要困难。获得高质量的观测数据和完整的陆面参数、强化地气系统大数据融合应用、提高机理认识推进模式发展、完善物理过程改进数据同化算法，将是未来一段时间研制更加可靠的包括土壤湿度在内的数据产品的发展方向。

升级观测系统以获得高质量原位观测数据。近10

年, 自动土壤湿度观测得到快速发展, 极大提升了土壤湿度监测的时间频次和空间密度, 但其与应用需求和高分辨率模式输出相比, 尚存在不小差距。从气象要素和土壤湿度等观测设备选型、站点布设、运维保障、质量控制等几个方面综合考虑, 持续升级, 以支撑数据同化、反演及模式验证, 逐渐满足实际应用。此外, 作为模式底层输入数据的土壤属性、植被类型、水文单元等这些陆面参数, 对模式输出的误差控制具有重要作用, 亦需要持续完善。

研发高精度气象驱动数据以提升模式结果。陆表、水文和生态模式均需要格点化的地表气象要素作为驱动数据, 准确和高分辨率的气象驱动数据有助于提高模式输出。近年来, 该领域的研究除融合多源数据、完善模式外, 更多学者持续关注同化算法和多模式集合方法<sup>[61-62]</sup>。不管是遥感土壤湿度反演算法或数据同化算法, 我国学者主要以应用和个别改进为主, 今后一段时间, 既需要针对具体数据资料对改进研究加以关注, 也需要在原创算法上投入更多精力。

增加地气系统的认识以完善模式物理过程。人类对地气系统各种过程的认识经历了单学科到多学科交叉、逐步深入, 从简单模拟到复杂模拟的过程。气候模式、陆面模式中的辐射传输、湍流通量、能量平衡、土壤热量输送和土壤水文等过程和方案存在诸多经验和不确定性, 提高这方面的认识和增加区域针对性, 模拟程度将越接近实际, 模式模拟的系统误差就会越小。总体看, 我国在这方面还有很长的路要走, 是未来一段时间需要着力强化的主要领域。

## 参考文献

- Akinremi O O, Mcginn S M, Barr A G. Simulation of soil moisture and other components of the hydrological cycle using a water budget approach. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, 76(2): 133-142.
- 张人禾, 刘粟, 左志燕. 中国土壤湿度的变异及其对中国气候的影响. *自然杂志*, 2016, 38(5): 313-319.
- 满子豪, 翁白莎, 杨裕恒, 等. 青藏高原冻融过程期划分及发展趋势研究. *水电能源科学*, 2020, 38(7): 16-19, 29.
- Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 1992, 359: 373-380.
- Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, et al. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 704-716.
- 林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等. 陆面水文过程研究进展. *大气科学*, 2008, 32(4): 935-949.
- Legates D R, Mahmood R, Levia D F, et al. Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 2010, 35(1): 65-86.
- Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change: a numerical experiment. *Monthly Weather Review*, 1984, 112: 474-490.
- Dirmeyer P A. A history and review of the global soil wetness project (GSWP). *Journal of Hydrometeorology*, 2011, 12(5): 729-749.
- 马柱国, 符凉斌, 谢力, 等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 563-567.
- 刘永强, 叶笃正, 季劲钧. 土壤湿度和植被对气候的影响: I. 短期气候异常持续性的理论分析. *中国科学: B辑*, 1992, 4: 441-448.
- 左志燕, 张人禾. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系. *科学通报*, 2007, 52(14): 1722-1724.
- Yang K, Chen Y Y, He J, et al. Development of a daily soil moisture product for the period of 2002-2011 in Chinese mainland. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(8): 1113-1125.
- Douville H, Viterbo P, Mahfouf J F, et al. Evaluation of the optimum interpolation and nudging techniques for soil moisture analysis using FIFE data. *Monthly Weather Review*, 2000, 128 (6): 1733-1756.
- Bob S, Yang K. Time-lapse observation dataset of soil temperature and humidity on the Tibetan Plateau (2008-2016). *National Tibetan Plateau Data Center*, 2019. doi: 10.11888/Soil.tpd.270110
- Xia Y L, Hao Z C, Shi C X, et al. Regional and global land data assimilation systems: innovations, challenges, and prospects. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(2): 159-189.
- 汪薇, 张瑛. 陆面过程模式的研究进展简介. *气象与减灾研究*, 2010, 33(3): 1-5.
- 刘金婷. 多陆面模式、多驱动场对新疆地区陆面过程模拟研究及结果集成. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- 张强. 简评陆面过程模式. *气象科学*, 1998, 18(3): 295-304.
- 张文君, 宇如聪, 周天军. 中国土壤湿度的分布与变化 II. 耦合模式模拟结果评估. *大气科学*, 2008, 32(5): 1128-1146.
- 戴永久. 陆面过程模式研发中的问题. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 33-38.
- 赵鸣, 江静. 一个引入近地层的土壤-植被-大气相互作用模式. *大气科学*, 1995, 19(4): 405-414.
- 季劲钧, 余莉. 地表面物理过程与生物地化学过程耦合反馈机理的模拟研究. *大气科学*, 1999, 23(4): 439-448.
- Dai Y J, Dickinson R E, Wang Y P. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2281-2299.
- Manabe S. Climate and the ocean circulation I. The atmosphere circulation and the hydrology of the Earth's surface. *Monthly Weather Review*, 1969, 97: 739-774.
- 李得勤, 段云霞, 张述文. 土壤湿度观测、模拟及估算研究. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 424-434.
- Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Evaluation of global soil wetness project soil moisture simulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1999, 77(1B): 183-198.
- 李得勤, 张述文, 文小航, 等. 土壤湿度参数化及对天气和气候模拟影响的研究进展. *地球科学进展*, 2016, 31(3): 236-247.
- 张文君, 周天军, 宇如聪. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间比较. *大气科学*, 2008, 32(3): 581-579.
- 马思源, 朱克云, 李明星, 等. 中国区域多源土壤湿度数据的比较研究. *气候与环境研究*, 2016, 21(2): 121-133.
- 王静, 祁莉, 吴志伟, 等. 多套土壤湿度替代资料在青藏高原的适用性分析. *高原气象*, 2018, 37(2): 371-381.
- 李新, 黄春林. 数据同化: 一种集成多源地理空间数据的新思路. *科技导报*, 2004, 12: 13-17.
- 郑辉, 刘树华, Prabhakar C, 等. 北京大学陆面过程模式 PKULM (Peking University Land Model) 介绍及检验. *地球物理学报*, 2016, 59(1): 79-92.
- 马翠丽, 吕世华, 潘永洁, 等. 陆面模式砾石参数化在国家气候中心 BCC\_AVIM 陆面过程模式中的应用及检验. *高原气象*, 2020, 39(6): 102-115.
- Wang Y D, Chen H S, Zhou Y, et al. Subseasonal variabilities of surface soil moisture in reanalysis datasets and CESM simulations. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, 13(1): 34-40.
- 邹永成, 宋耀明, 王志福. 四套土壤湿度再分析数据在中国西北部一华北一江淮地区的适用性研究. *气候与环境研究*, 2017, 21(5): 538-550.
- 孟现勇, 王浩, 雷晓辉, 等. 基于 CMDAS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析. *生态学报*, 2017, 37(21): 7114-7127.
- 焦振航, 舒红, 吴凯, 等. 水文模型的 LAI 优化与单网格土壤湿度同化. *地理空间信息*, 2019, 17(9): 68-72, 125.

- [39] 官元红,周光庆,陆维松,等.资料同化方法的理论发展及应用综述.气象与减灾研究,2007,30(4):1-8.
- [40] 兰鑫宇,郭子祺,田野,等.土壤湿度遥感估算同化研究综述.地球科学进展,2015,30(6):668-679.
- [41] 邵明轩,陈敏,陶祖钰,等.降水量的直接同化对初始场的影响.大气科学,2006,30(2):268-276.
- [42] Talagrand O. Assimilation of observation, an introduction. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1997, 75(1B): 191-209.
- [43] 王跃山.数据同化:它的起源、含义和主要方法.海洋预报,1999,16(1):11-20.
- [44] Ehrendorfer M. Four-dimensional data assimilation: comparison of variational and sequential algorithms. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1992, 118(506): 673-713.
- [45] 邱崇践,张蕾,邵爱梅.一种显式四维变分资料同化方法.中国科学(地球科学),2007,37(5):698-704.
- [46] 胡娅敏,丁一汇,廖菲.土壤湿度资料同化对中国东部夏季区域气候模拟的改进.科学通报,2009,54(16):2388-2394.
- [47] 马建文,秦思娴.数据同化算法研究现状综述.地球科学进展,2012,27(7):747-757.
- [48] 黄春林,李新.陆面数据同化系统的研究综述.遥感技术与应用,2004,19(5):424-428.
- [49] 李霞,高艳红,王婉昭,等.黄河源区气候变化与GLDAS数据适用性评估.地球科学进展,2014,29(4):531-540.
- [50] 邹永成,宋耀明,王志福.四套土壤湿度再分析数据在中国西北部—华北—江淮地区的适用性研究.气候与环境研究,2017,21(5):538-550.
- [51] Spennemann P C, Rivera J A, Saulo A C, et al. A comparison of GLDAS soil moisture anomalies against standardized precipitation Index and multisatellite estimations over South American. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(1):158-171.
- [52] 韩帅,师春香,姜立鹏,等. CLDAS土壤湿度模拟结果及评估.应用气象,2017,28(3):369-378.
- [53] 崔圆圆,谭军,敬文琪,等. GLDAS和CLDAS融合土壤水分产品在青藏高原地区的适用性评估.高原气象,2018,37(1):123-136.
- [54] 李新,黄春林.中国西部地区陆面数据同化数据集(2002).国家青藏高原科学数据中心,2013. doi: 10.3972/westdc.002.2013.db.
- [55] 师春香,潘昞,谷军霞,等.多源气象数据融合格点实况产品研制进展.气象学报,2019,77(4):774-783.
- [56] Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, et al. Comparison of soil moisture products from microwave remote sensing, land model, and reanalysis using global ground observations. Hydrological Processes, 2019, 34(3): 836-851.
- [57] 范科科,张强,史培军,等.基于卫星遥感和再分析数据的青藏高原土壤湿度评估.地理学报,2018,73(9):1778-1791.
- [58] 朱智,师春香,张涛,等.四套再分析土壤湿度资料在中国区域的适用性分析.高原气象,2018,37(1):240-252.
- [59] 邹永成,宋耀明,王志福.四套土壤湿度再分析数据在中国西北部—华北—江淮地区的适用性研究.气候与环境研究,2017,21(5):538-550.
- [60] 赵天保,符凉斌,柯宗建,等.全球大气再分析资料的研究现状与进展.地球科学进展,2010,25(3):242-254.
- [61] He J, Yang K, Tang W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. Scientific Data, 2020, 7, 25, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0369-y>.
- [62] Yang K, He J, Tang W, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38-46.

(上接7页)

和业务水平上都还存在差距,需要加强管理协调,采取有效措施,形成合力,促进我国航空气象业务服务水平的提升。2016年1月,中国民用航空空中管理总局、中国气象局和香港天文台启动联合建设亚洲航空气象中心,民航气象中心为建设和运行的主体单位,国家气象中心提供技术支持,香港天文台则为备份中心。2018年7月11日,该中心正式成立并开始运行,对亚洲区域内未来六小时可能影响航空运行的雷暴、颠簸、积冰、沙暴等天气提供预报。这一合作方式应成为一个新的起点,通过中心的发展,解决好航空气象服务的协调机制问题。

#### 参考文献

- [1] Haupt S E, Rauber R M, Carmichael B, et al. 100 years of progress in applied meteorology. Part I: Basic applications. Meteorological Monographs, 2017, 59: 22. 1-22. 33.
- [2] Dubois J L, Multhauf R P, Ziegler C A. The Invention and Development of the Radiosonde: with a Catalog of Upper-Atmosphere Telemetering Probes in the National Museum of American History, Smithsonian Institution. Smithsonian Institution Press, 2002.
- [3] von Bezold W. Die Bedeutung der Luftschiffahrt für die Meteorologie. Zeitschr Luftschiffahrt, 1888: 193-203.
- [4] Lebow E F. Cal Rodgers and the Vin Fiz: The First Transcontinental Flight. Smithsonian Institution Press, 1989. <https://sirismm.si.edu/EADpdfs/NASM.2007.0004.pdf>.
- [5] Johnston A. Libya 1911: How an Italian pilot began the air war era. BBC News, 2011: 10.
- [6] Shun C M, Lisk I, McLeod C, et al. Meteorological services to aviation. WMO Bulletin, 2009, 58(2): 94-103.
- [7] Perry J S, O'Neill T H R. The global atmospheric research program. Reviews of Geophysics, 1979, 17(7): 1753-1762.
- [8] Mueller E, Chatterji G. Analysis of aircraft arrival and departure delay characteristics. AIAA's Aircraft Technology, Integration, and Operations (ATIO) 2002 Technical Forum. 2002: 5866.
- [9] Ingleby B, Candy B, Eyre J, et al. The impact of COVID-19 on weather forecasts: a balanced view. Geophysical Research Letters, 2021, 48(4): e2020GL090699.
- [10] Wick G A, Dunion J P, Walker J. Sensing Hazards with Operational Unmanned Technology: Impact Study of Global Hawk Unmanned Aircraft System Observations for Hurricane Forecasting. NOAA Technical Memorandum, 2018.

# 高原积雪对太阳活动响应及其放大作用的研究进展

宋燕<sup>1</sup> 周雅清<sup>2</sup> 李智才<sup>3</sup> 张薇<sup>4</sup> 孙必云<sup>5</sup> 索琳<sup>6</sup> 毕训强<sup>5</sup> 肖天贵<sup>6</sup> 张红英<sup>7</sup>

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 山西晋中市气象局, 晋中 030600;

3 山西气候中心, 太原 030006; 4 北京市房山区气象局, 北京 102488; 5 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

6 成都信息工程大学, 成都 610225; 7 山西长治市气象局, 长治 046000)

**摘要:** 高原积雪对太阳活动的响应研究是一个较新的领域, 在对前期研究成果进行回顾和梳理的基础上, 展示了最新的研究成果。研究表明, 高原积雪时空分布对太阳活动有较为显著的响应, 其机理是太阳活动通过bottom-up机制和top-down机制共同作用影响高原积雪。太阳活动可以引起全球0~200 m海温异常和潜热通量异常, 通过改变海气相互作用进一步影响高原降水(积雪)异常, 放大太阳活动的作用; 另一方面, 太阳活动通过影响平流层大气温度和环流, 影响平流层和对流层大气之间的相互作用, 进而改变对流层大气环流和风场, 导致高原积雪异常。对未来的研究工作进行了展望, 研究表明: 数值试验模拟太阳活动影响高原积雪的关键在于气候系统模式需要包含细致的高层大气化学过程和海气耦合过程。

**关键词:** 高原积雪, 太阳活动, 放大作用, bottom-up和top-down机制, 中国降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.004

## Advances on Response and Amplification of Snow over the Tibetan Plateau to Solar Activity

Song Yan<sup>1</sup>, Zhou Yaqing<sup>2</sup>, Li Zhicai<sup>3</sup>, Zhang Wei<sup>4</sup>, Sun Biyun<sup>5</sup>, Suo Lin<sup>6</sup>,  
Bi Xunqiang<sup>5</sup>, Xiao Tianguai<sup>6</sup>, Zhang Hongying<sup>7</sup>

(1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 Jinzhong Meteorological Service, Jinzhong 030600 3 Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006

4 Fangshan District Meteorological Bureau, Beijing 102488 5 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 6 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

7 Changzhi Meteorological Service, Changzhi 030600)

**Abstract:** The research on the response of plateau snow cover to solar activity is a relatively new field, and there are few related researches about this topic internationally. The snow cover over the Tibetan Plateau in winter and spring has an important influence on the East Asian monsoon and precipitation in China. Therefore, it is of great significance to study the influence and amplification of solar activity on the snow cover over the Tibetan Plateau. On the basis of reviewing the previous research results, this paper gives the recent research results, and prospects of the further research work in the future. The results showed that the temporal and spatial distributions of plateau snow cover have significant responses to the solar activity, and the mechanism is that the solar activity could cause the abnormal snow cover over the Tibetan Plateau through the joint action of bottom-up mechanism and top-down mechanism. Solar activity can cause anomalous 0–200 m global sea surface temperature and latent heat flux over the Pacific Ocean, which could change the air-sea interaction, further to affect the precipitation of China and plateau snow, amplifying the influence of solar activity. On the other hand, through affecting stratospheric temperature and circulation, solar activity alters interaction of stratospheric and tropospheric atmosphere and wind field to induce anomalous plateau snow. In this paper, the future research work is prospected, and it is pointed out that the key to simulate the influence of solar activity on plateau snow is that the climate system model should include detailed chemical process in upper atmosphere and air-sea coupling process.

**Keywords:** plateau snow, solar activity, amplification, bottom-up and top-down mechanisms, precipitation in China

收稿日期: 2021年2月19日; 修回日期: 2021年7月16日

第一作者: 宋燕(1965—), Email: songyan@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(41575091); 国家重大科学研究计划(2012CB957803); 中国气象局气象干部培训学院科研项目(中国区域气候影响因子研究)

## 0 引言

太阳辐射是地球气候系统和大气环流的重要能量来源, 研究表明, 太阳活动对天气和气候有重要的影响<sup>[1-11]</sup>。近代太阳活动对全球气候系统显著影响的例子就是小冰期, 由于太阳活动的减弱, 太阳黑子减

少,使得12世纪中期到19世纪末期,全球气候在世界不同的区域出现了明显的变冷,发生气候异常<sup>[12-16]</sup>。

太阳活动对全球气候系统的影响在某些区域更为显著,也即具有区域性选择<sup>[17-20]</sup>。有研究表明,东亚季风区是对太阳活动响应的显著区域<sup>[17, 20]</sup>,太阳活动的强弱影响东亚夏季风北部边缘所在纬度,太阳活动强(弱),东亚夏季风区域南风更加偏北(南),雨带位置偏北(南)<sup>[20-21]</sup>。冬季太阳射电通量(SRF)强(弱),东亚冬季风较弱(强),东北亚地区冬季降水偏多(少)<sup>[18]</sup>。

在年代际时间尺度上,通过相关分析和显著性检验,宋燕等<sup>[22]</sup>指出,太阳活动对高原冬季雪深和东亚冬季风的影响在滞后2~6 a里达到最强,进一步说明了东亚地区是响应太阳活动的显著地区,高原积雪对太阳活动有明显的响应。

关于高原积雪对太阳活动的响应机制研究,近期研究表明,太阳活动通过bottom-up(太阳总辐照度(TSI))机制,影响太平洋、大西洋和印度洋地区0~200 m海温异常和潜热通量异常<sup>[23-24]</sup>,在异常的海气相互作用下,进一步造成东亚冬季和夏季降水异常<sup>[18, 23]</sup>,当海温异常指数高(低)时,高原夏季降水偏少(多),冬季降水偏多(少)。计算表明,高原地区的冬季降水与雪深相关性较高(达到99.9%),因此,高原冬季降水量反映积雪的多少。这项研究成果说明海洋对太阳活动的响应后的热力异常分布,通过影响海气相互作用中的热量通量,进而影响到高原积雪的异常;并且,由太阳活动造成的高原积雪异常,通过陆面过程和陆气相互作用,进而影响接下来夏季的东亚夏季风,造成中国夏季降水异常,在太阳活动强(弱)年,中国东部地区降水雨带偏北(南)。这证明太阳活动对高原积雪和中国夏季降水的关系有明显的调制作用,放大了太阳活动的影响。这些研究成果首次揭示了太阳活动影响高原积雪的物理过程,以及高原积雪对太阳活动的放大作用。

太阳活动主要通过两种物理途径影响气候系统,其一是top-down(自上而下)机制,又称为紫外线(UV)机制;其二是bottom-up(自下而上)机制,又称为TSI机制<sup>[9, 25-30]</sup>。由于太阳辐射中的紫外辐射引起的能量变化,会在地球大气中引起较为显著的影响,尤其是紫外辐射可以直接作用于平流层大气中的臭氧,促使平流层大气中臭氧量增加、热量在不同纬度重新分配,改变热力平衡而造成大气环流的变化,再由平流层和对流层大气之间的相互作用、大气中长波垂直传播影响对流层大气环流和气候现象<sup>[9-11]</sup>,这种机制即是所谓的top-down机制。太阳活动影响气候

系统的另一个机制是bottom-up机制,指的是太阳总辐射(TSI)的变化直接影响地球表面的热量分布,尤其是晴空无云的海洋,由于海洋表面热量吸收增多,造成海温异常分布,再通过海气相互作用影响水汽蒸发和大气中的水分含量,改变Hadley环流和Walker环流<sup>[26, 30-35]</sup>,引起副热带地区垂直运动和云量的变化,促使更多的水汽向ITCZ降水区辐合<sup>[9]</sup>,这两种机制的作用是正向一致的<sup>[27, 36]</sup>,从而放大了太阳活动的影响。本文在总结前人研究结果的基础上,探索太阳活动通过两种机制影响高原积雪和东亚季风,进一步放大太阳活动影响的物理过程。

目前尚缺乏有关太阳活动影响高原积雪异常的数值模拟研究,主要的难点在于需要选取可以描述高层大气化学过程、以及0~700 m海洋各层热力过程的气候系统模式,能够同时体现太阳活动影响气候系统的top-down和bottom-up两种机制,才能模拟出太阳活动影响大气的热力和动力过程以及非线性放大效应,得到太阳活动影响高原积雪的物理图像。这对气候系统模式的要求比较高。Meehl等<sup>[27]</sup>的工作表明,需要同时考虑太阳活动两种机制综合的影响,才能与实际观测更加接近。

## 1 研究结果

研究表明,在年代际时间尺度上,太阳射电通量(Solar Radio Flux, SRF)与高原冬季雪深呈较为显著的正相关关系,并且,太阳活动调节着高原冬季雪深与中国夏季降水之间的关系<sup>[21-22]</sup>。太阳活动对东亚夏季风的北缘位置以及6月淮河降水量都有重要的指示意义<sup>[19-20]</sup>。然而,在年际时间尺度上,高原积雪对太阳活动响应的时空特征,以及对太阳活动响应的放大作用研究成果甚少,而高原积雪对东亚地区气候的影响深远且意义重大,因此,相关研究很有必要。

### 1.1 冬季高原积雪对太阳活动的时空响应特征

利用1951—2017年20世纪再分析资料数据集第二版(20CRv2)的月平均水等效积雪深度格点资料代替积雪测站资料(该数据是单位面积上的积雪换算为融化后的水的质量,单位是 $\text{kg}/\text{m}^2$ ,分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ ),分析冬季高原积雪空间分布对太阳活动响应的同期和滞后相关(图1),发现高原积雪与太阳活动信号有同期和滞后1~2 a的显著相关。高原整体积雪与太阳射电通量基本呈现正相关,仅在高原的西端、东北部和东南部有局部的负相关。其中,显著相关区域集中在高原中部地区,唐古拉山脉—念青唐古拉山脉—横断山脉一线以及巴颜喀拉山脉东段和阿尼玛卿山脉。随着滞后时间的延长,正相关的区域逐渐减小,高

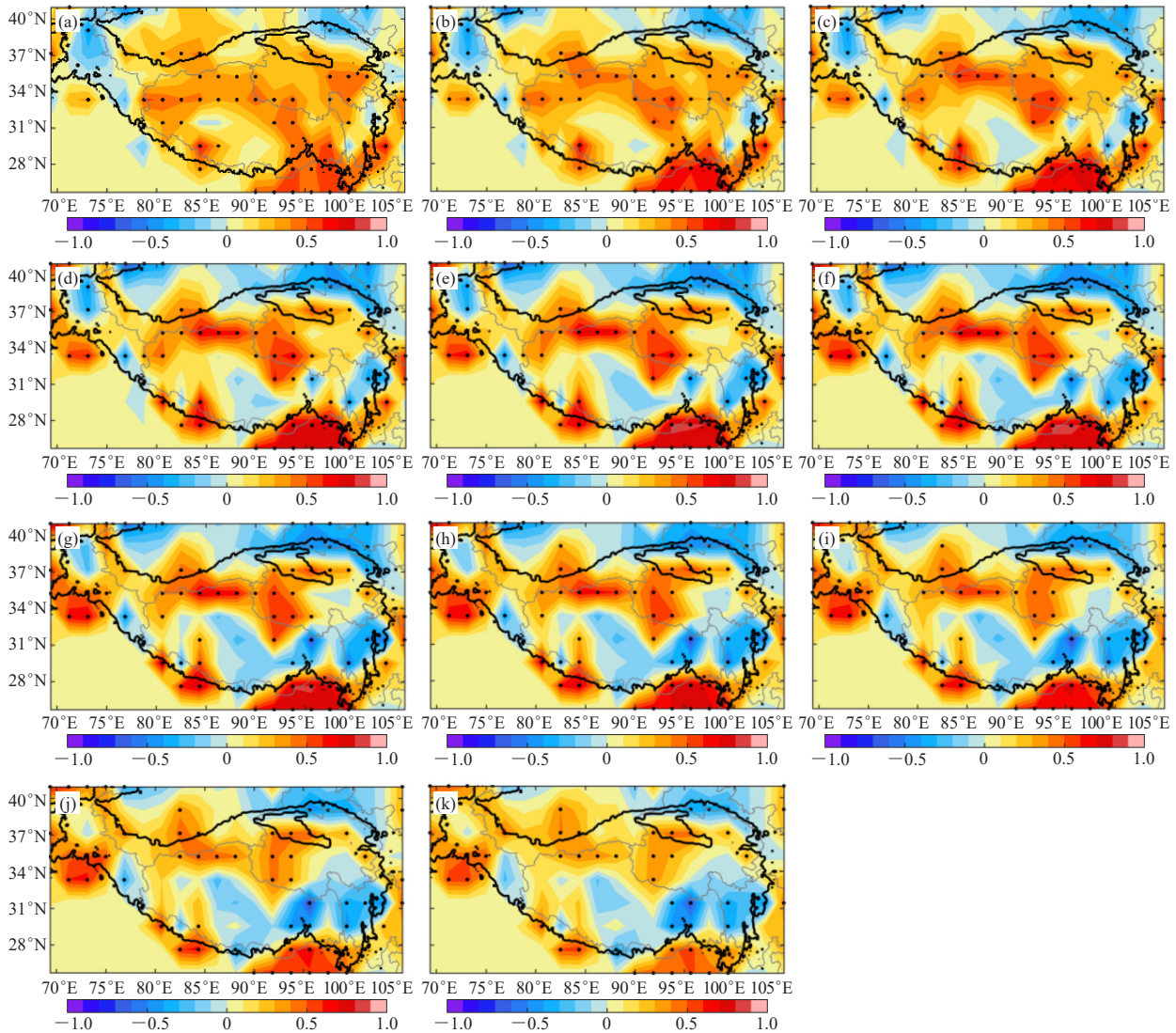


图1 1951—2017年青藏高原冬季积雪与太阳射电通量同期和滞后相关的空间分布，依次为同期 (a) 和分别滞后1~10 a (b~k) (黑点表示通过0.05的显著性检验)

Fig. 1 Spatial distribution of winter snow over the Tibetan Plateau during 1951—2017 for the same period and lag of solar radio flux

(a) in the same period, (b)—(k) in the lag of 1—10 years  
(Stippling indicates gridpoint where the difference is significant at 0.05 significance level)

原南部负相关的区域逐渐增大。说明在年际时间尺度上，冬季高原积雪空间分布对太阳活动有明显的同期和滞后相关。

对冬季高原积雪进行旋转经验正交函数分解 (REOF) 展开 (图2)，第一旋转特征向量表现为以唐古拉山脉—念青唐古拉山脉为界的东北—西南反位相特征 (图2a)；第二旋转特征向量表现为沿纬向的“—+—”的分布特征 (图2b)；在第三旋转特征向量呈现南北反位相的分布特征 (图2c)；第四个旋转特征向量近似地以90°E为界，呈现东西反位相的分布特征 (图2d)。

计算冬季高原积雪REOF各模态时间系数与SRF

的相关系数 (表1)，显示PC1、PC2、PC3与SRF之间存在显著的同期相关，PC2与SRF的同期相关最显著 (0.5571)。各模态的时间系数与SRF之间都存在显著的滞后相关。PC1与SRF除了滞后第7年未达到显著性水平之外，其余滞后年份均表现出显著的滞后相关。两者在同期至滞后7年时间段里均呈正相关，滞后8~10 a转为负相关，其中滞后第3年呈最大正相关 (0.6344)。前3个模态与SRF均有显著的同期和滞后相关，说明太阳活动对冬季高原积雪的影响是显著的。

以上研究结果均表明，太阳活动对冬季高原积雪时空分布具有同期和滞后显著的影响，高原地区是对太阳活动响应的敏感地区。

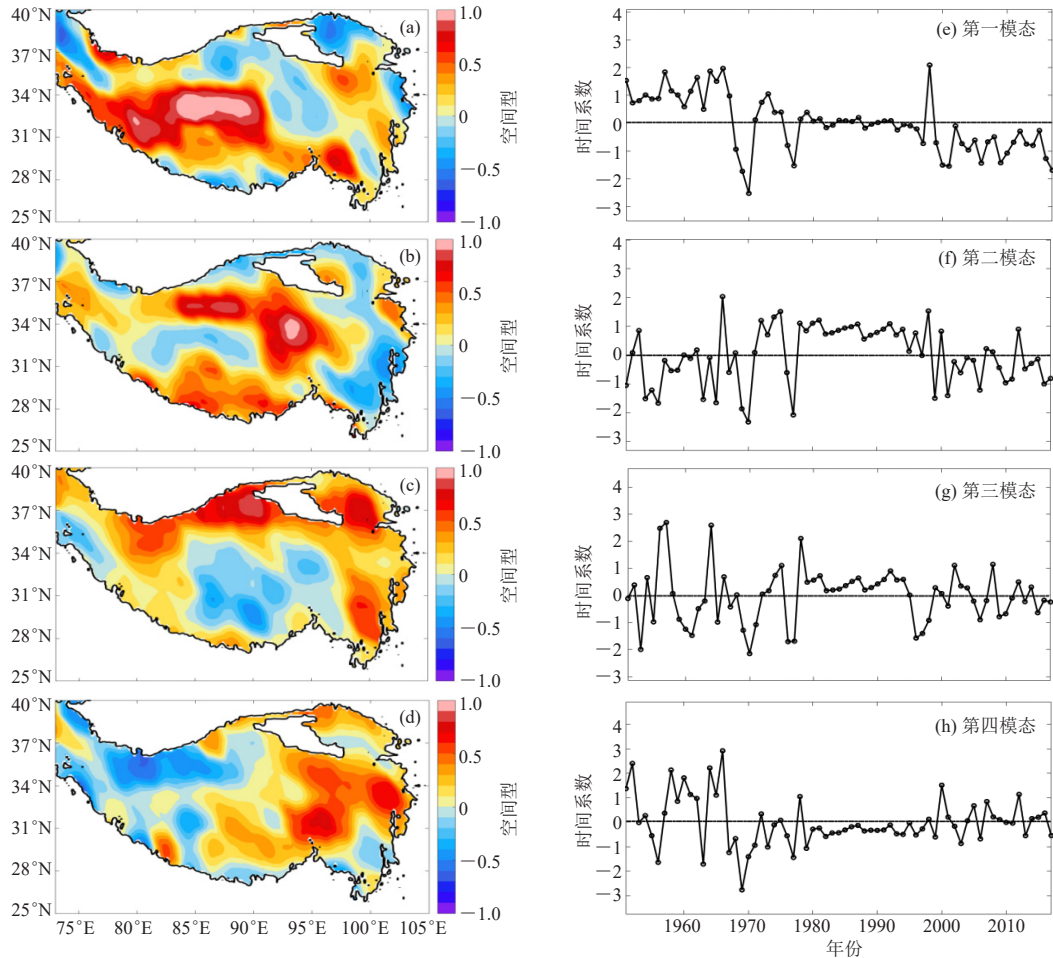


图2 1951—2017年冬季高原积雪经REOF分解后的第1~4模态特征向量的空间分布,依次为第1模态(a, 解释方差为23.59%)、第2模态(b, 解释方差为16.34%)、第3模态(c, 解释方差为14.44%)、第4模态(d, 解释方差为12.27%)以及各模态主成分时间系数,依次为PC1(e)、PC2(f)、PC3(g)、PC4(h)

Fig. 2 Spatial distribution of the eigenvectors of the first to fourth modes after REOF decomposition from 1951 to 2017. The first mode (a, variance is 23.59%), the second mode (b, variance is 16.34%), the third mode (c, variance is 14.44%), the fourth mode (d, variance is 12.27%), and the time coefficients of the principal components of PC1 (e), PC2 (f), PC3 (g) and PC4 (h)

表1 1951—2017年冬季高原积雪REOF时间系数与SRF的同期和滞后相关系数

Table 1 Correlation coefficients between time coefficient of the principal components of snow and SRF from 1951 to 2017

滞后时间	PC1	PC2	PC3	PC4
0年	0.4815*	0.5571*	-0.244*	0.1055
1年	0.5749*	0.4055*	-0.2133*	0.1591
2年	0.6303*	0.2489*	-0.1826	0.1781
3年	0.6344*	0.0996	-0.1631	0.1599
4年	0.5774*	-0.0339	-0.162	0.1066
5年	0.4529*	-0.1443	-0.1809	0.0252
6年	0.2637*	-0.2246*	-0.2145*	-0.0716
7年	0.0291	-0.2694*	-0.2512*	-0.1648
8年	-0.216*	-0.2796*	-0.2769*	-0.2347*
9年	-0.4361*	-0.2639*	-0.2818*	-0.269*
10年	-0.6087*	-0.2346*	-0.262*	-0.2654*

注: \*表示通过0.05显著性水平检验。

## 1.2 高原积雪对太阳活动响应的非线性放大影响

太阳活动对高原冬季积雪的影响,在峰值年和谷值年表现得更为突出。选取冬季SRF峰值年:1957/58,1967/68,1979/80,1990/91和2001/02,谷值年为:1963/64,1975/76,1986/87,1995/96和2008/09。图3是SRF和谷值年中国冬季降水差值场,从图中可见,在太阳活动峰(谷)值年,高原地区冬季降水显著偏多(少),并且通过了0.05的显著性检验。不仅如此,从我国东北经过河套地区,到青藏高原地区,降水异常分布呈现出东北-西南走向的“++”的分布特征。

根据太阳活动对地球气候系统影响的TSI机制(bottom-up),太阳活动短波辐射影响海洋热量的吸收,从而造成海气相互作用的异常,这种异常可以反映在潜热通量和感热通量的响应上面。图4是太阳射

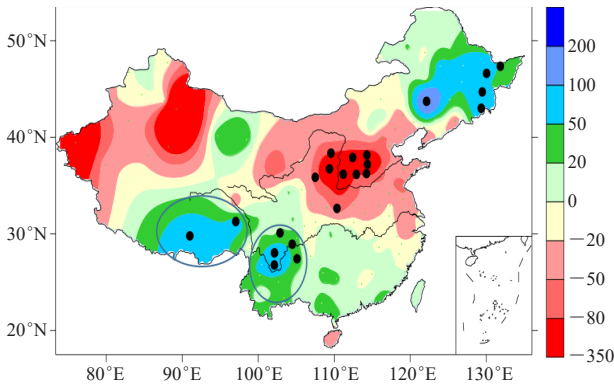


图3 SRF峰值年和谷值年中国冬季降水差值场 (黑点表示通过0.05显著性检验的站点)<sup>[18]</sup>

Fig. 3 Difference of winter precipitation in China between peak and valley years of SRF (Stippling indicates stations where is at 0.05 significance level<sup>[18]</sup>)

电通量11 a周期峰值年和谷值年潜热通量的差值场。可以看出，太平洋存在4个显著的潜热通量异常区A、B、C和D区（图4），具体范围如表2所描述。通过验证分析发现，B区和C区的潜热通量异常值，与高原冬季降水有密切的关系，对高原地区冬季降水的贡献最大。因此，利用B区和C区潜热通量异常数值定义一个指数 $I_{\text{latent}}=L_B+L_C$ ，其与中国冬季降水的空间相关分布如图5所示。可以看出，高原地区降水异常分布与图3非常相似，说明副热带太平洋中部和西部地区的潜热通量异常对高原地区冬季降水有重要的贡献。高原积

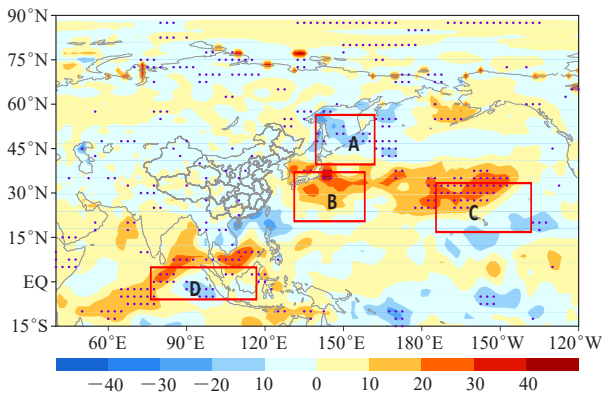


图4 太阳射电通量峰值年与谷值年冬季潜热通量差值图 (紫点为通过0.05显著性检验的格点)<sup>[18]</sup>

Fig. 4 Difference of latent heat flux between peak year and valley year of SRF in winter. (Stippling is gridpoints at 0.05 significance level<sup>[18]</sup>)

表2 潜热通量异常区的空间范围  
Table 2 Regional extent of latent heat flux anomaly

区域	范围	符号
A	44°—58°N, 140°—158°E	负
B	27°—40°N, 130°—155°E	正
C	2.5°—7.5°N, 85°—110°E	正
D	23°—35°N, 180°—210°E	正

雪异常，又会在接下来的夏季对中国降水产生影响，从而持续放大了太阳活动的作用。相比较而言，由太阳活动造成的感热通量异常对高原地区冬季降水的影响较小（图略）。

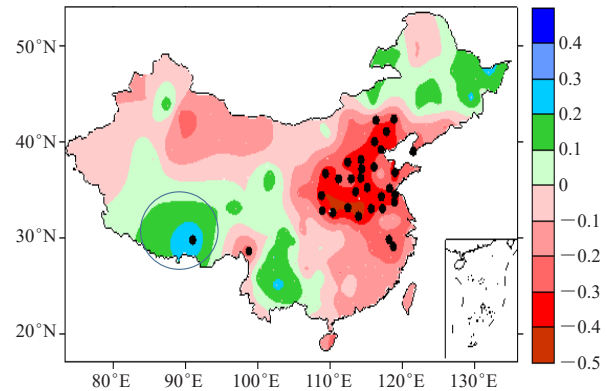


图5 潜热通量异常指数与中国冬季降水的相关 (黑点表示通过0.05显著性检验的站点)

Fig. 5 Correlation between latent heat flux anomaly index and winter precipitation in China (Stippling indicates stations where the difference is at 0.05 significance level)

太阳活动还可以通过影响0~200 m全球海洋温度距平，经由海气相互作用，进而影响高原冬夏季降水，从而放大太阳活动的作用。利用美国国家海洋地理数据中心（NOEC）0~700 m海温距平资料WOD09数据集（World Ocean Atlas, NCAR Climate Data Guide）（1955—2016年）（格点分辨率为1°×1°），将垂向各层次的海温距平资料进行5 a滑动平均，以去除ENSO信号。计算表明，0~200 m的海温异常对太阳射电通量的响应比较显著，将0~200 m层海温异常累加起来分析其对太阳射电通量高值年和低值年响应的合成差场，结果如图6所示。经过功率谱分析和红噪声显著周期检验，图中共6个显著的响应区A~F均对太阳活动有显著的响应，其具体空间范围和显著周期如表3所示。

经过检测，全球6个显著的响应区域（A、B、C、D、E、F）均具有与太阳活动周期相近的11.3 a显著周期，并且都通过了红噪声95%的信度检验。为了进一步检测这6个区域海温异常确实是由太阳活动激发而产生，对每个区域进行海温距平时间-经向剖面图分析（图略），可以看到这6个区域确实存在近似11 a的显著周期。

利用这6个区的海温异常值定义海温异常指数： $Z=ST_B+ST_F-ST_A-ST_C-ST_D-ST_E$ ，与SRF求相关得到相关系数为0.473，通过了0.001的显著性检验（图7），去趋势后两者的相关性更加显著。说明海温异常指数Z可以较好地反映对太阳射电通量响应的强度和位相变化。

海温异常指数Z与冬季和夏季格点降水分别计算同期相关，可以发现，在高原地区都存在较为显著的

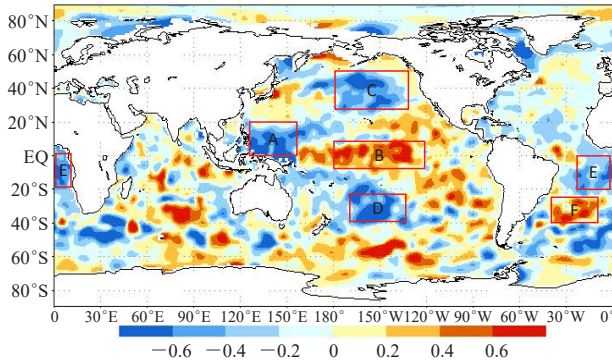


图6 经过5 a滑动平均后的全球海洋0~200 m年平均海温距平累加对SRF响应的合成差场(A~F区域分别是海温对太阳辐射响应显著的区域,暖色为正响应,冷色为负响应,均通过红噪声0.05的显著性检验)

Fig. 6 Composite of 0~200 m accumulated annual sea surface temperature anomaly response to SRF after 5 years running mean (A~F regions have significant responses, warm color indicates a positive response, and cold color means a negative response, all of which are at 0.05 significance level of red noise)

表3 全球海洋0~200 m年平均海温距平累加对SRF响应的显著区域空间范围和显著周期

Table 3 Range and significant period of 0~200 m accumulated annual sea surface temperature anomaly response to SRF

显著区域	范围	响应的符号	显著周期/a
A	120°—160°E, 0°—20°N	-	17, 11.3, 8.5
B	120°—180°W, 10°S—10°N	+	11.3, 8.5
C	130°—180°W, 25°—50°N	-	17, 11.3
D	130°—170°W, 25°—40°S	-	11.3, 8.5
E	20°W—10°E, 20°S—0°	-	11.3, 8.5
F	10°—40°W, 25°—40°S	+	11.3, 8.5

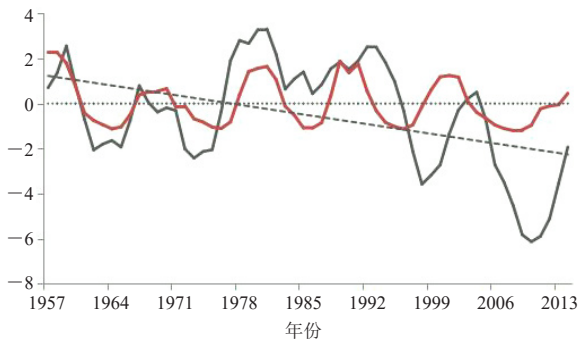


图7 海温异常指数Z的标准化曲线(黑色实线)和SRF标准化序列(红色实线)(虚线为Z的趋势线)

Fig. 7 Normalized time series of SSTA index Z (black solid line) and SRF (red solid line) (Dashed line is the tendency of Z)

相关(图8)。当海温异常指数Z数值较大(小)的时候,冬季高原地区降水显著偏多(少),而夏季高原地区的降水显著偏少(多)。滞后1 a的相关分布与同期相关很相似(图略)。说明全球海温异常传递了太阳活动的信号,对高原地区的降水产生明显影响,从

而放大了太阳活动的作用。冬季高原降水与积雪的高相关可以说明,冬季高原积雪对海温异常指数Z具有显著相关的特征,而高原积雪又可以影响大气环流和东亚夏季风,因此,太阳活动所产生的影响会通过非线性海气相互作用的链条反应,对东亚气候产生深刻而久远的影响。

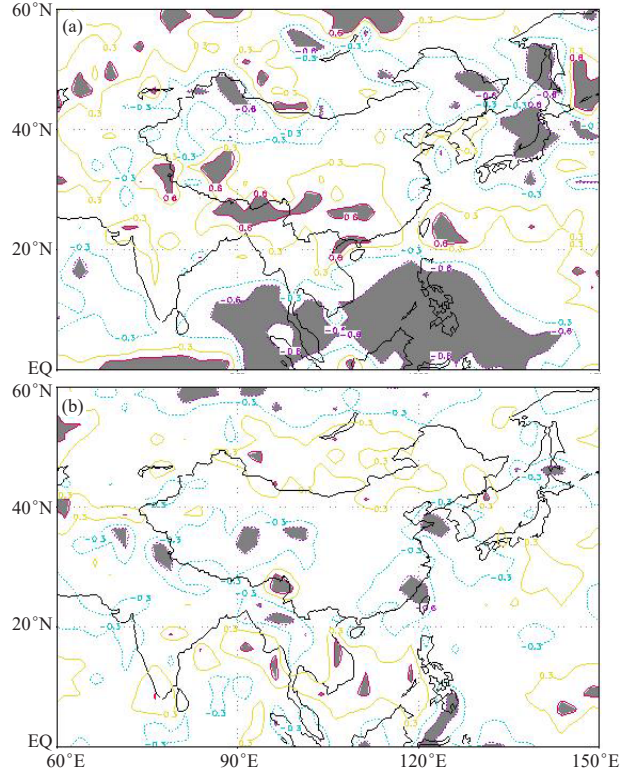


图8 海温异常指数Z与东亚地区冬季降水率(a)和夏季降水率(b)的相关系数(其中阴影区是达到0.1显著水平的异常区,实线是0.5等值线,虚线是-0.5等值线)

Fig. 8 Correlation of SST anomaly index Z and winter precipitation rate (a), and summer precipitation rate (b) in East Asia. (Shading indicates 0.1 significance level, solid contour interval is 0.5%, and dotted contour interval is -0.5%)

太阳活动造成的海温异常指数对中国冬季降水的影响主要集中在某些地区,比如当指数Z数值大时,华南地区广西和广东西部一带降水增多,东北地区降水减少,青藏高原地区降水显著增加;对中国地区夏季降水的显著影响集中在江南东部地区福建、浙江和台湾地区一带、山东半岛、青藏高原中部和东北部地区,这些都是降水减少比较显著的区域。说明海温异常在这些地区可以放大太阳活动的信号使得降水减少。在做短期降水预测时,应该注意在这些地区降水异常中的太阳活动信号。

以上讨论了太阳活动对全球和东亚地区海洋热力异常和降水的影响和放大作用,这只是太阳活动影响气候系统的一部分,实际上,在气候系统的许多领域还没有涉

及对太阳活动响应的研究,需要人们进一步去探索。

### 1.3 太阳活动影响高原积雪的机制研究

一般认为,太阳活动影响气候系统的机制有两种:一种是bottom-up机制,也就是太阳总辐射机制(TSI机制),太阳活动总辐射的变化,直接影响地球表面与大气之间的热通量和大气温度,改变大气环流,进而导致地球气候异常,驱动气候变化;另一种机制是top-down机制(UV机制),即太阳短波辐射中的紫外波段的强度变化能影响地球中高层大气化学过程,改变热平衡,进而影响平流层大气环流,并通过行星波的垂直传播影响到对流层大气,引起某些区域气候变化。研究表明,两种机制的作用是同相的,可以共同影响某些区域的气候异常,并且, top-down机

制要比bottom-up机制的贡献要大<sup>[27]</sup>。这是太阳活动非线性影响气候异常的重要物理机制。

前面1.2节所讨论的物理过程体现了bottom-up机制的作用。太阳活动对高原积雪的影响是否也可以通过top-down机制得以体现?我们尝试从top-down机制分析太阳活动对高原积雪的影响。

图9给出了冬季SRF峰值年与谷值年冬季温度异常的垂直剖面图和位势高度异常剖面图,可以看出,太阳活动峰值年400~100 hPa北极地区降温,中纬度地区升温,与这种指向极地的温度梯度相匹配,有利于中纬度地区西风加强,北极涛动呈现正位相,中纬度地区西风加强(图略)。在太阳活动谷值年,这种特征相反。

平流层大气的这种环流异常可以通过大气长波的

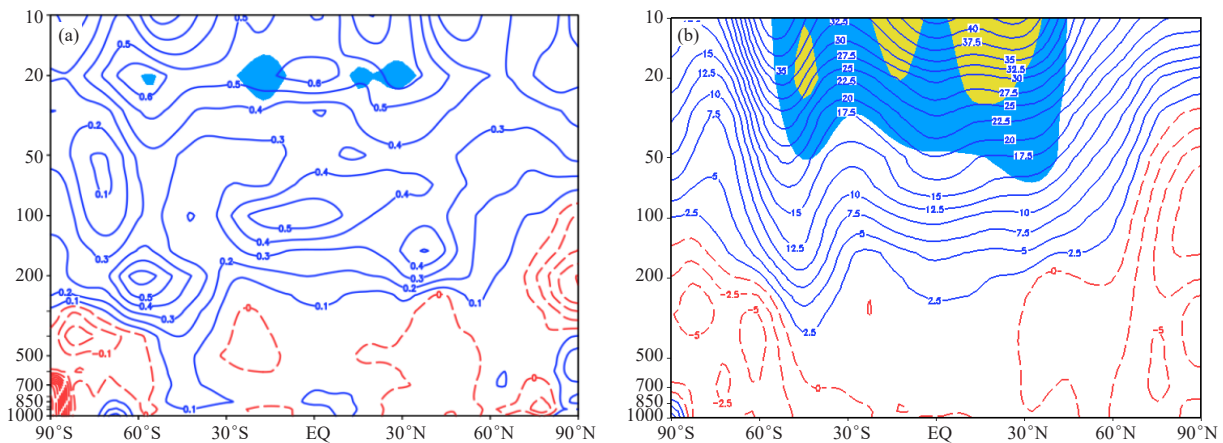


图9 冬季太阳射电通量峰值年与谷值年纬向平均数值的纬度-高度剖面差值

(a) 冬季温度 (单位: °C), (b) 冬季位势高度 (单位: gpm)

Fig. 9 Difference of latitude-height profile of zonal mean value between peak and valley years of winter solar radio flux. (a) Winter temperature (unit: °C), (b) winter geopotential height (unit: gpm)

垂直传播,传递到对流层大气。太阳射电通量高低年的EP通量(图10)显示,太阳活动高年,高纬度地区60°—80°N,从平流层到对流层存在一致的EP通量下传的现象,表明波动下传,将太阳活动的影响下传到对流层。平流层感热通量由极地指向低纬度,热量向中纬度输送,有利于中纬度温度升高,高纬度温度降低,产生由南指向极地的温度梯度,利于西风加强。沿经向方向,平流层EP通量箭头由极地指向赤道,有向北的动量输送,因此,在平流层45°—70°N存在强的EP通量的辐散,纬向西风加强;而其以南地区和极地地区,存在EP通量的辐合,纬向西风减弱,东风加强。这种纬向风随纬度的经向分布特征反映了环状模(北极涛动)的正位相。同样,对流层50°—60°N地区850 hPa以上存在EP通量的辐散,有利于西风加强。太阳活动低年,则情况相反。

平流层与对流层大气之间的相互作用改变了对流

层大气环流场分布。太阳活动高年的500 hPa纬向风场显示,高原地区有显著的东风异常,而其南侧的印度半岛、孟加拉湾和阿拉伯海上空存在较强的西风异常,西风气流加强(图11a)。这种纬向风异常随纬度的经向变化,产生正的涡度异常,易在高原地区产生异常的气旋,有利于加强降水,从而造成高原积雪的增多(图11b)。经过计算,SRF高年的冬季积雪日数平均每年比低年多出50 d。并且,由太阳活动造成的这种异常的纬向风可以一直持续到春季(图略),从而影响高原春季积雪。计算显示,SRF高年的春季积雪日数平均每年比低年多出57 d。

以上研究结果揭示了太阳活动影响高原积雪的top-down物理过程,证明了太阳活动通过两种物理机制(bottom-up和top-down)共同影响高原积雪。

## 2 讨论和结论

以上的研究从观测事实的角度揭露了高原积雪对

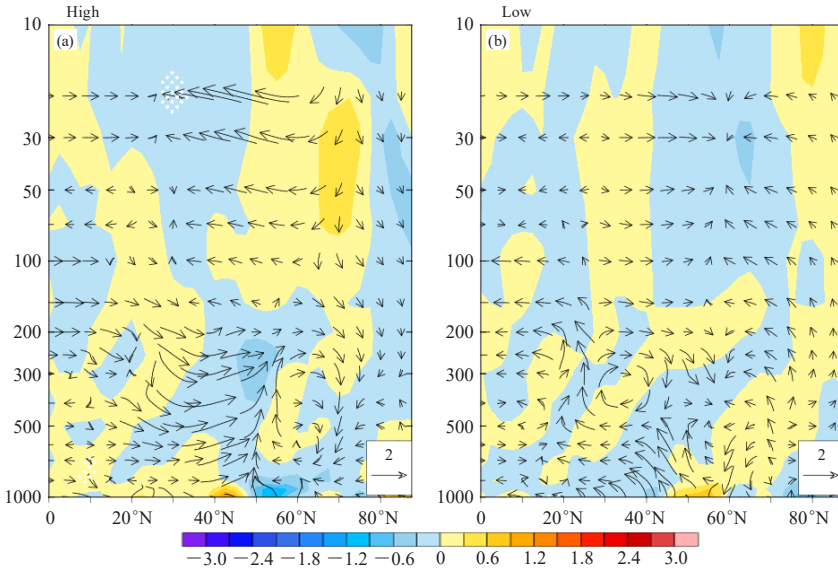


图10 冬季SRF高(a),低(b)年EP通量(箭头)和散度(阴影)(白点表示通过0.1显著性水平检验)

Fig. 10 EP flux (arrow) and divergence (shading) in winter of (a) high SRF years and (b) low SRF years. (Stippling indicates gridpoints where are at 0.1 significance level)

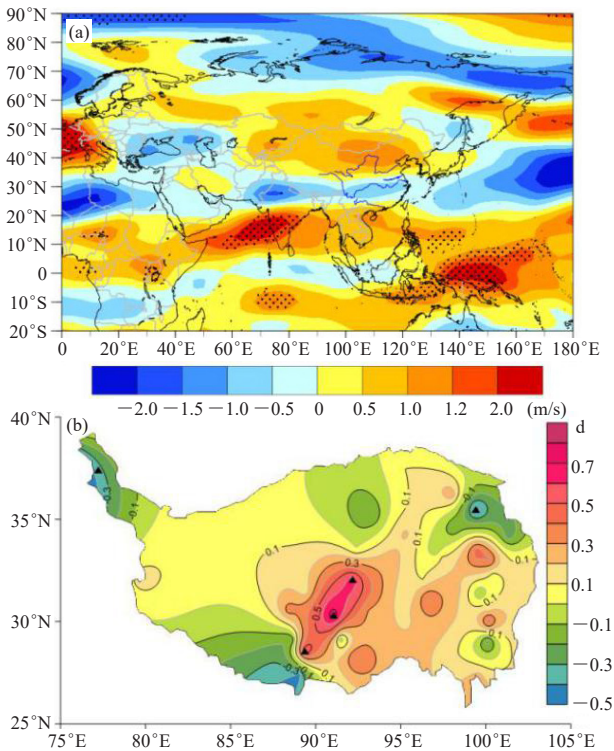


图11 冬季太阳射电通量高低年差值场

(a) 500 hPa纬向风场(紫色点表示通过0.1显著性水平检验), (b)高原冬季积雪日数(▲表示通过0.1显著性水平检验)

Fig. 11 Difference of high solar radio flux years and low years in winter

(a) 500 hPa zonal wind field (stippling means gridpoints where are at 0.1 significance test level), (b) snow days number in winter over the plateau (▲ means station with 0.1 significance level)

太阳活动响应的时空特征和物理过程,我们也尝试从数值试验的角度研究太阳活动对高原积雪的影响。这需要气候模式包含更为细致的高层大气的化学过程,以及海气耦合系统,这样更容易从top-down和bottom-up两种机制的共同作用下看到太阳活动对高原积雪的影响。

## 2.1 高原积雪对太阳活动响应的数值试验

选用美国大气科学中心的地球系统模式(NCAR CESM2.1.1)版本进行了包含有年变化的太阳辐射强度(Total Solar Irradiance, TSI) 1979—2009年的全耦合的数值积分试验,分析了1979—2009年期间地球气候系统的变化。大气水平分辨率为 $1.9^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ,具体模式参数设置如表4。

表4 模式参数设置  
Table 4 Mode parameters

各分量模式组成	物理参数化方案
大气 CAM6	深对流 ZM (Zhang and McFarlane)
陆面 CLM5	浅对流 CLUBB (Cloud Layers Unified by Binormals)
海洋 POP2	云微物理 MG 2.0 (Morrison and Gettelman)
海冰 CICE5	云宏物理 CLUBB (Cloud Layers Unified by Binormals)
陆冰 CISM2	边界层 CLUBB (Cloud Layers Unified by Binormals)
河流径流 MOSART	辐射 RRTMG (Rapid Radiative Transfer Method)

根据模式中1979—2009年太阳辐射强度(TSI)的变化,选取 $TSI > 1.0$ 标准差的TSI高值年:1979, 1980, 1981, 1989, 1990, 2000, 2001, 2002年,总共8 a;小于 $-1.0$ 标准差的TSI低值年:1985, 1986, 1995, 1996, 1997, 2007, 2008, 2009年,总共8 a。

图12是太阳活动高低年参考高度温度(TREHFT)(2 m气温)和顶层净太阳通量(FSNT)的空间分布。可以看出,太阳活动高值年高原地区大气层顶太阳通量明显较强,近地面大气温度更高,均通过了0.05的显著性水平检验。说明太阳活动强,高原地区进入大气层顶的热量高,近地面气温偏高。

图13是太阳活动高低年高原降雪率差值场,可以看到,太阳活动高(低)年,高原主体的降雪率偏多(少);高原以西和以北均表现为降雪率偏低(高)。说明太阳活动强(弱)时,高原主体冬春季积雪偏多(少)。这与1.1节所得到的结论一致,也与宋燕等<sup>[21-22]</sup>研究结果较为一致。数值模拟的结果与诊

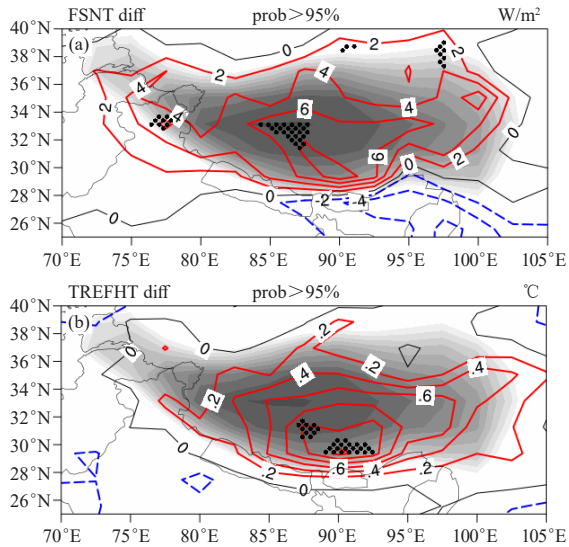


图12 太阳活动高低年差值场分布

(a) 年平均顶层大气净太阳通量; (b) 参考高度温度 (黑色点为通过0.05显著性水平检验, 阴影区是高原地区)

Fig. 12 Difference in high and low solar activity years of annual net solar flux at top of atmosphere (a), annual temperature at reference height (b) (stippling indicates gridpoints where are at 0.05 significance level, and shading are plateau areas)

断分析结果相一致。

环流场分析表明, 太阳活动高年500 hPa高原主体上空存在异常气旋和上升运动, 有利于产生降水; 高原主体上空100 hPa存在异常反气旋, 配合500 hPa异常气旋, 存在异常上升气流, 有利于降雪增多。以上环流异常有利于太阳活动强的年份高原降雪率增多; 太阳活动低的年份则相反(图略)。

以上数值试验结果证明了高原地区是对太阳活动响应的敏感地区, 包括温度场、降雪率和环流场(图略)都存在异常响应。但是, 模式中的平流层大气在中纬度地区没有出现纬向风的加强, 环状模没有明显的加强, EP通量分析表明平流层和对流层大气的相互作用也非常弱。究其原因, 有可能是模式中平流层大气的化学过程不完善造成的。在下一步的研究工作中, 拟选择包含较完整化学过程(主要是臭氧响应太阳辐射)的气候模式, 继续研究太阳活动对高原积雪异常影响的物理机制。

## 2.2 结论

本文回顾和梳理了近期高原积雪对太阳活动响应以及放大作用的研究成果, 给出了最新的研究结果, 具体结论如下。

1) 1951—2017年青藏高原冬季积雪与太阳射电通量同期和滞后空间相关分析表明, 高原积雪对太阳活动具有显著的空间响应, 同期和滞后1~2 a为显著

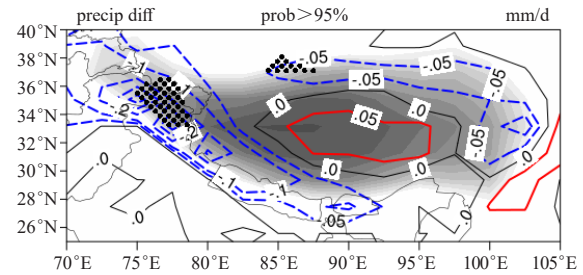


图13 太阳活动高低年年平均降雪率差值场的空间分布 (黑色点为通过0.05显著性水平检验, 阴影区是高原地区)

Fig. 13 Spatial distribution of difference of annual average snowfall rate between high and low solar activity years (stippling indicates gridpoints where are at 0.05 significance level, and shading are plateau areas)

的正相关, 主要集中在昆仑山脉—唐古拉山脉—念青唐古拉山脉—横断山脉一线。2年以后相关分布型发生显著的变化, 以32°N为界, 逐渐向“北正南负”的分布型发展, 高原北部积雪呈正相关, 85°E以西高原西部积雪呈正相关。

2) 高原积雪旋转经验正交分解(REOF)分析表明, 高原积雪的不同空间模态对太阳活动的响应有不同的分布型, 前3个模态对太阳活动都有显著的同期和滞后响应, 都通过了0.05的显著性水平检验, 其中第一模态响应最为显著。响应的敏感区集中在高原主体上的高山区域, 这里的积雪偏多, 对太阳活动的响应更为敏感。第四模态响应最弱。

3) 太阳活动通过影响海气相互作用, 导致冬季太平洋上的潜热通量显著异常, 以及太平洋和大西洋0~200 m海温显著异常, 海洋与大气异常的热量交换使得高原地区降水显著异常。一般来说, 太阳活动峰(谷)值年, 高原地区冬季降水偏多(少); 太阳活动高(低)年, 海温异常指数偏高(低), 高原地区冬季降水偏多(少), 夏季降水偏少(多)。以上是太阳活动影响高原积雪异常的bottom-up(TSI)机制。受太阳活动影响的高原积雪异常, 又会通过雪气相互作用, 进一步影响中国夏季降水, 从而放大了太阳活动的非线性影响。

4) 对太阳活动影响高原积雪的机制研究表明, 除去bottom-up机制之外, 还存在top-down机制(UV机制)的影响。太阳活动峰(谷)值年, 平流层北极地区降(升)温, 中纬度地区升(降)温, 由南指向北的温度梯度使得中纬度地区西风加强, 北极涛动正(负)位相。太阳活动高(低)年, 存在长波的垂直下(上)传, 在平流层45°—70°N存在强的EP通量的辐散(合), 纬向西风加强(减弱); 而45°—70°N以南地区和以北地区, 存在EP通量的辐合(散), 纬

向西风减弱（加强），东风加强（减弱），北极涛动正（负）位相。高原地区有显著的东（西）风异常，而其以南印度半岛、孟加拉湾和阿拉伯海上空存在较强的西（东）风异常，这种纬向风的经向切变呈现出正（负）涡度异常，易产生异常（反）气旋，有利于高原地区降水偏多（少），从而造成高原积雪的增多（减少）。由太阳活动造成的这种异常的纬向风可以一直持续到春季，影响高原春季积雪。

5) 数值模拟结果显示，在太阳活动高（低）值年份，高原地区大气层顶太阳通量更强（弱），近地面大气温度更高（低），高原主体的降雪率偏多（少）；高原主体500 hPa存在异常（反）气旋，100 hPa存在异常反（正）气旋，高原地区上升（下沉）运动增强，（不）有利于产生降水，降雪率增多（减少）。

致谢：感谢广东海洋大学海洋与气象学院李德琳博士为本文做图。

#### 参考文献

- [1] Herman J R, Goldberg R A. Sun, weather and climate. NASA, 1978.
- [2] Herschel W. Observations tending to investigate the nature of the sun, in order to find the causes or symptoms of its variable emission of light and heat: with remarks on the use that may possibly be drawn from solar observations. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1801, 91: 265-318, doi: 10.1098/rstl.1801.0015.
- [3] Hines C O. A possible mechanism for the production of sun: weather correlations. Journal of the Atmospheric Sciences, 1974, 31: 589-591, doi: 10.1175/1520-0469(1974)031<0589:APMFTP>2.0.CO;2.
- [4] Sfića a L, Voiculescu M. Possible effects of atmospheric teleconnections and solar variability on tropospheric and stratospheric temperatures in the Northern Hemisphere. Journal of Atmospheric and Solar: Terrestrial Physics, 2014, 109: 7-14.
- [5] Haigh J D. The impact of solar variability on climate. Science, 1996, 272: 981-985.
- [6] Ineson S, Scaife A A, Knight J R, et al. Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. Nature Geoscience, 2011, 4: 753-757, doi: 10.1038/ngeo1282.
- [7] Lockwood M, Harrison R G, Woollings T J, et al. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? Environmental Research Letters, 2010, 5 (2): 024001.
- [8] Woollings T, Lockwood M, Masato G, et al. Enhanced signature of solar variability in Eurasian winter climate. Geophysical Research Letters, 2010, 37: L20805, doi: 10.1029/2010GL044601.
- [9] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. Reviews of Geophysics, 2010, 48: RG4001, doi: 10.1029/2009RG000282.
- [10] 赵亮, 徐影, 王劲松, 等. 太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展. 气象科技进展, 2011, 1(4): 37-48.
- [11] 肖子牛, 钟琦, 尹志强, 等. 太阳活动年代际变化对现代气候影响的研究进展. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1335-1348.
- [12] Elizabeth N R. The Maunder minimum and the deepest phase of the little ice age. Solar Output and Climate during the Holocene. German: 14th EPC/ESF Workshop, 1995: 131-144.
- [13] Kunitomo S, Mikami T. Solar activity during the Little Ice Age. Proceedings of the International Symposium on the Little Ice Age Climate. Tokyo, Japan: Tokyo Metropolitan University, Department of Geography, 1992: 337-340.
- [14] Eddy J A. The maunder minimum. Science, 1976, 192(4245): 1189-1202.
- [15] Eddy J A. Climate and the changing sun. Climatic Change, 1977, 1(2):173-190.
- [16] 宋燕, 季劲钧, 王月宾, 等. 小冰期气候研究回顾和机理探寻. 气象, 2003, 29(7): 3-6.
- [17] 王瑞丽, 肖子牛, 赵亮, 等. 天气气候中太阳活动信号的敏感区域. 气象科技进展, 2014, 4(4): 19-27.
- [18] Song Y, Li Z C, Gu Y, et al. The effect of solar cycle on climate of Northeast Asia. Journal of Meteorological Research, 2019, 33(5): 885-894, doi: 10.1007/s13351-019-8132-z.
- [19] Wang J S, Zhao L. Statistical tests for a correlation between decadal variation in June precipitation in China and sunspot number. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D23117, doi: 10.1029/2012JD018074.
- [20] Zhao L, Wang J S. Robust response of the East Asian monsoon rainband to solar variability. Journal of Climate, 2014, 27: 3043-3051.
- [21] 宋燕, 李智才, 张菁, 等. 太阳活动对高原积雪东亚夏季风调制影响的回顾和进展. 气象科技进展, 2016, 6(3): 148-154.
- [22] 宋燕, 李智才, 肖子牛, 等. 太阳活动与高原积雪及东亚环流的年代际相关分析. 高原气象, 2016, 35(5): 1135-1147.
- [23] 周雅清, 宋燕, 肖子牛, 等. 全球海温对太阳射电通量异常的响应及其对降水的影响. 地球物理学报, 2021, 64(5): 1518-1530.
- [24] Wang G, Yan S X, Qiao F L. Decadal variability of upper ocean heat content in the Pacific: responding to the 11-year solar cycle. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2015, 135: 101-106.
- [25] Meehl G A, Washington W M, Wigley T M L, et al. Solar and greenhouse gas forcing and climate response in the 20th century. Journal of Climate, 2003, 16: 426-444, doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<0426:SAGGFA>2.0.CO;2.
- [26] Meehl G A, Arblaster J M, Branstator G, et al. A coupled air-sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region. Journal of Climate, 2008, 21(12): 2883-2897.
- [27] Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, et al. Amplifying the Pacific climate system response to a small 11 year solar cycle forcing. Science, 2009, 325(5944): 1114-1118, doi: 10.1126/science.1172872.
- [28] Haigh J D. A GCM study of climate change in response to the 11-year solar cycle. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125: 871-892, doi: 10.1002/qj.4971255506.
- [29] Kodera K, Kuroda Y. Dynamical response to the solar cycle: winter stratopause and lower stratosphere. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D24): 4749, doi: 10.1029/2002JD002224.
- [30] Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean Monsoon through dynamical processes. Geophysical Research Letters, 2004, 31(24), doi: 10.1029/2004GL020928.
- [31] van Loon H, Meehl G A, Arblaster J M. A decadal solar effect in the tropics in July-August. Journal of Atmospheric and Solar: Terrestrial Physics, 2004, 66(18): 1767-1778.
- [32] van Loon H, Meehl G A, Shea D J. Coupled air-sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112 (D2). doi: 10.1029/2006JD007378.
- [33] Lee J N, Shindell D T, Hameed S. The influence of solar forcing on tropical circulation. Journal of Climate, 2009, 22(22): 5870-5885.
- [34] White W B, Liu Z. Resonant excitation of the quasi-decadal oscillation by the 11-year signal in the Sun's irradiance. Journal of Geophysical Research Oceans, 2008, 113(C1), doi: 10.1029/2006JC004057.
- [35] White W B, Liu Z. Non-linear alignment of El Nino to the 11-yr solar cycle. Geophysical Research Letters, 2008b, 35(19), doi: 10.1029/2008GL034831.
- [36] Rind D, Lean J, Lerner J, et al. Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: D24103, doi: 10.1029/2008JD010114.

# 西南地区极端降水变化特征分析

汪靖<sup>1, 2</sup> 张少波<sup>1</sup> 袁利平<sup>3</sup>

(1 成都信息工程大学 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225;

2 贡山县气象局, 怒江 673500; 3 怒江州气象局, 怒江 673200)

**摘要:** 利用我国西南地区1971—2017年的逐日降水和气温数据对极端降水的变化进行了研究, 采用百分位阈值法来定义极端降水, 并通过对逐日降水的计算和统计得出6个极端降水指数, 经分析发现: 从时间上看, 近47年来西南地区总降水量减小, 但极端降水的频次和强度增大; 从空间上看, 西南地区东部的极端降水比率和强度都大于西部。此外, 夏季平均气温的升高会导致极端降水量的平稳增加, 但日平均气温的升高却会导致极端降水量先缓增后骤减, 说明西南地区极端降水随温度的升高有更多不确定性的同时极端降水趋于一个频次更高、时间更短、强度更强的趋势发展, 极端降水量随夏季平均气温升高的变化率为8.52%/°C, 大于C-C方程的理论解。

**关键词:** 极端降水, 西南, 温度, 相关性

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.005

## Analysis on the Characteristics of Extreme Precipitation in Southwestern China

Wang Jing<sup>1, 2</sup>, Zhang Shaobo<sup>1</sup>, Yuan Liping<sup>3</sup>

(1 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information

Technology, Chengdu 610225 2 Gongshan County Meteorological Bureau, Nujiang 673500

3 Nujiang Prefecture Meteorological Bureau, Nujiang 673200)

**Abstract:** In this paper, the daily precipitation and temperature data from 1971 to 2017 in Southwestern China were used to study the changes in extreme precipitation. The percentile threshold method was used to define extreme precipitation, and six extreme precipitation indexes were obtained through the calculation and statistics of daily precipitation. After research and analysis, the following conclusions were obtained: from the time point of view, the total precipitation in Southwestern China decreased in the past 47 years, but the frequency and intensity of extreme precipitation have increased. From the spatial point of view, the ratio and intensity of extreme precipitation in the east part of Southwestern China were higher than those in the west part of Southwestern China. The increase in summer averaged temperature will lead to a steady increase in extreme precipitation. Still, the increase of daily average temperature will cause the extreme precipitation to increase slowly and then suddenly decrease, it shows that extreme precipitation in Southwestern China has more uncertainty with the increase of temperature, and extreme precipitation tends to develop in a trend of higher frequency, shorter time, and more vigorous intensity. The change rate of extreme precipitation with summer averaged temperature was 8.52%/°C, which was higher than that of the C-C equation.

**Keywords:** extreme precipitation, Southwestern China, temperature, correlation

### 0 引言

在全球气候变暖的大背景下, 我国整体上极端降水事件呈现出了不断增长的趋势<sup>[1]</sup>。全球地表温度的升高也可以改变海陆热力差异, 使大尺度环流的结构发生变化, 加速全球水循环, 从而影响降水以及强降水的空间分布<sup>[2-3]</sup>, 带来更多的平均降水和极端降水事

件<sup>[4]</sup>。极端降水时间尺度小、强度大的特征, 给水利工程和气象防灾减灾带来很大的压力。目前对极端降水的研究主要以全球、国家和区域为主, 在我国也多以全国或省份以及江河流域为单位。

对于西南地区极端降水的变化特征, 国内外许多学者进行了深入的分析。王春学等<sup>[5]</sup>、袁文德等<sup>[6]</sup>和丁文荣等<sup>[7]</sup>一致得到极端降水事件整体呈上升趋势。陈活泼<sup>[8]</sup>利用国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)模式对我国极端降水和东亚大气环流未来演变特征进行了预估, 得出21世纪末我国极端降水的频率和强度有增加和增强的趋势。对于具体省份的

收稿日期: 2020年4月10日; 修回日期: 2020年7月12日

第一作者: 汪靖(1996—), Email: 643203125@qq.com

通信作者: 张少波(1987—), Email: zsb@cuit.edu.cn

基金项目: 四川省教育厅重点项目(18ZA0095), 成都信息工程大学引进人才启动项目(KYTZ201737)

研究, 杨晓静等<sup>[9]</sup>对云南省极端降水特征的分析中表明, 云南省极端降水量有显著的增加趋势。综上得到一个较为一致的观点是, 在近几年来我国西南地区的极端降水趋于增长, 并且频次增多、强度增强。

在全球变暖背景下, 研究者对温度和降水的关注度也越来越高。对于气温和降水的相关性, Wentz等<sup>[10]</sup>和Lenderink等<sup>[11]</sup>的研究都表明温度升高会增加大气中的饱和水汽压, 增强大气持水力。而Allan等<sup>[12]</sup>的研究表明, 在高温条件下极端降水事件的发生频率会比温度较低时更高。Xiao等<sup>[13]</sup>对我国极端降水变率与温度的相应关系的研究中发现, 气温的上升会增加极端降水事件的概率。

本研究包括四川、云南、贵州和重庆三省一市在内的我国的西南地区, 该地区西北接壤青藏高原, 南部是孟加拉湾和南海, 境内包括横断山脉、高原、丘陵、盆地等不同地貌, 地形十分复杂, 海拔落差大, 局地因子影响很大, 是一个典型的气候多变区。本文针对西南地区极端降水的变化趋势做分析, 并考虑其与气温的相关性。通过研究加深对气候变化及其影响的认识, 从而有利于政府有效开展防涝、抗旱、水利设施建设等工作。

## 1 数据和研究方法

观测资料来源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0)中1951—2017年国家级地面站点的逐日降水、日间和夜间降水资料以及逐日的气温和最高最低

气温资料。考虑到缺测及台站搬迁所造成的观测资料的不完整性, 选取了西南范围内的122个站点, 对1971—2017年这47年的降水和温度资料进行研究与分析。

极端降水的定义采用的是百分位阈值法, 将1971—2000年各站点每次降水过程的降水量序列升序排序, 把第95个百分位值定义为极端降水事件的阈值, 当某站点某次降水过程的降水量大于该站点的阈值, 就把此次降水记为一次极端降水过程。

极端降水指数有多种定义, 根据实际情况, 本文通过对逐日降水的计算和统计得出以下6个极端降水指数(表1)。

表1 极端降水指数及其定义  
Table1 Extreme precipitation index and its definition

指数符号	指数名称	定义	单位
rmax	1 d最大降水量	全年日降水量的最大值	mm
r5max	5 d最大降水量	全年每个连续5 d降水量最大值	mm
tr95	极端降水量	全年日降水量>第95百分位值的降水总量	mm
nd95	极端降水日数	全年日降水量>第95百分位值的降水日数	d
tr95pct	极端降水比率	年极端降水量占年降水总量的百分比	%
tr95str	极端降水强度	年极端降水量与极端降水日数的比值	mm/d

## 2 西南地区夏季降水的变化特征

### 2.1 夏季总降水量的空间分布和变化趋势

图1为1971—2017年西南地区夏季总降水量及其趋势变化的空间分布。图1a为20时一次日20时降水的

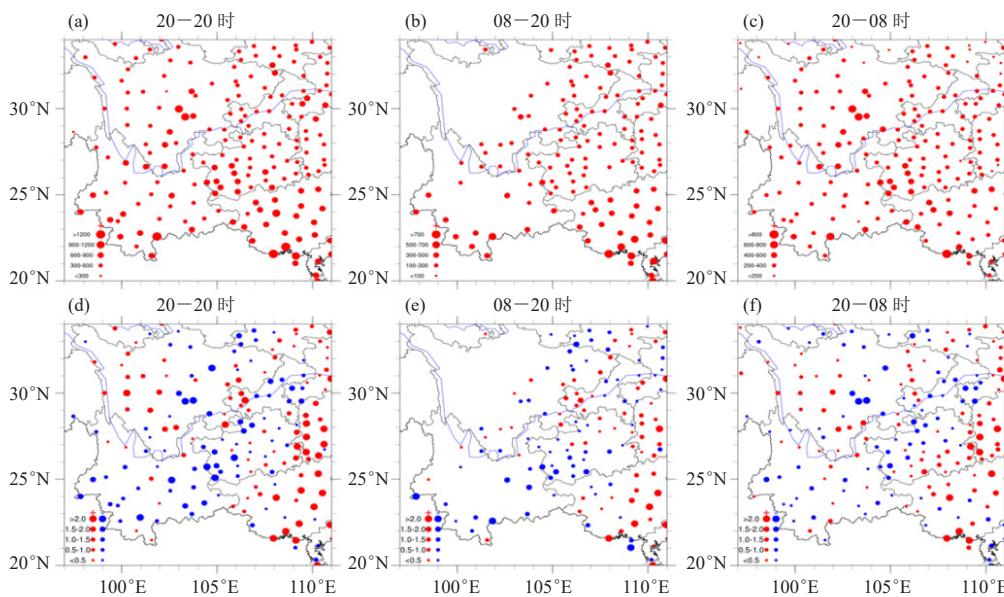


图1 1971—2017年夏季总降水量的空间分布和变化趋势

(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水, (d) 全天降水的趋势变化, (e) 日间降水的趋势变化, (f) 夜间降水的趋势变化  
Fig. 1 Spatial distribution and trend change of total precipitation in summer from 1971 to 2017  
(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation, (d) daily precipitation trend change, (e) daytime precipitation trend change, (f) nighttime precipitation trend change

空间分布, 可看出四川盆地降水量最大, 贵州和云南两省的总降水量都有明显的由北向南递增趋势。图1b和1c分别为日间降水与夜间降水的空间分布, 可看出在整个西南地区夜间降水明显大于日间。

图1d、1e和1f分别为全天、日间及夜间降水变化趋势的空间分布情况。其中不同大小的圆点对应不同程度的变化趋势, 红色表示增长, 蓝色表示下降。图1d为20时一次日20时的总降水, 整个西南地区约60%的站点呈下降趋势, 40%的站点呈上升趋势。日间降水有更明显的下降趋势, 约63%的站点下降, 37%的站点上升。夜间降水上升与下降的站点数基本持平, 分别约为49%和51% (图1f)。总体来看下降趋势的站点多于上升趋势的站点, 说明西南地区的夏季总降水量在近47年来呈现出减小趋势, 并且夜间降水的下降趋势更为明显。

## 2.2 极端降水量的空间分布和变化趋势

图2为1971—2017年西南地区第95百分位阈值的

极端降水量空间分布和趋势变化。图2a为20时一次日20时极端降水量 (tr95) 的空间分布, 可看到西南地区东部的极端降水量要明显大于西部, 西部的极端降水量基本在140 mm左右, 而东部大部分站点的极端降水量在200~260 mm。图2b和2c分别为日间和夜间的极端降水量, 可明显看到夜间的极端降水量大于日间。图2d为20时一次日20时极端降水量的变化趋势, 其中约66%的站点为增长趋势, 34%的站点为减小趋势。空间分布上看出川东以及贵州大部分地区都呈明显增长的趋势。川西一带也呈现出较为一致的增长趋势, 但增长幅度较小。图2e为日间极端降水的变化趋势, 约有60%的站点增加, 40%的站点减小。图2f为夜间极端降水的变化趋势, 约65%的站点增加, 仅35%的站点减小。说明西南地区的极端降水在不断上升, 并且夜间的极端降水占总降水的比重越来越大。由此看来, 西南地区近47年来夏季总降水量呈减小趋势, 而极端降水量却与之相反, 呈现出上升趋势。

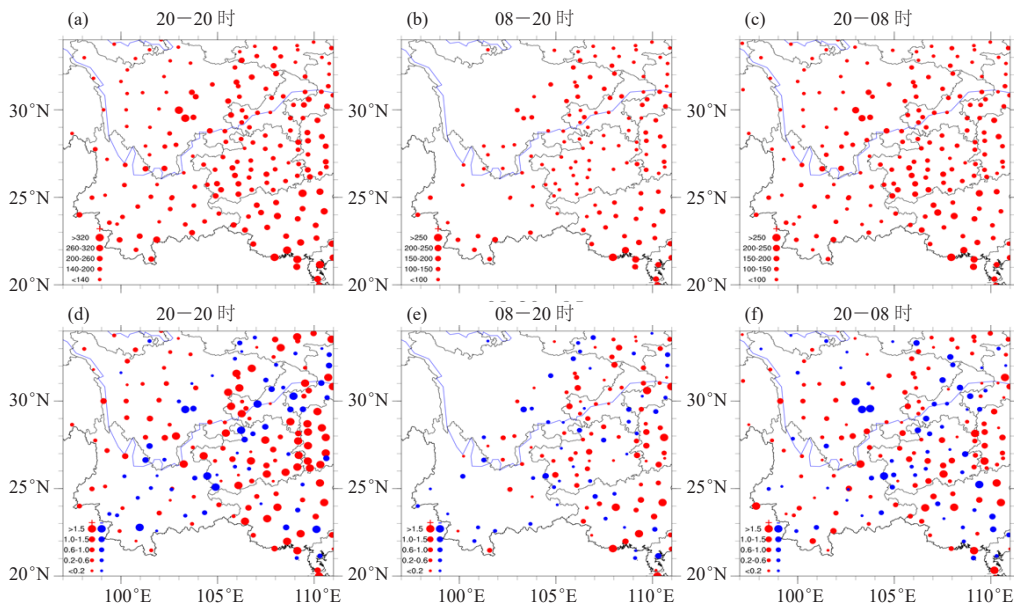


图2 1971—2017年极端降水量的空间分布和变化趋势

(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水, (d) 全天降水的趋势变化, (e) 日间降水的趋势变化, (f) 夜间降水的趋势变化

Fig. 2 Spatial distribution and trend of extreme precipitation from 1971 to 2017

(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation, (d) daily precipitation trend change, (e) daytime precipitation trend change, (f) nighttime precipitation trend change

## 3 极端降水指数的总体特征

### 3.1 极端降水指数的空间分布

图3为1971—2017年西南地区各极端降水指数平均值的空间分布。图3a为极端降水日数 (nd95), 西南地区约78%的站点都在4~5 d, 只有22%的站点在4 d以下。总体来看西南地区东北部的极端降水日数明显小于其他地区。但从图3b的极端降水量 (tr95)

来看, 在整个西南地区, 东部的极端降水量要大于西部。对比发现西南地区的东部极端降水频次少、强度大, 西部极端降水频次多、强度小。图3c, 1 d最大降水量 (rmax) 的特征也是西部小于东部。图3d为5 d最大降水量 (r5max), 与1 d最大降水有相似的特征。图3e表明, 在我国西南地区, 极端降水比率 (tr95pct) 的空间分布呈现出东部较大西部较小的趋

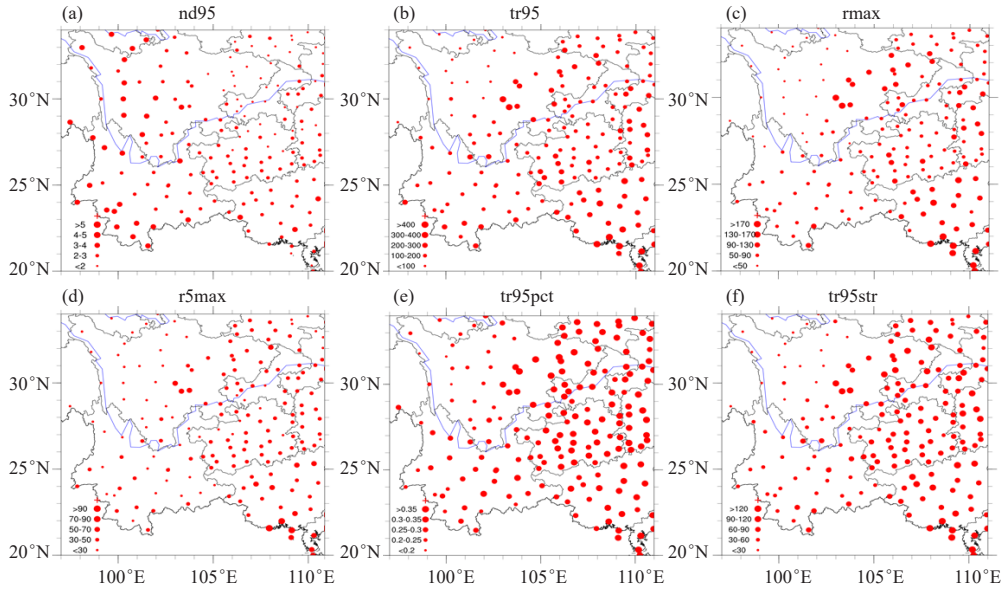


图3 1971—2017年各极端降水指数的空间分布

(a) 极端降水日数, (b) 极端降水量, (c) 1 d最大降水, (d) 5 d最大降水, (e) 极端降水比率, (f) 极端降水强度

Fig. 3 Spatial distribution of extreme precipitation indexes from 1971 to 2017

(a) days of extreme precipitation, (b) amount of extreme precipitation, (c) maximum precipitation in 1 d, (d) maximum precipitation in 5 d, (e) extreme precipitation ratio, (f) extreme precipitation intensity

势。盆地地区最大, 极端降水占年总降水量的35%甚至更高。重庆贵州一带极端降水比率也比较高, 约在30%~35%。图3f为年极端降水量与极端降水日数的比值(tr95str)。从空间分布上看西南的东部地区明显大于西部地区, 四川盆地及川东北的极端降水强度最大, 在90~120 mm/d。

综合多个极端降水指数来看, 我国西南地区西部极端降水的频次高而极端降水量低, 西南地区东部极端降水的频次低而极端降水量高, 即东部的极端降水强度要明显大于西部。

### 3.2 极端降水指数的变化趋势

如图4, 图4a为极端降水日数(nd95)变化趋势的空间分布, 约有63%的站点呈现出上升趋势, 37%的站点为减小趋势。从空间分布上看, 整个西南呈现出西部增长而东部减小的趋势。图4b为1 d最大降水量(rmax)变化趋势的空间分布, 约有65%的站点呈现为增长趋势, 35%的站点为减小趋势。贵州南部一带增长明显, 另外, 虽然增长幅度不大, 但在川西一带有较为一致的上升趋势。图4c为5 d最大降水量(r5max), 与1 d最大降水量呈现出基本一致的趋势。川西一带的站点为增大趋势。贵州和云南两省大部分站点都为减小趋势, 但减小趋势并不显著。图4d为西南地区极端降水强度(tr95str)变化趋势的空间分布图, 约60%的站点为上升趋势, 40%为减小趋势。从整体上看, 处于西南东部的重庆和贵州上升趋

势最为明显。图4e为极端降水比率(tr95pct)变化趋势的空间分布, 约有71%的站点呈上升趋势, 28%的站点呈下降趋势。

通过对西南地区总降水量和多个极端降水指数变化趋势的分析可以看到, 近47年来西南地区夏季总降水量呈减小趋势, 下降趋势的站点中约有86%, 而极端降水却出现了增加趋势, 极端降水日数、极端降水量以及极端降水强度等指数都呈现出了不同程度的上升趋势, 说明极端降水发生的频次和强度都有明显增大的趋势, 造成的结果为降水发生的更集中、时间更短、强度更大。

## 4 极端降水与气温的相关性

在全球变暖的背景下, 极端降水相对于平均降水对气候变化的响应更加显著, 并且极端降水与温度的关系也较为密切<sup>[14-18]</sup>, 因此温度和极端降水的关系越来越受到大家的关注, 而近年来我国大部分地区的夏季平均温度呈上升或显著上升的趋势<sup>[19]</sup>。不同区域的气候特征都有着明显差异, 因而不同区域的极端降水量与其温度的相关性也并不都是一致的。我国西南地区处于内陆, 地形复杂多变, 降水和其他气象要素受诸多因素影响, 因此更值得研究和探讨。

### 4.1 极端降水与日平均气温的相关性

图5为西南地区不同时次多个阈值的降水极值与日平均气温的相关性曲线。将不同阈值的降水量与发生降水时对应的气温进行统计, 细化为极小的温

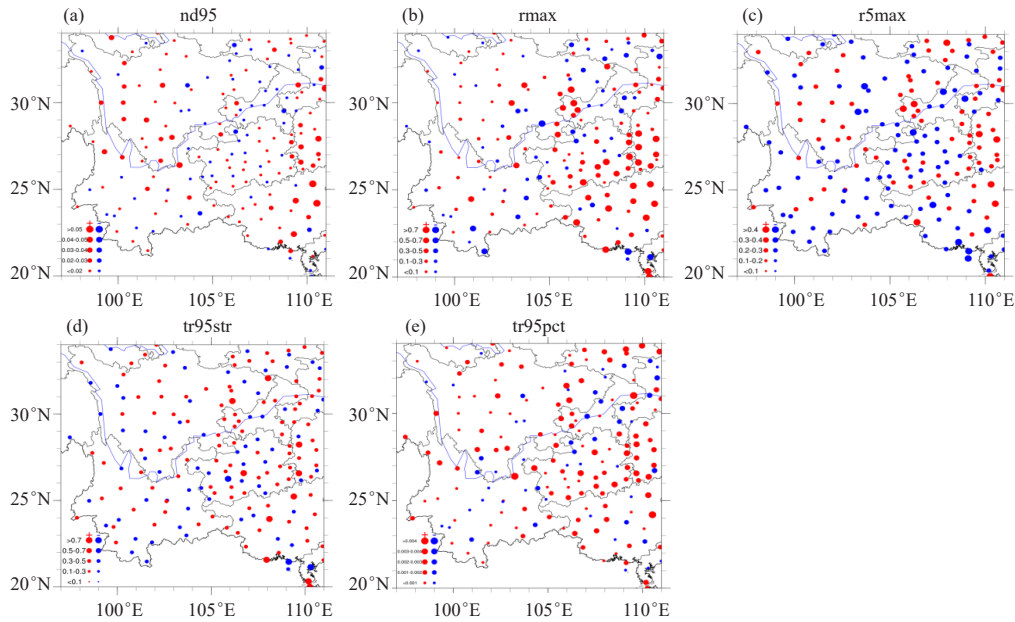


图4 1971—2017年各极端降水指数的变化趋势

(a) 极端降水日数, (b) 1 d最大降水, (c) 5 d最大降水, (d) 极端降水强度, (e) 极端降水比率

Fig. 4 Trend change of extreme precipitation indexes from 1971 to 2017

(a) days of extreme precipitation, (b) maximum precipitation in 1 d, (c) maximum precipitation in 5 d, (d) extreme precipitation intensity, (e) extreme precipitation ratio

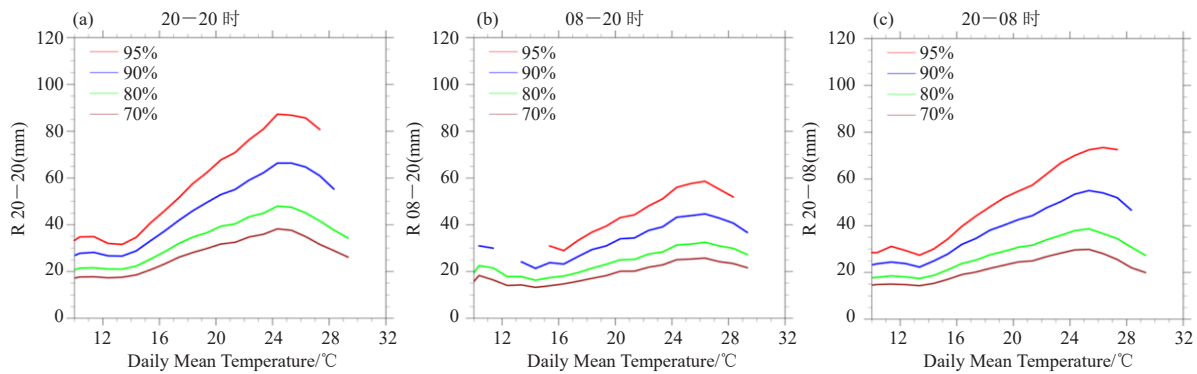


图5 极端降水量与日平均气温关系折线图

(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水

Fig. 5 Correlation between extreme precipitation and daily mean temperature

(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation

度区间后将气温和降水分别求平均,再连成一条几近平滑的曲线。图5a为20时一次日20时不同阈值的降水极值,可看出95、90、80和70百分位阈值内的降水在一定的温度范围内均呈现出了一致的上升趋势,二者呈正相关关系,但在超过这个温度范围以后极端降水量则随着温度的上升而下降,二者呈负相关关系。08—20时的日间降水与20时一次日08时的夜间降水也出现了同样的转折。在极端降水量与温度值呈正相关关系时,95百分位阈值的降水量随温度的升高增长最快,90、80和70百分位阈值降水的斜率依次递减,说明极端降水量随温度的升高会有更为显著的增加,而

当超过这个温度范围则出现反转,随温度的升高而迅速减小。从不同时段比较来看,夜间的极端降水量要大于日间,这说明夜间发生的极端降水事件强度更强。

#### 4.2 极端降水与气温相关性的空间分布

图6为极端降水量与气温相关性的空间分布。图6a中为20时一次日20时的极端降水量,西南地区约有28%的站点呈正相关关系,即温度越高极端降水量越大,约72%的站点呈现负相关关系。图6b为08—20时的日间降水与日最高气温的相关性空间分布,约有48%的站点为正相关关系,约52%的站点为负相关关

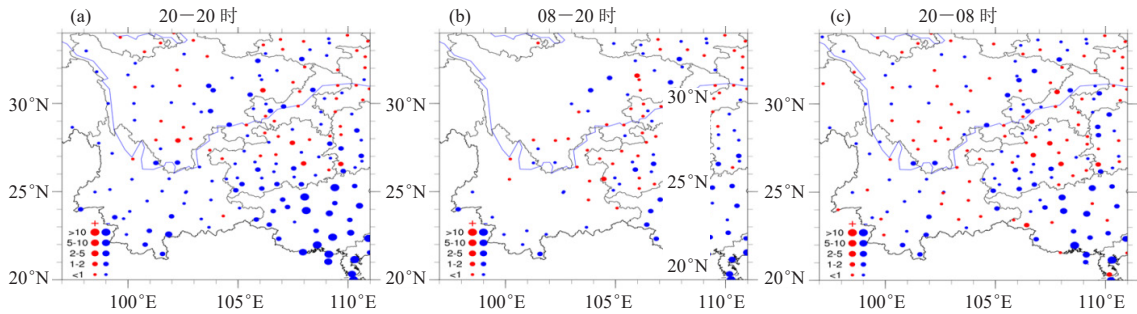


图6 极端降水与气温相关系数的空间分布  
(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水

Fig. 6 Spatial distribution of the correlation between extreme precipitation and temperature  
(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation

系。图6c中为20—次日08时的夜间降水与日最低气温相关性的空间分布,其中约56%的站点呈正相关关系,约44%的站点为负相关关系。

对比3个时段范围内的降水与气温的相关性,夜间约56%的站点极端降水与气温呈正相关关系,而20—次日20时的站点则仅有28%的站点呈正相关关系,气温较低的夜间极端降水量随气温的上升而增加的趋势较20—次日20时要明显得多,说明当极端降水发生时,气温越低降水量随温度上升而增加的趋势越明显。而日间有52%的站点呈负相关趋势,20—次日20时有72%的站点为负相关趋势。这反映了极端降水与气温的正相关性仅维持在温度较低条件下,温度越低,正相关关系越明显,极端降水随温度的升高而增加;温度越高时负相关关系则越显著,极端降水量随温度的升高而减少的趋势也就越明显。与上文的研究相对应,验证了西南地区温度的上升虽然增加了大气的饱和水汽压,大气的持水力增强,降水量增加,但当温度超过一定的范围之后则会出现反转,极端降水量与温度呈显著的负相关关系。

### 4.3 极端降水与夏季平均气温的相关性

根据克劳修斯-克拉伯龙(Clausius-Clapyeron)方程,极端降水量随气温而增加的变化率约为(6.0%~7.0%)/ $^{\circ}\text{C}$ 。同时根据历史观测数据和气候模拟结果表明,全球大尺度下的极端降水变化率接近或高于7%/ $^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。而我国整体上因平均气温上升的极端降水变化率为(6.4%/ $^{\circ}\text{C}$ )<sup>[1]</sup>,接近C-C方程的理论解。但是由于不同地区地势地形差异较大,受季风影响情况不同,极端降水随温度的变化与C-C方程的适应性会有所不同。尤其在我国西南地区,地形地貌复杂,海拔较高,有诸多因素影响降水。而西南地区的极端降水又多发生在夏季<sup>[20]</sup>,因此做了极端降水与夏季平均气温的相关性分析以探讨气温的上升对西南地

区极端降水的影响。

图7为3个不同时次的极端降水量与夏季平均气温的散点图,并做了线性拟合来研究二者的相关性。通过公式 $R_2 = R_1 \times (1 + P) \Delta t^{[21]}$ 来计算极端降水的变化率,其中: $R_1$ 为第一个温度值对应的降水量(mm); $R_2$ 为第二个温度值对应的降水量(mm); $P$ 为极端降水变化率(%/ $^{\circ}\text{C}$ ); $\Delta t$ 为温度差( $^{\circ}\text{C}$ )。可看出3个时次的极端降水主要集中在16~30 $^{\circ}\text{C}$ ,随平均气温的升高而呈现出了一致的增加趋势。其中20—20时的降水与气温的相关系数达到了5.14,在16~30 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,计算得出极端降水的变化率为8.52%/ $^{\circ}\text{C}$ ;08—20时的相关系数为3.51,极端降水的变化率为9.21%/ $^{\circ}\text{C}$ ;20—08时的相关系数为4.16,极端降水的变化率为8.19%/ $^{\circ}\text{C}$ ,所得结果都超出了C-C方程的理论解。可能因为西南地区受季风影响显著,东亚夏季风年代际尺度上的变化和西太平洋副热带高压的年代际位置变化,对整个区域气候产生显著影响,其中海温异常变化是影响西南地区气候变化的间接原因<sup>[6]</sup>。在地形上,西南地区是世界上地形最复杂的地区之一,地理海拔变化是影响西南地区极端降水变化的直接原因<sup>[22]</sup>。西南地区受到季风和地形显著影响,其极端降水随温度升高的变化率大于C-C方程的理论解。

## 5 结论

此次研究采用了多个极端降水指数对1971—2017年间西南地区的122个台站的逐日降水数据与气温数据进行了分析与讨论。得出了以下结论。

1) 从时间上看,近47年来我国西南地区的总降水量呈下降趋势,但极端降水的频次和强度却有显著的增加,降水趋于集中,并且强度更强、时间更短。从空间上看,夏季总降水量西南地区的东部要大于西部。西部地区极端降水日数多,但极端降水量小,东部的极端降水日数少而降水量大。极端降水的比率和

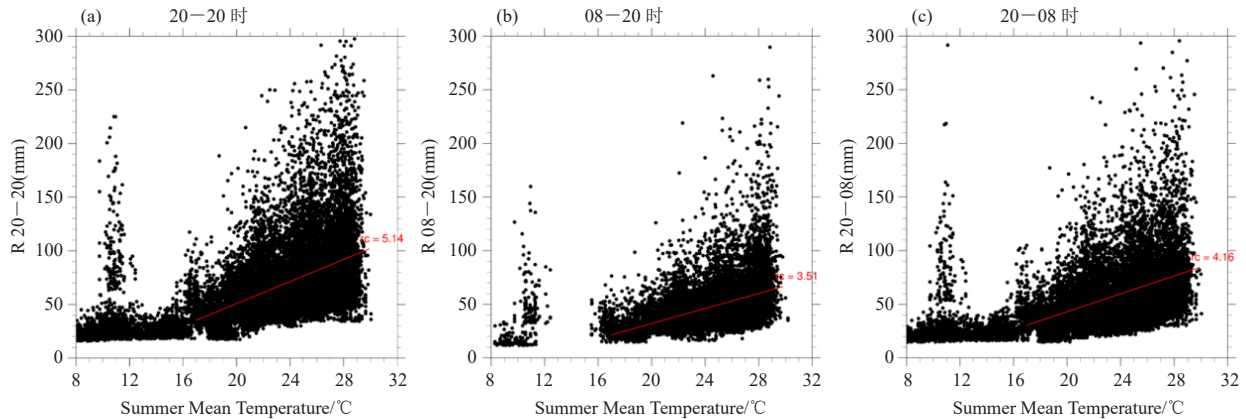


图7 极端降水量与夏季平均气温的散点图

(a) 全天降水, (b) 日间降水, (c) 夜间降水

Fig. 7 Scatter plot of extreme precipitation and summer mean temperature  
(a) daily precipitation, (b) daytime precipitation, (c) nighttime precipitation

强度也都出现了与之对应的结果, 西南地区东部的极端降水比率和强度都大于西部。

2) 对于夏季平均气温与极端降水量的关系, 二者在16~30°C呈现出一个较为平稳的增长趋势, 反映夏季平均气温的升高会导致极端降水量的增加, 但在日平均气温与极端降水的关系中却表明仅靠温度的升高无法保证极端降水量的稳定增加。反映了西南地区的极端降水伴随温度的升高有更多不确定性的同时极端降水又趋于一个频次更高、时间更短、强度更强的趋势发展。

3) 我国西南地区的极端降水量随夏季平均气温升高而稳定增加, 全天的极端降水变化率为8.52%/°C, 日间极端降水随温度的变化率为9.21%/°C, 夜间极端降水随温度的变化率为8.19%/°C, 大于C-C方程的理论解。

#### 参考文献

- [1] 章杰, 鱼京善, 来文立. 全球变暖背景下极端降水变化率与气温的响应关系. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(6): 722-726.
- [2] Overland J E, Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus A*, 2010, 62(1): 1-9.
- [3] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003. *Climate Dynamics*, 2011, 36 (11/12): 2399-2417.
- [4] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change. *Climatic Change*, 1998, 39(4): 667-694.
- [5] 王春学, 马振峰, 秦宁生, 等. 近50年川渝盆地夏季降水多尺度变化特征. 高原气象, 2016, (5): 1191-1199.
- [6] 袁文德, 郑江坤, 董奎. 1962—2012年西南地区极端降水事件的时空变化特征. 资源科学, 2014, (4): 766-772.
- [7] 丁文荣. 西南地区极端降水的时空变化特征. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1071-1079.
- [8] 陈活泼. CMIP5模式对21世纪末中国极端降水事件变化的预估. 科学通报, 2013, (8): 743-752.
- [9] 杨晓静, 徐宗学, 左德鹏, 等. 云南省1958—2013年极端降水时空变化特征分析. 灾害学, 2015, 30(4): 178-186.
- [10] Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring? *Science*, 2007, 317: 233-235.
- [11] Lenderink G, Meijgaard E V. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 511-514.
- [12] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 2008, 321: 1481-1484.
- [13] Xiao C, Wu P, Zhang L, et al. Robust increase in extreme summer rainfall intensity during the past four decades observed in China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 1-9.
- [14] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [15] Meehl G A, Karl T, Easterling D R, et al. An introduction to trends in extreme weather and climate events: observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 413-416.
- [16] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 2002, 19(3): 193-212.
- [17] Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [18] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D5), doi: 10.1029/2005JD006290.
- [19] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应. 地理学报, 2016, 71(5): 718-730.
- [20] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近50 a极端降水事件变化特征的季节性差异. 大气科学学报, 2009, 32(6): 744-751.
- [21] 王佳雯, 廖威林, 王大刚, 等. 中国大陆地区极端降水与温度的相关性. 中山大学学报:自然科学版, 2017, 56(6): 22-30.
- [22] 徐晓, 肖天贵, 麻素红. 西南地区气候季节划分及特征分析. 高原山地气象研究, 2010, 30(1): 35-40.

# 甘肃省平凉市春季一次罕见寒潮 低温天气的极端性分析

李晓霞<sup>1</sup> 李常德<sup>1</sup> 马真<sup>1</sup> 赵慧<sup>1</sup> 高玲<sup>2</sup>

(1 甘肃省平凉市气象局, 平凉 744000; 2 甘肃省白银市气象局, 白银 730900)

**摘要:** 基于常规观测资料、NCEP (2.5°×2.5°) 再分析等资料对2018年4月4—7日发生在甘肃省平凉市的罕见寒潮低温天气过程进行分析, 得出以下结论: 1) 此次寒潮天气的冷空气源地位于新地岛以东洋面上。寒潮爆发前5 d, 北半球100 hPa有一偏心型极涡。寒潮爆发期, 对流层中、上部的极涡发生了一次分裂, 因靠近我国的极涡中心偏强, 造成的低温天气也偏强。2) 此次寒潮天气过程属于脊前不稳定小槽发展型。高空主要影响系统为乌拉尔山高压脊及其前低压槽, 热力、动力因子共同促使槽、脊发展东移, 随着脊前偏北风加强, 引导槽后冷空气大举向南爆发。3) 寒潮爆发前后, 主力冷空气以分裂形式配合副冷锋影响寒潮区, 变形场和地面倒槽的动力、热力作用有利于地面(副)冷锋的生成和地面气旋加强。4) 寒潮爆发前, 平凉地区处于明显的升温环境中。爆发期, 因受强冷平流的长时间影响, 出现显著的持续性降温; 因平凉地区存在明显的上升绝热膨胀冷却效应, 利于降温天气的进一步加剧。5) 湿位涡中第二项湿斜压项的时、空演变特征能够很好地描述冷空气的移动、发展过程, 有助于寒潮天气过程中降温情况的判断和研究。

**关键词:** 寒潮, 极涡, 冷(副)锋, 冷平流, 湿位涡

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.006

## Extreme Analysis of a Rare Cold Wave and Low Temperature Weather in Spring in Pingliang City, Gansu Province

Li Xiaoxia<sup>1</sup>, Li Changde<sup>1</sup>, Ma Zhen<sup>1</sup>, Zhao Hui<sup>1</sup>, Gao Lin<sup>2</sup>

(1 Meteorological Bureau of Pingliang, Pingliang 744000 2 Meteorological Bureau of Baiyin, Baiyin 730900)

**Abstract:** Based on conventional observation data, NCEP reanalysis data (2.5°×2.5°), a rare cold wave and low temperature weather process which occurred in Pingliang City of Gansu Province from 4 to 7 in April 2018 was done. The results show that: 1) the cold air source of this cold wave weather is in the ocean surface to the east of Novaya Zemlya. Five days before the cold wave broken out, there was an off-center polar vortex at 100 hPa in the Northern Hemisphere. During the outbreak period of cold wave, the polar vortex in the middle and upper troposphere occurred a split. Because the center of polar vortex near China was stronger, the cold weather was also stronger. 2) The type of this cold wave process belonged to the development of unstable trough which in the fore part of high-pressure ridge. The main influence systems of high altitude were high pressure ridge in Ural Mountain and low-pressure trough. The thermal and dynamic factors jointly promoted the development and eastward movement of the trough and the ridge. With the strengthening of northerly wind in front of the high-pressure ridge, the cold air behind the low-pressure trough violent erupted to the south. 3) Around the outbreak of the cold wave, the main cold air with secondary cold front affected the cold wave area in the form of splitting. The dynamic and thermal effects of the deformation field and surface trough were conducive to the formation of surface (secondary) cold front and the strengthening of surface cyclone. 4) the intensity of 500 hPa high altitude cold center and ground cold high pressure all reached or exceeded the corresponding index value of the regional cold wave in Gansu Province in April; before the cold wave broke out, Pingliang Prefecture was in an obvious warming environment. During the outbreak period, due to the influence of strong cold advection for a long time, the temperature of Pingliang Prefecture occurred a significant sustained reduction. Pingliang Prefecture has obvious ascending motion and adiabatic expansion cooling effect, which was conducive to the further intensification of the cooling weather. (5)The temporal and spatial evolution characteristics of the second wet also baroclinic term in the wet potential vortex could well describe the movement and development of cold air, which was conducive to the judgment and research of the cooling situation in the cold wave weather.

收稿日期: 2020年7月27日; 修回日期: 2020年11月4日

第一作者: 李晓霞(1989—), Email: qx53915@163.com

资助信息: 甘肃省气象局气象科研项目(人才专项)  
(GSMARc2019-16)

**Keywords:** cold wave, polar vortex, cold (secondary) front, cold advection, wet potential vortex

## 0 引言

寒潮天气过程是一种大规模的强冷空气活动过程。寒潮天气的主要特点是剧烈的降温和大风,有时还伴有雨、雪、雨淞或霜冻<sup>[1]</sup>。寒潮是我国冬春季严重的灾害性天气之一,能给工农业生产和人们日常生活带来很大的影响。对寒潮天气的认识和研究已较为广泛,阎琦等<sup>[2-6]</sup>从气候角度分析了各地寒潮天气的变化特征及影响因子。周星妍<sup>[7]</sup>指出北大西洋风暴轴位置异常与我国寒潮频次变化存在显著的相关关系。张琳<sup>[8]</sup>发现极端气旋的生成和移动是中国寒潮天气发生的重要原因之一。近年来,对不同寒潮天气过程的发生机制进行对比分析的研究较多,田秀霞等<sup>[9-13]</sup>对相关寒潮天气的影响系统、发生背景、水汽、动力、热力机制等进行了诊断对比分析,得出一些重要的寒潮预报经验和指标。董全等<sup>[14]</sup>利用欧洲中期天气预报中心再分析资料和极端天气指数对某一次强寒潮天气活动进行了分析检验,探讨了如何有效利用极端天气指数来提高对极端灾害性天气过程预报的准确率。韦志刚等<sup>[15]</sup>评估了CFSv2系统对寒潮天气预报的能力,发现该系统对寒潮降温情况具有一定的提前预报能力。王丽等<sup>[16]</sup>将湿位涡应用到暴雨、强对流、寒潮等灾害性天气时,得出了有意义的结果。近年来,不少气象学者利用多种气象资料及相关产品对诸多典型寒潮天气个例做了深入的研究<sup>[17-22]</sup>,虽然引发寒潮爆发的环流形势和天气系统基本都是我们所熟知的,但是我国幅员辽阔,气候条件差异很大,各地寒潮天气特征存在一定的差异性,这就需要我们气象工作者根据当地的具体情况来研究寒潮预报的经验和指标,并做到本地化应用。目前而言,关于甘肃省平凉市本地的寒潮天气研究较少,对寒潮天气的极端性判断和预报也就更加欠缺。

2018年4月4—7日,甘肃省大部地方爆发了一次大范围的强寒潮天气,就平凉市而言,7个县(市、区)连续2日均出现寒潮天气,最低温度降幅最大达13.9℃,最低气温均达到或超过历史极值,属于一次极端性罕见强寒潮天气。各县区均出现不同程度的冷冻灾害,主要灾情出现在泾川县和灵台县,其中,泾川县有14个乡镇受灾,造成农作物受灾面积达27.85万亩(1亩≈666.7 m<sup>2</sup>),直接经济损失25882.66万元。灵台县有11个乡镇灾情较严重,造成果树、农作物等受灾面积达5.66万亩,直接经济损失16977.81万元。本文主要从寒潮天气系统、寒潮降温条件等方面入手,分析此次极端性寒潮天气的形成原因,为平凉市寒潮天气的预报及由此产生的气象灾害的预防提供参考。

## 1 天气实况

2018年4月4—7日,甘肃省平凉市爆发了入春以来最强的一次寒潮天气过程,造成7个县(市、区)出现大范围的剧烈降温天气,从寒潮强度和连续日数来看,4—7日研究区出现连续2天的区域性强寒潮天气,属于历史罕见寒潮天气。过程前后,全市日最低气温下降幅度普遍在8.5~13.9℃,其中,4—6日,庄浪县降温幅度最大,达到13.9℃;5—7日,灵台县降温幅度最大,达到13.8℃(图1)。7日清晨全市最低气温均降到-9.4~-5.0℃,最低气温和近20年同期相比较,7个县(市、区)均达到或超过历史极值,尤其静宁县的最低气温低于历史极值2.7℃。另外,4—5日寒潮区还出现了瞬时风力达6~7级的偏北大风,其中崆峒区极大风速达20.4 m/s。此次寒潮天气过程出现范围之广,强度之大,为历史罕见。

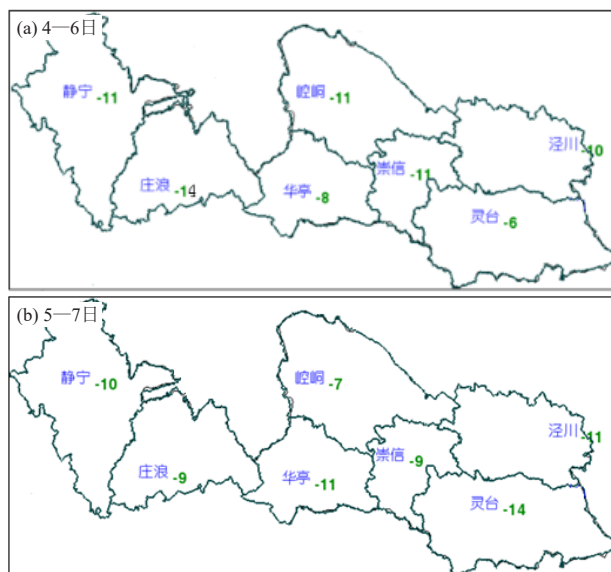


图1 2018年4月4—7日平凉市各县(市、区)48小时最低气温降温幅度(单位:℃)

Fig. 1 Drop range of minimum temperature for 48 h in Pingliang of all counties (cities, districts) in 4-7 April 2018 (unit: °C)

## 2 影响系统及降温条件

### 2.1 100 hPa 极涡

亚洲高纬度地区维持一个强大的极涡时,对我国的寒潮天气过程有很好的指示意义<sup>[1]</sup>。利用NCEP再分析资料对寒潮的中短期形势做了分析,分析寒潮发生前5 d、前1 d和发生时100 hPa极涡的分布特征发现,寒潮发生前5 d,有一极涡中心稳定于新地岛以东的喀拉海一带,中心强度在1512~1516 gpm左右,呈不对称的单波型,可见寒潮爆发前5 d,在北半球就出现了东西向偏心型极涡。寒潮爆发前1 d,3日08

时,极涡中心位于80°N以南,较前期相比强度增强,中心位置有所南压。3日20时,极涡继续加强南压至70°N附近,中心强度达1540 gpm左右。寒潮爆发时,4日08时,极涡进一步加强南压,极涡由东西向转为西北东南向,径向度加大,影响范围也大幅扩大。5日20时,极涡发生了一次分裂,2个中心分别位于70°N以北(极涡I)和贝加尔湖附近(极涡II),2个极涡均位于欧亚大陆,中心强度分别为1552 gpm和1564 gpm,且靠近我国的极涡II偏强,说明伴随我国的大范围寒潮低温天气也是偏强的,甘肃省平凉市位于极涡II底部,受其影响将出现持续低温冷冻天气。

此次寒潮天气过程冷空气的源地位于新地岛以东的洋面上,而后经喀拉海、太梅尔半岛、西伯利亚一带进入我国。寒潮爆发期间,对流层中、上部的极涡发生了一次断裂,分为两个中心,形成偶极型环流,这表明此次冷空气的强度为中等以上强度,由于靠近我国的极涡中心偏强,且位于西伯利亚北部,这样冷空气从西伯利亚源源南下,造成我国大范围持续低温天气,也是形成此次甘肃省平凉市极端寒潮天气的重要原因之一。

## 2.2 500 hPa 环流形势

寒潮能否爆发与冷空气的源地和堆积程度有着密切的关系<sup>[23]</sup>。分析500 hPa的环流形势可以看出,此次寒潮爆发前,2日20时,乌拉尔山附近为一高压脊,脊前有一弱的短波小槽,从温压场的配置来看,温度场落后于高度场,预示着上述槽、脊将会发展加强。3日08时,脊前不稳定小槽加强并东移南压至西西伯利亚一带。3日20时(图2a),乌拉尔山高压脊前冷槽分裂为南、北两支小槽,南支低槽位于新疆东部,等温线与等高线的交角大,槽后冷平流强。等高线也呈疏散结构,即槽线上有正涡度平流,两种因子共同促使该冷槽持续发展。同时,乌拉尔山高压脊线附近的暖平流和负涡度平流使得高压脊继续加强,使得脊前偏北风加大,这意味着冷平流的加强,将进一步促进脊前冷槽的发展。乌拉尔山高压脊和其前冷槽边发展边随着基本气流向东移动,至4日20时(图2b),乌拉尔山高压脊东移至亚洲西部,并由南北向逐渐向东北西南向发展,冷空气在脊前槽后持续堆积加强。5日08时,南北两支低槽同位相叠加,同时,亚洲西部高压脊同中亚高压脊有所合并加强,这将使得环流径向度进一步加大,脊前偏北风加强,引导槽后冷空气大举向南爆发,形成寒潮爆发的诱因。6日08时,亚洲中部受高压脊控制,低槽东移至我国东部,东亚大槽完成了一次重建,此时寒潮研究区仍受槽后冷平流的影响,前后出现了连续性的强寒潮天气。

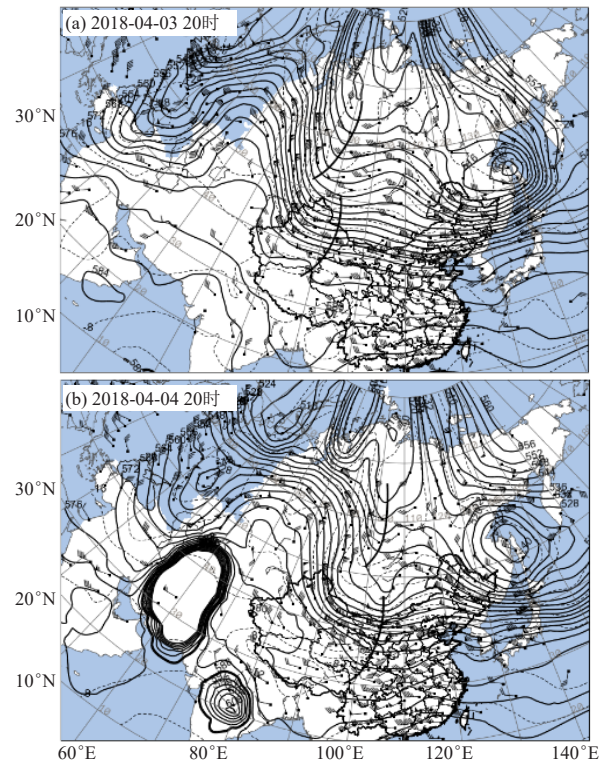


图2 2018年4月4—6日500 hPa环流形势  
(实线:等高线;虚线:等温线)

Fig. 2 Circulation situation of 500 hPa in 4-6 April 2018  
(solid: contours, dashed: isotherms)

此次寒潮天气过程属于脊前不稳定小槽发展型。高空主要影响系统为乌拉尔山高压脊及其前低压槽,不断东传的低槽持续影响寒潮研究区,加之强冷平流的长时间维持,使得此次寒潮天气过程具备了持续时间长,强度大,范围广的特征。

## 2.3 地面冷高压及冷锋

分析地面形势(图3)发现,此次寒潮爆发前后,在寒潮地面高压的前缘都有一条强度较强的冷锋作为寒潮的前锋,并且在300 hPa以下各等压面上都配合有明显的高空冷槽和锋区,同样,在寒潮冷锋的后部都有一地面冷高压存在,从冷高压的移动路径可以看出冷空气的移动路径为西北—东南向。对比上一节分析可以发现,地面寒潮冷锋均位于500 hPa冷槽前部,属于后倾形势。寒潮爆发过程中,随着高空冷槽的加深,地面冷锋后的气流径向度也加大,利于寒潮冷锋的南下。3日08时,地面冷高压位于乌拉尔山脊底部下游,寒潮冷锋位于两个冷高压之间的低压变形场中。3日20时(图3a),高压中心强度达1042.5 hPa,冷空气扩散到北疆,变形场中生成气旋中心,位于贝加尔湖西侧,寒潮冷锋位于贝加尔湖西侧至新疆北部。4日08时(图3b),冷高压位置少动,但主力冷空气分裂一闭合冷性小高压南压至河西

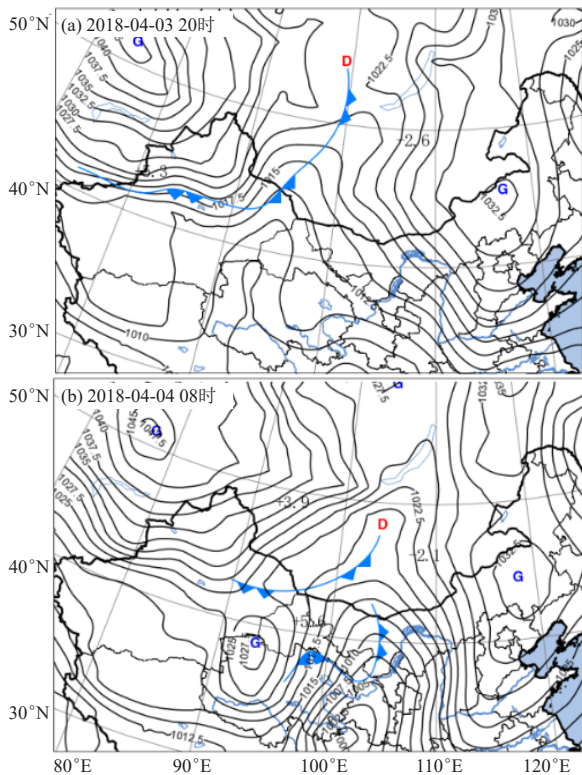


图3 2018年4月3—4日地面形势  
Fig. 3 Ground situation in 3-4 April 2018

西部和青海高原西部一带，其前有副冷锋生成，是发展的低压倒槽与柴达木冷空气前锋结合地形锢囚锋，此时主锋仍位于蒙古气旋中心向西延伸的低压槽中。4日20时，随着主冷锋下摆转向，与其前副冷锋合并，形成一支更强的冷锋位于蒙古中部至甘肃东南部一带，其后部的地面高压中心强度分别增强到1045.8 hPa、1028.4 hPa，这也预示着冷空气强度的增强，此时，甘肃省平凉市位于冷锋后3 h显著升压区内，锋后正变压中心值达+10.0 hPa，变压差增大到11.0 hPa左右，这与该时段内平凉全市出现偏北大风天气密切相关。5日08时，地面冷高压位置少动，强度增强到1057.1 hPa，伸出的地面高压脊伸向东南，沿河西走廊不断延伸，其前冷锋东移，前后变压差在10.5 hPa左右；5日20时，切断出闭合冷高压，中心位于马鬃山-额济纳一带，中心强度达1042.5 hPa，平凉市仍位于冷锋后3 h显著升压区内，锋后正变压中心值达+9.0 hPa，变压差在8.5 hPa左右，而锋后强冷空气和较大变压差是形成平凉市寒潮和大风天气的重要影响因子；6日08时，冷高压中心沿河西走廊东移南下直至甘肃省河东地区，之后的24小时内北部冷高压中心缓慢变性，高压前冷锋也逐渐东移减弱消失。

从地面冷锋、气旋和冷高压的演变来看，冷空气主力并未爆发性东移南下，而是以冷高压分裂的形

式影响甘肃省东部地区。分裂的冷空气出现向南爆发的现象，冷高压中心沿河西走廊南下，其空间尺度较小，降温集中。另外，变形场和地面倒槽的动力、热力作用有利于地面（副）冷锋的生成和地面气旋加强。

## 2.4 温度平流

在水平气流方向上气温分布不均匀时，空气水平运动将引起气温的局地变化，暖平流使局地气温上升，冷平流使局地气温下降，因而气温变化的程度决定于温度平流的强度<sup>[1]</sup>。

本文利用NCEP再分析资料对温度平流进行诊断分析，沿35.3°N做温度平流的垂直剖面，发现寒潮爆发前期，4月2—3日，研究区基本受暖平流或弱冷平流控制，以3日14时为例，在对流层中层有一个暖平流中心，强度达 $4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ ，可见过程前期研究区处于明显的升温环境中，为后期的寒潮降温和降温强度提供了温度基础。4日20时（图4a），600 hPa以下到近地面层，研究区转为受冷平流控制，最强中心位于近地面层，中心值达 $-1.6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ ，表明低层已有冷空气入侵。5日08时（图4b），从近地面层至对流层高层，研究区均受冷平流控制，中心位于700 hPa附近，值达到 $-2.0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ ，可见冷空气逐渐变得深厚，强度也大大增强，为连续两日寒潮天气提供了

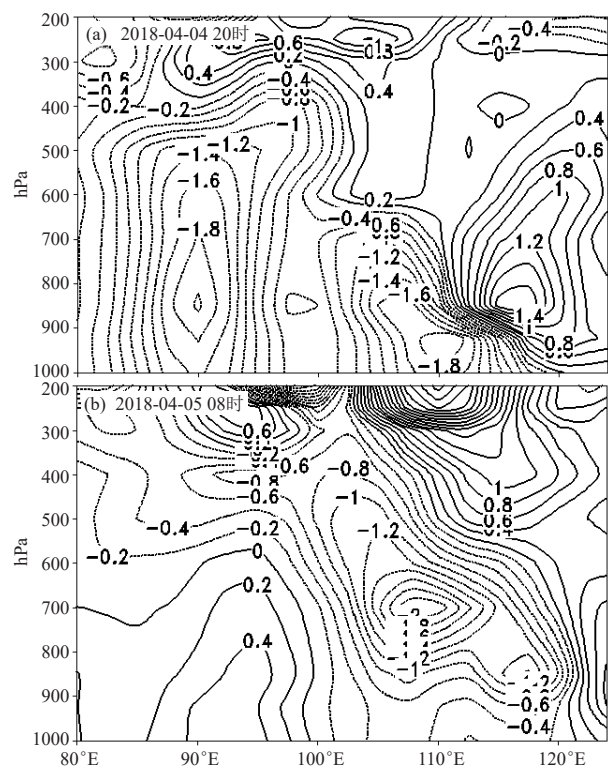


图4 2018年4月4—5日沿35.3°N温度平流的经向剖面(单位： $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ )

Fig. 4 The meridional section along 35.3°N of temperature advection in 2-5 April 2018 (unit:  $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ )

冷空气条件。到5日20时，冷空气持续加强，冷平流区域贯穿到对流层顶，最强中心位于500~400 hPa，研究区偏东一带更为显著，灵台县境内中心强度达 $-2.2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 左右。另外，从5日午后到前半夜，温度平流具有明显的上冷下暖分布特征，这种配置有利于不稳定层结的形成，可促使冷暖空气的上下对流，利于动量下传，形成地面大风。

## 2.5 垂直速度

本节主要分析垂直运动对局地气温变化的影响，垂直运动对局地气温变化的影响主要是通过垂直运动的方向、强度和大气温度来实现的。在稳定大气层结状态下，如有上升运动，即 $\omega < 0$ ，当地气温就下降，反之，如有下沉运动，即 $\omega > 0$ ，当地气温就上升。

本文沿 $35.3^\circ\text{N}$ 做垂直速度的垂直剖面，可以看出，4月3日20时，寒潮研究区500 hPa以下均为上升运动，中心值为 $-20 \times 10^{-2} \text{ Pa/s}$ ，对流层中低层这种垂直运动的分布，可产生绝热膨胀冷却效应，从而利于研究区降温天气的加剧。4日20时，从近地层到对流层顶，研究区整层均为强的上升运动，中心最大值达 $-52 \times 10^{-2} \text{ Pa/s}$ 以上，且最强上升运动区位于寒潮研究区境内，这说明此次寒潮天气过程中，垂直运动剧烈，从而引起的局地降温也就较强。5日20时，上升运动的强度有所减弱，但其伸展高度仍达300 hPa左右。至7日08时，研究区整层均转为下沉运动，由垂直运动项对局地温度变化所造成的影响转为升温效应。

## 3 湿位涡

湿位涡 (MPV) 是能够反映大气动力、热力和水汽作用的综合物理量。

在 $p$ 坐标系中，湿位涡守恒的表达式为：

$$MPV = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}, \quad (1)$$

$$MPV1 = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}, \quad (2)$$

$$MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}. \quad (3)$$

其中：式(2)为湿正压项，式(3)为湿斜压项。湿正压项表示惯性稳定性和对流稳定性作用。湿斜压项包含了湿斜压性和水平风垂直切变的作用，标志了大气斜压性的发展，而大气的斜压性有利于气旋性涡度的发展。MPV2与高空冷平流有很好的对应关系，可以很好的应用到寒潮天气的预报诊断中，当 $MPV2 < 0$ ， $|MPV2|$ 越大时，表示大气斜压性越强，等压面上的等温线越密集（即温度梯度越大），冷空气锋生越强，利于寒潮天气过程中的气温下降。

利用NCEP再分析资料，分别计算出500 hPa、700 hPa等压面上的MPV2项以及沿 $35.3^\circ\text{N}$ 的MPV2纬向垂直剖面，分析MPV2项在此次强寒潮天气过程中的作用。以500 hPa为例，3日20时，在甘肃省河东西部地区有一个MPV的密集带，中心值为 $-1.3 \text{ PVU}$  ( $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )，平凉市位于零线范围内。4日08时（图5a），MPV2密集带南压到甘肃省河东地区，研究区的值为 $-0.6 \sim -0.3 \text{ PVU}$ ，表明此时冷空气已南压并开始影响研究区，且500 hPa冷平流增强。5日08时（图5b），MPV2高值中心整体东移，研究区 $|MPV2|$ 增大，为 $-1.4 \sim -1.0 \text{ PVU}$ ，大气斜压性进一步增强，冷空气锋生加强，平凉市出现了明显的气温下降。之后MPV2密集带和大值中心逐渐东移，直到6日20时，研究区均位于MPV2负值区，但强度减弱。700 hPa的MPV2分布特征基本类似于500 hPa，3日20时—6日08时，研究区均位MPV2负值区，最强时段为3日夜到4日白天，最强值达 $-0.9 \sim -0.6 \text{ PVU}$ 。

再沿 $35.3^\circ\text{N}$ 做MPV2纬向垂直剖面图分析发现，3日02时，寒潮研究区700 hPa以上开始出现MPV2负值。4日20时（图5c），从近地面到对流层中上层，MPV2均为负值， $|MPV2|$ 普遍增大，最强中心位于600 hPa附近，值达 $-1.1 \text{ PVU}$ 左右，表明冷空气变深厚，强度增强。5日14时（图5d），MPV2大值中心东移，而寒潮区仍持续深厚MPV2的负值区。直到6日14时，研究区内MPV2值上下层均转为正值或弱的负值。

可见，湿位涡中第二项湿斜压项在此次寒潮天气过程中有着很好的指示意义，其时、空演变特征能够很好地描述冷空气的移动、发展过程，从而有助于寒潮天气过程中降温情况的判断和研究。

## 4 结论

(1) 此次寒潮天气的冷空气源地位于新地岛以东洋面上，而后经喀拉海、太梅尔半岛、西伯利亚一带进入我国。寒潮爆发前5 d，100 hPa在北半球有一东西向偏心型极涡。寒潮爆发期间，对流层中、上部的极涡发生了一次分裂，表明此次冷空气强度为中等以上强度，因靠近我国的极涡中心偏强，造成我国大范围的持续低温天气也偏强。

(2) 此次寒潮天气过程属于脊前不稳定小槽发展型。高空主要影响系统为乌拉尔山高压脊及其前低压槽，不断东传的低槽持续影响寒潮研究区，加之强冷平流的长时间维持，使得此次寒潮天气过程具备了持续时间久，强度大，范围广的特征。

(3) 从地面冷锋、气旋和冷高压的演变来看，

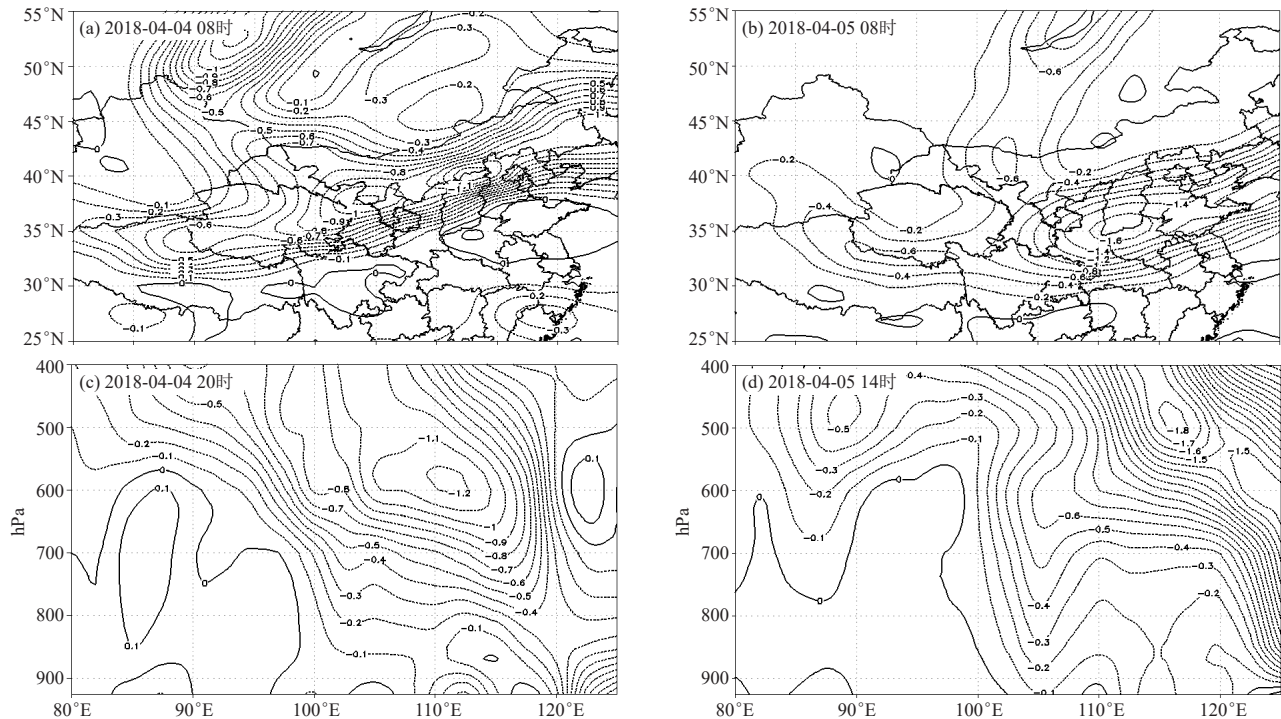


图5 500 hPa MPV2的分布特征 (a, b) 及沿35.3°N MPV2的纬向垂直剖面 (c, d) 图 (单位: PVU)

Fig. 5 The distribution characteristics of 500 hPa MPV2 and the vertical zonal section along 35.3°N of MPV2 (unit: PVU)

此次寒潮爆发前后,在寒潮地面高压的前缘都有一条强度较强的冷锋作为寒潮的前锋,主体冷高压位置少动,后期分裂形成一闭合小高压南压,并配合有副冷锋生成,随着主冷锋下摆转向,与其前副冷锋合并,形成一支更强的冷锋影响寒潮区。

(4) 从高空冷暖平流的分布可以得出,寒潮爆发前,研究区处于明显的升温环境中,这为后期的寒潮降温 and 降温强度提供了一定的温度基础。爆发期,研究区受强冷平流的长时间持续影响,因高空冷平流项引起的局地降温也是显著的;寒潮期间,研究区存在明显的上升运动,可产生显著的绝热膨胀冷却效应,从而利于研究区降温天气的加剧。

(5) 将湿位涡应用到此次寒潮天气的分析中,发现湿位涡中第二项湿斜压项在此次寒潮天气过程中有着很好的指示意义,其时空演变特征能够很好地描述冷空气的移动、发展过程,从而有助于寒潮天气过程中降温情况的判断和研究。

#### 参考文献

[1] 朱乾根,林锦瑞,寿邵文,等.天气学原理和方法.北京:气象出版社,2007.  
 [2] 阎琦,田莉,李爽,等.辽宁区域性冷空气多时间尺度变化特征及影响因子.冰川冻土,2016,38(2): 379-387.  
 [3] 黄炜楠,李雪,董胜.基于小波分析的山东寒潮强弱时空变化特征研究.自然灾害学报,2017,26(3): 56-62.  
 [4] 康志明,金荣花,鲍媛媛.1951—2006年期间我国寒潮活动特征分析.高原气象,2010,29(2): 420-428.  
 [5] 陈永林,邵玲玲,漆梁波,等.2008年初上海冰雪天气与冷空气路径的相关性研究.气象科学,2010,30(3): 414-419.

[6] 白松竹,博尔楠·哈不都拉,谢秀琴.气候变暖背景下阿勒泰地区寒潮活动变化特征.冰川冻土,2015,37(2): 387-394.  
 [7] 周星妍,朱伟军,顾聪.冬季北大西洋风暴轴异常对我国寒潮活动的可能影响.大气科学,2015,39(5): 978-990.  
 [8] 张琳,吕俊梅,丁明虎.2015年初北极极端气旋对中国寒潮的影响.应用气象学报,2020,31(3): 315-327.  
 [9] 田秀霞,寿邵文.2008年12月两次强寒潮过程的等熵位涡分析.气象科学,2013,33(1): 102-108.  
 [10] 李向红,廖幕科,熊英明.影响广西的三次寒潮过程对比研究.气象科学,2011,31(2): 228-235.  
 [11] 孙玉莲,任余龙,韦伯龙,等.甘肃临夏地区2次沙尘寒潮天气成因对比.干旱气象,2013,31(1): 150-156.  
 [12] 李艳,张金玉,李旭,等.两次典型极端低温过程低频特征分析.高原气象,2018,37(5): 1341-1352.  
 [13] 周翠芳,张广平,杨海山.宁夏冬季寒潮天气过程对比分析.干旱气象,2009,27(2): 142-147.  
 [14] 董全,代刊,陶亦为.ECMWF集合预报的极端气温预报产品应用和检验.气象,2016,8(4): 41-51.  
 [15] 韦志刚,董文杰,朱献,等.CFSv2系统对2015年11月中国一次寒潮过程及其欧亚冷空气活动的预报评估.高原气象,2019,38(4): 673-684.  
 [16] 王丽,韦惠红,金琪,等.湖北省一次罕见寒潮天气过程气温陡降分析.气象,2006,32(9): 71-76.  
 [17] 孙淑芳,张广兴,李曼.2014年4月22日新疆寒潮天气过程锋面结构演变特征分析.沙漠与绿洲气象,2018,12(6): 40-48.  
 [18] 高振荣,刘晓云,田庆明,等.甘肃河西地区一次强寒潮天气个例诊断分析.干旱气象,2009,27(1): 34-39.  
 [19] 阎琦,崔峰,赵梓淇,等.辽宁“11·24”强寒潮过程分析.沙漠与绿洲气象,2019,13(1): 39-43.  
 [20] 吕新生,万瑜,尹冰霞,等.新疆北部一次强寒潮天气特征及成因.干旱气象,2017,35(1): 82-90.  
 [21] 王晓芳,程正泉,姜丽萍.2016年广东一次罕见寒潮雨雪冰冻天气过程分析.气象科技,2019,47(1): 106-115.  
 [22] 张备,尹东屏,孙燕,等.一次寒潮过程的多种相态降水机理分析.高原气象,2014,33(1): 190-198.  
 [23] 牛若云,乔林,陈涛,等.2008年12月2—6日寒潮天气过程分析.气象,2009,35(12): 74-82.

# 广东一次强飑线过程的地闪变化特征分析

郭青<sup>1</sup> 李源锋<sup>1</sup> 高国靖<sup>1</sup> 郭春辉<sup>2</sup> 郭志萍<sup>3</sup> 曾惠娟<sup>1</sup>

(1 梅州市气象局, 梅州 514021; 2 肇庆市气象局, 肇庆 526000; 3 河源市气象局, 河源 517000)

**摘要:** 利用广东的地闪定位资料、天气雷达资料、卫星资料以及探空资料, 对2014年3月31日广东的一次飑线过程的地闪活动进行分析。重点分析飑线过程地闪活动变化特征以及地闪活动与同期气象观测资料的关系。分析表明: 飑线发展初期, 地闪活动快速增加; 在旺盛阶段, 地闪频数维持较高水平; 减弱阶段, 地闪活动明显减少, 在整个飑线发展过程中, 负地闪活动占主导地位, 正地闪比峰值落后于地闪频数峰值约在1 h出现; 飑线过程单位面积内92.8%的地闪活动发生在组合反射率 > 40 dBz的回波区, 其中组合反射率 > 60 dBz的回波区地闪活动最为活跃; 飑线旺盛阶段, 在雷达图上表现出明显“弓形回波”、速度模糊以及明显的速度辐合等强对流天气特征; TBB亮温 ≤ 220 K区域与闪电活动的密集区域有很好的对应关系; 地闪活动活跃期: 温度露点差垂直分布呈现明显的不稳定层结特性, 在湿度垂直分布主要表现为“上干下湿”型和“湿层深厚”型两个阶段, 飑线的旺盛发展阶段中低空有强的垂直风切变。

**关键词:** 飑线, 地闪频数, 雷达回波, 正负地闪

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.007

## Analysis on Lightning Activity Characteristic of a Strong Squall Line System in Guangdong

Guo Qing<sup>1</sup>, Li Yuanfeng<sup>1</sup>, Gao Guojing<sup>1</sup>, Guo Chunhui<sup>2</sup>, Guo Zhiping<sup>3</sup>, Zeng Huijuan<sup>1</sup>

(1 Meizhou Municipal Bureau of Meteorology, Meizhou 514021 2 Zhaoqing Municipal Bureau of Meteorology, Zhaoqing 526000 3 Heyuan Municipal Bureau of Meteorology, Heyuan 517000)

**Abstract:** Based on the cloud-to-ground (CG) lightning location data, weather radar data, satellite data and radiosonde data of Guangdong Province, this paper analyzes the lightning activity of a squall line process in Guangdong Province on 31 March 2014. This paper focuses on the analysis of the variation characteristics of the CG activity in the squall line process and the relationship between the CG activity and the meteorological observation data in the same period. The results show that: in the early stage of squall line development, the CG activity increases rapidly; in the vigorous stage, the CG frequency maintains a high level; in the weakened stage, the CG activity decreases obviously. In the whole squall line development process, the negative CG activity takes the dominant position, and the peak value of positive lightning ratio is about 1h behind the peak value of CG frequency; 92.8% of the CG activity per unit area of squall line process occurred in the echo area with combined reflectivity greater than 40 dBz, and the echo area with combined reflectivity greater than 60 dBz was the most active; In the strong stage of squall line, there are obvious “bow echo”, fuzzy velocity and obvious velocity convergence on radar image; TBB bright temperature lower than 220 K area has a good corresponding relationship with the dense area of lightning activity; the active period of ground lightning activity is usually accompanied by obvious unstable stratification characteristics, mainly including the “upper dry and lower wet” type and the “wet layer deep” type, and there is strong vertical wind shear in the middle and low altitude during the vigorous development stage of squall line.

**Keywords:** squall line, frequency of CG, radar echo, positive and negative lightning

### 0 引言

飑线通常有若干排列成行的雷暴单体或雷暴群组成, 是风向、风速发生突变的、狭窄的强对流天气带。飑线上的雷暴通常由若干个雷暴单体组成, 少则四五个, 多则十几二十个, 由于发展有先后, 所以飑

线比个别雷暴单体带来的天气变化更为剧烈, 常伴随着强风、雷暴甚至冰雹等灾害性天气<sup>[1-2]</sup>。

近年来, 国内外学者对飑线的产生机理开展大量研究工作, 取得了丰富的成果。赖悦等<sup>[3]</sup>、尹丽云等<sup>[4]</sup>分析了飑线过程的闪电特性; 一些学者<sup>[5-11]</sup>研究分析了飑线过程的雷达回波特性; 刘娟等<sup>[12]</sup>、李哲等<sup>[13]</sup>、李娜等<sup>[14]</sup>分析了不同地区飑线天气诊断分析以及数值模拟。Cetrone等<sup>[15]</sup>通过分析西非地区的几次飑线过程, 分析表明闪电活动和雷达回波强度有明显的相关

收稿日期: 2020年6月11日; 修回日期: 2020年7月5日  
第一作者: 郭青(1985—), Email: guoq85mz@aliyun.com  
资助信息: 广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2017M36)

性; Newton<sup>[16]</sup>发现飚线出现环境条件通常表征为: 强的垂直风切变, 并且对流层中下层水汽旺盛。本文运用相关气象资料对广东一次飚线过程的地闪活动进行分析, 通过分析地闪频数和相关气象资料的关系, 以期探寻地闪活动对强对流天气的指示作用, 旨在为本地区强对流天气的雷电预警预报工作提供技术参考。

## 1 资料来源及分析方法

本文采用2014年3月30—31日的地闪定位数据来源于广东电力系统闪电定位系统; 天气雷达资料来源于肇庆市天气雷达站, 观测时间间隔为6 min; 探空资料来源于河源市气象局东源探空站(站号: 59293); 气象卫星资料中FY-2E卫星的云顶亮温资料(TBB)来源于国家卫星气象中心的风云卫星遥感数据服务网; 其他气象观测资料来源于广东省气象局业务网。

本文主要采用数理统计的分析方法, 对2014年3月31日03—11时广东的一次飚线过程地闪数据与同期的气象观测数据进行统计分析, 得到了飚线过程的地闪变化特征并分析。本文统计雷达、卫星观测时刻同时发生的闪电频数时, 将雷达观测时间后6 min、卫星观测后1 h发生的闪电定义为该定位时间飚线过程同时发生的闪电。

## 2 飚线过程的地闪特征

受高空槽东移和低涡切变线南压影响, 广东地区受西南暖湿气流控制, 加之高空急流一直在本地区维持。良好的热力和动力条件, 不断诱发小尺度扰动的产生, 进而促使飚线系统的产生以及发展。2014年3月31日03—11时广东地区出现了飚线天气过程, 期间出现气压涌升、气温骤降、湿度增大以及风速急增等天气现象, 发生了大范围的强对流天气过程。此次过程对流活动持续时间长, 将近8 h; 影响范围广, 几乎横扫整个广东。飚线过程共监测到地闪频数为209575 fl (fl为flashes的简写, 表示闪电频数), 其中负地闪为161170 fl, 正地闪为48405 fl, 正地闪比为23.1%, 远高于赖悦等<sup>[3]</sup>研究得到的正地闪仅占总地闪频数6.8%, 远低于Feng等<sup>[17]</sup>研究得到正地闪频数占总地闪频数一半以上的结论。由此可见, 不同地区不同系统的地闪活动差异很大。

图1为飚线过程地闪频数随时间的变化, 可以看出: 在飚线初始发展阶段(03—04时): 总的地闪频数快速增长, 平均地闪频数为1954 fl·6 min<sup>-1</sup>, 其中负地闪频数的增长速率远大于正地闪频数, 正地闪比变化相对平缓, 整个阶段负地闪占比超过90%。04: 00—07: 30为飚线的旺盛发展阶段, 地闪频数

一直维持较高水平, 呈“窄幅震荡增长”趋势, 平均地闪频数达到3147 fl·6 min<sup>-1</sup>, 期间总的地闪频数以及负地闪频数均于07: 12达到最大值, 依次为4178 fl·6 min<sup>-1</sup>、2969 fl·6 min<sup>-1</sup>, 平均正地闪占比为22.95%。07: 30以后为飚线的减弱消亡阶段, 地闪频数虽偶尔有震荡增加现象, 但总体趋势呈明显减少, 平均地闪频数为2219 fl·6 min<sup>-1</sup>, 负地闪频数减少速率远快于正地闪频数; 平均正地闪比达到24.14%, 正地闪比峰值于08: 18达到最大值36.68%, 落后地闪频数峰值约1 h。

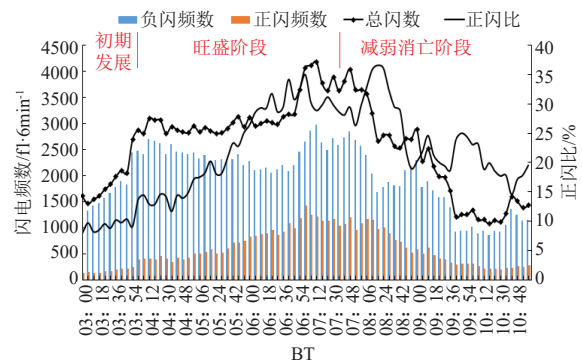


图1 2014年3月31日飚线过程地闪频数随时间的变化  
Fig. 1 Variation of ground flash frequency with time in squall line process on 31 March 2014

## 3 地闪特征与相关气象资料关系

### 3.1 地闪特征与天气雷达资料关系

雷达组合反射率通常用来表征云内大粒子(如冰晶、大的过冷水滴等)分布特性, 通常组合反射率越大, 说明云内大粒子的密度越大, 进而越容易发生碰并产生闪电活动。

本文将飚线过程雷达观测范围300 km内, 每6 min地闪与雷达组合反射率格点对应叠加, 统计出单位面积在不同组合反射率区间对应的地闪频数百分比(图2)。从图2可以看出: 92.8%的地闪活动发生在组合反射率大于40 dBz的回波区(即组合反射率大于40 dBz范围内对应的地闪频数占92.8%), 其中组合反射率大于60 dBz的回波区地闪活动最为活跃, 出现了58.8%的地闪活动。组合反射率小于40 dBz的弱回波区地闪活动较少。结合图3a可知, 组合反射率小于40 dBz的弱回波区面积最大, 但由于其对流不够旺盛、回波顶高度不高, 因而地闪活动相对较少; 而大于40 dBz区间回波顶高度较高, 闪电活跃, 因此闪电活动百分比高; 特别是60 dBz以上的回波区面积很小, 加之对流极为旺盛, 因此其单位面积的闪电频数百分比最高。地闪活动分布特征与雷达强回波区域有较好的对应关系, 且地闪活动密集区域与回波顶的最

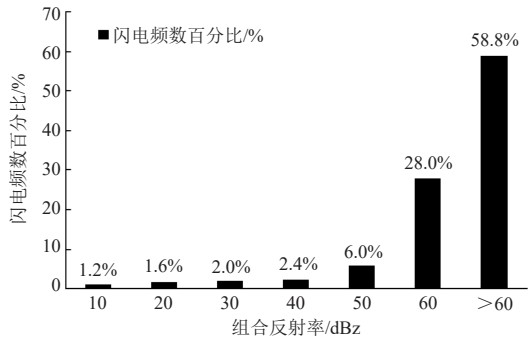


图2 地闪频数与组合反射率统计

Fig. 2 Statistics of ground flash frequency and combined reflectivity

大高度相对应。

在飑线旺盛阶段，在雷达组合反射率图上有明显的“弓形”回波（图3a），水平尺度达到300 km以上，强回波中心强度大于60 dBz；沿几个强回波中心得到垂直剖面图（图3b）可知，对流发展高度较高，最大回波顶高度大于15 km，强回波中心在7~8 km位置，有悬垂结构；由图3c可知，在强回波顶点位置的偏北风与偏南风形成明显的强辐合，速度达到43 m/s，在速度图上有速度模糊现象；由图3d可知，飑线系统的垂直液态含水量为45~50 kg/m<sup>2</sup>。由此可见，飑线旺盛阶段，雷达图上表现出明显“弓形回

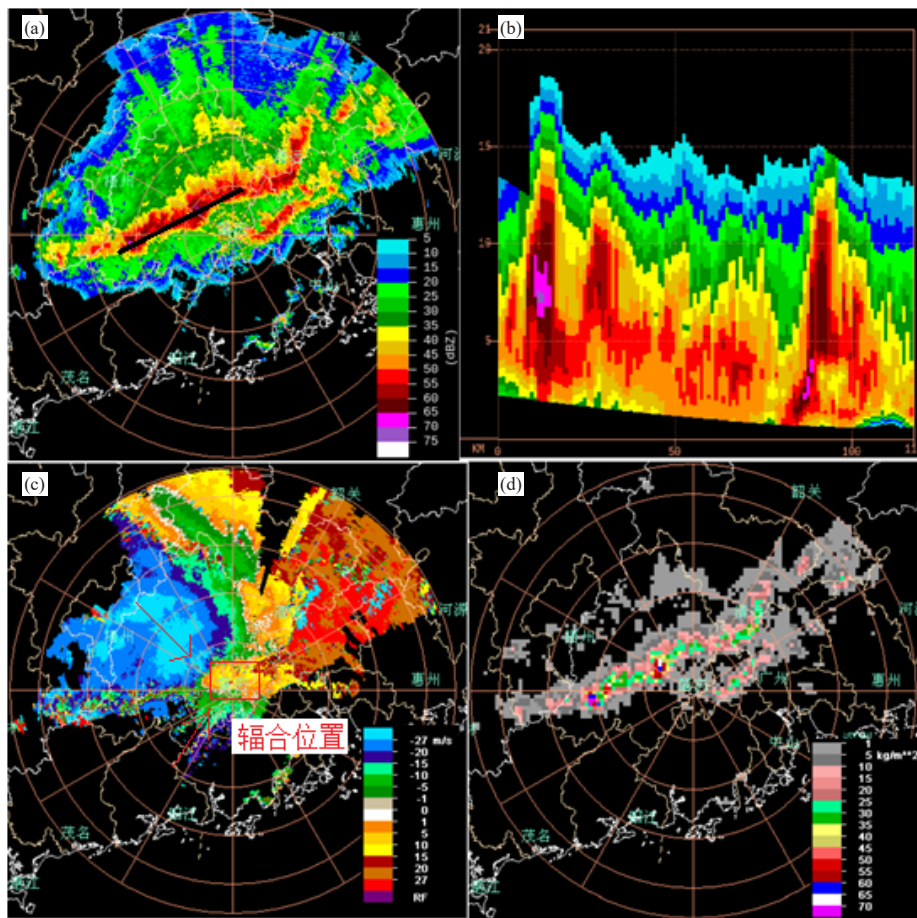


图3 2014年3月31日06:24飑线旺盛阶段雷达图(北京时,下同)

(a) 组合反射率; (b) 沿图3a黑色线垂直剖面; (c) 1.5°仰角速度; (d) 垂直液态含水量

Fig. 3 Radar chart of squall line in vigorous stage at 06:24 BT 31 March 2014

(a) combined reflectivity, (b) vertical section along black line in Fig. 3a, (c) 1.5° elevation velocity, (d) vertical liquid water content

波”、速度模糊以及明显的速度辐合等强对流天气特征，这一阶段刚好与着密集的闪电活动相对应。

### 3.2 地闪特征与卫星资料的关系

许多学者研究表明微波亮温的高低与云内粒子散射能力强弱密切相关<sup>[18]</sup>，云内粒子的散射能力强

弱与地闪活动活跃程度相对应。一般而言，云内粒子散射能力越强，微波亮温就越低。本文FY-2E卫星微波亮温以及同期广东地区地闪活动空间分布对比分析发现，31日03:00 TBB亮温≤220 K区域主要出现在广西境内，在广东境内则出现在韶关与河源

交界区域(图4a),而同期这两个区域出现了密集的地闪活动(图5a),特别是在广西境内地闪活动异常活跃;31日05:00 TBB亮温 $\leq 220$  K区域向东移动到了广西与广东的交界区域(图4b);07:00 TBB亮温 $\leq 220$  K区域整体移入广东境内,几乎覆盖了整个广东中部以及北部(图4c);由图4d可知,11:00 TBB亮温 $\leq 220$  K区域随着飊线减弱向东移动到了珠江口区域。结合同期广东地区地闪活动空间分布特性不难发现,TBB亮温 $\leq 220$  K区域与闪电活动的密集区域有很好的对应关系。

### 3.3 地闪特征与探空资料的关系

图6为东源站30日19时—31日19时( $T-T_d$ )垂直分布曲线以及湿度垂直廓线,由图6a可知,30日19时、31日07时的东源站温度廓线( $T-T_d < 5^\circ\text{C}$ )贯穿整个对流层,呈明显的不稳定层结特征;由图6b可知,30日19时初步呈现“上干下湿”特征,中低层湿度趋于饱和,平均相对湿度大于90%,高层比较干冷,平均相对湿度70%左右,有利于对流活动的发展;31日07时整个对流层“湿层深厚”特征特别明显,整个对流层湿度近于饱和,平均相对湿度均大于90%,对流活动异常旺盛,极易造成闪电活动活跃;同日19时对流层中上层湿度趋于干燥,对流层不稳定层结特征不明显,对流活动减弱,闪电活动随着减少。

环境风的垂直风切变是指水平风(含风速大小以及风的方向)随高度变化。公式为 $S = \sqrt{(u_1 - u_0)^2 + (v_1 - v_0)^2}$ ,式中: $S$ 表示垂直风切变,

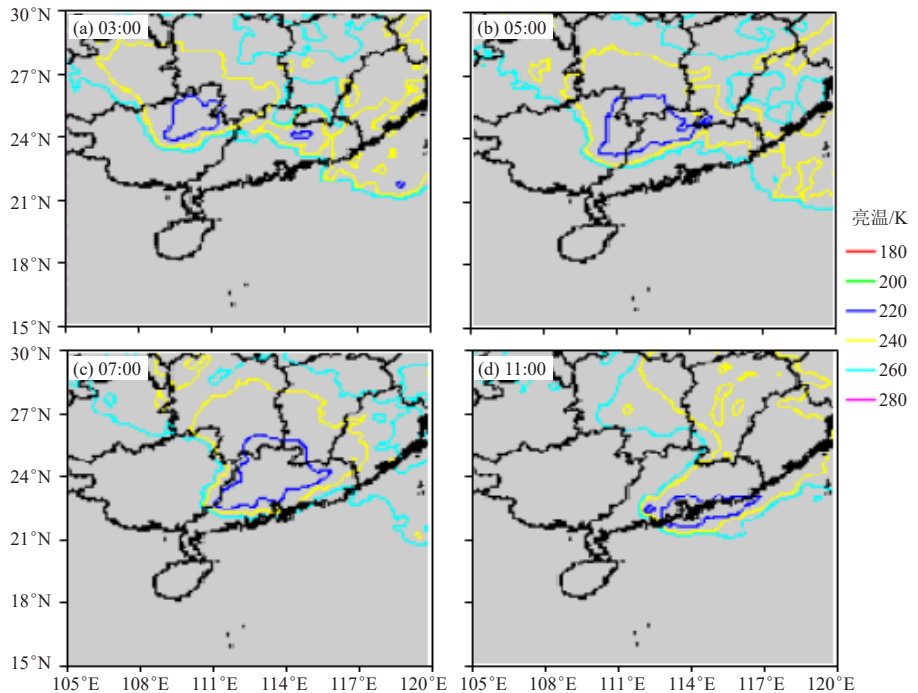


图4 2014年3月31日FY-2E卫星微波亮温度

Fig. 4 Cloud top brightness temperature of FY-2E satellite on 31 March 2014

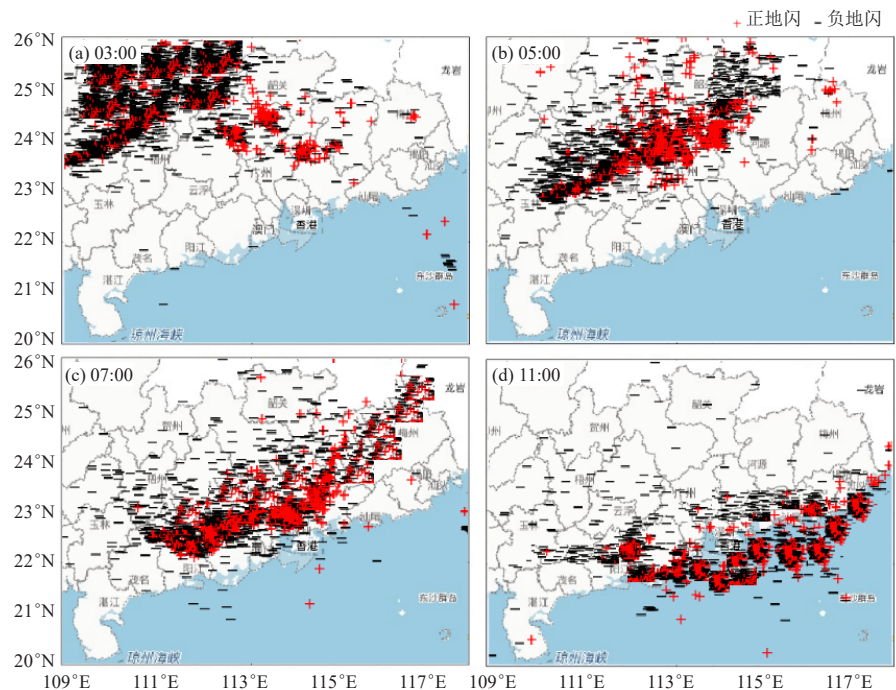


图5 2014年3月31日广东地区地闪活动空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of lightning activity in Guangdong on 31 March 2014

( $u_1 - u_0$ )、( $v_1 - v_0$ )分别表征某一高度风的分量以及近地面风的分量,本文近地面风取1000 hPa处风的分量。

由此得到30日19时、31日07时及19时环境风的垂直风切变曲线(图6c),由图可知,在700 hPa以下:飊线初期发展阶段,中低空垂直风切变不

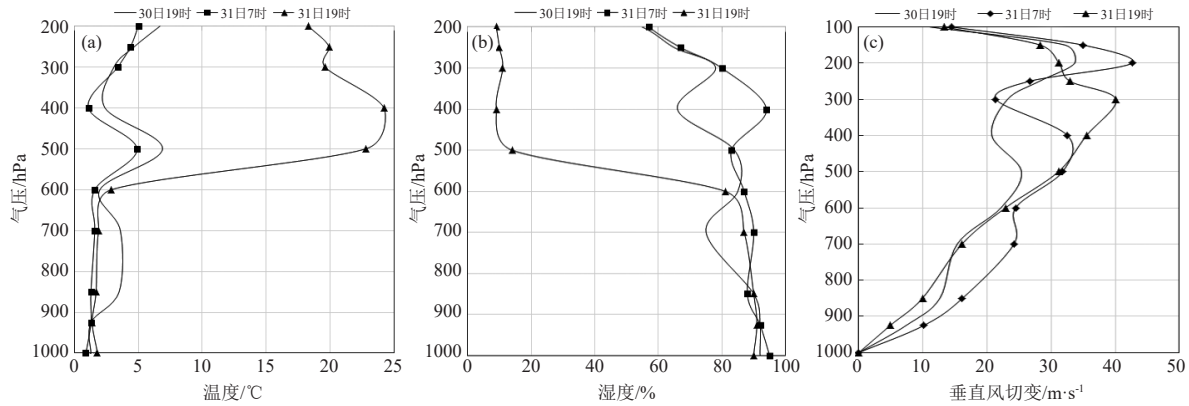


图6 2014年3月30—31日东源站探空站温度露点差(a)、湿度(b)、垂直风切变(c)垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of temperature and dew point difference (a), humidity (b), vertical wind shear (c) of Dongyuan station from 30 to 31 March 2014

断加强, 30日19时850 hPa相对地面垂直风切变为12.6 m/s; 飊线的旺盛发展阶段(31日07时)垂直风切变最强, 850 hPa相对地面垂直风切变为16.1 m/s; 飊线减弱消亡阶段, 垂直风切变明显减弱, 31日19时850 hPa垂直风切变仅为9.9 m/s。

综上所述, 飊线过程对流层层结不稳定加之中低层强的垂直风切变, 有利于水汽上升, 形成旺盛的对流活动, 进而发生剧烈的闪电活动。

#### 4 结论

本文利用广东的地闪定位资料、天气雷达资料、卫星资料以及探空资料, 对2014年3月31日广东的一次飊线过程的地闪活动进行了分析, 结果表明:

1) 飊线发展初期, 地闪活动快速增加; 在旺盛阶段, 地闪频数维持较高水平; 减弱阶段, 地闪活动明显减少, 在整个飊线发展过程中, 负地闪活动占主导地位, 正地闪比峰值落后于地闪频数峰值约1 h出现;

2) 飊线过程单位面积内92.8%的地闪活动发生在组合反射率大于40 dBz的回波区, 其中组合反射率大于60 dBz的回波区地闪活动最为活跃; 飊线旺盛阶段, 在雷达图上表现出明显“弓形回波”、速度模糊以及明显的速度辐合等强对流天气特征。

3) TBB亮温 $\leq 220$  K区域与闪电活动的密集区域有很好的对应关系; 地闪活动活跃期通常伴有明显的不稳定层结特性, 湿度垂直分布呈现出“上干下湿”型和“湿层深厚”型两个阶段; 飊线的旺盛发展阶段中低空有强的垂直风切变。

本文对飊线过程地闪活动与不同尺度气象资料的相关分析, 基于有限的资料分析得出, 具有一定的

局限性, 有待于今后采集更多的个例做深入的分析研究。

#### 参考文献

- [1] 郟秀书, 张其林, 袁铁, 等. 雷电物理学. 北京: 科学出版社, 2013: 192-196.
- [2] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 等. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2011: 411-416.
- [3] 赖悦, 张其林, 陈洪滨, 等. 深圳一次强飊线过程的闪电频数与天气雷达回波关系分析. 热带气象学报, 2015, 31(4): 549-558.
- [4] 尹丽云, 张杰, 张腾飞, 等. 低纬高原一次飊线过程的地闪演变特征分析. 高原气象, 2012, 31(4): 1100-1109.
- [5] 缪子青, 何宏让, 张云, 等. 一次飊线过程雷达回波特征及环境条件分析. 气象科学, 2016, 36(1): 71-79.
- [6] 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 一次强飊线内强降水超级单体风暴的多普勒雷达分析. 气象学报, 2008, 66(4): 621-636.
- [7] 牟容, 余君, 张亚萍, 等. 一次飊线过程的雷达回波分析及其反演风场研究. 气象科学, 2012, 32(2): 153-159.
- [8] 丁治英, 夏良, 高松, 等. 一次飊线过程中雷达回波的组织结构变化及成因分析. 热带气象学报, 2017, 33(5): 323-333.
- [9] 曹倩, 张述文, 曹帮军, 等. 超强不稳定和弱切变环境下一次飊线过程的雷达资料同化与分析. 热带气象学报, 2016, 32(5): 645-655.
- [10] 刁秀广, 孟宪贵, 万明波, 等. 源于飊线前期和强降雨带后期的弓形回波雷达产品特征及预警. 高原气象, 2015, 34(5): 1486-1494.
- [11] 段鹤, 严华生, 王晓君, 等. 滇南飊线的发生环境及其多普勒雷达回波特征. 热带气象学报, 2012, 28(1): 68-76.
- [12] 刘娟, 周昌云, 曹乃和, 等. 如皋一次罕见的飊线天气过程. 气象科学, 2010, 30(4): 564-568.
- [13] 李哲, 李国翠, 刘黎平, 等. 飊线优化识别及雷暴大风分析. 高原气象, 2017, 36(3): 801-810.
- [14] 李娜, 冉令坤, 高守亭. 华东地区一次飊线过程的数值模拟与诊断分析. 大气科学, 2013, 37(3): 595-608.
- [15] Cetrone J, Houze Jr R A. Leading and trailing anvil clouds of west African squall lines. Journal of the Atmospheric Sciences, 2011, 68(5): 1114-1123.
- [16] Newton C W. Severe convective storms. Advances in Geophysics, 1967, 12: 257-308.
- [17] Feng G, Qie X, Wang J, et al. Lightning and Doppler radar observations of a squall line system. Atmospheric Research, 2009, 91(2-4): 466-478.
- [18] 张文娟. 热带气旋闪电活动特征及其与气旋特性演变的关系研究. 北京: 中国科学院大学, 2013.

# 基于积分回归的花生产量气候影响因子研究

彭丽英<sup>1</sup> 麦宗鉴<sup>1</sup> 王华<sup>2</sup> 武君<sup>1</sup> 黎坚<sup>1</sup> 李英<sup>3</sup>

(1 茂名市气象局, 茂名 525000; 2 广东省气候中心, 广州 510080; 3 化州市气象局, 化州 525100)

**摘要:** 采用正交多项式法对茂名化州市春花生实际产量系列进行模拟, 分离出时间趋势产量和气候产量项, 用春花生平均气候产量与花生生育期各生物时段的平均气温、日照时数、降水量进行积分回归分析。得出结论: 平均气温在播种前期、荚果成熟期对春花生产量成正效应, 尤其是在6月正效应显著; 平均气温在幼苗期、开花结荚期对春花生产量成负效应。日照时数在播种前期、荚果成熟期对春花生产量成正效应, 特别是在2月上旬正效应显著; 日照时数在幼苗期、开花结荚期前期对春花生产量成负效应。降水量在开花结荚期后期对春花生产量成负效应。

**关键词:** 积分回归, 春花生, 产量, 气候影响因子, 化州市

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.008

## Study on Climate Influencing Factors of Peanut Yield Based on Integral Regression

Peng Liying<sup>1</sup>, Mai Zongjian<sup>1</sup>, Wang Hua<sup>2</sup>, Wu Jun<sup>1</sup>, Li Jian<sup>1</sup>, Li Ying<sup>2</sup>

(1 Maoming Meteorological Bureau, Maoming 525000 2 Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou 525100

3 Huazhou Meteorological Bureau, Huazhou 525100)

**Abstract:** Using orthogonal polynomials to simulate the actual production series of spring peanut in Huazhou, Maoming. Separate time trend yield and climate yield. An integral regression analysis is made between the average climate yield of spring peanut and average temperature, sunshine hours and precipitation in each biological period of peanut growth period. And we come to the conclusions: The average temperature has a positive effect on spring peanut production in the early stage of sowing and the mature stage of pods, especially in June. It has a negative effect in seeding stage, flowering and podding stage. The positive effect of sunshine hours is obvious in the first ten days of February. And it has negative effect in seeding stage, the early stage of flowering and pod setting. The negative effect of precipitation in the late stage of flowering and pod setting.

**Keywords:** integral regression, spring peanut, yield, climate influencing factors, Huazhou

### 0 前言

茂名市位于我国大陆南端, 地处北热带和南亚热带过渡区; 天气复杂, 灾害频发, 也是气候变化的敏感区和农业生态脆弱区。花生是我国主要的油料经济作物之一, 也是茂名市当地重要的油料来源和经济作物。目前国内有很多对于农作物气候条件分析的研究<sup>[1-3]</sup>, 主要集中在水稻、小麦、棉花等主要的粮食以及经济作物方面; 对于花生的研究也有一些<sup>[4-6]</sup>。关于产量预报的常用方法有多元线性模拟预报方程<sup>[7]</sup>、途径分析方法<sup>[8]</sup>、作物丰歉指数、气候适宜指数<sup>[9]</sup>, 以及基于积分回归来研究作物产量气候影响因子<sup>[10-12]</sup>等。本文利用茂名化州市国家气象站1982—2012年气象资料和化州市气象局春花生农气观测资料, 运用积分回归方法研究茂名化州市春花生产量的气候影响因子。

### 1 春花生产量的正交多项式分析

不同产量模拟的方法, 可能得出的气象产量差别很大<sup>[13]</sup>。本文采用三次曲线拟合和5点滑动平均得到花生产量趋势, 再对比2013年和2014年的模拟结果, 得到两个模型的模拟结果差别不大; 但在分离花生气象产量的方法中, 三次曲线拟合法分析得到的趋势产量更符合花生产值规律<sup>[14]</sup>。利用正交多项式法对茂名化州市1982—2012年共29年(1984、1985年为缺测)的春花生产量资料进行处理, 得出春花生产量拟合方程(三阶多项式), 如图1所示。由模拟结果可以看出, 春花生产量变化趋势是随着时间的增加, 趋势产量增加得越来越慢。

从历年的实际产量中分离出趋势产量后, 按照 $Y=YT+YW+YS$ , 进行分解。式中:  $Y$ 为实际产量,  $YT$ 为趋势产量,  $YS$ 为随机产量, 可忽略不计, 故即可求出气象产量 $YW$ 。

气象产量受气候条件的影响, 波动大。利用计算

收稿日期: 2020年2月23日; 修回日期: 2020年11月27日  
第一作者: 彭丽英(1979—), Email: 279387528@qq.com  
资助信息: 茂名市气象局气象科学技术研究项目(201503)

出的春花生气象产量可以得到花生气象产量的波动范围和最大正负波动量，即极大值为 $95.62 \text{ kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ ，极小值为 $-108.66 \text{ kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ ，极差达 $204.28 \text{ kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ 。该结果表明：化州地区春花生极差超过 $200 \text{ kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ ，产量的风险较大，即春花生的生产受自然灾害的影响比较显著。

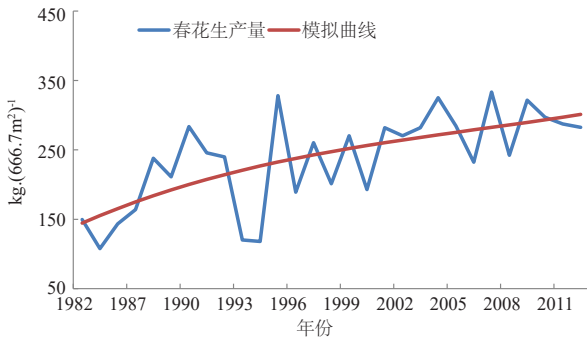


图1 春花生产量的模拟曲线和实际曲线 (单位:  $\text{kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ )  
Fig. 1 The analog curve and actual curve of spring peanut yield (unit:  $\text{kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ )

## 2 气候因子对花生产量的影响评估

由于在花生生长发育的过程中，水分、温度和日照条件是重要因素；积分回归法生物学意义明确，预报效果较好，已成为一种新的作物产量动态预报方法<sup>[15]</sup>。

### 2.1 基本原理和方法

由积分回归原理<sup>[16]</sup>可知，假设作物产量为因变量 $Y$ ，影响因素如温度、降水量、日照时数等气象要素为自变量。将作物整个生育期间分为若干个时段，把某一时段、某一气象要素值作为一个自变量。则可得多元线性回归方程的积分回归形式：

$$Y = C + \alpha_0 \rho_0 + \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + \alpha_3 \rho_3 + \alpha_4 \rho_4 + \alpha_5 \rho_5, \quad (1)$$

式中： $\rho_j = \sum_{t=1}^n \phi_j(t) X(t)$ ， $\phi_j(t)$ 可从正交多项式表查到。由式(1)可清楚地看到，对于不同气象要素的时间分布状况，存在不同的一组值与之对应。显然，同一气象要素各年的时间分布状况不完全一致，因此各年的时间分布值不同，与之对应一组 $\rho_j$ 值，从而 $Y$ 值不同。可见，式(1)是以产量 $Y$ 为因变量，以某一气象要素的正交时间分布 $\rho_j$ 为自变量的线性回归方程。

本研究利用茂名化州市1982—2012年春花生产量观测数据和积分回归分析方法，分析花生全生育期平均温度、日照时数和降水量的时间分布对其产量的影响。由于社会经济和农业生产技术的逐渐提高和改善，花生产量趋于逐年上升，因此需要将实际产量资料处理成产量的趋势离差（即气象产量）。分别计算春花生气象产量与平均气温、日照时数、降水量的回

归系数，得出历年 $\rho_j$ 值。计算(1)式中春花生气象产量与平均气温、日照时数和降水量回归系数 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 值如表1。

表1 春花生气象产量与平均气温、日照时数和降水量回归系数  
Table 1 The regression coefficient of spring peanut meteorological yield and average temperature, sunshine hours and precipitation

	降水量/mm	日照时数/h	平均气温/°C
C	45.00973	21.91268	-112.2891
$\alpha_0$	-0.005886	0.072864	-4.468609
$\alpha_1$	0.002496	0.040618	0.136364
$\alpha_2$	0.003791	0.004397	0.061511
$\alpha_3$	0.000014	-0.006577	-0.07907
$\alpha_4$	0.000212	0.001040	-0.026017
$\alpha_5$	-0.000223	-0.000155	-0.006674

### 2.2 计算积分回归的 $\alpha(t)$

将计算的 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 代入下式中，即可得到春花生生育期从2月下旬—7月上旬（共14旬）的平均气温、日照时数和降水量的各 $\alpha(t)$ 值。

$$\alpha(t) = \alpha_0 \phi_0(t) + \alpha_1 \phi_1(t) + \alpha_2 \phi_2(t) + \alpha_3 \phi_3(t) + \alpha_4 \phi_4(t) + \alpha_5 \phi_5(t), \quad (2)$$

其中： $\alpha(t)$ 表示旬平均气温（或日照时数或降水量）升降 $1^\circ\text{C}$ （1 h或1 mm）使春花生产量变化升值。由此可见， $\alpha(t)$ 是平均气温（或日照时数或降水量）的时间分布对春花生产量的效应，它在各时段不同。

#### (1) 平均气温的积分回归 $\alpha(t)$

从各时段 $\alpha(t)$ 值点绘图（图2）可见，平均气温对春花生正效应有两个时期：播种前期（2月上旬）和荚果成熟期（5月下旬—6月下旬），尤其是在6月正效应显著。平均气温在幼苗期（3月中旬前后）、开花结荚期（4月中旬—下旬）对春花生产量成负效应。

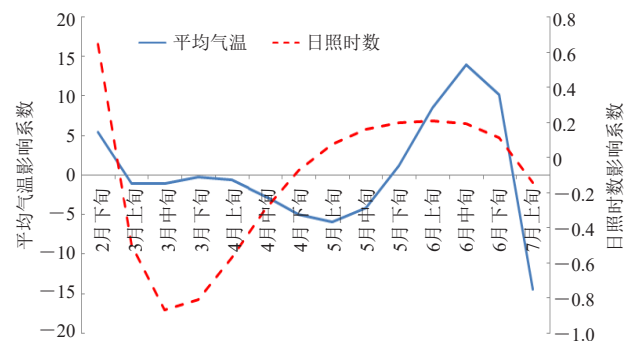


图2 平均气温和日照时数对春花生产量的效应 (单位:  $\text{kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ )

Fig. 2 The effect of average temperature and sunshine hours on spring peanut yield (unit:  $\text{kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ )

#### (2) 日照时数的积分回归 $\alpha(t)$

由图2可见，日照时数在播种前期（2月上旬）、

荚果成熟期（5月上旬—6月下旬）对春花生产量成正效应，特别是在2月上旬正效应很明显。日照时数在幼苗期（3月上旬—4月上旬）、开花结荚期前期（4月中旬—下旬）对春花生产量成负效应。

### （3）降水量的积分回归 $\alpha(t)$

由图3可见，降水量在播种前期（2月上旬）、分枝期（4月上旬—中旬）、荚果成熟期（6月中旬—下旬）对春花生产量成正效应。降水量在播种后期到幼苗期（3月上旬—下旬）、开花结荚期后期（5月上旬—6月上旬）对春花生产量成负效应。

### （4）积分回归结果的合理性分析

在成熟期（6月）平均气温增多，热量条件充足，花生产量增产明显。在幼苗期（3月上旬—4月上旬）日照时数负效应较明显，3月化州每日平均日照时数为2.3 h/d，远小于每日适宜日照时数（8 h/d），不利于幼苗生长，对花生产量有抑制作用。3月化州平均降水量为72 mm，恰逢降水量较多期，会形成烂苗等，故对花生生长有抑制作用。因此，如果出现低温阴雨天气，需要推迟播种，例如2008年出现低温阴雨天气，推迟到3月19日才播种；或者播种后容易引起种子霉烂，造成出苗率低，从而引起花生产量下降，例如1990年出现低温阴雨天气，播种期是2月8日，但出苗期是3月2日，播种期至出苗期长达22 d。在开花结荚期后期（5月上旬—6月上旬）降水量增多，洪涝发生，土壤积水，造成花生荚果成熟慢、秕果多，已成熟的荚果容易掉荚发芽，且常引起锈病大发生，导致产量下降。这和春花生的生长特点及其与气候条件关系<sup>[17]</sup>相符合。

另外，本文运用了直线回归法、3点滑动和5点滑动平均法来求出趋势产量，再分离出气象产量来做积分回归。其中，直线回归法得出的结果与上述基本一致；3点滑动和5点滑动平均法得出的平均气温和日照时数对花生产量的积分回归基本一致，但是得出的降水量对花生产量的积分回归（图3）差别较大。由图3可见，在3月降水量对春花生产量有明显正效应，这与春花生的生长特性不相符。因此，运用积分回归法来研究春花生产量的气候影响因子时，在分离花生气象产量的方法中，我们运用三次曲线拟合法和直线回归法得出的结论都是可靠的。

## 3 结论

1) 春花生产量变化趋势是随着时间的增加，趋势产量增加得越来越慢。春花生产量极差超过  $200 \text{ kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ ，化州地区种植春花生的风险较大，化州春花生的生产受自然灾害影响较为显著。

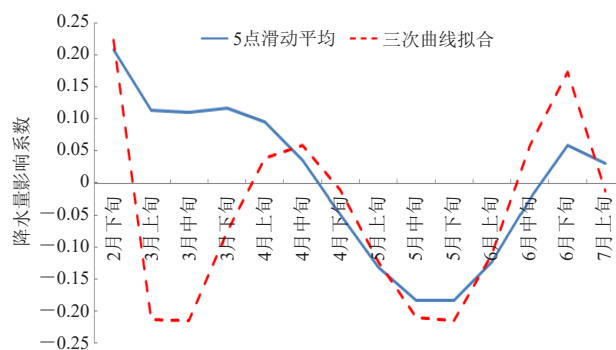


图3 降水量对三次曲线拟合和5点滑动平均的春花生产量的效应 (单位:  $\text{kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ )

Fig. 3 The effect of precipitation on cubic curve fitting and five-point moving average spring peanut yield (unit:  $\text{kg} \cdot (666.7 \text{ m}^2)^{-1}$ )

2) 分析平均气温、日照时数和降水量对化州春花生产量的影响评估。平均气温在播种前期、荚果成熟期对春花生产量成正效应，尤其是在6月正效应显著；平均温度在幼苗期、开花结荚期对春花生产量成负效应。日照时数在播种前期、荚果成熟期对春花生产量成正效应，特别是在2月上旬正效应显著；日照时数在幼苗期、开花结荚期前期对春花生产量成负效应。降水量在开花结荚期后期对春花生产量成负效应。

3) 在成熟期（6月）平均气温增多，热量条件充足，花生产量增产明显。在幼苗期（3月上旬—4月上旬）日照时数负效应较明显，3月化州每日平均日照时数远小于每日适宜日照时数，不利于幼苗生长，对花生产量有抑制作用。3月份化州恰逢降水量较多期，会形成烂苗等，故对花生生长有抑制作用。因此，如果出现低温阴雨天气，需要推迟播种，或者播种后容易引起种子霉烂，造成出苗率低，从而引起花生产量下降；在开花结荚期后期（5月上旬—6月上旬）降水量增多，洪涝发生，土壤积水，造成花生荚果成熟慢、秕果多，已成熟的荚果容易掉荚发芽，且常引起锈病大发生，导致产量下降。这和春花生的生长特点及其与气候条件关系相符合。

4) 本文首先运用了直线回归法、3点滑动和5点滑动平均法计算花生趋势产量，其次分离气象产量进行积分回归。其中，直线回归法得出的结果与正交多项式法基本一致；3点滑动和5点滑动平均法得出的平均气温和日照时数对花生产量的积分回归基本一致，但是降水量对花生产量的积分回归差别较大，与花生生长的特性不相符。因此，运用积分回归法来研究春花生产量的气候影响因子时，在分离花生气象产量的

(下转75页)

# 娄底市生态旅游气候资源分析

邓见英<sup>1</sup> 曾海鹏<sup>2</sup> 黄卓禹<sup>1</sup> 吴艳林<sup>1</sup> 刘臻婧<sup>3</sup>

(1 娄底市气象局, 娄底 417000; 2 冷水江市气象局, 娄底 417500; 3 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

**摘要:** 利用娄底市境内22个主要旅游景点的国家气象观测及加密自动站资料(2016—2019年), 计算人体舒适度, 开展旅游适宜性分析。结果表明: 娄底市具有适宜旅游的天气多, 特殊气候条件下自然景观独具特色, 垂直地域差异下局地小气候明显。可将旅游气候区域划分为春秋季节休闲运动型、夏季避暑型、冬季观赏型等。大部分地区春秋季节温暖舒适, 是休闲生态旅游的黄金时段; 夏季中高山地以上林区较适宜开展避暑旅游; 冬季是旅游淡季, 高山冬雪, 雨凇, 雾凇等独具奇特景观成节假日观赏亮点。但娄底市气象灾害种类较多, 在选择旅游景区、时间时, 需要注意避免灾害天气带来的不利影响。

**关键词:** 旅游气象, 气候资源, 气候舒适度, 等级划分

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.009

## Analysis of Climate Resources of Ecotourism in Loudi City

Deng Jianying<sup>1</sup>, Zeng Haipeng<sup>2</sup>, Huang Zhuoyu<sup>1</sup>, Wu Yanlin<sup>1</sup>, Liu Zhenjing<sup>3</sup>

(1 Loudi Meteorological Bureau, Loudi 417000 2 Leng Shuijiang Meteorological Bureau, Loudi 417500

3 School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

**Abstract:** Using the national meteorological observations and encrypted automatic station data (2016–2019) of 22 major tourist attractions in Loudi, the human body comfort is calculated, and the tourism suitability analysis is carried out. The results show that Loudi has many days which weather is suitable for tourism, natural landscapes are unique under special climatic conditions, and local microclimates are obvious under vertical regional differences. The tourism climate area can be divided into spring and autumn leisure sports type, summer avoidance type, winter viewing type, etc. Spring and autumn are warm and comfortable in most areas, which are the golden seasons for leisure eco-tourism. Summer is more suitable for carrying out summer tourism in the forest areas above the middle mountains and high mountains. Winter is the off-season for tourism, alpine winter snow, rain, fog and other unique landscapes become holiday highlights. However, there are many types of meteorological disasters in Loudi. When choosing tourist attractions and time, you need to pay attention to avoid the adverse effects of disaster weather.

**Keywords:** tourism weather, climate resources, climate comfort, classification

### 0 引言

娄底市辖娄星区, 涟源市, 冷水江市, 新化县, 双峰县, 东西宽度为160 km, 南北长度为102 km, 总面积为8117 km<sup>2</sup>, 位于云贵高原向江浙丘陵递降的过渡带, 介于27°12'31"—28°14'27"N, 110°45'40"—112°31'07"E。境内有山地、丘陵、冈地、平原四种地形, 呈山地成片、冈丘交错成串, 冈地如波、平地伸展特点, 以丘陵为主, 整个地势西北高、东南低, 呈阶梯状倾斜, 平均海拔为170 m。

特殊的自然地理环境和气候条件下, 域内自然风光无限。市内有清代名臣曾国藩故居等人文景观, 大熊山、龙山2个国家级森林公园以及梅山龙宫、紫鹊

界梯田、波月洞和湄江国家地质公园等各类风景名胜精品旅游点70多处, 是中国旅游大市。2018年全市旅游接待总人数4000万人次, 同比增长22.2%, 实现旅游总收入300亿元, 同比增长19%; 2019年旅游接待人数和总收入分别增长34%, 28%。

气候与旅游有着密切关系, 开展娄底市生态旅游气候资源区划分析, 充分利用独特气候资源优势, 确定各旅游景点的性质、特征和地位, 为制定与实施中长期旅游发展战略提供气候依据, 对促进旅游业发展具有积极的意义。

### 1 资料来源和计算方法

#### 1.1 资料来源

选取娄底市辖区内22个主要旅游景点, 资料来源于5个国家气象站观测资料及17个自动气象站观测资料(2016—2019年)。娄底(仙女寨)、新化

收稿日期: 2020年5月19日; 修回日期: 2020年8月19日  
第一作者: 邓见英(1972—), Email: djydjy@21cn.com  
资助信息: 湖南省气象局科研课题项目(XQKJ19B017)

(狮子山)、双峰(蔡和森纪念馆)、冷水江(波月洞)、涟源(杨家滩水利风景区)5个景点设有国家气象观测站,大桥村(渠江源)、矿山(世界锑都锡矿山)2个景点设有自动气象观测站(密度小于 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ ),观测项目有 $T$ 、 $U$ 、 $V$ ;龙山(国家森林公园)、荷叶(曾国藩故居、荷花基地)、双江(洪家山森林公园)、湄江(湄江风景区)、桥头河(博盛博盛生态体验园)、杏子(水府庙)6个景点设有自动气象观测站,观测项目有 $T$ 、 $V$ ,但缺少 $U$ ;双林(古桃园)、九峰山(森林公园)、古台山(林场)、水车(紫鹊界梯田)、农家乐(大熊山国家森林公园)、油溪(梅山龙宫)、甘棠(甘棠芍药花基地)、归古(归古旅游景点)、锁石(锁石油菜花基地)9个景点设有自动气象观测站,观测项目有 $T$ ,但缺少 $U$ 、 $V$ 资料。故采用ERA5  $0.1^\circ\times 0.1^\circ$ 全球格点 $10\text{ m}$ 的 $U$ 、 $V$ 数据,利用格点数据对15个区域站(景)点位置进行插值 $U$ 、 $V$ 数据处理。

## 1.2 计算方法

采用湖南省地方标准,娄底各台站舒适度指数计算公式如下:

$$K = 1.8T - 0.55 \times (1.8T - 26) \times (1 - RH) - 3.2V^{\frac{1}{2}} + 32,$$

其中: $K$ 是人体舒适度指数, $T$ 是平均气温, $RH$ 是平均相对湿度, $V$ 是平均风速,将逐日平均气温、日平均相对湿度、日平均风速直接代入人体舒适度计算公式(部分区域自动站缺少相对湿度资料或风数据,用6个站(景)实测温度和风+模式模拟湿度资料以及9个站(景)实测温度+模式模拟湿度和风数据),计算出辖区22个主要旅游景点逐日、月舒适度指数值。

## 1.3 等级划分

考虑了气温、湿度、风等气象因子对人体的综合作用,一般人群对外界气象环境感受到舒适与否及其程度<sup>[1-2]</sup>,共分9级(表1)开展旅游适宜性分析。

# 2 娄底市主要气候旅游资源特点

## 2.1 主要气候旅游资源特点

娄底市地处湘中腹地,属亚热带季风湿润气候区,基本特征为气候温暖,四季分明,风速较小,气候宜人,春秋季旅游舒适期长。山区面积为 $4013\text{ km}^2$ ,占总面积的49.4%,山地气候占有重要地位,海拔高度相差悬殊,决定了光,热,水等气候要素的重新分配<sup>[3-5]</sup>。

海拔为 $300\text{ m}$ 以下的山谷盆地及溪河沿岸平原,平地面积为 $874\text{ km}^2$ ,占全市总面积的10.8%,主要分布在涟源市杨家滩,新化县横阳、冷水江市禾青、

表1 人体舒适度分级描述及适宜旅游的程度  
Table 1 The description of human comfort level and the degree of travel suitability

级别	指数范围	体感	适宜旅游的程度
4级	>85	极热,极不舒适	不适宜旅游活动
3级	81~85	热,很不舒适	可适当安排旅游活动
2级	76~80	暖,不舒适	基本适宜旅游活动
1级	71~75	温暖,较舒适	适宜旅游活动
0级	61~70	舒适	非常适宜旅游活动
-1级	51~60	凉爽,较舒适	适宜旅游活动
-2级	41~50	凉,不舒适	基本适宜旅游活动
-3级	20~40	冷,很不舒适	可适当安排旅游活动
-4级	<20	极冷,极不舒适	不适宜旅游活动

娄星区杉山、双峰县梓门等;丘岗面积(含丘陵和岗地)占全市总面积的36.3%,主要分布在新化县中部、涟源东南部、娄底市北部以及双峰县北部和南部。年平均气温 $17.6$ (冷水江)~ $18.2\text{ }^\circ\text{C}$ (双峰),年平均降水量 $1344.8$ (双峰)~ $1581.3\text{ mm}$ (新化),年平均相对湿度 $77\%$ (新化)~ $80\%$ (涟源),年平均风速 $1.2$ (涟源)~ $1.9\text{ m/s}$ (冷水江),出现日极端最高大于 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温天气为 $33$ (冷水江)~ $45\text{ d}$ (双峰)。

境内归古乡村旅游度假区,是集山水体育运动,生态农业观光,特色乡村体验,主题乐园,休闲度假等旅游产业于一体的综合性旅游度假区;甘棠芍药花文化旅游为湖南省旅游特色名镇;梅山龙宫、波月洞的溶洞,洞中奇形怪状钟乳石悬垂,洞外风光迤邐,或瀑布飞泻,或奇峰峭壁,形成独具特色自然景观。

在海拔为 $300\sim 500\text{ m}$ 的低山丘陵山地,年平均气温为 $15.9\sim 17.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,最冷月平均气温为 $3.4\sim 4.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。境内湄江国家地质公园位于涟源市西北部,总面积为 $128\text{ km}^2$ ,拥有3处国家级地质遗迹,20处省级地质遗迹,其岩溶地质遗迹规模、种类、内涵均具有全国乃至世界性意义;洪家山森林公园由120多座山头组成洪家大山,林木苍翠,空气清新,景致独特,集山,水,洞,林和人文景观于一体,另有险幽奇深的圣仙洞,保存完好的华池洞,是春秋季休闲度假,旅游观光好去处。

在海拔为 $500\sim 1500\text{ m}$ 的中高山林区,境内山脉纵横,巍巍大熊山屹立西部边陲,绵亘百余里,主峰九龙池为全区之巅;中部龙山雄踞,峰回雾锁,巍为壮观;东南九峰山俊拔挺秀,林壑优美,三山有2个国家级(新化大熊山和涟源龙山)和1个省级森林公园。年平均气温为 $13.4\sim 15.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,最冷月平均气温为 $1.9\sim 4.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,年降水量为 $1700.0\sim 2000.0\text{ mm}$ 左右。冬季严寒期长,极端最低气温可达 $-10.0\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,小

于0℃天数为20 d左右,大于35℃高温天气少。冬季严寒,积雪冰冻多,夏季少酷热,春末夏初多雨,山地云雾多湿度大,气候凉棚效益显著,具有明显的春迟,夏短,秋早,冬长的山地气候特点,适宜旅游天气较多。

境内立体气候明显,特殊的地形地貌和梯田,形成了千姿百态的气象景观,尤以云海,雾海,冬雪、雾凇、雨凇和日出,晚霞极为壮观;紫鹊界梯田观赏季节在秋季,是一年中最佳的观赏季节,正好是丰收季节,金黄色梯田壮观美丽;大熊山独特的地理气候条件,造就大熊山的“十里杜鹃”,是湖南境内著名的踏青赏花圣地,每年4月底—5月初,当各处杜鹃花已谢,大熊山杜鹃赫然开在峰峦上伟岸处,一簇一簇,浩浩荡荡,激情如火,五一长假是赏花最佳日期。高山山顶常年雾凇,雨凇日数较多,一般从11月一次年3月初均可出现,尤以12月一次年2月出现次数最多,天气变化多姿多彩,由雾凇、雨凇组成的冰花,五彩缤纷,千姿百态,光彩照人,游人仿佛步入大自然的艺术殿堂,其乐无穷。

在海拔为1600 m以上的高寒山区冬季长而寒冷,所占面积相对偏少,不是人类主要聚居活动地。

## 2.2 娄底市主要旅游气象灾害发生特征

根据娄底市历年气候资料分析,影响旅游主要气象灾害有暴雨、低温雨雪冰冻、雷暴、高温、大风、大雾等,对交通安全出行影响较大且易破坏旅游景观。

### (1) 暴雨

年平均暴雨日为3.5(涟源)~3.9 d(新化),最长达10 d/a,以4—6月最为集中(占全年60%以上);最大日降水达290.2 mm(1998年5月22日,娄星区)。

### (2) 雷暴、大风、冰雹

年平均雷暴日为39.7(娄星区)~52.3 d(新化),主要在3—9月,尤以4、7、8月最多,最长达19 d/m(新化)。年平均大风日为1.1(涟源)~3.6 d(冷水江),最长达32 d/a。冰雹灾害相对较少,年平均为1~2 d,多发生在4—8月。

### (3) 低温雨雪冰冻

年平均降雪日在11.7(涟源)~15.8 d(新化),最大积雪深度为290 mm(1989年1月19日,新化)。年平均雨凇日数在1.6(涟源)~4 d(冷水江),多出现在12月一次年2月,北部山区多于东部;2008年1月13日—2月4日历时23 d低温冰冻灾害,过程气温、冰冻、严寒期的多项评估指标均创娄底历史极值。

### (4) 高温

年平均高温日数在19.7(冷水江)~26.8 d(双

峰),主要集中在7—8月,东南部多于西部,最长达59 d/a(2013年,双峰),最长连续高温日达36 d(2013年7月6日—8月10日,双峰),极端最高气温41.2℃(2003年8月2日,娄星区)。

### (5) 雾霾

年平均大雾日在14.6(娄星区)~35.4 d(新化),年平均霾日在17.9(双峰)~67.0 d(新化),新化为雾霾多发区,2008年达214 d,冬半年明显多于夏半年。

由于特殊地形地貌,局地山谷风热对流作用,有丰沛水汽蒸发,在午后常因对流发展旺盛,气流沿山坡上升,在山的南坡常产生局部地区雷降雨等强对流天气,山地基础设施薄弱,救灾能力不足,是大雾、雷电、低温冻害、冰雹以及暴雨山洪地质灾害高风险区。

## 3 娄底市旅游气候舒适度评价分析

从人体舒适度等级划分(表1)可知,当指数范围在51~75(即-1~1级)时,人体普遍感觉舒适,适宜或非常适宜旅游活动。从娄底市各景点人体舒适度指数等级天数表(表2)可知,舒适度指数在-1~1级的天数在194(蔡和森纪念馆)~232 d(古台山,紫鹊界等地),大部分景点适宜旅游天数达200 d以上,基本适宜旅游天数为100 d左右,不适宜天数为29(曾国藩故居)~82 d(矿山)。不同气候区域不适宜旅游(即指数为3、-3级)天数,中山山地以上略多(寒冷日数较多),为61~82 d,低山丘陵山地在50~56 d,其余各地均在30~40 d。

5月和10月的舒适指数(-1~1级)分别在28(湄江)~31 d(仙女寨);24(渠江源)~31 d(曾国藩故居),温度适宜,光照率充足,是本地最适宜旅游季节,加之“五一”“十一”旅游黄金周出游高峰,为旅游旺季。

不同区域最佳旅游时段差异较大,海拔300 m以下低山及沿江平原带在7月和8月天气炎热,35℃以上高温天气较多,舒适指数(-1~1级)小于10 d以下,不舒适(即指数为2、3级)天数分别为19~26 d,16~25 d;12月下旬—2月下旬天气寒冷(即指数为-2、-3级)天数为28~31 d(12月、1月),2月为22 d,不适宜旅游,其他为适宜时段。

中山山地以上林业区在11月下旬一次年3月上旬天气寒冷不适宜旅游,其余时段气候均较舒适,适宜户外旅游。炎夏也有许多避暑胜地,7月和8月的渠江源、龙山、矿山、大熊山、古桃花园、九峰山等地夏季大于35℃以上高温天气少,舒适指数(-1~1级)分别为29~31 d,31 d左右。

表2 2016—2019年娄底市各景点人体舒适度指数等级天数表  
Table 2 Days table of Human Comfort Index of various scenic spots in Loudi during 2016—2019

站(景)点	4级 >85	3级 81~85	2级 76~80	1级 71~75	0级 61~70	-1级 51~60	-2级 41~50	-3级 20~40	-4级 <20	-1~1级	海拔高度/m
古桃花源	0	0	0	43.3	104.3	82.5	73.5	61.5	0.3	230	936
渠江源	0	0	0.8	33.8	106.3	83.3	68	72	1.3	223.3	857
龙山	0	0	3.25	53	90.5	79	72.5	67	0	222.5	710
锡矿山	0	0	1	35.3	92.3	81.8	70.8	82	2.3	209.3	677
九峰山	0	0	3	49.3	98.3	80.8	64.3	68.8	1	228.3	536
古台山	0	0	6	57	93.8	81.5	71.3	55.8	0	232.3	494
紫鹊界	0	0	0	43.3	105.3	82	74	60.5	0.3	230.5	480
大熊山上	0	0	4	55.5	91.8	80.8	70.8	61.3	1.3	228	647
洪家山	0	0.3	30.8	56.3	79.5	74.5	67.3	56.5	0.3	210.3	280
梅山龙宫	0	1.5	41.8	48.5	84	73.75	78	37.8	0	206.3	175
湄江	0	8.8	61	45.3	83	70	75.3	22	0	198.3	262
曾国藩	0	3.3	59.3	47.3	80.8	71	78.5	25.3	0	199	147
博盛	0	0.5	42.3	52.8	80	73.3	66.5	49.8	0.3	206	178
甘棠	0	5.3	51.5	47.8	81.3	70.3	72.5	36.8	0	199.3	147
归古	0	4.8	46	49	80.5	74.5	73.3	37.3	0	204	130
锁石	0	4	45.5	47	80.8	74.8	73.3	40	0	202.5	120
水府庙	0	1.3	44	51	83	74.8	69.8	41.5	0	208.8	92
波月洞	0	0	33.5	51.8	85.5	75.3	72.8	46.5	0	212.5	249.2
狮子山	0	0.3	44.5	50.8	86	72.5	75.3	36	0	209.3	211.9
杨家滩	0	1	51.3	48.8	81.8	71.8	75.5	35.3	0	202.3	165
仙女寨	0	0	40.8	50.8	85.3	73.3	75.3	40	0	209.3	205.8
蔡和森	0	3	60	42.5	81.5	70	72.8	35.5	0	194	100

#### 4 娄底市旅游气候资源区划及评述

根据旅游舒适程度及生理活动关系研究成果,将人体舒适度分为9级<sup>[1]</sup>。并按照适宜旅游月份所在的时段作为旅游适宜度区划主要指标,按照春秋季节闲运动型(3—5月,9—11月)、夏季避暑型(6—8月)、冬季观赏型(12—次年2月),来体现各旅游景点的气候资源特征。娄底是湖南省气象灾害种类多、灾害频发的地区之一,故在选择旅游景区、旅游时间时,需要避防灾害天气影响。

##### 4.1 春秋季节休闲运动型

春秋两季气候宜人,绝大多数景点春季和秋季舒适度指数为-1~1级,适宜开展旅游的日数占全年70%以上(图1),表明娄底市各旅游景点都属于春秋季节休闲运动型,出现时间主要集中在4—5月和9—10月;其中5、9、10月是最为适宜月份。位于海拔500 m以上中山和高山地区(古桃花源、九峰山等),在早春3月和晚秋11月天气较冷,较不适宜旅游活动。

##### 4.2 夏季避暑型

6—8月是一年中最热的季节,九峰山、渠江源、龙山、矿山、大熊山、紫鹊界、古台山和古桃公园的

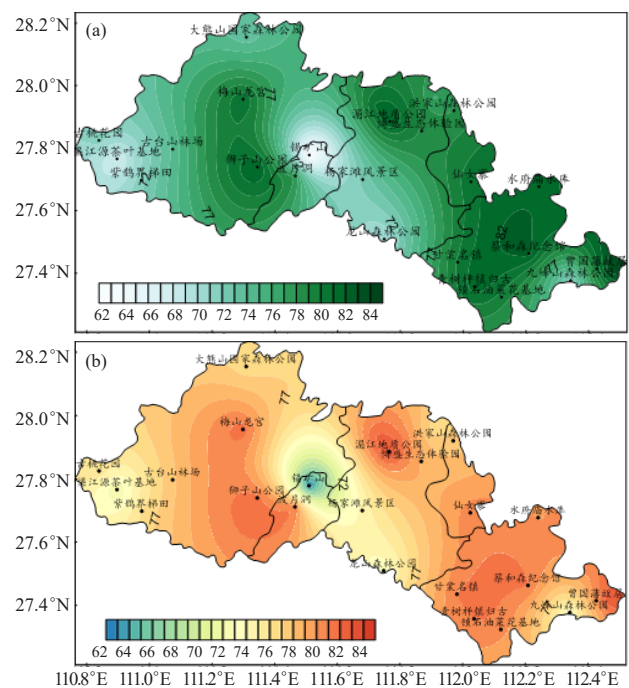


图1 娄底市旅游景点春季(a)、秋季(b)适宜开展旅游日数的百分比(单位:%)

Fig. 1 The percentage of tourism days suitable for the tourist attractions in Loudi City in spring (a) and autumn (b) (unit: %)

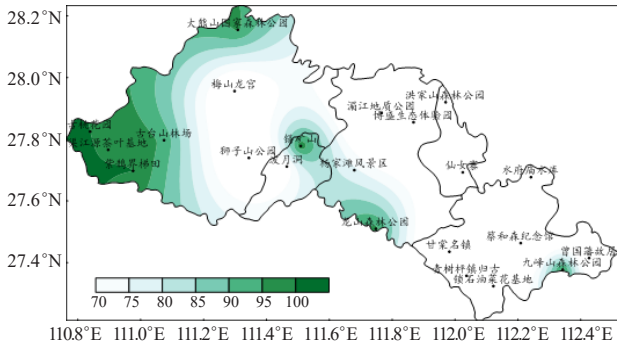


图2 娄底市旅游景点夏季适宜开展旅游日数的百分比 (单位: %)

Fig. 2 The percentage of tourism days suitable for tourism in Loudi City in summer (unit: %)

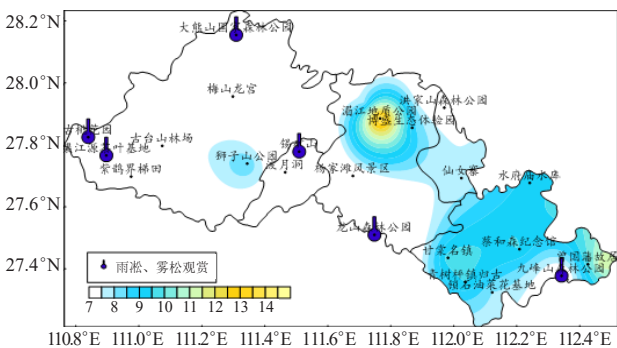


图3 娄底市旅游景点冬季气候分型 (阴影为舒适度指数为-1~1级的日数)

Fig. 3 Winter weather classification of Loudi City tourist attractions

(shaded is the number of days with a comfort index of -1 to 1)

适宜旅游舒适度日数占全季的90%以上, 古桃花源、紫鹊界梯田高达100%, 渠江源、百里龙山及九峰山森林公园也均在95%以上(图2)。即海拔高度在500 m以上的景点, 都较适宜夏季避暑, 适宜到九峰山、紫鹊界等地观日出, 看晚霞、观云海雾海等美丽气象景观, 且各有风趣。而其他地区, 温高风小, 相对比较炎热, 较不适宜开展旅游。

### 4.3 冬季观赏型

冬季是娄底一年中最寒冷的时期, 也是旅游淡季, 各景点适宜旅游时长为3~14 d(图3), 特别是海拔高度在500 m以上的古桃花源、渠江源、锡

矿山、大熊山及龙山国家森林公园, 九峰山森林公园, 冬季寒冷潮湿, 平均气温在4℃左右, 最低气温在-5℃左右, 不适宜旅游, 但在海拔1300~1600 m山顶, 冬雪、雨淞、雾凇景观独具特色。观赏奇特冬景成元旦、元宵节假日旅游观赏亮点, 部分身体素质好的游客可适当安排旅游活动。

海拔位于200 m以下的低山平原地区的曾国藩故居、湄江地质公园、甘棠特色名镇、水府庙水库和青树坪镇归古旅游景点, 气温相对温暖, 即便在严冬季节, 最低气温很少降至0℃以下, 基本适宜开展冬季旅游, 曾国藩和湄江均有4 d较适宜开展旅游, 适合开展时期为2月, 其次是12月, 晚冬气温逐渐上升, 适宜开展旅游日数逐渐增多。

## 5 结论

1) 娄底市各景点舒适度指数在-1~1级天数在194(蔡和森纪念馆)~232(古台山、紫鹊界等地) d, 适宜旅游天数达200 d以上, 基本适宜旅游天数100 d左右, 不适宜天数在29(曾国藩故居)~82 d(矿山)。

2) 娄底市适宜旅游的季节集中在春、夏、秋三季, 5月和10月的舒适指数(-1~1级)分别在28(湄江)~31 d(仙女寨)和24(渠江源)~31 d(曾国藩故居), 温度适宜, 光照率充足, 是最适宜旅游季节。7月和8月的九峰山、渠江源、龙山、矿山、大熊山、古桃花源等中高山地林区夏季 $\geq 35^\circ\text{C}$ 以上的高温天气极少, 舒适指数(-1~1级)分别为29~31 d、31 d, 为本地避暑胜地; 也是冬雪、雨淞、雾凇独特景观区。

3) 娄底市旅游气候等级区划为春秋季节休闲运动型, 夏季避暑型、冬季观赏型区。

### 参考文献

- [1] 胡毅, 朱克云, 江毓忠. 成都及附近地区旅游气候资源研究. 成都信息工程学院学报, 2001, 16(4): 237-242.
- [2] 郭洁, 姜艳, 胡毅, 等. 四川省旅游气候资源分析及区划. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 390-395.
- [3] 肖卫平, 邓见英, 蔡海朝, 等. 湘中山区农业气候资源利用研究. 安徽农业科学, 2011, 39(30): 18824-18826.
- [4] 杨舒琳, 林中鹏, 韩庚. 泉州市盛夏避暑旅游气候资源及区划分析. 农业灾害研究, 2015, 5(12): 27-29, 56.
- [5] 荣裕良, 张霞, 贺千山. 上海佘山国家旅游度假区气象环境条件分析. 气象科技进展, 2018, 8(6): 28-32.

# 三峡水库分流域面雨量预报检验系统研究

周英 袁久坤

(重庆市万州区气象局, 万州 404000)

**摘要:** 基于多种数值预报模式降水产品, 应用编程和文字表格处理工具、OLE自动化控制等方法, 采用距离平方反比格点插值、预报检验、权重平均、等值线分析和色斑图绘制等方法, 将三峡水库汇水流域的面雨量预报经面雨量实况检验, 以权重集合平均的方式形成面雨量预报的制作流程, 编制成三峡水库分流域面雨量预报检验系统, 实现三峡水库分流域面雨量预报产品自动化输出及自动评分检验等功能。系统有助于提高面雨量预报的准确性、客观性、及时性和精细化水平。

**关键词:** 三峡水库, 面雨量预报检验, 插值, 权重平均

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.010

## Study on Area Rainfall Forecasting System of Three Gorges Reservoir by Watershed

Zhou Ying, Yuan Jiukun

(Chongqing Wanzhou Meteorological Service, Wanzhou 404000)

**Abstract:** Precipitation numerical forecast model based on a variety of products, application programming and word form processing tools OLE automation control methods, such as using inverse square lattice interpolation forecasting test of weighted average contour analysis and splash graph method, such as the Three Gorges Reservoir catchment basin surface rainfall forecast by the surface precipitation live test, with the weight set to make the surface precipitation forecast, the average surface rainfall forecast into the points of the three gorges reservoir basin inspection system, implement the points of the Three Gorges Reservoir basin surface rainfall forecast product output and automatic grading test automation, and other functions, improve the precision of surface rainfall forecast objectivity, timeliness and the level of refinement.

**Keywords:** Three Gorges area, rainfall prediction verification, interpolate method, weight average

### 0 引言

三峡水库-葛洲坝梯级电站扼控我国长江“黄金水道”。库区上游岷沱江、嘉陵江、乌江、川江、金沙江等流域以及水库下游地区, 频繁出现暴雨洪涝、高温干旱、滑坡泥石流等气象水文和地质灾害。保障三峡水库-葛洲坝梯级电站的科学、安全运行, 充分发挥三峡工程防洪、蓄水、抗旱、发电、通航、水资源调度等功能的综合效益有着十分重要的意义。

面雨量是指某一特定区域或流域的平均降水状况。开展面雨量计算和面雨量预报能更好地为组织防汛抗洪以及水库运行等决策提供重要的依据, 又可为水利部门的洪水预报提供非常重要的参数, 是气象与水利部门加强合作为防灾减灾和经济建设服务的一个

重要手段。1998年长江流域发生历史上罕见的洪涝灾害之后, 中国气象局加强了有关面雨量业务和服务工作。重庆、湖北等地气象部门也针对本地服务需求开展了面雨量预报技术的研究<sup>[1-5]</sup>, 徐晶等<sup>[6]</sup>提出了七大江河流域面雨量计算方法及应用, 但目前尚无可进行业务推广应用的流域面雨量预报制作与检验评分系统。

本文主要研究三峡库区内主要汇水流域基于数值预报模式降水产品, 研发基于数值预报降水产品的三峡水库分流域面雨量预报检验系统, 为三峡水利枢纽的科学调度和安全防洪度汛提供更加精细准确的决策依据, 为长江黄金水道经济社会发展提供更加优质的气象保障服务。

### 1 资料与方法

#### 1.1 三峡水库主要汇水流域分区

按照与三峡梯调中心所签订的服务合同, 将三峡库区主要汇水流域分为岷沱江、涪江、嘉陵江干流、渠江、乌江思南上、乌江思南下、长江宜宾一重庆、

收稿日期: 2020年8月28日; 修回日期: 2020年10月24日

第一作者: 周英(1972—), Email: 383891184@qq.com

通信作者: 袁久坤(1972—), Email: 123187447@qq.com

资助信息: 中国长江电力股份有限公司气象信息与预报服务项目

重庆一万州、万州一宜昌段等共9个流域分区。对应各分区，从MICAPS3系统获取所需的流域和站点地理信息资料。

### 1.2 雨量实况获取以及数据处理方法

面雨量实况以三峡梯调通信中心提供的面雨量为准（2015—2019年）。从各流域范围内的气象监测站点获取的数据计算的面雨量仅作参考。面雨量的计算采用算数平均法<sup>[7]</sup>。

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}, \quad (1)$$

其中： $\bar{P}$ 为流域的面雨量，单位：mm； $p_i$ 为流域内各雨量测站的同期降雨量，单位：mm； $n$ 为雨量测站数。

系统开发的主要编程语言和工具包括Visual Studio 2015、Visual Basic 6，和气象要素等值线分析和色斑图绘制工具<sup>[8]</sup>以及OLE自动化控制方法<sup>[9]</sup>等。

开发中采用距离平方反比插值法<sup>[10]</sup>，即：

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}}, \quad (2)$$

其中： $n$ 为样点数目， $z_i$ 为第 $i$ 点的样点值， $d_i$ 为第 $i$ 个样点到插值点的距离， $Z$ 为待估值。当样点与插值点重合时样点权重为1，其他点权重为0，插值点值等于样点值。

面雨量预报准确率的计算采用中值法，根据质量考核规定得出 $S_{ij}$ （为第 $i$ 分区第 $j$ 次预报考核得分）； $K_i$ 为参与计算的预报次数。分值越高，预报越接近于实况。

则设 $T_i$ 为第 $i$ 分区的面雨量预报准确率，计算公式为式（3）：

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^n S_{ij}}{k_i} \times 100\% \quad (3)$$

## 2 数值预报模式降水产品（M3格式）<sup>[11]</sup>

为提高降水时空预报精度，该系统主要应用细网格的欧洲中心数值预报模式（EC）、GRAPES\_meso、Japan等数值预报模式格点降水产品。将格点降水预报产品用距离平方反比插值法插值到流域内相关站点。下面以EC为例进行介绍，其他数值预报模式与EC模式类似，只是格点间距有细微差别。

### 2.1 模式产品数据格式

采用MICAPS第4类数据格式，欧洲数值预报模式降水产品空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格点间隔。

### 2.2 距离反比插值到站点

采用距离平方反比插值法。如典型的插值站点S落在A、B、C、D这4个预报格点内， $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$ 、 $R_d$ 为S点距A、B、C、D四格点的距离（图1），则插值点值为式（4）：

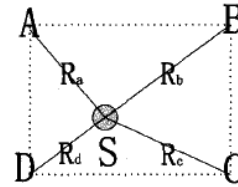


图1 预报站点（插值点）在数值预报格点的格子内  
Fig. 1 Prediction stations (interpolation points) are within the lattice of numerical prediction points

$$Z_s = \frac{\frac{Z_d}{R_d^2}}{\frac{1}{R_d^2} + \frac{1}{R_c^2} + \frac{1}{R_b^2} + \frac{1}{R_a^2}} + \frac{\frac{Z_c}{R_c^2}}{\frac{1}{R_d^2} + \frac{1}{R_c^2} + \frac{1}{R_b^2} + \frac{1}{R_a^2}} + \frac{\frac{Z_b}{R_b^2}}{\frac{1}{R_d^2} + \frac{1}{R_c^2} + \frac{1}{R_b^2} + \frac{1}{R_a^2}} + \frac{\frac{Z_a}{R_a^2}}{\frac{1}{R_d^2} + \frac{1}{R_c^2} + \frac{1}{R_b^2} + \frac{1}{R_a^2}} \quad (4)$$

## 3 面雨量预报检验

### 3.1 制作前期检验时段的各降水产品的实况、预报评分表

根据三峡梯调通信中心系统数据库中提供的实况面雨量，按照服务技术合同考核办法中面雨量预报准确率计算方法，一模式一表分别计算出前期检验时段（一般为前一个月，根据梯调中心提供的面雨量实况数据时段而定）各数值预报模式降水产品的预报评分（表1）。

### 3.2 制作多模式降水产品的实况-预报综合检验表

根据各数值预报模式产品对各预报流域的检验统计，列出前期各预报流域与各数值预报降水产品的预报检验得分情况，作为后期各预报模式计算权重的依据（表2）<sup>[12]</sup>。

### 3.3 制作多模式降水产品的实况-预报综合检验界面

应用Visual Basic控制office（Excel，Word），后台读取需要检验的前期（一般前一个月）各模式面雨量预报，按照服务技术合同考核办法中面雨量预报准确率计算方法，自动一模式一表分别计算出前期检验时段各数值预报模式降水产品的预报评分，并汇总到综合表，以便实际预报时调取检验信息作为各模式加权平均的依据。多模式降水产品的实况-预报综合检

表1 2020年4月28日数值预报模式(EC)降水产品的实况-预报评分表  
Table 1 28 April 2020 numerical forecast model (EC) precipitation product fact-forecast rating sheet

站名	站号	14时	20时	02时	08时	日雨量/mm	预报值	强降水预报得分	基数	降水预报得分	基数
岷沱江区间	2400001	0.03	0.44	2.75	1.44	4.67	0-0	Na	0	100	1
嘉陵江涪江区间	2300100	0.22	0.56	0.12	0	0.9	0-0	Na	0	Na	0
嘉陵江干流区间	2300200	1	1.33	0.3	0.01	2.65	0-0	Na	0	100	1
嘉陵江渠江区间	2300300	0.56	2.6	1.54	0.1	4.73	0-0	Na	0	100	1
乌江思林以上区间	2600100	5.38	0.06	20.3	10.1	35.79	0-0	0	1	0	1
乌江思林以下区间	2600200	3.55	3.89	5.2	4.25	16.89	0-0	Na	0	0	1
屏~寸区间	2500001	0.19	0.4	7.84	5.93	14.36	0-0	Na	0	0	1
寸~万区间	2010001	1.22	2.52	1.43	1.93	7.11	0-0	Na	0	0	1
万宜区间	2020001	1.62	1.34	1.12	0.06	4.14	0-0	Na	0	100	1

表2 2020年4月1日至30日多模式降水产品的实况-预报综合检验表  
Table 2 Comprehensive fact-forecast test sheet for multi-mode precipitation products on April 1, 2020 solstice and 30

站名	站号	EC降水 检验得分	NCEP降水 检验得分	Japan降水 检验得分	GRAPES降水 检验得分	Germany降水 检验得分	CMA降水 检验得分
岷沱江区间	2400001	75	37.1	24.5	48.6	57.5	87.5
嘉陵江涪江区间	2300100	72.7	48.1	27.7	47.3	59.4	89.5
嘉陵江干流区间	2300200	73.8	48.6	27.8	43.8	56.3	86.3
嘉陵江渠江区间	2300300	67.1	45.1	28	38	51.5	82.2
乌江思林以上区间	2600100	58.1	47	29	38	48.9	79.5
乌江思林以下区间	2600200	56	49.9	31	37.4	45	81.3
屏~寸区间	2500001	53	49.6	30.2	36.7	46.5	80.7
寸~万区间	2010001	54.3	49.5	32.4	36.3	46.7	80.9
万宜区间	2020001	55.6	50.4	33.2	36.6	46.9	80.8

验界面如图2所示。

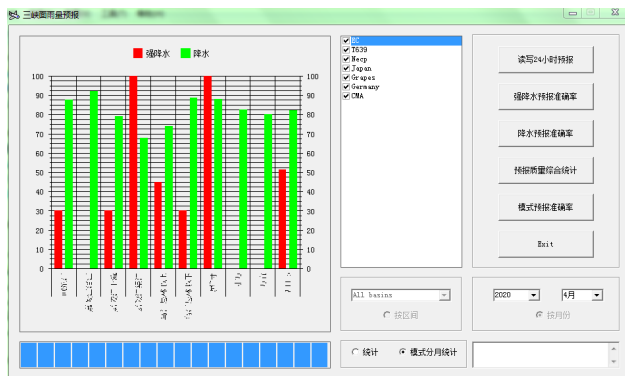


图2 多模式降水产品的实况-预报综合检验界面  
Fig. 2 A reality-forecast comprehensive inspection interface for multi-mode precipitation products

### 3.4 多模式降水产品的实况-预报综合检验效果分析

分别统计了2015年以来的近5年各流域面雨量预报使用本系统(A1)和未使用本系统(A2)的预报检验质量以及制作预报所需的时间,并对预报检验质量做方差分析,对比检验其预报质量的稳定性(表3)。

从表3可看出,使用本预报检验系统后,面雨量

预报质量平均提高了5.4个百分点;方差分析可知,使用本预报检验系统做出的面雨量预报产品的准确率较不使用本预报检验系统做出的预报产品,预报质量稳定性明显更好;在产品制作时间上,不使用本预报检验系统,做一次预报至少需要1.5 h,而使用本预报检验系统,做一次预报仅需要接近0.5 h。无论预报平均质量还是质量的稳定性都有明显的提升,而制作预报所需制作时间则大幅减少。

表3 模式降水产品的实况-预报综合检验效果分析  
Table 3 Analysis of the result of fact-forecast comprehensive test for model precipitation products

站名	A1质量 (平均)	A2质量 (平均)	A1质量 方差	A2质量 方差	A1时间 (平均)/min	A2时间 (平均)/min
岷沱江区间	55.2	47.4	19.7	185.3	3	10
嘉陵江涪江区间	57.0	50.8	33.0	71.7	3	10
嘉陵江干流区间	48.0	46.8	7.5	105.7	3	10
嘉陵江渠江区间	50.8	51.4	20.2	134.3	3	10
乌江思林以上区间	50.6	47.4	18.8	79.3	3	10
乌江思林以下区间	65.0	48.8	20.0	172.7	3	10
屏~寸区间	55.8	49.8	25.7	43.7	3	10
寸~万区间	61.4	54.2	70.8	80.2	3	10
万宜区间	58.0	57.2	29.0	120.7	3	10
合计	55.8	50.4	244.7	993.6	27	90

### 3.5 面雨量预报制作界面

在图3的界面上，应用Visual Basic 6编程控制office（Excel，Word），后台读取前期预报检验信息（Excel表）计算各模式权重，计算制作各预报模式降水产品的流域面雨量并根据计算的权重加权平均，按照分区面雨量预报用语要求自动制作待发布的流域分区面雨量预报。同时可根据服务对象需求，输出以流域站点降水量绘制的散点等值线色斑图、以流域封闭区间方式绘制的面雨量等级色斑图等预报产品。

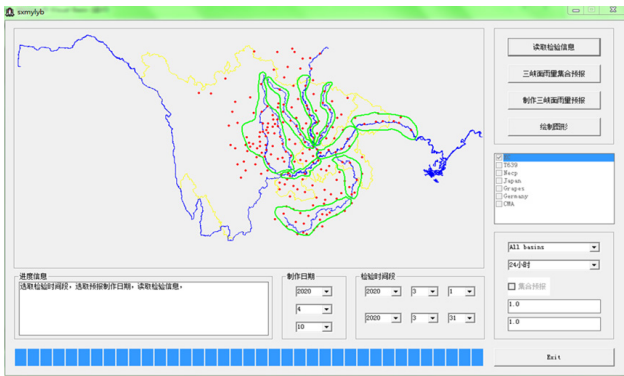


图3 流域面雨量预报制作界面

Fig. 3 Watershed surface rainfall forecast production interface

## 4 结论

本系统实现了基于数值预报模式降水产品的三峡水库面雨量预报的自动评分检验、以权重集合平均的方式自动制作面雨量预报、面雨量预报检验的表格和文档产品自动化输出等功能。同时能根据需求输出以流域站点降水量绘制的散点等值线色斑图、以流域封闭区间方式绘制的面雨量等级色斑图等预报产品。经实际应用检验，该系统能快速有效地实现三峡水库分流域面雨量预报的自动化制作，提高面雨量预报的准确性、稳定性、及时性和精细化水平。

1) 检验证明，应用本预报检验系统制作面雨量预报较人工分析计算制作，自动化程度高，制作时间短，在所需资料齐全的情况下，一个流域平均几分钟

就可以制作出基于数种数值预报模式降水产品的面雨量预报，较纯人工制作减少1 h左右，大大减轻了人工预报劳动强度，给预报员留出更多的形势预报分析时间。

2) 应用本预报检验系统有利于对面雨量预报进行持续的检验，提高了面雨量预报的准确率，近5年内的平均预报质量提高了5.4个百分点。

3) 应用本预报检验系统制作面雨量预报有较好的客观稳定性，较好地避免了完全由人工制作难以避免的主观性影响。

4) 应用本预报检验系统制作面雨量预报可以文字表格、等值线色斑图、格点文件等方式发布，提高了服务产品的多样化和精细化水平。

5) 本系统在数值预报模式对面雨量的预报检验数据存储处理上采用了开放性的Excel表格方式，能较方便地增减数值预报模式种类，适应不同模式产品的格式变化，实用性较好。

### 参考文献

- [1] 周杰, 刘晓冉, 康俊. 基于FloodArea的三峡库区小流域山洪面雨量分析. 气象科技, 2019, 47(4): 697-704.
- [2] 陈艳英, 高阳华, 游扬声, 等. 面雨量空间扩展估算法. 气象科技, 2010, 38(1): 9-14.
- [3] 周国兵. 三峡库区流域面雨量预报模糊检验. 气象科技, 2005, 33(2): 120-123.
- [4] 李才媛, 顾永刚. 灰色预测模型在长江上游流域面雨量预报中的应用. 气象科技, 2003, 31(4): 223-225.
- [5] 方慈安, 潘志祥, 叶成志, 等. 几种流域面雨量计算方法的比较. 气象, 2003, 29(7): 23-26.
- [6] 徐晶, 林建, 姚学祥, 等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用. 气象, 2001, 27(11): 13-16.
- [7] 孙佳, 何丙辉. 流域面雨量计算方法探讨. 水土保持应用技术, 2007, 1: 42-45.
- [8] 江剑霞, 刘少华, 严汉英. VB环境下不规则三角网的算法设计与实现. 四川测绘, 2006, 29(2): 64-67.
- [9] 钟颖, 汪秉文. 基于VB的OLE自动化编程技术及其应用. 信息技术, 2002, (5): 7-8.
- [10] 张金鑫, 马国忠. 利用距离平方反比算法对格点数值预报产品进行插值. 黑龙江气象, 2011, 28(4): 22-23.
- [11] 尹恒, 杜良敏, 胡永光, 等. 细网格数值模式产品在水文气象服务中的应用. 气象科技进展, 2017, 7(1): 155-158.
- [12] 熊伟, 汪超, 周明飞, 等. 多种数值预报产品在贵州定量降水预报中的检验. 贵州气象, 2013, 37(4): 15-18.

# 5G时代气象媒体融合的发展与服务创新

■ 刘珺 张寅伟

中国天气网推出的气象资讯自动化写作产品《速读天气》，就是通过机器实时检索气象数据、历史数据，自动生成全国3240个县级城市的天气服务稿件，基于用户位置每日推送。未来，5G传输技术与大数据、人工智能、云计算等技术深度融合，连接人和万物，从技术层面保证了高清成像制作与传输，使新闻的采集、制作与传输有了更多的可能性。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.011

从1G到5G时代，每一次技术的迭代都在不同程度地推动气象传媒产业变革，对媒体融合产生了深度影响。2G—3G时代，图集是流量大户，3G—4G时代，短视频逐渐崛起。当4G移动宽带网络和移动智能终端的迅速普及后，用户的注意力由电视端、PC端迅速大规模地向移动端转移，改变了用户的信息消费习惯及信息接收方式。气象媒体也围绕着4G时代用户移动化、碎片化的信息接收习惯而发展变化，由此催生出了新闻客户端、新闻资讯平台等各类移动互联网新闻产品。从4G到5G时代，信息通信技术是气象媒体融为一体、合而为一的最强技术原动力。

随着5G时代帷幕拉开，连续广域覆盖、热点高容量、低功耗大连接、低时延高可靠等革命性的技术突破，不仅将直接重塑人与信息的连接方式，甚至是重构人与社会、物与社会的连接。5G技术的革命性通信能力，为构建一个万物皆媒、人机共生、自我进化的智媒传播系统给予了关键性支持，无物不连、无时不在、无处不有的“全”连接社会的构建具有了更多可能性。5G是数字化战略的先导领域，是经济社会数字化转型的关键环节，首先改变的是媒体。

2018年底开始，中央广播电视台、新华社、人民网等主流媒体纷纷抢占布局5G，将新技术创新应用于新闻报道中。2020年初，24小时不间断的5G直播被首次应用于对“新冠”疫情防控进展的新闻报道中，多角度场景、多形态内容、随时随地、永远在线的优势，使公众可在第一时间了解抗击疫情的最新动态，以最直接的方式获取最真实的信息。5G在抗击疫情宣传报道中的综合运用，体现了5G网络传播高速率、低时延、大容量的技术特性和网络优势，可谓典型的5G新媒体新闻形态，也是5G时代新闻传播媒体融合创新的一次成功尝试。5G视频直播是5G最直观的应用，

5G与新闻媒体的应用融合在实践中逐渐成熟。媒体融合发展，关键在融为一体、合而为一，需要新闻传播与信息技术从底层到应用，在每一个核心环节的全面融合。而对于气象媒体而言，5G环境的变化也将给媒体融合升级和服务创新带来新机遇和新挑战。

## 1 5G技术给气象媒体带来的优势

在媒体融合发展过程中，技术是创新应用的基础。5G时代将实现物联网、大数据、人工智能的协同发展，并进一步促进媒体深度融合，带来更丰富的传播内容、更高效的生产速度以及更清晰的音视频观看体验。5G技术是气象媒体行业一个全新的发展契机和抓手，是推动广播、电视、网络媒体和传播技术实现跨越式融合发展的重要引擎，更利于气象资源整合、协同高效、融合传播力提升。相对于4G，5G技术给气象媒体带来三大明显优势。

一是5G通信技术将全面革新气象新闻传播的形式。移动通信能够在各种各样的时空背景下混合、模糊和重新构造不同的社交活动，时间、空间和活动界限的模糊，形成了一个新的自主选择的时间、空间框架，以及多目标的传播活动，定义了新的沟通形式和渠道，带来新的传播模式。5G技术与人工智能（AI）、虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、混合现实（MR）等高新技术的融合，必将引发气象新闻传播行业的发展，为气象新闻的生产、分发、呈现带来新的变化。目前5G为气象直播提供强有力的技术支撑，提高新闻传播时效性，尤其在气象灾害直播报道中，气象主播可随时随地开启直播，5G可针对性地解决过去视频大数据量传输、实时存储、信号中断、画面卡顿等问题，实现多线路记者超高清视频的高速移动化和实时播放，超千万公众可同步收看灾害现场最新动态，实现防灾减灾信息快速有效地传播，提高公

收稿日期：2020年8月8日，修回日期：2020年10月19日  
第一作者：刘珺（1985—），Email: liujun09@163.com

众防灾减灾意识。在5G技术的推动下，“短视频+直播”将为传统气象媒体的转型提供新的思路，成为未来新闻传播的主流形式，新型的新闻传播形式将成为常态，大众使用媒介的行为特征也将发生变化。

二是5G+人工智能技术将全面提升新闻的生产传播效率。在新技术推动下，新闻生产方式正从单纯的采编人员采集素材、编写新闻，向人机协同的数据汇聚、智能标引、算法挖掘、机器生成的新方式逐渐拓展。5G技术与人工智能的结合，可大幅提升气象新闻生产、分发效率，让更多AI场景得到完美落地，将使人工智能新闻编辑更高效灵活。例如中国天气网推出的气象资讯自动化写作产品《速读天气》，就是通过机器实时检索气象数据、历史数据，自动生成全国3240个县级城市的天气服务稿件，基于用户位置每日推送。产品以天气预报数据和重点天气服务提示语库为核心，融入预警、节假日、节气、生活旅游信息等提示类实用信息，同时将传统气象要素提示词转换成更易于理解的表达方式，大幅提升信息规模化服务能力。未来，5G传输技术与大数据、人工智能、云计算等技术深度融合，连接人和万物，从技术层面保证了高清成像制作与传输，使新闻的采集、制作与传输有了更多的可能性。

三是全面升级用户视觉体验。借助5G通信技术，新闻直播信号的采集，能够扩展到4K高清摄像机、虚拟现实全景视频采集设备。5G时代4K的超清成像技术能够呈现给观众高仿真度超清画面，4K新闻将重新定义现场直播新闻的真实性，带给观众身临其境的体验。5G上行带宽能够保障更高清的直播视频上传。借助5G可大幅提升气象节目的画面质量，改变为基于4K\8K\VR\全息等体验形式为主导的“体验式”传播形式。5G时代网速更快，超高清视频等更为流畅，视觉体验升级，尤其将虚拟天气场景和现实环境相融合，顺畅、高清晰度体验将给公众带来更多沉浸感。

## 2 5G时代气象媒体传播生态的新变化

5G技术上的优势正在深层次改变气象媒体的传播生态，包括气象新闻生产逻辑、气象新闻呈现方式，进而影响气象新闻内容及渠道分发，突破传播终端介质对内容形态的局限，形成真正的全媒体融合发展态势。在2020年疫情防控的特殊背景下，视频直播在气象领域中的应用逐渐广泛和深入。无论是针对台风、暴雨等重大灾害性天气过程，还是聚焦社会热点事件报道，甚至延展到中国气象局新闻发布会、气象科普活动、气象服务及产品推广、全国各级气象部门远程学习培训等，线上视频直播似乎成为了气象业务发展中的“新标配”。气象媒体从以往的“跑采访”，到

如今把会场延伸到云端，网络技术促使气象报道内容更丰富、服务形式更多元化，而视频直播模式也在气象媒体业务中“常态化”，成为流量“新入口”。

### 2.1 报道内容更丰富

5G技术促使视频直播兴起，流式视频的内容形态、海量用户的个人发布、以及垂直领域的应用场景，是直播平台对移动宽带网络技术特性与优势的最集中体现，也是兴起的主要原因。近几年，气象媒体也纷纷加大视频直播频次，创建直播栏目，增设单独的视频直播页面，优化视频报道流程，发挥专业领域优势在直播内容、报道手段、运营模式上不断创新，特别是在重大灾害性天气报道和气象热点事件服务中已初见成效。

以中国天气网为例，2020年6月21日开启的“太空天眼追日食”视频直播，首次以14路信号不同视角多窗口的形式呈现日环食全过程的实时画面，包括有独家视角太空天眼——风云气象卫星拍摄画面；最佳环食观测点的西藏阿里、福建厦门实时信号；实景天气产品展示日食下山河湖海的景观变化；还有专业的空间天气观测站实时回传日食影像解读，国家空间天气预报台首席预报员、中国天文学会会员等全程解读。直播内容的硬核实力得到了32家重量级媒体平台宣推，吸引超千万人观看。其中在快手平台创新推出多链路直播间，将演播室信号、西藏阿里信号、北京天文望远镜画面在同一直播间以多视角同屏形式展现，公众可自由选择喜欢的视角观看，大幅提升公众观看体验。直播过程中，金边日环食高清视频还引发全民刷屏祝福，给公众带来一场有温度的直播。直播丰富的内容和与生俱来的时效性优势、真实性特征，助力日环食报道总浏览量破亿次，创网站新高。

视频直播的服务形式更像是一场视听盛宴，不仅内容丰富、形式多元化，还增强了主播与观众之间以及观众之间的互动性、参与感、体验感等，从而提升气象服务报道质量，成为气象媒体流量的“新入口”。这是5G时代内容格局、流量格局变动的最大趋势。

### 2.2 服务形式更多样

技术创新驱动更多融媒场景和服务形式落地。随着5G的到来，可以说是迈入了“直播+”的时代，演播室不再是唯一的直播地点，气象主播可根据天气形势随时随地开启直播，直播的形式也被应用于世界气象日、防灾减灾日、气象助农、气象科普等各类活动和场景中，通过快手等平台开展短视频、直播的业务创新。2020年4月开始，每天早上有3~4名气象主播在快手平台上开启早间天气服务直播，通过自媒体直

播矩阵解析当天重点天气、预警预报信息、交通出行天气、气象为农服务内容,为网友提供一对一的交互式气象服务。这是气象媒体融合的创新服务形式,将全国各地专业的气象主播形成MCN(多频道网络的产品形态)矩阵,开办《“快”说天气》日播栏目,特别在重大天气气候事件报道中发挥着重要作用,提升公众对天气的关注。像是2020年6月南方出现暴雨洪涝灾害,主播们每天从不同角度、不同风格针对南方降雨趋势、水情变化、防御科普等有节奏地进行特色直播,得到网友广泛关注。从早间直播常态化到24小时不间断直播,5G正在不断改变气象媒体的服务形式,开拓新的应用场景,推动气象媒体应用“泛视频化”的发展。

气象助农一直是气象部门大力推广的重点工作。2020年疫情期间,气象部门多次开展气象助农直播活动,打破传统媒体机构和电子商务机构之间的壁垒,在升级“直播带货”新业态的同时,赋能气象助农扶贫服务新模式。通过明星宣传、公众号推荐、网络推广、电商销售等多种形式,拓宽销售渠道,助力农民增产增收。在技术条件和网络环境保障下,气象直播的表现形式得到极大创新与突破,应用场景也得到丰富与拓展,这是气象部门首次将气象服务与电商结合,首次在直播中设置抽奖、试吃、制作美食、限量抢购等形式促进消费,从线上代言销售到线下发货运输,气象部门全流程参与,开拓气象助农扶贫服务的新模式。“直播带货”推动气象媒体传播打开新思路,让内容生产更加贴近用户,开掘更多发展的可能性,为未来气象传媒品牌的增值与盈利渠道的扩展打下良好基础。

5G视频直播是5G技术最直观的应用,未来媒体MCN化、MCN产业化是趋势,信息传播将更多地以视频为表达方式和表现形态,5G+AR/VR+4K/8K等超高清网络直播将成为主流。随着视听行业的发展,优秀的直播不仅仅只有带货,背后要有更多的内容沉淀和价值厚度。因此,通过大屏串联小屏,输出个性化、差异化、具有气象特色的优质内容,尝试新技术拓展服务形式,矩阵内打造特色化IP,将是未来面向消费者内容升级的重要方式。

### 3 5G环境气象服务产品形态的变化

数字化的虚拟环境深刻改变了人们对各种天气现象和气象灾害的认知习惯,改变了人们对现实与虚拟之间的互动方式,不光从气象科普知识的角度扩充了了解天气的方式,而且从感官上也挑战了人们感官互动的极限。网络技术正在悄然改变气象服务产品的形态。

#### 3.1 气象影视节目

从早期简单的手工制播作业,到今天运用世界最先进的数字化制播设备实时提供,网络技术的演进及其升级,使得气象影视节目的服务产品不断升级。如今的《新闻联播天气预报》,更多采用的是高科技气象服务产品,例如风云四号卫星云图、新一代天气雷达、逐小时降水和气温预报、强对流概率预报等产品;不仅如此,还引入了形势场、流场、风场、风速等模式产品、OCF(气象服务精细化多模式集成预报产品)等前沿服务产品。在技术的推动下,影视媒体团队还根据各类节目需求,研发出一系列虚拟图形图像产品,包括科普类、图标类、文字信息图解化等类型,将天气的真实场景生动呈现在演播室里,应用于灾害天气、春运保障、体育赛事等服务报道中,增加气象节目的可视性。产品的新形态不仅丰富了气象科普及服务表现形式,还灵活应用于各类直播场景增强交互性,让气象影视节目展现出更多的新鲜感和趣味性,提升收视率。

每年的“两会”都是各路媒体的“竞技场”,近年关于两会的新闻产品例证了通信技术进化背景下媒介形态、产品形式的变迁。例如2020年新华社推出5G的全息异地同屏系列访谈,人民日报利用5G+AR采访眼镜进行现场直播等,都给人耳目一新的感觉。受传输网络、终端设备、生产成本等条件限制,虚拟现实气象节目还停留在初级阶段,而借助高速率、大容量、低延时的5G网络,未来有望实现整个演播室场景完全虚拟化呈现,尤其是针对台风、龙卷风、暴风雨、暴雪等极端天气的解读,能使突发天气新闻的报道更加直观、生动;甚至引入虚拟人物等方式,建构立体、真实、多维、感官的新闻场景,实现跨越时空的“面对面”访谈,从而改变交互方式,带来全新的视听和交互体验。

未来5G技术将大幅提升大屏气象产品的分辨率、色彩空间等元素,助力建立智能图形模版,实现大屏小屏互融共通,跨屏互动将成为常态。而如何利用VR推出360°全景沉浸式天气预报服务、利用大屏属性将实时虚拟现实直播常态化、增设AI虚拟主播、虚拟现实新闻产品线等还需气象媒体不断探索和实践,5G网络将为影视媒体创新产品形态、优化用户体验带来更多可能。

#### 3.2 App

天气类App的竞争核心在于准确的天气预报和优质的服务产品,也是天气类App发展的核心,以及参与市场竞争的基础。随着网络升级,“泛在+感知”的智能气象服务成为5G发展的技术趋势,天气类App

不仅要采集社会化气象信息、感知服务用户的气象需求，还需要通过智能移动终端为用户提供基于用户位置和需求的个性精准、高端定制的天气服务。气象媒体开始研发新的App，2019年底推出一款可定制的管家式天气服务App—天气管家，它基于大众生活轨迹，围绕通勤、差旅、老人和低龄幼儿四类主要场景及人群，智能化、智慧化向用户提供天气变化推送行事建议、生活参考、风险天气评估等服务信息，可满足用户个性化需求，按需自动智能推送全场景智慧气象服务，未来还将持续更新迭代。而目前各种“超级App”、应用市场、浏览器等入口让流量变得越来越碎片化，如何根据气象产品定位和特性留住用户，是气象媒体面临的现实问题。

App作为连接用户与场景的核心载体，对于气象媒体而言，首先要提升产品“适配场景”能力，理解特定场景中的用户需求，推出与用户需求相适应的内容或服务。未来移动气象App将以“5G+AI”模式发展，气象产品的“入口”会围绕家庭、个人、车载的使用场景进行构建和不断延展。可以预见的是，将气象服务与智能语音播报结合具有良好的发展前景，气象媒体可根据不同时间、位置、用户喜好为判断依据，提供衣食住行一体化的气象服务提示，实现场景化、智能化传播。在2020年世界人工智能大会上专家表示，5G将使AI更泛在，AI让5G更智能。5G网络与AI技术结合可加速气象产品智能化转型，利于创造出更多个性化、精准化、定制化的智能气象服务产品，搭建智能融媒体服务平台，更好地满足媒体发展及公众需求。5G将为智慧气象发展注入新动力。

### 3.3 小程序

不可否认，微信“小程序”正在逐渐取代App而成为用户使用的主要应用形态。“小程序”无需下载、不占用内存，通过内嵌在其他软件中与用户建立了更加方便、快捷的连接方式，尤其在疫情期间被广泛应用。5G网络特点和性能优势将会进一步弱化用户对终端的功能性需求，云端应用形态也会越来越普及，小程序或将成为5G时代的重要服务媒介。目前气象媒体已开始针对特殊人群、个性用户研发小程序形态的气象服务产品，未来小程序或将成为气象产品的新入口和应用形态。

### 3.4 网站

信息技术的介入打破了气象传媒的原有边界，促进气象媒体与相关行业的跨界融合，做内容产品、合作模式的“破圈者”。2020年5月，中国天气网联合稚优泉化妆品推出首个跨界联名产品“台风眼”眼影；首次与百度输入法推出“天气皮肤”等，都是融

入天气元素，极具创意的跨界合作产品。日常策划的原创新闻产品，也开始尝试软文植入广告及品牌冠名，通过报道内容、服务产品与商业植入巧妙融合，实现商业变现。

目前许多企业品牌、政务机构入驻短视频平台也展示了媒体融合的新趋势：今后的媒体融合不仅仅是媒体元素的融合，更是社会的融合。面对5G时代短视频的发展趋势，网络媒体应结合自身定位与市场需求，创建数据可视化模板，通过数据可视化视频工具，将气象数据制成视频，提升产品社交属性，促进用户的主动参与、主动分享。例如新华智云自主研发的MAGIC短视频智能生产平台，可极大提升新闻制作效率，缩短发布时间，同时还具有直播引流、语音合成等创新功能，可帮助媒体将智能采集、用户分析、图像识别、语音合成等一系列创新功能深度应用于新闻报道中；此外还研发了洪涝报道机器人，通过数据可视化视频工具，将权威数据制成视频，包括暴雨分布地图、洪涝灾害地图以及降雨量预警排名等，助力媒体更快地发布相关视频报道。

优质的内容与优秀的运营是相互成就的，缺一不可。产品生产消费形式和营销模式离不开“内容驱动+数据赋能+场景匹配”，用内容驱动产品营销，但营销植入要恰到好处、精准匹配，不影响用户体验；同时产品分发平台应是多元化的，矩阵式传播，包括话题预热、用户调查等，分发频率应是有路径、有节奏的，将内容与运营融合，建立一套长效的气象产品生产、分发、营销机制尤为重要。未来气象媒体可尝试依托新技术打造具有气象特色的产品创新平台，“智造”一系列气象融合产品，建立智能创作、智能加工、智能运营、智能推荐等流程，从内容智能到传播智能，形成全链条的智能化系统。

5G发展带来的技术革新，实现了从“人联网”到“物联网”的转变，也使得“场景”成为重要因素之一。目前已有机构自主研发灾害报道机器人，可针对台风、洪涝、地震等灾害场景进行自动播报，智能匹配气象数据，利于媒体挖掘新的报道角度，助力媒体高效、高质地做好灾害报道。在媒体化的时代，5G将让气象产品的生产与呈现、气象服务模式存在无限可能，还将催生出更多新需求，创造出更多新业务和新模式。例如为贫困地区打造一批“气候好产品”、开发特色旅游景观产品等，探索跨界营销新模式，从内容运营、商业化两个方面推进气象媒体融合向纵深发展。

## 4 结语

如果说4G改变生活，那么5G将改变社会、改变行业。4G时代，“To C”（个人用户）端流量占

（下转79页）

# 国家气候标志“中国雪都”产生的旅游综合效益分析

■ 李冬梅

获得国家气候标志的地区普遍具有气候禀赋高，气候特色鲜明；生态环境好，空气质量优良；气候景观丰富、气候风险较低；地方政府生态保护意识强、绿色发展愿景大等特征。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.012

2018年阿勒泰市被授予“中国雪都”国家气候标志<sup>①</sup>，从气象角度为阿勒泰冬季旅游打造了“雪名片”，也打开了气候生态为公众服务的大门。

## 1 阿勒泰市雪资源分析

根据国家气象信息中心1960—2017年阿勒泰国家基准气候站的年逐日气候要素，新疆维吾尔自治区气象局18个区域站多年气象观测等资料，参考阿勒泰市人民政府网（<http://www.alt.gov.cn/>）社会经济等资料，可以分析得到阿勒泰市雪资源气候禀赋具有降雪量丰沛、雪期长、降雪日数多、积雪深度最大、雪质好等特征。

雪气候特征如下。

**降雪量大。**属全国降雪量非常丰沛地区之一，年降雪量为86.8 mm（全国排名前4%以内），占全年降水量的（212.6 mm）40.8%；年降雪量最多年份达164.3 mm（2010年），最少年份仅19.8 mm（1967年），最多年是最少年的8倍多。1960—2017年中二分之一年份降雪量超过100 mm。

**降雪日数多。**年降雪日数为57.4 d（全国排名前4%以内），最多年份为93 d（1966年），最少为30 d（1995年），最多年是最少年的3倍。冬季二分之一时间有降雪，日数多达34.1 d，占全年降雪日数59.5%；最多年份为51 d（2000/2001年），最少年份为13 d（2011/2012年）。12月降雪日数最多为13.1 d，其次1月（11.1 d）和11月（10.3 d）。

**初雪早、终雪迟。**降雪初日为10月23日，是北方降雪最早的地区之一；1960—2017年最早降雪初日是9月1日（2000年），最晚降雪初日是11月22日（2006年），最晚和最早相差近3个月。降雪终日为4月19日，也是北方最晚的地区之一；最早降雪终日是3月

13日（1996年），最晚终日是5月27日（1988年）。

**积雪期长。**年积雪期为146.2 d，长达4个多月；最长积雪期为220 d（1969年9月26日—1970年5月3日），最短积雪期120 d（1971年12月5日—1972年4月2日）；是我国积雪日数最多地区之一，位居全国2300多个国家级气象观测站19名，比最多的漠河仅少28 d，全国排名1%以内。1990—2017年，年平均积雪日数为133.6 d，最多年为157 d（2010年），最少年为106 d（1995年）。

**积雪深度最大。**雪深为全国之最，1990—2017年年均积雪深度为10.8 cm，最大为24.4 cm（2010年），最小为3.2 cm（1995年）；年最大积雪深度平均为50.6 cm，最大为94 cm（2010年1月18日），最小为17 cm。

**雪质优质。**因气候干冷，自然雪含水量低，仅约为20%，因而具有天然好雪质，是真正干燥松软的粉雪，也是最受滑雪爱好者欢迎的雪质。尽管冬季寒冷，仍有日最高气温0~5℃以上的暖和天，每天平均日照时间超过5 h，体感舒适，非常适合户外冰雪运动和观景。

从气候变化角度看，1960—2017年阿勒泰市年降雪量、平均积雪深度和最大积雪深度均呈增加趋势，冰雪资源丰富稳定且具有明显的可持续利用和开发优势。

## 2 游客“为雪而来”

通过统计分析马蜂窝、同程、飞猪、去哪儿网等国内主流旅游OTA平台和微博、微信公众号留言，采集近5年2万条200万字关于阿勒泰冬季旅游的游记和评论。通过问卷星收到回复1083份，国内各大滑雪俱乐部、旅游从业者推广联盟等渠道收到回复258份，电话访谈65家滑雪俱乐部负责人、50名2018年冬季阿勒泰游客，面谈了2019年深圳文博会期间广东滑雪联盟各成员单位及顽雪训练营等培训机构。

收稿日期：2020年2月24日；修回日期：2020年5月7日

作者：李冬梅（1975—），Email: mayLee9019@163.com

① 国家气候中心. 新疆阿勒泰市国家气候标志评估报告. 2018

对上述数据的初步分析表明, 冬季游客除新疆中部和北部外, 主要来自全国经济发达及人口稠密区域, 尤其是京津冀城市群、长三角城市群、珠三角城市群、成渝城市群、中原城市群、长江中游城市群、海峡西岸城市群及沈哈长地区。受访者中, 66%表示愿意来阿勒泰冬季旅游, 25%觉得难以抉择。阿勒泰冬季旅游吸引力处于中偏上水平, 游客大多被极致美景和特色体验所吸引, “极致雪景”是最吸引潜在游客的自然资源, 选择率达65.6%; 禾木村雪屋是最吸引潜在游客的人文景观, 选择率超过43.5%, 游客对阿勒泰冬季印象以感受性为主, 对资源印象多集中在“雪”的方面。

“雪质好”是滑雪游客选择阿勒泰最主要的原因, 选择占比达75.49%, 优良雪质已得到广大滑雪爱好者一致认可。此外, “滑野雪”“价格合适”“雪期长”也是一致认可优势。一年外出滑雪2次及以下的占32.68%, 3~5次占29.96%, 10次及以上占24.52%, 可见滑雪游客的出游频次较高。在滑雪目的地方面, 选择新疆的占77.82%, 吉林次之占32.68%, 再次为日本27.63%。

### 3 “中国雪都”对当地冰雪旅游的影响

经济效益显著。来自当地文化和旅游部门的数据, 截至2019年10月7日(“中国雪都”获批一周年), 阿勒泰地区共接待游客3082.11万人次, 同比增长46.39%; 实现旅游总消费352.84亿元, 同比增长64.34%。

总体布局实现高位推动。当地政府设立旅游产业发展专项资金和旅游市场拓展资金1500万, 实施全方位品牌宣传。按照以“旅游业为主体, 牵动一产、托举二产”的发展思路, 依托人类滑雪起源地世界级品牌, 形成冬季旅游精品线路核心竞争力和引领产品, 展示得天独厚的冰雪资源、底蕴深厚的旅游文化。

形成高标准旅游及交通线路。按照“四区一带”冬季旅游和“三轴N环”夏季旅游整体布局, 围绕“快进慢游”旅游交通体系, 实现与乌鲁木齐、库尔勒、克拉玛依、伊宁、和田、阿克苏、喀什、塔城等疆内8个城市, 广州、郑州、重庆、西安等国内4个城市直飞或经停, 开通富蕴—阿勒泰—喀纳斯—禾木冬季通勤航班, 克拉玛依—喀纳斯—阿勒泰—富蕴县—克拉玛依低空环飞线路, 初步形成“干线飞全国、支线飞全疆、通航飞景区”航空网。开行“龙泰号”“吉泰号”旅游专列12列, 吉林省包机45班。

### 4 结果讨论

气象品牌可以提升综合价值。国家气候标志评定一方面增强了全社会气候意识, 成为提高地方知名度、发展生态经济的鲜活名片, 另一方面推动了生

态文明建设气象保障服务的针对性和有效性。在我国旅游业迎来快速、高质量发展的现阶段, 生态游、康养游、研学游等旅游形态为气象旅游资源开发利用拓展了广阔空间。包括“气候标志”在内的气象旅游资源, 是自然旅游资源的重要组成部分, 也是各种旅游观光、体验活动的重要内容, 充分利用气候资源为旅游业服务, 是气象科学、旅游科学与体验型经济学之间的新课题。

跨界融合实现了联合发展。获得国家气候标志的地区普遍具有气候禀赋高, 气候特色鲜明; 生态环境好, 空气质量优良; 气候景观丰富、气候风险较低; 地方政府生态保护意识强、绿色发展愿景大等特征。旅游具有“一业兴百业”的带动作用, 气象在现代旅游业中已不仅仅是背景和衬托, 而是能作为旅游资源形态从幕后走向前台。

区域合作促进了协同增效。气象旅游资源通常没有行政边界之分, 地区间气象旅游资源往往各具特色。区域间联动和协同, 可实现资源共享、优势互补。阿勒泰地区借阿勒泰市授予“中国雪都”机遇, 加强顶层设计, 强化政策引导与支持, 重视气象旅游资源挖掘利用, 将阿勒泰市的优质气象旅游资源延伸到全地区, 覆盖到旅游规划、产品设计等全流程, 从冰雪资源开发利用辐射到旅游、体育、乡村建设、基础设施建设等诸多方面, 一定程度上惠及新疆整个旅游业, 推进了全域气象旅游品牌一体化发展, 实现了气象旅游资源的价值转化与升级。另外, 国家气候标志还将唤起并不断提高全社会气候意识, 科学认识气候、合理利用气候、主动适应气候、努力保护气候, 有效支撑地方发展生态经济, 让人们充分享受到气候优、环境美的生态红利, 让全社会走上绿色生态可持续发展的快车道。

致谢: 国家气候中心, 新疆阿勒泰地委宣传部、地区(市)文化旅游局、地区气象局, 国家智慧旅游重点实验室, 新疆气候中心对本文形成提供很多帮助, 谨致谢忱。

#### 深入阅读

- 国家气候中心, 2018. 浙江安吉国家气候标志评估报告. 北京: 国家气候中心.
- 许启慧, 范引琪, 等, 2014. 滑雪场建设气候条件分析. 气象科技, 42(5): 938-944.
- 汪克付, 2019. 科学利用气象旅游资源 促进全域旅游提质增效. 中国气象报, 2019-6-12(3).
- 王杨, 2016. 中国雪乡游客旅游满意度分析及提升研究. 哈尔滨: 东北农业大学.
- 郭静原, 2018. 22个市县获评国家气候标志. 经济日报, [http://www.gov.cn/xinwen/2018-12/18/content\\_5349824.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2018-12/18/content_5349824.htm).

(作者单位: 新疆兴农网信息中心)

# 基于气象服务大数据洞察平台的用户行为分析

■ 耿蓉

上海市气象服务中心的“气象服务大数据洞察平台”依托“多终端跨屏大数据”优势建立，平台基于囊括PC（常用气象类服务网站）、IPTV（气象类电视栏目）、手机终端（常用气象类手机APP）以下简称PC、IPTV、Mobile多终端数据来源的用户流量数据，主要提供PC、IPTV、Mobile三终端的上海市民每日访问的PV以及UV数据。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.013

传统气象信息管理和共享服务系统在可复用资源、系统集约化程度、信息管理能力和加工处理能力、共享服务能力等方面的局限性已经无法适应新型气象业务需求。以用户需求为导向，立足于市民生活、企业生产、政府管理的实际需求，需要不断拓展大数据、云计算、物联网、移动互联网等最新信息技术在气象领域应用的广度和深度，切实增强信息化对提升气象服务业务水平的支撑、引领和带动效用。随着大数据时代的到来，大数据和气象服务的结合越来越紧密。大数据应用于各专业气象服务的理念，核心是大数据技术获取非气象类的大数据，及其与气象数据的碰撞，表现为专业气象服务水平的提升和服务方式的革新。将“气象行业大数据”和“气象互联网大数据”有效融合，能够更加有效地应对各种业务服务需求和社会服务需求。喻迎春等利用气象相关的互联网新闻、舆情大数据和新媒体发展数据，分析了江西省公共气象服务需求，发现大部分公众更关注当天天气，对其他气象相关问题的参与度较低。对于公众关注气象信息的渠道来说，于庚康等研究发现江苏省公众获取气象信息的主要渠道是电视、手机和网络。曹梅等利用深圳天气官方微博、微信服务号、手机客户端为研究对象，结合不同天气过程进行对比，分析了各种服务产品的用户数量变化和公众关注度变化进行分析，发现客户端的点击数和下载量具有明显的年变化特征且在重大天气过程频繁期对客户端的需求量较大。

本文对上海市气象服务中心气象服务大数据洞察平台的后台用户行为大数据进行深入挖掘分析，实现对上海市民气象服务使用情况定性、定量分析。通过

总体洞察、分析用户画像用户标签，并结合气象要素变化和用户行为变化之间的相关性分析，真实还原了上海市民在不同具体时期的气象服务使用情况，充分发挥了数据信息的服务功能。

## 1 数据

上海市气象服务中心的“气象服务大数据洞察平台”依托“多终端跨屏大数据”优势建立，平台基于囊括PC（常用气象类服务网站）、IPTV（气象类电视栏目）、手机终端（常用气象类手机APP）以下简称PC、IPTV、Mobile多终端数据来源的用户流量数据，主要提供PC、IPTV、Mobile三终端的上海市民每日访问的PV以及UV数据。其中PV（Page View）访问量数据定义为浏览量或点击量，旨在衡量用户访问的网页（电视节目、APP）的数量，在每日的统计周期内用户每打开或刷新一个页面就记录1次，多次打开或刷新同一页面则浏览量累计。UV（Unique Visitor）代表独立访客数量，可以理解成一天内访问某网站（电视节目、APP）的终端的数量。在多次打开但不清除cookies，再次访问相关内容时，统计的UV数是不变的。此外该平台还提供基于电信集团用户大数据库的气象服务使用者的用户标签、气象网站评分以及实时气象热词等内容。

本文主要使用数据为气象服务大数据洞察平台监测到的多端渠道数据（PC网站、IPTV栏目、手机APP）的PV以及UV数据，它基于对热门气象服务网站、手机APP以及气象类电视栏目的总体使用日常流量数据监测统计。此外还有依托上海电信公司大数据库中的上海市使用气象服务人群的用户标签，该数据标签库囊括了用户的年龄、性别以及车辆使用情况等

收稿日期：2019年12月30日；修回日期：2020年11月30日

作者：耿蓉，Email: 415129318@qq.com

信息。平台数据能够较为有代表性地反映上海市民对气象服务的使用情况。该大数据平台于2017年年底投入运行，本文选取气象服务大数据洞察平台2018年3月1日至2019年2月28日整年的数据。文中所使用的气象数据是上海市区国家站徐家汇站点（站号58367）的气象数据。

## 2 数据获取及分析

### 2.1 总体洞察

统计2018年3月1日至2019年2月28日期间每日的PC、IPTV、Mobile三端之和PV、UV数据，时间跨度包含春夏秋冬四个季节。由于这是目前公众主要获取三种气象渠道的来源，认为其代表上海市民对气象信息的关注度。从2018年3月1日至2019年2月28日期间每日的PC、IPTV、Mobile三端之和的PV、UV时间序列来看（图1），PV、UV时间序列变化整体趋势一致，上海市民对气象服务使用情况存在季节，这与曹梅等发现的深圳市民对气象服务的使用情况较为相似。具体表现为上海市民在春、夏、秋季对气象信息关注度较高，冬季关注度相对来说略低，这可能是由于冬季相对其他季节所发生的天气过程相对平稳，所以市民对气象信息的关注度偏低。从UV、PV时间序列来看，在某些时间段，上海市民对天气关注度变化存在波动，下文还将针对这些关注度变化比较大的部分做个例分析。

对前文中提到的UV、PV数据进行计算，粗略认为用每日的PV/UV后可以得到对应的用户关注气象信息的次数。用户关注气象信息的次数大约在5~25次不等，没有存在明显的季节变化。关注度较高的两个峰值出现在2018年“十一”长假前期和12月上旬。关于12月上旬，出现了一次寒潮过程，将在后面具体分析。将Mobile、PC、IPTV三个终端数据分开来看，发现用户使用手机端每日访问次数最高。平均来说，Mobile用户每天使用7次、PC端使用3次、IPTV大约在1次。可见，比起传统的网站和电视栏目，手机客户端占有明显的市场优势，这是由于目前手机网民的高普及率。根据中国互联网络信息中心发布的第44次《中国互联网络发展状况统计报告》，截至2019年6月，我国网民使用手机上网的比例达99.1%。由此可以看出，做好手机端的用户气象服务还有很大的空间和市场。

为了对比分析不同终端渠道用户使用气象服务的区别，将三端PV数据分开来看（图2），绝大多数流

量来自手机端（Mobile）来访问天气，占比96%，PC端访问量只有3%，而IPTV仅仅为1%。这印证了目前气象影视收益下降的根本原因是由于市民使用电视这一终端获取气象服务的比例陡降。因此，气象部门在利用好气象类APP、官方微信号、官方微博的优势做好服务的同时，应当考虑气象影视节目的转型升级来吸引更多的电视用户。

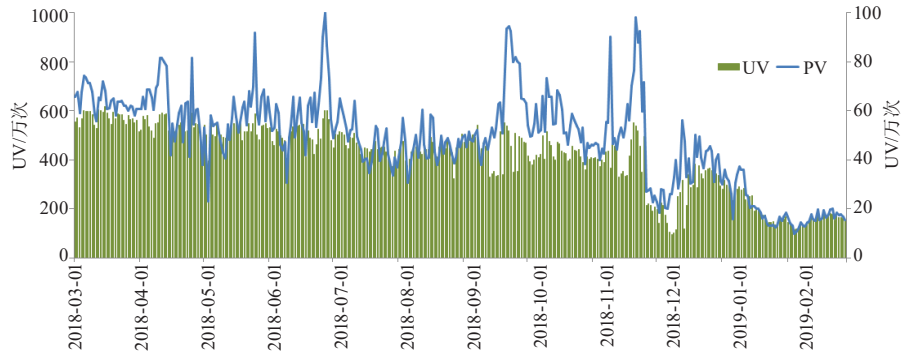


图1 PC、IPTV、Mobile每日PV、UV之和的时间序列

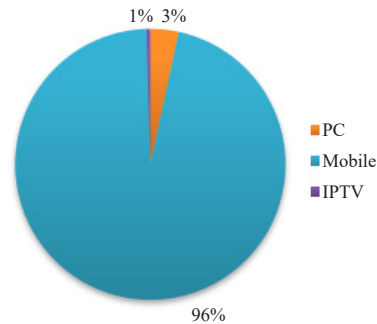


图2 PC、Mobile、IPTV终端使用气象服务的用户占比

### 2.2 用户画像浅析

用户画像是以用户的资料、行为、偏好分析结果为基础，直观描述用户的基本特征及其偏好情况，能够为气象服务使用行为洞察等重点应用提供用户层面的信息支撑。对于2018年3月至2019年2月这一时间区间内，结合UV数据统计结果及电信大数据提供的部分基于PC、Mobile使用互联网气象服务的用户人群画像标签，包括性别、年龄、家庭车辆拥有情况等属性内容进行分析。

对于上海市使用气象服务用户的市民年龄进行统计可以发现（图3），用户群体集中分布在30岁以上的成年人群，30岁以下的用户仅仅占到用户总数的11%。

对上海市关注气象信息市民的性别进行分析可以发现，女性用户占比高达72%，远高于男性，因此女性比男性更加关注天气情况，后期可考虑针对成年女性用户推送穿衣搭配、育儿信息等精准广告投放。

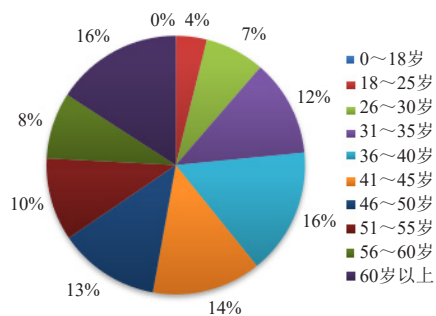


图3 气象服务用户年龄分布情况

对上海市关注气象信息市民的汽车拥有情况进行分析可以发现（图略），在使用上海市气象服务的用户群体中，29%的用户拥有汽车，占总用户的近三分之一。根据上海市交通行业发展报告，2018年全市注册机动车千人拥有率为161辆/千人。后期可以考虑为车主定向推送囊括出行指数、洗车指数的专属的气象服务产品。

有效掌握和利用上述年龄性别以及车辆拥有情况的用户画像，有助于全面掌握上海气象服务用户互联网生活特征，感知不同天气场景下不同标签用户的行为变化，以支撑相关气象公共服务工作开展。未来将更加精准地对人群实现分类服务，进一步开辟更多围绕“气象大数据”应用服务的新市场。

### 2.3 气温和降水对用户行为的影响

为了更加深入洞察气象要素的变化与上海市民对气象信息关注度变化之间的对应关系，探究每当气象要素变化时，公众对气象信息的关注度情况，选取文章第一部分中时间序列变化较大期间的流量数据并结合气温和降水两个公众主要关心的气象要素来进行个例分析。

对于降水，采用上海市区徐家汇站点的24小时累计降水量。对于气温，由于温度的变化对百姓的实际生活更有影响，因此，用日变温（即每日平均气温之差）以下简称日变温，来代替日平均气温，考虑其对公众对气象信息关注度的影响。

#### 2.3.1 暴雨及台风天气过程

表1列出了部分PV变化率较高的时间段的雨量、日变温、PV、PV变化率、UV、UV变化率及PV/UV数据。对于4月23日当日的一次降水过程，徐家汇站点降水量为53.1 mm，日变温为4.5 °C。在4月22日，PV增长率就比前一天增长33.4%，UV则增长了9%，PV/UV的值也有所提高。4月24日，当此次降水过程结束，PV、UV变化率又有了明显的下降，与之对应的PV/UV的值也下降了。在5月25日，徐家汇站点降水量为44.2 mm，当天日变温-1.3 °C，当日，用户PV

提高了30.9%，UV增长了7.6%，PV/UV也显著增长。

表1 夏季时段雨量、日变温及对应的PV、PV变化率，UV、UV变化率及PV/UV

日期	雨量/mm	日变温/°C	PV/次	PV变化率/%	UV/次	UV变化率/%	PV/UV
2018-04-21	0	0.4	4725929		471603		10.021
2018-04-22	0	2.9	6304436	<b>33.40</b>	514072	<b>9.01</b>	12.264
2018-04-23	53.1	-4.5	6377475	1.16	516517	0.48	12.347
2018-04-24	1.5	-5.9	4102671	-35.67	484971	-6.11	8.460
2018-05-24	0.2	0.1	7001584		546726		12.806
2018-05-25	44.2	-1.3	9166781	<b>30.92</b>	588111	<b>7.57</b>	15.587
2018-06-18	0	2.5	4188057		411520		10.177
2018-06-19	31.5	0.4	6192499	47.86	516204	25.44	11.996
2018-08-02	0	-0.4	4721061		470462		10.035
2018-08-03	56.5	-3.5	5709617	<b>20.94</b>	505882	<b>7.53</b>	11.286
2018-08-04	0	3.5	4763654	-16.57	396276	-21.67	12.021
2018-08-10	0	0.6	4080524		420554		9.703
2018-08-11	0	-0.4	4756977	16.58	431910	2.70	11.014
2018-08-12	64.4	-3.7	6023647	<b>26.63</b>	493135	<b>14.18</b>	12.215
2018-08-13	9.8	1.6	4611249	-23.45	458880	-6.95	10.049
2018-08-14	0.3	0.2	4042941	-12.32	442943	-3.47	9.127
2018-08-15	0.6	0.6	4081038	0.94	440613	-0.53	9.262
2018-08-16	11.9	-1.6	5826454	<b>42.77</b>	491836	<b>11.63</b>	11.846
2018-08-17	70.6	-1.6	5708191	-2.03	472374	-3.96	12.084
2018-08-18	0	2.2	4313844	-24.43	441382	-6.56	9.773
2018-11-20	0	2.3	7644272		550470		13.887
2018-11-21	31.3	-0.1	9793143	<b>28.11</b>	595647	<b>8.21</b>	16.441

对于2018年的台风季来说，台风和降水过程所带来的气象信息关注度的变化也十分明显。2018年8月3日，第12号台风云雀（热带风暴级）给徐家汇站点带来的降水量达到56.5 mm，当天日变温为-3.5 °C，PV上升了20.9%，UV也提高了7.5%。8月12日第14号台风摩羯（热带风暴级）给徐家汇站点带来64.4 mm的降水量，日变温为-3.7 °C。当天，PV变化率为26.6%，UV提高了14.2%，PV/UV也有所提高。2018年8月17日，第18号台风温比亚（热带风暴级）清晨在上海浦东新区南部沿海登陆，这是近一个月以内第3个登陆上海的台风，在上海140多年气象记录史上首次出现，当日，城区徐家汇站降水量达到70.6 mm。可能是由于媒体及时的宣传报道，早在8月16日台风登陆的前一天，PV变化率就上升了42.8%，UV变化率也上升了11.6%，PV/UV也明显提高。

由此可见，每当暴雨、台风等重大天气过程发生时，市民对气象信息的关注度骤升，无论是PV代表的用户次数以及UV代表的用户量以及PV/UV都有明显的提高，在一些重要天气过程来临时，由于官方媒体的信息宣传发布到位，关注度的提升甚至出现在天气过程发生之前。作为气象服务部门，每当重大天气过

程发生时，应当加密公众气象服务，及时做好信息发布和群众生产生活引导工作。

### 2.3.2 冬季寒潮及连阴雨天气过程

2018年12月，上海发生了一次寒潮天气过程，选取2018年12月2—9日的连续降温天气过程，列出期间雨量、日变温、PV、PV变化率、UV、UV变化率以及PV/UV数据。从表2可以看出，12月4日起当寒潮天气过程发生时，PV变化率和UV变化率都有提高，其中PV提高了53.2%、UV提高了57.9%。12月7日当天，降水量达到19.2 mm，日变温为-5.5 °C，当天PV增长了30.43%，UV增长了29.43%。值得注意的是，从12月6日开始，PV/UV的值明显提高，而当寒潮过程结束时，由于UV骤降，而PV却变化不大，导致12月8日、12月9日PV/UV显著上升，具体原因还有待进一步探究。

表2 冬季时段雨量、日变温及对应的PV、PV变化率，UV、UV变化率及PV/UV

日期	雨量/mm	日变温/°C	PV/次	PV变化率/%	UV/次	UV变化率	PV/UV
2018-12-02	9.3	1	1826565		141400		12.918
2018-12-03	3.8	0.4	2798268	53.20	223208	57.86	12.537
2018-12-04	5.8	-3.5	2764997	-1.19	214604	-3.85	12.884
2018-12-05	4.9	-2.5	2026635	-26.70	173973	-18.93	11.649
2018-12-06	27.9	-1.8	1993824	-1.62	141617	-18.60	14.079
2018-12-07	19.2	-5.5	2600513	30.43	183292	29.43	14.188
2018-12-08	2.2	-2.1	2598217	-0.09	93670	-48.90	27.738
2018-12-09	2.1	0.8	2765207	6.43	100929	7.75	27.398

2018—2019年上海发生了百年一遇的阴雨湿冷天气。在徐家汇有气象记录以来的145年中，2018—2019年的连绵阴雨仅次于同时期的1918—1919年，居于第二高位。选取2019年2月7—22日（共计16 d）时间段的雨量、日变温、PV、PV变化率、UV、UV变化率及PV/UV数据并与之前相对降水量较少的16天进行比对。2月7—22日的PV累计26291480次，比1月24日到2月6日的累计19637720次增长高达34.6%，而UV则高出26.7%。1月24日—2月22日期间，当2月7日连阴雨过程开始后，无论是PV还是UV都呈现整体递增的趋势。

由此可见，当冬季的连续降温过程发生或连阴雨持续时间较长时，用户对于气象信息的关注度明显提高。回顾2018—2019年期间上海市发生的连阴雨天气过程，新闻媒体频频爆出干衣机、内衣内裤等季节性用品一度脱销的新闻，今后可考虑在气象APP栏目进行定向广告投放，实现精准营销。

## 3 结论及展望

基于气象服务大数据洞察平台的用户PV、UV数

据并结合用户标签库以及气象数据进行研究可以发现，总体来看，上海市民对气象服务的使用情况呈现季节变化，在春、夏、秋三季的关注度明显高于冬季。大部分用户倾向于使用手机来获取气象服务。用户画像方面，气象服务的用户以成年人群为主，女性用户居多，关注天气的市民中大部分没有私家车。当暴雨、台风、降温等天气过程发生时，市民对气象信息的需求情况骤升，当天气过程结束后，需求会有所下降。

大数据的核心是预测，利用气象服务大数据洞察平台所监测的用户气象服务使用情况以及实况观测气象要素数据，将人的行为数据和气象数据深度融合分析，旨在打造创新性的大数据气象服务产品，为精准气象服务提供实时数据导向和支持，提升对以用户需求为导向的精细化智能服务产品的服务能力。

由于气象服务大数据洞察平台投入应用伊始，随着时间序列的增长，今后长时间序列用户行为大数据结合气象数据能够更加深入的探究气象要素的变化对用户行为的影响。除了常规的降水量、日变温以外下一步我们还将探究空气质量、能见度等与生产生活密切气象要素变化与用户使用气象服务变化之间的相关性关系。对于用户画像，将在后期采用更多有指导意义的用户信息进行融合，做更加精细的画像，从而能够进一步根据天气的变化对不同人群对气象服务使用的行为进行预测，在交通、物流、旅游、保险、餐饮外卖等民生气象服务领域推送以需求为导向的精细化气象服务产品。此外，还将引入其他大数据平台进行数据量的扩展和质的提升，实现多元化大数据与气象数据的碰撞，提升专业气象服务水平，进一步增强信息化对提升气象服务业务水平的支撑、引领和带动效用。

### 深入阅读

- 曹梅, 李海龙, 肖然, 2018. 深圳市重大天气过程互联网数据变化与气象服务. 广东气象, 40(5): 51-53.
- 达月珍, 2019. 浅析气象部门运作天气类app和气象微信公众号的优势. 气象科技进展, 9(3): 60-64.
- 梁文昌, 2017. 数据平台的设计与实现. 北京: 北京交通大学.
- 沈文海, 2016. 再析气象大数据及其应用. 中国信息化, (1): 85-96.
- 唐延婧, 彭芳, 罗喜平, 等, 2017. 大数据在贵州专业气象服务的应用及展望. 气象科技进展, 7(2): 54-59.
- 田兰, 熊伟, 赵秋云, 等, 2019. 面向服务的气象大数据集成与共享技术研究. 中国科技成果, 20(13): 78-79.
- 王海成, 2016. 大数据时代政府管理的应对策略. 哈尔滨学院学报, 37(6): 41-43.
- 于庚康, 申双和, 罗艳, 等, 2012. 基于江苏省公众气象服务效益的分析与研究. 气象, 38(12): 1546-1553.
- 喻迎春, 吴楠, 黄震宇, 等, 2018. 基于大数据的公共气象服务需求分析与效益评估. 气象与减灾研究, 41(3): 68-72.

(作者单位: 上海市气象服务中心)

# 智慧气象服务融入智慧城市时空信息云平台的思考与探索

■ 段文广 范飞勇 刘燕 张玲 王骥 石永玮

依托时空信息云平台建设的智慧气象应用子平台,在解决气象服务智慧化、行业获取气象数据便利化的基础上,推进行业大数据的深度融合,利用大数据挖掘技术,找出行业需求与气象数据高度关联的结合点,构建“智慧行业+气象”应用场景,将气象信息发布变为气象能力服务,是智慧气象服务更高层次的体现。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.014

“十三五”期间,全国有超过500座城市建设智慧城市,中国气象局办公室于2018年印发的《智慧气象服务发展行动计划(2019—2023年)》,明确了发展智能感知、精准泛在、情景互动、普惠共享的智慧气象服务的总体要求<sup>①</sup>。由于部分地区气象部门大数据观念不强、资金技术投入有限、具体措施抓手不够等原因,气象服务仍旧停留在传统服务领域,服务产品单一、智慧含金量不足,已难以满足各地政府部门及公众对精准化、精细化气象服务的需求。全国各大城市正在开展智慧城市时空信息云平台建设,为气象部门智慧气象服务发展提供了新机遇,如何顺应时代潮流,抓住新机遇,推进智慧气象服务融入与智慧城市时空信息云平台建设,并发挥相应的效益,是增强气象服务软实力,提升服务效益的有效途径。

## 1 智慧城市时空信息云平台建设概要

时空信息云平台是以时空为基准,以位置服务为核心,通过大数据、物联网、云计算等新一代信息技术,实时汇集城市各种时空信息而形成的感知更透彻、互联更广泛、决策更智能、服务更灵活和更加安全可靠的地理信息服务平台,是智慧城市建设的重要空间信息基础设施,是城市服务与治理转型升级的有力推手,也是新兴产业高速发展的重要引擎。

为适应智慧城市对信息资源共享应用的需求,满足城市运行、管理与服务的自动化、智能化应用,2012年底,国家测绘地理信息局提出智慧城市时空信息云平台建设试点工作。目前,在全国启动40多个云平台建设试点,有重庆、武汉、宁波、广州、兰州、咸阳、徐州、潍坊、嘉兴等一批城市完成了城市时空

信息大数据中心和时空信息云平台的前期建设,并不断拓展多项面向政务和公众的应用领域,开展面向行业的智慧示范应用建设,全面推进智慧城市建设,提升城市智慧化治理与服务水平。

智慧城市时空信息云平台项目以时空信息为载体,整合了城市人口、法人、房屋等基础信息,构建了统一的时空大数据中心。各试点城市在城市规划、国土资源管理、社会管理创新、智慧税务、智慧水务、网上群众服务、智慧城管、应急指挥、智慧工地、区域研究及公众服务等多个领域开展应用,取得了显著的社会及经济效益。

为加快智慧城市建设提供了时空大数据支撑。智慧城市80%以上的数据与时间、空间有关。时空信息云平台基于统一的时空基准,提供高精度的位置信息,解决了城市数据由于基础不统一而产生的障碍,大大缩短机构与机构、公众与政府之间的距离。

为促进智慧城市管理转型升级提供了集约共享资源。将城市的管理资源统一整合,让城市中的各个功能协调运作,提升城市管理效率;同时借助遍布城市的传感网络,将城市的事件变化及时掌握,使政府对经济社会管理等问题做出快速反映,不断提高管理决策能力。

为提升行业服务效率提供了跨部门业务应用协同。基于时空信息云平台的共享交换服务,根据部门间共享协同的需求,通过云服务,实现跨部门跨区域的资源共享与应用协同,通过平台提供的数据、接口服务及时空大数据挖掘分析技术,实现“数据协同、业务共享”,高效提升行业服务能力。

为提升公众智慧服务能力提供了丰富的应用场

收稿日期:2020年3月6日;修回日期:2020年6月29日

第一作者:段文广(1975—),Email:5245214@qq.com

资助信息:中国气象局2019年度软科学研究项目(2019ZZXM20)

① 中国气象局办公室.智慧气象服务发展行动计划(2019—2023年)

景。时空信息云平台提供了GIS+信息融合框架，充分融合了互联网地图数据、部门业务数据、公众行为数据等，为社会公众提供更为丰富的信息服务。通过移动客户端，结合公众切实需求，提供公众信息查询、网上办事、便民服务等应用场景，充分发挥信息融合在社会公众生活中的巨大价值。

为推动新兴产业高速发展提供了重要引擎。时空信息云平台是融合城镇化、信息化、工业化发展战略的重要载体，为城市新兴产业发展提供机遇，将有力地促进大数据、云计算、物联网、智能终端制造等产业高速发展，优化城市产业结构，还将拉动大量小微创新型产业的诞生，极大地推动城市的创新活动。

## 2 发展智慧气象的机遇与挑战

智慧城市时空信息云平台建设，对发展智慧气象带来的机遇主要体现在以下方面：

1) 开拓了新思路。发展智慧气象是当前全面推进气象现代化的重要内容和重要标志。各地气象部门积极探索智慧气象建设，建成的国一省两级气象大数据云平台、集约化的智能网格预报业务系统、智能气象服务平台、手机App等公众智能应用平台等，有力提升了智慧气象服务业务支撑能力。但是，由于部门行业之间的信息壁垒，缺乏部门行业大数据的支撑，对如何发展更高质量的智慧气象服务，还没有找到新的突破口、切入点，并没有形成明确的工作思路。如何有效利用各地智慧城市时空信息云平台提供的大数据共享资源，为发展精准、高效的决策气象服务，发展基于影响的行业气象服务，构建开放协同的气象服务生态等更高维度的智慧气象服务带来了难得的机遇和全新的工作思路。

2) 开辟了发展新空间。例如智慧交通、智慧旅游、智慧应急等示范应用子平台，坚持以政府主导，有效融入智慧城市建设，不仅为新形势下新型智慧气象服务发展开辟了广阔的发展空间，同时也为政府防灾减灾智慧应用、民生应用与产业发展提供气象信息支持，助力提升政府治理能力，实现双方共赢。

3) 提供了支撑新平台。依托智慧城市时空信息云平台提供的通用平台构建专业化的智慧气象服务平台，不仅能够充分利用云平台提供的云空间和互联网出口资源，而且有效解决高分辨率的基础地理信息、部门数据共享和城市气象服务组织管理体系的诸多难题，市县基层气象部门无需再操心基础平台的建设和安全维护，只需充分利用好国一省两级气象大数据云平台和本地政府提供的支撑新平台，构建起气象“云+端”业务服务生态链，为当地政府、行业、公众提供更加优质的智慧气象服务。

4) 激发了创新新动力。智慧城市时空信息云平台提供了海量的行业大数据，为开展多领域、多维度共

享大数据挖掘与融合带来了便利条件，必将激发广大气象科技、业务人员的创新动力。通过对行业大数据的有效融合和挖掘应用，建立基于影响的行业气象服务指标、算法，构建以用户为中心的行业气象服务供给体系，实现农业、交通、能源、旅游等重点行业全过程、全链条的气象服务，不断提升智慧气象服务核心技术。

智慧城市时空信息云平台建设，对发展智慧气象也面临更多挑战：

1) 对气象预报智能化提出了更高要求。由于气象数值预报模式与国际先进水平存在明显差距，智能网格预报质量和智能化程度不高，需要气象部门大力提升科技水平，为满足各行各业不同场景的服务需求提供高质量的预报产品。

2) 对气象服务智慧化提出了更高要求。智慧城市时空信息云平台本身以服务为宗旨，开展基于场景定制、用户行为自动感知、精准推送的智慧公众气象服务；构建以用户为中心的全过程、全链条行业气象服务供给体系，必然要求气象部门大力发展人工智能，提升气象服务智慧内涵，目前这方面的气象应用却十分有限。

3) 对气象科技创新能力提出了更高要求。智慧城市时空信息云平台是一个交互式的、开放的大数据平台，只有真正实现气象信息与各行各业信息的深度融合应用，才能延长其生命周期。如何将气象信息与多源数据有效融合，如何利用时空大数据挖掘分析技术，挖掘出针对行业有价值的气象服务信息，开展有针对性的服务，这是对气象科技创新能力的巨大挑战。

## 3 融入建设思考与探索

### 3.1 借力构建“气象云+政务云”大数据平台，创新气象服务模式

目前，由于缺少一个与政府各部门互联互通的共享平台，难以有效融合行业大数据、提供有针对性的气象服务，一直制约着气象服务智能化发展。气象部门可通过申请当地政府主导建设的政务云资源，不但可有效推进气象服务与数据上云，解决市县气象部门信息上云通道和维护成本。而且借力“气象云+政务云”构建大数据服务供给链路，一方面通过国一省两级气象大数据云平台提供的各类数据接口，为智慧城市时空信息云平台提供丰富的气象数据资源，另一方面可通过平台方便获取行业数据，有效开展数据融合应用。同时利用政务云提供的高速带宽和互联网出口，实现气象“云+端”业务服务新模式。这方面，深圳市气象局已经提供了可借鉴的经验。

### 3.2 主动有机融入智慧城市建设，打造智慧气象应用子平台

兰州市交通大数据公共平台、厦门市数据安全开

放平台等十余个应用平台荣获了2019年智慧中国年会“数据应用领先奖”。鼓励各地气象部门争取当地政府在政策、项目、资金、数据、技术等方面的支持,利用智慧城市时空信息云平台提供的资源,建设智慧气象应用子平台,并打造成智慧城市时空信息云平台的重要应用平台。以咸阳市为例,咸阳市气象局早在2015年就紧抓咸阳国家智慧城市试点建设机遇,主动融入、积极作为,率先启动智慧气象建设,不仅探索了融入智慧城市发展智慧气象工作新思路,成为共享资源受益者和数据应用的主导者;通过部门协作,共同绘就防灾减灾“一张图”,有效填补了智慧城市在防灾减灾领域的应用空白,成为咸阳自然灾害监测预警指挥平台不可或缺的组成部分,实现了智慧气象建设和智慧城市发展的双赢结合。

### 3.3 构建“智慧行业+气象”应用场景,有效融入政府公共服务体系

智慧城市时空信息云平台的建成,将形成良性的数据生态城市模式,满足智慧城市建设过程中对各类时空信息资源集约共享与协同应用的需求,最终实现时空大数据服务政府部门、行业单位及公众。气象数据只有与各行各业的业务需求深度融合,才能发挥气象部门独特优势,切实助力提高行政效率,提升服务效能,增加经济效益。因此,依托时空信息云平台建设的智慧气象应用子平台,在解决气象服务智慧化、行业获取气象数据便利化的基础上,推进行业大数据的深度融合,利用大数据挖掘技术,找出行业需求与气象数据高度关联的结合点,构建“智慧行业+气象”应用场景,将气象信息发布变为气象能力服务,是智慧气象服务更高层次的体现。比如“智慧交通+气象”应用中,将提前发布的城市内涝风险预警点、道路结冰路段与交通导航、路况播报相结合,提前告知驾驶员绕行或限速通行等,有效避免交通拥堵和事故发生。“智慧水务+气象”应用中,对流域内降水量与中小河流及山洪沟道基础数据相关联,进行时空大数据挖掘计算,建立基于时空特征的洪水及山洪风险预警模型,将精细化到中小河流及山洪沟道的风险预警与防汛部门的决策指挥系统相结合,提高中小河流及山洪沟道防洪工程治理及应急指挥决策能力。兰州市气象局在“智慧观光农业+气象”方面做了有益的探索,通过建设设施农业物联网监控系统、观光农业大数据服务平台等,在为种植用户提供设施农业气象服务指标的同时,将设施农业种植、农产品采摘、农业休闲及公众出行等农业观光大数据与精细化气象服务相融合,深度挖掘各类应用场景,建立智能服务

引擎,推出农产品采摘指数、农业观光休闲指数,有力提升了融入式观光农业气象服务的技术含量。

### 3.4 开发各类场景服务接口,构建气象服务众创生态

气象资料先天具有时空大数据的属性,随着智能预报技术的发展,“云+端”气象服务格局的形成,借助智慧城市时空信息云平台,发挥气象动态数据优势,搭建智慧气象大数据交换共享平台。平台充分挖掘各类用户需求,以API接口方式为各行业及大数据应用服务公司提供各类主题数据产品与主题服务,形成数据及服务的产品供需链,如为路政部门应用提供“公路养护天气指南”,为建筑企业应用提供“高空作业天气提示”、为公众出行服务应用提供“出行天气提醒”等,这些服务均以API接口方式在智慧气象大数据交换共享平台上提供在线服务,用户只需下载API接口程序,无缝嵌入到自己的应用场景即可得到所需的气象服务。

目前深圳市气象局已通过API接口方式入驻“i深圳”App为市民提供15项气象查询服务,其中“停课天气预警”已在中小校园App中深入应用。同时,还可以此搭建气象服务众创平台,通过API接口方式开放基础气象资料,建立面向社会的气象服务集智创新机制,不断丰富API接口功能,拓展服务场景,延伸服务触角,逐步探索智慧气象从大数据交换共享平台走向气象大数据交易平台。不仅提高专业气象服务创新供给能力,更好服务于国民经济和社会发展,而且构建起众创众创的气象服务创新生态,促进气象服务良好生态发展。

#### 深入阅读

- 郭树军,张洪广,周勇,2016.关于发展智慧气象的若干思考.中国气象报,2016-12-29(3).
- 何宇华,刘东华,张立杰,等,2019.深圳气象信息化发展现状和展望.气象科技进展,3(3):108-111.
- 沈文海,2015.大数据时代的气象信息化发展.气象软科学,(1):23-30.
- 熊翔宇,2018.基于智慧城市建设的智能服务模式研究(应用案例分析—以宁波市智慧城市建设为例).南京:南京大学,56-58.
- 于新文,2015.智慧气象:全面推进气象现代化的新境界.中国气象报,2015-10-26(3).
- 张树誉,朱海利,王小克,等,2017.基于智慧城市的咸阳智慧气象建设探索与实践//中国气象学会.第七届气象服务发展论坛论文集.北京:中国气象学会.
- 周勇,胡爱军,杨诗芳,等,2016.智慧气象的内涵与特征研究.中国信息化,(3):83-88.
- 朱焱,严明良,韩笑,等,2016.大数据视域下的苏州智慧气象服务探索.气象软科学,(3).

(作者单位:段文广、王骥,兰州市气象局;范飞勇,甘肃省气象局政策法规处;刘燕、石永玮,兰州市人影办;张玲,甘肃省气象局信息中心)

# 一次集体书写气象历史的有益尝试 ——《雪域风云路》统稿体会

■ 王元红 戚兴宇

2011年是西藏和平解放60周年，中国气象局决定出版一本回忆录文集，向全国700多位在西藏工作过的气象人发去了约稿函，引起了积极响应，很多珍贵的图片和文稿，从祖国各地，汇集到了北京，集体书写雪域高原气象事业发展历史的活动得以进行。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.015

2011年，笔者参与了《雪域风云路——西藏气象事业发展回忆文集》的编辑与统稿工作，这是一次难忘的经历，是对雪域高原气象事业发展历史一次梳理，是一次集体书写气象历史的有益尝试。

## 1 契机：西藏和平解放60周年

2011年是西藏和平解放60周年，中国气象局于5月11日召集曾在西藏工作过的老同志召开了庆祝会。庆祝会结束后，决定出版一本回忆录文集，由中国气象局老干办具体承办。老干办向全国700多位在西藏工作过的气象人发去了约稿函，引起了积极响应，很多珍贵的图片和文稿，从祖国各地，汇集到了北京，集体书写雪域高原气象事业发展历史的活动得以进行。

## 2 成果：回忆文集得以顺利出版

2011年10月，《雪域风云路——西藏气象事业发展回忆文集》正式由气象出版社出版。书中插入23张彩图和155张黑白照片，文字和图片体量巨大，较好地追述了西藏和平解放60年西藏气象事业发展的过程。

征文中未对写作者的书写做过多的限制，在回忆文章当中，创业篇文章数量占比56.36%和篇幅占比52.92%，超过了整本书的一半，由此可见，越是艰苦的环境和艰难的经历，越是记忆深刻。

## 3 角度：多视角诠释和阐述同一重大历史事件

在西藏气象历史当中，1980年是非常关键的一年，大批汉族干部内调，本民族干部又未成长起来，

导致西藏很多气象台站的工作受到巨大的影响甚至瘫痪。在这一关键时刻，中央气象局邹竞蒙副局长带队深入西藏各地，最终促成了由国务院办公厅转发中央气象局《关于巩固西藏气象工作的请示报告》（国办发〔1981〕6号），明确大力培养民族干部，为西藏气象事业长远发展奠定了人才基础。这份文件，集体书写历史过程中，多人从多角度进行了阐述。

毛如柏在回忆文章中谈到了他1980年写给邹竞蒙的一封信，谈到了机构精简面临的影响、领导班子轮换、民族干部培养、机构和体制改革等四大问题。索朗多吉则用专题回忆文章《里程碑式的文件》集中回忆了邹竞蒙进藏调研、注重改善民生、培养民族干部等，用事实和数字阐释6号文件的重大意义。

古桑曲吉也用专题回忆文章进一步阐释了“1981年国办的六号文件在西藏气象事业发展史上是一个里程碑式的文件，再多的肯定和赞扬都不过分，它确实值得大书特书。”韩通武则从中央气象局调研组的视角去阐述6号文件出台前后的历史背景、工作过程、深远影响等。

## 4 记忆：留存下来珍贵的西藏气象历史片段

陈金水《坚守在安多》一文，描述了安多气象站建站的艰难与辛苦：“这里建一个站要比气候好的地区多花一倍的时间，但是我们还是提前10天建好站开始工作。”接下来是漫长的坚守，“因为海拔高、气压低，有米吃不到熟饭……有钱买不到蔬菜……”“安多站最大的家产是两项帐篷起家的，一直住了7年……”“在帐篷里工作、生活太艰苦了，冬天被头、褥子经常是结冰的，有时温度达到零下

收稿日期：2020年10月27日；修回日期：2020年12月8日

第一作者：王元红，Email: 113806933@qq.com

27°C……”海拔4800米，安多的艰苦可想而知，历历在目。张祖仁回忆了帕里气象站建站历史：“当时正好是腊月天气，气温低于零下20多度，冻土层达1米多深……硬是用铁钎、铁锹，一点一点挖下去，大家手上起泡，戴上手套继续深挖，经过20多天的共同努力，终于把所有的仪器安装好。”

林淑君不仅回忆了行军到那曲路上的各种困苦，也记述了那曲建站的艰难：“5月的黑河（那曲）春风未度，仍然是天寒地冻；但全站的同志已迫不及待地修整值班室，平整观测场。地冻如石，十字镐刨下去只留下一个白点，臂酸麻了，手打起来血泡；但大家不把这些放在眼里。”沈锦水《冒死观测》描述了在平定西藏叛乱期间的观测经历：“到19时我们用经纬仪观测带有灯笼的测风气球时，他们马上警觉了，对我们打冷枪。”“最危险的是白天观测，我们在楼顶上的活动，被他们看得清清楚楚……就是在这个环节上，有一个同志被冷枪子弹擦破了头皮，连骨头都看到了……”这样的场面惊心动魄。陈启厚烈士在平定叛乱时英勇牺牲，冯大刚的回忆文章《魂落泽当换和平》记述了这一历史事件。

## 5 启示：把珍贵的精神和文化书写出来，传承下去

1) 书写历史是一种有效记录历史的方式。通过

这次集体书写历史，可以看出，这种方式对于记录历史是非常有效的，很好地保存和充实了历史文献非常缺乏年代的史料，这对以后研究西藏气象事业发展历史提供了很好的依据。因此，这种方式可以被借鉴、被使用、被改进，以补充和完善气象史料。

2) 让写作能力强的人参与到历史书写中来，精准表达。在统稿的过程中，由于有些老同志年纪比较大，有些老同志的文化程度不高，因此，书写的文本质量相对比较一般，修改起来有难度，如果不了解情况，修改更难以下笔。有些数据和历史文献有出入，需要进行校对和订正。这次的集体书写，虽然安排了少量记者进行采访，但占比很小，还有不少稿件的写作质量不是太高，因此，让写作能力强的人员参与到书写历史当中来，能够让文字的表达更加精准。

3) 书写过程中，配合实物收集，效果更好。此次集体书写历史的过程中，还收集了178张图片，这些图片成为了非常珍贵的资料，如果能够收集到一些其他的实物，效果会更好，可在此后的书写历史中有意识地开展，让一些珍贵的历史实物保存下来。

（作者单位：王元红：西藏自治区气象局；  
戚兴宇：西南民族大学公共管理学院）

（上接51页）

方法中，运用三次曲线拟合法和直线回归法得出的结论均具有较大可信度。

### 参考文献

- [1] 梁钊扬, 赵玲, 郭媚媚. 影响肇庆柑橘生长的气象灾害分析. 广东气象, 2019, 41(1): 68-70.
- [2] 张柳红, 陈卓煌, 王华, 等. 英德市茶叶生产的气候条件分析. 广东气象, 2019, 41(4): 68-70+77.
- [3] 钟志诚, 邓明, 丘志华, 等. 广宁县种植砂糖桔的气候适应性和不利性分析. 广东气象, 2012, 34(1): 53-55.
- [4] 白书军, 朱蓉慧, 王啸天. 石河子花生栽培气候适应性分析. 农业与技术, 2019, 39(11): 148-149.
- [5] 章文鑫, 宋晓君, 陈阳, 等. 广东省高要区春花生长期气候因子与品质的关系研究初探. 南方农业, 2019, 13(20): 149-150, 156.
- [6] 赵瑞, 许瀚卿, 樊冬丽, 等. 气候变化对中国花生生产的影响研究进展. 中国农学通报, 2017, 33(21): 114-117.
- [7] 李显信. 气候条件对柳城县花生生产量的影响. 广西气象, 1985, (1): 58-60.
- [8] 许国庆, 都前进, 许庆娥. 用通径分析方法探讨濮阳市气候条件与花生生产量的关系. 现代农业科技, 2009(8): 126.
- [9] 艾劲松, 孙雨轩, 刘凯文. 荆州市冬小麦产量动态预报方法对比研究. 气象科技进展, 2018, 8(5): 36-39.
- [10] 王晓铃, 丁在尚. 积分回归在气候要素分析中的应用. 安徽师范大学学报, 2003, 26(1): 81-84.
- [11] 徐为根, 吴洪颜, 张仁祖. 用多元积分回归方法分析降水对小麦产量的影响. 江苏农业科学, 2004, 1: 24-27.
- [12] 贾建英, 刘一锋, 彭妮, 等. 基于积分回归法甘肃省冬小麦产量动态预报. 气象与环境学报, 2016, 32(2): 100-105.
- [13] 房世波. 分离趋势产量和气候产量的方法探讨. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 13-18.
- [14] 唐帅, 刘宏旺, 李伟, 等. 兴城市花生气象产量的最佳分析方法. 农技服务, 2019, 36(10): 84-85.
- [15] 朱海霞, 李东明, 王铭, 等. 基于积分回归法黑龙江省作物产量动态预报研究. 气象与环境学报, 2018, 34(3): 86-92.
- [16] 杨永崎. 农业气象中的统计方法. 北京: 气象出版社, 1983.
- [17] 郑志阳. 影响福建省惠安县春花生生产的气候条件分析//中国气象学会. 创新驱动发展 提高气象灾害防御能力——S7应对气候变化与农业气象防灾减灾. 北京: 中国气象学会, 2013: 240-244.



所、公主岭农事试验场观测所、郑家屯农事试作场观测所、抚顺（抚矿）观测所、海龙农事试作场观测所、洮南事务所观测所、凤凰城农事试作场观测所、鞍山昭和制钢所观测所、开原原种圃观测所、齐齐哈尔事务所观测所、黑山头种羊场观测所、敦化农事试作场观测所、哈尔滨事务所观测所、海伦事务所观测所、钱家店事务所观测所等。1937年11月5日，按照签署的《日本国与满洲国间关于废除在满洲国的治外法权及转让南满洲铁路附属地行政权条约》及《附属协定》中规定：“接收有关日本方面之设施及职员。”1937年12月，日本把“满铁”建立的气象观测所移交伪满中央观象台（图2）。



图2 伪满洲国气象机关分布

“满铁”建立的观测所，每日观测3次，观测时间为120°E地方标准时的05时、13时、21时，并以21时为日界，各台站观测要素不尽相同，一般有气压、气温、湿度、风向风速、降水量、蒸发量、积雪深度、云量、日照，以及天气现象等。

### 3 “满铁”气象观测资料主要应用

“满铁”将气象资料进行整理成《北满洲气象报告》（1933年6月）《满洲农业气象报告》、农事试验场刊物等发行，其中《满洲农业气象报告》中的气象资料不断补充更新，分别在1931年5月、1934年3月、1936年5月进行三次发行，由于发行量大，日本

很多大学附属图书馆都可阅览，气象资料被有效地利用（图3）。

“满铁”在试验场、试作场、苗圃等地建立的观测所的气象资料主要应用在农业生产和科学试验等方面；在制钢所和煤矿等地建立的观测所的气象资料主要应用在煤矿生产、钢铁工业等；随着受日本关东厅委托，“满铁”建立的观测所的气象资料也应用在军事方面。

#### 3.1 农业生产方面的应用

“满铁”成立时，就对中国东北地区的农业资源及生产状况开展大规模实地调查，将调查结果整编《南满洲在来农业》等报告书。在进行农业资源调查的同时，“满铁”总部设立了掌管农事试验的农务课，农务课下辖农事试验场、苗圃、试作场、原种圃、采种圃、种畜场、兽疫研究所、农业实习所等。农事试验场在开展农事试验活动，同时增加了农业气象观测，气象资料也被广泛应用到农业生产和科学试验研究中。

1909年，成立了“南满铁道株式会社熊岳城苗圃”，其目的为铁道沿线植树育苗。1913年4月，“满铁”将熊岳城苗圃改为“满铁产业试验场熊岳城分场”，全面开展果树、种艺、蔬菜、花卉、林产、养蚕、气象观测、水稻、旱田作物等方面的科学试验研究，以及农业培训等。主要开展的科学试验有果树品种改良试验及栽培试验、蔬菜试验、花卉试验、罐头加工试验等，水稻、高粱、玉米、大豆、棉花、亚麻等作物品种改良及栽培试验，养蚕、林木种子调查和育苗试验，以及病理昆虫试验等。

熊岳城分场观测所主要观测项目有气压、气温、最高气温、最低气温、湿度、降水量、日照时数、蒸发量、风向风速、地中温度（0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、2.0、3.0 m）、草温、云量、降水日数、降雪日数、快晴及晴日数、云天日数、霜日数、雹日数、雷电日数、暴风日数、无霜期、降雪期间等多个要素。这些气象资料被广泛应用到栽培试验和品种改良当中。1933年，南满州铁道株式会社出版的《成立20周年纪念 农业试验场业绩 熊岳城分场编》的一书记录：1913—1932年祝光、红魁、国光等品种苹果的物候期，包括芽膨大期、芽开放期、展叶期、现蕾期、开花期、成熟期等物候期出现的时间，以及整个苹果生育期间的降水日数和降水量、田间持水量，以及灌溉次数等资料。1914年和1915年开展了针对2年生龙眼葡萄的越冬抗冻试验，该试验分为五个区域、每个区域覆盖不同厚度土层，试验结果表明：不同年份、不同气温下，覆盖土层厚度不同，龙眼葡萄抗冻试验



### 3.3 煤矿生产和钢铁工业等方面的应用

抚顺煤矿及其附属企业是“满铁”重要财源，收入仅次于铁道运输的利润。抚顺煤炭大量运往日本，鞍山昭和制钢所冶炼的铁矿石大部分运往日本，用来制作军需品，用来补充日本军需的不足，为日本殖民侵略战争提供后勤保障。“满铁”在抚顺煤矿和鞍山制钢所都设立了观测所，其气象观测资料为采矿和钢铁工业服务等。

## 4 结论

通过开展“满铁”时期气象观测站网和观测资料应用方面的研究，使我们了解到“满铁”的概况，包括建立的时间、所经营的事业等。从熊岳国家基本气象站沿革资料中，我们了解到“满铁”时期建有的气象站网，以及气象资料在农业生产方面、军事方面、煤矿生产和钢铁工业等方面的应用，有助于我们认识到“满铁”是一家特殊的日本公司，是日本经营东北地区的核心，从表面上看它是一个经营铁路的公司，实际上它还负有对中国物产、自然资源进行调查，以及为日本政府提供政治、经济、社会等情报的特殊机构。同时，也有助于我们深刻地了解日本侵华的历史，有利于揭露日本侵华罪行，对开展爱国主义教育具有重要意义。

(上接64页)

80%，5G时代，“To B”（行业和企业）端和“To S”（社会效率）端流量占80%，这也是5G改变社会的主要原因。新技术的注入、新模式的应用，改变了气象媒体的传播内容、服务形式与产品形态，有助于催生多元化的媒体融合产品，进而推进融媒体产品体系建设，促进新兴媒体与传统媒体加速融合发展和服务创新，公众可通过最新的技术应用，沉浸式体验天气现场，感受智慧型的气象产品，有效提升了气象媒体服务能力。短视频、直播与智能化、个性化传播等内容传播形式，将逐渐成为未来气象媒体融合发展的新趋势；而更富现场感、更了解用户、更多样化的内容传播形式也将成为媒体长远发展的关键所在。气象媒体融合，可以通过流程优化、平台再造，促进媒体资源、生产要素甚至社会资源的有效整合，实现信息内容、技术应用、平台终端、管理手段的共融共通，从而催化媒体融合发展质变，朝着真正的全媒体新闻迈进。

以5G通信技术为底层支撑的信息社会，将为气象全媒体传播创造崭新的生态环境，在技术支持、业务发展、市场环境以及服务模式等方面提供新的发展机遇。气象媒体应以“十四五”智慧气象发展规划为契

### 深入阅读

- 黄娇, 2020. 日本侵占东北时期昭和制钢所研究. 长春: 长春师范大学.  
 满史会, 1988. 满洲开发四十年史. 东北沦陷十四年史辽宁编写组, 译. 东京: 满史会.  
 李红梅, 萨殊利, 2003. 南满洲铁道株式会社的设立与日本侵华政策. 北方交通大学学报(社科版), 4: 72-76.  
 南满洲铁道株式会社, 1933. 成立20周年纪念 农业试验场业绩 熊岳城分场编. 东京: 南满洲铁道株式会社.  
 南满洲铁道株式会社, 1933. 满洲农业气象报告. 东京: 南满洲铁道株式会社.  
 秦书媛, 2012. 试论南满洲铁道株式会社调查机构的演变及其作用. 延吉: 延边大学.  
 山本晴彦, 2013. 满洲的农业试验研究历史. 东京: 农林统计出版株式会社.  
 山本晴彦, 2014. 帝国日本气象观测. 东京: 农林统计出版株式会社.  
 沈克尼, 2011. 侵华日军怎样编制兵要地志. 世界军事, 3: 59-62.  
 沈克尼, 2011. 用野心的丈量——数典侵华日军编印的中国兵要地志. 世界军事, 1: 66-69.  
 魏承先, 1933. 满铁事业的暴露. 北京: 中华书局.  
 吴英华, 1930. 二十年来的南满洲铁道株式会社. 上海: 上海商务印书馆.  
 吴杨, 刘舒, 2020. 营口百年气象站及陈列馆影像集. 全球变化数据仓储, doi:10.3974/geodb.2020.04.18.V1.  
 吴增祥, 2007. 中国近代气象台站. 北京: 气象出版社.  
 张华飞. 日本在东北的农业科研活动与农业统治. 长春: 东北师范大学, 2017.

(作者单位: 陈杰、谭昕、宋文锦, 营口经济技术开发区气象局; 吴杨、徐亚琪, 营口市气象局)

### 深入阅读

- 崔燕振, 陈洲, 2019. 大视频时代电视媒体覆盖发展与融合传播价值探究. 现代传播, (2): 12-13.  
 段鹏, 文喆, 徐煜, 2020. 技术变革视角下5G融媒体的智能转向与价值思考. 现代传播, (2): 30-31.  
 郭全中, 2019. 5G时代传媒业的可能蓝图. 现代传播, (7): 4-6.  
 李华君, 涂文佳, 2020. 5G时代全媒体传播的价值嬗变、关系解构与路径探析. 现代传播, (4): 2-3.  
 刘庆振, 2019. 洞察5G时代传媒产业变局 做好终端层与内容层布局. 中国新闻出版广电报, 2019, <http://media.people.com.cn/n1/2019/1022/c14677-31414206.html>.  
 刘珊, 黄升民, 2020. 5G时代中国传媒产业的解构与重构. 现代传播, (5): 2.  
 卢迪, 邱子欣, 2019. 5G新媒体三大应用场景的入口构建与特征. 现代传播, (7): 8-10.  
 卢迪, 邱子欣, 2020. 新闻“移动化”与直播“常态化”: 5G技术推动新闻与直播深度融合. 现代传播, (4): 8-9.

(作者单位: 华风气象传媒集团)

# AMS词汇

## 大地水准面 (geoid)

大地水准面 (geoid) 是指与地球上的平均海平面最接近的特定势面。气象出版社2012年出版的《英汉汉英大气科学词汇(第二版)》收录了该词条并翻译为大地水准面。



出于制图目的，通常将旋转椭球体视为大地水准面的近似物，以方便使用。假定椭球体的尺寸和方向既可能体现出最接近大地水准面的整体情况，也可能仅代表某一特定部分，而不考虑其他。当提及地球的形状大小时，通常参考最能代表大地水准面整体的椭球体的尺寸。在某些地方，实际的大地水准面与最佳拟合球面的背离程度可高达100 m。

通过《韦氏大词典》官网 (<https://www.merriamwebster.com/>) 查询可知，geoid一词来源于希腊语geoidēs，在1881年首次以英文geoid的形式被使用，意即大地水准面。

## 地中海涡流 (MEDDY)

MEDDY是Mediterranean Eddy的简写形式。气象出版社2012年出版的《英汉汉英大气科学词汇(第二版)》和商务印书馆2016年出版的《综合英汉科技大词典(第2版)》均收录了该词条，将其翻译为地中海涡流。

地中海涡流指的是一种盐镜现象，涡流内包含大量直布罗陀海峡流出的海水，属于次中尺度相干涡流，其空间尺度小于内罗斯贝半径。地中海涡流像固体一样顺时针(反气旋)旋转，被强梯度水团所包裹，其外围边缘可见清晰涡锋。地中海涡流与其伴生涡流的相互作用是由其地理位置和涡流数量所决定的。地中海涡流的自

大地水准面是描述地球形状的一个重要物理参考面，确定大地水准面是国家基础测绘中的一项重要工程。与大地水准面相关的学科被称为大地测量学 (geodesy)。

相关衍生词汇及短语：

- geodesy 大地测量学
- geodesic grid 测地网格
- geodesic line 测地线
- geodetic curve 大地测量曲线
- geoidal height map 大地水准面高度图
- Geodetic Earth Orbiting Satellite (GEOS) 大地测量地球轨道卫星
- Geodetic Satellite (GEOSAT) 大地测量卫星

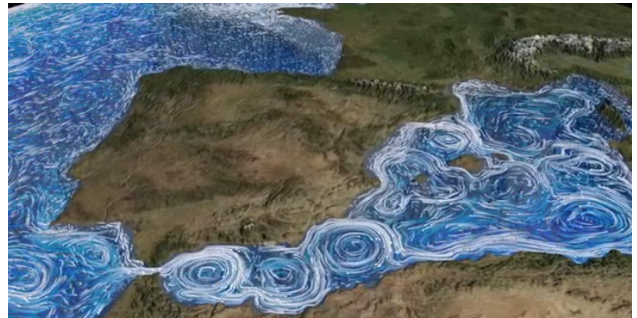
以geoid为主题词在Web of Science平台的SCI 数据库中检索(2000年至今)，可以得到1816条结果。其中发文量最多的学科为地球化学和地球物理学(972篇)，其次为地质科学(461篇)和遥感(414篇)，在海洋学、土木工程、天文学等领域也有涉及。2017—2021年，平均每年发表的SCI文献为93篇，可见围绕geoid的研究一直保持着较高的热度。表1按照引用次数，列出被引次数最高的6篇相关论文信息。

表1 大地水准面相关研究高被引论文

序号	题目	第一作者	来源	被引次数
1	GRACE measurements of mass variability in the Earth system	Tapley, BD	Science, 2004,305 (5683): 503-505	1431
2	The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)	Pavlis, NK	Journal of Geophysical Research-Solid Earch, 2012, 117	1175
3	Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: the global ICE-6G_C (VM5a) model	Peltier, WR	Journal of Geophysical Research-Solid Earch, 2015, 120(1): 450-487	533
4	GGM02-An improved earth gravity field model from GRACE	Tapley, B	Journal of Geodesy, 2005, 79(8): 467-478	463
5	The composition and evolution of lithospheric mantle: a re-evaluation and its tectonic implications	Griffin, WL	Journal of Petrology, 2009, 50(7): 1185-1204	423
6	Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites	Kopp, RE	Earths Future, 2014, 2(8): 383-406	407

(■ 韩国琳 王春竹 编辑)

发形成正是地中海盐舌内随机盐源的体现，进而影响到北大西洋大尺度对流扩散盐平衡。



在NOAA地球物理学流体动力实验室的官网页面上有关于海洋中尺度涡流的专门介绍，其中特别指出，虽然在卫星图像中只能看到中尺度涡流的表面，但实际上它们是三维结构，延伸至密度跃层。此外，该页面还特别提及地中海涡流，将其归类为一种特殊的中尺度涡流，是形成于西班牙/葡萄牙大西洋海岸附近的次表层透镜体，主要由盐水构成，水流源自地中海深处 (<https://www.gfdl.noaa.gov/ocean-mesoscale-eddies/>)。

除了地中海涡流之外，世界上诸多海域均可见中尺度涡流，例如位于南非的阿古拉斯涡流、位于中国南海的南海涡流以及位于墨西哥湾流区及孟加拉湾的中尺度

涡流。

从构词法的角度，MEDDY采用的是Mediterranean的首字母与Eddy的结合，此类组合方式在科技英语中较为常见。

组合词汇例如：

TTT diagram (Time-temperature-transformation diagram) 时间-温度-相变图

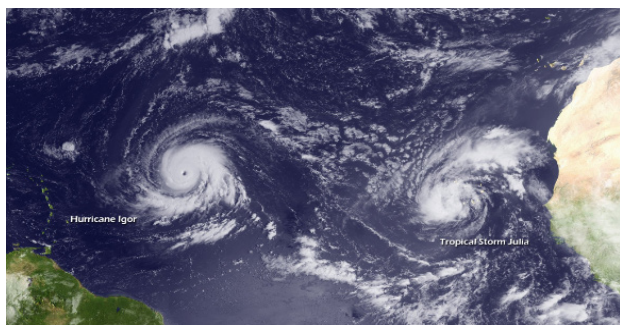
GEOMON (geochemical monitoring) 地球化学检测

SATOB (satellite observations) 卫星观测

(■ 沈悦 王春竹 编辑)

### 藤原效应 (Fujiwhara effect)

藤原效应 (Fujiwhara effect)，是指两个相邻的热带气旋因彼此的水平对流作用而引发气旋式旋转的趋势。气象出版社2012年出版的《英汉汉英大气科学词汇 (第二版)》收录了该词条并翻译为藤原效应。



在20世纪20年代初，日本气象学家藤原博士发现两个气旋性涡旋在较近的距离内具有反时针方向互旋的特点和彼此接近的趋势，这种相互作用现象后来被称为“藤原效应”。

藤原效应在西北太平洋盆地时有发生，由此给当地天气预报带来极大挑战，但是在其他海洋盆地很少发生。

近几年藤原效应的实际案例包括2017年9月的双台风，即1718号台风泰利和1719号台风杜苏芮；2013年10月的双台风，即1323号台风菲特和1324号台风丹娜丝；以及2012年8月的双台风，即1209号台风苏拉和1210号台风达维。

(■ 王春竹 编辑)

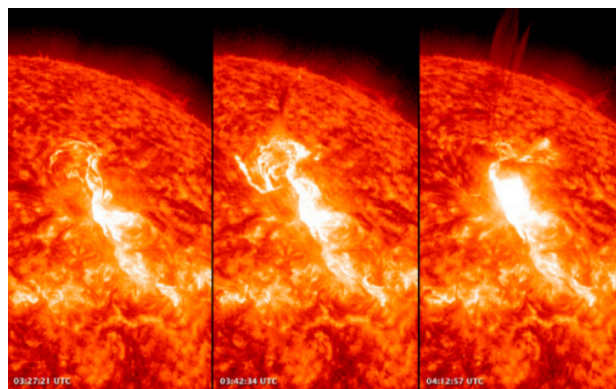
### 电离层突扰 (Sudden ionospheric disturbance)

电离层突扰 (Sudden Ionospheric Disturbance, 缩写为SID) 是指电离层状态突发变化的复杂组合以及这些变化的影响。气象出版社2012年出版的《英汉汉英大气科学词汇 (第二版)》收录了该词条并翻译为电离层突扰或突发电离层骚扰。

电离层突扰的发生通常与太阳耀斑相关，且仅可在太阳光照射到的地球一侧可见，从电离层突扰发生到电离层恢复到“正常”状态通常耗时30~60 min。

以下是电离层突扰最为重要的影响：1) 短波衰减。当短波衰减发生时，D层对高频 (HF) 无线电波的吸收突然增加，其结果便是在此频率范围内远程无线电波接收的缺损；2) 地磁钩扰。地磁钩扰指的是地球磁场水平分量的突变，缘于低电离层电导率的增加。地磁钩扰是正常的安静日磁性变化的增强形式；3) 10~100 kHz的频率范围内长波天电的突然增强，这是因为在如此低频率的无线电波范围内D层斜入射反射率有所提高；4) 因D层降低而造成的离散低频电波 (10~100 kHz) 相位突变；5) 因地波和天波间的干扰而引发的远距离低频无线电信号 (10~100 kHz) 场强突变。

相关行业对电离层突扰颇为关注，《电离层突然骚扰分级》是由国家卫星气象中心 (国家空间天气监测预



与“电离层突扰”相关的衍生词汇和短语包括：

Ionosphere sounding satellite (ISS) 电离层探测卫星

Ionospheric modification 人工影响电离层

Ionospheric profile 电离层剖面

Ionospheric tide 电离层潮

Ionospheric storm 电离层暴

警中心) 起草编写的行业标准，于2011年10月1日开始实施。《电离层突然骚扰分级》根据电离层电子总含量 (total electron content; 缩写为TEC) 的变化将电离层突然骚扰分为弱、中等、强共三级。

(■ 王春竹 编辑)

**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  
Jia Pengqun (executive)

### Managing Editors

Chen Jinyang, Cheng Xiuhu, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang,  
Li Bai, Li Guoping, Luo Yunfeng, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu,  
Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang Huaigang, 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 Yuewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu,  
Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming,  
Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu  
Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing,  
Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoping, 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

Zhang Meng, Ma Jie, Li Li, Hou Meiting, Wu Xinrui, Cui Xiaojun, Han Guolin

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

Tel: +86-10-58993291/68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

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 Xu Xiaofeng/ Aviation and its Partner Aviation Meteorology, and  
Vice Versa

### Progress

- 8 Chen Mingxuan, Fu Zongyu, Liang Feng, Jin Ronghua, Xue  
Hongxi, Li Jin, Liu Couhua, Gan Lu, Sun Chao, Shi Shaoying,  
Wang Zongmin, Chen Haoming/ A Review of SMART2022-FDP  
Progress
- 14 Yan Weixiong, Li Jianping, Jin Yan, Zhang Yongxia, Zhao Junfang/  
Recent Advances in Soil Wetness Simulation
- 21 Song Yan, Zhou Yaqing, Li Zhicai, Zhang Wei, Sun Biyun, Suo  
Lin, Bi Xunqiang, Xiao Tianguai, Zhang Hongying/ Advances on  
Response and Amplification of Snow over the Tibetan Plateau to  
Solar Activity
- 31 Wang Jing, Zhang Shaobo, Yuan Liping/ Analysis on the  
Characteristics of Extreme Precipitation in Southwestern China
- 38 Li Xiaoxia, Li Changde, Ma Zhen, Zhao Hui, Gao Lin/ Extreme  
Analysis of a Rare Cold Wave and Low Temperature Weather in  
Spring in Pingliang City, Gansu Province
- 44 Guo Qing, Li Yuanfeng, Gao Guojing, Guo Chunhui, Guo Zhiping,  
Zeng Huijuan/ Analysis on Lightning Activity Characteristic of a  
Strong Squall Line System in Guangdong
- 49 Peng Liying, Mai Zongjian, Wang Hua, Wu Jun, Li Jian, Li Ying/  
Study on Climate Influencing Factors of Peanut Yield Based on  
Integral Regression
- 52 Deng Jianying, Zeng Haipeng, Huang Zhuoyu, Wu Yanlin, Liu  
Zhenjing/ Analysis of Climate Resources of Ecotourism in Loudi  
City
- 57 Zhou Ying, Yuan Jiukun/ Study on Area Rainfall Forecasting  
System of Three Gorges Reservoir by Watershed

### Forum

- 61 Liu Jun, Zhang Yinwei/ Development and Service Innovation of  
Meteorological Media Integration in 5G Era
- 65 Li Dongmei/ Analysis on the Comprehensive Benefits of Tourism  
Produced by the National Climate Symbol "Snow Capital of China"
- 67 Geng Rong/ User Behavior Analysis Based on the Meteorological  
Service Big Data Insight Platform
- 71 Duan Wenguang, Fan Feiyong, Liu Yan, Zhang Ling, Wang Ji,  
Shi Yongwei/ Thinking and Exploration of Integrating Smart  
Weather Service into Smart City Space-Time Information Cloud  
Platform

### Reading

- 74 Wang Yuanhong, Qi Xingyu/ A Beneficial Attempt to Write  
Meteorological History Collectively—Experience of the Unified  
Draft of *The Snowy Road*
- 80 AMS Glossary Words

### Station

- 76 Chen Jie, Wu Yang, Tan Xin, Xu Yaqi, Song Wenjin/  
Meteorological Station Network Established during  
Manchuria Railway Period and the Use of Its Observing  
Data