

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.3

2020年6月20日

第10卷 第3期



洞庭湖生态气象

气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院

中国气象学会

主办

主管 中国气象局
主办 中国气象局气象干部培训学院
中国气象学会
出版 《气象科技进展》(英文)编辑部
名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

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

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

编委 (按音序排名)
毕宝贵 陈镜明 陈云峰 陈振林 崔春光
崔讲学 董文杰 杜钧 封国林 何金海
何清 胡欣 胡跃文 姜彤 金飞
雷小途 李集明 李俊 李良福 李耀辉
李跃清 李忠明 梁旭东 刘晶森 刘黎平
刘立成 刘实 刘征宇 卢乃锰 陆日宇
罗兵 罗亚丽 马舒庆 马耀明 彭莹辉
浦一芬 宋燕 索渺清 汤绪 田红林
万齐林 王斌 王斌(海外) 王东海 王建元
王式功 王卫丹 王温 王延青 王迎春 王元
王自发 卫晓莉 王敏 王翁富忠 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 张小玲 张跃堂 赵广忠
周定文 周建华 周凌晞 周显信 朱定真
朱小祥 朱玉洁 祝燕 邹立尧 邹晓蕾

编辑部
张萌 侯美亭 李莉 冀文彬 江剑民
崔晓军

地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081
电话: (010) 68409927/68409933
邮箱: amst@cma.gov.cn
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: 侯美亭 张萌

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P
定价: 30元

目次

第10卷 第3期 2020年6月20日
(内含: 进展报告2020“洞庭湖生态气象”)

1 许小峰: 主编语

科学观察

- 2 许小峰: 气象小卫星: 拓展地基气象观测的新领域
8 陆龙骅: 北极臭氧洞

气象发展前沿报告

- 10 郭妮, 王小平, 王玮, 王丽娟, 胡蝶, 沙莎: 干旱遥感监测技术进展
21 匡秋明, 于廷照: AI技术与卫星资料应用研究现状分析

研究进展

- 30 朱智慧, 王琴, 李丽: 上海市区与洋山港区气温日变化差异分析
36 何好斐, 高祝宇: 临安一次梅雨锋暴雨过程的风廓线雷达探测资料分析
43 赵现纲, 林曼筠, 谢利子, 卫兰, 范存群: 风云卫星地面应用系统计算机网络平台架构
49 吕文忠, 蔡秀华, 孙京利: AMDAR数据在数值天气预报中的影响评估
55 苗运玲, 宫恒瑞, 张云惠, 柴岩红: 1961—2016年汛期东天山北坡不同量级降水日数时空变化特征
62 李国洋, 徐启恒, 陈宽文, 曹永超: 2005—2015年广东省森林生态系统净初级生产力时空变化特征

专题 基层气象现代化

- 66 武君, 于晋秋, 黄冬至: 茂名气候及其生产力变化与粮食产量关系研究

短论

- 151 杨荣芳, 王红侠, 王贺: 河北省气象灾害预警信号分布特征研究

会评

- 154 周庆亮, 任璐, 王蒙: 首届世界气象中心研讨会简评

阅读

- 158 张家诚: 我所认识的人才学
159 陶祖钰: 我所知道的陈受钧: 一位有国际声望的学者
160 丁一汇: 纪念全球气候变化科学评估的先驱John Houghton教授

信息

- 7 贾朋群: 2030年的气象界是什么样子——《国际气象技术》为你描述
61 李婧华: “自然指数2020: 地球和环境领域”榜单发布中国气象局荣膺机构上升之星

编辑选编

- 156 揭开大气蒸发需求对干旱的复杂影响/SoilTemp: 全球近地表温度数据库/中华人民共和国成立以来气象研究和业务的进展

AMS词汇

- 封3 张伊, 张萌: 进潮量(tidal prism)与臭氧总量测绘光谱仪(TOMS)

主编语

与长江相连的洞庭湖是我国第二大淡水湖,从地理角度看也是一个重要的参照物,湖北省位于洞庭湖以北,故称为湖北,湖南省境绝大部分位于洞庭湖以南,故称为湖南。为了加强洞庭湖流域生态环境保护,统筹平衡该区域经济与生态的协调发展,2014年4月,国务院正式批复了《洞庭湖生态经济区规划》。

岳阳市作为拥有洞庭湖水域面积近60%的沿湖城市,在洞庭湖生态经济区建设中承担着重要责任。岳阳市气象局近年来在水体气象监测、水上气象服务、湿地生态观测、城市防汛预报预警等方面开展了富有湖区特色的工作。本期以“刊中刊”形式推出的“洞庭湖生态气象”主题专辑,刊登了以岳阳市气象局科技人员为主开展的与洞庭湖区域生态文明建设气象保障服务有关的最新研究成果。

作为我国最大的内陆湖泊湿地生态系统之一,洞庭湖湿地具有极为重要的生态功能和经济价值(P72);在全球气候变化背景下,洞庭湖区域的气候也呈现出不确定性增强的倾向,极端气候事件频发(P89);岳阳市气象局利用水上气象监测站网获取的资料能够更加准确地反映水面气象特征(P76),精准服务于水上航运;尽管洞庭湖是长江中下游最大的调蓄湖泊,但近年来由于受气候变化和人类因素影响,湖泊面积呈现萎缩的趋势。枯水期的洞庭湖湿地变成了候鸟重要的中转站,

丰富的鸟类资源是开展观鸟旅游的良好基础,“观鸟气象指数”的构建(P96)也成为洞庭湖生态旅游气象服务的一大特色。

本期“气象发展前沿报告”栏目关注了遥感在干旱监测中的应用(P10)、AI在卫星资料分析中的应用现状(P21)。卫星遥感早已成为生态环境监测的重要工具,遥感数据不仅能揭示地表的水体面积变化(P128),也能帮助于分析臭氧层的变化(P8)。

新冠疫情使得2020年注定成为不寻常的一年,英国著名气候变化和大气物理学教授J. Houghton爵士不幸感染新冠病毒于这个5月逝世;北京大学气象系陈受钧教授、中国气象科学研究院张家诚研究员也于今年上半年故去。本期通过摘刊了一汇院士(P160)、陶祖钰教授(P159)对他们的怀念文章等,与读者一起怀念逝者在气象领域做出的贡献。

湖南省岳阳市气象局作为本期“刊中刊”的支持单位,在论文组织、图说设计等方面做了大量工作;来自中科院亚热带农业生态研究所、湖南东洞庭湖国家级自然保护区管理局和气象局系统等机构的专家参与了论文的评审,并带来了独特的视角。借此机会,向上述及所有参与此项工作的单位和学者给予的支持表达衷心的感谢。

许小峰

进²⁰²⁰展报告 洞庭湖生态气象



研究论文

研究进展

- 76 彭洁, 蒋帅, 袁泉, 尹依雯: 东洞庭湖区水面气象站网的建立及2016—2018年数据特征及应用
- 84 王琪, 吴贤云: 近37年来湖南暴雨时空变化特征分析
- 89 许建伟, 彭保发, 郭蓉芳, 王夏青: 1960—2018年洞庭湖生态经济区极端气温和降水事件的变化规律
- 96 黄菊梅, 刘学, 李奇, 覃鸿, 向伟: 东洞庭湖湿地“观鸟气象指数”研究
- 99 蒋帅, 尹依雯: 洞庭湖地区一次持续性暴雨特征诊断分析
- 107 杨伟, 刘擎, 王威, 张巧明, 方阳: 东洞庭湖湖陆风特征分析
- 117 喻长建, 陈姣荣, 喻宇, 钟泽洲: 岳阳2015—2017

年暴雨空间分布与天气形势特征分析

- 123 覃鸿, 刘学, 黄菊梅, 王波: 南湖富营养化与气象影响因子的关系研究
- 128 王威, 隋兵, 林南, 陈太龙: 基于Landsat遥感数据的洞庭湖面积变化研究
- 133 袁泉, 吴思雁, 肖平, 李奇: 利用区域自动站资料分析岳阳市城郊以及山区降水差异
- 138 许丽丽, 陈世文, 昌立伟: 岳阳市近30年城市气象灾害变化特征分析
- 141 昌立伟, 黄海波, 许丽丽, 李晶, 黄卓禹: 岳阳市冬季暴雪和一般性降雪条件对比分析

台站巡礼

- 147 向伟, 彭洁, 吴劫远, 王威: 岳阳百年气象站在长江经济带发展中的历史作用探究

气象小卫星：拓展天基气象观测的新领域

■ 许小峰

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.001

推进小卫星的发展, 需要从标准、法规、政策、机制等方面入手, 调动企业、学校、科研院所等更为广泛的参与, 构建与政府主导的大卫星发展有所不同的模式, 调动全社会的积极性加速推进小卫星的发展。

近年来, 随着小卫星技术的快速发展和应用, 为气象业务的天基观测拓展了新的领域。通过小卫星星座的建立, 与大卫星系统结合, 可以构成能力更强大的多要素、高时空分辨率、满足多样需求的气象卫星观测体系。

1 小卫星的概念

关于小卫星概念, 最初是从重量角度定义的, 具体分法虽有差异, 但大同小异。较流行的一种分类是将重量在1000 kg以上的称为大型卫星(Large Satellite); 重量在1000 kg以下的统称为小卫星(Small Satellite)。又进一步将小卫星分为6类: 重量在500~1000 kg的为小卫星(smallsat); 重量在100~500 kg的为超小卫星(minisat); 重量在10~100 kg的为微卫星(microsat); 重量在1~10 kg的为纳卫星(nanosat); 重量0.1~1 kg的为皮卫星(picosat); 重量小于0.1 kg的称为飞卫星(femtosat)。实际上, 从卫星的发展进程看, 星体本身也是一个由简单到复杂、由小到大的过程。如美国1960年4月1日发射的世界第一颗试验性气象卫星“泰罗斯”1号, 重约120 kg, 按现在的标准, 是名副其实的小卫星; 中国于1970年4月24日发射的第一颗人造卫星“东方红一号”重173 kg, 也是一颗小卫星; 1988年9月7日我国发射的首颗气象卫星风云一号A, 重750 kg, 仍属小卫星范畴。而风云三号 and 风云四号

气象卫星系列, 由于增加了大量有效载荷, 探测能力明显提升, 重量增加到了2000~5000 kg, 属于大卫星。

从2017年开始, 全球小卫星的发射数量明显增长。2012年以前, 每年小卫星发射数量在50颗以下; 2013—2016年, 每年发射数量超过100颗; 2017年至今, 每年发射数量超过300颗, 小卫星占有所有航天器的比重也从30%左右增长至70%。2018年全球共发射461个航天器, 其中500 kg以下的小卫星321颗, 占69.6%; 2019年全球航天器发射数量为492个, 500 kg以下小卫星占比80.29%, 份额进一步提升, 小卫星在空间飞行器体系中已占有重要位置。

为了适应小卫星技术发展和发射数量的快速增加, 标准规范的确立也伴随推进, 影响最为广泛的是建立了根据体积和重量两项指标和相关技术要求创造性地划分了不同类型微小卫星标准, 即立方体卫星(CubeSat)。1999年, 在美国加利福尼亚理工大学州立大学(Cal Poly)的Jordi PuigSuari教授、San Luis Obispo教授和斯坦福大学空间系统开发实验室(SSDL)的Bob Twiggs教授共同努力下, 启动了CubeSat项目, 目的是为皮卫星的设计提供一个标准, 方便卫星的设计、研制、测试与发射, 以减少成本和开发时间, 为维持微小卫星的频繁发射提供更为便捷有效的方式。CubeSat最终成为包括100多所大学和私人公司共同开发的国际合作

项目, 制定出了规范标准和功能规格要求。CubeSat以“U”为单位进行划分, 1 U即一个标准单元, 体积约为10 cm³, 重量约1.33 kg。对每一标准单元又将重量按一定比例划分给载荷、电池、平台、结构等部分(图1)。CubeSat按照模块化架构设计, 以“U”为单位, 可在一个轴或多个轴上扩展, 形成2 U、3 U甚至更大的立方星, 但一般不超过12 U, 这种设计方式由于在技术和应用上所带来的便利性, 已成为国际微小卫星发展的实际标准, 得到普遍认可, 一些更大卫星的发展设计也在参照这一做法。

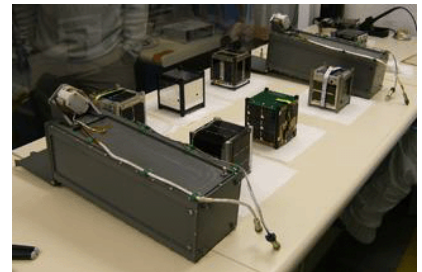


图1 6个立方星和它们的配置系统

2 小卫星的优势与发展方式

发展小卫星具有研发周期短、成本低、发射方式灵活等优点, 通过多颗星组成星座阵列, 可以提高时空探测密度, 提高关键信息的获取效率。如何发展小卫星, 则有不同的方式选择。一是对需求目标相对单一的探测, 如仅对某一种要素的信息感兴趣, 方案就很简单, 载荷少, 直接发展单一探测目标的小卫星即可; 二是选择将准备在大卫星上试验的一些新

资助信息: 国家自然科学基金重点项目(91637211)

功能移到小卫星上进行，这样有利于缩短研发周期，加快新技术的应用；三是选择将大卫星上已发展成熟且应用效益明显的单个或几个载荷重新设计，通过小卫星实现新的探测能力，技术上相对成熟，且可以发挥小卫星高时空分辨的优势，通过多颗星构建小卫星星座，满足业务需求，显然是比较现实的做法；还有一种考虑是如何将现有的大卫星做小，如发展了多年的气象卫星，综合探测能力已比较成熟，若能通过技术改进，压缩所有载荷、元器件的体积和重量，使其降至小卫星的阵营，这可以作为一种理想追求，但从技术上显然需要发展过程，短期内不易实现，从成本上考虑则可能更高，包括时间和价格，这显然与小卫星应具备的优势相悖，不可取。从各国小卫星技术发展的实际情况看，以上提到的除最后一种选择外，前三项都有了成功的实践，也说明小卫星的显著特点之一是可以快速实现相对单一或简单的功能。

同以往发射的卫星类似，目前发射小卫星的主要用途仍以通信、定位和遥感监测为主。随着技术上的成熟和成本的下降，无论是国际还是国内，小卫星的发射都呈爆发式增长，这一方面反映了实际需求的牵引，也与一些国家政策支持导向有关。如美国于2010年就由NASA牵头，启动了立方体小卫星发射创新计划（CSLI），通过资金赞助和发射支持等激励政策，鼓励大学、中小学和非盈利组织参与立方星的创新开发，从效果看，无论是对创新实践、实际应用，还是在全社会普及空间科学知识等方面都起到了积极推进作用，并进一步促进了全社会对航天科技发展的认识和支持。

有意愿参与CSLI计划的学校或组织可根据自身的兴趣和能力设计CubeSat方案，然后提交NASA进行评估，确定是否立项。2010年以来，NASA已从来自39个州的97个独立单位提交的项目中，选择了176个CubeSat任务（图2~图3），并对其进行了优先排序。通过27次发射，

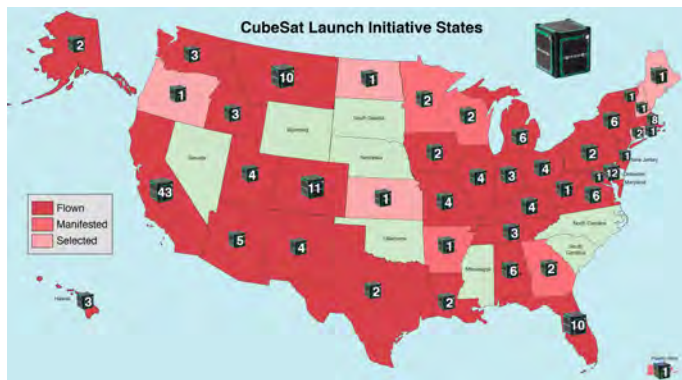


图2 美国各州参与CSLI项目分布图，包括被选中、待发射和已发射小卫星的数量（来自NASA网站）



图3 CSLI项目第100个3U-CubeSat-HARP，于2019年11月2日发射，旨在测量大气气溶胶、云水和冰粒的微物理特性（来自NASA网站）

已将101个CubeSat送入太空，还有39个已准备好的星也已具备发射条件，2020年的项目还将继续支持执行这一计划。

除了组织广泛的研发与参与外，在机制设计上通过立法导向也是调动社会力量积极投入参与的有效方式。以气象为例，美国2017年通过了《2017年天气研究与创新法案》，其中明确了允许政府机构向商业公司购买气象数据，且要求NOAA避免在数据提供上出现政府部门与私人企业的非必要重复。这调动了商业机构在大气探测业务上投入的积极性，而不仅是单纯生产装备。特别是在小卫星这一新兴领域，私营企业的灵活机制更具竞争性。

3 几类气象小卫星的发展状况

3.1 GNSS掩星小卫星星座

中国台湾与美方机构合作，

2006年4月15日美国执行了COSMIC（Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate）计划，共发射了6颗小卫星组成GPS掩星探测系统，每颗卫星直径1 m、重62 kg，通过接受GPS导航卫星的信息获取掩星事件，推算大气垂直温湿廓线。这一项目取得了成功，所获取的全球廓线资料已成为应用效果排名靠前的气象卫星资料，被应用到许多国家的数值天气预报的模式及相关的科研和业务中。鉴于COSMIC项目的成功，美国又启动了COSMIC-2计划，已于2019年6月25日，发射了COSMIC-2第一批6个卫星，并计划于2020年投入业务使用，每天可以在全球范围提供4000个掩星廓线。与此同时，商业机构也看到了这一领域卫星数据挖掘的潜力，政府部门的投入远不能满足需求。美国SPIRE公司经过几年来的发展，构建了3U

小卫星星座的方式，迅速扩大了在GNSS无线电掩星观测领域的占有份额。截止到2019年8月，通过20次发射，已拥有了84颗3U CubeSats在不同轨道平面上运行，且还在继续发展，计划达100颗以上，数量上远超过了COSMIC计划（图4）。到2019年底，已在全球范围每天提供6500个温湿垂直廓线，且还在迅速增加，预计2020年将超过10000个/d，且这些数据已纳入到NOAA商业天气数据试点计划中，并正在申请纳入美国空军商业天气数据试验计划。SPIRE公司的小卫星掩星探测星座不但可以接收GPS星的信号，还可以同时处理欧盟的Galileo、俄罗斯的GLONASS和日本的QZSS导航星座信号，其能力更具扩展性。

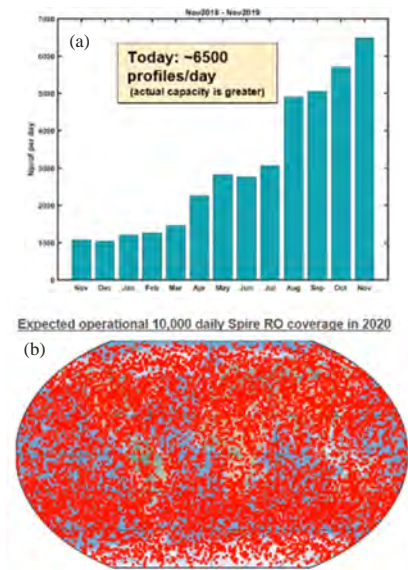


图4 SPIRE公司2019年掩星探测能力快速提升(a)和2020年将进一步拓展(b)

3.2 测风小卫星星座

同样是利用GPS导航信息探测大气信息的另一个小卫星星座是NASA主导的测风小卫星星座计划CYGNSS (Cyclone Global Navigation Satellite System)，于2016年12月15日发射成功，2017年3月开始提供测风数据。CYGNSS小卫星星座由8颗6U-CubeSat星组成，每颗星可以同时接收至少4颗GPS卫星的直接和反射信号，以确保定位的准确性，直接

信号用来确定CYGNSS卫星自身的位置，反射信号来自海洋表面，通过测量反映风浪运动的粗糙度变化，分析确定风速风向等级（图5）。由8颗小卫星协同观测，可以在南北纬40°之间提供任一观测点每3小时一次的观测数据。由于GPS的微波信号具有穿透云雨的全天候特征，CYGNSS可以及时捕捉到在广阔的海洋上产生的气旋系统从初始生成到消亡的完整海表风场变化，对开展海洋天气气候研究和完善相关业务是非常有价值的，特别是对易造成重大影响的台风，无论是强度还是路径变化，风场都是最重要的信息之一（图6）。在实际应用中，CYGNSS信息还被延伸至分析洪水、土壤湿度、地表热通量等信息，都取得了很好的效果。

3.3 微波小卫星

在目前气象卫星装载的各类探测仪器中，微波温湿度辐射计是最成功的载荷之一，据ECMWF的评估，

卫星微波探测获取的全球垂直温湿度廓线已成为减少数值预报模式误差最有价值的信息，远超过包括传统探空仪在内的其他任何探测资料。因此，在极轨气象卫星上安装了微波仪器已成为各国卫星计划的优先选择。而要弥补大卫星成本高、数量少、时间分辨率低的缺陷，发射多颗微波小卫星组成星座应是优先选择。美国NASA地球系统科学探路者（ESSP）计划赞助的6U级小卫星TEMPEST-D (Temporal Experiment for Storms and Tropical Systems Demonstration) 于2018年5月21日通过国际空间站发射，7月13日成功部署到轨道上，卫星的有效载荷是一个五频段毫米波辐射计（87~181 GHz），能够观测到大气液态水和冰含量的分布变化（图7~图8）。通过将TEMPEST-D与现有的NOAA和欧洲EUMETSAT气象卫星的对应资料进行对比发现，TEMPEST-D辐射计具有很高的

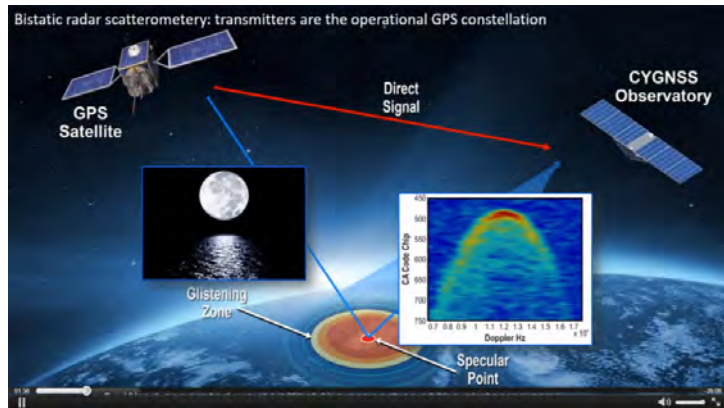


图5 CYGNSS星座工作原理示意图

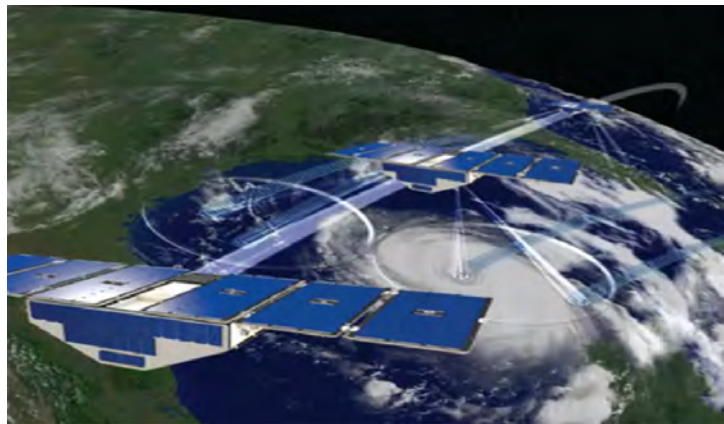


图6 CYGNSS小卫星星座连续监测台风活动示意图

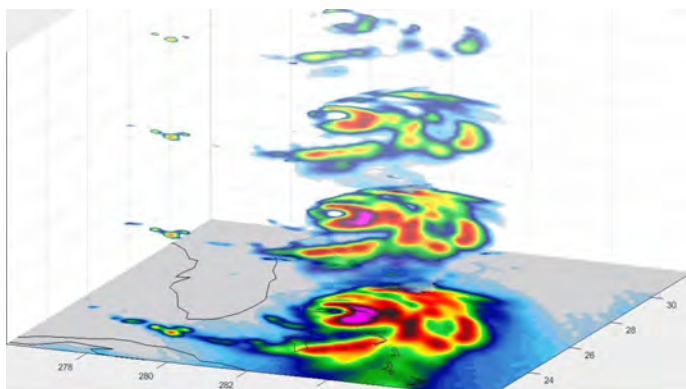


图7 2019年9月30日TEMPEST-D对飓风多莉安(Dorian)观测后形成的三维图像

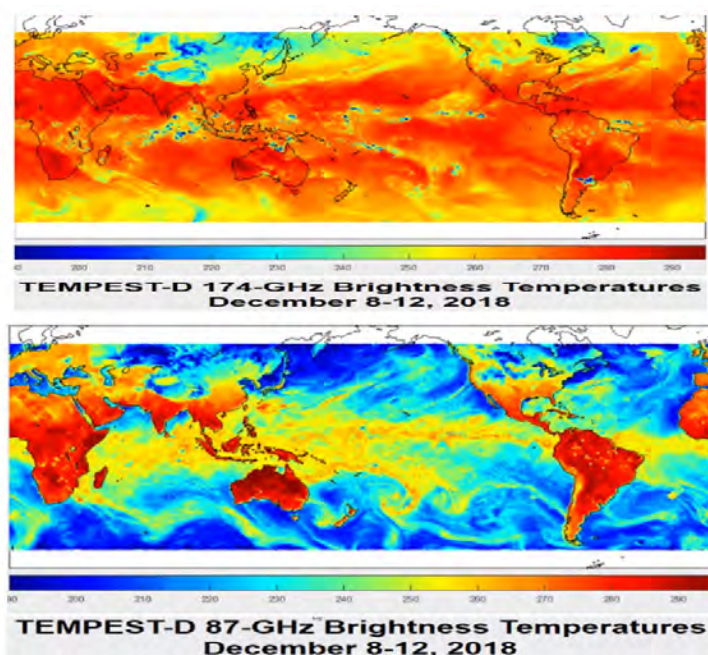


图8 TEMPEST-D两个不同频段获取的2018年8—12日全球亮温分布

准确性和稳定性，与大卫星上仪器保持了一致性。按照初始计划，试验成功后，将部署8颗TEMPEST系列CubeSat星构成星座，形成高时间分辨率小卫星毫米波对地遥感观测系统。

除TEMPEST计划外，NASA的“地球风险仪器(EVI-3)”计划还支持了由6个3U-CubeSats组成的微波星座项目TROPICS，原计划在2019年发射，现已延迟到2021年。该计划的技术实现以麻省理工学院(MIT)林肯实验室(LL)开发的微型微波卫星2(MicroMAS-2)为基础，每颗星上装有一个高性能微波辐射计，类似于美国NOAA-20卫

星上安装的高性能微波探测器ATMS(Advanced Technology Microwave Sounder)，使用91~205 GHz的12个频段通道，重复观测周期约半小时，可以提供几乎全天候的大气三维温度、湿度以及云冰和降水结构的信息。而NOAA也在支持发展类似的观测微波小卫星星座项目(EON-MW The Earth Observing Nanosatellite-Microwave)，同样由林肯实验室承担研制，采用与ATMS类似的四个波段的22个微波频道，是一组由8颗12U级CubeSat立方星构成的观测星座，原计划于2020年发射。正是由于微波探测器在大卫星上取得的成功，使其成为发展小卫

星星座所优先选择的载荷之一。

3.4 高光谱小卫星

在被动遥感的有效载荷中，除微波探测资料外，根据ECMWF的分析，气象卫星中红外高光谱信息对改进数值预报模式性能的作用位列第二，如2002年5月NASA发射的Aqua卫星安装了先进的大气红外探测器AIRS，可以通过2378光谱通道提供高质量的大气温、湿、云、气溶胶、臭氧等大气廓线结构信息，在各国全球数值预报模式发展和遥感资料分析中得到广泛应用，评价很高。而如何将这样的高性能、高造价的设备通过改造安装到小卫星上，通过低成本的替代方案解决时间分辨率的问题，显然是极有价值的发展选项。NASA的JPL已经开始研制这样的6U级小卫星CIRAS(CubeSat Infrared Atmospheric Sounder)，设计指标接近于AIRS且有了初步成果。

3.5 雷达小卫星

2018年5月与TEMPEST-D一起通过国际空间站发射的还有另外一颗6U级立方体试验小卫星RainCube，与TEMPEST-D不同的是这颗星是主动遥感小卫星，有效载荷是NASA喷气动力实验室(JPL)研制的Ka波段(35.75 GHz)测雨雷达。RainCube于6月正式进入轨道，7月28日，超轻、紧凑型Ka频段天线成功展开，8月27日首次对降雨系统进行了观测。RainCubezhu6主要试验任务是在大型卫星(如全球测雨卫星GPM)已实现的测雨雷达系统小型化，安装在小卫星上运行，通过构建星座实现对降雨系统高时频重复观测，解决广大洋面和其他地基雷达无法覆盖区域的主动遥感观测问题。同时，RainCube的试验成功，也为在小卫星上发展更为先进的雷达载荷打下了基础，美国NASA正在研发更为先进的用于小卫星的三频多普勒雷达系统MASTR(Multi-Application Smallsat Tri-band Radar)，同时通过Ku、Ka和W波进行探测，获取更为丰富的云和降水信息(图9)。

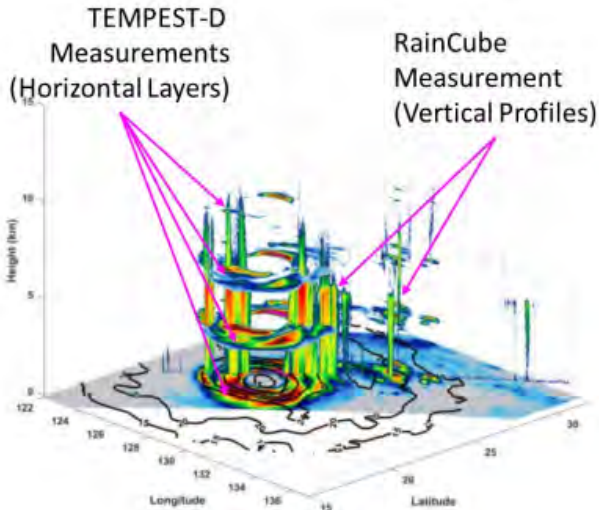


图9 TEMPEST-D与RainCube协同观测台风特拉米 (Trami)



图10 太空中的ICESat-2探测示意图

3.6 激光小卫星

另一类主动遥感小卫星的有效载荷是激光雷达，如美国NASA冰冻圈科学计划支持发展的小卫星ICESat-2 (Ice, Cloud and land Elevation Satellite) 于2018年9月15日成功发射(图10)，搭载了先进地形激光测高仪系统(ATLAS)，是继2003年发射的ICESat-1后第二代激光测高小卫星，重155 kg，通过发射3组6个激光束对地表目标物扫描，设定的4个科学目标为：通过测量冰盖融化情况并研究对海平面上升的影响；测量并研究冰盖和冰川的质量变化；估算和研究海冰厚度；测量全世界森林和其他生态系统中的植被高度。通过这些监测和研究掌握因气候变化对冰冻圈和生态圈造成的影响情况，同时还可以测量云和气溶胶分布结构。2019年6月，NASA已通过网站正式发布

了ICESat-2的观测数据。从激光的应用范围看，远不止测高，而高度测量小卫星的成功发射和应用，显然有助于为其他功能的实现提供示范，如NASA已将原准备配备在无人机上的一种紧凑型模块化激光雷达系统设计为可用于小卫星平台，该系统可以测量大气水汽、气溶胶、甲烷等大气成分的垂直分布结构。

4 小结

以上介绍了部分气象小卫星发展情况，包括已经发射成功的和正在研发的小卫星项目，主要反映的是美国的部分情况。实际上，包括中国在内的许多国家都开始在这一领域发力，参与到气象小卫星发展进程中，已发射成功和正在研发的小卫星项目还很多。2018年12月29日，我国成功发射的云海二号卫星，是由6颗小卫星组

成的星座，承担大气掩星探测任务，并于2019年10月部署完毕，可以提供探测资料。2019年6月5日我国在黄海海域成功完成“一箭七星”海上发射技术试验，其中有两颗就是用于气象的捕风小卫星，类似于美国CYGNSS星座的功能，通过对接收到的信息进行分析处理，达到了预期指标。2020年1月15日，由天津宇宙宇航科技有限公司研制的国内首个商业GNSS掩星探测小卫星在太原卫星发射中心发射升空并成功入轨，这一计划的目标是实现由80颗小卫星构成的全球组网星座。

从国内外小卫星的发展态势，不难分析得到以下结论。

1) 根据近年来航天技术的发展趋势和航天器发射数量比例变化情况来看，小卫星的发展显然已占据了重要位置，可以独立构成星座，完成特定任务，也可以与大卫星形成互补，解决大卫星难以解决的问题，要对这一变化趋势予以足够关注。

2) 推进小卫星的发展，需要从标准、法规、政策、机制等方面入手，调动企业、学校、科研院所等更为广泛的参与，构建与政府主导的大卫星发展有所不同的模式，调动全社会的积极性加速推进小卫星的发展，满足更多不同层面的需求，同时也有助于航天科技的普及。

3) 小卫星的制造和发射比大卫星简单，成本低、周期快，但构成星座的小卫星资料处理则要复杂得多，需要在地面资料应用环节组织更多力量，完成质量控制、效果评估、科研应用等重要环节，提升小卫星发展效益，这些工作更应尽早启动。

4) 气象小卫星发展已有许多成功的示范案例，要加强科技引导与投入，注意跟踪国内外在大卫星和小卫星领域的成熟技术发展，积极参与国际技术交流，吸取发达国家已发展多年的经验教训，缩短技术研发与转化环节。

深入阅读

- 李同玉, 彭昆雅, 2019. 中国首次海上发射技术试验综述. 中国航天, (6): 6-12.
- 唐亮, 刘鸿鹏, 何慧东, 2019. 全球小卫星现状及发展. 国际太空, (6): 36-41.
- 童兴, 2001. 小卫星如何按重量分类. 国际太空, (8): 7.
- Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, et al, 2010. The ICESat-2 laser altimetry mission. Proceedings of the IEEE, 98(5): 735-751.
- Blackwell B, Pereira J, 2015. New small satellite capabilities for microwave atmospheric remote sensing: the earth observing nanosatellite-microwave. (2015-08-08). <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3292&context=smallsat>
- Blackwell W J. et al, 2019. Microwave atmospheric sounding CubeSats: from MicroMAS-2 to TROPICS and beyond. Ninth Conference on Transition of Research to Operations, Phoenix, January 6-10, 2019. Boston: AMS.
- Carlis D N L, McLean C, Cortinas J V, 2018. Implementation of the weather research and forecasting innovation act of 2017 at NOAA. AGU Fall Meeting 2018, Washington, December 10-14, 2018. Washington: AGU.
- Crusan J, Galica C, 2019. NASA's CubeSat Launch Initiative: enabling broad access to space. Acta Astronautica, 157: 51-60.
- English S, McNally T, Bormann N, et al. Impact of Satellite Data. Reading: ECMWF, 2013.
- Im E, Peral E, Sanchez-Barbety M, et al, 2017. The next generation of spaceborne radars for cloud and precipitation measurements. Pasadena: NASA.
- Irisov V, Nguyen V, Duly T, et al, 2020. Accomplishments and plans of spire's growing constellation of GNSS RO CubeSats. 100th AMS

- Annual Meeting, Boston, January 12-16, 2020. Boston, AMS.
- Mehrpourvar A, Pignatelli D, Carnahan J, et al, 2014. Cubesat Design Specification Rev 13. California: The CubeSat Program, California Polytechnic State University.
- Nehrir A R, Rory A, Kooi S A, et al. Airborne lidar observations of water vapor profiles and planetary boundary layer heights-prospects for future SmallSat missions. 100th AMS Annual Meeting, Boston, January 12-16, 2020. Boston: AMS.
- Pagano T S. Technology advancements and concepts for IR grating spectrometer sounders for CubeSats and SmallSats at NASA JPL. 100th AMS Annual Meeting, Boston, January 12-16, 2020. Boston: AMS.
- Peral E, Tanelli S, Statham S, et al, 2019. RainCube, the first spaceborne precipitation radar in a 6U CubeSat. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4377&context=smallsat>.
- Reising S, Gaier T C, Kummerow C, et al, 2017. Temporal Experiment for Storms and Tropical Systems Technology Demonstration (TEMPEST-D) Mission: Enabling time-resolved cloud and precipitation observations from 6U-class satellite constellations. 31st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, August 5-10, 2017. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3609&context=smallsat>.
- The CYGNSS Team. Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS). (2018-04-11). https://essp.nasa.gov/essp/files/2018/04/17790-LL-01-R0-C1_CYGNSS-Lessons-Learned_4-11-18.pdf.

(作者单位: 中国气象局)

2030年的气象界是什么样子——《国际气象技术》为你描述

■ 贾朋群 编辑

2010年创刊的气象技术类期刊《国际气象技术》，在其十周年纪念刊中，邀请了来自多个国家的10位专家，就10年后世界气象界的模样，以及支撑这些改变的技术做出预测。这些专家既有美国气象局长、ECMWF技术团队这样的政府官员和研发人员，更多的是来自企业和组织具体实施气象研发的人员。在他们的回答中，除了地球系统、AI和最新卫星技术等多人提及的内容之外，本文就其他颇有新意的观点进行介绍。

(1) 一方面，全球气象界(GWE)之间的合作从未如此密切并且正在加速发展，公私合作伙伴关系正在上升期，并正在以多种不同的形式进行尝试；另一方面，随着私营部门能力提升，在某些领域，私营部门将成为国家气象水文部门目前正在开展的某些业务的对手。政府组织正在深层次上向私企开放，不仅仅是硬件和技术的提供者，而且还包括服务和数据。数值天气预报系统在走向开放，计算机代码开源分享。许多服务甚至跨越政治边界，在全球范围内提供。

(2) 公共-私营在气象发展中扮演的角色及其转化的一个极好的例子，是NOAA目前的执行局长尼尔·雅各

布斯。执掌NOAA前他在松下任职，利用TAMDAR飞机探测数据做出的一些出色预测。在一项名为国家中尺度网计划的支持下，松下继续向NOAA提供先进的全球飞机气象数据，以改善美国国家气象局的预报。随着装载TAMDAR的飞机在北美近300个机场起飞和降落，风、温度和湿度便可实现每五秒钟观测一次。学术界与政府合作的一个例子是业内熟知的WRF-Hydro模式已

(下转42页)



北极臭氧洞

■ 陆龙骅

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.002

2020年由于北极地区大气环流异常,春季平流层极涡中温度持续偏低,平流层冰晶云面积也创新高,臭氧的化学损耗更大,低值低于220 DU,故而首次出现了臭氧洞。在目前大气环境被污染的情况下,南极臭氧洞的变化和北极臭氧洞是否出现等,取决于南北两极春季平流层极涡及其低温状态的变化。2020年春季,首个北极臭氧洞出现与春季平流层极涡的持续低温有关,是由大气环流等自然因素引起的,并无环境指示意义。

大气臭氧层是地球生命的保护伞,它的变化对地球生态系统和大气环境有重要影响。自20世纪80年代中期发现春季南极臭氧洞以来,每年春季南极地区都会出现臭氧洞;而在北极春季,直到2019年均未出现过臭氧洞,只有2020年,才首次出现北极臭氧洞。如图1所示,在2020年3月12日蓝色区域为臭氧低值区,其中最低值为205 DU,而在2019年的同期,北极地区却为臭氧高值区。2020年4月中下旬,北极地区臭氧低值升至220 DU以上,北极臭氧洞不复存在。那么,相对于南极,为什么北极臭氧洞直到2020年才出现呢?

北极臭氧的化学亏损和北极臭氧洞

北极是更加接近人类活动的

地区,北极大气中污染物的浓度也比较高,与南半球相比污染更为严重;但南北半球的海陆分布差异等对气候和大气环流也有很大影响。无论冬季还是春季,北极平流层极涡中的温度都比南极高,特别进入春季以后北极极涡很快崩溃、温度升高。春季,当极夜后太阳光再次照耀北极地区时,平流层极涡中的温度大都在 -78°C 以上,很难满足形成平流层冰晶云的必要条件;另外,在春季,北极地区臭氧总量通常为400~500 DU的高值区(图2和图3),故在2019年以前北极春季没有出现臭氧洞。

在1997、2011和2020年春季,北半球春季平流层极地涡旋中温度异常偏低,大气臭氧的化学亏损严重,都出现了闭合的低值区,

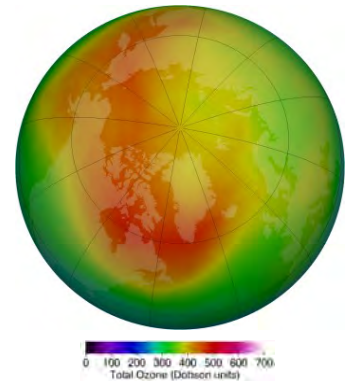


图2 1979—2018年3月北极臭氧化^①

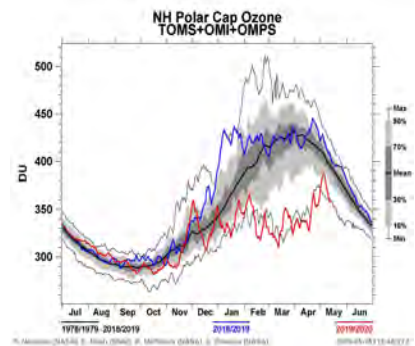


图3 北半球极冠地区大气臭氧总量的年变化^①

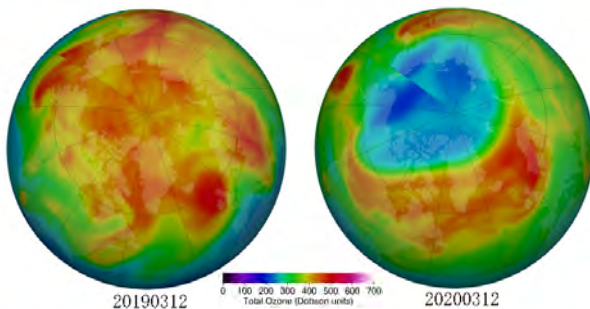


图1 2020年3月12日的北极臭氧^①

只是1997和2011年最低值未低于220 DU,尚未达到出现臭氧洞的标准。而2020年由于北极地区大气环流异常,春季平流层极涡中温度持续偏低(图4),平流层冰晶云面积也创新高(图5),臭氧的化学损耗

作者:陆龙骅(1942—), Email: 13661204042@163.com

资助信息:国家自然科学基金(41076132, 41941012);中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100300);中国气象科学研究院基本科研业务费(2019Z005)

① 引自<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>。

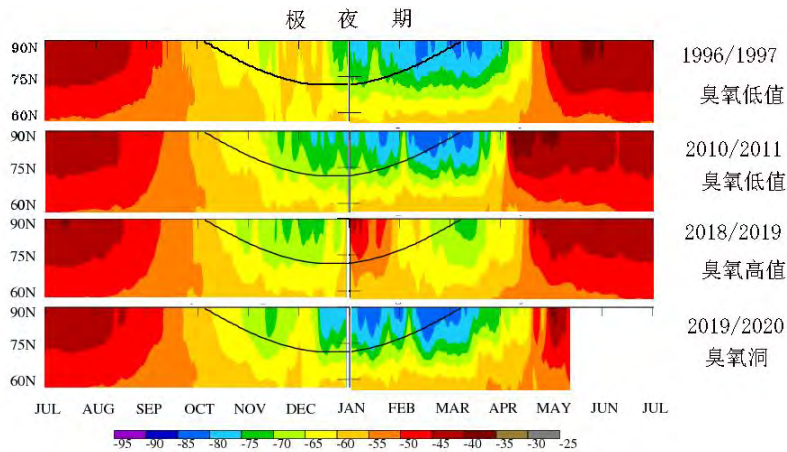


图4 臭氧异常年的北极平流层(50 hPa)温度变化^①

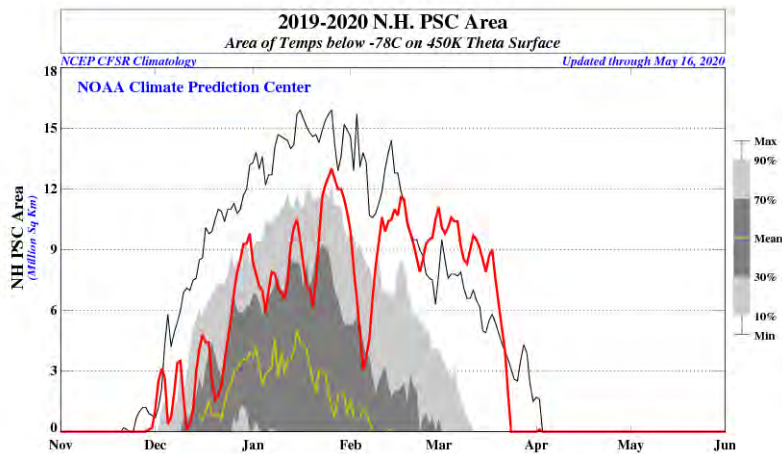


图5 2019—2020年北极地区PSC面积^①

更大, 低值低于220 DU, 故而首次出现了臭氧洞。

在目前大气环境被污染的情况下, 南极臭氧洞的变化和北极臭氧洞是否出现等, 取决于南北两极春季平流层极涡及其低温状态的变化。2020年春季, 首个北极臭氧洞出现与春季平流层极涡的持续低温有关, 是由大气环流等自然因素引起的, 并无环境指示意义。

臭氧层保护是长期任务

天气和气候是两个不同的概念, 正如在全球变暖的大背景下, 不能因某一年偏冷就认为气候在变冷; 同样, 也不能因某一年南极臭氧洞偏小或出现了北极臭氧洞, 就认为臭氧洞已被修复或环境条件变差。从总体上来说, 氟利昂等主要ODC已被禁止生产和使用, 大气中污染物质浓度增长的速度在减慢, 南极臭氧洞的面积将继续保持稳定, 然后开始缓慢减小, 到2070年后才有可能恢复到1980年的水平。但鉴于有报告称CFC-11排放自2005年以来并未出现预期的下降, 如果近期三氯氟甲烷(CFC-11)的排放增长持续下去可能会让南极臭氧洞的恢复时间延迟10年以上。

深入阅读

- 卞林根, 林忠, 郑向东, 2011. 南极臭氧洞的影响因子和变化趋势. 气候变化研究进展, 7(2): 90-96.
- 贾朋群, 2014. 他曾让NASA和卫星探测陷入尴尬——记发现南极臭氧洞的英国科学家法曼. 气象科技进展, 4(6): 106-110.
- 陆龙骅, 2008. 春季南极臭氧洞与环境保护. 科学, 60(2): 15-18.
- 陆龙骅, 2012. 臭氧与臭氧洞. 自然杂志, 34(1): 24-28.
- 陆龙骅, 2016. 北极为什么没有臭氧洞. 人与生物圈, (1): 22-27.
- 陆龙骅, 2016. 南极臭氧洞的发现、研究和启示. 气象科技进展, 6(3): 89-96.
- 陆龙骅, 2019. 南极臭氧洞: 今年怎么又小了? 知识就是力量, (2019-12-27).

- Chubachi S, 1984. Preliminary result of ozone observations at Syowa station from February 1982 to January 1983. Mem Nati Inst Polar Res, 34: 13-19.
- Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D, 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. Nature, 315: 207-210.
- Solomon S, 1999. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. Reviews of Geophysics, 37(3): 275-316.
- Stolarski R S, Krueger A J, 1986. Nimbus-7 satellite measurements of the spring time Antarctic ozone decrease. Nature, 332: 808-811.

(作者单位: 中国气象科学研究院)

① 引自<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>。

干旱遥感监测技术进展

郭锐 王小平 王玮 王丽娟 胡蝶 沙莎

(中国气象局兰州干旱气象研究所/中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020)

摘要: 简单回顾了卫星遥感在可见光、热红外、微波、重力卫星、高光谱、叶绿素荧光、无人机以及多源遥感技术和大数据挖掘等领域的干旱监测技术; 对各种指数(模型)应用中存在的问题进行评述; 指出卫星遥感干旱面临的主要技术问题, 并结合国家和气象行业需求提出研究对策及学科建议。

关键词: 干旱, 卫星, 遥感, 干旱指数, 对策建议

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.003

Review of Drought Monitoring Based on Remote Sensing Technology

Guo Ni, Wang Xiaoping, Wang Wei, Wang Lijuan, Hu Die, Sha Sha

(Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration/ Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration/ Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Lanzhou 730020)

Abstract: In this paper, we reviewed and summarized the drought monitoring technology of satellite remote sensing in the fields of visible light, thermal infrared, microwave, hyperspectral, chlorophyll fluorescence, UAV, and multi-source remote sensing technology and big data mining; evaluated and discussed the various problems existing in remote sensing drought indices and models; indicated the main technical problems of satellite remote sensing drought monitoring and the future development opportunities, and put forward the main problems to be solved and the development direction in view of the current situation of China's satellite remote sensing drought application.

Keywords: drought, satellite, remote sensing, drought index, suggestions

0 前言

干旱是全球各地普遍发生的、对人类社会影响最大、给社会造成的经济损失十分严重的一种自然灾害^[1]。随着全球气候变化, 干旱灾害也呈进一步加强趋势, 发生频率和范围进一步增大, 严重威胁着全球的粮食安全和社会稳定^[2-3]。因此, 科学有效的干旱监测与预警不仅是科学界致力解决的重大科学问题^[4-5], 也是人类社会应对气候变化亟待解决的技术难题。

国内外根据干旱过程发生的顺序和影响将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱。

基于地面气象和水文观测数据以及农业气象墒情观测建立的多种干旱指标是干旱监测的主要工具。近40年来迅速发展的全球对地观测技术为从空中进行大范围、动态、无缝隙监测干旱提供了有效的数据源。利用地面观测、卫星遥感及数值模式同化技术, 国内外建立了多个干旱监测与预警业务系统, 基本实现了大范围干旱的定量监测^[6-9]。

本文围绕不同的遥感干旱监测方法及多源遥感技术和大数据挖掘在干旱监测方面的进展进行评价, 在此基础上结合国家和行业需求提出研究对策及学科发展展望。

1 遥感干旱监测方法

遥感监测干旱主要是侧重于农业干旱监测。农业干旱受到降水、土壤含水量、作物需水等因素的影响, 土壤含水量变化是影响农作物长势的主要因子^[10]。遥感图像表现为不同的光谱特征, 干旱发生会引起作物体内生理生化参数的变化, 光谱会相应变化, 故以此来监测农业干旱。根据遥感数据源的差别

收稿日期: 2019年9月15日; 修回日期: 2020年4月30日
第一作者: 郭锐(1963—), Email: guoni0531@126.com
通信作者: 王小平(1975—) Email: xiaopinwang@163.com
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001-5); 甘肃省气象局气象科研项目(ZcZd2020-21); 风云三号(02)批气象卫星地面应用系统工程应用示范项目(FY-3(02)-UDS-1.5.2); 风云四号科研试验卫星地面应用系统工程应用项目

可将遥感监测方法分为光学遥感监测法（包含了可见光—近红外遥感监测法、热红外监测法、可见光近红外—热红外遥感监测法），高光谱遥感监测法，微波遥感监测法及多源数据综合干旱监测方法等。

1.1 可见光、近红外及段波红外监测法

干旱会引起土壤含水量、作物生理的变化，可见光—近红外遥感主要利用植被指数来监测植被生长状态和土壤水分含量。从作物在不同干旱状况下的光谱曲线中可以发现，干旱明显导致作物在可见光波段（红光波段最明显）反射率上升以及近红外波段反射率下降，干旱程度越重这种变化幅度越大^[11]。基于植被的这种特性，构建了归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI），该指数能够反映植被对水分条件的响应，是最早应用于干旱监测的指数，也是构建其他基于植被指数的干旱指数的基础，应用十分广泛^[9, 12-13]。由于NDVI会受到大气状况、双向反射辐射、土壤和叶冠背景的影响，且存在高生物量区发生饱和的问题，因此增强型植被指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）^[14]、土壤调节植被指数（Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI）^[15]等指数被提出，后期大量研究将其用于干旱监测^[9]。

由于植被与当地地理气候和植被分布及生长规律密切相关，在空间上不具备可比性。因此，基于长时间序列植被指数，距平植被指数（Anomaly Vegetation Index, AVI）^[16]、植被状态指数（Vegetation Condition Index, VCI）^[17]等被提出进行干旱监测研究，AVI和VCI较NDVI有更好的时空可比性，在大范围的干旱监测中得到广泛的应用^[18-21]。这类指数的特点是计算简单，但由于植被指数对缺水响应的滞后导致它们具有一定的时间滞后性。

1.2 热红外遥感监测法

植被在缺水时，除了植被指数会发生变化之外，叶片温度会因为缺水而迅速升高，这种变化要比植被指数变化出现的早且敏感。基于植被的这种生理特性，陆地表面温度（Land Surface Temperature, LST）被用于干旱监测中。基于LST构建的干旱指数主要包括热惯量法、温度状态指数等。

土壤热惯量是描述土壤热惰性大小的物理量，是土壤阻止其自身温度变化能力的大小表征，与土壤水分的关系密切。对于同一类土壤而言，含水量越高其热惯量就越大。基于这一物理过程，多种热惯量模型^[22-26]被建立起来，但在实际中，表现热惯量（Apparent Thermal Inertia, ATI）应用的最为广泛，但该指数仅适用于裸地和低植被覆盖区的土壤，具有

较大的局限性。

与VCI指数类似，通过引入LST的历史信息，Kogan构建了温度状态指数（Temperature Condition Index, TCI）^[27]，弥补了VCI滞后性较强的缺点。但受到诸如下垫面状况、海拔高度、卫星过境时间差异以及地表热平流等因素的影响，TCI监测干旱存在不确定性。

1.3 可见光近红外—热红外遥感监测法

由于单独使用植被指数或者地表温度的诸多局限，研究者将植被指数和地表温度结合起来应用于干旱监测研究。这类指数主要包括植被健康指数（Vegetation Health Index, VHI）、植被供水指数（Vegetation Supply Water Index, VSWI）、温度植被干旱指数（Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI）等。

VHI^[27]是最早被提出的，它由植被状态指数和温度状态指数加权得到，计算简单，可用于大范围区域干旱监测^[28-30]，目前VHI仍是美国NOAA STAR（NOAA Center for Satellite Applications and Research）与美国国家干旱减灾中心（National Drought Mitigation Center, NDMC）的重要干旱监测产品。

VSWI^[31-32]基于NDVI和LST的比值构建而成，该指数在监测应用中更适合地形平坦、植被覆盖度较高的地区与时段，且统计模型受时空尺度的限制，监测结果不具有时空可比性。

研究表明，以植被指数—地表温度构成的特征空间与土壤水分状况关系密切：LST与NDVI的斜率与作物水分指数、土壤水分呈负相关，且LST/NDVI随干旱强度增强而增大^[33-35]。LST与NDVI的斜率与土壤水分的负相关关系是特征空间中的重要统计特征，基于这种特征，Sandholt等^[36]构建了TVDI指数和VTCI指数^[37]，二者的关系为 $TVDI = 1 - VTCI$ 。由于物理意义明确，这类指数在干旱监测领域得到了广泛的研究和应用^[38-40]。但这类指数是在一种理想的特征空间中且LST与NDVI的斜率与土壤水分的负相关关系下提出的，在实际中很难获取适合大小的研究区域以满足理想特征空间的要求，因此在实际应用中这类方法也存在诸多不确定性。由于NDVI的局限性及海拔等因素等对LST的影响，对这类指数的改进主要包括：利用EVI、比值植被指数（Ratio Vegetation Index, RVI）等其他植被指数替换NDVI构建特征空间以克服NDVI在高植被覆盖区指示干旱较差的情况^[41-42]；利用海拔高度对LST进行订正后构建特征空间以消除对高海拔地区旱情估计偏低的假象^[43]；利用多时次遥感数据构

建特征空间以提高TVDI指数的时间可比性^[44]。

基于植被受到干旱胁迫时植被在可见光和近红外特征空间中的特性，一些新的干旱指数，如垂直干旱指数（Perpendicular Drought Index, PDI），修正垂直干旱指数（Modified Perpendicular Drought Index, MPDI）^[45]得到了较多应用，PDI适于裸地或者低植被覆盖区域的干旱监测。为了提高PDI在高植被覆盖区域的监测精度，Ghulam等^[46]引入植被覆盖度，对PDI进行了改进，提出了MPDI。相关研究表明，在裸地或稀疏植被地表PDI和MPDI的干旱监测精度相当，而高植被覆盖时，MPDI的监测结果远好于PDI^[47]。

1.4 综合干旱指数

基于单一的遥感干旱指数往往难以达到干旱监测的精度要求，因此许多学者将各种干旱指数进行综合，构建了新的干旱指数。Zhang等^[48]应用PDI和VSWI构建的基于MODIS数据修正干旱指数（Modified MODIS-based Index, MMI），根据作物生育期建立了MMI与站点土壤湿度的回归模型，结果表明建立的MMI与土壤湿度观测的相关关系非常好，是一种非常适合研究区精确反演土壤湿度信息的遥感方法。Amani等^[49]基于由LST、垂直植被指数（Perpendicular Vegetation Index, PVI）、土壤湿度构成的三维特征空间，构建了温度植被土壤干旱指数（Temperature-Vegetation-soil Moisture Dryness Index, TVMDI），TVMDI与土壤温度、NDVI、SM均显著相关，其中与SM的相关性相对较差，相较PDI、MPDI、MPDI1、TVDI等指数，TVMDI指数的反演精度更高。

1.5 遥感蒸散干旱监测

蒸散是蒸发和蒸腾的总和，作为水热交换的重要参数，参与地表水分循环和能量平衡过程，是土壤—植被—大气系统相互作用的关键因子。由于地表水分条件的限制，实际蒸散与蒸散潜力之间存在偏差，所以，往往可以利用这种偏差来表征区域的土壤水分状况，遥感蒸散干旱监测亦是基于这种思想进行研究^[50]。蒸散遥感反演的方法是以能量平衡和水平衡方程为出发点，主要有经验模型、单层模型、双层模型和多层模型。

经验模型简单、易实现，但具有一定的经验性，在普适性方面受到限制。单层模型未区分植被和土壤，将地表假设为一叶，对土壤—植被间的相互作用进行高度简化，致使模型输入参数较少，计算简单、快捷，从而在蒸散遥感反演中应用广泛^[51]。与经验模型相比，单层模型具有更加明确的物理意义。双层模型考虑土壤—植被的相互作用，将蒸散区分为植

被冠层蒸散、土壤蒸发^[52]。与单层模型，双层模型分离了土壤和植被，分别考虑土壤和植被冠层，以及两者之间的水热交换过程，将土壤—植被—大气之间的水热交换机制描述得更为详尽。基于双层模型得到的地表、冠层胁迫指数能够分别反映气象、农业干旱状况，是目前美国全境干旱监测产品生产的基础^[53]。与双层模型相比，多层模型将植被冠层描述得更为详尽，但由于模型输入参数较多和不易获取性，导致多层模型应用受到限制。

随着我国第二代静止轨道气象卫星——FY-4系列静止卫星的成功发射，双层模型对卫星资料高时间频次的需求得到满足。FY-3号03批业务星将形成由晨昏星、上下午星和降水星组成的星座体系，并首次搭载主动微波传感器（风场测量雷达（Wind RAD）和降水雷达（PR）），可提供高精度的降水和土壤水分产品数据，为双层模型中土壤水分平衡参数化方案的优化提供依据。FY-3和FY-4的联合观测将为我国使用双层模型生产高精度、实时蒸散干旱监测产品奠定基础。

1.6 微波遥感干旱监测

相比光学遥感存在云的影响问题而言，微波遥感最大的优势就是对云、雨、大气有较强的穿透能力，具有全天时、全天候的监测特点。随着越来越多星载微波传感器的发射，微波遥感可在全球尺度上精确监测地球系统中诸多要素，具备研究干旱等气候灾害的能力。

1.6.1 微波遥感降水监测方法

目前，卫星遥感技术是测量全球尺度降水率分布的唯一可行方法^[54-56]。热带降雨测量卫星（Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM）提供的长时间序列多卫星降水分析产品（Multi-satellite Precipitation Analysis, TMPA）为开展区域尺度干旱监测研究提供重要数据，其中，第7版本的TMPA产品精度在干旱区及高原地区有所提高^[57]。非实时的3B42V7产品与地面站点观测数据在月尺度上具有相当精度^[58-60]。因此，该产品在干旱监测中应用广泛。Naumann等^[61]和Sahoo等^[62]利用TRMM数据监测非洲、美国和欧洲等地区的干旱状况，并用标准化降水指数（SPI）进行验证，表明TRMM降水产品能够在时间和空间上准确识别干旱，其监测具有更高的空间精度。冯海涛等^[63]和陈诚等^[64]利用TRMM降水产品构建Z指数分别对云南省和中国黄淮海地区的干旱时空演化特征进行监测，结果表明，Z指数在云南省监测的15年旱情及早灾实例时空特征与实情相符；利用Pa指数对Z指数干旱等级

划分进行修正后, 该指数在黄淮海地区的干旱监测同SPI的相关系数达 $R^2 > 0.75$, 进一步证明了TRMM数据对于干旱监测的有效性和可靠性。胡蝶等^[65]基于TRMM月降水产品构建了降水距平百分率(Pa_{TRMM})和降水状态指数(PCI_{TRMM})对我国西北地区的甘肃省干旱情况进行监测, 结果表明这两个干旱指标均能有效、直观地反映干旱时空分布及变化特征。同时, TRMM遥感降水数据还可弥补我国西北地区实测站点空间分布不均及插值数据存在较大误差的问题。

TRMM卫星已于2015年4月停止业务运行, 全球降水观测GPM(Global Precipitation Mission)是TRMM的后续卫星。GPM是由一个核心卫星和多颗微波小卫星组成的国际卫星观测网提供覆盖全球的降水观测, 能够提供更高精度的3D云微物理结构, 提供全球范围基于微波的3 h以内和基于微波红外的0.5 h的雨雪数据产品。具有更高精度、更大覆盖范围和更高时空分辨率的GPM降水产品对全球天气预报将有划时代的影响, 可进一步提高对洪水、泥石流和干旱等预报预警技术。

1.6.2 微波遥感土壤水分监测方法

微波波段是电磁波谱中唯一能够真实量化估算地表土壤水分的电磁波谱频段, 微波遥感反演地表土壤水分的方法主要有两种, 一是基于微波辐射计的被动反演法, 二是基于雷达或散射计的主动微波反演法。

被动微波反演土壤水分: 被动微波是通过亮度温度来估算土壤水分, 亮度温度主要由发射率和地表有效辐射温度决定, 而发射率与土壤复介电常数紧密相关, 通过土壤复介电常数与土壤水分之间的物理关系即可根据亮度温度反演土壤水分。

常用的被动微波辐射计有SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)、Aqua卫星搭载的高级微波辐射计AMSR-E和FY-3卫星搭载的微波成像仪MWRI。AMSR-E传感器积累了2002年6月—2011年10月全球25 km空间分辨率的土壤水分数据产品, 由于天线旋转故障, 于2011年10月停止工作。GCOM-W1卫星搭载的第二代先进微波辐射计AMSR2于2012年5月发射成功。AMSR2增设了频率为7.3 GHz的两个通道, 降低了无线电射频干扰的影响, 可得到更精确的土壤湿度分布^[66-67]。但低频波段C、X和Ku波段对植被的穿透深度有限, 仅适用于裸土和低矮植被地区。SMOS是首颗利用干涉测量方法测量地球表面发射L波段的被动微波辐射计, 由欧空局在2009年11月发射。由于L波段对植被具有更好的穿透性和对土壤水分更敏感,

可进行多角度观测, 是目前能够提供可靠性和精度更高的传感器^[68-69]。

针对以上产品, 不少学者在全球不同地区开展了精度检验和反演算法改进等研究^[70-72]。李哲等^[73]采用修正的单通道算法(SCA)模型, 应用AMSR-E土壤表层亮温数据, 建立了高原地区土壤湿度反演模型反演青藏高原夏季土壤湿度, 结果表明修正SCA模型反演的土壤湿度精度更高。陆峥等^[74]利用实测土壤水分数据集, 检验了AMSR2两个算法土壤水分产品在黑河流域的精度, 结果表明JAXA和LPRM土壤水分产品的均方根误差均超过 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。庄媛等^[75]以自动土壤水分观测站土壤湿度作为验证数据, 对2012年中国区域ASCAT、WINDSAT、FY-3B、SMOS共4种微波遥感土壤湿度产品按省份进行了评估研究。结果表明: ASCAT质量最优, 在中国大部地区与观测数据相关系数较高; WINDSAT其次, 质量优于FY-3B; 而SMOS在中国大部分地区质量差, 受无线电频率干扰严重。

被动微波具有高时间分辨率, 对土壤水分更为敏感性和数据处理简单等优势。但目前受限于空间分辨率和观测波段, 很大程度上影响到数据的验证和有效利用。

主动微波反演土壤水分: 主动微波通过地表后向散射系数来反演土壤水分。地表后向散射系数主要受地表复介电常数、地表粗糙度和植被性质的影响, 而复介电常数主要由土壤水分决定, 因此可以用于土壤水分的反演。

主动微波传感器主要包括合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)和散射计2种。应用于土壤水分反演研究的SAR主要有ERS-1/2、Radarsat、JERS-1、ENVISAT和Sentinel-1A。Pathe等^[76]应用ENVISAT ASAR数据反演美国俄克拉何马州地区的土壤水分发现该数据具有捕获空间细节时间变化的能力。Holah等^[77]和Zribi等^[78]利用ASAR数据分别对裸露农田土壤地表参数和非洲北部半干旱区土壤水分进行反演并检验, 均取得较好结果。田辉等^[79]利用ASAR影像估算了玛曲地区夏季土壤水分空间分布。胡蝶等^[80-81]利用Radarsat-2 SAR数据反演半干旱地区裸露地表土壤水分, 应用交叉极化组合模型较好反演了10~20 cm土壤含水量信息; 进一步结合MODIS数据应用水云模型校正植被的影响反演黄土高原地区植被覆盖下土壤水分, 取得较好结果。何连等^[82]结合基于变化检测的Alpha近似模型, 利用Sentinel-1卫星获取的多时相C波段SAR数据, 实现了农田地表土壤水分的反演。

主动微波数据具有米级高精度分辨率，在精细化土壤水分监测中提供有效监测手段。但存在重访周期长，费用高、数据处理复杂，反演模型的适用性有限等不足。目前主要用于科学研究，还未能广泛应用于全球地表土壤水分监测业务。

1.6.3 重力卫星监测干旱

地球重力场是一个反映地球表层和内部物质分布、变化及其运动状态的基本物理场，地球重力场指示的地球物理环境及其变化信息，为人类认识和解决自然资源、环境及灾害等问题提供基础数据。

美国宇航局（NASA）和德国航天局（DLR）共同研制了重力反演与气候实验卫星GRACE（Gravity Recovery and Climate Experiment），并于2002年3月成功发射。GRACE不仅为研究地球深层结构和跟踪地球表面质量变化提供了新技术，而且为反演陆地水储量及其变化提供了新手段。

多国学者应用GRACE反演的水储量信息进行不同区域的干旱特征的监测研究。Yirdaw等^[83]利用GRACE反演的水储量数据提出了总水储量亏损系数（TSDI），用来监测加拿大草原的干旱情况。Seoane等^[84]应用GRACE水储量数据、结合地面站点和水文模拟数据，分析了21世纪初澳大利亚东南部的干旱状况。Chen等^[85]应用GRACE反演的水储量结合气候模式，研究了2005年干旱期间亚马孙流域水储量的变化。李琼等^[86]研究表明2009年秋至2010年春中国西南云南、贵州、四川三省干旱事件发生期间的GRACE反演的西南地区水储量明显减少。曹艳萍等^[87]利用GRACE水储量变化数据确定了区域旱涝指标—相对水储量指数，应用该指数对新疆2002—2013年的干旱情况进行分析，结果与实际干旱灾害状况一致。

需要注意的是GRACE卫星空间分辨率为166 km，仅适用于大范围干旱的监测。GRACE继任卫星（GRACE Follow On）于2018年5月发射。GRACE Follow On重力卫星除搭载微波测距系统外，还搭载了观测精度达到纳米量级的激光测距系统，比微波测距的精度提升三个数量级。这有望进一步提高重力卫星的观测精度和空间分辨率，提升重力卫星对干旱的监测能力。

1.7 高光谱遥感农业干旱监测

1.7.1 高光谱遥感技术在农业干旱监测中的应用

近几十年来，高光谱遥感技术因其高光谱分辨率得到了快速发展，并成为一门新兴遥感技术^[88-89]。高光谱不仅融合了光谱与成像技术，而且能同时获取地物的光谱和空间信息，近年来高光谱遥感技术在精准

农业中得到了广泛的应用。

高光谱的光谱分辨率可达到纳米级，其独到的优势已经在定量遥感中发挥了重大作用，其应用领域也达到了前所未有的广度。在干旱胁迫的监测应用方面，也具备传统多光谱遥感没有的优势，能够捕捉到细微的干旱响应信号，在干旱监测中能更早地监测到植被的早期干旱^[90-92]。

植被光谱对水分和干旱胁迫信号的响应特征，是高光谱遥感进行植被含水量和干旱反演的基础^[93]。前期研究利用光谱的水分吸收特征进行植被含水量反演的结果证明，叶片含水量的光谱反演对于干旱监测具有重要指示意义^[94]。

对水分敏感的波段，前期有很多研究，主要集中在近红外和短波红外波段，比如970、1200、1450和1950 nm附近^[95-96]。利用这些特征，构建的水分指数有WI^[97]，SWIR^[98]，NDWI^[99]等。此外，因干旱胁迫导致植被生理生态改变，在光谱的响应方面也有很多新的尝试，如利用光能利用率PRI指数对水分胁迫的监测^[100-101]，利用水分吸收峰的深度和面积及光谱反射率差值或利用近红外与短波红外的组合进行水分含量的反演^[102-104]。

利用辐射传输模型分析光谱敏感性是非常重要的方法，应用较广的是PROSPECT和SAIL模型^[105]，PROSAIL冠层叶片耦合模型可以实现冠层光谱的前向模拟和生理参数的后向反演。结合PROSAIL模型可以分析不同生理参数对光谱的敏感波段，有利于开展不同干旱胁迫条件下作物生理参数的响应特征^[106-109]及敏感光谱波段和监测指数的机理性分析^[110-111]。

高光谱遥感技术在农业干旱监测中的应用，主要是通过直接或间接反演因干旱导致的生理生态参数进行。基于冠层辐射传输模型或光谱植被指数定期获取并反演干旱发生过程中的作物生长状况，间接反演干旱是目前常用的方法^[112]。

1.7.2 国内高光谱干旱监测存在的问题

高光谱遥感技术经过近30年的发展，不论是高光谱成像系统，还是基于“星—空—地”的多源遥感都取得了显著的进展，但是从应用角度看，我国在利用高光谱遥感监测与诊断作物水分胁迫方面，尚存在如下问题。

1) 常规的航空、航天高光谱遥感数据，由于受成本高、空间分辨率低、数据获取权限、研究区天气状况等众多因素的影响，在我国的应用仅局限于部分研究机构，在农作物水分状况监测领域的相关研究还十分有限。

2) 缺乏开展近地表、航空和航天高光谱遥感的综合研究, 难以进行作物水分胁迫状况的空间制图与动态监测。利用多源高光谱遥感数据, 构建“星—空—地”一体化农业遥感信息获取技术体系, 对准确及时获取农作物水分胁迫信息, 指导农田节水灌溉和精准农业的发展具有实际应用价值。

因此, 在地面观测研究中, 应充分考虑地面传统作物水分监测方法与卫星遥感反演中的空间尺度不匹配的问题, 建立能够贯穿作物生长全程的水分信息获取、校正、融合方法和决策模型, 重点关注“星—空—地”多源高光谱数据间的尺度关联性^[113-115], 改进卫星遥感数据反演作物冠层水分胁迫模型的精度, 实现较大面积农田作物水分胁迫状况的精准制图与动态监测, 对充分发挥高光谱遥感技术在精准农业研究中的作用具有实际应用价值。

1.8 基于低空无人机遥感平台干旱监测

1.8.1 基于低空无人机遥感平台的作物生长及水分胁迫状况精准制图

与普通的航空高光谱遥感探测平台相比, 基于小型无人机的高光谱成像系统对起飞环境要求简单, 成本低, 因此无人机载高光谱成像技术受到国内外学者的极大关注, 并在农业遥感应用方面有了快速发展。其中利用机载成像高光谱遥感监测与诊断农作物水分胁迫就是主要研究方向之一^[116]。

国外在基于UAV技术的植被水分胁迫高光谱遥感研究方面, 主要取得如下一些初步研究成果。

1) 在植被叶片及冠层水平上, 发现一些对植被水分含量高度敏感的基于光谱位置的特征参数、基于光谱面积的特征参数和基于波段组合的高光谱遥感监测指标。例如, 提出对植被叶片水分含量、植被表面冠层结构非常敏感的窄带绿度指数(如改进红边归一化植被指数等), 发现可度量植被在光合作用中对入射光利用效率的光利用率指数(如光化学植被指数、结构不敏感色素指数、红绿比值指数), 构建可估算植被水分亏缺的指数(如作物水分胁迫指数等指标)。

2) 基于多元统计分析方法和辐射传输理论, 构建部分作物水分含量的高光谱遥感反演模型, 在部分地区开展作物水分胁迫程度的时空动态模拟与制图研究。通过模型耦合或模型与植被指数结合方法, 建立的光谱模型(如Suits、SAIL和PROSPECT等), 恰当模拟叶片结构、植被冠层和生化组分等^[117]。由于水分含量在很大程度上决定着作物的产量和品质, 因此, 在作物水分含量的高光谱研究方面, 国外研究较为深

入, 相关研究报道较多^[118-119]。

我国在基于植被冠层及叶片水分敏感光谱波段的提取和组合, 对比光谱指数与植被水分含量之间的关系, 修正现有水分估算模型的参数等方面也取得了一些初步的研究成果^[120-124]。与国外相关研究比较, 我国在该领域的研究水平整体处于跟跑或者并跑状态, 并未取得可用于指导生产实践的成熟研究成果。

1.8.2 无人机技术与成像光谱的农业干旱监测发展趋势

1) 利用近年来广泛应用的无人机(UAV)技术和航空高光谱成像设备, 充分发挥图谱合一的优势, 更加灵活机动地获取作物冠层的高光谱遥感数据, 为探索多时空尺度作物水分含量的研究, 以及为改进卫星遥感反演作物水分含量模型的精度提供了更加丰富的数据源与技术支撑, 是航空高光谱遥感未来发展的趋势之一。

2) 采用星载、机载和近地面高光谱数据相结合的方式, 综合研究作物冠层水分含量的光谱特征, 探索作物冠层水分亏缺的高光谱遥感敏感指数、诊断方法及其监测模型, 实现较大时空范围作物水分胁迫状况的精准制图与动态监测, 对指导未来精准农业的发展具有实际应用价值。

1.9 叶绿素荧光遥感干旱监测

叶绿素荧光与植物的光合作用密切相关, 主要位于650~800 nm的红光和远红光区域^[125-126]。大量研究已表明, 植被光合作用过程中的荧光特性对植物的环境胁迫响应非常敏感^[127-128]。

受到干旱胁迫后, 植物的叶绿素含量一般会降低^[129-132], 反射光谱和荧光测量都可以捕捉到这些信号, 特别是荧光信号一般比叶绿素的下降更早体现出来, 因此更容易监测早期干旱胁迫的发生^[133], 这是叶绿素荧光遥感监测干旱的基础。

在水分胁迫监测中, 还经常用到激光诱导荧光技术。利用激光荧光雷达和调制荧光探测不同作物如玉米、甘蔗、高粱的叶绿素荧光产量结果表明, 荧光探测水分胁迫与辐射强度和作物种类有关^[134]。基于荧光成像技术探测叶片光合能力的结果表明, 利用蓝/红光波段的峰值比可以反演植物的水分状况, 正常和受胁迫叶片的差异明显^[135]。利用激光激发诱导荧光光谱的结果表明, 活力指数(Rfd)和胁迫适应指数(Ap)可以较好地指示植物胁迫信号^[136]。

以上不同荧光遥感技术的应用, 进一步扩大了遥感监测的范围, 特别是荧光成像技术, 能够更准确地指示植物的早期胁迫信息。随着荧光探测器的出现, 可以更好地和光谱、植被生理生化指标结合, 应用

于植被光合^[137]、营养诊断^[138-139]、环境胁迫和干旱监测^[140-141]中。

存在问题：叶绿素荧光信号解释光合作用机理性强，在植被生理监测中具有反应灵敏，测定速度快，无损监测的特点，得到了广泛应用。但是其缺点也很明显，比如在测量过程中需要经过暗适应，不易在冠层水平实施，在室外观测中受外界环境的影响很大，目前主要在室内开展研究。激光诱导荧光适合进行宏观测量，但要考虑激发能量和植被的接受程度，还不适合空间应用^[142]。此外，日光诱导荧光技术虽然能够揭示植被光合作用与环境的关系，且FLD法有可能实现空间遥感应用，但还处在探索阶段，很多问题如大气校正、环境条件与荧光的定量关系等，仍依赖于将来定量遥感技术与理论的发展与大量地面试验数据验证。相信随着高光谱遥感技术和定量遥感模型的发展将进一步促进荧光遥感技术在植被干旱监测中发挥更多作用。

1.10 基于大数据和多源遥感技术的综合干旱监测

由于农业干旱监测涉及到大气—土壤—植被等多种过程，同时涉及的作物类型多样，干旱致灾的机理不同，作物的干旱敏感期差异较大，农业干旱监测不再是一个单一指标能完成的，而在大数据发展到一定程度的今天，干旱监测问题也成为一个大数据问题^[143]，同时干旱监测也需要多源遥感数据共同完成^[144-145]，才有可能完成精准和精细化的监测预警服务，基于大数据的综合干旱监测方法与模型将成为未来农业干旱监测的主要发展趋势。

2 中国遥感干旱监测的需求分析和存在的问题

2.1 国家需求

干旱是对全球经济和社会影响最严重的一种气象灾害。我国每年因旱灾造成的损失占各种自然灾害总和的15%以上。在全球气候变化和人类活动增加的背景下，干旱的发生频率、强度和持续时间均有可能增加。由于引发干旱的大气环流异常的原因十分复杂，在未来相当长时间内，人类还很难对干旱的发生进行准确预测。因此，加强干旱监测技术的研究，提高干旱监测和早期预警的水平，不仅是国际干旱科学领域的一项重要内容，也是我国政府抗旱防灾中致力解决的首要问题。

国家迫切需要对不同区域和不同类型干旱出现时间、范围、强度以及发生、发展和消退干旱过程进行准确监测和早期预警，提升我国干旱防灾减灾能力，减少干旱造成的经济损失，为我国干旱防灾减灾、保

障粮食安全以及生态安全、水安全乃至国家安全提供科技支撑。

2.2 行业需求

综合运用气象观测信息和现代预测、预报、预警技术，实时、准确地发布监测干旱信息是气象部门主要业务。目前各级气象部门分别通过气象干旱指数（CI）、降水距平百分率（Pa）、标准化降水指数（SPI）等指数进行气象干旱监测，应用降水距平百分率、不同深度的土壤相对湿度开展农业气象干旱监测，应用卫星遥感数据开展遥感干旱监测。这些指标分别从不同角度来描述干旱过程，相互之间既有联系又存在差异，单一指数仅反映干旱过程某一状况。如何从时间和空间上建立这些指数间的联系，客观定量地融合这些信息，建立综合监测模型，对全面了解干旱过程是非常必要和迫切需求的。

因此，研究由气象干旱—农业干旱—水文干旱间的干旱传递过程和相互间的联系，综合应用气象、农业气象、卫星遥感观测信息以及大数据技术，改进和发展干旱监测模型，研发多源信息综合监测技术，并能针对不同目标提供更客观、定量和精细的干旱信息，提高干旱监测和早期预警水平，为国家抗旱决策提供有力的科技支撑，是气象部门迫切需要解决的科学和技术问题。

2.3 科研中存在的问题

1) 对气象干旱—土壤干旱—农业干旱发展过程中，不同遥感参数（包括大气降水、云、大气温湿度等大气参数），植被参数（植被指数、盖度、叶面积、fPAR），地表参数（地表反射率、地表温度、蒸散发、土壤水分、土壤热通量）的特征、作用及相互联系认识不够，没有掌握干旱发生、发展和传播的过程中各参数变化规律和对干旱作用的实质。

2) 由于干旱时空特征差异很大，现有的遥感监测指标远不能满足我国不同区域和不同时间段的干旱监测的需求，亟待建立不同时空尺度遥感监测指标体系。

3) 如何建立从紫外—微波的多源遥感数据综合监测干旱技术？如何解决时空尺度转化问题？如何进行多源数据融合？这些问题还需要深入探讨和研究。

3 对策建议和研究计划

3.1 对策建议

虽然干旱是全球普遍发生的自然灾害，但因其影响因子复杂，其发生发展规律和造成的危害具有鲜明的地域和时间特征，人类对干旱的认识尚在探索中。

尽管科学界已经提出了100多个基于地面站点观测的干旱指数和数十个基于卫星遥感的干旱指数，但仍然没有哪个指数可以对全球不同地区的干旱发生时间、范围和强度进行有效的监测。

干旱与当地气候、农业、水文、土壤、人口和社会抗旱能力密切相关，因此，针对各地气候特征，结合农业和植被特点、土地类型等特点，提出适合不同地区、不同时段干旱监测标准和指标体系很有必要。

3.2 研究计划

1) 建立以FY系列卫星估算地表蒸散为基础的干旱监测技术

以FY-3和FY-4产品为基础，利用双层模型分离土壤蒸发和植被蒸腾，分别计算地表胁迫指数和冠层胁迫指数，分别给出地表和冠层的水分监测结果，进而针对不同地域和目标开展监测。

2) 综合微波遥感干旱指数构建、应用与评估

以西北为研究区，在检验微波遥感产品适用性的基础上，利用微波遥感降水、土壤水分和地表温度等数据分别建立单一指标的微波干旱指数；分析这些指数在不同气候区、不同地表类型和不同时段监测干旱能力的差异；基于不同单一指标干旱指数在监测干旱时贡献率不同的分析，综合考虑大气—土壤—地表温度的影响因素，采用专家咨询权重法和因子分析权重法，将单一指标干旱指数按不同权重系数合理组合，进一步构建多种微波集成干旱指数。

将多种微波集成干旱指数应用于西北区域干旱时空变化特征的监测中，应用历史干旱过程检验微波集成干旱指数在西北地区干旱监测中的适用性；同时结合气象站点资料计算的干旱指数（如SPI、K和PDSI等）以及光学遥感数据计算的指数（如NDVI、VCI和TCI等）评估微波集成干旱指数监测干旱的特点和应用能力；根据不同气候区和不同地表类型选择最佳微波集成干旱指数，并分析西北地区近20年的干旱演变特征。

3) 无人机航空—地面结合的高光谱遥感干旱致灾过程机理观测试验研究

根据旱区作物生长发育规律，开展水分胁迫条件下的地面—航空高光谱同步观测试验，研究作物生理生态特征与高光谱遥感特征。

研究作物在水分胁迫条件下的航空高光谱遥感监测特征指标和参数，提出旱区作物水分胁迫的光谱诊断指标体系，建立适用于不同生育期的作物水分胁迫高光谱遥感监测模型。

以地面—航空同步观测资料为基础，逐步升尺度，在较大时空范围验证和改进星载高光谱遥感监测模型的精度；结合HJ-1A和TG-1等高光谱卫星遥感影像，对作物水分胁迫状况进行空间制图与动态监测（图1）。

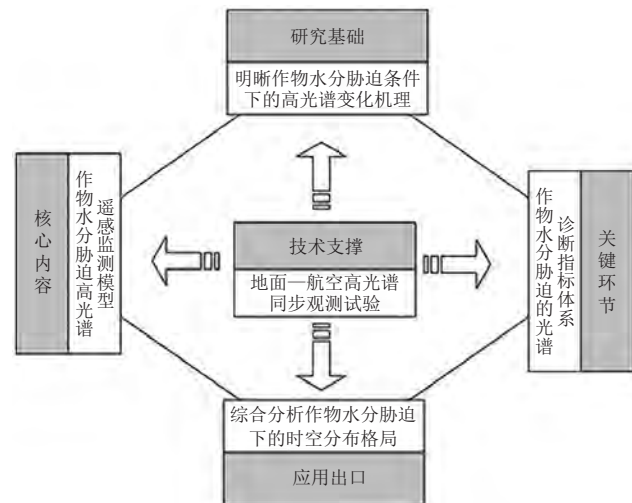


图1 基于UAV技术的作物水分胁迫高光谱遥感监测技术路线图

Fig. 1 Flow chart of crop water stress hyperspectral remote sensing monitoring based on UAV technology

4) 研制综合干旱监测指数

在上述工作的基础上，利用不同的干旱监测指数对历史干旱过程进行监测，对比分析各指数的适用下垫面及监测特征，并基于不同植被覆盖度，通过按不同权重进行指数组合构建出新的综合遥感干旱监测指数，使其适用于非均匀的下垫面。

参考文献

- 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 我国气象干旱研究进展评述. 干旱气象, 2012, 30(4): 494-508.
- 马柱国, 符凉斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析. 气象学报, 2001, 59(6): 737-746.
- 张强, 韩兰英, 张立阳, 等. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略. 地球科学进展, 2014(1): 80-91.
- Wilhite D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. A global assessment, London: Routledge, 2000, 1(1): 3-18.
- 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778.
- Aghakouchak A. Remote sensing of drought: progress and opportunities for improving drought monitoring. Reviews of Geophysics, 2015, 53(2): 452-480.
- 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.
- 周磊, 武建军, 张洁. 以遥感为基础的干旱监测方法研究进展. 地理科学, 2015, 35(5): 630-636.
- 郭锐, 王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇. 干旱气象, 2015, 33(1): 1-18.
- 隋学艳, 王汝娟, 姚慧敏, 等. 农业气象灾害遥感监测研究进展. 中国农学通报, 2013, 30(17): 284-288.
- Wang X, Zhao C, Guo N, et al. Determining the canopy water stress for spring wheat using canopy hyperspectral reflectance data in Loess Plateau semiarid regions. Spectroscopy Letters, 2015,

- 48(7): 492-498.
- [12] Tucker C J, Newcomb W W, Los S O, et al. Mean and inter-year variation of growing season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(6): 1133-1135.
- [13] Tucker C J, Justice C O, Prince S D. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1571-1581.
- [14] Liu H Q, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457-465.
- [15] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295-309.
- [16] 陈维英, 肖乾广. 距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用. *遥感学报*, 1994, 36(2): 106-112.
- [17] Kogan F, Sullivan J. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 1993, 13(5): 219-222.
- [18] Anyamba A, Tucker C J. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(3): 596-614.
- [19] 严建武, 陈报章, 房世峰, 等. 植被指数对旱灾的响应研究—以中国西南地区2009年—2010年特大干旱为例. *遥感学报*, 2012, 16(4): 720-737.
- [20] 冯强, 田国良, 王昂生, 等. 基于植被状态指数的土壤湿度遥感方法研究. *自然灾害学报*, 2004, 13(3): 81-88.
- [21] 郭锐, 管晓丹. 植被状况指数的改进及在西北干旱监测中的应用. *地球科学进展*, 2007, 22(11): 1160-1168.
- [22] Watson K, Rowen L C, Ofield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images. *Remote Sensing of Environment*, 1971, 3: 2017-2041.
- [23] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18(1): 59-73.
- [24] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. *遥感学报*, 1997, 1(1): 24-31.
- [25] 张仁华, 孙晓敏. 以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感信息模型及在甘肃沙坡头地区的验证. *中国科学:地球科学*, 2002, 32(12): 1041-1050.
- [26] 刘振华, 赵英时. 遥感热惯量反演表层土壤水的方法研究. *中国科学:地球科学*, 2006, 36(6): 552-558.
- [27] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91-100.
- [28] Kogan F N. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(5): 1038-1038.
- [29] Kogan F. World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 83(48): 557-563.
- [30] Bento V A, Gouveia C M, Dacamara C C, et al. A climatological assessment of drought impact on vegetation health index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 286-295.
- [31] Toby N C, Robert R G, Eileen M P. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9(1): 161-173.
- [32] 杨秀海, 卓嘎, 罗布. 基于MODIS数据的青藏高原旱情监测研究. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 527-534.
- [33] Goward S N, Hope A S. Evapotranspiration from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation: preliminary five results from AVHRR data. *Advances in Space Research*, 1989, 9(7): 239-249.
- [34] Nemani R, Pierce L, Running S, et al. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(3): 548-557.
- [35] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(1): 71-94.
- [36] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [37] 王鹏新, 龚健雅, 李小文, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 527-533.
- [38] 于敏, 高玉中, 张洪珍. 地表温度-植被指数特征空间干旱监测方法的改进. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 243-250.
- [39] Liu L, Liao J, Chen X, et al. The Microwave Temperature Vegetation Drought Index (MTVDI) based on AMSR-E brightness temperatures for long-term drought assessment across China (2003-2010). *Remote Sensing of Environment*, 2017, 199: 302-320.
- [40] Liu Y, Yue H. The Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) Based on Bi-Parabolic NDVI-T_s Space and Gradient-Based Structural Similarity (GSSIM) for Long-Term Drought Assessment Across Shaanxi Province, China (2000-2016). *Remote Sensing*, 2018, 10: 1-21.
- [41] Shan Y, Gong A, Su Y, et al. Improvement of soil moisture monitoring using EVI as a key parameter based on TVDI in the north China plain. *Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE*. 2014: 3738-3741
- [42] 张喆, 丁建丽, 李鑫, 等. TVDI用于干旱区农业旱情监测的适宜性. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 220-227.
- [43] 冉琼, 张增祥, 张国平, 等. 温度植被干旱指数反演全国土壤湿度的DEM订正. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 32-36.
- [44] Sha S, Guo N, Hu D, et al. Comparison of temperature vegetation dryness indexes through two approaches in drought monitoring: A case of Henan Province. 2017 6th International Conference on Agro-Geoinformatics. *IEEE*, 2017.
- [45] Ghulam A, Qin Q, Zhan Z. Designing of the perpendicular drought index. *Environmental Geology*, 2007, 52(6): 1045-1052.
- [46] Ghulam A, Qin Q, Teyip T, et al. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(2): 150-164.
- [47] 张学艺, 李剑萍, 秦其明, 等. 几种干旱监测模型在宁夏的对比应用. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 18-23.
- [48] Zhang D, Meng L, Qu J J, et al. Estimation of surface soil moisture in cornfields using a modified modis-based index and considering corn growth stages. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5618-5631.
- [49] Amani M, Salehi B, Mahdavi S, et al. Temperature-Vegetation-soil Moisture Dryness Index (TVMIDI). *Remote Sensing of Environment*, 2017, 197: 1-14.
- [50] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 1981, 17: 1133-1138.
- [51] Tang R L, Li Z L. Evaluation of two end-member-based models for regional land surface evapotranspiration estimation from MODIS data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 202: 69-82.
- [52] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, 111: 839-855.
- [53] Anderson M C, Norman J M, Kustas W P, et al. Upscaling tower and aircraft fluxes from local to continental scales using thermal remote sensing. *Agronomy Journal*, 2007, 99: 240-254.
- [54] Xie P, Arkin P A. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78: 2539-2558.
- [55] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 2010, 47: 123-138.
- [56] 孙逢林, 覃丹宇, 游然. 星载SAR降水反演研究简介. *气象科技进展*, 2016, 6(1): 111-115.
- [57] Moazami S, Golian S, Kavianpour M R, et al. Comparison of PERSIANN and V7 TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) products with rain gauge data over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(22): 8156-8171.
- [58] Sun R, Yuan H, Liu X, et al. Evaluation of the latest satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe River basin. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 302-319.

- [59] 刘少华, 严登华, 王浩, 等. 中国大陆流域分区TRMM降水质量评价. 水科学进展, 2016, 27(5): 639-651.
- [60] 唐国强, 李哲, 薛显武, 等. 赣江流域TRMM遥感降水对地面站点观测的可替代性. 水科学进展, 2015, 26(3): 340-346.
- [61] Naumann G, Barbosa P, Carrao H, et al. Monitoring drought conditions and their uncertainties in Africa using TRMM data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(10): 1867-1874.
- [62] Sahoo A K, Sheffield J, Pan M, et al. Evaluation of the Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159: 181-193.
- [63] 冯海涛, 于国荣, 杨具瑞. 基于TRMM 3B43 V7数据的云南降水与干旱监测及精度评价. 水资源与水工程学报, 2014, 4: 89-96.
- [64] 陈诚, 赵书河. 基于TRMM降雨数据的中国黄淮海地区干旱监测分析. 国土资源遥感, 2016, 28(1): 122-129.
- [65] 胡蝶, 郭锐, 王丽娟, 等. TRMM降雨数据在甘肃省干旱监测中的应用. 干旱气象, 2017, 35(3): 374-382.
- [66] 邹晓蕾, 翁富忠, 田小旭. AMSR2仪器上新增的C波段通道对陆地无线电频率干扰的有效缓解. 气象科技进展, 2015, 5(2): 35-41.
- [67] Imaoka K, Kachi M, Fujii H, et al. Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 717-734.
- [68] 施建成, 杜阳, 杜今阳, 等. 微波遥感地表参数反演进展. 中国科学(地球科学), 2012, 42(6): 814-842.
- [69] Su C H, Ryu D, Young R I, et al. Inter-comparison of microwave satellite soil moisture retrievals over the Murrumbidgee Basin, southeast Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 1-11.
- [70] Draper C S, Walker J P, Steinle P J, et al. An evaluation of AMSR-E derived soil moisture over Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 113(4): 703-710.
- [71] 彭丽春, 李万彪, 刘辉志. FY-3A/MWRI数据反演半干旱地区土壤湿度的研究. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(5): 797-804.
- [72] Jackson T J, Bindlish R, Cosh M H, et al. Validation of soil moisture and ocean salinity (SMOS) soil moisture over watershed networks in the U.S. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1530-1543.
- [73] 李哲, 王磊, 王林, 等. 基于AMSR-E反演青藏高原夏季表层土壤湿度. 高原气象, 2017, V36(1): 67-78.
- [74] 陆崑, 柴琳娜, 张涛, 等. AMSR2土壤水分产品在黑河流域中上游的验证. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 324-337.
- [75] 庄媛, 师春香, 沈润平, 等. 中国区域多种微波遥感土壤湿度产品质量评估. 气象科学, 2015, 35(3): 289-296.
- [76] Pathe C, Wagner W, Sabel D, et al. Using envisat asar global mode data for surface soil moisture retrieval over oklahoma, USA. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 468-480.
- [77] Holah N, Baghdadi N, Zribi M, et al. Potential of ASRA/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(1): 78-86.
- [78] Zribi M, Chahbi A, Shabou M, et al. Soil surface moisture estimation over a semi-arid region using ENVISAT/ASRA radar data for soil evaporation evaluation. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2011, 15(1): 345-358.
- [79] 田辉, 文军, 史小康, 等. 主动微波遥感黄河上游玛曲地区夏季土壤水分. 水科学进展, 2011, 22(1): 59-66.
- [80] 胡蝶, 郭锐, 沙莎, 等. 基于Radarsat-2/SAR数据反演定西裸露地表土壤水分. 干旱气象, 2014, 32(4): 553-559.
- [81] 胡蝶, 郭锐, 沙莎, 等. Radarsat-2/SAR和MODIS数据联合反演黄土高原地区植被覆盖下土壤水分研究. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 860-867.
- [82] 何连, 秦其明, 任华忠, 等. 利用多时相Sentinel-1 SAR数据反演农田地土壤水分. 农业工程学报, 2016, 32(3): 142-148.
- [83] Yirdaw S Z, Snelgrove K R, Agboma C O. GRACE satellite observations of terrestrial moisture changes for drought characterization in the Canadian prairie. *Journal of Hydrology*, 2008, 356(1-2): 84-92.
- [84] Seoane L, Ramillien G, Frappart F, et al. Regional GRACE-based estimates of water mass variations over Australia: validation and interpretation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 10(4): 4925-4939.
- [85] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. 2005 Drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2009, 114: 1-9.
- [86] 李琼, 罗志才, 钟波, 等. 利用GRACE时变重力场探测2010年中国西南干旱陆地水储量变化. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1843-1849.
- [87] 曹艳萍, 南卓铜, 程国栋. GRACE重力卫星监测新疆干旱特征. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 87-92.
- [88] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬, 2006. 高光谱遥感原理技术与应用. 北京: 高等教育出版社.
- [89] 童庆禧. 空间遥感信息产业发展. 卫星应用, 2012, (1): 44-48.
- [90] Tong Q X, Xue Y Q, Zhang L F. Progress in hyperspectral remote sensing science and technology in China over the past three decades. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(1): 70-91.
- [91] Houborg R, Fisher J B, Skidmore A K. Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 43: 1-6.
- [92] Xue Z, Du P, Li J, et al. Sparse graph regularization for robust crop mapping using hyperspectral remotely sensed imagery with very few in situ data. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 124: 1-15.
- [93] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16(2): 125-141.
- [94] 张佳华, 李莉, 姚凤梅. 遥感光谱信息提取不同覆盖下植被水分信号的研究进展. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1638-1642.
- [95] Riaño D, Vaughan P, Chuvieco E, et al. Estimation of fuel moisture content by inversion of radiative transfer models to simulate equivalent water thickness and dry matter content: analysis at leaf and canopy level. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 819-826.
- [96] Michio S, Tsuyoshi A. Seasonal visible, near infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phylomass. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27(2): 119-127.
- [97] Peñuelas J, Piñol J, Ogaya R, et al. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18: 2869-2875.
- [98] Roberts D A, Green R O, Adams J B. Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. *Remote Sensing Environment*, 1997, 62: 223-240.
- [99] Gao B C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 257-266.
- [100] Suárez L, Zarco-Tejada P J, Berni J A, et al. Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(4): 730-744.
- [101] Suárez, L. et al. Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 286-298.
- [102] 田庆久, 官鹏, 赵春江. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析. 科学通报, 2000, 45(4): 2645-2650.
- [103] 刘良云, 王纪华, 张永江, 等. 叶片辐射等效水厚度计算与叶片水分定量反演研究. 遥感学报, 2007, 11(3): 289-295.
- [104] Wang X P, Zhao C Y, Guo N, et al. Determining the canopy water stress for spring wheat by using canopy hyperspectral reflectance data in Loess Plateau semi-arid regions. *Spectroscopy Letters*, 2005, 48(7): 492-498.
- [105] Jacquemoud S, et al. PROSPECT+ SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: S56-S66.
- [106] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29(1): 185-212.
- [107] Gaspar, T. Concepts in plant stress physiology. Application to plant

- tissue cultures. *Plant Growth Regulation*, 2002, 37(3): 263-285.
- [108] Jac'ımovic' G, Malešević' M, Ac'in V, et al. Effects of drought on yield of winter wheat in long-term field trial and Vojvodina province. *Research Journal of Agricultural Science*, 2013, 45(3): 30-31.
- [109] Taiz L, Zeiger E. 2010. *Plant physiology*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- [110] Suárez L, Zarco-Tejada P J, Sepulcre-Cantó G, et al. Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(2): 560-575.
- [111] Sanches I D A, Souza Filho C R, Kokaly R F. Spectroscopic remote sensing of plant stress at leaf and canopy levels using the chlorophyll 680 nm absorption feature with continuum removal. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 97: 111-122.
- [112] 吴炳方, 曾源, 黄进良. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 585-590.
- [113] 秦占飞, 常庆瑞, 谢宝妮, 等. 基于无人机高光谱影像的引黄灌区水稻叶片全氮含量估测. *农业工程学报*, 2016, 32(23): 77-85.
- [114] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 277-293.
- [115] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(11): 1835-1848.
- [116] 赵晓庆, 杨贵军, 刘建刚, 等. 基于无人机载高光谱空间尺度优化的大豆育种产量估算. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 110-116.
- [117] Jin X, Yang G, Li Z, et al. Estimation of water productivity in winter wheat using the AquaCrop model with field hyperspectral data. *Precision Agriculture*, 2016: 1-17.
- [118] Alexander A, Zbyněk M, Julie O, et al. Meta-analysis assessing potential of steady-state chlorophyll fluorescence for remote sensing detection of plant water, temperature and nitrogen stress. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168: 420-436.
- [119] Villamuélas M, Fernández N, Albanell E, et al. The Enhanced Vegetation Index (EVI) as a proxy for diet quality and composition in a mountain ungulate. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 658-666.
- [120] 张良培. 高光谱目标探测的进展与前沿问题. *武汉大学学报信息科学版*, 2014, 39(12): 1387-1394.
- [121] 薛忠财, 高辉远. 反射光谱技术在监测大豆叶片光化学效率和水分状况中的应用. *大豆科学*, 2016(3): 436-441.
- [122] 林毅, 李倩, 王宏博, 等. 干旱条件下春玉米高光谱特征及土壤含水量反演. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1323-1329.
- [123] 李媛媛, 常庆瑞, 刘秀英, 等. 基于高光谱和BP神经网络的玉米叶片SPAD值遥感估算. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 135-142.
- [124] 程志庆, 张劲松, 孟平, 等. 基于高光谱信息的107杨叶片等效水厚度估算模型的研究. *林业科学研究*, 2016, 29(6): 826-833.
- [125] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42(1): 313-349.
- [126] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence- a practical guide. *Journal of Experiment Botany*, 2000, 51: 659-668.
- [127] Agati G. Response of the in vivo chlorophyll fluorescence spectrum to environmental factors and laser excitation wavelength. *Pure and Applied Optics*, 1998, 7(4): 797-807.
- [128] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, et al. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: I. Leaf-level measurements and model simulation. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 582-595.
- [129] Lichtenthaler H K, Babani F. Detection of photosynthetic activity and water stress by imaging the red chlorophyll fluorescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2000, 38(11): 889-895.
- [130] Lichtenthaler H K, Miehé J A. Fluorescence imaging as a diagnostic tool for plant stress. *Trends in Plant Science*, 1997, 2(8): 316-320.
- [131] Lichtenthaler H K, Lang M, Sowinska M, et al. Detection of vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(5): 599-612.
- [132] Gitelson A A, Kaufman Y J and Merzlyak M N. Use of the green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.
- [133] Heisel F, Sowinska M, Miehé J A, et al. Detection of nutrient deficiencies of maize by laser induced fluorescence imaging. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(5): 622-631.
- [134] Cerovic Z G, Goulas Y, Gorbunov M, et al. Fluorescence of water stress in plants: Diurnal changes of the mean lifetime and yield of chlorophyll fluorescence, measured simultaneously and at distance with a τ -LIDAR and a modified PAM-fluorimeter, in maize, sugar beet and Kalanchoe. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 311-321.
- [135] Schindler C, Lichtenthaler H K. Photosynthetic CO₂-assimilation, chlorophyll fluorescence and zeaxanthin accumulation in field grown maple trees in the course of a sunny and a cloudy day. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(s3-4): 399-412.
- [136] Subhash N, Mallia J R. Changes in laser induced chlorophyll fluorescence signatures during regeneration of Kacholam and Colocasia plants from water stress. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003, 5: 3293-3295.*
- [137] Zarco-Tejada P J, Berni J A J, Suárez L, et al. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(6): 1262-1275.
- [138] Middleton E M, Campbell P K E, McMurtrey J E, et al. Red edge optical properties of corn leaves from different nitrogen regimes. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS' 02. 2002 IEEE International. IEEE, 2002.*
- [139] McMurtrey J E, Daughtry C S T, Devine T E, et al. Spectral detection of crop residues for soil conservation from conventional and large biomass soybean. *Agronomie*, 2005, 25(1): 25-33.
- [140] Evain S, Flexas J, Moya I. A new instrument for passive remote sensing: 2. Measurement of leaf and canopy reflectance changes at 531 nm and their relationship with photosynthesis and chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(2): 175-185.
- [141] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44.
- [142] Ounis A, Cerovic Z G, Briantais J M, et al. Dual excitation FLIDAR for the estimation of epidermal UV absorption in leaves and canopies. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(1): 33-48.
- [143] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(11): 1835-1848.
- [144] 孙忠富, 杜克明, 郑飞翔, 等. 大数据在智慧农业中研究与应用展望. *中国农业科技导报*, 2013, 15(6): 63-71.
- [145] 刘勃, 毛克彪, 马莹, 等. 农业大数据浅析及与Web GIS结合应用. *遥感信息*, 2016, (1): 124-128.

AI技术与卫星资料应用研究现状分析

匡秋明 于廷照

(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: 人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 在环境要素预报、环境质量预报、气象基本要素预报以及高影响性天气预报等方面已取得研究性进展。其中, 环境要素包括云、雾、雪, 太阳能辐射及土壤水分、植被、湖泊等; 环境质量包括空气质量、海洋环境质量等; 气象基本要素包括降水、风、温度; 高影响性天气包括冰雹、强风、雷电、对流暴雨、洪涝等。

关键词: 卫星资料, 人工智能, 环境要素, 气象要素, 预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.004

Review of Leveraging AI for Exploitation of Satellite Observations

Kuang Qiuming, Yu Tingzhao

(Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Artificial Intelligence has achieved great progresses in many areas such as environmental elements forecasting, environmental qualification forecasting, meteorological elements forecasting and extreme weather forecasting. Specifically, the environmental elements include cloud, fog, snow, solar, soil moisture, crop and lake. The environmental qualification consists of both air quality and ocean quality. The meteorological elements contain precipitation, wind and temperature, while the extreme weather is composed of hail, storm, lighting and floods.

Keywords: satellite data, artificial intelligence, environmental elements, meteorological elements, forecasting

0 引言

2019年4月23—25日, 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 在其天气和气候预测中心主办了利用人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术开发利用卫星观测资料和数值天气预报的研讨会。研讨会的目的是促进遥感/地球观测/数值模式等气象科学专家和人工智能领域专家之间的知识交流, 探索使用人工智能解决NOAA在有效利用爆炸性增长卫星观测数据方面面临的重大挑战。会议指出, 人工智能是环境数据处理和开发利用以及NWP中的一项潜在的变革性技术, 特别是处理卫星和其他大容量数据的革命性技术。

1 AI在卫星资料环境要素预报研究进展

1.1 云、雾、雪的检测、识别和预报

卫星图像云、雾、雪的检测、识别和预测是各类气象服务的基础, 有效的云、雾、雪相关算法研究对提高气象要素预报精度具有一定指导价值。基于人工

智能机器学习方法的云检测技术由来已久, Ting等^[1]提出一种多特征融合方法, 通过融合谱特征、纹理特征和归一化植被指数特征, 用支持向量机 (SVM) 对高分卫星图像进行检测, 识别准确率达到91.45%。多特征融合方法是有效的, 但其最大的问题在于特征提取方法需要很强的先验知识, 因此, 云检测准确率在很大程度上依赖于底层特征选择。为解决此问题, Shi等^[2]和Cai等^[3]分别提出基于深度网络的方法, 通过网络自动挖掘云层的潜在判别信息。卫星图像首先通过线性迭代聚类转换为超像素子区域, 网络对每个子区域分别检测识别。针对小型卫星遥感图像, Zhang等^[4]提出一种基于Unet网络和小波变换的云检测识别技术, 通过红光、绿光、蓝光和红外四种波段, 在Landset-8数据集上云识别准确率达到97.45%。Li等^[5]提出还有一种多尺度卷积特征融合技术, 采用自动编码器模型提取多尺度、高层空间特征, 不同层特征融合后, 通过主流卷积网络可以实现云检测分割。此外, Ozkan等^[6]提出深度金字塔网络结构, Hayatbini等^[7]提出基于梯度的云检测分割, 其最大优势是可以逐像素点识别云层类别。Tan等^[8]和Mohajerani等^[9]最近也提出多种基于卷积长短时记忆网络和全卷积网络

收稿日期: 2020年4月25日; 修回日期: 2020年4月28日
 第一作者: 匡秋明 (1982—), Email: kuangqm@cma.gov.cn
 通信作者: 于廷照 (1990—), Email: yutingzhao@cma.gov.cn
 资助信息: 科技部国家重点研发计划 (2018YFF0300105, 2018YFF0300100)

的云检测方法。

雾在卫星图像呈现形式上与云具有很强相似性，Egli等^[10]提出基于多元混合数据和随机森林的雾检测方法。Colabone等^[11]、Han等^[12]将各种气象要素时间序列转换为二维图像，通过卷积神经网络可以预测短时的雾产生消散情况。Xie等^[13]提出多分支深度神经网络方法，每个分支在多尺度上分别进行厚雾、薄雾、无雾的检测识别。此外，利用人工智能技术可以实现卫星图像云、雾的去除，对地物观测识别^[14-15]、地面能见度分析^[16]具有指导作用，对交通流量管理^[17-18]、航海^[19]、航班飞行^[20]等海陆空专业气象服务也具有重要应用价值。

云、雾、雪底层颜色特征和局部纹理特征的相似性使得如何区分三者之间形态也是当前人工智能技术的发展方向。Zhan等^[21]提出一种全卷积网络，可以在卫星图像像素级实现云和雪的分类识别分割。尽管此类方法效果明显，其仍然存在两方面缺陷：从模型角度此类方法易产生梯度消散并造成模型退化，从数据角度此类方法无法充分利用各类有效数据，从而造成监测识别精度的降低。为解决以上两点问题，Xia等^[22]提出基于多维输入的深度残差网络（Multidimensional deep Residual Network, M-ResNet），通过多维信息输入实现有效信息互补，该技术可以有效提取卫星图像特征及谱信息，在多波段卫星图像上可以实现无云雪、云、雪、云雪混合四种模式识别。Nijhawan等^[23]提出基于深度特征和浅层特征的融合方法，该方法分为两部分，第一部分以在计算机视觉领域预训练的主流卷积网络为基础，提取卫星数据谱图像的深度卷积网络特征，第二部分基于传统手工特征提取合成孔径雷达图像的判别式特征，该方法在验证集积雪识别的准确率对比主流方法提高了2%。此外，不仅积雪覆盖区域会影响日常生活，积雪区域的变换也会影响人们的日常生活安排及出行计划，为此，Varade等^[24]提出基于稀疏表示和字典学习的积雪覆盖区域变化识别方法，将积雪覆盖区域表示视作图像，以K-SVD分解得到图像表示的一组完备基，即字典，再通过稀疏反编码技术获取最终积雪覆盖区域的变化信息，该方法比基于支持向量机的方法效果有明显提升。Zhu等^[25]提出一种针对山地地区高时空分辨率积雪覆盖区域识别的一种半监督方法，称为半监督多时段积雪提取法（SMCE）。该方法最大的特点是可实现多时段相同区域图像的耦合模型训练，不同时间段的图像视作相同地表观测的不同描述形式，然后通过迭代的耦合训练即可实现大规模无标注数据的有效利用，即半监督方法。

1.2 太阳能辐射预报

太阳能辐射预报随着各种新能源设备、技术的普及也逐步展开，并且人工智能技术需求日益提高^[26-30]。Senkal等^[31]利用经纬度、高度、时间、辐射等气象卫星数据和地理位置作为输入信息，并基于神经网络实现了对任意位置的太阳能辐射预测，以归一化共轭梯度为优化算法，该神经网络与传统方法最大的不同在于其采用弹性传播机制而非主流反向传播，使得神经网络的收敛速度明显加快。Marquez等^[32]利用卫星数据和神经网络实现了未来2 h逐30 min全球水平太阳能辐射预测，由于太阳能辐射量与云层位置及其厚度有很大关系，该方法首先根据提供的卫星图像数据估算感兴趣区域云的平均移动速度，进而估计在未来短时间内该运动造成云覆盖量变化对全局辐射的影响，在多种评价准则条件下该方法优于冻结云传导（Frozen Cloud Translation）模型。Voyant等^[33]利用静止卫星获取的全球的二维太阳能时间序列作为神经网络，实现了对地球上偏远或无标定地区的太阳能预测。不同于主流基于均方误差优化目标的方法，该方法在太阳能预测领域首次引入基于互信息评价准则，该准则相较均方差目标能够最大化感兴趣区域损失，后来该方法在计算机视觉领域得到广泛推广，即注意力（Attention）机制。Zhou等^[34]利用中分辨率成像光谱仪（MODIS）遥感数据，基于随机森林方法实现了太阳能辐射的逐日预测。随机森林是机器学习领域常见的一种集成学习方法，简单起见，博伊西州立大学直接采用开源随机森林模型，其最大特点是采用耦合方式，融合了地面观测数据和遥感数据，使得随机森林模型可以综合考虑多模式输入的优势。Jang等^[35]基于多源卫星图像和支持向量机实现了太阳能辐射预测方法。同Marquez等^[32]一样，该技术首先基于卫星图像的大气运动向量（AMVs）实现了大气层运动信息估计，并利用4年的卫星信息观测数据实现了基于支持向量机的太阳能辐射时序预测。Srivastava等^[36]首次提出基于长短时记忆网络的太阳能辐射预测技术，并在欧洲16个观测点和美国5个观测点全球共计21个地点对该技术进行验证，证明了该技术的有效性。长短时记忆（LSTM）网络是深度学习领域一种特别适用于时序估计的模型，该模型由于增加了遗忘门、输入门、输出门及中间状态四种控制信息，可以实现对长短时记忆的自动选择，提高时序估计性能。Lago等^[37]提出基于神经网络的短时太阳能辐射预测技术，该技术主要利用卫星观测数据和气象预报数据，以多模式数据为输入，以卷积网络为方法，以短时太阳能辐

射为输出，其最大优势是可以实现跨地区预测，并在荷兰25个观测点验证了该技术的有效性。

1.3 土壤水分、植被、湖泊监测预报

地物系统是人工智能领域也是研究热点，如土壤水分含量预测、作物森林植被覆盖预测等。Panda等^[38]早在十多年前就利用卫星图像并基于神经网络实现陆地湖泊水质估计。Ahmad等^[39]最早引入针对卫星图像的支持向量机技术，用于土壤水分估计。很多水文相关的应用如干旱、洪涝、灌溉等都需要高分辨率土壤水分数据，Srivastava等^[40]研究了多种机器学习技术，如神经网络、支持向量机、相关向量机、广义线性模型等在卫星土壤水分图像上的降尺度方法，Ali等^[41]也对此类相关技术展开了细致调研。Xing等^[42]利用神经网络技术，隐式获取卫星观测数据与土壤水分之间的高度非线性关系。Efremova等^[43]基于序列到序列最新人工智能技术，从卫星图像出发，识别分割出作物及其所在陆地区域并实现了土壤水分估计。高精度卫星图像作物识别对食品安全等具有重要影响，Kuwata等^[44]研究了基于支持向量回归技术和深度网络技术的卫星图像作物区域估计。卫星数据的重要性不言而喻，但其标注数据却少之又少，Xie等^[45]利用迁移学习技术，充分利用了多种卫星图像数据实现了地物区域估计^[46]。而后You等^[47]又提出基于手工特征提取、卷积网络、长短时记忆网络、高斯过程的时空相关作物估计技术。手工特征提取根据人工专家先验提取判别性特征信息，卷积网络从数据分布出发隐式提取模型最具判别性特征，长短时记忆网络通过自带的输入门、遗忘门、输出门及中间状态实现时域长短的自适应选择，高斯过程可以实现预估数据的平滑。Kussul等^[48]、Garnot等^[49]也提出基于卫星图像和深度网络的陆地作物分类技术。除作物覆盖外，森林覆盖也是地物重要组成部分，Shao等^[50]研究了堆叠稀疏编码器、多步线性回归、k近邻、支持向量机、反向传播网络、随机森林等机器学习技术针对卫星数据的森林覆盖及地面生物量估计。Khan等^[51]构建了一种多尺度网络，将森林覆盖问题转换为机器学习中的区域分类问题，实现了纯数据驱动的区域表示分类。

2 AI在卫星资料环境质量预报研究进展

2.1 空气质量监测及预报

环境质量与人生活息息相关，基于卫星数据的空间统计方法研究火热，与人工智能方法相结合的环境质量检测技术方法也是研究热点^[52-54]。Ma等^[55]基于中国国内PM_{2.5}监控网络，提出地理加权回归方法（GWR），与卫星观测的气溶胶光学厚度数据相融

合，可以估计每天PM_{2.5}浓度变化。通过交叉验证实验表明，多模式气象要素及地面观测信息可以极大的提高模型预测性能。Song等^[56]同样基于地形加权回归技术，可以预测珠三角地区PM_{2.5}浓度变化。考虑到浓度随时间的变化规律，Bai等^[57]在地理加权技术的基础上提出时域地理加权技术（GTWR），基于500 m气溶胶光学厚度数据可以预测地面PM_{2.5}浓度。具体来说，GTWR通过气溶胶反演算法（SARA）预测气溶胶厚度（AOD），然后结合数值天气预报的多模式气象要素如行星边界层高度（PBLH），相对湿度，风速及温度等可以实现PM_{2.5}浓度的时空动态变化预测。Li等^[58]是早期将深度网络技术应用到地面PM_{2.5}浓度预测的机构之一，在主流深度信念网络框架下，将地理距离信息和PM_{2.5}时空相关信息融合起来，可以刻画隐空间PM_{2.5}关键特征，预测未来PM_{2.5}浓度信息。Liu等^[59]利用卫星观测数据，基于随机森林方法实现空间0.01°分辨率网格的长时PM_{2.5}浓度预测，随机森林法是机器学习领域常用的一种集成学习方法，该方法最大的优势是可以预测长时间段的PM_{2.5}浓度变化。Shen等^[60]提出一种纯数据驱动技术，利用深度网络隐式地学习PM_{2.5}浓度、卫星气溶胶光学反射率、观测角度和气象要素之间的关系。Khaefi等^[61]基于气象数据、卫星图像和社交媒体图像多种信息，利用深度网络技术实现了空气质量预测。由于主流时域地理加权技术均采用线性回归作为基本方法，线性假设限制了模型表达能力，为此，Li等^[62]在时域地理加权技术的基础上，充分挖掘数据的非线性关系，将线性回归泛化为深度卷积网络，提出时域地理加权深度网络，具有更强的非线性表达能力，可以预测0.1°空间分辨率的PM_{2.5}浓度，并提出交叉验证方法^[63]。Sarafian等^[64]分别检验了高斯马尔科夫随机场模型和线性混合模型对卫星数据PM_{2.5}浓度预测的效果，结果表明高斯马尔科夫随机场模型优于线性混合模型。卷积网络最早成功的应用于计算机视觉领域，Inception、VGG等模型在物体识别、物体检测、物体分割领域效果突出，为了验证该类方法是否能有效解决PM_{2.5}浓度预测问题，Hong等^[65]对此展开研究，并利用卫星图像数据、地面观测数据和卷积网络技术，验证了以上多种新型深度网络模型如Inception、VGG等在户外PM_{2.5}浓度预测上的效果。

IBM 绿色地平线是基于卫星观测等资料，利用AI技术实现空气质量监测、预报和防治的典型实践案例。IBM依托收购全球最大气象公司之一的TWC公司的相关业务，利用长达30年跨度的国际气象数据

分析及预报经验,从多个尺度挖掘了大气复合污染成因及传输规律。该平台利用认知计算、大数据分析以及物联网技术的优势,分析空气监测站和气象卫星传送的实时数据流,凭借自学习能力和超级计算处理能力,提供未来72 h的高精度空气质量预报,实现对城市地区的污染物来源和分布状况的实时监测。该平台是基于数据驱动的机器学习典范,该方法通过模拟人类大脑的神经连接结构,将数据在原空间的特征表示转换到具有语义特征的新特征空间,从而可以不经人工先验知识设计,自动地学习得到数据的层次化特征表示,提高预报性能^[66]。由IBM研究院研发的“污染过程多维认知案例库”,可以实现针对全国367个特定城市、20多个维度的历史污染过程和天气形势全自动化认知分析,助力专业管理机构决策。通过同化融合海量历史数据(诸如空气质量、气象、遥感监测等),从污染传输、气象条件、遥感反演等多个维度实现对PM_{2.5}、臭氧等多种污染物的历史同期污染过程深度对照。

2.2 海洋环境监测及预报

海洋中洋流^[67]、旋涡^[68-69]、海面温度^[70-71]对海上作业具有重要影响。Keating等^[72]提出一种随机滤波技术,可以基于卫星高度测量数据估计海洋旋涡热量传递,且该技术计算成本低。蔚山国家科学和技术研究所是早期采用机器学习技术和卫星数据检测沿海水质的机构之一, Kim等^[73]利用包括随机森林、支持向量回归等模型技术,实现了叶绿素和悬浮物浓度监测, Lee等^[74]利用决策树、随机森林技术,实现了南极冰川厚度估计。Kim等^[75]提出基于深度网络的南极海冰密度估计技术。该方法首先基于贝叶斯多模型融合构建集成区域气候模式(RCM),该模型由于充分考虑了单个模型的时空变化性,使得集成后的区域气候模式可以最小化单个区域模式的不确定性,并用于生成高分辨率观测数据,然后通过深度神经网络(DNN)非线性的拟合海冰密度这一要素与各类气候因子之间的隐式依赖关系,并估计未来10~20 a海冰密度的变化趋势。由于该模型以气象先验为指导对网络结构、损失函数、优化算法及激活函数等对整个模型学习过程进行优化,模型性能提升明显。Su等^[76]基于支持向量机技术,利用卫星数据实现了印度洋海平面表面温度、高度、盐度异常监测。Wang等^[77]基于卷积网络和合成孔径雷达数据实现了地球两极海冰密度的估计。以合成孔径雷达数据为输入,以海冰密度为输出,在不经任何特征提取或图像分割技术的前提下,卷积网络可以通过反向传播按照既定的优化目标函数及优

化方式实现模型自动更新。Savitha等^[78]新提出一种最小资源分配网络和增长剪枝径向基网络,以序列化的方式实现了海浪高度预测。Ducournau等^[79]采用超分辨率卷积网络,实现了卫星图像降尺度,并用于海平面温度的降尺度估计。Huang等^[80]基于卷积网络,实现了SAR图像端到端的海洋旋涡检测,在无需任何先验知识的前提下,大大提高了海洋旋涡检测精度和速度。

3 AI在卫星资料基本气象要素监测预报研究进展

3.1 降水预报

降水是与人们生活关系最密切的气象要素之一,自Shi等^[81]提出基于卷积长短时记忆网络(ConvLSTM)的降水技术以来, Shi等^[82]、Hernandez等^[83]、Ha等^[84]、Cao等^[85]、Manandhar等^[86]都对此展开深入研究。基于卫星数据的降雨估计在覆盖率和时空分辨率上明显优于地面降雨估计,为提高基于卫星数据的降雨估计精度, Tao等^[87]提出一种二阶段网络技术,第一阶段填充缺失值,第二阶段实现点对点精准降雨估计。第一阶段,模型通过堆栈式噪声自动编码器实现面积无雨区域的消除以及有雨区域的精确描述。第二阶段,模型仍然通过堆栈式噪声自动编码器在保证扭曲分布的前提下,实现降水精准估计。随后, Tao等^[88]又在此基础上引入星载红外、水汽数据,提出多模式卷积网络对该方法进行改进,且验证试验表明多模式数据尤其是水蒸气通道数据对提高识别有无降雨具有明显提升作用。

3.2 风监测预报

利用机器学习技术针对卫星数据的风要素估计由来已久,早在20年前, Chen等^[89]、Cornford等^[90]就开始探索用神经网络描述卫星散射计与海洋风力场之间的反演物理关系模型。最近,基于机器学习技术的风速估计非常火热,如Liu等^[91]、Wang等^[92]、Ghaderi等^[93]。基于主流机器学习方法, Xie等^[94]、Feng等^[95]、Khodayar等^[96]主要探究短时风速预报, Wan等^[97]主要探究逐天风预报。此外, Zhang等^[98]基于玻尔兹曼机、Qureshi等^[99]基于回归和迁移学习、Hu等^[100]基于深度迁移网络、Khodayar等^[101]基于深度生成网络、Qu等^[102]基于长短时记忆网络等均取得了一定进展。Cardona等^[103]最近基于主流卷积网络、递归网络,实现了对自然场景拍摄图像0.75~11 m/s的风速估计。该方法首先通过耦合式卷积神经网络提取图像的隐式判别式特征,而正如风在自然界中是一个连续的过程一样,该方法随后通过递归神经网络实现风速变化趋势

的拟合,进而通过特征分类器实现当前时段的风速估计。该成果2019年发表于机器学习及人工智能领域的顶级会议——“神经系统信息处理研讨会”,是较为前瞻的AI在气象领域的先进算法。

3.3 温度监测预报

Wu等^[104]最近使用卷积神经网络实现了静止卫星反演路面温度数据,提出多尺度特征聚合卷积神经网络,不同于传统方法只能实现小片区域的温度补全,MSFC-CNN可以通过卷积网络高度复杂的非线性特征实现对大片区域的温度补全。Singh等^[105]则采用多线性回归、多层感知器和自适应神经模糊推理系统技术实现了多深度土壤温度预报模型。Hendee等^[106]研发珊瑚礁预警系统网络,应用NOAA卫星海洋表面温度产品和人工智能分析软件实现了实时监测珊瑚表面温度。Shiguemori等^[107]应用神经网络方法实现了卫星资料反演大气温度,通过辐射传输方程直接刻画卫星数据特征,为神经网络模型提供训练数据,神经网络模型选择人工智能领域经典的径向基函数网络,并以数据为基础通过反向传播优化网络参数。Shiguemori等^[108]改进了神经网络模型,实现对垂直温度场的反演,并与HIRS/2高分辨率红外辐射探测仪的真实辐射数据以及无线电探空仪测量的温度剖面相比较,结果表明,神经网络模型反演结果与温度垂直探测结果非常接近。

4 AI在卫星资料高影响性天气监测预报研究进展

4.1 冰雹监测预报

各种自然灾害如冰雹等对工业、农业破坏性强,因此与之相关预警研究具有重要意义。Pullman等^[109]研究了基于卫星图像的冰雹检测、预警新技术,该技术以主流深度学习网络为框架,并通过2006—2016年的观测数据验证了该技术的有效性。此外,Czernecki等^[110]通过随机森林方法也实现了对冰雹灾害的精准估计。由于多数人工智能方法均基于数据驱动,研究者首先从数据多样性出发,融合了雷达反射率数据、闪电探测数据以及ERA5再分析对流指数数据等,极大地提高了模型的鲁棒性,并降低了误报率。Burke等^[111]主要研究了如何通过机器学习方法对模式预报结果进行相关后处理,提高冰雹预测精度。同前述文献一样,该方法同样基于多源数据融合及随机森林模型提高模型预报精度和鲁棒性,不同之处在于该方法基于模式预报后的数据后处理,即冰雹最大期望范围。

4.2 强风监测预报

大风天气影响强、范围广,每年大风都会造成巨

大的生命财产损失,对台风、风暴等大风信息预警具有实用价值。Kovordanyi等^[112]较早开展了基于神经网络并针对卫星数据的气旋风的跟踪预报,通过模拟人脑机制的多层神经网络实现的气旋风跟踪估计方法在测试集的方向准确率达98%,并且该研究指出,除卫星图像外,风速、水温、相对湿度、气压等额外气象要素可以有效提高预报精度。Qiu等^[113]基于模糊集合理论、支持向量机技术及闪电预警信息,提出风暴预警技术。Zhang等^[114]基于卫星图像序列,根据当前和历史卫星图像,以气象知识为先验,通过卷积网络提取与最具判别性的视觉特征,通过计算云的局部运动信息实现了短时大风预报。Hong等^[115]在卫星图像基础上,提出一种新型专用于台风中心跟踪的卷积神经网络,该网络用于提取台风中心显著判别特征,线性回归模型实现台风中心预测。Ruttgers等^[116]利用最新生成对抗网络技术,实现了针对遥感卫星数据对台风未来6 h轨迹跟踪,该技术在80 km误差范围内准确率为42.4%,120 km误差范围的准确率为74.5%。生成对抗网络是近年来较为火热的AI技术之一,与传统卷积神经网络不同,该网络分为两部分,第一部分为生成器,用于对任意的输入生成目标输出;第二部分为判别器,用于判断对任意的输入是否为真实数据。生成器和判别器的训练过程是一个博弈的过程,当二者达到纳什平衡时,模型的输出趋于稳定,模型的输出也即期望输出。此外,Jiang等^[117]、Gao等^[118]也对海上台风预测的相关机器学习技术展开研究。

4.3 强对流洪涝监测预报

对流云的产生通常会伴随着强降雨、风暴等,而对大数据环境下的强天气检测面临巨大挑战,当前主流研究方法大多基于相关物理变量而由专家先验知识定义的阈值,实现强天气精确仍是研究难点,因此,相关研究对降低灾害具有重要意义。Han等^[119]在决策树、随机森林、支持向量机等机器学习技术的基础上,利用各种气象、卫星数据,可以实现检测强对流的形成过程。Liu等^[120]实现了基于卷积网络的强天气检测作为气象领域强天气检测的一种辅助,是全球首次采用深度学习方法用于强天气检测,但从机器学习角度来看这只是深度学习技术的一次跨领域尝试。尽管该方法对辅助强天气检测提供了有效帮助,但该方法需要大量标注数据,而实际过程中,强天气有多种不同表现形式,如飓风、温带气旋等,实现完全标记需要耗费大量人力物力财力。为此,Racah等^[121]提出基于半监督时空自动编码器的强天气检测方法,通过多通道时空编码—解码器刻画数据特征,用于拟合

多通道数据、时域变换数据以及无标记数据的重构, 实现判别式特征提取, 从而实现强天气现象检测。Zhu等^[122]实现了基于主流GoogleNet的强天气识别。此外, 强天气的出现可能引发诸多灾害, Zhou等^[123]提出基于卷积网络的对流天气识别, Zhang等^[124]提出基于双流全卷积网络的对流云提取, Bischke等^[125]、Biffis等^[126]等都提出基于深度网络和遥感图像的强对流洪涝检测技术。

4.4 雷电监测预报

雷电对日常生活影响大、损失严重, 当前主流基于卫星数据的闪电预测方法都基于不同光谱通道的高温观测, 一旦该观测达到某一设定阈值, 即推送闪电预警。Johari等^[127]是早期研究基于AI技术闪电预警的研究机构之一, 根据历史观测数据和各类气象数据, 该方法设计了一组简单的神经网络, 仅包含两层卷积, 通过反向传播优化网络参数, 该模型可以实现提前4 h的闪电预警。Booyens等^[128]利用卫星时序数据, 研究了K-means方法、决策树方法、朴素贝叶斯方法在闪电检测和预警方面的效果。Schon等^[129]最近提出多种基于决策树技术和神经网络技术的卫星图像雷电预警技术, 是近年来较为先进的人工智能方法。该技术核心是将卫星图像的二维光流误差信息作为决策树、神经网络的输入, 并且认为光流误差是形成闪电对流的主要影响因子, 以此为卷积网络的输入, 该技术实现了未来15 min雷电精准预警, 预警准确率达96%, 且未来5 h雷电预警准确率达到83%。

4.5 火点监测预报

森林覆盖在生态中存在的最大隐患就是火点^[130-132], 森林火险容易造成大量的经济损失和人员伤亡。森林火险预警的一大难题就是如何在有限计算量的前提下, 拟合火势扩散的动态趋势, 这一过程本身可以视作一种马尔科夫决策过程, 而这一过程的主体是火点位置, 动作集是火点可能扩散方向, 即东西南北四个方位, 回报函数是该方法最终是否预测火点正确。在此框架下, Subramanian等^[133]基于最新强化学习技术, 分别通过值迭代法和策略搜索中的异步优势评论算法, 实现了森林火点的动态变化估计。Lee等^[134]、Zhao等^[135]也提出此类基于深度学习的森林火点检测技术。

5 展望

尽管AI技术具有极其广泛的应用前景, 但该类研究离实际落地应用还有一定差距, 人工智能在气象资料的应用领域面临着巨大挑战, 主要体现在以下三方面。第一, 数据完善及可靠性。AI技术是数据驱

动的机器学习机制, 其发展离不开大量人工标记数据的支撑, 大量气象观测站及气象卫星资料提供了海量数据, 但受限于观测手段等各种因素影响, 收集到的数据可能存在缺陷, 这会给人工智能算法的学习带来一定挑战。第二, 平台可扩展及共生性。传统气象领域与当前人工智能领域在技术实现上存在一定差异, 气象领域多数基于大量领域内的专家知识先验, 而AI技术不以先验为前提, 倾向于突出算法模型的自适应能力, 因此, 如何实现现有气象平台的可扩展性以及如何实现人工智能技术与现有气象平台的对接也给AI在气象领域的应用带来巨大困难。第三, 技术落地应用。一种先进方法的落地应用离不开前期基础积累、中期技术升级以及后期性能检验三步流程, 为此, 需要大量后期性能检验, 验证方法技术的有效性, 这需要耗费大量的人力、物力、财力, 给AI在气象领域的应用带来了挑战。

参考文献

- [1] Ting B, Deren L, Kaimin S, et al. Cloud detection for high-resolution satellite imagery using machine learning and multi-feature fusion. *Remote Sensing*, 2016, 8(9):715-720.
- [2] Shi M, Xie F, Zi Y, et al. Cloud detection of remote sensing images by deep learning. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE*, 2016:168-173.
- [3] Cai K, Wang H. Cloud classification of satellite image based on convolutional neural networks. *IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science. IEEE*, 2017: 874-877.
- [4] Zhang Z, Iwasaki A, Guo X, et al. Small satellite cloud detection based on deep learning and image compression. *Preprints 2018*, 2018020103, doi: 10.20944/preprints201802.0103.v1.
- [5] Li Z, Shen H, Cheng Q, et al. Deep learning based cloud detection for medium and high resolution remote sensing images of different sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 150: 197-212.
- [6] Ozkan S, Efendioglu M, Demirpolat C. Cloud detection from RGB color remote sensing images with deep pyramid networks. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE*, 2018: 6939-6942.
- [7] Hayatbini N, Hsu K, Sorooshian S, et al. Effective cloud detection and segmentation using a gradient-based algorithm for satellite imagery: application to improve PERSIANN-CCS. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(5): 901-913.
- [8] Tan C, Feng X, Long J, et al. FORECAST-CLSTM: A new convolutional LSTM network for cloudage nowcasting. *IEEE Visual Communications and Image Processing. IEEE*, 2018: 1-4.
- [9] Mohajerani S, Saeedi P. Cloud-Net: an end-to-end cloud detection algorithm for Landsat 8 imagery. *arXiv:1901.10077*, 2019.
- [10] Egli S, Thies B, Bendix J. A hybrid approach for fog retrieval based on a combination of satellite and ground truth data. *Remote Sensing*, 2018, 10(4): 628.
- [11] Colabone R O, Ferrari A L, Vecchia F A S, et al. Application of artificial neural networks for fog forecast. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2015, 7(2): 240-246.
- [12] Han T, Miao K, Yao Y, et al. Convolutional neural network for short term fog forecasting based on meteorological elements. *International Conference on Intelligent Computing. Springer*, 2018: 143-148.
- [13] Xie F, Shi M, Shi Z, et al. Multilevel cloud detection in remote sensing images based on deep learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017,

- 10(8): 3631-3640.
- [14] Wang J, Olsen P A, Conn A R, et al. Removing clouds and recovering ground observations in satellite image sequences via temporally contiguous robust matrix completion. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016: 2754-2763.
- [15] Rußwurm M, Körner M. Convolutional LSTMs for cloud-robust segmentation of remote sensing imagery. *arXiv:1811.02471*, 2018.
- [16] Zhu L, Zhu G, Han L, et al. The application of deep learning in airport visibility forecast. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2017, 7(03): 314-322.
- [17] Zhang D, Kabuka M R. Combining weather condition data to predict traffic flow: a GRU-based deep learning approach. *IET Intelligent Transport Systems*, 2018, 12(7): 578-585.
- [18] Koesdwiady A, Soua R, Karray F. Improving traffic flow prediction with weather information in connected cars: A deep learning approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(12): 9508-9517.
- [19] Shin D, Kim J H. A new application of unsupervised learning to nighttime sea fog detection. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 54(4): 527-544.
- [20] Cheng Y, Wu R. The research of aviation dangerous weather forecast for fog and haze based on BP neural network. *Proceedings of the Conference on Electrical Engineering and Automatic Control*. Springer, 2016: 877-883.
- [21] Zhan Y, Wang J, Shi J, et al. Distinguishing cloud and snow in satellite images via deep convolutional network. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(10): 1785-1789.
- [22] Xia M, Liu W, Shi B, et al. Cloud/snow recognition for multispectral satellite imagery based on a multidimensional deep residual network. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(1): 156-170.
- [23] Nijhawan R, Das J, Raman B. A hybrid of deep learning and hand-crafted features based approach for snow cover mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(2): 759-773.
- [24] Varade D, Dikshit O. Enhancement of snow cover change detection with sparse representation and dictionary learning. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, 40: 543-548.
- [25] Zhu L, Xiao P, Feng X, et al. A co-training, mutual learning approach towards mapping snow cover from multi-temporal high-spatial resolution satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 122: 179-191.
- [26] Gensler A, Henze J, Sick B, et al. Deep Learning for solar power forecasting- An approach using AutoEncoder and LSTM Neural Networks. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. IEEE, 2016: 002858-002865.
- [27] Yu J, Wang Z, Majumdar A, et al. DeepSolar: A machine learning framework to efficiently construct a solar deployment database in the United States. *Joule*, 2018, 2(12): 2605-2617.
- [28] Voyant C, Notton G, Kalogirou S, et al. Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. *Renewable Energy*, 2017, 105: 569-582.
- [29] Kaba K, Sarıgül M, Avcı M, et al. Estimation of daily global solar radiation using deep learning model. *Energy*, 2018, 162: 126-135.
- [30] Tuohy A, Zack J, Haupt S E, et al. Solar forecasting: methods, challenges, and performance. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2015, 13(6): 50-59.
- [31] Şenkul O, Kuleli T. Estimation of solar radiation over Turkey using artificial neural network and satellite data. *Applied Energy*, 2009, 86(7-8): 1222-1228.
- [32] Marquez R, Pedro H T C, Coimbra C F M. Hybrid solar forecasting method uses satellite imaging and ground telemetry as inputs to ANNs. *Solar Energy*, 2013, 92: 176-188.
- [33] Voyant C, Haurant P, Muselli M, et al. Time series modeling and large scale global solar radiation forecasting from geostationary satellites data. *Solar Energy*, 2014, 102: 131-142.
- [34] Zhou Q, Flores A, Glenn N F, et al. A machine learning approach to estimation of downward solar radiation from satellite-derived data products: an application over a semi-arid ecosystem in the US. *PloS One*, 2017, 12(8): e0180239.
- [35] Jang H S, Bae K Y, Park H S, et al. Solar power prediction based on satellite images and support vector machine. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(3): 1255-1263.
- [36] Srivastava S, Lessmann S. A comparative study of LSTM neural networks in forecasting day-ahead global horizontal irradiance with satellite data. *Solar Energy*, 2018, 162: 232-247.
- [37] Lago J, De Brabandere K, De Ridder F, et al. Short-term forecasting of solar irradiance without local telemetry: a generalized model using satellite data. *Solar Energy*, 2018, 173: 566-577.
- [38] Panda S S, Garg V, Chaubey I. Artificial neural networks application in lake water quality estimation using satellite imagery. *Journal of Environmental Informatics*, 2004, 4(2): 65-74.
- [39] Ahmad S, Kalra A, Stephen H. Estimating soil moisture using remote sensing data: a machine learning approach. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(1): 69-80.
- [40] Srivastava P K, Han D, Ramirez M R, et al. Machine learning techniques for downscaling SMOS satellite soil moisture using MODIS land surface temperature for hydrological application. *Water Resources Management*, 2013, 27(8): 3127-3144.
- [41] Ali I, Greifeneder F, Stamenkovic J, et al. Review of machine learning approaches for biomass and soil moisture retrievals from remote sensing data. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 16398-16421.
- [42] Xing C, Chen N, Zhang X, et al. A machine learning based reconstruction method for satellite remote sensing of soil moisture images with in situ observations. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 484-493.
- [43] Efremova N, Zausaev D, Antipov G. Prediction of soil moisture content based on satellite data and sequence-to-sequence networks. *arXiv:1907.03697*, 2019.
- [44] Kuwata K, Shibasaki R. Estimating crop yields with deep learning and remotely sensed data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2015: 858-861.
- [45] Xie M, Jean N, Burke M, et al. Transfer learning from deep features for remote sensing and poverty mapping. *AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2016:1583-1590.
- [46] Wang A X, Tran C, Desai N, et al. Deep transfer learning for crop yield prediction with remote sensing data. *Proceedings of the Conference on Computing and Sustainable Societies*. ACM, 2018: 50.
- [47] You J, Li X, Low M, et al. Deep Gaussian process for crop yield prediction based on remote sensing data. *AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2017:1829-1905.
- [48] Kussul N, Lavreniuk M, Skakun S, et al. Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(5): 778-782.
- [49] Garnot V S F, Landrieu L, Giordano S, et al. Time-space tradeoff in deep learning models for crop classification on satellite multi-spectral image time series. *arXiv:1901.10503*, 2019.
- [50] Shao Z, Zhang L, Wang L. Stacked sparse autoencoder modeling using the synergy of airborne LiDAR and satellite optical and SAR data to map forest above-ground biomass. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5569-5582.
- [51] Khan S H, He X, Porikli F, et al. Forest change detection in incomplete satellite images with deep neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(9): 5407-5423.
- [52] Li X, Peng L, Hu Y, et al. Deep learning architecture for air quality predictions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(22): 22408-22417.
- [53] Freeman B S, Taylor G, Gharabaghi B, et al. Forecasting air quality time series using deep learning. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2018, 68(8): 866-886.
- [54] Qi Z, Wang T, Song G, et al. Deep air learning: interpolation, prediction, and feature analysis of fine-grained air quality. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2018, 30(12): 2285-2297.
- [55] Ma Z, Hu X, Huang L, et al. Estimating ground-level PM_{2.5} in

- China using satellite remote sensing. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(13): 7436-7444.
- [56] Song W, Jia H, Huang J, et al. A satellite-based geographically weighted regression model for regional PM_{2.5} estimation over the Pearl River Delta region in China. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 154: 1-7.
- [57] Bai Y, Wu L, Qin K, et al. A geographically and temporally weighted regression model for ground-level PM_{2.5} estimation from satellite-derived 500 m resolution AOD. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 262.
- [58] Li T, Shen H, Yuan Q, et al. Estimating ground-level PM_{2.5} by fusing satellite and station observations: A geo-intelligent deep learning approach. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(23): 11985-11993.
- [59] Liu Y, Cao G, Zhao N, et al. Improve ground-level PM_{2.5} concentration mapping using a random forests-based geostatistical approach. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 272-282.
- [60] Shen H, Li T, Yuan Q, et al. Estimating regional ground-level PM_{2.5} directly from satellite top-of-atmosphere reflectance using deep belief networks. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(24): 13,875-13,886.
- [61] Khaefi M R, Pramestri Z, Amin I, et al. Nowcasting air quality by fusing insights from meteorological data, satellite imagery and social media images using deep learning. *ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*. IEEE, 2018: 393-396.
- [62] Li T, Shen H, Yuan Q, et al. Geographically and temporally weighted neural networks for satellite-based mapping of ground-level PM_{2.5}. arXiv:1809.09860, 2018.
- [63] Li T, Shen H, Yuan Q, et al. Validation approaches for satellite-based PM_{2.5} estimation: Assessment and a new approach. arXiv:1812.00135, 2018.
- [64] Sarafian R, Kloog I, Just A C, et al. Gaussian Markov random fields versus linear mixed models for satellite-based PM_{2.5} assessment: evidence from the northeastern USA. *Atmospheric Environment*, 2019, 205: 30-35.
- [65] Hong K Y, Pinheiro P O, Weichenthal S. Predicting global variations in outdoor PM_{2.5} concentrations using satellite images and deep convolutional neural networks. arXiv:1906.03975, 2019.
- [66] 尹文君, 张大伟, 严京海, 等. 基于深度学习的大数据空气污染预报. *中国环境管理*, 2015, 7(6):46-52.
- [67] Bayindir C. Predicting the ocean currents using deep learning. arXiv:1906.08066, 2019.
- [68] Franz K, Roscher R, Milioto A, et al. Ocean eddy identification and tracking using neural networks. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2018: 6887-6890.
- [69] Ashkezari M D, Hill C N, Follett C N, et al. Oceanic eddy detection and lifetime forecast using machine learning methods. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(23): 12234-12241.
- [70] Ouala S, Herzet C, Fablet R. Sea surface temperature prediction and reconstruction using patch-level neural network representations. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2018: 5628-5631.
- [71] Castellani M. Identification of eddies from sea surface temperature maps with neural networks. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(8): 1601-1618.
- [72] Keating S R, Majda A J, Smith K S. New methods for estimating ocean eddy heat transport using satellite altimetry. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(5): 1703-1722.
- [73] Kim Y H, Im J, Ha H K, et al. Machine learning approaches to coastal water quality monitoring using GOCI satellite data. *GIScience and Remote Sensing*, 2014, 51(2): 158-174.
- [74] Lee S, Im J, Kim J, et al. Arctic sea ice thickness estimation from CryoSat-2 satellite data using machine learning-based lead detection. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 698-703.
- [75] Kim J, Kim K, Cho J, et al. Satellite-based prediction of arctic sea ice concentration using a deep neural network with multi-model ensemble. *Remote Sensing*, 2019, 11(1): 19-25.
- [76] Su H, Wu X, Yan X H, et al. Estimation of subsurface temperature anomaly in the Indian Ocean during recent global surface warming hiatus from satellite measurements: a support vector machine approach. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 160: 63-71.
- [77] Wang L, Scott K A, Xu L, et al. Sea ice concentration estimation during melt from dual-pol SAR scenes using deep convolutional neural networks: a case study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4524-4533.
- [78] Savitha R, Al Mamun A. Regional ocean wave height prediction using sequential learning neural networks. *Ocean Engineering*, 2017, 129: 605-612.
- [79] Ducournau A, Fablet R. Deep learning for ocean remote sensing: an application of convolutional neural networks for super-resolution on satellite-derived SST data. *IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing*. IEEE, 2016: 1-6.
- [80] Huang D, Du Y, He Q, et al. Deepddy: a simple deep architecture for mesoscale oceanic eddy detection in sar images. *International Conference on Networking, Sensing and Control*. IEEE, 2017: 673-678.
- [81] Shi X, Chen Z, Hao W, et al. Convolutional LSTM network: a machine learning approach for precipitation nowcasting. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2015: 802-810.
- [82] Shi X, Gao Z, Lausen L, et al. Deep learning for precipitation nowcasting: a benchmark and a new model. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017: 5617-5627.
- [83] Hernández E, Sanchez-Anguix V, Julian V, et al. Rainfall prediction: a deep learning approach. *International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems*. Springer, 2016: 151-162.
- [84] Ha J H, Lee Y H, Kim Y H. Forecasting the precipitation of the next day using deep learning. *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 2016, 26(2): 93-98.
- [85] Cao Y, Li Q, Chen L, et al. Video prediction for precipitation nowcasting. arXiv:1907.08069, 2019.
- [86] Manandhar S, Dev S, Lee Y H, et al. A data-driven approach for accurate rainfall prediction. arXiv:1907.04816, 2019.
- [87] Tao Y, Hsu K, Ihler A, et al. A two-stage deep neural network framework for precipitation estimation from Bispectral satellite information. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, 19(2): 393-408.
- [88] Tao Y, Gao X, Ihler A, et al. Precipitation identification with bispectral satellite information using deep learning approaches. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(5): 1271-1283.
- [89] Chen K S, Tzeng Y C, Chen P C. Retrieval of ocean winds from satellite scatterometer by a neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 247-256.
- [90] Cornford D, Nabney I T, Bishop C M. Neural network-based wind vector retrieval from satellite scatterometer data. *Neural Computing and Applications*, 1999, 8(3): 206-217.
- [91] Liu H, Mi X, Li Y. Wind speed forecasting method based on deep learning strategy using empirical wavelet transform, long short term memory neural network and Elman neural network. *Energy Conversion and Management*, 2018, 156: 498-514.
- [92] Wang H, Li G, Wang G, et al. Deep learning based ensemble approach for probabilistic wind power forecasting. *Applied Energy*, 2017, 188: 56-70.
- [93] Ghaderi A, Sanandaji B M, Ghaderi F. Deep forecast: Deep learning-based spatio-temporal forecasting. arXiv:1707.08110, 2017.
- [94] Xie L, Gu Y, Zhu X, et al. Short-term spatio-temporal wind power forecast in robust look-ahead power system dispatch. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 5(1): 511-520.
- [95] Feng C, Cui M, Hodge B M, et al. A data-driven multi-model methodology with deep feature selection for short-term wind forecasting. *Applied Energy*, 2017, 190: 1245-1257.
- [96] Khodayar M, Kaynak O, Khodayar M E. Rough deep neural architecture for short-term wind speed forecasting. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 2770-2779.
- [97] Wan J, Liu J, Ren G, et al. Day-ahead prediction of wind speed with deep feature learning. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2016, 30(5): 1650011.
- [98] Zhang C Y, Chen C L P, Gan M, et al. Predictive deep Boltzmann machine for multiperiod wind speed forecasting. *IEEE*

- Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1416-1425.
- [99] Qureshi A S, Khan A, Zameer A, et al. Wind power prediction using deep neural network based meta regression and transfer learning. *Applied Soft Computing*, 2017, 58: 742-755.
- [100] Hu Q, Zhang R, Zhou Y. Transfer learning for short-term wind speed prediction with deep neural networks. *Renewable Energy*, 2016, 85: 83-95.
- [101] Khodayar M, Wang J, Manthouri M. Interval deep generative neural network for wind speed forecasting. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10(4): 3974-3989.
- [102] Qu X, Kang X, Zhang C, et al. Short-term prediction of wind power based on deep long short-term memory. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE*, 2016: 1148-1152.
- [103] Cardona J L, Howland M F, Dabiri J O. Seeing the wind: visual wind speed prediction with a coupled convolutional and recurrent neural network. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2019: 8732-8742.
- [104] Wu P, Yin Z, Yang H, et al. Reconstructing geostationary satellite land surface temperature imagery based on a multiscale feature connected convolutional neural network. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 300-305.
- [105] Singh V K, Singh B P, Kisi O, et al. Spatial and multi-depth temporal soil temperature assessment by assimilating satellite imagery, artificial intelligence and regression based models in arid area. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 150: 205-219.
- [106] Hendee J, Liu G, Strong A, et al. Near real-time validation of satellite sea surface temperature products at Rainbow Gardens Reef, Lee Stocking Island, Bahamas. *International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Miami, May 20-22, 2002.
- [107] Shiguemori E H. Atmospheric temperature and humidity retrieval from satellite data-artificial neural networks and hardware implementation approaches. *National Institute for Space Research, Brazil*, 2007.
- [108] Shiguemori E H, de Campos Velho H F, da Silva J D S. Atmospheric temperature retrieval from satellite data: New non-extensive artificial neural network approach. *Proceedings of the ACM symposium on Applied computing. ACM*, 2008: 1688-1692.
- [109] Pullman M, Gurung I, Ramachandran R, et al. Detection and prediction of hail storms in satellite imagery using deep learning. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2017.
- [110] Czernecki B, Tazarek M, Marosz M, et al. Application of machine learning to large hail prediction-the importance of radar reflectivity, lightning occurrence and convective parameters derived from ERA5. *Atmospheric Research*, 2019, 227: 249-262.
- [111] Burke A. Using machine learning applications and HREFv2 to enhance hail prediction for operations. *University of Oklahoma*, 2019.
- [112] Kovordányi R, Roy C. Cyclone track forecasting based on satellite images using artificial neural networks. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(6): 513-521.
- [113] Qiu T, Zhang S, Zhou H, et al. Application study of machine learning in lightning forecasting. *Information Technology Journal*, 2013, 12(21): 6031-6037.
- [114] Zhang Y, Wistar S, Li J, et al. Severe thunderstorm detection by visual learning using satellite images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 55(2): 1039-1052.
- [115] Hong S, Kim S, Joh M, et al. Globenet: Convolutional neural networks for typhoon eye tracking from remote sensing imagery. *arXiv:1708.03417*, 2017.
- [116] Rüttgers M, Lee S, You D. Typhoon track prediction using satellite images in a Generative Adversarial Network. *arXiv:1808.05382*, 2018.
- [117] Jiang G Q, Xu J, Wei J. A deep learning algorithm of neural network for the parameterization of typhoon - ocean feedback in typhoon forecast models. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(8): 3706-3716.
- [118] Gao S, Zhao P, Pan B, et al. A nowcasting model for the prediction of typhoon tracks based on a long short term memory neural network. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(5): 8-12.
- [119] Han H, Lee S, Im J, et al. Detection of convective initiation using meteorological imager onboard communication, ocean, and meteorological satellite based on machine learning approaches. *Remote Sensing*, 2015, 7(7): 9184-9204.
- [120] Liu Y, Racah E, Correa J, et al. Application of deep convolutional neural networks for detecting extreme weather in climate datasets. *arXiv:1605.01156*, 2016.
- [121] Racah E, Beckham C, Maharaj T, et al. Semi-supervised detection of extreme weather events in large climate datasets. *arXiv:1612.02095*, 2016.
- [122] Zhu Z, Li J, Zhuo L, et al. Extreme weather recognition using a novel fine-tuning strategy and optimized GoogLeNet. *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications. IEEE*, 2017: 1-7.
- [123] Kanghui Z, Zheng Y, Bo L I, et al. Forecasting different types of convective weather: a deep learning approach. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(5): 797-809.
- [124] Zhang X, Wang T, Chen G, et al. Convective clouds extraction from Himawari-8 satellite images based on double-stream fully convolutional networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019(12):1-5.
- [125] Bischke B, Bhardwaj P, Gautam A, et al. Detection of flooding events in social multimedia and satellite imagery using deep neural networks. *MediaEval*, 2017:1090-1100.
- [126] Biffis E, Chavez E. Satellite data and machine learning for weather risk management and food security. *Risk Analysis*, 2017, 37(8): 1508-1521.
- [127] Johari D, Rahman T K A, Musirin I. Artificial neural network based technique for lightning prediction. *Student Conference on Research and Development. IEEE*, 2007: 1-5.
- [128] Booyens A, Viriri S. Detection of lightning pattern changes using machine learning algorithms. *Proceeding of International Conference on Communications, Signal Processing and Computers*, 2014.
- [129] Schön C, Dittrich J, Müller R. The error is the feature: how to forecast lightning using a model prediction error. *Proceedings of the International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM*, 2019: 2979-2988.
- [130] Zhang Q, Xu J, Xu L, et al. Deep convolutional neural networks for forest fire detection. *International Forum on Management, Education and Information Technology Application. Atlantis*, 2016: 118-123.
- [131] Cortez P, Morais A J R. A data mining approach to predict forest fires using meteorological data. *Proceedings of the Portuguese Conference on Artificial Intelligence*, 2007: 512-523.
- [132] Cheng T, Wang J. Integrated spatio-temporal data mining for forest fire prediction. *Transactions in GIS*, 2008, 12(5): 591-611.
- [133] Subramanian S G, Crowley M. Learning forest wildfire dynamics from satellite images using reinforcement learning. *Conference on Reinforcement Learning and Decision Making*, 2017: 1546-1550.
- [134] Lee W, Kim S, Lee Y T, et al. Deep neural networks for wild fire detection with unmanned aerial vehicle. *IEEE international conference on consumer electronics. IEEE*, 2017: 252-253.
- [135] Zhao Y, Ma J, Li X, et al. Saliency detection and deep learning-based wildfire identification in UAV imagery. *Sensors*, 2018, 18(3): 712-722.

上海市区与洋山港区气温日变化差异分析

朱智慧 王琴 李丽

(上海海洋中心气象台, 上海 201306)

摘要: 利用上海徐家汇站与洋山站2008—2016年的地面气象观测资料, 分析了上海市区和洋山港区的气温日变化差异。结果表明: 1) 市区和港区气温日变化有明显季节差异, 四季市区气温日变化幅度均大于港区, 港区气温变化受海洋调节, 较为温和。2) 港区的最大升(降)温幅度要低于市区, 变化更为平缓。市区和港区的升温和降温都存在非对称特征, 降温比升温缓慢。3) 市区一年四季的最大升温出现时间都比较集中, 港区较分散。市区和港区的最大降温出现率围绕峰值呈现明显的不对称性, 市区较大的出现率集中在18—20时, 港区在16—18时。4) 市区和港区最高、最低温度的出现率都存在双峰结构, 13时和20时有较高的最高温度出现率, 05时和20时有较高的最低温度出现率。各季节最低温度出现率有显著差异。

关键词: 市区, 港区, 气温日变化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.005

Difference of the Diurnal Temperature Variations Between Urban and Harbor Area in Shanghai

Zhu Zhihui, Wang Qin, Li Li

(Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201306)

Abstract: Using the ground meteorological observation data of Xujiahui and Yangshan stations in Shanghai from 2008 to 2016, the diurnal variations of temperature in Shanghai and Yangshan harbor area were analyzed. The results show that: 1) There are obvious seasonal differences in diurnal variation of temperature between urban area and harbor area. The diurnal variation range of temperature in urban area is larger than that in harbor area in all seasons. The change of temperature in harbor area, due to the infection of ocean, is gentler. 2) The maximum temperature rising (cooling) range of the harbor area is lower than that of the urban area, and the change is gentler. The temperature rising and cooling changes in urban and harbor areas are asymmetric, and the temperature cooling changes more slowly than the temperature rising. 3) The maximum temperature rising changes in the urban areas are relatively concentrated throughout the year, and scattered in the harbor area. The maximum temperature cooling appearance rate of urban and harbor area shows obvious asymmetry around the peak value, and the larger incidence in the urban area is concentrated on 16:00 to 18:00 BT, while the harbor area on 18:00 to 20:00 BT. 4) the appearance of the highest and lowest temperature have double-peak structure, there is higher occurrence rate of the highest temperature on 13 and 20 BT, while there is higher occurrence rate of the lowest temperature on 05 and 20 BT. There is significant difference in the lowest temperature occurrence rate in each season.

Keywords: urban, harbor, the diurnal variations of temperature

0 引言

最近几十年, 随着城市化进程的发展, 城市热岛效应^[1-4]正成为气温变化的重要影响因素。Jones等^[5]在研究城市化问题对大尺度气温变化的影响时发现, 在中国1951—2004年城市化相关的增暖为 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。周雅清等^[6]的研究表明, 对华北地区, 平均气温、最低气温变化趋势中城市热岛效应加强因素的影响明显。还有其他许多研究者^[7-10]对城市化与某一地区气温变

化的关系进行了分析。近十几年, 自动气象站建设和野外观测技术的进步为城市局地的精细化气候研究带来了可能性。黄良美等^[11]基于试验观测数据, 对南京市不同下垫面的温度日变化规律、热岛强度特征进行了全面分析。胡文志等^[12]选取较能代表香港市区与郊区情况的气象站数据, 比较了香港市郊温度和相对湿度差异的日变化和季节变化, 及其与城市化影响的关系。李兴荣等^[13]用自动观测站资料分析了深圳城市、海洋、丘陵、山地等4个小气候区夏季典型晴天气温、湿度及舒适度特征。杨萍等^[14]利用北京地区4年67个自动气象站的逐小时气温观测资料, 研究了城郊气温的日变化差异及季节特征。上海作为国际化的大

收稿日期: 2018年11月27日; 修回日期: 2019年5月22日
第一作者: 朱智慧(1984—), Email: zhuzhihui83@qq.com
资助信息: 上海市气象局面上项目(MS201806)

都市, 城市化对局地气候的影响显著, 近年来关于上海城市热岛效应的研究也比较多^[15-17], 但这些研究集中在城市和郊区气温差异的分析上。

上海洋山港是世界最大的海岛型深水人工港, 随着港口经济的发展, 人们对港区气温的精细化预报要求也越来越高, 但分析市区和港区气温日变化差异性及其季节特征方面的研究较少, 对这些问题进行分析, 有助于提高港区气温的精细化预报水平。

1 资料与方法

1.1 站点选取和数据

上海徐家汇气象观测站自1873年建站至今已有141年历史, 位于徐家汇商业圈内, 有关上海城市热岛效应的许多研究都将徐家汇站选为市区站的代表^[15-17]。本文参照前人研究选取徐家汇站为市区站。

表1 站点分布及气温资料 (平均数值以2008—2016为参考)

Table 1 The distribution and temperature information of the stations (The average value is based on 2008—2016)

站点	海拔/m	平均温度/°C	平均最高温度/°C	平均最低温度/°C	平均气温日较差/°C	极端最高温度/°C	极端最低温度/°C
徐家汇	4.6	17.6	21.3	14.8	6.4	40.8 (2013年8月7日)	-7.2 (2016年1月24日)
洋山	54.4	16.9	19.5	15.0	4.5	37.6 (2013年8月7日)	-6.1 (2016年1月24日)

1.2 分析方法

计算了市区和港区2008—2016年逐年平均的平均温度、最高最低温度和9年平均的00—23时逐时平均温度、最高最低温度和气温日较差。此外, 还通过计算最高、最低温度出现时间的概率分布, 分析了市区和港区温度日变化的差异性, 计算方法^[14]为: 利用出现率 (出现次数/总次数) 来表征日最高 (低) 温度在各时次出现的概率, 统计了市区和港区站点全年和季节日最高温度 (最低温度) 出现时间的概率分布特征。在分析季节变化特征时, 3、4、5月为春季, 6、7、8月为夏季, 9、10、11月为秋季, 12、1、2月为冬季。

2 结果与分析

2.1 气温日变化

图1给出了市区和港区一年四季平均气温日变

化。上海洋山深水港区位于杭州湾口、长江口外的浙江省嵊泗崎岖列岛, 由大、小洋山等数十个岛屿组成。为了给洋山港区提供现代化的气象服务, 上海市气象局在位于洋山港区的小洋山岛上建立了洋山气象站。2005年洋山站被正式列入国家观测站, 2007年开始正式参与全国性气象资料发报。2007年以后洋山站的气象观测资料完整, 本文选取洋山站为港区站。

本文所使用的资料为徐家汇站和洋山站2008—2016年的地面气象观测文件, 包含每日的极值记录, 资料的时间间隔为1 h。

两个测站的海拔高度、平均温度、平均最高和最低温度、平均气温日较差 (气温日较差是指一天中气温最高值与最低值之差)、极端最高和最低温度等信息见表1。

从中可见, 由于下垫面的不同, 市区和港区的气温日变化在一年四季都有明显的异同。四季市区气温日变化幅度均大于港区, 说明港区气温受海洋的调节变化较为温和。四季两站最高气温均出现在13—14时, 最低温度出现在05—07时。春季和夏季, 市区的气温在00—23时都高于港区, 14时前两者温差逐渐拉大, 之后逐渐减小。秋季和冬季, 00—10时和19—23时, 港区气温要高于市区; 10—19时, 港区气温低于市区。这说明, 在四季, 由于市区下垫面对太阳辐射的响应快, 日出之后, 市区增温更快, 10—18时左右市区气温要明显高于港区, 日落之后, 在春季和夏季, 天气处在一年中由冷转暖的阶段, 市区夜间城市热岛效应比较明显, 气温高于港区, 在秋季和冬季, 天气处在一年中由暖转冷的阶段, 夜间城市热岛效应

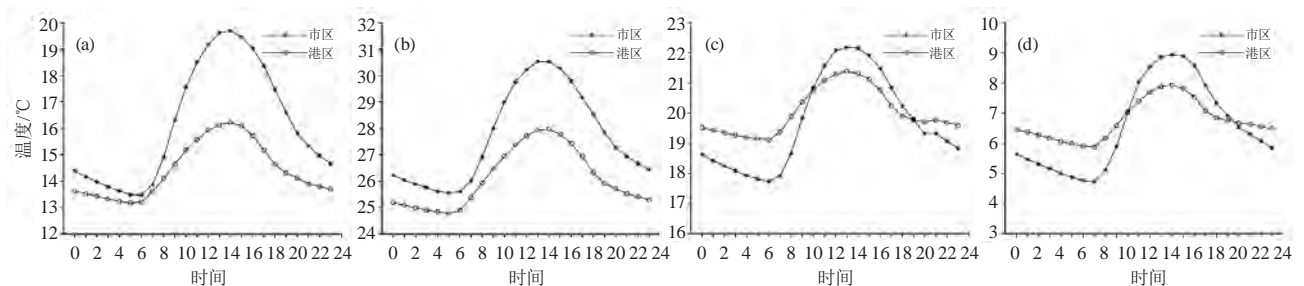


图1 市区 (星号线) 和港区 (空心圆点线) 气温日变化特征

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 1 Diurnal air temperature variations between urban (asterisk) and harbor (hollow point)

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

对气温的调节作用小于海洋，市区的气温低于港区。

2.2 变温强度

图2给出了市区和港区9年平均的1 h、3 h、6 h间隔的气温变化的日变化特征曲线。从中可见，市区和港区的1 h变温都在09时达到最大值，市区的3 h和6 h最大正变温出现在11时、13时，而港区出现在10时、

12时，均比市区提前1 h；市区的最大负变温出现在18时、19时和21时，港区在17时、18时和20时，同样比市区提前1 h。此外，不管哪种时间间隔，港区的最大升（降）温幅度都要低于市区，说明由于海洋的调节作用，港区的温度变化更为平缓。

从图3中1 h变温的日变化的季节特征可以看到市

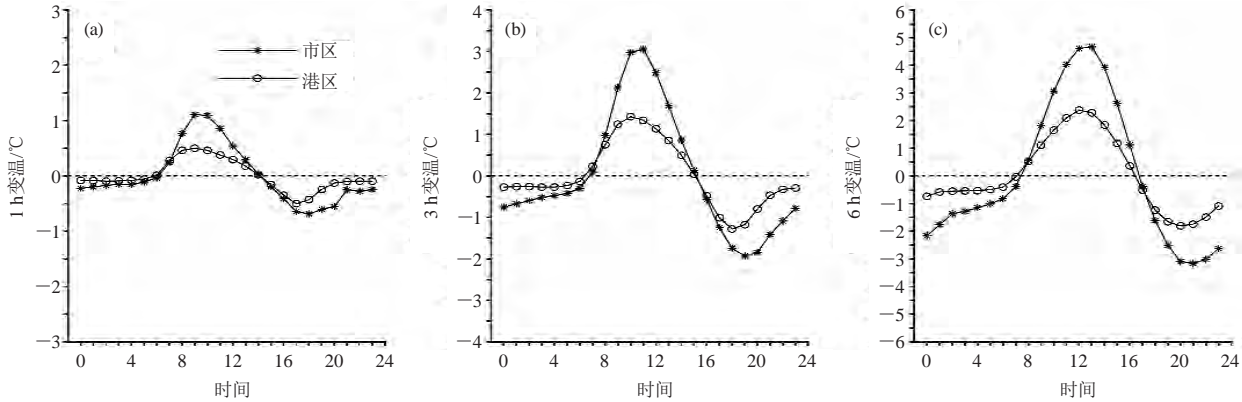


图2 市区（星号线）和港区（空心圆点线）变温日变化
(a) 1 h, (b) 3 h, (c) 6 h

Fig. 2 Diurnal variation of temperature increment in urban (asterisk) and harbor (hollow point) areas
(a) 1 hour, (b) 3 hours, (c) 6 hours

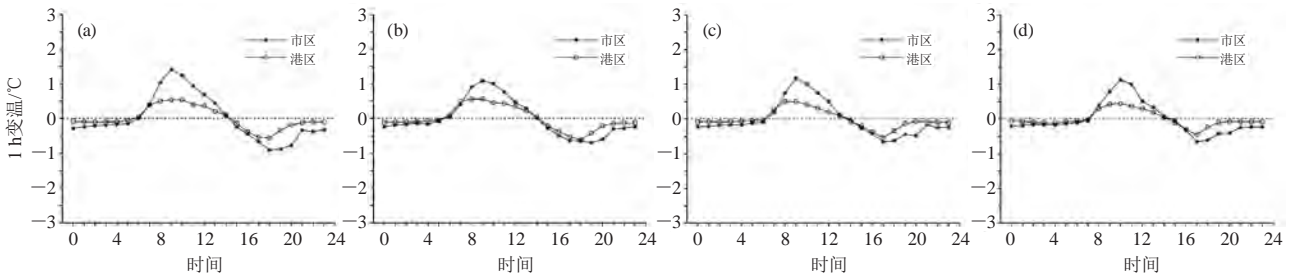


图3 市区（星号线）和港区（空心圆点线）1 h变温的日变化
(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 3 Diurnal temperature variation for 1 hour in urban (asterisk) and harbor (hollow point) areas
(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

区和港区一年四季的最大升温都出现在09时，春季和夏季市区最大降温出现在18、19时，港区出现在17、18时，提前1 h，而在秋季和冬季，市区和港区的最大降温都出现在17时；一天中，市区的升（降）温幅度要大于港区。此外，市区和港区的1小时升温 and 降温都存在非对称特征。以夏季为例，升温从06时开始，到09时达到峰值，历时3 h，降温从14时开始，到19时达到最低值，历时5 h，说明对市区和港区，降温过程都要比升温过程缓慢。3 h和6 h变温日变化的季节特征（图略）与1 h变温类似。

图4给出了市区和港区1 h、3 h、6 h间隔的最大升温和最大降温出现率的9年平均日变化特征曲线。从中可以看到，不管哪种时间间隔，市区的最大升温出

现率的峰值要明显高于港区，而最低温度出现率两者接近，说明最大升（降）温除了与日照有关，还与下垫面的属性密切相关。对市区和港区，1 h和3 h最大升温出现率峰值都出现在10—11时，6 h最大升温出现率出现在13—14时。市区和港区的1 h最大降温出现率最大值都出现在18时；市区的3 h最大降温出现率最大值出现在20时，港区出现在19时；市区和港区的6 h最大降温出现率最大值都出现在21时。

从图5中可以看到，市区四季的1 h最大升温都比较集中，春、夏、秋季出现率的峰值在10时，冬季在11时，数值为30%~40%。港区的最大升温主要出现在09—14时，较为分散，四季出现率的峰值都低于20%。春季市区和港区最大降温出现率的峰值都出现

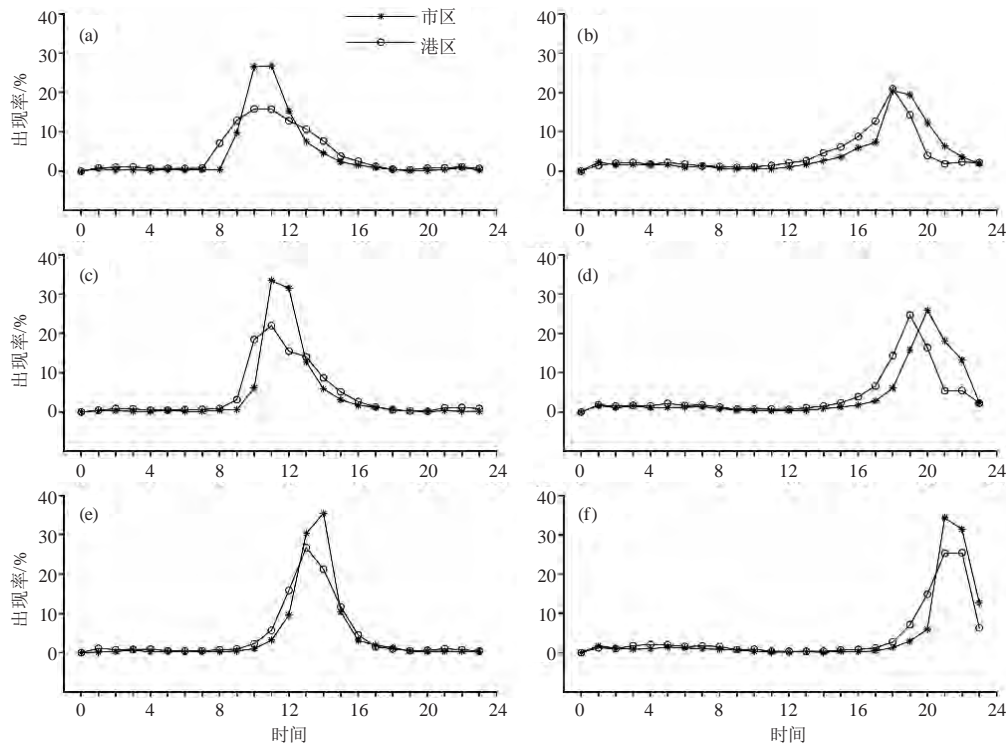


图4 市区（星号线）和港区（空心圆点线）最大升温（a：1 h，c：3 h，e：6 h）和最大降温（b：1 h，d：3 h，f：6 h）出现率的日变化

Fig. 4 Occurrence rate of maximum temperature rising (a: 1 hour, c: 3 hours, e: 6 hours) and maximum temperature cooling (d: 1 hour, d: 3 hours, f: 6 hours) increment in urban (asterisk) and harbor (hollow point) areas

在19时；夏季市区的峰值出现在18时，港区出现在19时，比市区落后1 h，而且港区的峰值要高于市区。秋季和冬季，市区和港区的峰值都出现在18时，且数值接近。此外，市区和港区的1 h最大降温出现率围绕峰值的分布呈现明显的不对称性，市区较大的出现率集中在18—20时，港区在16—18时。3 h和6 h最大升温出现率的日变化的季节变化特征与1 h类似（图略），只是峰值出现时间有差别。

2.3 日极端气温出现时间的概率分布

最高（低）气温出现的时间是气温日变化的重要特征，过去人们主要关注平均的最高（低）温度出现时间，对最高（低）气温出现时间的概率分布研究较少，对其进行分析，可以加深对气温日变化特征的认识。图6给出了市区和港区最高（低）温度出现率的年平均和四季日变化特征。

从图6a、6c、6e、6g、6i可见，市区和港区年平均的最高温度出现率都存在双峰结构，最大的时次都为13时，其次为20时。各季节最高温度出现率的平均状态与年平均状态情况基本一致，但略有差异。其中，市区和港区春季和夏季最高温度出现率最大的时次均为13时；秋季市区为12时，港区为13时，市区比

港区提前1 h；冬季市区为14时，港区为13时，市区比港区落后1 h。市区和港区在春、夏、秋三个季节最大的最高温度出现率都在12—13时，在冬季，20时也存在很高的出现率。

从图6b、6d、6f、6h、6j可见，市区和港区年平均的最低温度出现率有两个峰值，最大的时次都为05时，其次为20时。各季节最低温度出现率的平均状态与年平均状态有较显著差异。04—06时以及19—20时都是最低温度较容易出现的时段，其中市区一年四季的最低温度出现率的最大值都在04—06时，数量在25%以上，港区夏季04—06时的最低温度出现率较明显，春、秋、冬季20时的最低温度出现率与05时接近。

3 结论

1) 由于下垫面的不同，市区和港区的气温日变化在一年四季都有明显的异同。四季市区气温日变化幅度均大于港区，说明港区气温受海洋的调节变化较为温和。由于市区下垫面对太阳辐射的响应快，日出之后，市区增温更快，10—18时左右市区气温要明显高于港区，日落之后，在春季和夏季，夜间城市热岛效应比较明显，市区气温高于港区，而在秋季和冬

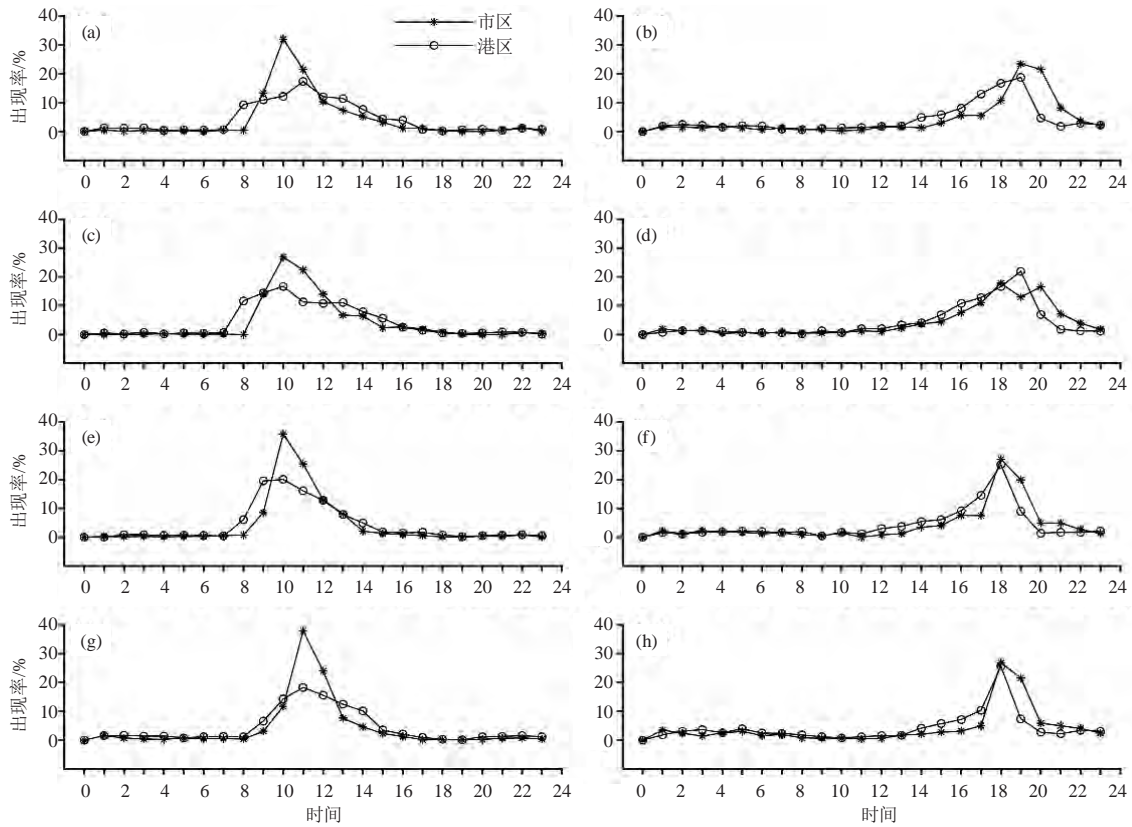


图5 市区(星号线)和港区(空心圆点线)1小时最大升温(a:春季,c:夏季,e:秋季,g:冬季)和最大降温(b:春季,d:夏季,f:秋季,h:冬季)出现率的日变化

Fig. 5 Diurnal variations of occurrence rate of maximum temperature rising (a: spring, c: summer, e: autumn, g: winter) and maximum temperature cooling (b: spring, d: summer, f: autumn, h: winter) increment for 1 hour in urban (asterisk) and harbor (hollow point) areas.

季,夜间城市热岛效应对气温的调节作用小于海洋,市区的气温低于港区。

2) 不管哪种时间间隔,市区的最大升(降)温幅度都要高于港区,港区的温度变化更为平缓。市区和港区的1 h升温 and 降温都存在非对称特征,降温过程比升温过程缓慢。

3) 市区和港区的最大升温集中在10—14时,而最大降温集中在19—21时,说明变温受日照变化的影响显著。同时,市区最大升温出现率的数值要明显高于港区,说明变温还受下垫面性质的影响。市区四季的最大升温都比较集中,港区较为分散。市区和港区的最大降温出现率围绕峰值的分布呈现明显的不对称性,市区较大的出现率集中在18—20时,港区在16—18时。

4) 市区和港区最高、最低温度的出现率都存在双峰结构,在13时和20时存在较高的最高温度出现率,在05时和20时存在较高的最低温度出现率。各季节最高温度出现率的平均状态与年平均状态情况基本一致,但略有差异,港区最高温度出现率峰值出现时

间春季和夏季与市区一致,秋季比市区落后1 h,而冬季提前1 h。各季节最低温度出现率的平均状态与年平均状态有较显著差异,04—06时以及19—20时都是最低温度较容易出现的时段,其中市区一年四季的最低温度出现率的最大值都在04—06时,港区夏季04—06时的最低温度出现率较明显,春、秋、冬季20时的最低温度出现率与05时接近。

本文仅对市区和港区的平均状况进行了分析,实际上,由于地形条件、天气状况等方面的影响,市区和港区的气温差异性还有很多值得研究的地方。此外,由于观测资料样本时间较短,所得到的结论也需要在样本积累较长时间后进一步验证。

参考文献

- [1] Mnaley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84: 70-72.
- [2] Thomas R K, Henry F D, George K. Urbanization: its detection and effect in the United States climate record. Journal of Climate, 1988, 1 (11): 1099-1123.
- [3] Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effect on time series of surface air temperature. Nature, 1990, 347: 169-172.

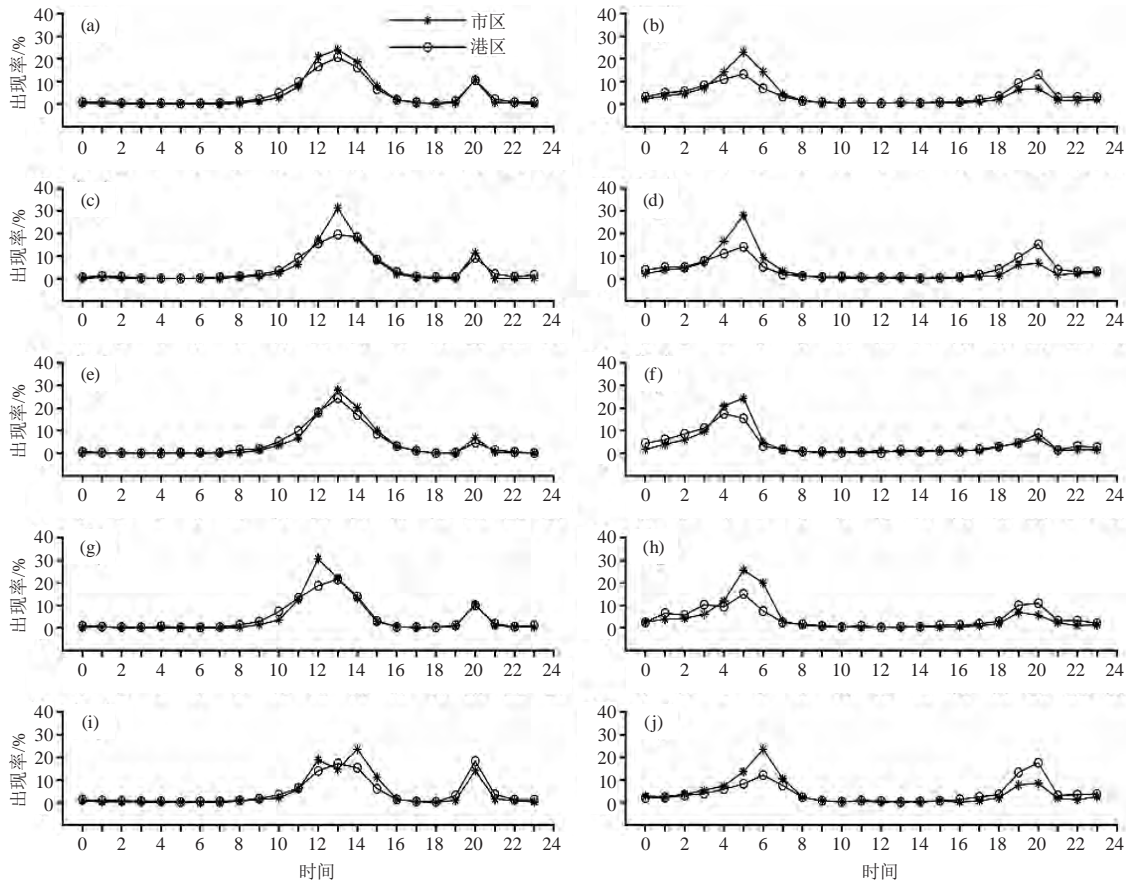


图6 市区 (星号线) 和港区 (空心圆点线) 最高温度 (a: 年平均, c: 春季, e: 夏季, g: 秋季, i: 冬季) 和最低温度 (b: 年平均, d: 春季, f: 夏季, h: 秋季, j: 冬季) 出现率的日变化

Fig. 6 Diurnal variations of maximum (a: annual mean, c: spring, e: summer, g: autumn, i: winter) and minimum (b: annual mean, d: spring, f: summer, h: autumn, j: winter) temperature occurrence rate in urban (asterisk) and harbor (hollow point) areas

[4] Saaroni H, Ben-Dor E, Bitan A, et al. Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 48 (1): 1-18.

[5] Jones P D, Lister D H, Li Q. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113(D16): 280-288.

[6] 周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化趋势的影响. *高原气象*, 2009, 28(5): 1158-1166.

[7] 刘霞, 景元书, 王春林, 等. 城市化进程对南京市气温变化影响的主成分分析. *热带气象学报*, 2010, 26(4): 509-512.

[8] 林学椿, 于淑秋. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 39-45.

[9] 赵娜, 刘树华, 虞海燕. 近48年城市化发展对北京区域气候的影响分析. *大气科学*, 2011, 35(2): 373-385.

[10] 谢庄, 崔继良, 陈大刚. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 69-75.

[11] 黄良美, 黄海霞, 项东云, 等. 南京市四种下垫面气温日变化规律及城市热岛效应. *生态环境*, 2007, 16(5): 1411-1420.

[12] 胡文志, 梁延刚, 雷惠雯. 香港城市与郊区气候差异分析. *气象*, 2009, 35 (2): 71-79.

[13] 李兴荣, 张小丽, 隋高林, 等. 深圳夏季典型晴天不同小气候区温湿及舒适度特征. *气象*, 2010, 36(10): 62-66.

[14] 杨萍, 肖子牛, 刘伟东. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析. *大气科学*, 2013, 37(1): 101-112.

[15] 邓莲堂, 束炯, 李朝颀. 上海城市热岛的变化特征分析. *热带气象学报*, 2001, 17(3): 273-280.

[16] 侯依玲, 陈葆德, 陈伯民, 等. 上海城市化进程导致的局地气温变化特征. *高原气象*, 2008, 27: 131-137.

[17] 穆海振, 孔春燕, 汤绪, 等. 上海气温变化及城市化影响初步分析. *热带气象学报*, 2008, 24(6): 672-678.

临安一次梅雨锋暴雨过程的风廓线雷达探测资料分析

何好斐¹ 高祝宇²

(1 杭州市余杭区气象局, 杭州 311100; 2 浙江省气象信息网络中心, 杭州 310000)

摘要: 利用临安CFL-03型边界层风廓线雷达探测资料对2017年6月23—24日的一次梅雨锋暴雨过程进行了详细分析, 结果表明风廓线雷达能够揭示江淮梅雨系统中的中尺度切变线特征, 低空切变线是这次暴雨过程的降水主要集中在降水前段和后段的主要原因, 高空西风急流使降水得以维持发展。由功率谱数据估算的回波强度反映了此次暴雨过程的发展变化细节, 降水集中区的降水云体发展深厚, 达到5 km以上。垂直速度和大气折射率结构常数 (C_n^2) 与降水的变化趋势一致, 10 mm的降水量对应的垂直速度接近7 m/s, C_n^2 对数值接近-11。由于与降水的良好对应关系, 风廓线雷达产品可以应用于强降水灾害天气的监测业务。

关键词: 风廓线雷达, 暴雨, 切变线, 急流, 回波强度, 垂直速度, 大气折射率结构常数

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.006

Analysis on Wind Profiling Radar Data of a Rainstorm at Lin'an

He Yufei¹ Gao Zhuyu²

(1 Yuhang Meteorological Bureau, Hangzhou 311100

2 Information Network Center of Zhejiang Meteorological Bureau, Hangzhou 310000)

Abstract: A Meiyu front rainstorm process from June 23, 2017 to June 24, 2017 is analyzed in detail by using CFL-03 boundary-layer wind profiling radar at Lin'an, and the results show that wind profiling radar observations are able to reflect characteristics of mesoscale shear line during the Meiyu front system. The main reason why precipitation is relatively concentrated at the beginning and end of this process is that low-level wind shear happens to move over Lin'an during those periods. Thanks to upper level jet, this rainstorm lasts a long time. Except wind profiles, radar echo intensity is estimated by power spectrum data to analyze the details of developments of the rainstorm, and it is found that precipitation cloud develops vigorously with height over 5 km. Other wind profiling radar products, such as vertical velocity and atmospheric refractive index structure constant (C_n^2), change in an identical way comparing with the precipitation. When the precipitation is above 10 mm, vertical velocity is around 7 m/s and log of C_n^2 is around -11. Consequently, wind profiling radar products can be used to monitor rainstorm operationally.

Keywords: wind profiling radar, rainstorm, shear line, jet, echo intensity, vertical velocity, C_n^2

0 引言

暴雨及其造成的洪涝是我国主要的自然灾害之一, 引发的山崩、滑坡、泥石流等次生灾害更是给国民经济和人民的生命财产带来严重危害。长江三角洲地区暴雨灾害频发, 尤其是在每年6月中下旬到7月上旬的梅雨锋暴雨^[1-3], 因其强度大且持续时间久的特点往往致灾严重。

为了更好地对暴雨进行分析研究与监测预警, 降低暴雨灾害的影响, 需要高时空分辨率的非常规探测

资料以弥补常规地面高空资料的不足^[4-5], 风廓线雷达作为新型的探测设备, 在灾害天气的研究领域与业务应用中已经发挥了重要作用^[6-9]。李峰等^[10]利用国产对流层II型风廓线雷达资料对北京地区经历的一次雾霾雨雪多相态天气过程进行了诊断分析, 结果表明风廓线雷达产品可以判别天气发展转变过程, 能很好揭示降水细节变化; 古红萍等^[11]利用三个站的Airda3000边界层风廓线雷达分析了北京地区一次强降水过程, 阐述了降水过程的复杂垂直结构与发展演变机理; 陈楠等^[12]将一次春季降水过程的风廓线雷达资料与地面自动站雨量数据进行对比分析和相关统计, 分析了风廓线雷达产品与降水的相关性; 周志敏等^[13]分析了湖北咸宁地区一次冰雹过程的风廓线雷达水平风和垂直速度资料, 提取了对流发展特征; 阮征等^[14]对风廓线

收稿日期: 2019年2月27日; 修回日期: 2019年8月26日
第一作者: 何好斐(1992—), Email: heyufeizhao@163.com
通信作者: 高祝宇(1990—), Email: 1171759671@qq.com
资助信息: 浙江省气象局科技项目(2017ZD18)

雷达探测降水云体的方法进行了探究；黄伟等^[15]利用风廓线雷达资料估测了雨滴谱参数；Benjamin等^[16]分析了美国中部地区的一次强雷暴天气与一次强降雪天气，充分肯定了美国风廓线雷达站网数据在强灾害天气监测与预报中的作用。

风廓线雷达不仅有很高的时间分辨率，而且垂直方向上的分辨率精细到60 m，因此对暴雨等中尺度现象的研究有很高的科学价值^[17]，将风廓线雷达资料应用于暴雨过程的分析研究是十分有意义的。目前浙江省业务运行的风廓线雷达已达7部，但风廓线雷达资料在省内的应用效果如何，仍缺乏相关的研究工作。本文利用临安站风廓线雷达探测资料分析了一次典型的梅雨锋暴雨过程，从风廓线时序变化中提取了此次暴雨过程的中尺度影响系统特征，通过功率谱数据估算回波强度以分析强降水的细节变化过程，分析垂直速度、大气折射率结构常数等产品，提取与强降水有关参数，为省内风廓线雷达对灾害性暴雨的天气分析与监测应用提供参考。

1 天气实况与设备资料

1.1 天气实况

2017年6月23—24日，受地面梅雨锋系统和高空数千千米西南东北走向急流带影响，华南和华东地区出现了持续性降水过程，其中杭州临安经历了一次暴雨过程，日降水量达到106.1 mm，降水过程小时雨量如图1所示。从图1中可以看出23日中午12时降水开始，17时降水到达开始阶段的峰值13.2 mm，18时到次日04时降水维持，小时降水量在1 mm左右，到24日上午降水势头持续不减，小时降水量10 mm左右，10—11时降水量达到降水末段的峰值，小时雨量在15.8 mm，之后降水逐渐减小，14时降水停止。此次梅雨锋暴雨过程雨量主要集中在降水前段和后段，尤

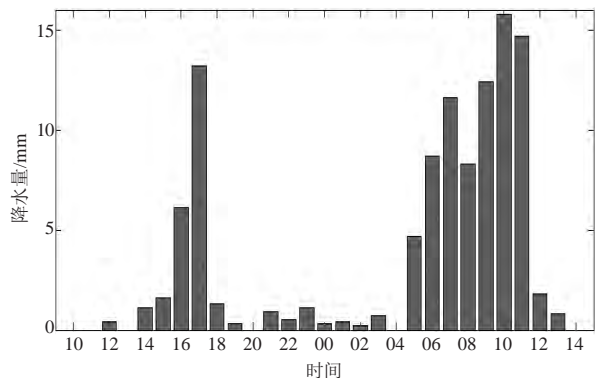


图1 2017年6月23日10时至24日14时临安地面自动站小时雨量(北京时,下同)

Fig.1 Hourly rainfall at Lin'an automatic weather station from 10:00 23 June to 14:00 24 June 2017

其在降水后段，小时雨量在10 mm左右的持续时间达到6 h，造成了杭州临安城区多处内涝积水，给民众生活带来诸多不便，水库水位上升加重了山洪暴发的危险性。

1.2 设备资料

临安风廓线雷达为CFL-03型边界层雷达，采用五波束扫描探测方式，一个探测周期包含低模式和高模式2个探测模式，探测周期为3~5 min，详细雷达参数见表1。

表1 临安风廓线雷达参数

Table 1 Parameters of wind profiling radars at Lin'an

参数	CFL-03边界层雷达	
	低模式	高模式
发射波长/m	0.227	0.227
脉冲宽度/ μ s	0.8	3.2
脉冲重复频率/Hz	31250	15625
FFT点数	512	512
谱平均数	8	4
探测起始高度/m	60	600
探测终止高度/m	1500	5280
距离库长/m	60	120

本文使用的风廓线雷达数据包括功率谱数据、ROBS文件数据、OOBS文件数据，其中功率谱数据的时间分辨率为4 min，ROBS文件数据的时间分辨率为6 min，OOBS文件数据的时间分辨率为1 h，ROBS和OOBS文件数据包含风廓线雷达探测各个高度的水平风速、水平风向、垂直速度、大气折射率结构常数等。

临安风廓线雷达与地面自动站位于同一站址，经纬度为119.7°E，30.22°N，有利于两者数据间的协同对比分析。

2 风廓线资料分析

利用风廓线雷达OOBS数据分析研究此次梅雨锋暴雨过程的动力条件，OOBS提供了每一小时间隔各个距离高度的水平风速和风向信息。图2给出了2017年6月23日10时至24日14时的水平风垂直廓线分布，从图中可以看出，降水之前10—11时，低空2 km以下以西风为主，高空以西南风为主，风随高度逆转，临安站上空冷平流过境；12—13时开始低空转为西南气流，降水开始；14时，低空1.8 km以下风向转为西北风，1.8 km以上东风转西南风，风随高度顺转，在1.8 km以上有暖平流，15时风在整个高度上由东风转西南风，临安受暖平流控制，14—15时存在着低空切变线系统如图2中左侧红线所示，低空东边暖湿气流与西北冷空气交汇，辐合上升明显，降水逐渐增多；16—21时，低层风向逐渐由东风转为偏西风，随高度增加转得越快，说明切变线系统的时间尺度随高度增加减小，

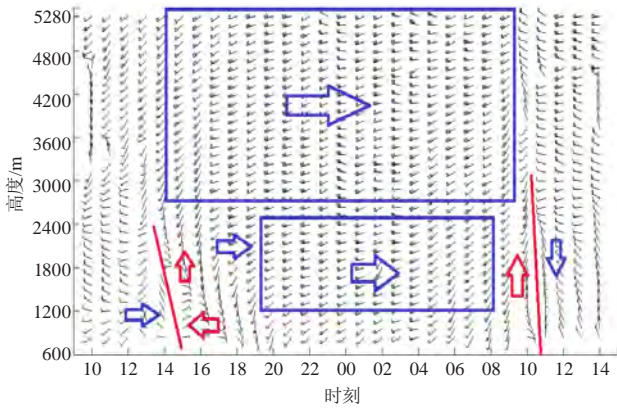
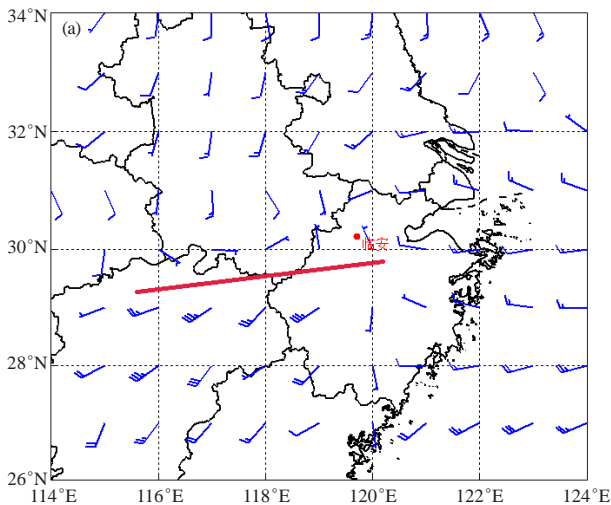


图2 2017年6月23日10时至24日14时临安风廓线雷达小时水平风垂直廓线

Fig.2 Hourly horizontal wind profiles of Lin'an wind profiling radar from 10:00 BT 23 June to 14:00 BT 24 June 2017

600 m高度切变线系统的时间尺度在6 h, 2 km高度的时间尺度为3 h, 3 km以上高空一直受偏西风急流控制; 22时一次日04时, 低空和高空都受偏西风影响, 风速较大, 降水维持发展; 05时开始低空风向由西风向南偏转, 到09时低空风向转为偏南风, 由于西南方向的水汽汇入, 降水再次增强; 10—11时, 低空风向由偏南风突然转为偏北风, 有中尺度切变线系统过境, 且发展高度深厚, 达到3 km, 如图2中右侧红线所示, 造成了11时的小时雨量超过15 mm; 12时以后低空受偏北气流影响, 降水逐渐停止。

图3给出2017年6月23日14时、20时 NCEP全球再分析850 hPa风场分布图, 图3a为23日14时的风场分布, 可以看出临安地区为西北风, 受冷气团控制, 与风廓线雷达23日14时的1.5 km左右高度水平风资料一致



致, 空间上江西北部到浙江中部有切变线, 如图3a中红线所示, 降水发展; 图3b为23日20时的风场分布, 可以看出临安地区为西南风, 受暖气团控制, 与风廓线雷达23日20时的1.5 km左右高度水平风资料一致, 此时切变线系统已消失, 降水减弱。图4给出2017年6月24日08时、14时 NCEP 全球再分析850 hPa风场分布图, 图4a为24日08时的风场分布, 可以看出临安地区为西南风, 受暖气团控制, 与风廓线雷达24日08时的1.5 km左右高度水平风资料一致, 空间上江西北部至临安以北有切变线, 如图4a中红线所示, 降水发展; 图4b为24日14时的风场分布, 可以看出临安地区为西北风, 受冷气团控制, 与风廓线雷达24日14时的1.5 km左右高度水平风资料一致, 此时切变线系统已消失, 降水减弱。从全球再分析850 hPa风场分布图可以看出, 此次暴雨过程临安地区先后经历了两次中尺度切变线系统过境, 分别触发了两次较强的降水, 第一次强降水暖气团较强, 第二次强降水冷气团较强, 与风廓线雷达水平风资料分析结果一致, 风廓线雷达时间分辨率更高, 可以看出两次切变线系统影响下临安地区风场更连续的变化。

图5给出了这次梅雨锋暴雨过程风廓线雷达不同高度平均风速情况, 其中图5a为0.06~1.08 km各个高度, 图5b为3~5.16 km各个高度。1 km以下平均风速较小, 在5 m/s左右; 3 km 以上平均风速较大, 均接近20 m/s。从平均风速的分布情况可以看出, 临安站上空3 km高度以上受急流系统影响, 急流下方风速不大, 存在着中尺度系统的可能性较大。

图6给出了水平风向随时间的变化分布, 图6a为

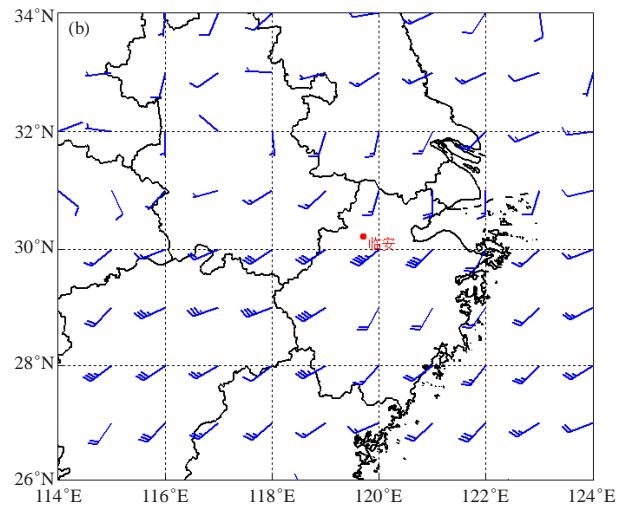


图3 2017年6月23日14时、20时 NCEP 1° x 1°全球再分析850 hPa风场
(a) 14时; (b) 20时

Fig.3 1° x 1°NCEP FNL 850 hPa wind field at 14:00 23 June and 20:00 23 June 2017
(a) 14:00 BT; (b) 20:00 BT

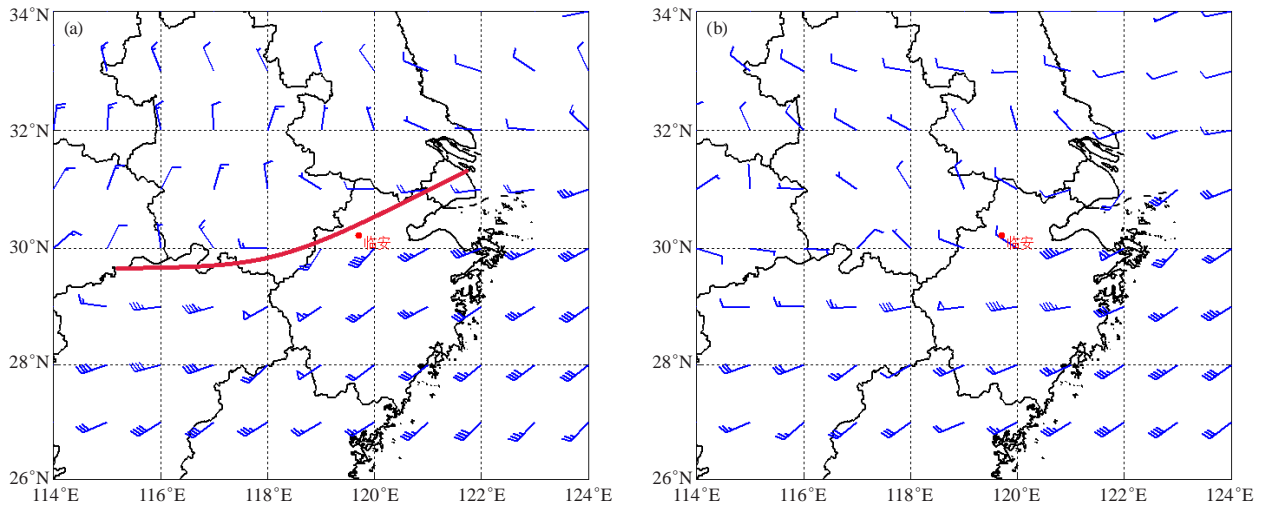


图4 2017年6月24日08时、14时 NCEP 1°×1°全球再分析850 hPa风场

(a) 08时; (b) 14时

Fig.4 1°×1°NECP FNL 850 hPa wind field at 08:00 24 June and 14:00 24 June 2017

(a) 08:00 BT; (b) 14:00 BT

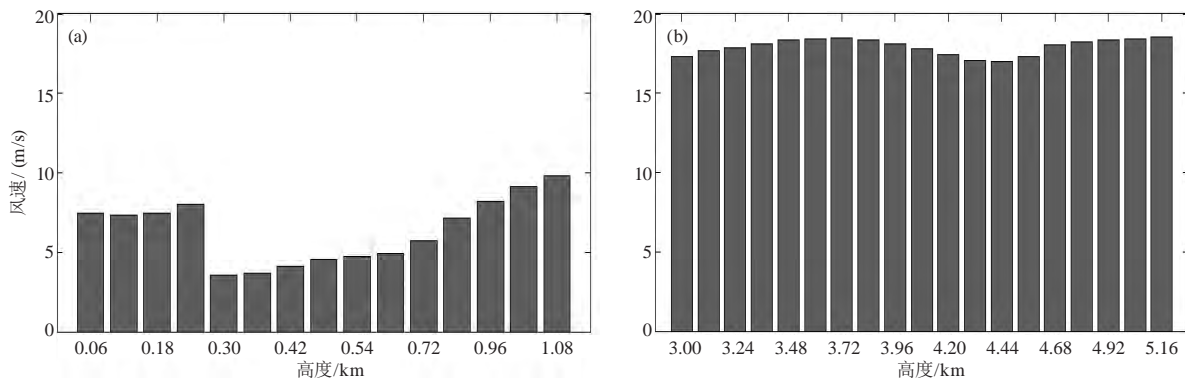


图5 降水时段内平均风速随高度的分布

(a) 0.06~1.08 km; (b) 3~5.16 km

Fig.5 Spatial distribution of average wind speed during the precipitation

(a) 0.06–1.08 km; (b) 3–5.16 km

1 km高度的水平风向随时间变化,图6b为3 km高度,图6c为5 km高度。图中水平风向指的是与正北方向的夹角,单位为度($^{\circ}$),范围在 $0\sim 360^{\circ}$, 0° 表示北风, 90° 表示东风, 180° 表示南风, 270° 表示西风, 360° 表示北风。从图6a可以看出,12:00—15:00受低空切变线系统影响,1 km高度水平风向在降水开始时出现较大波动,偏西风转为西北风又转为偏东风,15时开始切变线系统开始移出临安上空,风向逐渐由偏东风转为偏西风,说明偏西风的能量是强于偏东风的,在降水的中段20时至次日07时,1 km高度以偏西风为主,08时开始同样是受低空切变线系统影响,风迅速逆时针偏转,转为南风、偏东风至北风,带来了持续性强降水过程;从图6b可以看出,3 km高度水平风向以偏西风和西南风为主,受急流影响,风向比较平稳;从图6c可以看出,5 km高度水平风向以偏西风

为主,风向少有波动。

综上所述,此次梅雨锋暴雨过程的降水主要集中在降水前段和降水末段,这是由于在过程前期和后期,临安各经历了一次中尺度的低空切变线系统过境,过程前期暖气团较强,过程后期冷气团较强。相比全球再分析资料,风廓线雷达时间分辨率更高,可以看出两次切变线系统影响下临安地区风场连续的变化,降水过程临安地区高空一直受西风急流影响,降水得以维持发展。

3 雷达回波强度分析

3.1 雷达回波强度估算

风廓线雷达接收到的回波信号主要来自大气湍流散射,在有降水发生时,回波信号的主要贡献来自于降水粒子的散射。对于边界层风廓线雷达而言,波长一般在分米级,降水粒子的散射满足瑞利散射,弥散

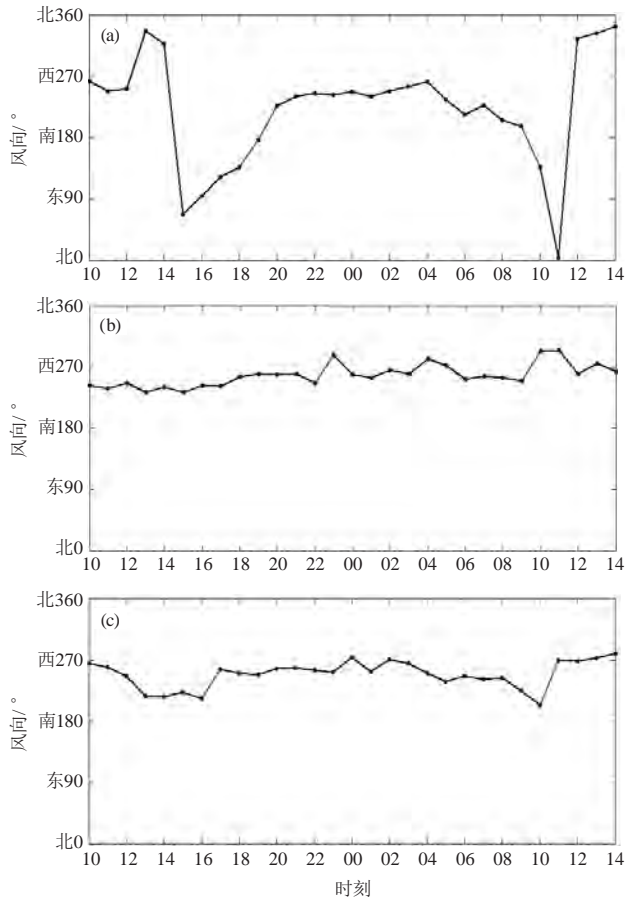


图6 降水时段内不同高度风向随时间的分布
(a) 1 km; (b) 3 km; (c) 5 km

Fig.6 Temporal distribution of wind direction at different heights during the precipitation
(a) 1 km; (b) 3 km; (c) 5 km

目标的雷达气象方程同样适用:

$$P_R = \frac{\pi^3}{1024 \times \ln 2} \times \frac{P_t h G^2 \theta \psi}{\lambda^2 R^2 L} \times \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \times Z, \quad (1)$$

式中, P_R 为降水回波信号功率; P_t 为发射功率; G 为天线增益; θ 、 ψ 为雷达水平、垂直波束宽度; h 为发射脉冲对应的空间长度; λ 为雷达发射波长; R 为目标物距离; L 为馈线损耗; $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|$ 为复折射指数项, 降水一般取0.93; Z 为雷达反射率因子, 即雷达回波强度。

为了获取 Z 值, 关键是计算回波信号功率 P_R 。 P_R 理论上可以由功率谱密度的零阶矩得到, 然而厂家给出的功率谱数据并非代表每一根谱线的功率值, 而是与功率值成正比, 需要对功率谱数据进行标定。目前对于风廓线雷达回波信号功率的估算主要有两种方法, 一种是利用回波信号信噪比, 由雷达系统的信噪比来估算 P_R ; 另一种是利用信号源对回波信号进行标定。本文采用雷回波信号信噪比估算信号功率的方

法, P_R 由雷达信噪比 R_{sn} 和雷达接收系统的噪声功率 P_n 计算得到。

$$P_R = R_{sn} \cdot P_n, \quad (2)$$

其中,

$$R_{sn} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i + N_i)}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (3)$$

$$P_n = K \cdot T_0 \cdot B_0 \cdot N_f, \quad (4)$$

式中, K 玻尔兹曼常数, T_0 是用绝对温度表示的雷达接收机系统噪声温度, B_0 为接收机的带宽, N_f 是噪声系数。

由式(1)~式(4)推导出雷达回波强度的计算式:

$$Z = \frac{1024 \cdot \ln 2}{0.93 \cdot \pi^3} \cdot \frac{\lambda^2 \cdot K \cdot T_0 \cdot B_0 \cdot N_f \cdot L}{P_t \cdot G^2 \cdot h \cdot \theta \cdot \psi} \cdot R_{sn} \cdot R^2, \quad (5)$$

雷达信噪比由功率谱数据谱线累加值 $\sum_{i=1}^n (S_i + N_i)$ 与噪声电平值 $\sum_{i=1}^n N_i / n$ 定, 通常认为远距离处最后几个距离库的返回信号不包含气象信号, 基本为噪声信号, 噪声电平可以由最后几个距离库的功率谱数据的谱线累加平均值计算得到。图7给出了这次临安梅雨锋暴雨过程中风廓线雷达的信噪比时间高度分布, 可以看出降水发生时信噪比明显增大, 达到40 dB左右。

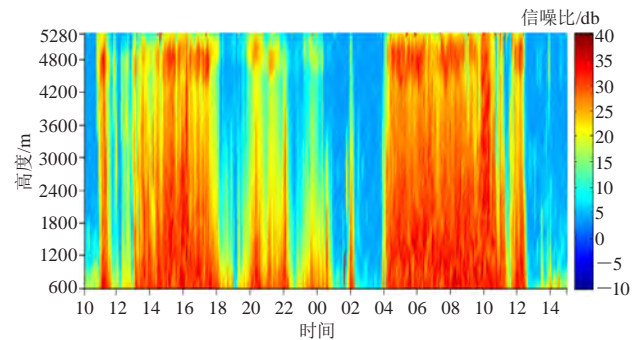


图7 降水过程的信噪比时间高度分布

Fig.7 Temporal and spatial distribution of signal-to-noise ratio during the precipitation

3.2 雷达回波强度特征

利用风廓线雷达功率谱数据, 根据式(5)估算风廓线雷达回波强度, 如图8所示。降水粒子的回波强度一般在20 dBz以上, 从图8可以看出此次梅雨锋暴雨过程的降水细节变化。11时开始回波强度在整个高度上增强, 说明临安上空开始有降水, 11—14时回波强度不高, 对应地面降水不大, 15—18时, 回波增强, 且回波顶高超过风廓线雷达最大探测高度, 5 km高度回波强度接近50 dBz。回波强度与粒子大小的6次方成正比, 回

波强度的贡献主要来自于大的降水粒子散射，低空回波强度较高空稍低，可能是由于高空降水粒子较大，而到了低空，降水粒子间的碰撞运动明显，大粒子变成了小粒子。18时到次日04时，20 dBz以上的回波强度不连续，且值不大，对应地面小时雨量也很小，在1 mm左右。04—12时，受中尺度低空切变线影响，降水回波连续且从降水回波高度范围可以看出降水云体发展深厚，12:30之后降水停止，回波强度减弱。

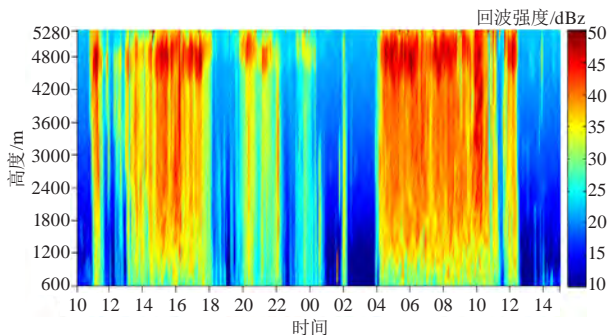


图8 降水过程的回波强度时间高度分布

Fig.8 Temporal and spatial distribution of echo intensity during the precipitation

4 风廓线雷达产品分析

4.1 垂直速度

风廓线雷达在晴空时利用湍流散射原理获取大气的垂直速度，而在降水时返回信号既包含大气的垂直速度又包含降水粒子的下落速度，在非特殊强对流情况下，粒子的下落速度比大气垂直运动速度大1~2个量级，风廓线雷达探测的垂直速度主要来自于降水粒子的下落速度。杨馨蕊等^[18]研究指出，风廓线雷达探测的垂直速度一般在4 m/s以上即为降水。

图9给出23日10时至次日15时的垂直速度时间高度分布情况，数据时间分辨率为6 min，高度分辨率为60 m，下降速度为正，上升速度为负。从图9中可以看出，降水开始之前，4 km以下存在弱的上升速度，

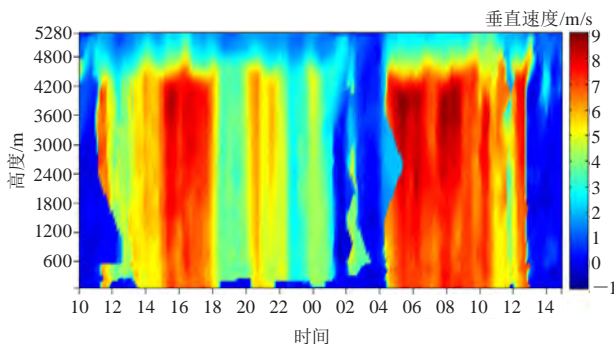


图9 降水过程的垂直速度时间高度分布

Fig.9 Temporal and spatial distribution of vertical speed during the precipitation

11时开始垂直速度增大到4 m/s以上，开始出现降水；16时附近垂直速度达到7 m/s以上，对应地面小时雨量在16时开始明显增多，16时和17时分别下了6.1 mm和13.2 mm；18时到次日04时大部分时间垂直速度维持在4 m/s左右，与地面小时雨量在1 mm左右相对应，其中03—04时垂直速度接近0 m/s，04时小时雨量为0；04时—12:30左右，降水过程加强，垂直速度在4.2 km以下达到7 m/s以上且高值区分布较为连续；12:30之后降水逐渐停止，垂直速度在0 m/s附近。

风廓线雷达探测的垂直速度与地面降水量之间有良好的正相关关系，降水量较大的时刻，整层高度上的垂直速度较大，此次个例中，地面降水量在10 mm以上的时刻，风廓线雷达垂直速度在高度上分布能达到7 m/s以上，地面降水量较小在1 mm附近的时刻，风廓线雷达垂直速度一般在4 m/s左右，且地面降水量的连续性与风廓线雷达3 m/s以上垂直速度的连续性相对应。

4.2 大气折射率结构常数

大气折射率结构常数 (C_n^2) 是衡量湍流强度的重要物理量之一，在降水发生时由于降水粒子的后向散射较晴空湍流散射强，返回信号功率值变大， C_n^2 计算结果也将变大，可以以此来研究降水过程的变化特征。

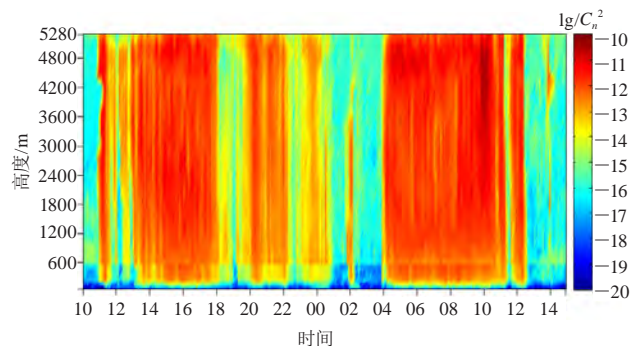


图10 降水过程的大气折射率结构常数时间高度分布

Fig.10 Temporal and spatial distribution of C_n^2 during the precipitation

图10给出 C_n^2 对数的时间高度分布，与垂直速度和地面降水的对应关系一样， C_n^2 的变化同样与地面降水有很好的对应关系。降水集中的前段和后段， C_n^2 对数值较大，在-11附近，且分布较为连续；在降水中段，地面雨量较小， C_n^2 对数值在-13附近，且不连续；在地面雨量为0的时刻， C_n^2 对数值在-17附近。

5 结论

1) 风廓线雷达资料能够捕获大尺度梅雨静止锋系统中的中尺度低空切变线，低空切变线系统带来了暴雨过程前段和后段的强降水，高空西风急流使得降水维持发展。

2) 利用功率谱数据估算了雷达回波强度, 回波强度能够反映临安此次梅雨锋暴雨过程的细节变化, 降水云体发展深厚, 5 km回波强度接近50 dBz。

3) 垂直速度和大气折射率结构常数产品与暴雨过程变化趋势一致, 降水发生时垂直速度与 C_n^2 明显增大, 10 mm以上降水时, 垂直速度接近7 m/s, C_n^2 对数值接近-11。

4) 风廓线雷达信噪比、回波强度、垂直速度以及大气折射率结构常数产品均能够在暴雨灾害性天气监测业务中发挥作用。

参考文献

- [1] 隆宵, 程麟生. “99·6”梅雨锋预报低涡切变线的数值模拟和分析. 大气科学, 2004, 28(3): 342-356.
- [2] 陶诗言. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究. 北京: 气象出版社, 2004.
- [3] 何斌, 何锋, 范晓红, 等. 一次长江中下游梅雨锋暴雨过程的诊断分析. 高原气象, 2013, 32(4): 1074-1083.
- [4] 何平. 相控阵风廓线雷达. 北京: 气象出版社, 2006.
- [5] 易仕明, 陈奕隆. 观测高空风的新装备——风廓线雷达. 气象, 1988, 14(11): 3-8.
- [6] 黄慧君, 钟爱华, 张健东. 多种探测资料在云南大理州强降水个例分析中的应用. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 50-57.
- [7] 杨波, 魏东. 二次开发风廓线探测资料及其在天气预报中的应用. 气象科技, 2010, 38(4): 413-417.
- [8] 董保举, 付志嘉, 李明, 等. 风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用. 气象科技, 2012, 40(1): 74-78.
- [9] 翟亮, 王令, 刘文军. 两次降雪天气过程预报中边界层风廓线雷达资料的应用. 气象科技, 2012, 40(5): 783-788.
- [10] 李峰, 施红蓉. 一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析. 气象, 2014, 40(8): 992-999.
- [11] 古红萍, 马舒庆, 王迎春, 等. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用. 气象科技, 2008, 36(3): 300-302.
- [12] 陈楠, 胡明宝, 徐芬, 等. 一次降雨过程风廓线雷达回波特征. 气象与环境学报, 2012, 28(5): 19-24.
- [13] 周志敏, 万蓉, 崔春光, 等. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 251-256.
- [14] 阮征, 葛润生, 吴志根. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究. 应用气象学报, 2002, 13(3): 330-338.
- [15] 黄伟, 张沛源, 葛润生. 风廓线雷达估测雨滴谱参数. 气象科技, 2002, 30(6): 334-337.
- [16] Benjamin S G, Schwartz B E, Koch S E, et al. 2004. The value of wind profiler data in U.S. weather forecasting. Bulletin of the American Meteorological Society, 85(12): 1871-1886.
- [17] 李晨光, 刘淑媛, 陶祖钰. 华南暴雨实验期间香港风廓线雷达资料的评估. 热带气象学报, 2003, 19(3): 269-276.
- [18] 杨馨蕊, 马舒庆, 吴蕾. UHF风廓线雷达降水数据判别方法的比较与评价. 大气科学学报, 2010, 33(5): 576-581.

(上接7页)

成为NOAA国家水模式(NWM)的基础。

(3) 在未来10年内对气象领域影响最大的趋势之一是转向基于影响的天气预报。例如, 当发生暴雨时, 预报和影响之间需要互动, 才能结合特定时段的降水量数据和坡度、土壤类型等地形条件数据, 预测出山体滑坡发生的概率。

(4) 气象观测将走向分层观测网。未来不再是拥有一个已知每个站点并进行质量的扁平网络, 替代者是一个高层网, 再下面还可以有第三层, 这些分层网最下端, 是通过物联网可以看到的来自消费者的气象数据。

(5) 未来边界层足够密集的高质量观测, 将为世界各地创建千米尺度的预报。行星边界层是需要更优数据的领域之一, 应该在行星边界层中使用更可靠的廓线信息, 而目前这样的信息尚不存在。

(6) 从卫星的角度来看, 需要重新认识的一项非常重要的技术是地球静止探测器。自20世纪70年代和80年代, 可见光红外自旋扫描辐射计(VISSR)大气测深仪(VAS)设计并在GOES卫星上运行以来, NASA没有在地球静止轨道上进行过任何温度和湿度探测的实验工作。VAS的光谱分辨率很低, 只有12个通道, 而目前近地轨道卫星上的高光谱分辨率探测器有2000多个通道。如果使用光谱分辨率更高的地球静止探测器, 能每30秒

或每分钟收集一次数据, 这样就能更好地了解小尺度天气, 对模式研究也将非常重要。

(7) 影响气象界最重大的技术进步正发生在行业之外。私营部门增值产品出现了爆炸式增长。如今气象数据应用方式多种多样, 社交平台、电视频道和应用程序都可以。一个巨大的挑战也随着其更广泛的传播出现: 确保信息以负责、准确和可靠的方式传播。令人担忧的是, 如今公众可获悉大量天气信息, 但事实上这些信息经过了过滤, 以获得更大的商业利益。未来公共和私营部门将继续紧密合作, 但是为了使这种伙伴关系良好运转, 需要制定“道德守则”, 以保证正确使用数据。

(8) 气象行业需要实施“哑巴工程”, 测风和测温并不需要超级灵巧的方式, 而是需要更便宜、能够大批量生产的方式, 来获得更多观测结果。建议NOAA与其花费数十亿美元来升级整个北美雷达网络, 不如购买50台雷达安装在卡车上, 或100台探空系统在货车上——这些技术如今价格相对合理。然后组建一个团队, 每天开车到危险区域, 以非常精细的分辨率收集大量数据。然后, 他们将其上传到数据中心输入模型。拥有这些“靶向”精细网格化数据将使我们有很大机会开展5 h严重风暴预报。

(编者感谢《中国气象报》同仁提供信息和翻译稿)

风云卫星地面应用系统计算机网络平台架构

赵现纲 林曼筠 谢利子 卫兰 范存群

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 计算机网络平台是风云卫星地面应用系统的重要支撑。从计算资源池、存储资源池、网络系统和管理软件等四个方面详细介绍了风云卫星地面应用系统计算机网络平台的架构和特点。计算资源池中采用了资源调度、并行计算、云计算、大数据等技术实现了计算资源的充分共享和高效使用; 存储资源池采用了存储虚拟化、分布式存储等技术实现了存储资源的池化共享; 采用软件定义的网络SDN技术保证了网络系统的高效与灵活; 通过一体化智能运维系统及典型应用分析与优化软件对系统进行了统一管理和持续优化。实际业务运行表明该平台运行高效可靠, 很好地支撑了卫星观测数据的接收、处理、存档、服务与应用以及卫星在轨管理等业务。

关键词: 风云卫星, 地面应用系统, 计算机网络系统, 智能运维

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.007

Computer Network System of FY Satellite Ground Segment

Zhao Xiangang, Lin Manyun, Xie Lizi, Wei Lan, Fan Cunqun

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Computer network system is an important support for the FY satellite ground segment. This paper introduces the architecture and characteristics of the computer network platform of the FY satellite ground segment from four aspects including computing resource pool, storage resource pool, network system, and management software. Resource scheduling, parallel computing, cloud computing, big data and other technologies are used in the computing resource pool to realize the full and efficient use of computing resources. The storage resource pool uses storage virtualization and distributed storage technologies to realize the sharing of storage resources. The software-defined network technology ensures the efficiency and flexibility of the network system. Integrated intelligent maintenance system and typical application analysis and optimization software have been developed to achieve unified management and continuous optimization of the system. The actual operation shows that the platform is efficient and reliable, and it supports the satellite data reception, processing, archiving, service, application, and satellite on-orbit management efficiently.

Keywords: FY satellite, ground segment, computer network system, intelligent operation and maintenance

0 引言

风云卫星地面应用系统计算机网络平台(Computer Network and Storage, 以下简称CNS)为整个地面应用系统提供计算、网络、存储支撑, 是风云卫星地面应用系统的基石^[1-2]。计算机网络平台的架构设计与整个风云地面系统运行的稳定性、可靠性、安全性、时效性等有着直接的关系。

自第一颗风云气象卫星发射以来, 风云卫星地面应用系统计算机网络平台架构经历了30多年的滚动发展和持续改进, 计算设备经历了从大型机到小型机, 再到通用X86计算平台的变革过程。网络互联带宽也

由10 MB逐步提升至100 GB。所采用的存储技术也由单一的磁带、磁盘发展到目前磁盘阵列、网络存储以及分布式存储等多种存储技术共存的局面。数据存档量也由原来的GB级增长到现在的10 PB级。

目前, CNS通过采用先进的云计算、SDN(Software-Defined Network)网络互联、存储虚拟化、高性能并行计算、资源调度等技术, 解决了快速、稳定、实时处理海量卫星观测数据的难题, 实现了平台高效、可靠运行, 很好地支撑了风云气象卫星的工程建设和业务运行。

1 平台架构

风云气象卫星地面系统新一代IT平台是云计算就绪的基础平台, 平台架构如图1所示。为了兼顾IT资源的共享和安全性, 平台中资源池被设计成专用资源

收稿日期: 2018年12月4日; 修回日期: 2019年9月9日
第一作者: 赵现纲(1976—), Email: xgzhaoc@cmac.gov.cn

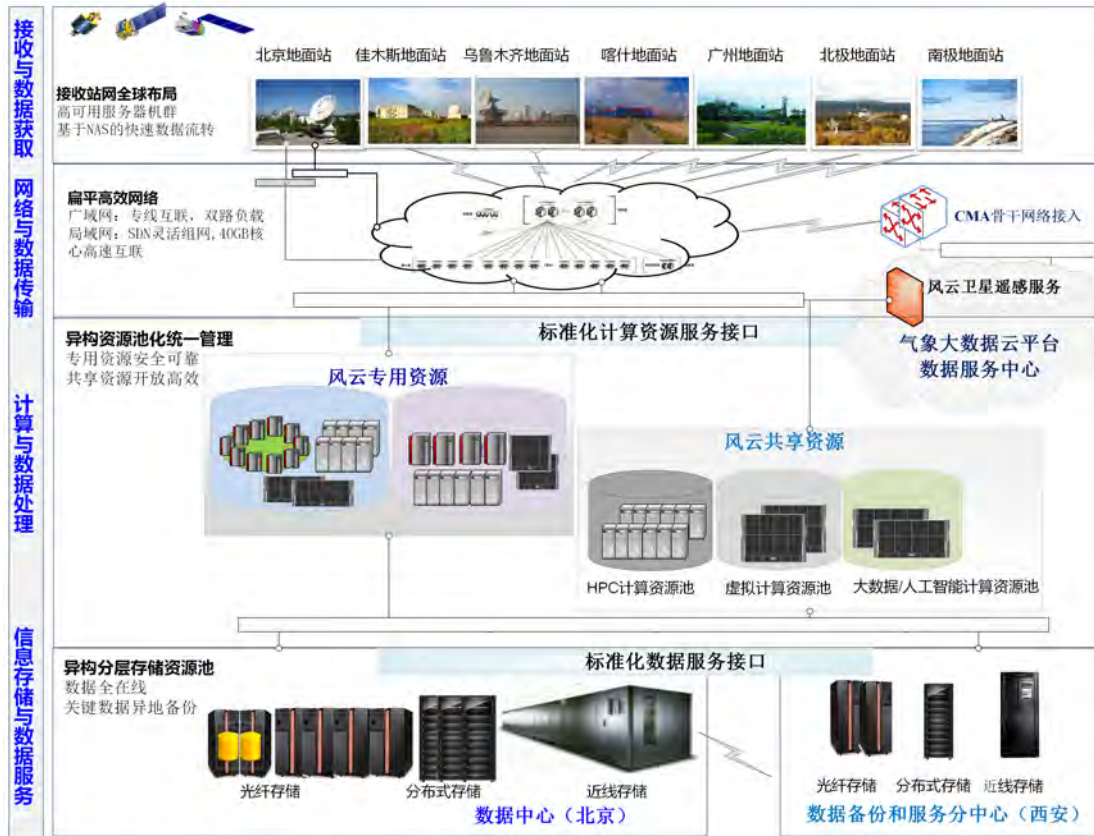


图1 CNS架构
Fig. 1 Structure of CNS

池和共享资源池两大类。专用资源池更侧重安全稳定，用来保障气象卫星遥感数据的接收、运行控制和前端数据处理任务稳定运行；共享资源池更侧重使用效率和灵活性，为后端产品处理、遥感应用和服务等业务提供高效支撑。新一代风云IT平台的主要特点是采用云计算、大数据等技术，大量采用通用性强、性价比高的X86服务器替代以往的UNIX小型机，由扁平化SDN网络实现互联，以统一的资源管理和作业调度软件、一体化运维软件和应用分析与优化软件等一系列软件统筹管理。通过这样软硬件结合的方式，构建了高效、灵活、可管理、可持续发展的IT基础平台设施。该平台为日益发展的气象卫星地面应用系统业务运行提供可靠的支撑，能满足多星、全球、全天候数据接收处理任务以及高时效国内外产品服务等多样的业务需求。

1.1 计算资源池

目前风云卫星地面系统计算资源规模约为8万计算核心，其中95%以上都是X86 CPU计算核心。为了充分利用这些计算能力，风云卫星地面系统计算资源采用池化设计理念，池内资源可以为多用户、多应用共享，计算资源的使用对用户透明。风云卫星地面系

统的应用按照数据流程可分为数据接收与传输、运行控制、数据处理、产品生成、数据存档与服务以及遥感应用等几个部分，按照各部分业务应用以及硬件设备的特点，划分为专用和共享两类计算资源池^[3-4]，具体如图2所示。

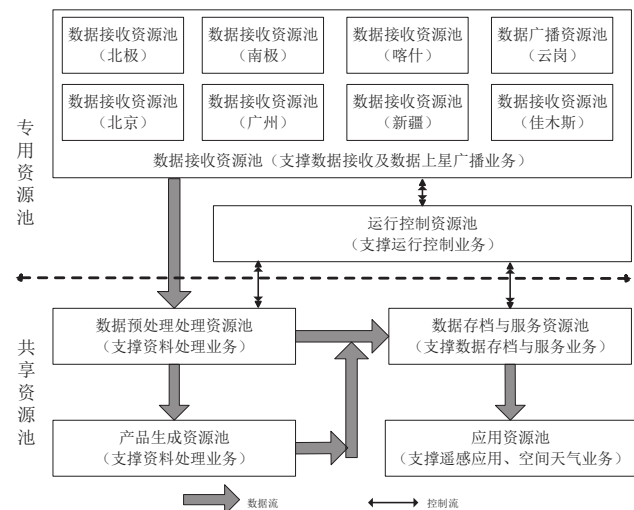


图2 CNS计算资源池设计
Fig. 2 CNS computing resource pool design

专用计算资源池主要用于承载各地面站卫星数据

接收及运行控制业务。对于卫星数据接收而言，由于其中涉及的专业设备较多，如调制解调、进机分包、信道设备等，目前该资源池内计算资源均为物理裸机加专用设备卡的形式。由于数据接收资源池位于地面数据处理的最前端，其肩负着保证数据完整、数据高质量以及数据传输高效三大使命，故而该资源池内所有设备采用“2+1”方式运行，即一主一备双机运行，同时1机冷备的方式。运行控制系统作为地面系统运行指挥的大脑，其对可靠性要求最高。因此，运行控制资源池主要通过高端服务器双机HA实现，且应用独占计算资源。

共享计算资源池主要用于承载卫星数据处理、存档与服务以及面向社会各类终端用户的遥感应用服务。数据处理资源池和数据存档与服务资源池要求保证产品生产、存档和数据服务的高时效。该资源池规模庞大，通过灵活的资源调度软件实现了各类产品生产作业实时调度、海量资源的优化分配，该池内同时拥有物理资源和虚拟资源。应用资源池用于支撑各类对外服务业务，通过计算资源虚拟化实现资源的灵活调度以及应用的灵活部署，通过虚拟机动态迁移确保硬件故障下的不间断服务。

在风云卫星地面系统中部署有自主开发的资源调度系统FYRSS（图3），该系统实现了用户使用资源的便捷性，用户使用底层的资源时就像使用水电一样方便，只需要通过标准接口向资源池提交作业，不用关心底层资源细节。

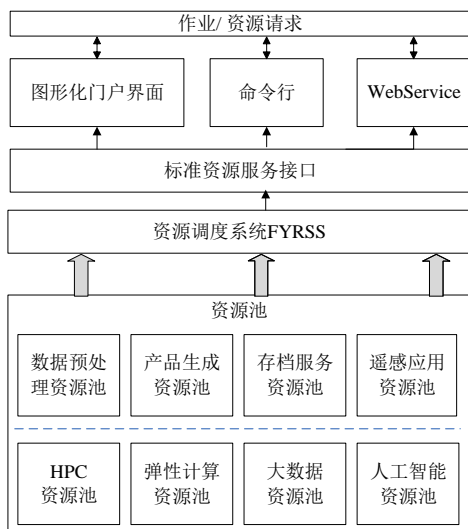


图3 基于资源调度的资源池化技术

Fig. 3 Resource scheduling based resource pooling technology

FYRSS实现了用户服务的标准资源接口，实现了图形化、命令行和API作业提交及资源管理接口，定

义了接口标准规范，用户使用标准接口提交和管理作业。用户无需关心作业运行在哪台机器上，无需考虑硬件故障处理和系统负载均衡。FYRSS设计了资源调度算法，实现跨异构负载均衡调度集群（如UNIX、Linux物理机集群，UNIX、Linux虚拟机集群，大数据、人工智能资源池等）的统一计算资源调度和故障处理。资源调度软件从地面应用系统各系统的二级业务调度接受其提交的单个作业，根据作业的输入、输出和约束条件等生成可运行的作业指令，并根据当前资源实际负载、作业资源需求、资源池特性等情况分配作业到具体的资源池以及计算资源上运行，在作业运行过程中监视作业状态并根据需要将作业状态返回给各系统二级调度，将重大作业运行故障或异常上报到运行控制系统，对异常作业和调度故障能够根据提前定义好的故障处理策略进行自动或半自动处理。

目前该资源调度系统很好地支撑了FY-4A卫星的业务运行，实现了业务与资源的解耦、异构资源的统一调度以及动态计算资源扩展。

1.2 网络架构

风云卫星地面应用系统中大多数据处理作业都需要并行处理大量数据，属于IO密集型计算，对网络带宽和灵活性要求很高。CNS的网络平台设计遵循了滚动设计的原则，以高扩展、高性能和高可靠性为目标，建成了技术先进的网络系统。

卫星各地面接收站接收到数据后通过专线高速传输到北京数据中心进行数据处理和服务，然后再通过专线或内部高速网络把数据分发给行业内外用户。

北京数据中心内部网络采用“VXLAN (Virtual Extensible LAN) +SDN (Software Defined Network)”的网络架构体系（图4）。VXLAN用于实现Overlay网络，实现基于设备无关的部署方式，SDN用于实现网络统一管理与配置自动下发。网络系统分为Underlay与Overlay两部分，Overlay网络主要通过隧道封装的方式在物理网络（Underlay网络）之上构建一个虚拟网络，应用系统将源主机发出的原始二层报文封装后在现有网络中进行透明传输，到达目的地之后再解封得到原始报文，转发给目标主机，从而实现主机之间的二层通信，相当于Overlay叠加在现有的基础网络之上^[5]。

这种横向延伸、分布组网、集中控制的网络系统实现了“转发—接入”两层扁平化拓扑结构，有效缩短了各业务系统之间的信息传输路径。分布式组网模式使网关下移至接入层，采用以太网虚拟专用网络技术实现同一业务网关在不同接入层设备之间多活，

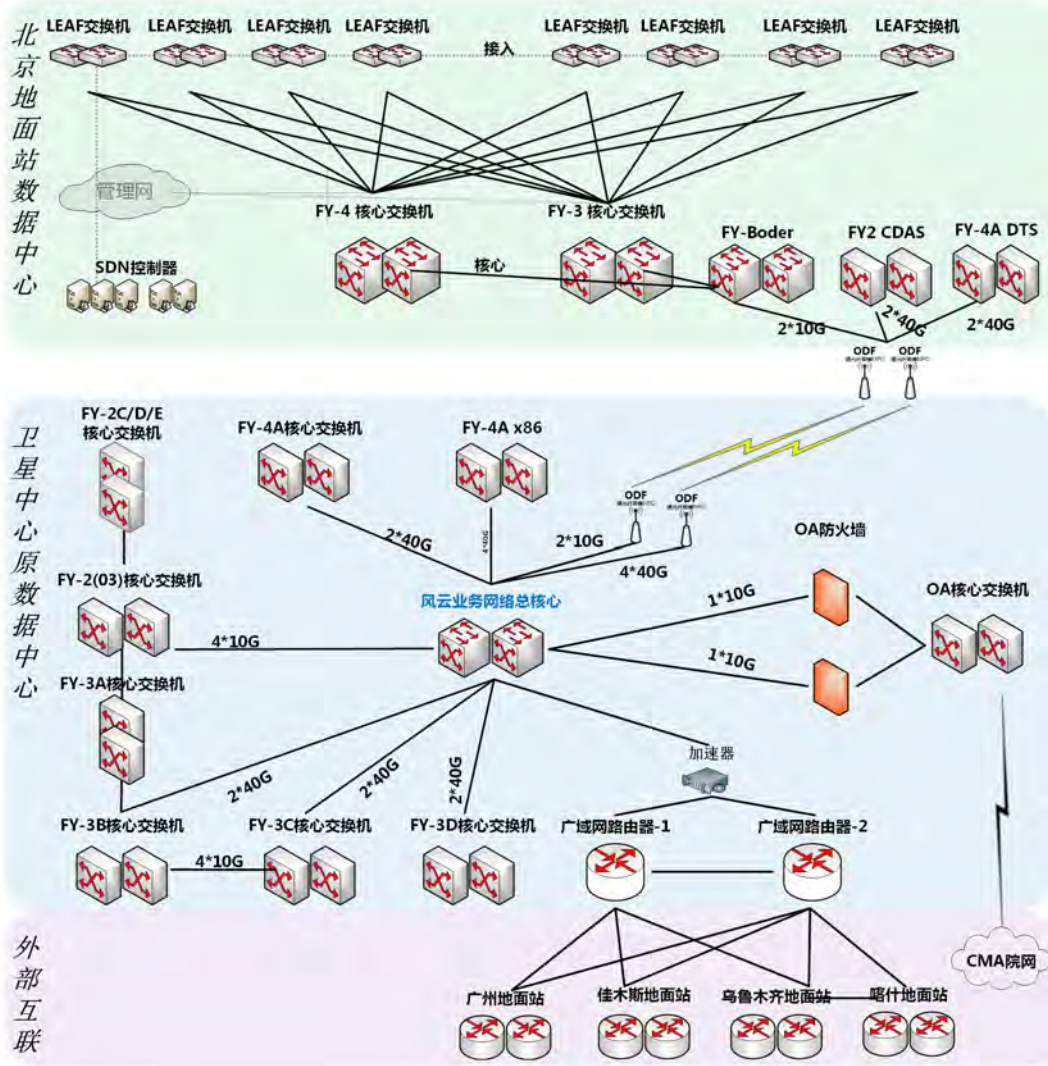


图4 网络系统架构

Fig. 4 Network system architecture

设备接入不再受限于物理位置，从而使跨机房、跨批次、跨型号的设备灵活组网成为可能，为计算和存储资源池化奠定基础。采用软件定义网络架构将网络数据平面和控制平面解耦合，通过控制器对上百台交换机进行统一平面的策略配置和下发，实现对大规模网络设备的集中管理和灵活控制。

为保障网络的安全性和灵活性，实现精细化分区管理，根据承载业务特点设计了分区域网络安全隔离和防护策略，实现了业务区和互联网物理隔离，具体如图5和图6所示。在业务区中设计了用于卫星测控、L0、L1和L2数据处理的生产区，用于工程开发、科学仿真、数据服务和内网办公的服务区，以及用于平台监控、系统运维的运维区。对核心生产区进行边界严格管控，其他区对生产区的访问按需开通，根据业务访问需求设计网络服务链。同时，生产区同一系统内

部互访不受限制，以保证业务系统的高效运行。对服务区开放访问，确保科研、开发和办公用户的便利使用。对人员流动性较大且会对系统运行造成潜在影响的运维区进行接入授权和行为审计，将运维出现问题后的被动追查转变为主动的事前防范、事中控制，确保运维安全。

各网络分区架设了堡垒机、日志审计系统、补丁分发系统、漏洞扫描系统、准入控制系统、安全审计系统、防病毒软件、网页防篡改软件、操作系统加固软件等安全设备和系统，保证整个网络的安全性。

1.3 存储资源池

CNS存储资源的管理设计，充分从统一管理、分配、灵活配置等方面考虑，通过采用资源池技术和存储虚拟化技术，对各存储系统设备进行统一规划管理，从而简化存储管理、提高利用率和效率，改善服

务水平。针对地面系统数据处理、服务和存档等业务对存储的不同需求，存储资源池主要由热数据资源池、温数据资源池、冷数据资源池三部分组成，其架构如图7所示。

热数据资源池采用全闪存阵列或高端FC构建，提供高速的IO带宽和IOPS能力。采用高端盘阵结合磁盘分层技术，提供高性能和高可靠的在线存储资源，保障业务处理时效和运行成功率；采用数据镜像技术，确保关键数据的安全。该资源池当前规模已达近10 PB，主要用来支撑数据接收、预处理、产品生产等实时业务。

温数据资源池采用中端FC、分布式存储、对象存储等构建，提供一定的IO能力以及海量数据存储空间。该资源池当前规模已超过10 PB，用来支撑准实时业务、测试仿真以及存档服务。风云卫星所有观测资料已经全部整合到该资源池，实现了卫星数据全在线，为数据服务和应用提供了高效的数据支撑。温数据资源池采用了存储虚拟化技术，实现了资源灵活配置与统一管理。

冷数据资源池采用磁带库、光盘库构建，实现数据归档功能，实现气象卫星数据的永久保存。高端磁带库，采用多驱动器和大容量磁带技术，提供高可用和高可靠性。该资源池当前规模已超过100 PB，保证了未来几年内卫星数据安全存档的需求。

除了本地存储，CNS中还使用了公有云存储资源池提供对外数据服务以提升数据分发的效率。

为了保证数据的安全性，CNS在西安建设了异地数据备份和服务支撑平台，形成了卫星数据异地备份、双中心服务支撑能力。

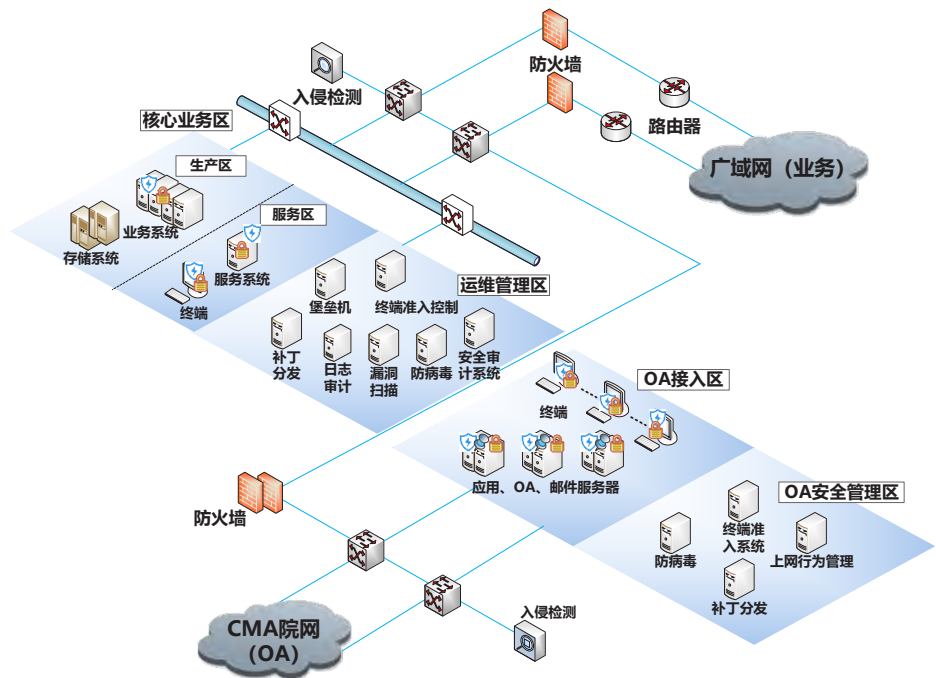


图5 网络安全分区（业务与办公区）
Fig. 5 Cyber security zone (business and office area)

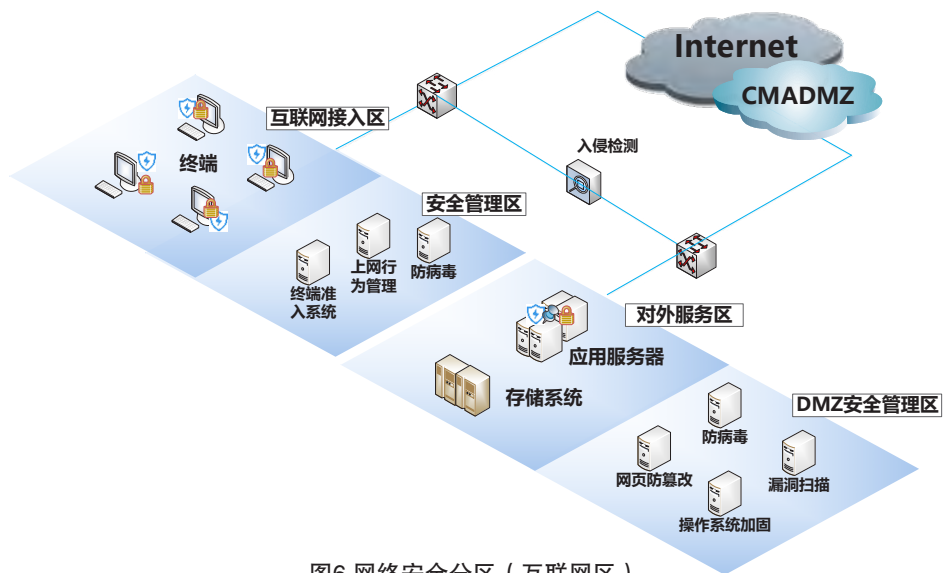


图6 网络安全分区（互联网区）
Fig. 6 Cyber security zone (internet zone)

2 系统管理与运行优化

只有通过高效的软件才能发挥出硬件的整体性能。CNS系统管理软件的设计，首先从一体化运维管理着手，保障系统平稳运行和设备故障及时处理；其次，通过应用特征分析软件为应用运行优化提供决策支持并辅助故障诊断。

目前，同时在轨业务运行的风云卫星多达7颗，地面系统业务数据量巨大，处理流程复杂，每天运行超过100万个作业。应用对IT平台的可靠性、运算能

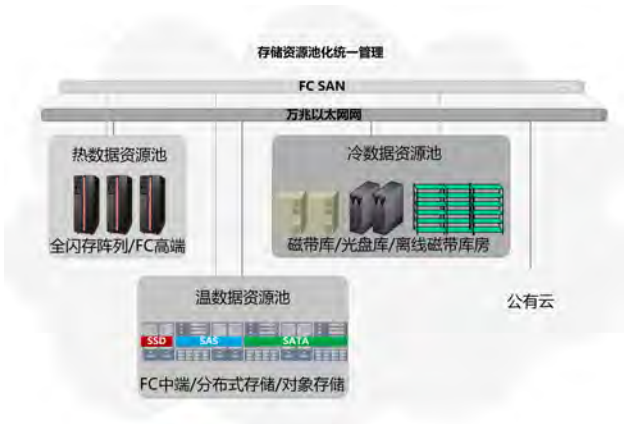


图7 存储资源池

Fig. 7 Storage resource pool

力、存储容量和网络带宽要求都很高。同时，新一代风云IT平台大量采用了单机功能相对弱化的通用服务器，设备数量剧增，平台系统管理难度大。为了解决这一问题，CNS设计了一体化运维管理软件，对IT平台及其所支撑应用运行信息进行统一收集、处理和存储，并结合技术人员运维经验进行分析、报警。该软件通过定制的配置库，实现对IT平台资产信息和配置信息的管理。通过可灵活扩展的采集器插件采集平台和应用各类信息，实现对各类平台资源和应用软件运行状态的实时、准实时监视。所有运维信息都存储于ElasticSearch集群中，为智能运维统一提供数据支撑；监视信息以可视化的方式统一展现；系统通过结合运维人员的工作经验，设置故障报警阈值，实现对各类故障的分级报警与及时上报，有效确保了平台平稳运行。

应用分析与优化软件对风云卫星地面应用系统各应用软件的资源使用合理性进行评估和优化，它通过系统监视和特定采集工具获取系统运行的特征数据，并在此基础上融合大数据分析技术对系统资源使用情况分析评估，继而以知识库为依据判断应用使用资源的合理性并形成资源优化建议。

3 风云卫星下一代信息技术展望

未来十年内，气象卫星数据量还会有上百倍的增长，如何及时、高效、可靠地处理海量数据将会是CNS一直面对的问题。CNS的设计将会一直紧跟信息化技术浪潮，建设技术先进的IT平台支撑风云气象卫星业务稳定运行。

人工智能技术目前发展迅速，尤其涉及的一些深度学习算法已经较为成熟^[6]。风云卫星IT设备体量，数据规模大且不断增长，人工智能技术将来会在

数据处理、数据质量控制、智能运维方面得到应用，用以提升系统智能水平和平台使用效率，为智慧气象发展提供支撑。

云计算技术已成功应用于CNS中，解决了资源的标准化问题。然而这种以虚拟机为载体的云平台虚拟资源管理方式存在着诸多弊端。首先虚拟机本身耗费着物理资源，这在一定程度上造成了物理资源的浪费；其次，虚拟机较为重载，不适合细粒度灵活地分配资源^[7-8]。

容器是一种内核虚拟化技术，可提供轻量级的虚拟化，使得资源和进程得到隔离，通过对应用组件的封装、分发、部署、运行等生命周期的管理，可以实现应用的标准化^[9]。因此在容器技术的支持下，软件应用可采用分模块部署的方式，根据不同模块的负载进行伸缩性调整，并且实现内部的负载均衡调节，提高服务整体性能^[10]，提升应用部署的灵活性。

4 结语

风云卫星地面应用系统计算机网络系统随着信息化浪潮历经了多次技术变革，卫星数据的处理和存储能力已得到很大程度的提高。随着风云卫星的发展，对其IT支撑平台的要求也越来越高，这就需要在合理架构计算机网络体系的基础上保持系统的鲁棒性，以云计算技术、大数据技术等作为技术核心，并在此基础上研究容器技术、深度学习技术、软件定义存储等前沿技术以进一步应用到计算机网络系统中，进而为风云卫星地面应用系统提供更为高效稳定的IT支撑环境。

参考文献

- [1] 赵现纲, 谢利子, 卫兰, 等. 风云静止气象卫星地面应用工程计算机网络系统发展. 气象科技进展, 2016, 6(1): 99-103.
- [2] 贾树泽, 杨军, 施进明, 等. 新一代气象卫星资料处理系统并行调度算法研究与应用. 气象科技, 2010, 38(1): 96-101.
- [3] Zhao X, Xie L, Wei L, et al. A Cloud Computing Platform for FY-4 Based on Resource Scheduling Technology. International Conference on Advanced Cloud & Big Data. IEEE. Chengdu, Aug 13-16, 2016.
- [4] 范存群, 赵现纲, 黄彬彬, 等. 云化卫星地面系统中基于云模型的资源映射方法. 计算机工程, 2016, 42(11): 38-42.
- [5] 张朝昆, 崔勇, 唐器祎, 等. 软件定义网络(SDN)研究进展. 软件学报, 2015, 26(1): 62-81.
- [6] 钟湘琼. 基于云计算的大数据智能运维系统设计. 信息通信, 2016(2): 146-147.
- [7] Kozhimbayev Z, Sinnott R O. A performance comparison of container-based technologies for the Cloud. Future Generation Computer Systems, 2017, 68: 175-182.
- [8] Fu S, Liu J, Chu X, et al. Toward a Standard Interface for Cloud Providers: The Container as the Narrow Waist. IEEE Internet Computing, 2016, 20(2): 66-71.
- [9] 树岸, 彭鑫, 赵文耘. 基于容器技术的云计算资源自适应管理方法. 计算机科学, 2017, 44(7): 120-127.
- [10] 邵海军. 基于容器技术的云计算资源合理调度方法研究. 现代电子技术, 2017, 40(22): 33-35.

AMDAR数据在数值天气预报中的影响评估

吕文忠¹ 蔡秀华² 孙京利³

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 中国气象科学研究院, 北京 100081;

3 北京玖天气象科技有限公司, 北京 100081)

摘要: 简要回顾了飞机自动化气象观测发展的历程, 讨论了飞机观测数据的质量和偏差校正方法, 评估了飞机观测数据对地区和全球数值天气预报的积极作用, 特别是在急流附近的高动能地区的重要性, 并介绍了国内航空器气象数据中继 (AMDAR) 的发展状况。

关键词: AMDAR观测, 校正方法, 数据质量

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.008

Impact Assessment of AMDAR Data in NWP

Lyu Wenzhong¹, Cai Xiuhua², Sun Jingli³

(1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081 2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 3 Beijing Jiutian Meteorological Technology Co. Ltd., Beijing 100081)

Abstract: This paper briefly reviews the development of aeroplane automatic meteorological observation, and discusses the quality and deviation correction methods of aeroplane observation data. The positive effect of aeroplane observation data on regional and global numerical weather prediction, especially the importance of aeroplane observation data in high kinetic energy areas near the jet stream is evaluated. The development of AMDAR in China is introduced finally.

Keywords: AMDAR observation data, correction method, data quality

0 引言

低成本、自动化的飞机观测, 现在已经是继地面观测站和卫星之后的第三大气象数据来源。常规高空观测虽然历史长, 资料质量稳定, 但局限于固定台站固定时次, 其资料时空分辨率有限^[1]。飞机气象观测在飞机航线上具有采样频率高、探测层次密集^[2]等特点, 对常规高空气象观测具有重要补充作用。飞机观测主要集中在急流高度附近, 对于确定很多天气系统的驱动力或者说动能来源尤其有效。飞机观测数据不仅能对常规高空数据进行补充, 还提供了在水平和垂直方向其他设备很难观测到的气象要素。航空器气象数据中继 (AMDAR) 资料可以在天气预报和航线气象服务中用于一些极端天气现象的预警^[3]。高时空分辨率的飞机气象资料是天气预报重要的资料来源之一, 可为机场终端区的强对流天气短临预报提供高时间密度的垂直探测信息^[4]。可结合卫星资料用于研究浅层积云的分布和动力学特征^[5]。利用飞机和风廓线雷达观测资料可以分析低层大气的风场结构^[6]。AMDAR

资料可以提高大尺度的短期和中期天气预报能力^[7], 提高海洋上空的高层风场预报, 这种提高效果在探空资料稀疏的地区更明显。在大雾天气的数值模拟和分析过程中, AMDAR资料对气温场分析有显著影响^[8]。由于飞机观测资料时空密度较大, AMDAR资料可以弥补现有常规探空资料在时空分布上的不足, 是目前气象行业发展垂直观测业务的重要研究内容。通过世界气象组织 (WMO) 的AMDAR计划, 各国的飞机观测气象资料已经实现全球交换。本文回顾了AMDAR业务的发展历史, 介绍并研判AMDAR资料在数值预报业务中的应用, 希望对相关部门提供一定的参考价值。

1 飞机自动化观测的发展历程

利用飞机进行气象观测始于20世纪30年代, 最初是手动记录观测数据, 由于在转录和远程通讯中易出错及飞机的位置和地球风速不准确, 观测数据的参考价值不大。首次自动记录观测数据是1974年在“全球大气研究计划” (GARP) 的“大西洋热带试验”项目上实现的。当时观测数据被保存在飞机的记录系统里, 而实时传输观测数据则是从1978—1979年进行的“GARP第一次全球试验” (FGGE) 开始的。飞机观测数据最初仅用于科研上, 但随着其量与质的迅速提

收稿日期: 2019年10月21日; 修回日期: 2019年11月28日

第一作者: 吕文忠 (1961—), Email: wzhlh@sohu.com

通信作者: 蔡秀华 (1963—), Email: caixha@126.com

升,应用范围也大大拓展。飞机观测数据质量提升的关键是应用了精准长距离导航系统(Loran)和惯性导航系统(INS),它们可提供准确的飞机位置及相关地球风速^[9]。

FGGE之后,“飞机至卫星数据中转”(ASDAR)项目的专用观测设备被安装在了商用飞机上,至此飞机观测和数据传输全部实现了自动化。在随后的20年里,隶属8个航空公司的20架安装了ASDAR的飞机源源不断地提供观测数据报告,这些报告证明了高质量的风速和温度观测数据可以利用商用飞机上获取,特别是在可以影响气旋生成和风暴进化的急流附近的高动能地区。

20世纪80年代,数值天气预报(NWP)模式对北半球短期高空风速预测的误差在9~10 m/s(均方根风速向量误差),这些误差增加了航空公司的运营成本。联邦航空管理局(FAA)为此设立了“航空天气预报工作队”项目,以提高全球区域预报中心(WAFCs)和美国气象局(NWS)应用NWP模式预报的准确度。相应地,5家美国航空公司允许WAFCs实时获取和使用它们的飞机观测报告。之后的20年里,全球范围内风速预报的准确性得到明显提高,其中北半球的风速误差下降了约40%,从10 m/s下降到了6 m/s。更重要的是,在急流附近(风速大于40 m/s的地区),风速误差从大于13 m/s降至小于8 m/s,减少了约45%的误差,从而使飞机更为有效地避开意外强顺风或强逆风,航空公司的运营效率和燃油使用率因此得到显著提高。

从20世纪90年代末开始,AMDAR项目扩展到了全球10多个国家的39家航空公司的超过3500架飞机上,每天提供超过680000个风速和温度观测报告。其中数据覆盖密度最大的地区是北美和欧洲空中交通繁忙的地区。海洋观测则局限于跨洋航线覆盖的高对流层地区。根据WMO协议,AMDAR报告由NCEP进行监测。

近年来,AMDAR资料在全球范围内都得到大力普及,包括一些发展中国家。许多研究^[10-14]表明,在AMDAR资料的辅助下,飞机气象观测所具有的特点和优势使其成为天气分析以及数值预报中非常重要的资料。

2 AMDAR气象要素观测特点

目前的常规观测系统中对于高空的探测主要依赖于每日两次的探空气球观测(个别区域站或汛期时次数有适当增加),缺点是时间间隔过长,而风廓线、微波辐射计等新型仪器探测高度相对较低,准

确性也还不能得到很好的保证^[15]。相对于气球探空观测、雷达遥感观测等高空气象观测,飞机观测有其独特的气象观测特点,飞机气象观测的主要目标是探测高空大气状况及气象要素分布,垂直分辨率相对较高^[6],AMDAR资料可按高度进行细化:<1000 m、7000~8000 m、8000~9000 m和10000~11000 m。6000 m以下的AMDAR资料可用来监测、采集和分析机场上空对流层及中下层的大气垂直结构;6000 m以上高度的AMDAR资料可体现飞行器飞行路线中对流层上层大气的结构特点。AMDAR资料水平分辨率为百米量级,时间分辨为几秒至几十秒,高于常规观测资料的分辨率^[16];探测高度可达100~200 hPa。飞机气象观测的项目一般包括:飞机位置和时间、经纬度、气压高度、温度、湿度、水平风矢量、垂直阵风、湍流扩散率等。Moninger等^[16]指出民用飞机观测还包括:高空风速、露点温度、结冰和湍流;有时还包括大气的水汽资料、飞机颠簸和积冰^[17]。飞机探测资料配合其他气象资料可以连续和有效地监视机场及其附近区域的天气演变趋势,捕捉到一些常规资料难以发现的中小尺度天气系统,有助于极端天气的预警,如低空风速切变现象。因为飞机起飞和降落期间的气象观测相当于探空,观测结果具有较高的时空分辨率,经过质量控制后的飞机观测数据可以是常规探测数据很好的补充。

3 AMDAR观测的质量评估和偏差纠正

为提高NWP的预报准确性,全球各NWP中心必须对所有进入数据库的数据进行检测和质量控制(QC)。为保证错误的AMDAR数据不被放入数据同化(DA)系统,所有飞机观测报告会经常被更新并传输到其他的NWP中心进行交叉比对,消除因机载设备和通信系统产生的误差。

AMDAR数据通常只有很小的系统误差。系统误差会随着季节和不同的飞机型号而波动。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)采用了Isaksen等^[18]2012年设计的纠正系统误差的方案,明显提高了对流层顶和平流层温度分析的水平及与卫星测量的契合度。其他NWP中心也计划实施类似的误差纠正方案。

4 AMDAR观测对短时区域预报的影响

第一个短时区域数值预报(NWP)模型是由NOAA的地球系统研究实验室(ESRL)研发,并在NCEP以小时为单位运行。为考察AMDAR数据对短时地区预报的影响,Benjamin等^[19]对比了一个80 km分辨率的快速更新循环(Rapid Update Cycle,RUC)预报模式中的MDCRS数据和由NWS操作的嵌套网格模型

(NGM) 依赖于探空观测(探空)信息的一天两次的预报数据。结果表明,连续的飞机数据使得250 hPa的风速预报误差减少了约10%。

2000年, Schwartz等^[20]分析了模型分辨率和物理环境对MDCRS观测的效用影响。通过比较一个60 km分辨率的RUC与一个40 km分辨率的RUC-2发现:RUC-2包括了更复杂的地表物理环境、地形状况、更高的垂直分辨率。结果是:RUC-2在所有长、中时预测都有更好的表现,最大的差别体现于短时预测。在300 hPa以上、700 hPa以下的提高主要是由于更高的垂直分辨率以及更好的边界层参数,然而在中等高度,由于当时上升和下降阶段资料的缺失,并没有很好的提高。

在认识到飞机上升和下降阶段数据的重要性后,NWS和FAA在20世纪90年代末期一起与一些美国航空公司合作,增加了观测频率。Petersen^[21]用当时20 km分辨率的RUC对这些高频率的风速和温度报告的影响进行了对比和测试。结果表明,飞机上升和下降阶段的温度和风速观测数据对所有高度的温度和风速预报都有不同程度的提高作用,其中对300 hPa以下的影响最大(图1),相当于把模型分辨率提高了两倍。

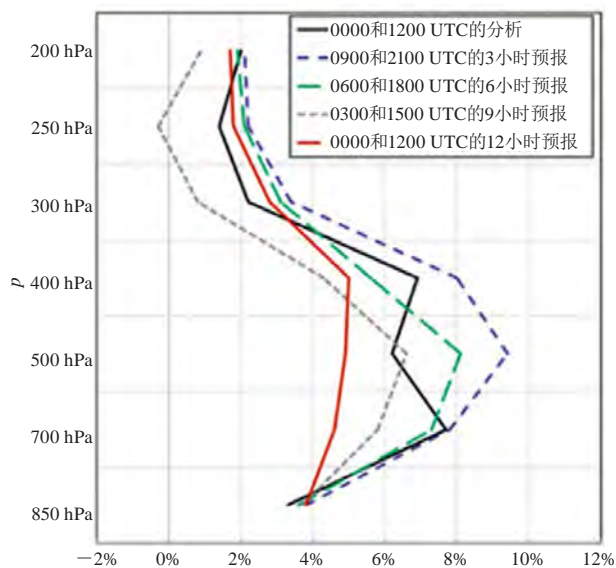


图1 飞机上升和下降阶段观测数据对NWP预报准确性的影响程度(基于Petersen 2004年测试^[21])

Fig. 1 The impact of the observation data on the NWP prediction accuracy in the rising and falling stages of the aircraft (Based on Petersen test in 2004^[21])

通过把包括和不包括上升和下降阶段数据进行RUC 12 h预测对比,即可以分析得出AMDAR观测的整体影响:AMDAR数据使所有高度风速预报精度提高了0.2~1.2 m/s,相当于从低层的5%一直提高到高层的20%。

近期的更多测试进一步展示了飞机自动化观测报告对美国短时预报的影响。在这些测试中,飞机观测报告不止局限于在WMO全球电信系统(GTS)上的AMDAR报告,还包括了其他来源的数据。最值得关注的是,10%~15%的观测数据是由装载了“对流层空气气象数据报告”(TAMDAR)系统的飞机提供的,主要设计为在500 hPa以下和机场附近。

5 AMDAR观测对全球数值预报的影响

评估AMDAR对全球数值预报准确性的影响与评估其对地区数值预报准确性的影响方法相同。首先,全球数据同化系统必须把飞机的观测报告与其他不同形式的大量观测报告(大多基于卫星并提供全球海洋数据)进行整合;其次,结合数值预报模型进行“数据拒绝”式测试。早期的评估多专注于ECMWF的报告,近期则基于更为广泛的全球各数值预报中心的报告。

Kelly等^[22]进行的一个长时全球研究,使用了ECMWF全球分析和预测系统对2002年8—9月、12月和2003年1月的数据进行了分析,全球15家航空公司提供了相应时段的AMDAR数据;Petersen^[23]利用这些数据和ECMWF全球数值预报模型,对北半球以及AMDAR数据密度最大的北美地区做了更详细的短时(12~48 h)预报分析,发现AMDAR温度和风速观测对高层对流层的短时预报精度有显著的影响(图2)。

当评估AMDAR对整个北半球数值预报的影响时,发现对至少48 h内的预报精度都有提高作用,第一天的提高幅度最大,从200、300~500 hPa,12 h平均温度和风速预报误差分别减小了14%和8%。而在没有AMDAR数据可用的高度上,预测精度的提高幅度则较小(例如在100 hPa温度预报误差只减小了3%~6%,风速预报误差只减小了2%~5%)。

当只对北美进行评估的时候,因为AMDAR数据覆盖密度大,对100 hPa以下的所有高度的预报精度都有影响,同时持续时间长,并且比对整个北半球的影响要高。在第一天中,200~300 hPa的温度预测误差减少了约23%,风速预测误差减少了12%~14%。对200~300 hPa温度和风速预测的提高一直持续两天。

进一步的研究表明,AMDAR数据对温度和风速预报精度的提高不仅限于北半球,对热带地区和南半球同样有益。显然,随着以后AMDAR数据越来越多,所有地区和全球的数值预报精度也将相应提高。

6 AMDAR观测影响的近期测试

近年来,虽然全球数据同化系统可用的卫星观

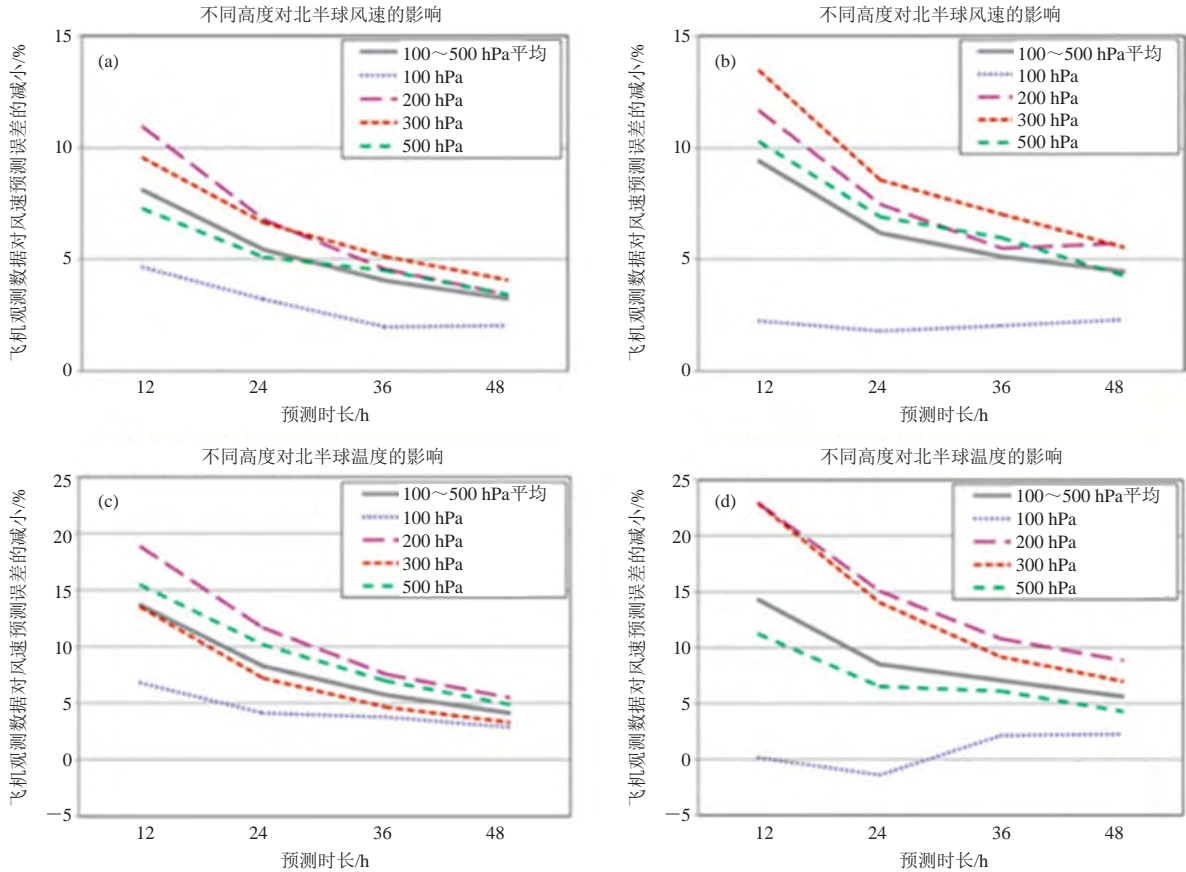


图2 AMDAR对ECMWF在不同高度的温度和风速短时预测的影响
(a, c) 北半球结果; (b, d) 北美地区结果 (基于2002年8—9月和2002年12月—2003年1月的ECMWF试验)

Fig. 2 The impact of AMDAR on the short-term prediction of ECMWF at different altitudes
(a, b) the results for the Northern Hemisphere; (c, d) the results for North America (based on the ECMWF data from August to September 2002 and December to January 2003)

测数据增加了很多, 但总体看只有不到5%的辐射 (Radiance) 数据得到了利用。相反, 只有5%参与AMDAR计划的飞机自动化观测现在是DA最大的非卫星数据来源, 这说明了其质量和重要性都在上升。

2012年, 5个NWP中心 (包括WAFCS, NCEP, ECMWF, Météo-France和GMAO) 用不同来源的数据比较减少24 h预报误差的贡献。其中AMDAR排行第三, 仅次于微波卫星观测 (AMSU-A) 和探空报告 (Raobs)。相对其他数据, AMDAR数据表现最为连贯和稳定。在飞机起降过程中获得的机场、急流和大气能量源附近的数据非常稀缺和重要, 且很容易地被纳入全球数据同化系统里。同一航线的不同飞机带来的报告还可以用来进行交叉测试。

对于独立事件, AMDAR的影响更大。例如在监测和预报热带气旋的发展和运动, 以及风暴的结构和风力分布时, AMDAR的作用是非常重要的, 因为自动站气象资料只能获得近海的气象情况, 并且空

间覆盖很有限, 卫星资料的覆盖范围及时间也比较有限, 而飞机自动化观测数据能提供高空气象情况和拥有较高的空间分辨率。Hoover等^[24]使用海军全球环境模型 (NGEM) 和海军研究实验室变异DA系统, 应用AMDAR数据对预报Hurricane Sandy的影响作了研究。结果表明, AMDAR系统在预报登陆的地点和时间上都比其他数据来源有着更大的影响, 是探空数据的两倍。

7 我国AMDAR资料概况

我国从2002年开始建立AMDAR资料的数据物理链路及接收平台及实时收集、处理业务流程。2003年以来, 我国每月获得的AMDAR资料数量占全球AMDAR资料数量的百分比为5%~20%。2003—2007年我国AMDAR资料数量并不稳定, 部分月份的缺报日数偏高, 甚至出现整月资料缺报的情况。直至2007年11月, 我国AMDAR资料的收集和传输进入稳定状态。总的来说, 早期AMDAR资料的资料量少, 稳定

性较差,但可为一些中短期天气系统的研究提供数据源。

2003年,我国参加AMDAR计划的航空公司很少,资料主要集中在以北京为中心的几条航线。随着我国航空运输业的迅速发展,大量配有气象观测仪器和信号处理软件的飞机投入运行,加入AMDAR计划的航空公司也开始增加,AMDAR报量迅速增加,并形成了以北京、上海和深圳等航空运输量较大的机场为中心的几个资料集中地区。早期资料主要集中在105°E以东地区,从2008年开始,西部地区的资料有所增加。2009年4月以后,云贵川地区以及新疆地区每月也能获得一定数量的飞机观测资料。

AMDAR资料质量的好坏是直接影响其在天气预报业务中的应用的的重要因素,为此美国NOAA开展了AMDAR资料与探空数据的相关比对研究,多年比较显示飞机观测的温度误差量级在1℃左右,而国内在这方面开展的工作却相对较少,一些学者^[25-26]对AMDAR数据进行了误差特性分析及应用探讨。为了确保AMDAR资料的质量,国家气象信息中心借鉴了美国AMDAR资料质量控制方案的经验,设计了针对中国AMDAR资料的6项控制流程,对原始的资料进行质量检验(图3),包括重复观测记录的剔除和处理、元数据信息检查、极值检查、飞机飞行状态检查机修订、空间一致性检查、时间一致性检查。

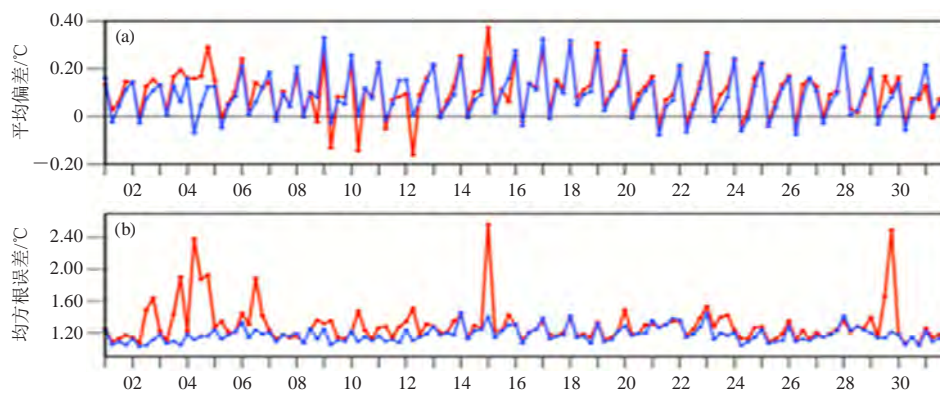


图3 AMDAR数据质控前后的质量对比(红线:质控前;蓝线:质控后)

Fig. 3 Quality comparison of AMDAR data before and after quality control (red line: before quality control; blue line: after quality control)

图3显示,不管是平均偏差,还是均方根误差,质量控制前的观测数据(红线)波动明显大于质量控制后的数据(蓝线),所以相对于质量控制前,质量控制后观测数据的质量更加稳定。随着AMDAR数据质量的不断完善,在现有类型的气象资料源中对提高数值天气预报的准确性,AMDAR数据占有了重要的地位。

2014年10月,我国正式参与WMO的GTS交换,通过GTS实现了我国AMDAR资料的全球交换,并通过实时数据库和卫星广播系统向各级气象部门提供实时的全球AMDAR资料。近年来,我国的AMDAR工作进展快速,获得了大量的相关气象资料,包含了温度、经纬度、高度、风速和风向信息,提高了天气预报包括数值预报的准确率。目前国家气象信息中心整合全球9套历史飞机报文资料,通过质量控制评估,建成1973年以来的全球飞机观测数据集(图4),包含商用飞机飞行阶段观测的温度、风场和湿度数据。其中,2003年以来,欧洲、美国、日本、加拿大、韩国等地的观测数量显著提升,相对早期发布的同类产

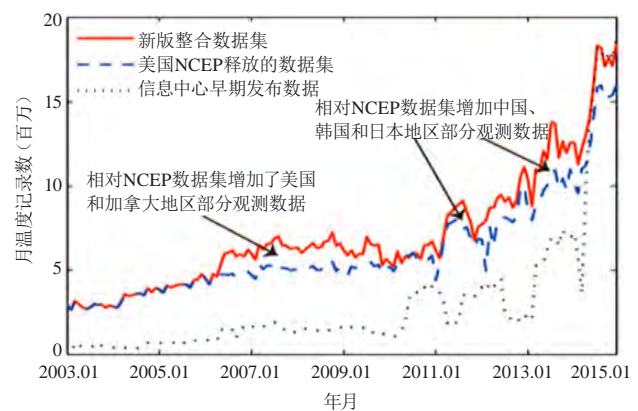


图4 整合后的月温度记录数

Fig. 4 Number of integrated monthly temperature records

品,数据增量超过72.5%。

由图4可见,多源、多类报文整合后,相对美国NCEP释放数据集,在中国、日本、韩国及北美地区的数据量优势明显。

随着我国AMDAR数据在质量和数据上的不断提高,其应用也不断增加。周显敬等^[28]设计发明了一种

基于物联网的民用航空机场气象监测系统已经比较成熟,通过能见度观测仪、风速仪、雨雪传感器、摄像头、温度传感器和湿度传感器将收集到的机场航道气象数据经过CPU分析处理后,由信号发射器发射信号传输给监控中心,扩展天线加强信号传输便于监控中心人员了解机场的气象状况,方便指挥控制飞机的降落起飞,提高飞机的安全性。王晓峰等^[29]将AMDAR数据用于局地强对流快速更新同化数值的模拟。尹金方等^[30]搜集了常规观测、雷达、地基GPS、飞机报等资料,将其进一步优化完善后,构建了东亚区域大气再分析数据集。采用多组物理过程参数化方案组合,开展了批量个例和长时间模拟试验,试验结果表明再分析系统初步具有在全球再分析的基础上提高区域再分析资料性能的能力,可将本再分析系统用于今后再分析数据的研制。

虽然飞机观测资料在我国已有广泛的应用,但国内的AMDAR观测应用技术的研究相对较为缓慢,自己的商用飞机探测、信息收集、处理系统还需要提高。

8 结论

AMDAR资料凭借高精度及大数据量已成为数值天气预报分析中不可或缺的一部分。AMDAR温度和风速观测数据对地区和全球短时和短时数值预报质量有明显提高作用。AMDAR在欧美已经得到了很大的发展,而在发展中国家并没有得到很好的规划。对于在数据稀缺地区扩大AMDAR观测网络,合作和增加飞机数量是很好的方法。

AMDAR资料现已成为我国高空气象观测资料的重要组成部分,在国家及地区的资料同行、数值预报业务中具有较高的应用价值。建议有关部门加大我国的民用飞机的气象探测项目的投入,借鉴国外比较成熟的飞机探测技术,尽快制定国家层级的飞机观测系统发展规划和配套政策,构建具有中国特色的飞机自动化观测系统。

参考文献

[1] 罗林艳,罗宇,钟艳雯,等. AMDAR气温资料和常规高空观测气温资料的对比分析. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 115-119.
 [2] 贾朋群,胡英,王金星. 民用航空气象观测综述. 气象科技, 2004, 32(4): 213-218.
 [3] NOAA. Status Report on AMDAR Programme in USA. The 8th Meeting of the AMDAR Panel, Santiago, 2005.
 [4] 周元,魏鸣仙,宋立雪. AMDAR资料的风温信息在机场终端区强对流天气分析中的应用. 大气科学学报, 2019, 42(2): 303-310.
 [5] Stefaan M A Rodts, Peter G Duynkerke, Harm J J Jonker. Size distributions and dynamical properties of shallow cumulus clouds from aircraft observations and satellite data. Journal of Atmospheric

Sciences, 2003, 60: 1895-1912.
 [6] 魏伟,叶鑫欣,王海霞,等. 飞机测风资料在大气边界层研究中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 24-34.
 [7] Cardinali C, Isaksen L, Andersson E. Use and impact of automated aircraft data in a global 4D-var data assimilation system. Monthly Weather Review, 2003, 131: 1865-1877.
 [8] Liang Aimin, Zhang Qinghong, Liu Kaiyu, et al. The 3D-var data assimilation experiments on a dense fog event the central Plain of China. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 23(1): 116-117.
 [9] Ralph A P. On the impact and benefits of AMDAR observations in operational forecasting. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 585-602.
 [10] 仲跻芹,陈敏,范水勇,等. AMDAR资料在北京数值预报系统中的同化应用. 应用气象学报, 2010, 21(1): 19-28.
 [11] Ballish, B A, Kumar, V K. Systematic differences in aircraft and radiosonde temperatures. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 11(11): 1689-1707.
 [12] 黄超凡,周林,宋帅,等. 南海周边海域越洋航线晴空颠簸的数值预报研究. 气象科学, 2015, 35(3): 317-322.
 [13] 龚俊强,刘朝顺,刘延安,等. 探空和飞机观测资料联合同化对台风“苏迪罗”(2015)数值模拟的影响研究. 热带气象学报, 2019, 35(1): 99-112.
 [14] 易军,王峰云,阎凤霞. 上海机场终端区AMDAR资料系统及应用. 气象科技, 2016, 44(4): 542-547.
 [15] Drtle C, Frey W, Hoff A, et al. Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008, 134: 229-239.
 [16] Moninger W R, Mamrosh R D, Pauley P M. Automated meteorological reports from commercial aircraft. American Meteorological Society, 2003, 84(2): 203-216
 [17] 黄卓,李延香,王慧,等. AMDAR资料在天气预报中的应用. 气象, 2006, (9): 42-48.
 [18] Isaksen L, Vasiljevic D, Dee R, et al. Bias correction of aircraft data implemented in November 2011. ECMWF Newsletter, 2012.
 [19] Benjamin S G, Brewster K A, Brummer R, et al. An isentropic three-hourly data assimilation system using ACARS aircraft observations. Monthly Weather Review, 1991, 119: 888-906.
 [20] Schwartz B E, Benjamin S G, Green S M, et al. Accuracy of RUC-1 and RUC-2 wind and aircraft trajectory forecasts by comparison with ACARS observations. Weather Forecasting, 2000, 15: 313-326.
 [21] Petersen R A. Do automated meteorological data reports from commercial aircraft improve forecasts? ICAO Magazine, 2004, 59: 4-7.
 [22] Kelly G, McNally T, Thepaut J N, et al. OSEs on all main data types in the ECMWF operation system. Proc Third Workshop on the Impact of Various Observing Systems on Numerical Weather Prediction, Alpbach, March 9-12, 2004. WMO, 2004.
 [23] Petersen R A. Impact of AMDAR data on numerical prediction models. Proc Third Workshop on the Impact of Various Observing Systems on Numerical Weather Prediction, Alpbach, March 9-12, 2004. WMO, 2004.
 [24] Hoove B T, Velden C S, Langland R H. Adjoint-based analysis of observational impact on tropical cyclone forecasts. 31st Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Orlando. American Meteorological Society, 2014.
 [25] 廖捷,熊安元. 我国飞机观测气象资料概况及质量分析. 应用气象学报, 2010, 21(2): 206-213.
 [26] 王瑞文,龚建东,韩威,等. AMDAR温度资料的偏差订正及对GRAPES系统的影响. 高原气象, 2017, 36(5): 1346-1356.
 [27] 江勤,张蕾,王晓峰,等. 飞机气象探测资料(AMDAR)质量控制与质量分析. 气象, 2017, 43(5): 598-609.
 [28] 周显敬,汪寒雨,李朝义,等. 一种基于物联网的民用航空机场气象监测系统. 北京博仁华盟科技有限公司, 2018.
 [29] 王晓峰,王平,张蕾,等. 上海“7-31”局地强对流快速更新同化数值模拟研究. 高原气象, 2015, 34(1): 124-136.
 [30] 尹金方,梁旭东,陈锋,等. 东亚区域大气再分析技术研究及数据集建设. 气象科技进展, 2018, 8(1): 79-84.

1961—2016年汛期东天山北坡不同量级降水日数时空变化特征

苗运玲¹ 宫恒瑞¹ 张云惠² 柴岩红¹

(1 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市气象局, 乌鲁木齐 830006; 2 新疆维吾尔自治区气象局, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 利用东天山北坡5个国家级地面气象站1961—2016年汛期(5—9月)逐日降水资料,采用线性趋势、相关系数、多项式拟合及Mann-Kendall突变方法,探讨不同量级降水日数时空演变特征及与汛期总降水量的关系。结果表明:随着降水量级升高,对应降水日数迅速减小;近56 a总降水日数、中雨日数、大雨日数和暴雨日数均呈增加趋势,其中大雨日数增加趋势最明显,对总降水日数的增加贡献最大,小雨日数呈明显的减小趋势,大雨日数在1991年发生突变,暴雨日数在1980年发生由少到多的突变,其他降水日数表现为下降趋势,但均未发生突变;从不同量级降水日数空间分布可知,除了小雨日数其他量级降水日数都是以木垒为高值中心,逐渐向东西两侧减小,最低值一般出现在伊吾和吉木萨尔;汛期随着降水量级上升,降水日数与汛期总降水量相关系数也不断增大,小雨日数与总降水量相关性最差,与大雨日数相关性最高。

关键词: 东天山北坡, 降水日数, 趋势

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.009

The Different Orders Rainy Days Spatiotemporal Variation Characteristics of the East Tianshan Mountain North Slope in Rainy Season from 1961 to 2016

Miao Yunling¹, Gong Hengrui¹, Zhang Yunhui², Chai Yanhong¹

(1 Urumqi Meteorological Bureau, Urumqi 830006 2 Xinjiang Meteorological Bureau, Urumqi 830002)

Abstract: Spatiotemporal characteristics of number of precipitation days for different magnitudes and total precipitation during flood season were investigated based on daily precipitation data at 5 national surface weather stations on the north slope of east Tianshan Mountain from 1961 to 2016 (May to September). The results show that with the increase of precipitation magnitudes, the number of precipitation days decreases rapidly. The nearly 56 a total precipitation days, moderate rain days, heavy rain days and rainstorm days of all showed an increasing trend. The increase trend of the number of heavy rain days was the most obvious, which mostly caused the increase of total precipitation days. The number of light rain days showed an obvious decreasing trend. In 1991, the heavy rain days had a sudden change, and in 1980 the heavy rain days had a sudden change. The number of other precipitation days had a downward trend, but no abrupt change occurred. From the spatial distribution of the number of precipitation days of different orders of magnitude, the number of light rain days, the number of precipitation days were all based on the wooden barrier as the high value center decreased to the east and west gradually, and the lowest values were generally found in Yiwu and Jimusar. During flood season, with the increase of precipitation magnitudes, the correlation coefficient increased between the precipitation days and total precipitation. The correlation between the number of light rain days and total precipitation was the worst and the number of heavy rain days was the most obvious.

Keywords: north slope of east Tianshan Mountain, number of precipitation day, trend

0 引言

天山作为世界七大山系之一,位于欧亚大陆腹

地,是世界上最大的独立纬向山系,也是世界上距离海洋最远和全球干旱地区最大的山系。它横亘在新疆中部并贯穿全境,是影响新疆乃至我国中、西部地区天气气候和生态环境的重要天然屏障。近年来,对天山山区降水量空间分布及其变化已经开展了较深入的研究^[1-5]。研究^[3]显示,天山山区降水呈现“西多东少,北多南少,高山多外围少”的特征。天山山区的降水量总体上在增加,天山中部和南部的降水量增加

收稿日期: 2019年2月22日; 修回日期: 2019年7月19日
 第一作者: 苗运玲(1976—), Email: hmmyl65313@163.com
 通信作者: 柴岩红(1978—), Email: 441932880@qq.com
 资助信息: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM2016001)

幅度都大于西部^[4]。

不同量级降水日数能直接或间接反映出研究区域的降水特征，可以作为衡量某一区域降水是否分配均匀的指标^[6-9]。本研究利用1961—2016年东天山北坡5个国家级地面气象站的降水量数据，分析东天山北坡不同量级降水日数的分布及其变化趋势，提高对东天山北坡降水量分布和变化的认知程度，以期对东天山北坡生态环境保护和恢复提供基础数据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

东天山北坡地处亚欧大陆腹地，准噶尔盆地东南侧，以88°E为界，地理坐标为42°25′—45°30′N，88°30′—96°23′E，海拔高度742.9~1728.6 m（图1）。选取该区域具有代表性的5个国家级地面气象站，分别是昌吉州东部的吉木萨尔、奇台、木垒县和哈密北部的巴里坤、伊吾县，总面积约为11.22万 km²。该区域气候较为敏感，生态环境脆弱，地形地貌复杂，总体呈西低东高，北低南高，降水量较少，分布不均匀，气候干燥，昼夜温差大，属于温带大陆性干旱半干旱气候。

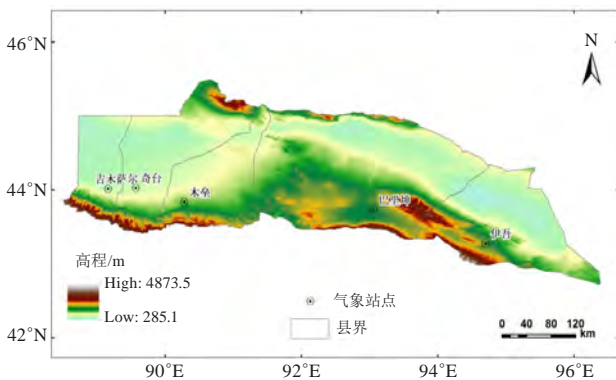


图1 东天山北坡地形及气象站点分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations on the north slope of east Tianshan Mountain

1.2 数据来源

数据来源于新疆维吾尔自治区气象信息中心，经过严格质量控制，资料真实可靠，使用东天山北坡5个国家级地面气象站1961—2016年逐日降水数据资料。5—9月是东天山北坡主要降水量季节，其降水量占年降水量的60%~80%，因此把5—9月看成该研究区域的汛期。根据2003版《地面气象观测规范》^[10]规定，天气现象日界时间以北京时间20时为界，即当日20时至次日20时出现的降水作为一个降水日数，若某次降水跨日（或月）则按出现2个降水日数计算。

1.3 分析方法及雨量分级处理

本文所使用的分析方法主要包括线性趋势、相关系数和多项式拟合等方法。采用Mann-Kendall（简称M-K）方法对降水时间序列进行突变分析，为了检验气象要素突变是否达到标准，对突变点进行信噪比S/N检验，信噪比公示如下：

$$S/N = \frac{|\bar{X}_a - \bar{X}_b|}{S_a + S_b}, \quad (1)$$

式中， \bar{X}_a 、 \bar{X}_b 、 S_a 、 S_b 分别为转折年份前后两段要素的平均值和标准差，规定S/N>1时，则认为该年是某气候要素的突变年，否则不是突变年。

由于新疆区域的特殊性，降水量分级标准相对中国内陆大部分地区有所不同，新疆降水评分标准将降水量分为5个量级：微雨（0.0 mm）、小雨（0.1~6.0 mm）、中雨（6.1~12.0 mm）、大雨（12.1~24.0 mm）、暴雨（≥24.1 mm）。本文只统计日降水量≥0.1 mm的降水事件，并将日降水量≥0.1 mm的降水称为有效降水。各量级降水日数即为该量级的降水日数，将4个有效降水的降水日数之和称为总降水日数。

2 结果与分析

2.1 汛期不同量级降水日数基本特征

1961—2016年东天山北坡经济带汛期总降水日数为167 d。结合表1分析可知，该区域不同量级降水日数具有以下特征：（1）随着降水量级的上升，对应降水日数迅速减小。小雨日数所占比重最大，占总降水日数79.04%，对总降水日数贡献最大；其次是中雨日数为11.98%，其余降水日数均低于10%。（2）从不同量级降水日数气候倾向率可以看出，小雨日数变化趋势不明显；其他降水日数均呈增加趋势，大雨日数增加最明显，中雨日数的增加是导致汛期总降水日数增加的主要原因；其次是暴雨日数，二者均通过0.01显著性检验。（3）从总降水日数与不同量级降水日数相关系数可知，除了暴雨日数与总降水日数相关系数较小且没有通过0.05显著性检验外，其余降水日数均通过0.01显著性检验，其中与小雨日数相关性最好，达到0.92，表明小雨日数对总降水日数贡献最大，暴雨日数贡献最小。（4）年际分布差异大。各量级不同降水日数最多年份大多集中出现在1984—1988年，暴雨日数出现在1998年；最少降水日数出现年份比较分散，其中没有暴雨出现的年份主要集中在20世纪80年代中期以前。（5）年际变化大。总降水日数最多达226 d，最少仅有114 d。

表1 1961—2016年东天山北坡汛期不同量级降水日数统计

Table 1 The number of precipitation days for different magnitudes during flood season on the north slope of east Tianshan Mountain from 1961 to 2016

雨日类型	雨日/d	所占比例/%	气候倾向率/(d/10 a)	相关系数	最多/(d/年份)	最少/(d/年份)
小雨日数	132	79.04	-1.69	0.92**	193/1988	95/2006
中雨日数	20	11.98	0.33	0.59**	37/1987	9/1962、1974
大雨日数	12	7.19	1.27**	0.48**	22/1984	3/1982
暴雨日数	3	1.8	0.58**	0.26	11/1998	0/1962、1975、1977、1979、1985
总降水日数	167		0.45		226/1988	114/2001

注：*表示通过0.05显著性水平，**表示通过0.01显著性水平。

2.2 汛期不同量级降水日数空间分布特征

从1961—2016年东天山北坡汛期不同量级降水日数空间分布可知(图2)，总降水日数(图2a)主要是以木垒为高值中心(37.5 d)逐渐向东西两侧减小，其次是巴里坤(37.1 d)，最低值出现在海拔高度最低的吉木萨尔(30.1 d)。小雨日数(图2b)以

巴里坤(28.1 d)为大值中心逐渐向两侧减小，其次是海拔最高的伊吾(27.5 d)，最小值依然出现在吉木萨尔(24.2 d)；其他降水日数的空间分布与总降水日数相似，都是以木垒为高值中心逐渐向两侧减小，最低值出现区域不同，而是出现在哈密市东北部的伊吾县。

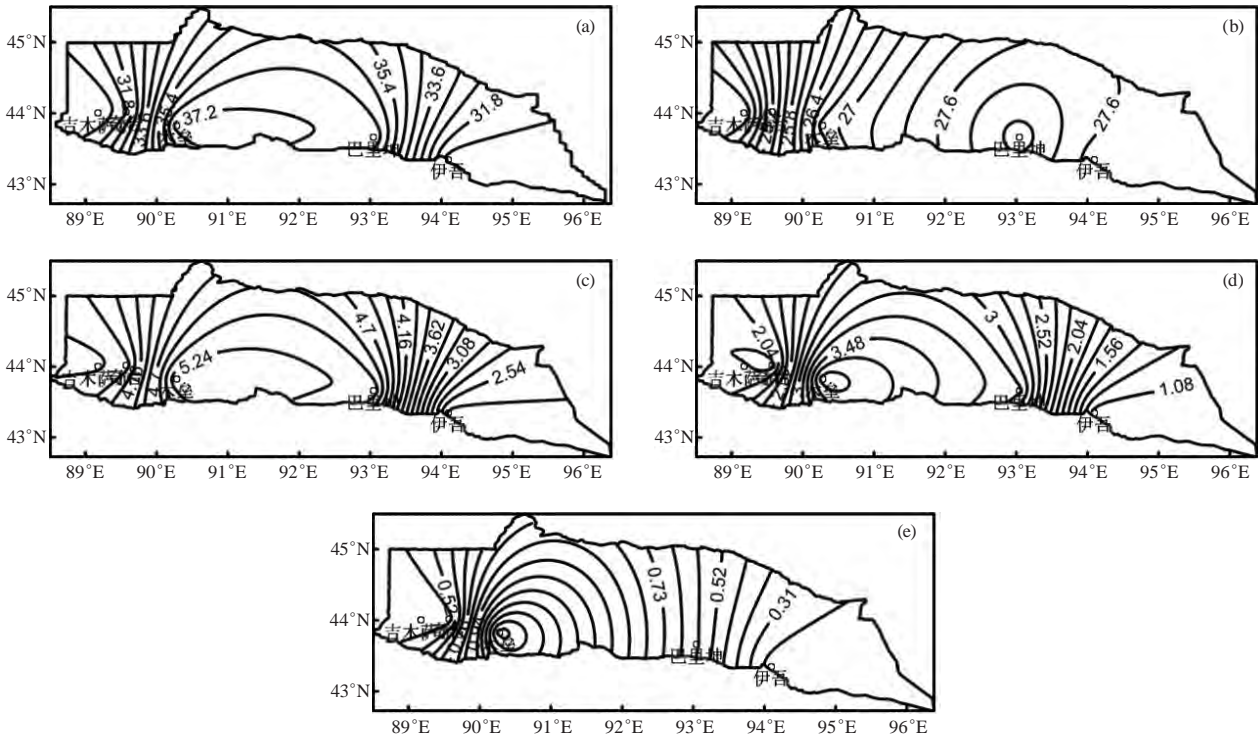


图2 1961—2016年东天山北坡汛期平均总降水日数(a)、小雨日数(b)、中雨日数(c)、大雨日数(d)和暴雨日数(e)空间分布(单位:d)

Fig. 2 Spatial distribution of average total precipitation days (a), the number of light rain days (b), the number of moderate rain days (c), the number of heavy rain days (d) and the number of rainstorm days (e) during flood season on the north slope of east Tianshan Mountain from 1961 to 2016 (Unit: d)

综上分析可知，不同量级降水日数空间分布都是以某一高值区为中心逐渐向东西两侧减小，不同的是高值区和低值区出现区域不同，高值区集中出现在木垒(小雨日数出现在巴里坤)，低值区集中出现在吉木萨尔和伊吾。从各区域不同量级降水日数所占比重可知(图略)，随着降水量级的增大，对应降水日数

也迅速减小，其中小雨日数占总降水日数比重最大，5个县均在72%以上，其中伊吾所占比重最高，达到89%以上。因此可知，总降水日数越少的区域，小雨日数所占比重越大，反之越小；暴雨日数所占比重最小，在0.6%~3.7%，其中木垒出现暴雨日数最多，占3.7%，伊吾出现最少，仅占0.6%。

2.3 汛期不同量级降水日数气候趋势分布特征

由近56 a东天山北坡汛期不同量级降水日数变化趋势的空间分布(图3)可知,总降水日数和小雨日数变化趋势较一致,这与小雨日数占总降水日数比重在72%以上有绝对的关系。因此,在一定程度上,各站小雨日数的趋势变化基本可以代表总降水日数变化趋势。其中吉木萨尔和奇台呈增加趋势,其他3县呈减小趋势,不同的是总降水日数中5县均未通过0.05显著性检验,总趋势是以吉木萨尔增加最明显,达到0.72 d/10 a,且逐渐向东减小,最小值出现在伊

吾;而小雨日数中巴里坤减小最显著(-0.9 d/10 a, $P < 0.05$),其他4个县均未通过检验。中雨日数趋势变化与大雨日数、暴雨日数相似,5个县均呈增加趋势,不同的是中雨日数5个县均未通过0.05显著性检验;大雨日数中,有2个县通过0.05和1个县通过0.01显著性检验,巴里坤增加最显著,达到0.48 d/10 a ($P < 0.01$),伊吾增加趋势最小($P > 0.05$);暴雨日数中,木垒增加最明显,达到0.26 d/10 a ($P < 0.01$),增加趋势最弱的是吉木萨尔($P > 0.05$)。

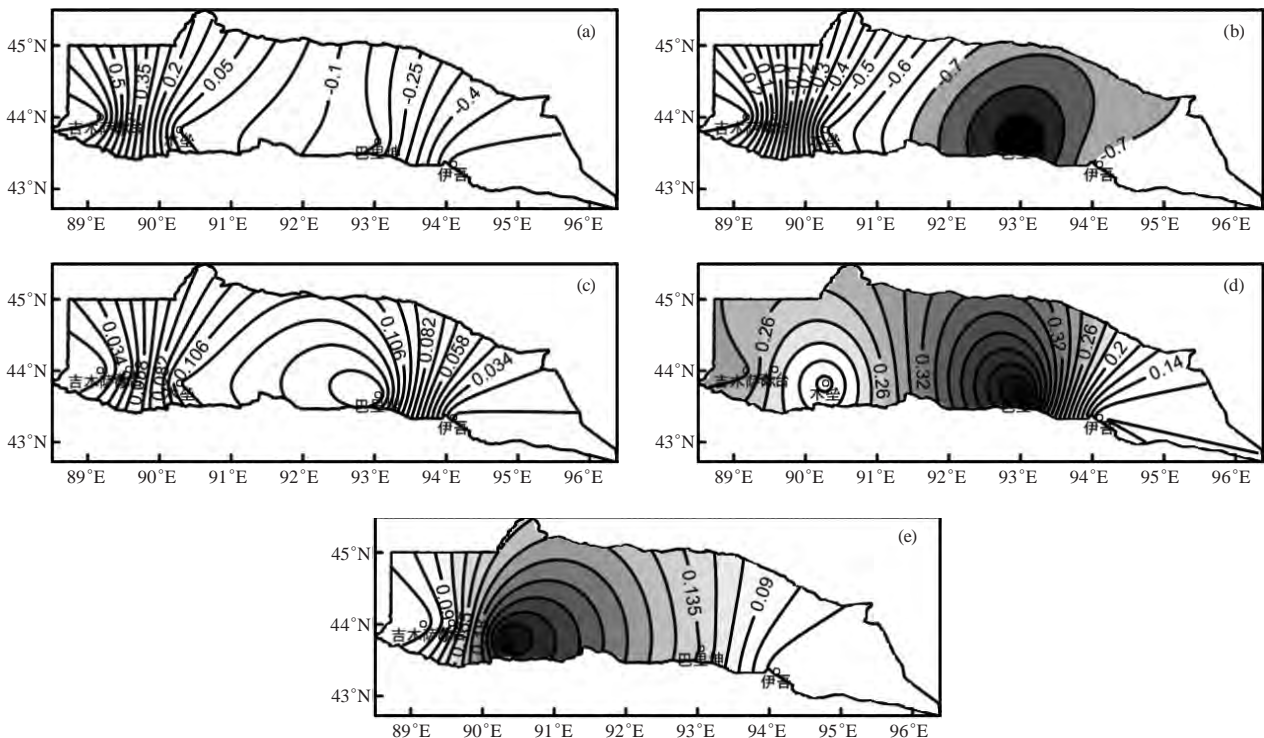


图3 1961—2016年东天山北坡汛期平均总降水日数(a)、小雨日数(b)、中雨日数(c)、大雨日数(d)和暴雨日数(e)气候变化趋势空间分布(单位:d/10 a,阴影部分通过0.05显著性检验)

Fig. 3 Spatial distribution of climate change trend of average total precipitation days (a), the number of light rain days (b), the number of moderate rain days (c), the number of heavy rain days (d) and the number of rainstorm days (e) during flood season on the north slope of east Tianshan mountain from 1961 to 2016 (Unit: d/10 a, the shaded part passes a significance level of 0.05)

2.4 汛期不同量级降水日数年代际变化特征

为了分析东天山北坡不同量级降水日数的年代际变化趋势,利用6次多项式拟合方法对该区域不同降水日数进行序列拟合。由图4可知,近56 a东天山北坡汛期总降水日数和小雨日数变化趋势基本一致,呈单峰双谷型,峰值出现在20世纪90年代初期,谷值出现在20世纪60年代中期和21世纪前10年的末期,20世纪70—90年代以及近6年均呈增加趋势。中雨日数20世纪60—90年代初期呈增加趋势,随后逐渐减小持续到21世纪初期,然后逐渐增加。大雨日数从20世纪60

年代到21世纪初期呈微弱波动增加趋势,随后快速增加。暴雨日数呈双峰双谷型,峰值出现在20世纪60年代中期和90年代末期,谷值出现在20世纪70年代末期和21世纪前10年的末期,随后增加明显。综合分析表明,各量级降水日数均在进入21世纪前10年后呈增加趋势,预计这种增加趋势仍将持续。

2.5 汛期不同量级降水日数的突变分析

为了检验1961—2016年东天山北坡汛期不同量级降水日数较长时间序列变化信号,利用M-K法进行变化趋势分析的同时进行突变分析。从图5可知,总降

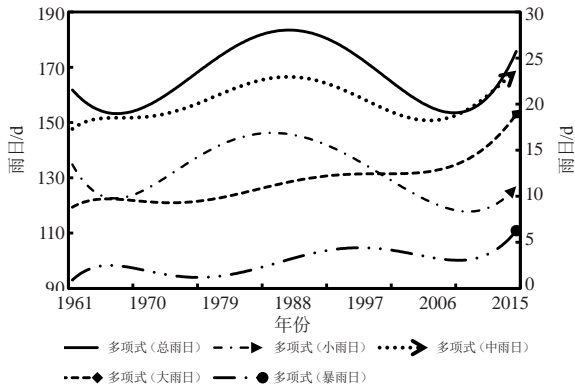


图4 1961—2016年东天山北坡汛期不同量级降水日数年代际变化趋势

Fig. 4 The trend of number of precipitation days for different magnitude during flood season on the north slope of east Tianshan Mountain from 1961 to 2016

水日数、小雨日数和中雨日数变化趋势相似，UF和UB曲线在临界线（ ± 1.96 ）范围内出现多个交点，但相交的年份不同，通过信噪比检验各交点 S/N 均小于1，说明三者研究期内均未发生突变；同时从UF曲线演变可知从20世纪90年代末期以后呈下降趋势，并在未来仍将持续。大雨日数在1977年之后UF曲线呈波动上升趋势，与UB曲线相交于1991年，通过信噪比检验该交点 $S/N > 1$ ，说明1991年是东天山北坡大雨日数的突变年，1998年超过临界线，表明为显著的上升趋势；暴雨日数中UF和UB曲线在1980年以前出现多个交点，利用信噪比检验所有交点只有1980年 $S/N > 1$ ，表明该年是暴雨日数的突变年，1990年超过临界线，表明从该年开始为显著上升趋势，同样这种上升趋势在未来仍将持续。

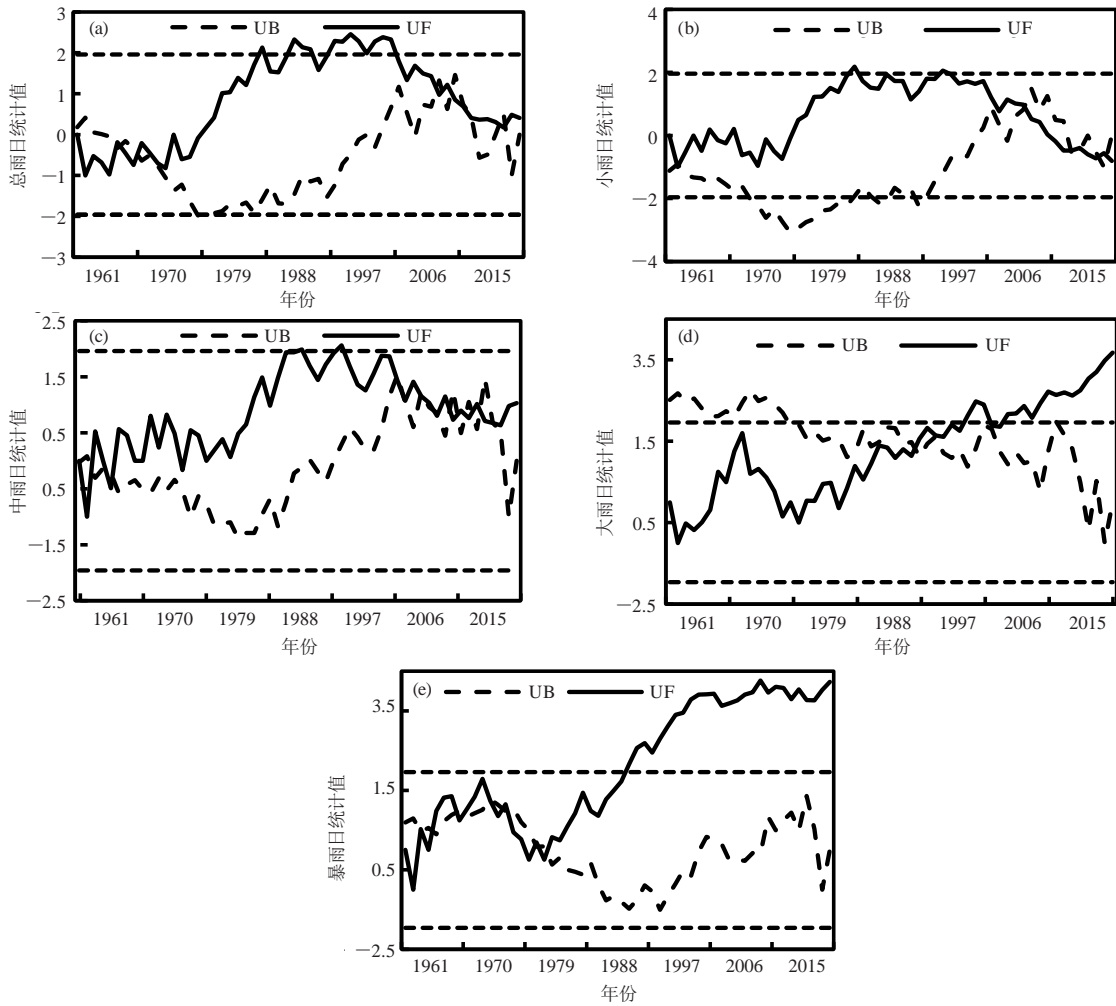


图5 1961—2016年东天山北坡汛期总降水日数 (a)、小雨日数 (b)、中雨日数 (c)、大雨日数 (d) 和暴雨日数 (e) 突变分析

Fig. 5 The analysis of abrupt change points of total precipitation days (a), the number of light rain days (b), the number of moderate rain days (c), the number of heavy rain days (d) and the number of rainstorm days (e) during flood season on north slope of east Tianshan Mountain from 1961 to 2016

2.6 汛期不同量级降水日数与总降水量的关系

从近56 a东天山北坡汛期总降水量的空间分布可知(图略),总雨量与总降水日数、中雨日数、大雨日数和暴雨日数空间分布比较一致,均以木垒为大值中心,逐渐向东西两侧减小,低值区位于伊吾。汛期总降水量线性趋势变化(图略)与总降水日数、中雨日数、大雨日数和暴雨日数变化较一致,为明显的增加趋势,达到45.06 mm/10 a;从气候倾向率的空间分布可知(图略)与中雨日数、大雨日数相似,均表现为增加趋势,增加最明显的是巴里坤,伊吾增加最小;不同的是通过显著性检验范围和站点不同,总降水量有3个县通过0.01显著性检验。汛期总降水量与不同量级降水日数的相关系数全部通过0.01显著性检验(表略),与小雨日数相关性最差,仅为0.36,而与其他降水日数相关系数均在0.65以上,说明中、大、

暴雨日数与汛期总降水量关系较密切,其中与大雨日数相关系数最好,高达0.84,其次是暴雨为0.74。

从不同量级降水日数与汛期总降水量相关系数空间分布可知(图6),总降水量与总降水日数相关性密切,5个县均通过0.01显著性检验,相关系数最高出现在吉木萨尔,为0.68;与小雨日数相关性相对较差,只有3个县通过0.01显著性检验,相关性最好的为伊吾,达到0.42;与小雨日数相比,中雨日数与总雨量相关性有所提高,1个县通过0.05显著性检验,4个县通过0.01显著性检验,相关性最好的仍出现在伊吾,升至0.64;而大雨日数、暴雨日数与总雨量相关性更高,5个县均通过0.01显著性检验,大雨日数相关性最好出现在巴里坤,为0.71;暴雨日数为0.70,出现在木垒。因此在汛期随着降水量级升高,降水日数与汛期总降水量的相关系数也不断增大,小雨日数与总雨量相关性相对较差,与大雨日数相关性最好。

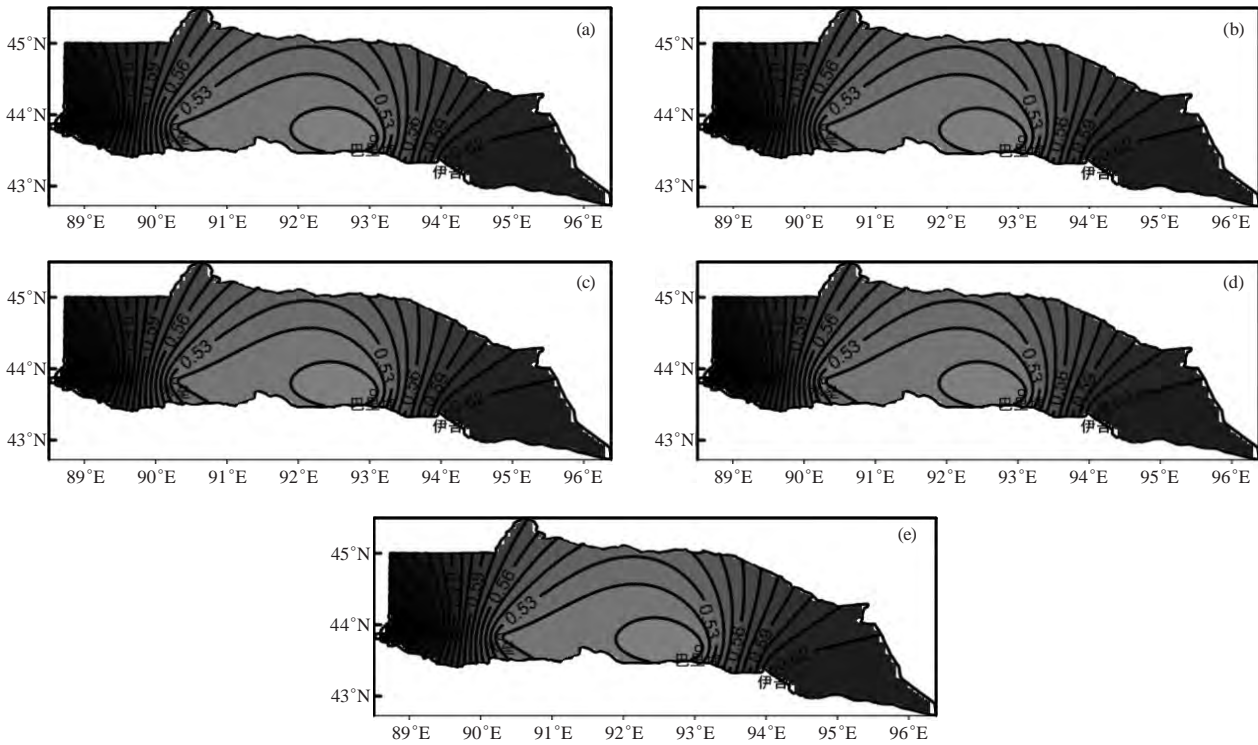


图6 1961—2016年东天山北坡汛期总降水量与总降水日数(a)、小雨日数(b)、中雨日数(c)、大雨日数(d)和暴雨日数(e)相关系数空间分布(阴影部分通过0.05显著性检验)

Fig. 6 Spatial distribution of correlation coefficient between total precipitation and total precipitation days (a), the number of light rain days (b), the number of moderate rain days (c), the number of heavy rain days (d) and the number of rainstorm days (e) during flood season on the north slope of east Tianshan Mountain from 1961 to 2016 (the shaded part passes a significance level of 0.05)

3 结论

1) 近56 a东天山北坡汛期总降水日数为167 d,小雨日数占总降水日数比重达79.04%,且随着降水量级的上升,对应的降水日数迅速减小,暴雨日数仅为

3 d。从气候倾向率变化可知,小雨日数呈明显下降趋势,其他降水日数呈增加趋势,其中大雨日数增加最明显,达到1.27 d/10 a,它的增加是导致汛期总降水日数增加的主要原因。

2) 从不同量级降水日数的空间分布可知, 都是以某一高值区为中心逐渐向东西两侧减小, 不同的是高值区和低值区出现区域不同, 高值区大都集中出现在木垒(小雨日数出现在巴里坤), 低值区集中出现在吉木萨尔和伊吾。具体表现为总降水日数越少的区域, 小雨日数所占比重越大, 暴雨日数所占比重越小。

3) 通过6次多项式拟合方法对东天山北坡近56 a不同雨日进行序列拟合发现, 总降水日数和小雨日数变化趋势基本一致, 呈单峰双谷型, 其他降水日数变化不太一致, 但总的来说各量级降水日数在进入21世纪前十年后均呈增加趋势。

4) 利用近56 a东天山北坡汛期不同量级降水日数与总降水量关系可知, 随着降水量级升高, 降水日数与汛期总降水量的相关系数也不断增大。

参考文献

- [1] 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化. 地理学报, 2009, 64(7): 798-806.
- [2] 张正勇, 刘琳, 唐湘玲. 近50年我国天山山区降水变化区域差异及突变特征. 干旱区资源与环境, 2013, 27(7): 85-90.
- [3] 赵传成, 丁永建, 叶柏生, 等. 天山山区降水量的空间分布及其估算方法. 水科学进展, 2011, 22(3): 1932-1960.
- [4] 刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山山区降水对全球气候变化的响应. 冰川冻土, 2017, 39(4): 748-759.
- [5] 韩雪云, 杨青, 姚俊强. 新疆天山山区近51年来降水变化特征. 水土保持研究, 2013, 20(2): 139-144.
- [6] 王芬, 曹杰, 李腹广, 等. 贵州不同等级降水日数气候变化特征及其与降水量的关系. 高原气象, 2015, 34(1): 145-154.
- [7] 郑腾飞, 刘显通, 万齐林, 等. 近50年广东省分级降水的时空分布特征及其变化趋势的研究. 热带气象学报, 2017, 33(2): 212-220.
- [8] 李小亚, 张勃, 汪宝龙, 等. 河西地区1960年至2011年不同级别降水日数和极端降水事件的变化特征. 资源科学, 2013, 35(1): 182-190.
- [9] 张冰, 刘宣飞, 郑广芬, 等. 宁夏夏季极端降水日数的变化规律及其成因. 大气科学学报, 2018, 41(2): 176-185.
- [10] 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003.

“自然指数2020: 地球和环境领域”榜单发布中国气象局荣膺机构上升之星

■ 李婧华

2020年4月30日, 自然出版集团发布了“2020年自然指数榜单”。在地球和环境领域排行榜中, 中国科学院、德国亥姆霍兹联合会和法国国家科学研究中心位列前三甲。中国气象局以137篇论文的成绩, 位列第25位, 较上一年的第67位有大幅度提升。

榜单中共有22个中国机构进入地球和环境领域排行榜前100名, 数量比上一年增加了7个。中国科学院(排名1)、南京大学(6)和中国科学院大学(13)是中国机构前三甲。其他中国机构有: 同济大学(14)、中国科技大学(17)、中国地质大学(武汉)(18)、北京大学(19)、清华大学(26)、浙江大学(36)、中山大学(40)、北京师范大学(50)、哈尔滨工业大学(54)、武汉大学(57)、香港科技大学(65)、南京信息工程大学(72)、中国地质大学(北京)(84)、南开大学(87)、中国地震局(90)、华中科技大学(94)、自然资源部(94)和兰州大学(100)。最新榜单中, 中科院连续5年蝉联第1位, 入选的中国高校共有18所高校, 政府机构共3个, 其中中国气象局的排名最高。

除中国气象局外, 多个国家/地区的气象机构进入榜单前100名。NOAA位列第8, 比上一年的第17前进了9位; NCAR位列第29, 较上一年的第30前进1位; 加拿大环境和气候变化中心位列第83, 较上一年的

第74有所下滑。中国气象局位列NOAA和NCAR之后, 是该榜单中排名第三的气象机构。

今年的自然指数年度榜单还增加了机构上升之星榜单, 该榜单跟踪2015—2019年各机构高质量产出的增长情况。在地球和环境领域, 中国成为该榜单中的主导力量, 共有62家机构入选上升之星榜单, 并且包揽了榜单前10名。根据调整后的贡献份额变化情况, 升幅最快的前十家机构上升之星分别是中国科学院、中国科学院大学、中国地质大学、同济大学、中国科技大学、南京大学、中山大学、中国气象局、武汉大学和中国地质大学(北京)。

中国气象局在地球和环境领域上升之星榜单中荣膺第8, 是这个名单里的唯一政府机构。中国气象局经调整后的贡献份额增加了22.22%, 反映出机构在过去几年中高质量的科研成果增长显著。在2020年的榜单中, 中国气象局排名第25位, 也是历年来的最佳排名。随着气候变化和空气污染成为全球研究的重中之重, 中国气象局在气候监测和模式、大气污染物形成以及气候变化对生态的影响等方面开展了广泛的研究。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

2005—2015年广东省森林生态系统净初级生产力时空变化特征

李国洋¹ 徐启恒¹ 陈宽文² 曹永超²

(1 广东省东莞市测绘院, 东莞523129; 2 广东省东莞市不动产登记中心, 东莞 523129)

摘要: 基于MODIS的森林植被净初级生产力(NPP)数据, 辅以气候和土地利用数据, 利用GIS和统计分析方法, 探讨了2005—2015年广东省森林植被NPP的时空特征。结果表明: 1) 时间趋势上, 2005—2015年广东省森林植被年NPP均值以及年NPP总量总体上均呈现波动上升的趋势。2) 空间分布上, 2005—2015年广东省森林植被NPP存在空间异质性。年NPP均值最大值为潮州市, 最低的地区是中山市和湛江市。3) 空间趋势上, 广东省森林植被NPP有15.93%为无显著变化区域, 显著上升和显著下降区域分别为63.45%和20.62%; 2005—2015年广东省森林植被NPP呈显著下降的区域主要分布广东省北部地区的清远市、韶关市、河源市、梅州市以及零星分布在南部的湛江市, NPP呈显著上升的区域主要分布在广东省的中南部地区茂名市、阳江市、云浮市等。4) 气温和降水对森林植被NPP均值的影响呈现明显的空间分异特征。

关键词: 广东省, 森林生态系统, 植被净初级生产力, 时空特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.010

Spatial and Temporal Characteristics of Net Primary Productivity of Forest Ecosystem in Guangdong Province from 2005 to 2015

Li Guoyang¹, Xu Qiheng¹, Chen Kuanwen², Cao Yongchao²

(1 Dongguan Institute of Surveying and Mapping, Dongguan 523129

2 Dongguan Real Estate Registration Center, Dongguan 523129)

Abstract: Based on MOD17A3H Net primary productivity of vegetation data, climate data and land use data, using GIS analysis and statistical analysis methods, the spatial and temporal characteristics of forest vegetation NPP in Guangdong Province from 2005 to 2015 were analyzed. The results show that: 1) both the annual mean value of NPP of forest vegetation and the annual total NPP of Guangdong Province had a trend of fluctuation and increased from 2005 to 2015; 2) in terms of spatial distribution, NPP of forest vegetation in Guangdong province had spatial heterogeneity from 2005 to 2015. The annual NPP mean value was the highest in Chaozhou and the lowest in Zhongshan and Zhanjiang; 3) 15.93% of NPP in Guangdong province showed no significant change, while 63.45% showed significant increased and 20.62% showed significant decrease, respectively. From 2005 to 2015, NPP in Guangdong province decreased significantly mainly in Qingyuan, Shaoguan, Heyuan, Meizhou and Zhanjiang in the north of Guangdong province, while NPP increased significantly in Maoming, Yangjiang and Yunfu in the south of Guangdong province; 4) the effect of temperature and precipitation on NPP of forest vegetation showed obvious spatial differentiation.

Keywords: Guangdong Province, forest ecosystem, net primary productivity, spatiotemporal characteristics

0 引言

森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 对于全球碳平衡、CO₂等温室气体上升, 全球气候变化等具有重要的作用。植被净初级生产力(NPP)是指植被在单位时间、单位面积上累积的有机干物质总量, 是进行光合作用产生的有机质总量减去呼吸消耗

的能量剩余的部分^[1-2]。森林植被NPP是森林生态系统碳循环过程重要指标和关键参数, 可以评估植被的生产能力, 同时可以衡量陆地生态系统的可持续发展, 在全球气候变化中具有重要的作用^[3-4]。

MODIS卫星遥感数据具有高时间分辨率的优势, 在森林植被监测中已经得到了广泛的应用。基于遥感估算的NPP已经成为森林植被监测的一个重要指标^[5-6]。王培娟等^[7]对长白山地区森林植被NPP的影响因子进行了敏感性研究, 结果表明长白山森林植被NPP与温度

收稿日期: 2019年2月15日; 修回日期: 2019年7月22日

第一作者: 李国洋(1989—), Email: 769671870@qq.com

呈负相关与降水量无明显关系。江洪等^[8]基于MODIS遥感影像结合气象数据对福建省2004年森林生态系统植被净初级生产力进行了模拟与分析,结果表明福建省森林生态系统NPP空间分布具有地域特征。赵鑫等^[9]基于MODIS数据估算了内蒙古地区的森林植被NPP,结果表明内蒙古森林植被NPP具有空间异质性,由东向西、由北向南依次减小,不同植被类型也存在差异。李登秋等^[10]研究了江西省森林植被NPP的动态变化特征和驱动因子,结果表明气候变化等因素对森林植被NPP的动态变化有一定的影响。赵颖慧等^[11]对黑龙江落叶松NPP与气象因素关系研究,结果表明生长季NPP与月均气温、月均降水呈极显著相关性。

广东省地处我国华南地区,森林植被资源丰富。基于MODIS估算的NPP,对2005—2015年广东省森林植被NPP的时空变化特征进行定量分析,研究成果对于森林生态系统生产力评估、气候变化以及生态系统环境建设具有重要参考意义。

1 研究区概况

广东省地处低纬度地区(图1),横跨热带和亚热带。全省的森林植被覆盖率达57%,南部地区为热带常绿雨林季节,中部为亚热带季风常绿阔叶林,北部南岭地区主要为亚热带常绿阔叶林^[12]。

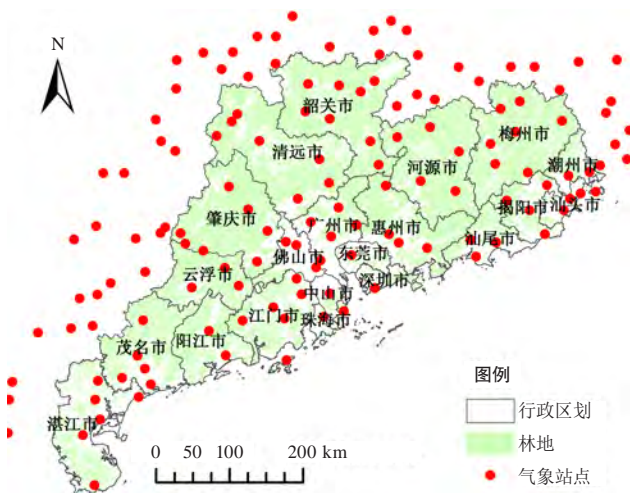


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本文所使用的2005—2015年NPP数据来源于MODIS产品MOD17A3H (<https://search.earthdata.nasa.gov/>),该产品运用生物地球化学模型BIOME-BGC估算出全球陆地植被年NPP,已经在全球和区域NPP以及碳循环研究中得到广泛应用。MOD17A3H产品中的

数据质量信息文件(Npp_QC_500m)是8 bits位的二进制格式压缩成整型数据的一个波段,使用MODIS陆地数据业务化产品质量评估工具(LDOPE Tools)把压缩的二进制恢复为通常的十进制波段,即解码^[13]。8 bits位的第一位(MODLAND_QC bits)代表数据质量,第1 bit位数据解压为十进制数据后,“0”代表Good Quality,“1”代表Other Quality。利用MRT软件对MOD17A3H数据进行格式转换、投影转化以及重采样处理,处理后的数据为TIF格式,投影为Albers等积圆锥投影,空间分辨率为500 m。最后利用质量信息文件,选择质量好的像元参与分析。

土地利用数据(2005、2010和2015年)来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),本研究中的森林植被就是土地利用分类体系中的林地。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),主要包括气温和降水,为保证数据的一致性,选择2005年建站以来的气象站,利用广东省以及周边的气象站点数据采用Anuspline 4.3气象专用插值软件进行插值,得到与NPP数据具有一致的空间分辨率和投影的温度和降水栅格数据集。利用广东省矢量边界数据对NPP数据、气温和降水栅格数据进行裁剪,得到研究区内森林植被NPP、气温和降水的空间分布数据。

2.2 方法

NPP的变化趋势采用Sen趋势分析方法^[14],并用Mann-Kendall统计检验方法对NPP的变化趋势进行显著性检验。为了定量研究森林植被NPP与区域气候因子的关系,使用Pearson相关系数方法^[15]分析森林植被NPP与降水、气温之间的关系。

3 时空格局

3.1 广东省2005—2015年森林植被NPP时间变化特征

2005—2015年,广东省森林植被年NPP均值以及年NPP总量总体上均呈现波动上升的趋势(图2)。森林植被年NPP均值变化范围是748.32~865.41 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,平均值为816.46 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,最大值是2013年,最小值是2005年;森林植被年NPP总量变化范围是 $7.79\times 10^{13}\sim 9.04\times 10^{13}$ $\text{gC}\cdot\text{a}^{-1}$,平均值为 8.61×10^{13} $\text{gC}\cdot\text{a}^{-1}$,最大值是2013年,最小值是2005年。

3.2 广东省2005—2015年森林植被NPP空间分布格局

2005—2015年广东省各市年NPP均值(多年的NPP均值)如图3所示。2005—2015年,广东省森林植被年NPP均值,高值主要分布在广东省的中部

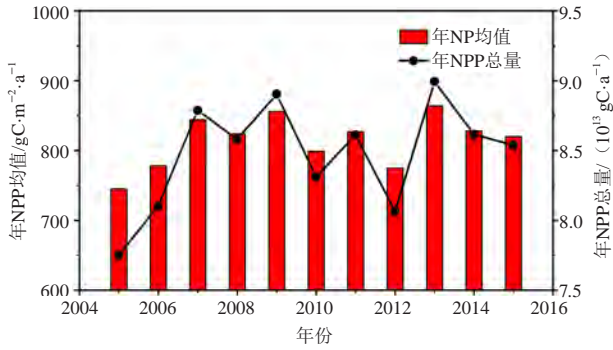


图2 2005—2015年广东省森林植被年NPP均值变化趋势
Fig. 2 The mean change trend of forest vegetation NPP in Guangdong Province from 2005 to 2015

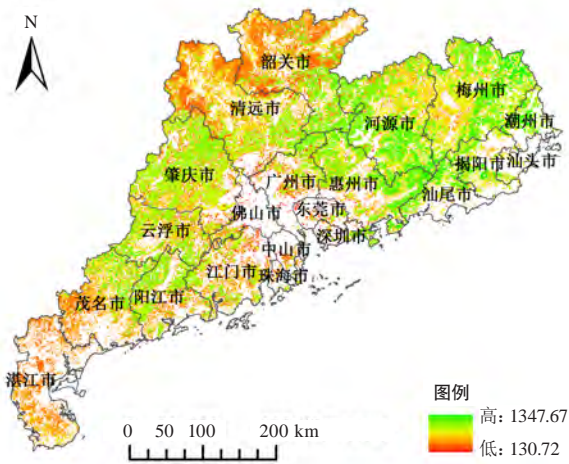


图3 2005—2015年广东省森林植被年NPP均值空间分布
(单位: $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
Fig. 3 The spatial distribution of forest mean NPP in Guangdong Province from 2005 to 2015 (Unit: $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

与东部地区，潮州市、梅州市、河源市和肇庆市等，低值区主要分布在广东省的北部地区和南部地区，韶关市、清远市和湛江市等。潮州市年NPP均值最大 ($1009.53 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)；其次为汕尾市 ($952.44 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)；中山市和湛江市的年NPP均值最小，分别为 589.65 、 $572.87 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.3 广东省 2005—2015 年森林植被 NPP 空间趋势特征

为监测广东省森林植被NPP变化趋势，计算了2005—2015年森林植被NPP的Sen趋势，并进行Mann-Kendall检验，将结果划分为无显著变化和显著变化 ($P < 0.05$) 两个等级 (图4)。结果表明，广东省森林植被NPP有15.93%为无显著变化区域，显著上升和显著下降区域分别为63.45%和20.62%；2005—2015年广东省森林植被NPP呈显著下降的区域主要分布广东省北部地区的清远市、韶关市、河源市、梅州市以

及零星分布在南部的湛江市，NPP呈显著上升的区域主要分布在广东省的中南部地区茂名市、阳江市、云浮市等。

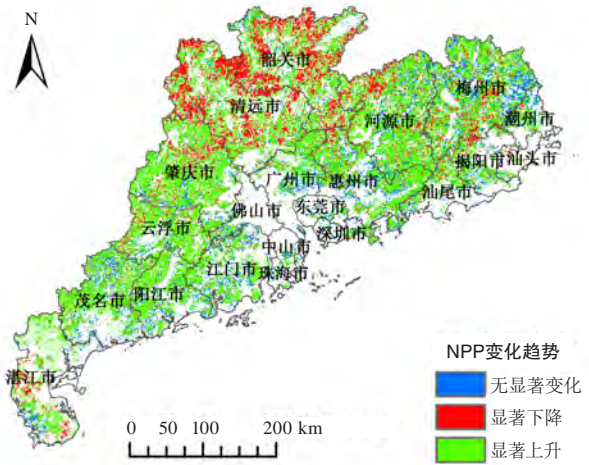


图4 2005—2015年广东省森林植被NPP变化趋势与显著性
Fig. 4 The change trend and significance of forest vegetation NPP in Guangdong Province from 2005 to 2015

4 影响因素分析

4.1 广东省年均气温及降水空间分布

分析2005—2015年广东省温度和降水栅格数据可知：近11年来，广东省年平均气温呈现南高北低的趋势，尤其是湛江市年均温度最高，清远市和韶关市的林区温度较低；年均降雨量最高的地区位于阳江市和江门市，年均降雨量最低的地区主要位于西部的云浮市和肇庆市、北部的韶关市以及东北部的梅州市和潮州市 (图5)。

4.2 气候因素对 NPP 的影响

对广东省2005—2015年气象栅格数据和森林植被NPP数据进行相关性分析，得到气温和降水量与森林植被NPP相关系数的空间分布图 (图6)。由图可知，气温和降水对森林植被NPP均值的影响呈现明显的空间分布特征。其中森林植被NPP与气温呈正相关的面积占总面积的14.36%，主要分布在北部地区的韶关市；呈负相关的面积占总面积的17.56%，主要零星分布广东省的西南部地区的肇庆市、云浮市、佛山市、江门市、阳江市和茂名市等。森林植被NPP与降雨量呈正相关的面积占总面积的11.65%，主要零星分布在分布肇庆市、云浮市和茂名市；森林植被NPP与降雨量呈负相关的面积占总面积为39.24%。

广东南部地区气温较高，能充分满足植被生长，因此温度与NPP相关不明显；而北部地区为山区，气温较低，一旦温度升高将有利于植被NPP的增加。降

茂名气候及其生产力变化与粮食产量关系研究

武君 于晋秋 黄冬至
(广东省茂名市气象局, 茂名 525000)

摘要: 采用茂名山阁气象站1960—2010年气象资料, 对气候因子和气候生产力的变化趋势进行分析。结果表明: 气温和降雨量呈递增趋势, 日照时数缓慢递减。气候生产力以 $21.3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的速度递增, 与各气候因子都具有相关性, 其中与年平均气温的相关系数达0.99, 明显高于其他因子。粮食单产与同期气候生产力变化趋势相同, 各气候因子通过对气候生产力的影响间接影响粮食产量。在气候变暖的大背景下, 降雨对气候生产力的增幅并不明显, 还需要合理利用水资源才能使茂名的气候优势更稳定。

关键词: 气候变化, 气候生产力, 粮食产量, 茂名

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.011

Analysis on the Relationship Between the Change Trend of Climate, Climate Productivity and Grain Yield in Maoming

Wu Jun, Yu Jinqiu, Haung Dongzhi
(Maoming Meteorological Bureau, Maoming, 525000)

Abstract: Based on meteorological data from 1960 to 2010 at Shange Weather Station in Maoming, the change trend of climatic factors and climate productivity of Maoming City was analyzed. Results show that the temperature and rainfall had an increasing trend, but the sunshine hours slowly decreased. Climate productivity of Maoming increased at the rate of $21.3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ was related to the climatic factors. The correlation coefficient with annual average temperature reached 0.99, which was obviously higher than other elements. The change trend of grain yield per unit area was the same as that of climatic productivity in the same period and climatic factors could indirectly affect grain yield by affecting climatic productivity. Under the background of climate warming, the increase of climate productivity caused by rainfall in Maoming was not obvious, so it is necessary to make rational use of water resources in order to make the climatic advantages of Maoming more stable.

Keywords: climate change, climate productivity, grain yield, Maoming

0 引言

近年来有关气候变化对中国农业影响的研究受到学术界越来越广泛的关注, 研究的结论并不一致。一方面, 一些研究^[1-2]表明, 气候变暖使中国大部分地区热量资源增多, 使得作物单产有所增加; 另一方面, 也有研究^[3]表明, 气候变暖后土壤微生物分解有机质速度加快, 这样在相同的农业栽培技术条件下必然会造农作物生育期缩短和农田地力下降, 使农作物产量下降, 导致农业减产减收。目前还没有对茂名气候生产力状况及其与农作物产量关系方面的研究, 预计本文的研究成果对茂名农业产业应对气候变化将起到促进作用。

1 资料和方法

采用茂名山阁国家气象观测站1960—2010年的逐月平均气温、降水量以及日照时数等资料进行气候以及气候生产力的变化趋势分析; 采用茂名统计局年鉴确定粮食产量以及耕地面积等数据。

计算气候生产力的方法很多, 常用的计算模型有Miami模型、Memorial模型、Chikugo模型、筑后数学模型等^[4-6]。本文选用了Thorntwaite Memoria气候生产力模型, 该模型是根据世界各地植物生物产量与年平均气温、年降水量之间的关系, 用实际蒸发散量估算气候生产力, 具体公式参见文献[7-8]。

2 结果

2.1 茂名气候变化趋势

从茂名山阁气象站1960—2010年的年平均气温变化趋势(图1a)来看, 茂名年平均气温以 $0.12 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$

收稿日期: 2019年5月9日; 修回日期: 2019年8月22日
第一作者: 武君(1982—), Email: 94028672@qq.com
资助信息: 茂名市气象局科研项目(201701)

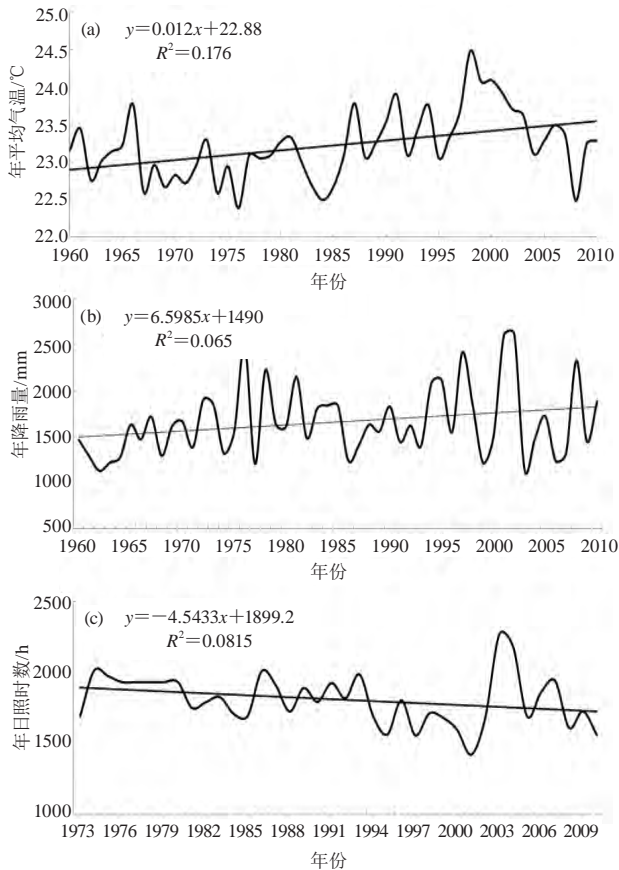


图1 茂名气候变化趋势
(a) 年平均气温, (b) 年降雨量, (c) 年日照时数
Fig. 1 The trends of climatic factors in Maoming
(a) annual average temperature, (b) annual precipitation, (c) annual sunshine hours

的速度递增, 1995年以后变化幅度明显增大; 年降雨量变化(图1b)与气温变化趋势大致相同, 以65.985 mm/10 a的速度递增; 年日照时数(图1c)与年平均气温、年降雨量的变化趋势相反, 呈减少趋势, 递减率为45.433 h/10a。

分析茂名各气候因子年代际变化趋势, 发现20世纪80年代前年平均气温为负距平, 90年代后为正距平; 年降雨量20世纪60、80年代为负距平, 70年代正常, 90年代和21世纪00年代为正距平; 年日照时数20世纪70—80年代为正距平, 90年代后为负距平。

2.2 茂名气候生产力以及相对应的粮食产量年代际变化趋势

模型计算结果(图2)表明, 1960—2010年茂名气候生产力呈上升趋势, 递增率 $21.3 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。从茂名气候生产力年代际变化趋势(表1)来看, 20世纪90年代最高, 21世纪00年代次之, 距平百分率分别为2.4%和1.0%。

茂名粮食单产的年代际变化趋势与气候生产力变

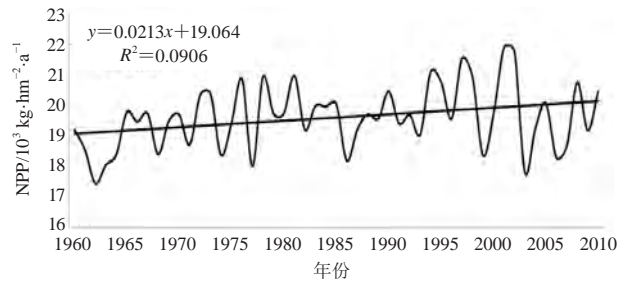


图2 茂名市气候生产力变化趋势
Fig. 2 The trend of climate productivity in Maoming

表1 气候生产力以及对应粮食产量的年代际变化
Table 1 The decadal trends of climate productivity and grain yield

年代	气候生产力/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	距平/%	粮食单产/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	距平/%
20世纪60年代	18857.3	-3.9	1705.3	-39.9
20世纪70年代	19653.1	0.2	2176.8	-23.3
20世纪80年代	19664.3	0.2	3152.1	11.1
20世纪90年代	20089.4	2.4	3642.1	28.4
21世纪00年代	19809.4	1.0	3509.4	23.7

化趋势基本一致, 20世纪60—70年代为负距平, 90年代的粮食单产最高, 到了21世纪00年代有所下降。

2.3 茂名各气候因子对气候生产力的影响

通过将各气候因子与气候生产力做相关分析(表2)可知, 年平均气温与同期气候生产力的相关系数高达0.99 ($P < 0.001$)。与8月、10—12月、1—4月的月平均气温的相关系数通过了0.01的显著性水平检验; 与7月的降雨量以及7、9、11月的日照时数的相关系数通过了0.05的显著性水平检验, 说明茂名气候生产力的高低与某些月份的平均气温、降水量以及日照时数等气候因子都有着直接的关系, 与年平均气温的相关系数明显高于其他气候因子。

表2 气候因子与气候生产力的相关性
Table 2 The correlation between climatic factors and climatic productivity

气候因子	与气候生产力的相关系数
月日照时数(7、9、11月)	-0.34*~-0.47**
月降水量(7月)	0.35*
年平均气温	0.99***
月平均气温(8月、10—12月、1—4月)	0.39~0.59**

注: *, **, ***分别表示显著性水平达0.05、0.01、0.001。

然后, 在气温以及降水量1960—2010年多年平均值的基础上, 研究了它们增加或减少时气候生产力的变化情况(表3)。结果表明, 年平均气温、年降雨量与气候生产力变化趋势一致。如果年降雨量保持平均水平, 年平均气温改变 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 气候生产力改变1.1%; 年平均气温改变 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 变平气候生产力改变

表3 气候变化条件下茂名气候生产力距平百分率
Table 3 Percentage of climate productivity anomaly in Maoming under climate change conditions

年平均气温变化/% 气候生产力距平百分率/%	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5
年降雨量变化/%							
-30	-12.9	-12.0	-11.2	-10.4	-9.6	-8.9	-8.2
-20	-9.0	-8.0	-7.0	-6.1	-5.2	-4.3	-3.5
-10	-6.0	-4.8	-3.7	-2.7	-1.7	-0.7	0.3
0	-3.6	-2.3	-1.1	0.0	1.1	2.2	3.2
10	-1.6	-0.3	0.9	2.2	3.4	4.5	5.7
20	-0.1	1.3	2.6	3.9	5.2	6.4	7.6
30	1.1	2.6	4.0	5.4	6.7	8.0	9.3

2.2%左右；年平均气温改变1.5℃，气候生产力变化-3.6%~3.2%。如果年平均气温保持平均水平，年降雨量变化1成，气候生产力变化-2.7%~2.2%；年降雨量变化2成，气候生产力变化-6.1%~3.9%；年降雨量变化3成，气候生产力的变化为-10.4%~5.4%。

如果年平均气温升高0.5℃，同时年降水量增加1成，气候生产力会增加3.4%；年平均气温升高1℃，年降水量增加2成，气候生产力会增加6.4%；由此可见，偏“暖湿”气候有利于植物干物质的积累^[9]。而年平均气温升高0.5℃时，如果年降水量减少1成，气候生产力会降低1.7%，年降水量减少3成，气候生产力则会降低9.6%，说明气候偏“暖干”时会加剧水分不足，造成植物生物产量下降。

如果年平均气温降低0.5℃，同时年降水量增加1成，气候生产力增加0.9%；年平均气温降低1℃，年降水量增加2成时，气候生产力则会增加1.3%，说明在偏“冷”的背景下，降雨对气候生产力的增幅并不明显；而年平均气温降低0.5℃，年降水量减少1成时，气候生产力会降低3.7%，当年平均气温降低1.0℃，年降水量减少2成时，气候生产力更会降低8%，气候偏“冷干”时对气候生产力是最不利的。

3 小结

茂名气候生产力的高低与某些月份的气温、降水量以及日照时数等气候因子都有着直接的关系，其中与年平均气温的相关系数达0.99，明显高于其他气候因子。通过分析未来气候因子的虚拟变化对气候生产力影响可知，在一定条件下，气温越高、降水越多，气候生产力就越高，说明茂名气候在向偏暖湿方向发展时对粮食生产是最有利的。不过由于茂名地区雨量的波动比较大，在气候变暖的大背景下，降雨对气候生产力的增幅并不太明显，而气温上升会增强田间土壤蒸散能力^[10]，所以还需要合理利用水资源才能使茂名的气候优势更稳定。

尽管文中研究取得了一些有意义的结论，但还存在一些局限。首先该研究所选用的站点仅为国家基准站，这可能对研究结果有所影响，其次，对未来的气候变化的趋势，特别是降水量的变化，还有较大不确定性，特别是区域尺度下降水和气温的组合关系是否协调，会直接影响气候生产力的状况^[10]。因此，关于茂名地区气候变化对气候生产力影响的研究还有待进一步深入。

参考文献

- 赵俊芳, 郭建平, 马玉平, 等. 气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2922-2930
- 陈兆波, 董文, 霍治国, 等. 中国农业应对气候变化关键技术研究进展及发展方向. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3097-3104.
- 陈冰, 梁伟杰, 李志杰, 等. 化州气候变化特征及其对农业生产的影响. 气象研究与应用, 2009, 20(2): 153-154.
- 刘洪杰. Miami模型的生态学应用. 生态科学, 1997, 16(1): 52-55.
- 周广胜, 郑元润. 自然植被净第一性生产力模型及其应用. 林业科学, 1998, 34(5): 2-11.
- 侯光良, 游松才. 用筑后模型估算我国植物气候生产力. 自然资源学报, 1990, 5(1): 60-64.
- 杨文坎, 李湘阁. 越南北方气候与气候生产力变化的研究. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 504-515.
- 姚玉璧, 李耀辉, 王毅荣, 等. 黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 202-208.
- 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. 植物生态学报, 1996, 20(1): 11-19.
- 安彬, 孙虎, 刘宇峰, 等. 陕西省气候及其生产潜力时空变化特征. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 103-108.

(上接65页)

- 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2012, 4(4): 321-325.
- 王培娟, 谢东辉, 张佳华, 等. 长白山森林植被NPP主要影响因子的敏感性分析. 地理研究, 2008, 27(2): 323-331.
- 江洪, 汪小钦, 孙为静. 福建省森林生态系统NPP的遥感模拟与分析. 地球信息科学学报, 2010, 12(4): 580-586.
- 赵鑫, 王萍. 基于MODIS的2008—2017年青岛市植被覆盖度动态变化分析. 北京测绘, 2018, 32(10): 1133-1137.
- 李登秋, 张春华, 居为民, 等. 江西省森林净初级生产力动态变化特征及其驱动因子分析. 植物生态学报, 2016, 40(7): 643-657.
- 赵颖慧, 吕泓辰, 甄贞, 等. 黑龙江省气象因子插值优化及与落

- 叶松NPP相关性分析. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(3): 1-9.
- 刘海柱, 唐旭利, 周国逸, 等. 1981—2000年广东省净初级生产力的时空格局. 生态学报, 2006, 27(10): 4065-4074.
- 刘晨晨, 曹广真, 张明伟, 等. 时空尺度对利用MODIS地表温度估算空气温度的影响研究. 遥感技术与应用, 2014, 28(5): 459-466.
- 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716.
- 赵卓文, 张连蓬, 王胜利. 宁夏归一化植被指数与气象因子的相关性. 测绘科学, 2016, 41(7): 98-103.

进展报告2020：洞庭湖生态气象



支持机构：湖南省岳阳市气象局

图说 洞庭湖生态气象

- 72 彭洁, 王彩, 覃鸿: 洞庭湖气象生态服务: 过去、现在和未来
- 74 何筱仙, 向伟, 周静, 杨伟, 李蜀湘: 图看岳阳气象的百年发展脚步

信息 阅读

- 106 李姿容: 岳阳市首个县级环境空气质量预报预警系统启动建设
- 122 王威: 岳阳气象防灾减灾体系建设
- 137 王威: 岳阳气象服务为大岳高速洞庭湖大桥建设保驾护航



进 2020
展报告洞庭湖生态气象
2020年6月/10卷3期

进展报告2020

特约专家

胡爱军 (湖南省气象局)
罗焕娟 (湖南省气象局)
刘敏 (武汉区域气候中心)
万蓉 (武汉暴雨研究所)
邓正苗 (中科院亚热带农业生态研究所)
张鸿 (湖南东洞庭湖国家级自然保护区管理局)
李桂红 (咸宁市气象局)
赵雅静 (咸宁市气象局)
彭洁 (岳阳市气象局)

特约编辑

朱浩 (岳阳市气象局)
莫松柏 (湖南省气象局)

依托生态气象, 守护江湖碧水

“洞庭八百里, 壮阔在岳阳”。洞庭湖汇集四水、吞吐长江, 是我国第二大淡水湖, 也是长江最重要的调蓄湖泊和国际重要湿地。洞庭湖2/3的水域面积在岳阳境内, 经由岳阳城陵矶汇入长江的水量占长江中游总径流量的46%; 岳阳湿地面积达2122.8 km², 占洞庭湖湿地面积的1/3, 被誉为“中国观鸟之都”和“拯救世界濒危物种的重要希望地”。因此, 岳阳不仅是调控江湖的枢纽、长江中下游防洪保安的要冲, 同时也是维系我国乃至全球生物多样性的重要地区。然而, 随着气候变化和人类活动的影响, 洞庭湖湖泊日益萎缩, 调洪蓄水功能下降, 气象灾害频率上升, 生物多样性减少, 严重制约地方经济和社会可持续发展。

近年来, 在党中央的关怀下, 长江经济带和洞庭湖生态经济区建设两大国家战略在岳阳叠加实施, 岳阳市气象局更担起了依托生态气象, 守护一江碧水的重任。岳阳市气象局围绕“一带一区”两大建设做了大量卓有成效的工作, 取得了丰富的实践成果。2010年, 岳阳市气象局联合常德市、益阳市、荆州市气象局, 牵头成立了洞庭湖气候中心, 对环洞庭湖区气候变化规律进行研究。在气候适应性城市建设试点、水上交通安全、城市内涝、大气污染防治等方面取得实质性进展, 并同步推进生态遥感监测、气候变化风险评估、生态环境评价等科研业务服务, 建立了较为完善的气象防灾减灾体系。

本期的主题是洞庭湖生态气象, 主要汇集了洞庭湖气候中心各成员单位在洞庭湖区气候及气候变化、气候适应性城市建设、湖泊湿地生态气象保障服务等方面的最新研究成果, 可为长江经济带和洞庭湖生态经济区建设提供科学决策参考, 助力实施“生态优先、绿色发展, 守护好一江碧水”可持续发展战略。“绿水青山就是金山银山”理论, 在湖南洞庭湖区就表现为江湖碧水的守护。气象人无疑在这样的守护中肩负特殊使命, 本专栏的文章, 无疑交出了岳阳气象人给出的令人充满希冀的答卷。

本期的主题是洞庭湖生态气象, 主要汇集了洞庭湖气候中心各成员单位在洞庭湖区气候及气候变化、气候适应性城市建设、湖泊湿地生态气象保障服务等方面的最新研究成果, 可为长江经济带和洞庭湖生态经济区建设提供科学决策参考, 助力实施“生态优先、绿色发展, 守护好一江碧水”可持续发展战略。“绿水青山就是金山银山”理论, 在湖南洞庭湖区就表现为江湖碧水的守护。气象人无疑在这样的守护中肩负特殊使命, 本专栏的文章, 无疑交出了岳阳气象人给出的令人充满希冀的答卷。

目录

研究进展

- 76 彭洁, 蒋帅, 袁泉, 尹依雯: 东洞庭湖区水面气象站网的建立及2016—2018年数据特征及应用
- 84 王琪, 吴贤云: 近37年来湖南暴雨时空变化特征分析
- 89 许建伟, 彭保发, 郭蓉芳, 王夏青: 1960—2018年洞庭湖生态经济区极端气温和降水事件的变化规律
- 96 黄菊梅, 刘学, 李奇, 覃鸿, 向伟: 东洞庭湖湿地“观鸟气象指数”研究
- 99 蒋帅, 尹依雯: 洞庭湖地区一次持续性暴雨特征诊断分析
- 107 杨伟, 刘攀, 王威, 张巧明, 方阳: 东洞庭湖湖陆风特征分析
- 117 喻长建, 陈姣荣, 喻宇, 钟泽洲: 岳阳2015—2017年暴雨空间分布与天气形势特征分析
- 123 覃鸿, 刘学, 黄菊梅, 王波: 南湖富营养化与气象影响因子的关系研究
- 128 王威, 隋兵, 林南, 陈太龙: 基于Landsat遥感数据的洞庭湖面积变化研究
- 133 袁泉, 吴思雁, 肖平, 李奇: 利用区域自动站资料分析岳阳市城郊以及山区降水差异
- 138 许丽丽, 陈世文, 昌立伟: 岳阳市近30年城市气象灾害变化特征分析
- 141 昌立伟, 黄海波, 许丽丽, 李晶, 黄卓禹: 岳阳市冬季暴雪和一般性降雪条件对比分析

台站巡礼

- 147 向伟, 彭洁, 吴劼远, 王威: 岳阳百年气象站在长江经济带发展中的历史作用探究

洞庭湖气象生态服务：过去、现在和未来

■ 彭洁 王彩 覃鸿

(湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000)

作为我国最大的内陆湖泊湿地生态系统之一,洞庭湖湿地具有极为重要的生态功能和经济价值,在全球气候变化的大背景下,洞庭湖生态受到多方面的影响,洞庭湖生物多样性保持、湿地气候调节、洪涝调蓄能力等均面临着挑战。通过分析过去70年洞庭湖湿地气候(图1)、水文与生态系统发展变化背景,梳理了围绕洞庭湖生态保护和修复开展气象服务的技术路线和服务成果,并展望了卫星遥感技术在洞庭湖湿地生态修复气象服务中的前景。

1 挑战

新中国成立以来,洞庭湖区经济快速发展的同时也引发了系列的环境问题,主要表现为湖泊面积急剧下降,1949年洞庭湖湖泊面积为4350 km²,到2000年时下降为2560 km²,减少了41.15%;水质及空气污染加剧,地表水逐步下降到III~IV类水平;生物多样性锐减,许多珍稀鸟类和名贵鱼种大量减少甚至灭绝,部分水域沉水植物逐步消亡;血吸虫疫情反复等。在全球气候变暖的大背景下,气象因子对洞庭湖生态环境变化的作用主要体现在极端水旱灾害频发、环境污染加重、生物多样性减少等方面,洞庭湖生态保护和修复对气象服务提出了要求。

2 生态气象服务的技术路线和成效

20世纪60—70年代,一批高污染的工业项目落户长江沿线和洞庭湖区域,岳阳市气象部门开始针对洞庭湖区域环境调查、环境质量报

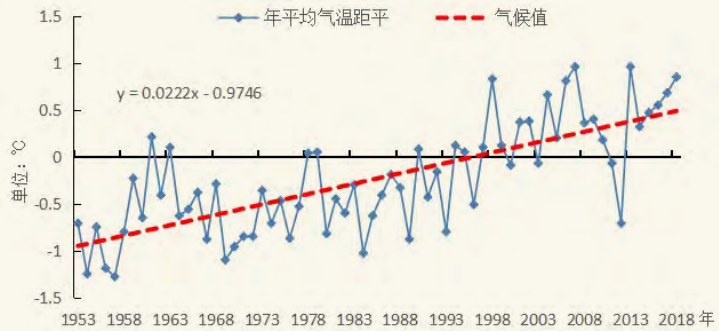


图1 1953—2018年洞庭湖区气温距平变化曲线

告评审、重大项目环境影响评价及气候可行性论证等方面开展研究和技术服务(图2)。主要采取实地调查及设立临时气象观测站的方式(图3),采集相关数据,通过线性回归、分类统计、时间序列和周期分析等方法为炼油、化工、造纸等重污染企业提供技术评审和气候可行性论证。

洞庭湖生态环境的持续恶化,催生了新的探测手段和方式(图4),推动了气象生态服务的发展,2003年开始,在国家基本气象监测站网的基础上,环洞庭湖流域的区域自

动气象站、农田小气候站、气溶胶站、闪电定位仪、大气电厂仪、水上气象站、城市内涝站、通量梯度观测塔(图5)逐步完成布局,在结合气象和环境监测数据研究的基础上,建立面向服务对象的专业数据库,对气象和非气象数据进行信息化处理,通过模式分析和格点预报处理等方法,建立针对不同预报对象的预报预警模型,运用GIS等方法,采用客户端和服务端分离模式,为洞庭湖区域城市内涝、空气质量、水陆交通安全、湿地生物多样性评估、中国天然氧吧和夏季避



图2 1971年气象员在岳阳化工总厂施工地开展逆温层探空观测



图3 1981年气象人员在夏船上手持观测仪器进行水面气象观测

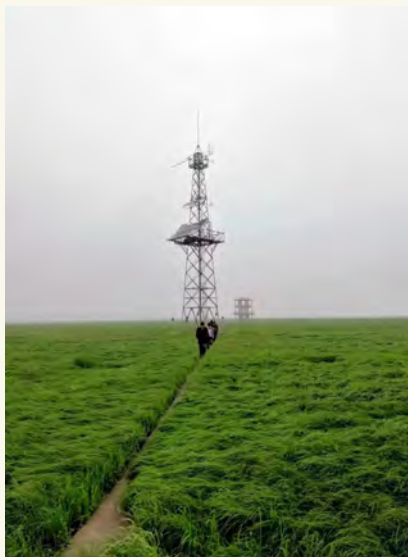


图4 综合立体气象监测站网



图6 内涝、空气质量、水上平台系统主页面

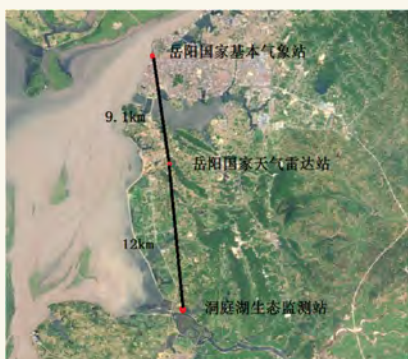


图7 岳阳国家气候观象台一站三址布局图

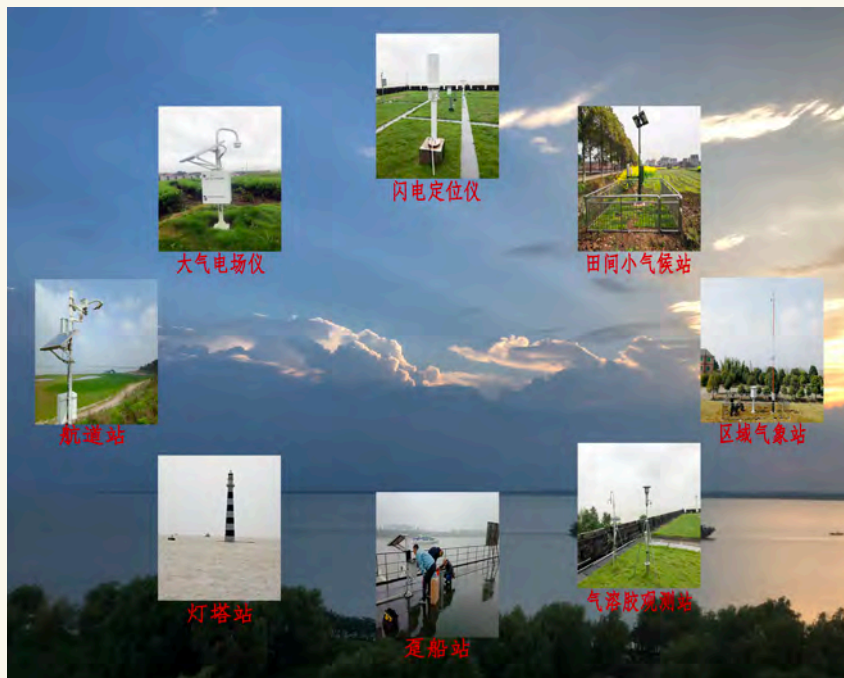


图5 洞庭湖腹地通量梯度观测塔

暑旅游胜地创建等开展卓有成效的服务(图6)。

3 未来发展展望

2019年成立的岳阳国家气候观象台(图7)以洞庭湖生态气象观测及高分卫星遥感地面校验为重点开展建设,遥感技术的应用为生态气象服务提供了新的技术支持,有关湖泊面积变化、水质和植被、水旱发展趋势监测的遥感产品将为

洞庭湖生态保护和修复提供科学依据。通过卫星遥感湖泊水体监测洞庭湖水体面积可见,2019年洞庭湖区域的严重干旱导致洞庭湖面积急剧下降,9月23日05时洞庭湖水体(裸水)面积为829.89 km²(图8),较7月3日14时洞庭湖水体(裸水)面积1847 km²减少了1017.11 km²,减少比例为55%,客观地说明了长时间干旱少雨给洞庭湖生态造成的影响。



图8 2019年9月23日FY-3D/MERSI洞庭湖水体(裸水)监测图

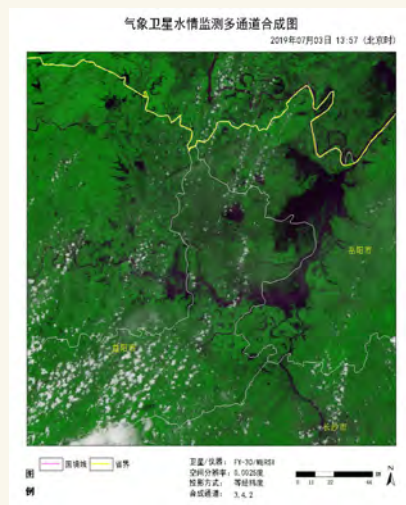


图9 2019年7月3日FY-3D/MERSI洞庭湖水体(裸水)监测图

图看岳阳气象的百年发展脚步

■ 何筱仙 向伟 周静 杨伟 李蜀湘
(湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000)

测百年气象 观洞庭风云

洞庭天下水, 岳阳天下楼。在洞庭湖和岳阳楼之间, 一个气象观测站静静矗立, 记录着洞庭湖区的潮涨潮落、风云变幻, 这就是岳阳国家基本气象站。岳阳国家基本气象站是全国唯一建在大型水体附近、且观测资料时间跨度逾百年的气象观测站。



1938年

抗日战争爆发, 测候所的日常观测随之中断。



1909—1912年岳州气象月总簿

1953年

“八一”转建命令后, 开始转化为既为国防航空服务, 又为地方经济服务的政府建制, 站名改成岳阳县气象站。

1954年

3月, 岳阳县气象站扩充为气象台。

1955年

4月, 正式发布24小时天气预报。



20世纪50年代观测员用风向风速计记录风的数据

1909年

1909年, 英国人在洞庭湖和长江交汇处的城陵矶岳州海关内设立测候所, 这便是岳阳气象站的前身。当时的观测要素主要为温度、湿度、风等, 每天8次观测, 主要为来往长江的货船提供天气信息。



1909年测候所旧址

1952年

1952年, 新中国气象部门重新选址, 在距原海关测候所7 km处建立岳阳观测站, 观测工作得以重新启动。



1954年建站初期的模样

2010年

2010年4月，岳阳新一代天气雷达调试完成。新一代天气雷达自运行以来被广泛应用于天气监测预警工作中，能实时、精准的获取230 km范围内的气象要素的时空分布信息，进一步提高岳阳市天气预报的准确率，特别是增强对暴雨、大风、冰雹等强对流天气的监测、预报和预警能力，为全市经济社会发展提供更加有效、优质的气象服务。



岳阳市新一代天气雷达全景图

洞庭湖水体变化卫星遥感图

气象卫星的成功发射，大大推动的遥感技术的发展。遥感技术在天气气候、大气监测、灾害监测等方面发挥了重要作用。通过卫星遥感全国主要江河、湖泊水体监测分析洞庭湖水体面积，2016年洞庭湖与近10年同期平均值相比增大约33.8%，与1998年同期相比水体面积增大约3.2%。



2020年

截至2020年1月，岳阳全市共有6个国家级气象观测站，1个天气雷达站，232个区域自动气象站以及12个水上气象站。这给岳阳区域内灾害性天气监测预报提供了十分重要的气象数据。完善的中小尺度天气监测网，在岳阳的决策气象服务中发挥了重要的作用。



岳阳市气象综合站网分布图

2018年

2018年2月，中国气象局授牌的全国首批“中国百年气象站”落户岳阳国家基本气象站。

岳阳国家基本气象观测站被省科技厅授予“湖南省科普基地”称号。



百年老站揭牌仪式现场



岳阳市气象科普馆

1963年

岳阳观测站被中央气象局定为国家基本气象站。



20世纪60年代观测员正在记录观测要素

在湖南省局支持下开展水上交通安全气象预报预警技术研究，建成了水上安全气象服务平台在海事部门运行，最大程度降低了岳阳境内气象灾害导致的水上交通事故风险。



岳阳市水上安全气象保障平台系统



岳阳市气象科普馆开放启动仪式

东洞庭湖区水面气象站网的建立及 2016—2018年数据特征及应用

彭洁 蒋帅 袁泉 尹依雯
(湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000)

摘要: 利用东洞庭湖区域水上交通气象站和国家观测站2016—2018年的观测资料, 分析了东洞庭湖水域和陆地的气象特征及差异, 结果表明: 水上站和陆地站的气温和相对湿度季节变化规律基本一致, 但水上站气温峰值和谷值出现时间均较陆上站滞后1 h左右; 水陆高低温差异存在较为明显的季节规律; 陆地站风速大值主要出现在4、5月, 水上站除此之外还出现在1、10月, 陆地站风速日变化较水上站更明显。水上站6、7月主导风为偏南风, 其他月为偏北风。水上站灾害性大风以6、7级偏北大风为主, 8、9级大风相对较少, 其中出现频率最高的是磊石站, 最少的是青港站。水上大雾(霾)日数明显少于陆地, 但轻雾日数略多于陆地, 水上大雾(霾)多出现在03—11时, 一天中07—08时出现大雾(霾)的概率最高。

关键词: 东洞庭湖区, 水上交通气象站, 水陆差异

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.012

Meteorological Differences Between Land and Water in the East Dongting Lake

Peng Jie, Jiang Shuai, Yuan Quan, Yin Yiwen
(Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000)

Abstract: The meteorological characteristics and differences of land and water in east Dongting Lake were analyzed using data of water traffic stations along east Dongting Lake and national stations from 2016 to 2018. The results showed that the seasonal changes of air temperature at the water and land stations were basically same, but the peak and valley of air temperature at the water stations were about 1 hour behind the land stations. The difference of high and low temperature between land and water changed obviously with season. The large value of wind speed at the land stations mainly appeared in April and May, and the water stations also appeared in January and October. The daily variation of wind speed at the land stations was more obvious than that at the water stations. The dominant wind in the water stations was slant South wind in June and July, and was slant north wind in other months. Disaster wind on water was mainly associated with levels 6 and 7 north wind, and relatively less with levels 8 and 9 wind. The frequency of disaster wind was the highest at Leishi Station, and the least at Qinggang Station. The number of days of water heavy fog (haze) was significantly less than that of land, but the number of days of light fog was slightly more than that of land. Water fog (haze) mostly occurred between 03:00 and 11:00 BT, and the probability of fog (haze) was the highest between 07:00 and 08:00 BT.

Keywords: Dongting Lake, water traffic station, land and water difference

0 引言

洞庭湖是我国第二大淡水湖, 其中东洞庭湖约占洞庭湖60%的水域面积, 全部位于湖南省岳阳市境内, 湖南境内主要水系汇入东洞庭湖后由城陵矶流入长江, 由于该区域内湖内河及港汊众多、下垫面复杂, 导致局地小气候明显, 多暴雨、雷电、大风、大雾等灾害性天气发生。近年来, 由于岳阳市航运物流

及水上旅游行业的迅速发展, 因恶劣天气引发的水上安全事故频发。据不完全统计, 2012年以来, 复杂天气条件下在东洞庭湖至湘江湘阴段水域发生水上交通事故多达32起。由于水上监测设备和预警信息发布手段的缺乏, 恶劣天气导致水上交通事故后, 往往造成严重的生命财产损失。如2012年2月2日, 湖北监利666号运砂船在途经汨罗、岳阳县交界水域时遭遇大风, 发生侧翻, 1人死亡, 10人失踪。2015年6月1日21时30分左右, 隶属于重庆东方轮船公司的“东方之星”大型客轮, 在从南京驶往重庆途中突遇狂风暴雨

收稿日期: 2019年8月20日; 修回日期: 2019年11月28日
第一作者: 彭洁(1974—), Email: 378948922@qq.com

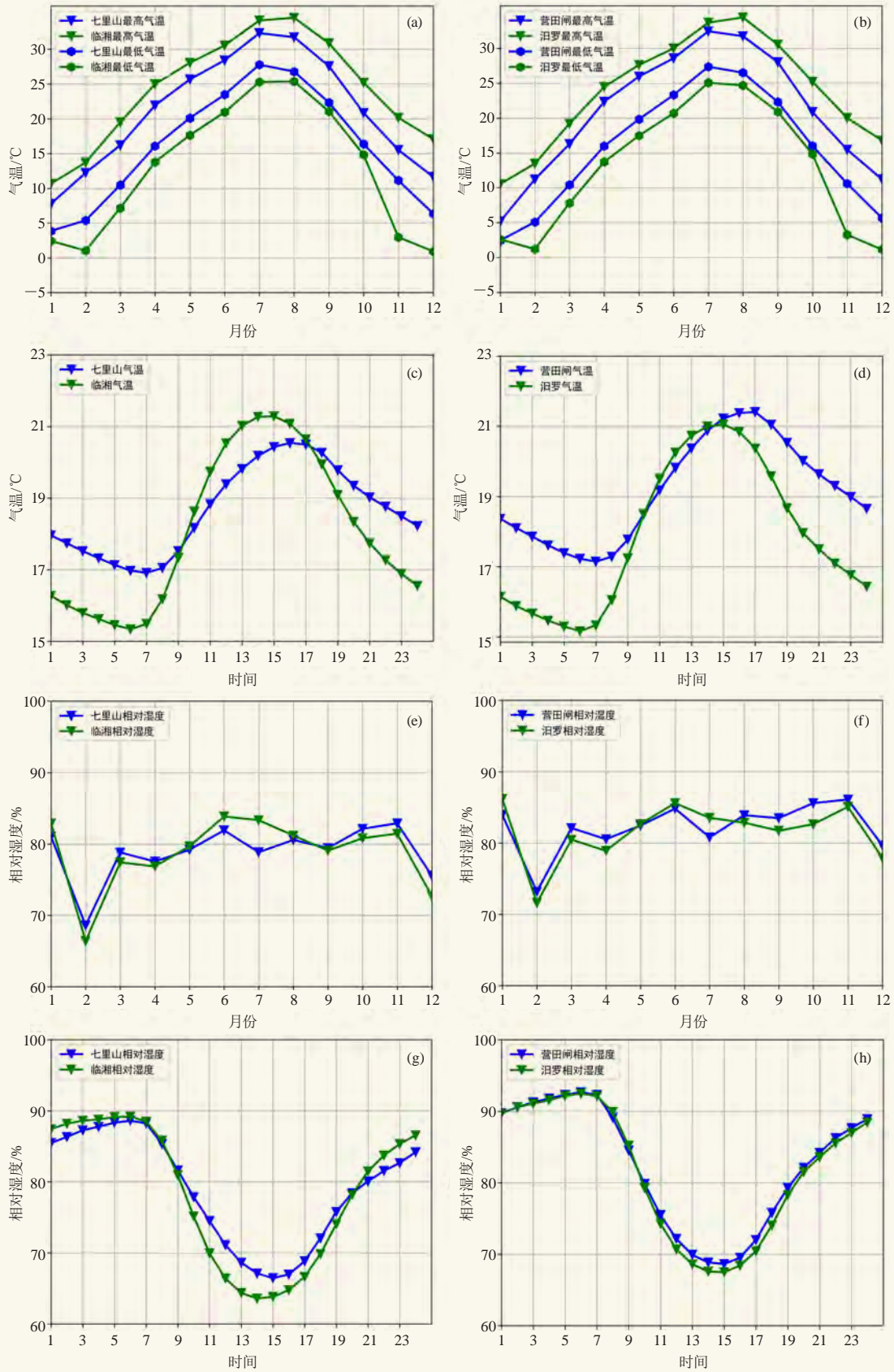


图2 气温(a~d)和相对湿度(e~h)月(a, b, e, f)、日(c, d, g, h)变化曲线

Fig. 2 Monthly (a, b, e, f) and diurnal (c, d, g, h) variation curves of temperature (a ~ d) and relative humidity (e ~ h)

季白天水上航行人体感觉更冷。从气温日变化情况来看(图2c、2d),水上站点最高气温出现时间主要集中在16时左右,最低气温出现在07时左右,而同一纬度的临湘站的最高气温主要出现在15时左右,最低气温出现在06时左右,汨罗和营田闸也具有相同特征。可见与陆地相比,水面上每日最高、最低温度出现时间均延后1 h左右。这主要是因为洞庭湖作为大型水体比热容大,具有良好的“保温”效应,对大气辐射升降温反映较陆地上缓慢,导致日高低温出现时间延迟且气温日较差较小。

从相对湿度变化来看(图2e~2h),水上站与陆地站变化规律一致,但除6、7月外,水上站相对湿度都高于陆地站点。从相对湿度差异来看,夏秋季节差异较大,冬春季节较小。从相对湿度的日变化来看,白天水上站相对湿度高于陆地站,夜间二者相对湿度接近或陆地稍高于水上,也是导致夏季水上更加湿热(闷热湿),冬天水面更加湿冷重要原因。

2.2 水陆气温差异

为了对比高低温水陆站点差异,计算了水上站与国家站的高低温差值(表略),发现水陆高温差异存在较为明显的季节规律性。总体来看,1—9月水陆高温差异在2~3℃,最小的是2月和7月,高温差在1~3℃,10月开始,水陆高温差异开始明显增大,陆地上高温比水上高温偏高4~5℃,12月两者差异达到最大,均在5℃以上。从最低温来看,水陆低温差异同样具有季节规律,1、3—10月水陆低温差异在0~3℃,最大的是11—12月,低温差值5~8℃,2月水陆低温差值次之,在3~5℃。

综上,水上站和陆地站的气温和相对湿度月变化规律基本一致,但水上站的气温日较差明显低于陆地站点,水上相对湿度较陆地更大,且气温峰值和谷值出现时间均较陆上站滞后1 h左右;水陆高低温差异存在较为明显的季节规律性,1—9月水陆高温差异较小(2~3℃),最大为10—12月(4~6℃);从最低温来看,1、3—10月较小(0~3℃),最大的是11—12月(5~8℃),2月次之(3~5℃)。

3 水面与陆地风向风速特点

瞬时大风是影响水路交通的重要因素,气象观测的每日极大风速即每日最大的瞬时大风,极大风向风速具有瞬时特征,本文着重分析水上极大风向风速特点及与陆地的差异。

3.1 水上风向风速特点及与陆地站点差异

从逐月水上风的变化情况(图3),可以看到,每年1、5、10月是一年中风力最大的季节。从空间分

布情况来看,其中洞庭湖中部的磊石站风速明显较其他水上站的风速偏大,是整个东洞庭湖最容易出现大风天气的站点,年平均风速为5.9 m/s,其极大风大值主要出现在1、5月以及10—11月,青港站是风力最小的站点,年平均风速为3.6 m/s。磊石站位于湘江大堤东岸,正处于洞庭湖区域汨罗江到湘江的入口处,两侧地势高,站点处地势低,由于“狭管加速效应”导致该地常年风速均大于其他水上站,而青港站位于湘江大堤之下,处于背风区,因此常年风速偏小。

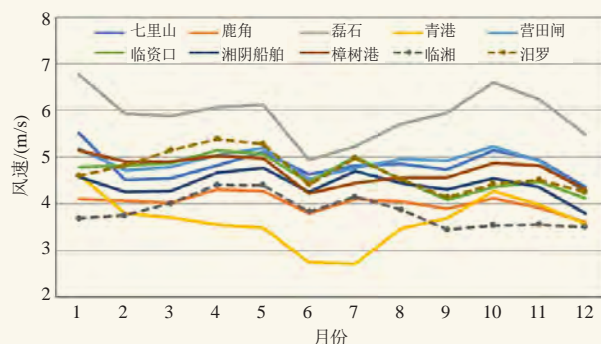


图3 水上站和国家站逐月风速变化曲线
Fig. 3 Monthly wind speed variation curve of water stations and national stations

洞庭湖地区属于亚热带季风气候区,风向风速具有明显的季节变化特征。为了更清晰分析水陆差异,挑选了水上站七里山、营田闸,国家站临湘、汨罗。从图4可以看到,洞庭湖区域山区和平原的极大风季节变化呈现双峰型曲线,峰值常出现在每年4、5、7月。而水上极大风的季节变化则呈现出多峰型特征,峰值分别出现在1、5和10月。究其原因^[6],4、5月为春夏之交的大气环流转换季节,冷暖空气频繁交汇,洞庭湖区域此时段出现的大风不仅包括了地面气旋大风、冷空气大风,而且常有强对流带来的雷暴大风,这是包括水上和陆地的洞庭湖区春夏之交风力偏大的重要原因。此外由于水上站特殊下垫面影响,初秋由于变性冷气团影响增多,水面摩擦小导致极大风速较陆地偏大,隆冬季节极涡南下频繁,冷空气强盛,多冷空气大风出现,这就导致水面的极大风峰值除了春夏之交以外还常常出现在10和1月。水上极大风的日变化规律和陆地呈现相同变化特点,但国家站日变化更为明显。从图4c和4d可以看到,01—07时风速变化不明显,白天随着温度升高,风速逐渐加大,日最大值出现13—15时,17—23时缓慢下降,最低出现在23—01时。

为分析水上各月风向特点,以磊石站为例制作极大风风向风速玫瑰图,玫瑰图分为16个方位,依据不同风力分0~9级(不同颜色表示)。从图5可以

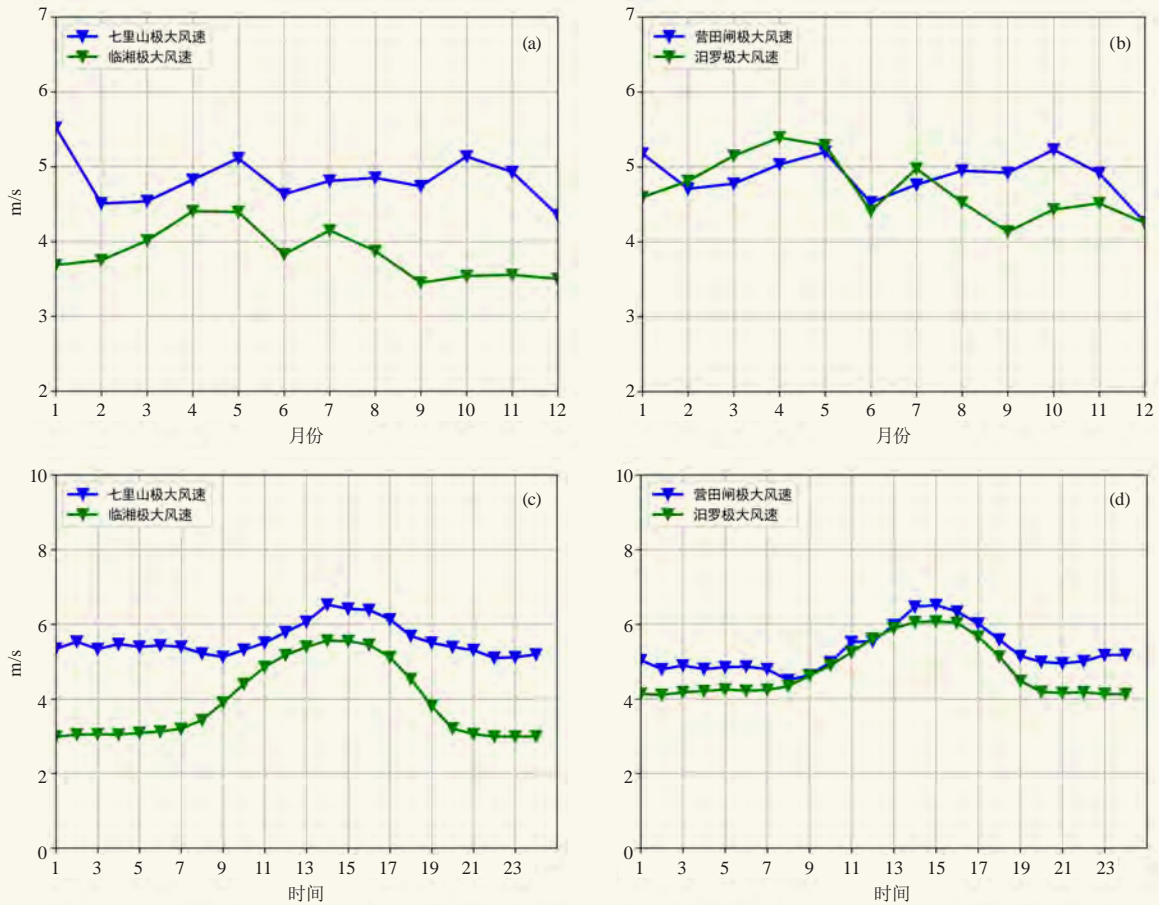


图4 水上站 (a, c) 和同纬度陆地站 (b, d) 的风速月 (a, b)、日 (c, d) 变化曲线

Fig. 4 Monthly (a, b) and daily (c, d) variation curves of wind speed of water station (a, c) and land station (b, d) of the same latitude

看出, 冬季 (12月—次年2月) 水上极大风以N风为主, 占比均在30%以上, 其次为NNE风、NNW风, 其中1月极大风为N风出现的比例最高, 达45.3%。春季 (3—5月) N风逐渐减弱, 占比在25%~30%, SE风逐渐加大。夏季 (6—7) 月N风进一步明显减弱, 占比在15%~18%, S风逐渐增强, 主导风向变成SSE风 (占比21.4%)。8月后冷空气南下频次开始增多, 受其影响极大风北风增多, 南风显著较弱。秋季 (9—11月) 主要受到N风、NNE、NNW风影响, 偏S风较弱。综上, 水面上除夏季 (6—7月) 主导风为S风、SSE风外, 其他月主导风均为偏N风为主。从风力等级分布来看, 0~4级风力在各方位均有体现, 但5级以上, 尤其是6~9级以上大风主要出现在偏北方位。

3.2 灾害性的大风特点

瞬时大风的准确预报预警是保障东洞庭湖区水运交通安全的基础, 气象学上6级风风力为10.8~13.8 m/s, 7级风风力为13.9~17.1 m/s, 8级风

风力为17.2~20.7m/s, 9级风风力为>20.8 m/s。为了对比分析各站出现灾害性大风风速频率和方向, 分不同方向和等级统计2016—2018年水上站逐小时大风频次 (表1、表2)。洞庭湖地区灾害性大风最易出现在N方向 (70.5%), 其次依次为NNE (10.5%), NE (0.4%), 其他风向上出现的相对较少。从站点差异来看, 磊石出现灾害性大风最多, 共出现灾害性大风2909时次, 其次依次为营田闸、七里山、樟树港、临资口、湘阴船舶、青港、鹿角 (表2)。此外, 水上站灾害性大风以6、7级大风为主, 8、9级相对较少。

综上, 陆地站极大风大值主要出现在4、5月, 水上站除此之外还出现在1、10月; 水上极大风的日变化规律和陆地呈现相同变化特点, 但国家站日变化更为明显, 最大值出现在13—15时, 最小风速均出现23—01时; 风向来看水上站除6、7月主导风为S风或者SSE风外, 其他月主导风均为偏N风为主。全年各月均有>6级以上的灾害性大风出现, 主要以N风为主, 灾害性大风出现频率最高的是磊石站, 其次依次

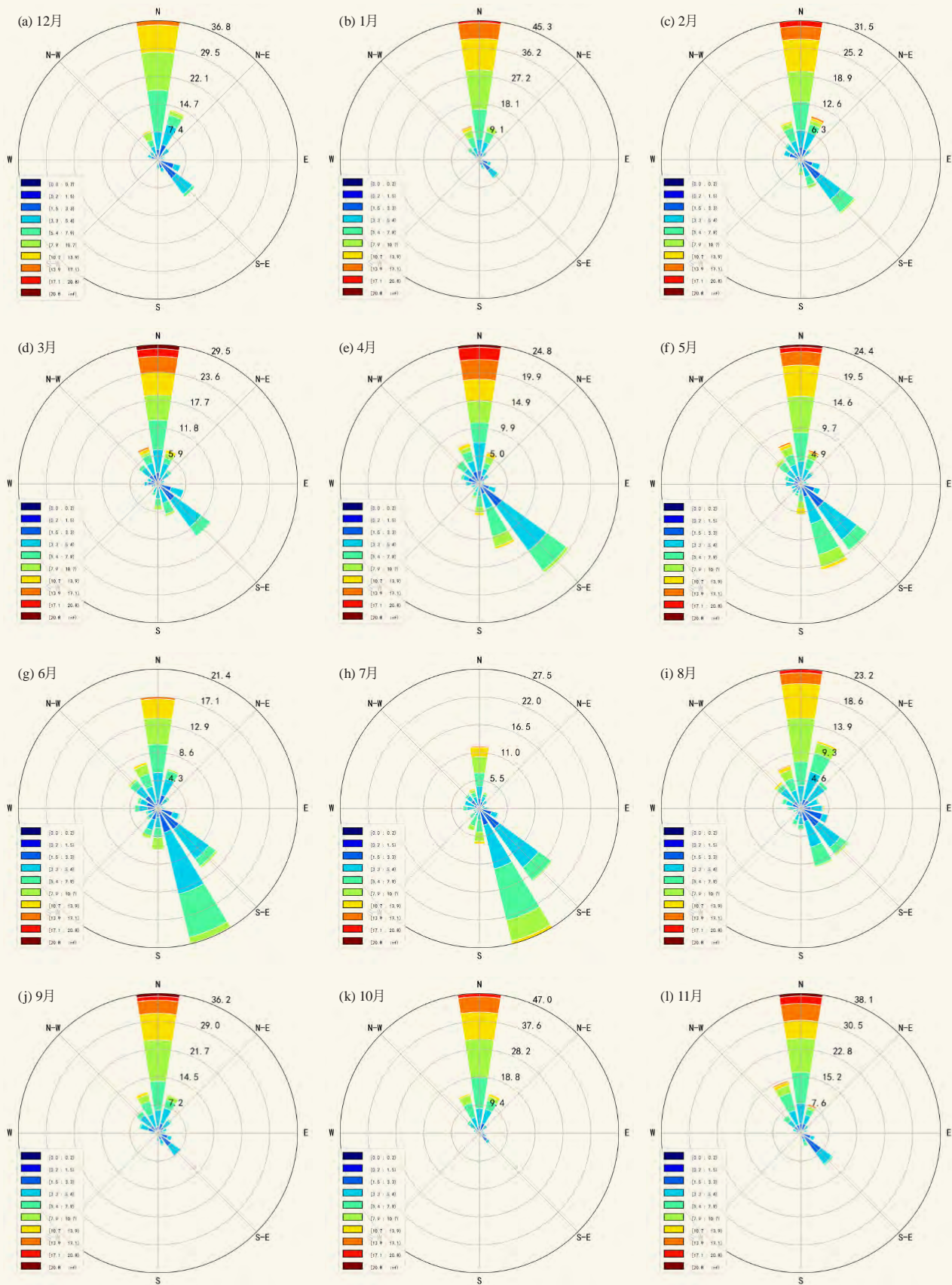


图5 磊石站1—12月极大风玫瑰图

Fig. 5 Rose chart of extreme wind at Leishi Station from January to December

表1 2016—2018年水上站不同风向灾害性大风频次统计（16个风向）

Table 1 Statistics on the frequency of catastrophic winds of different wind directions in water stations from 2016 to 2018 (16 wind directions)

站点	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	站点	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
七里山	423	265	3	0	0	1	3	8	七里山	58	34	9	0	2	2	0	46
鹿角	115	39	1	1	3	0	1	0	鹿角	3	12	1	0	1	0	0	4
磊石	2442	128	8	0	5	3	6	39	磊石	49	3	2	1	1	2	22	198
青港	210	47	6	0	0	2	1	0	青港	0	0	0	0	0	3	4	36
营田闸	513	116	0	6	5	1	2	1	营田闸	54	34	1	5	0	5	12	190
临资口	341	76	4	6	3	1	2	15	临资口	132	27	3	5	1	0	5	74
湘阴船舶	355	24	0	0	0	0	0	11	湘阴船舶	59	11	0	1	1	2	1	66
樟树港	769	57	6	2	0	1	7	3	樟树港	9	3	2	2	2	3	5	43

表2 2016—2018年水上站不同等级风力灾害性大风频次统计
Table 2 Statistics on the frequency of catastrophic winds of different wind scale in water stations from 2016 to 2018

站点	6级	7级	8级	9级	总和/次	平均风力/(m/s)
七里山	708	131	14	1	854	12.5
鹿角	170	11	0	0	181	11.9
磊石	1770	810	255	74	2909	13.8
青港	293	15	0	1	309	12.0
营田闸	765	162	16	2	945	12.5
临资口	582	110	2	1	695	12.4
湘阴船舶	446	81	2	2	531	12.3
樟树港	672	196	42	4	914	13.0

为营田闸、七里山、樟树港、临资口、湘阴船舶、青港、鹿角。从灾害性大风等级分布来看，水上站灾害性大风以6、7级大风为主，8、9级大风相对较少。

4 水面能见度特点

4.1 水上能见度特征

低能见度是影响水上交通安全的重要指标^[7]，是除了大风之外导致安全事故的主要气象因素，这里以七里山和营田闸水上站为代表，由于2017—2018年水上能见度资料缺测较多，这里以2016年资料进行统计。

从月际分布来看（图6），冬春季节是一年中能

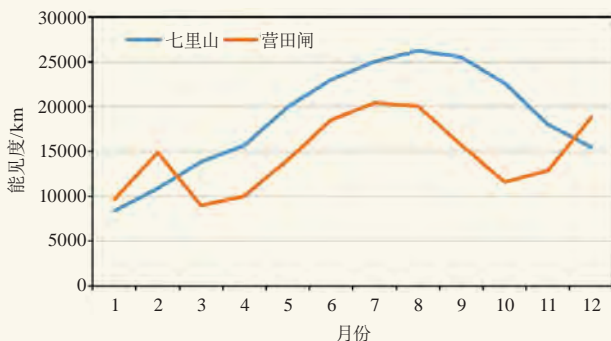


图6 月平均能见度变化曲线

Fig. 6 Monthly average visibility curve at Qilishan and Yingtianzha stations

能见度较低的时期，最低出现在1月，夏季能见度相对较好，7—9月达到峰值，秋冬季节能见度降低。这里以能见度<1.0 km作为一个大雾（霾）日数，以能见度<10.0 km作为一个轻雾日数，统计数据见表3。七里山站一年中共出现大雾（霾）日12 d，其中4月出现最多（4 d），该站共出现轻雾日286 d，其中8—9月轻雾出现日数最少，为18 d，其他月均在22 d以上。营田闸站一年中共出现大雾（霾）日26 d，同样4月出现最多（5 d），其次是1月、7月各出现4 d，9月没有出现大雾（霾）天气，该站共出现轻雾日298 d，11—12月轻雾日数相对较少，轻雾没有明显的季节差异。总体来看，东洞庭湖水域大雾发生次数春季最多，冬季次之，夏季最少。而轻雾则一年四季均有发生，并没有明显的季节差异。

经统计（图7），东洞庭湖水域出现的大雾均发生在夜间至上午，多出现在03—11时，一天中07—08时出现大雾（霾）的概率最高。日出后，由于水面气温上升，大雾多数在11时以后消散。大雾持续出现1~3 h的情况居多，以营田闸站2016年为例，26个大雾日中共有20次（约占总数的77%）大雾持续时间不超过3 h；持续时间在4~7 h的有4次（约占总数的15%）；超过8 h的仅有2次（约占总数的7%）。

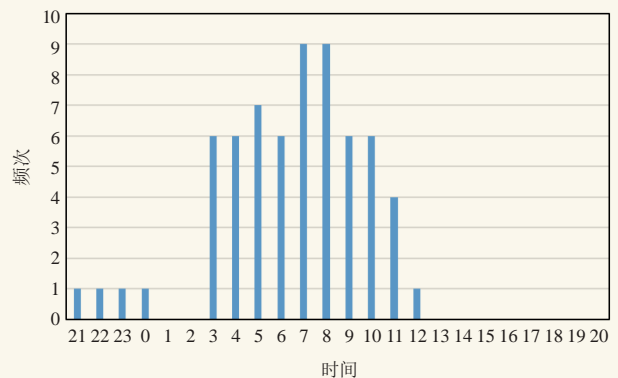


图7 2016年营田闸站大雾出现时间频次

Fig. 7 Frequency of fog in 2016 at Yingtianzha Station

4.2 水陆能见度特征差异

从七里山与临湘、营田闸与汨罗站对比看，水上大雾出现的概率远小于陆地，但轻雾出现概率较陆地略偏大。以2016年为例（表3），水上出现大雾（霾）的比例只有山地的32%、平原的38%。尤其是秋冬季节水面的大雾（霾）比陆地上明显偏少，这种现象在11—12月表现尤为突出。分析原因大雾（霾）的成因不仅与天气条件有关，同时也与空气中的颗粒物多少有关，一般情况下水面风力较大，生成大雾（霾）的静稳条件难以达到，而冬季陆地上大气污染严重，凝结核丰富，风力由于摩擦系数大于水面，风力较小，利于水汽和凝结核结合形成雾。而水上出现轻雾的比例与陆地相仿，甚至略高于陆地，这是因为轻雾的形成主要与湿度条件相关，水面上常年湿度较陆地大，因此轻雾出现日数略高于陆地。

表3 2016年水陆大雾及轻雾日数对比
Table 3 Comparison of days of fog and light fog

月	月大雾日数/d				月轻雾日数/d			
	临湘	七里山	汨罗	营田闸	临湘	七里山	汨罗	营田闸
1月	5	1	9	4	22	23	20	23
2月	4	1	3	3	21	23	21	22
3月	1	0	7	4	30	30	24	30
4月	5	4	9	5	23	25	21	30
5月	2	0	2	1	22	22	29	27
6月	2	0	1	0	22	25	24	23
7月	4	4	4	4	17	24	24	24
8月	0	0	4	1	30	19	27	22
9月	0	0	2	0	28	18	28	26
10月	1	0	3	3	29	29	28	30
11月	8	1	11	0	21	23	19	21
12月	6	0	14	0	24	25	16	20

5 结论

1) 水上站和陆地站的气温和相对湿度月变化规律基本一致，但水上站的气温日较差明显低于陆地站点，水上相对湿度较陆地更大，水上站和陆地站的气温年变化规律基本一致，且气温峰值和谷值出现时间均较陆上站滞后1 h左右；水陆高低温差异存在较为明显的季节规律性，1—9月水陆高温差异较小（2~3℃），最大为10—12月（4~6℃）；从最低温来看，1月、3—10月较小（0~3℃），最大的是

11—12月（5~8℃），2月次之（3~5℃）。

2) 陆地站极大风大值主要出现在4—5月，水上站除此之外还出现在1、10月；水上极大风的日变化规律和陆地呈现相同变化特点，但国家站日变化更为明显，最大值出现在13—15时，最小风速均出现23—01时；风向来看水上站除6、7月主导风偏南风外，其他月主导风均为偏北风。全年各月均有>6级以上的灾害性大风出现，主要以N风为主，灾害性大风出现频率最高的是磊石站，其次依次为营田闸、七里山、樟树港、临资口、湘阴船舶、青港、鹿角。从灾害性大风等级分布来看，水上站灾害性大风以6、7级大风为主，8、9级大风相对较少。

3) 水上大雾出现的概率远小于陆地，而轻雾出现概率较陆地略大，其中大雾（霾）日数仅为陆地的30%~40%，尤其是秋冬季节水面的大雾（霾）比陆地上明显偏少，在11—12月表现尤为突出；冬春季节是水上能见度较差的时期，1—3月能见度相对较低，最低出现在1月，夏秋季能见度相对较好，7—9月达到峰值，最高出现在8月。水域出现的大雾均发生在夜间至上午，多出现在03—11时，一天中07—8时出现大雾（霾）的几率最高。

水陆气象条件的差异导致水面上高影响灾害性天气预警指标较陆地有所不同，其中高低温、风力、能见度预警阈值均较陆地偏低，说明灾害性天气对水上交通事故的影响较陆地更为明显。本文基于现有的水上站资料分析了水陆站点气象条件差异，具有一定的现实参考价值，但考虑到样本资料时间较短，以上差异指标在今后实际情况中需不断修正完善。

参考文献

- [1] 蔡荣辉, 姚蓉, 黄小玉. 洞庭湖区域雷暴大风分型及预报分析研究. 气象, 2017, 43(5): 560-572.
- [2] 廖春花, 郭海峰, 孙建美. 湖南省水上交通事故特征和天气影响因素分析. 湖南交通科技, 2018(12): 182-185.
- [3] 程宏林, 王才宝, 洪贞铨. 江苏内河航运交通事故气象条件分析. 气象, 1996, 22(12): 51-53.
- [4] 姜丹. 三峡库区复杂天气条件下船舶航行安全风险预警等级研究. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [5] 罗红梅, 向毅, 李学敏. 湖南省水上交通主要航道气象灾害风险普查技术研究. 科技创新导报, 2018(9): 133-136.
- [6] 朱浩, 陈娇荣, 王威. 东洞庭湖区大风灾害及其对水上交通安全的影响. 科技与创新, 2014(23): 95-96.
- [7] 虞俊, 王遵娅, 张强. 长江三峡库区大雾的变化特征分析及原因初探. 气候与环境研究, 2010, 15(1): 97-105.

近37年来湖南暴雨时空变化特征分析

王琪¹ 吴贤云²

(1 湖南省气象服务中心, 长沙 410108; 2 湖南省气候中心, 长沙 410108)

摘要: 利用湖南97个气象站1981—2017年逐日降水资料, 采用线性趋势分析、集合经验模态分解(EEMD)等方法, 分析了湖南近37年来年暴雨和大暴雨日数、强度、贡献率等气候特征。结果表明, 近37年来, 湖南年平均暴雨日数在地理上总体呈北多南少的分布。最大值出现在湘中一带, 有两个中心, 分别位于南岳高山站(暴雨为6.95 d; 大暴雨为1.19 d)和安化(暴雨为6.10 d; 大暴雨为1.16 d); 最小值出现在湘西南的怀化城步(暴雨为2.40 d; 大暴雨为0.11 d)。湖南年暴雨与大暴雨日数、强度及对降水的贡献率自1981—2017年均呈显著上升趋势, 暴雨与大暴雨日数的2~3年、4~8年周期变化性质明显, 且近些年来, 有变化频率加快的趋势。

关键词: 暴雨, 湖南, 气候特征, EEMD

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.013

Climate Characteristics of Rainstorm in Hunan in the Last 37 Years

Wang Qi¹, Wu Xianyun²

(1 Hunan Meteorological Service Center, Changsha 410108 2 Hunan Climate Center, Changsha 410108)

Abstract: Based on daily precipitation of 97 meteorological observation stations in Hunan Province, statistical diagnostic analyses on annual rainstorm days and heavy rainstorm days over past 37 years (1981-2017) were performed by using several methods, such as linear trend analysis, EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition). Results show that, generally, the spatial distribution of the annual-averaged rainstorm days had a decreasing trend from north to south, with two distinct high-value centers, one being in Nanyue Station (6.95 days of rainstorm and 1.19 days of heavy rainstorm), the other in Anhua and its surrounding areas (6.1 days of rainstorm and 1.16 days of heavy rainstorm). The lower values appeared in southwest part of Hunan, with the minimum center in Chengbu county (2.4 days of rainstorm and 0.11 days of heavy rainstorm). The rainstorm and heavy rainstorm days, intensities and their contributions to yearly rainfall had a increasing trend. Finally, the days of both rainstorm and heavy rainstorm had obvious 2-3 year and 4-8 year periodic variations, respectively, which tended to have an accelerating frequency in recent years.

Keywords: rainstorm, Hunan, climate characteristics, EEMD

0 引言

近年来, 许多学者对我国暴雨气候变化开展了广泛研究, 取得了大量科研成果。鲍名等^[1]研究表明, 长江流域暴雨呈增多的趋势, 华北暴雨却呈减少的趋势。孙杰等^[2]采用趋势分析、周期分析和突变检验等方法揭示了华中地区年降水量整体表现为增多的趋势, 但各站表现不一, 大部分站增多的趋势不明显。贺芳芳等^[3]研究表明, 上海1995年以来呈现暴雨强度增强、持续时间变短的变化趋势。朱宵峰等^[4]采用小波分析方法分析出长江下游地区汛期暴雨呈现增加的趋势, 并具有多重时间尺度的周期变化。白淑英等^[5]利用近50年的长江流域逐日降水资料, 分析了长江流

域年均暴雨日数时空变化特征, 指出长江流域暴雨变化具体区域性, 长江中下游大部分区域暴雨日数有增加的趋势。张天宇等^[6]对三峡库区气象站1961—2008年各气象要素的资料, 系统地分析了库区48年的气候变化特征, 并探讨了三峡水库的局地气候效应, 指出了局地地形对暴雨的影响较大。

众所周知, 暴雨的局地性较强, 由于受地型的影响, 往往存在一些暴雨易发地, 同时, 暴雨的变化特征在不同的区域差异较大, 有些区域出现暴雨频次增加, 有些区域却在减少, 加强这方面的研究, 对暴雨预报与暴雨灾害评估有着直接的指示作用。本研究主要是利用湖南现有的97个观测站资料, 分析湖南暴雨地域分布及其变化特征, 旨在为湖南暴雨预报提供有益参考。

收稿日期: 2019年5月26日; 修回日期: 2019年11月19日
第一作者: 王琪(1961—), Email: 104309296@qq.com

1 资料与方法

本文所用资料是经过质量控制了的湖南97个站点逐日降水量资料。资料的时段为1981—2017年。暴雨日数定义为日降水量 ≥ 50.0 mm的日数，大暴雨日数定义为日降水量 ≥ 100.0 mm的日数；平均暴雨强度定义为暴雨以上的降水量之和与暴雨日数之比；暴雨贡献率为暴雨以上降水量之和与同期降水总量之比。暴雨日数、平均暴雨强度、暴雨贡献率、暴雨以上降水量都分别形成年、雨季(MJJ)两个序列。

使用方法包括线性趋势分析、集合经验模态分解(EEMD)方法等。本文使用这些方法分析湖南近37年来暴雨日数的空间分布、暴雨日数变化特征、暴雨强度的变化特征及暴雨贡献率的变化特征。

2 暴雨日数的空间分布

暴雨日数是指日雨量 ≥ 50 mm的降水日数。图1

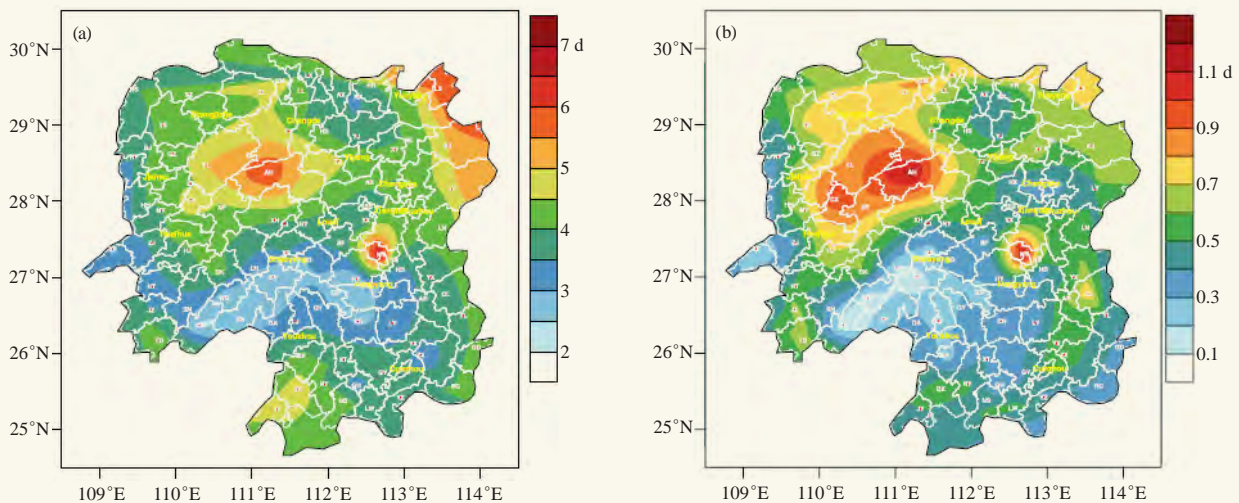


图1 1981—2017年湖南平均年暴雨日数(a)、大暴雨日数(b)的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of annual rainstorm days (a) and heavy rainstorm days (b) in Hunan (from 1981 to 2017)

3 暴雨日数的变化特征

3.1 暴雨日数的年际变化

图2为湖南年平均暴雨日数与大暴雨日数。从图2a可以看出，近37年来湖南平均暴雨日数为3.88 d，2002年最多(6.62 d)，1985年最少(2.27 d)。1981—2017年湖南暴雨稍有增多的趋势。20世纪90年代末期至21世纪初，是湖南暴雨显著增多的时期，在那段时期，湖南的年降水量也明显增多。由图2b可见，1981—2017年湖南的大暴雨也呈逐步上升的趋势。

3.2 暴雨日数的月变化

对1981—2017年湖南暴雨与大暴雨日数按月进

为1981—2017年平均年暴雨日数和大暴雨日数的空间分布图。湖南年平均暴雨日数为3.88 d，总体分布为北多南少，有三个暴雨日数大值区，最大值出现在南岳山(6.95 d)，第二个大值区出现在安化(6.10 d)，第三个大值区出现在湖南东北角岳阳临湘(5.70 d)，湖南西南部为少暴雨区，年暴雨日数在2.0~3.0 d，最少在邵阳城步(2.40 d)，最多与最少相差达4.55 d，湖南暴雨地区差异较为明显(图1a)。

湖南近37年来，大暴雨日数的空间分布(图1b)与暴雨分布大体相同，平均大暴雨日数为0.51 d，总体上也是北多南少，最多大暴雨日数出现在高山站南岳山站(1.19 d)，但范围比较小，第二个大值中心出现在益阳安化(1.16 d)，与其相邻的沅陵、辰溪的大暴雨日数也在1.0 d附近，这主要与湖南的地形影响相关。其小值区出现在湖南的西南部(邵阳城步，0.11 d)。湖南大暴雨的区域差异也比较明显。

行统计(图3)，可以发现，湖南的暴雨各月均可以发生，1—12月呈单峰型分布，6月发生的暴雨日数最多(1.02 d)，7月、5月次之(分别为0.72 d与0.64 d)，1月最少(0.01 d)，12月次之(0.03 d)，与湖南月降水的分布相似。湖南的大暴雨在冬季(12月一次年2月)没有出现过，发生最多的月份为6月(0.17 d)，7月次之(0.15 d)。

3.3 暴雨日数的周期分析

湖南暴雨主要发生在夏季，受季风活动影响很大，夏季季风活动具有较强的周期振荡特征，由此是否可以推测湖南暴雨也具有周期变化性质？降水演变具有非线性非平稳特征，这里采用EEMD方法分析湖

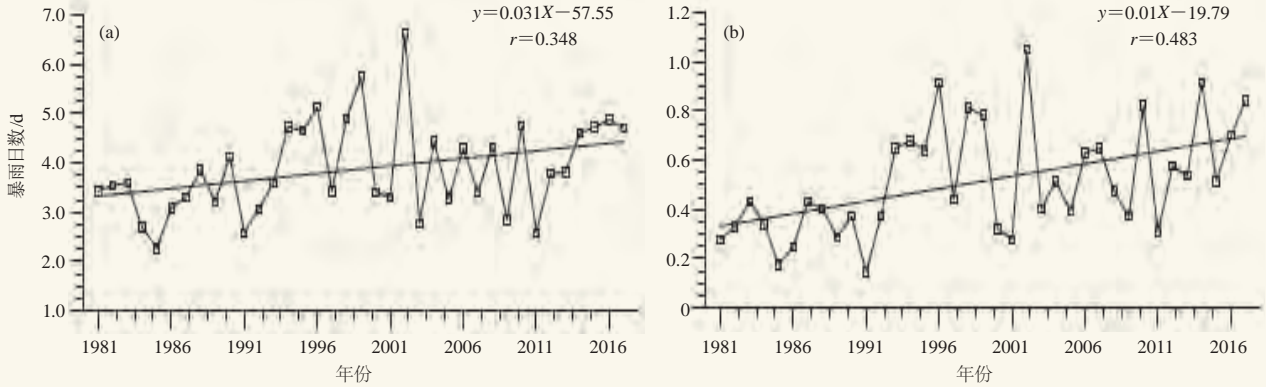


图2 湖南1981—2017年年平均暴雨日数 (a) 与大暴雨日数 (b)
Fig. 2 Annual days of rainstorm (a) and heavy rainstorm (b) from 1981 to 2017 in Hunan

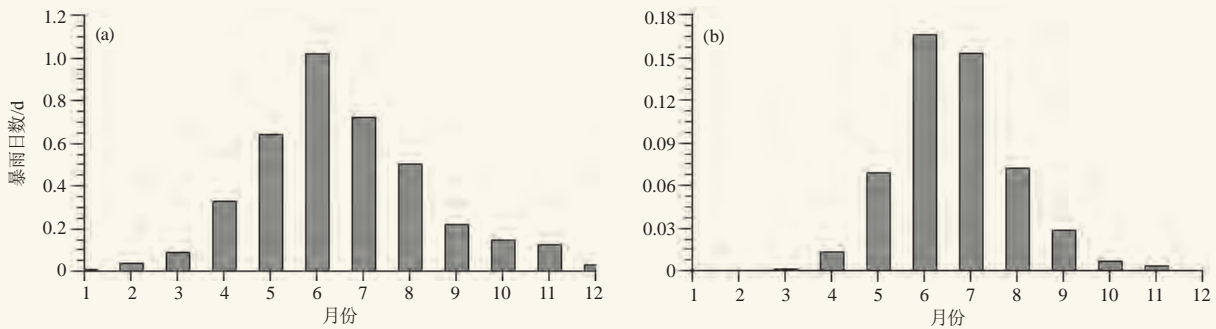


图3 湖南1981—2017年暴雨 (a) 与大暴雨月际分布
Fig. 3 Monthly distribution of rainstorm (a) and heavy rainstorm (b) in Hunan from 1981 to 2017

南年暴雨与大暴雨日数的可能周期变化性质。表1和图4是1981—2017年的暴雨日数的经验模态分解结果。

表1 湖南年暴雨日数EEMD分析

Table 1 EEMD analysis of annual rainstorm days in Hunan

	平均周期/年	相关系数	方差	方差贡献率/%
IMF1	2~3	0.78	0.57	74.6
IMF2	4~8	0.27	0.11	14.5
IMF3	18	0.50	0.07	9.2
IMF4	21	0.44	0.01	1.5
IMF5	36	0.14	0.001	0.2

注: IMF是EEMD分解的分量, 其中1~5表示分解出来的第1~5个分量

从1981—2017年湖南暴雨日数变化来看(图4a), 在20世纪90年代至本世纪初, 湖南有一个暴雨日数多发期, 而20世纪80—90年代初, 暴雨日数明显偏少, 但近些年来, 暴雨日数又有增多的趋势, 这与湖南年降水的总体趋势基本一致。对暴雨日数进行EEMD分析, 选取5个本征函数, 从分析结果来看, 这5个本征函数均体现了湖南暴雨日数的周期性质(表1)。

湖南暴雨日数呈现了多种周期变化。其中2~3年周期变化最为显著, 方差贡献率达到74.6%, 与原序列的相关系数达到78%(图4b)。在20世纪80—90年代中期, 基本表现为3年的变化周期, 而在20世纪

90年代中后期至21世纪前10年, 其变化频率加大, 基本上为2年一个周期(偏多、偏少交替出现)。第二个为4~8年的变化周期, 方差贡献率达14.5, 相关系数为27%, 这一周期变化也呈阶段性转折, 在2000年以前, 基本上表现为8年左右的变化周期, 而进入21世纪以后, 其周期相对变小, 为4~6年(图4c)。另外, 还存在18年(图4d)、21年(图4e)与36年(图4f)左右的周期变化特征。

同样, 对湖南大暴雨日数进行EEMD分析(图略), 得到湖南大暴雨日数与湖南暴雨日数基本相同的周期变化性质, 其中, 2~3年与4~8年为其主要周期, 方差贡献率分别达到67.4%与20.1%。

4 平均暴雨强度的变化特征

平均暴雨强度表示发生暴雨时, 平均雨量的大小。它反映在较长时间尺度上强降水的集中程度。图5为湖南年暴雨及大暴雨强度距平年际变化。1981—2017年, 湖南年平均暴雨强度为 $74.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 整体来看, 20世纪80—90年代初, 暴雨强度偏少, 基本上为负距平, 而从90年代开始, 只有少数几年为负距平, 大部分年份为正距平(图5a)。最大暴雨强度出现在1998年, 距平达 $6.39 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 其次为2017年, 距平为 $5.78 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$; 最小暴雨强度发生在

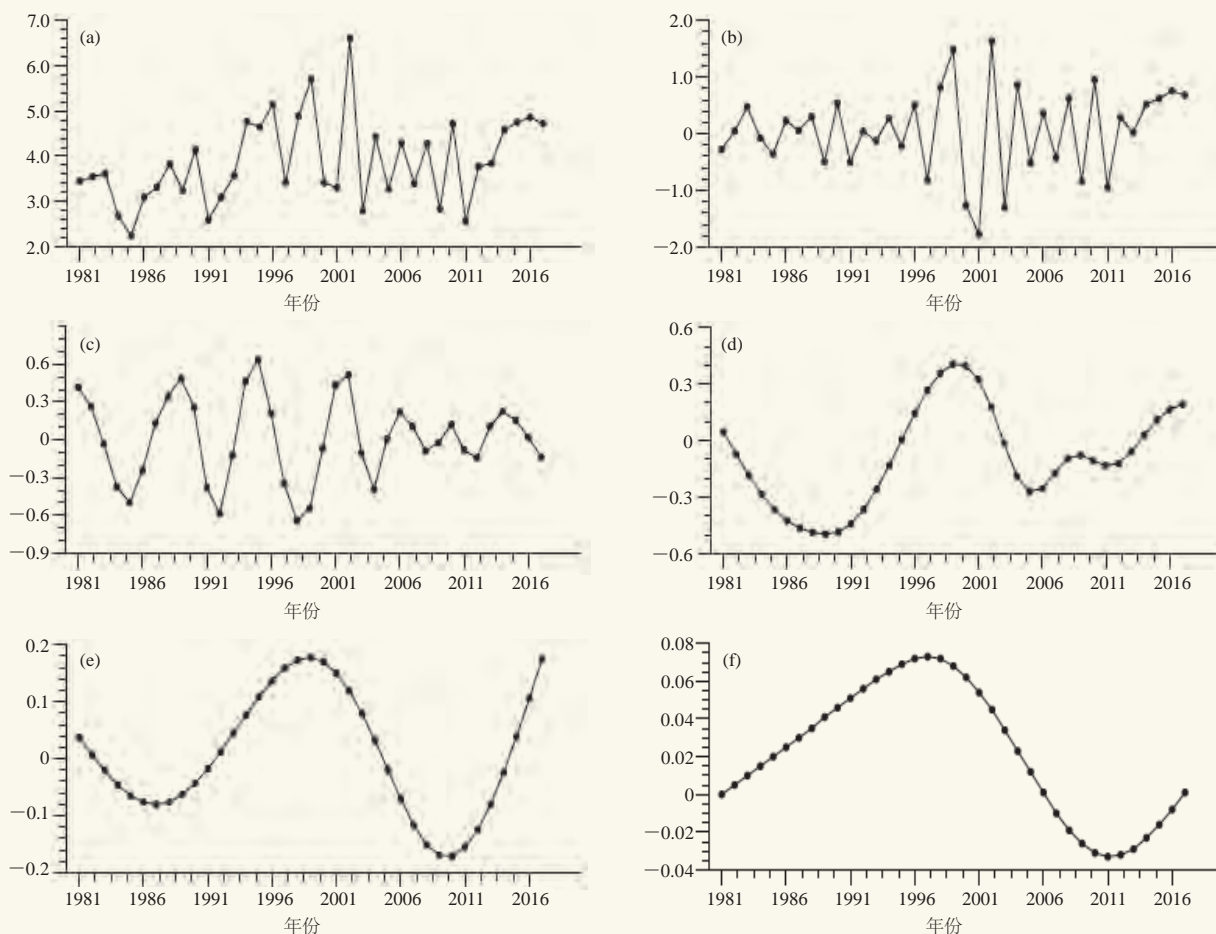


图4 1981—2017年湖南暴雨日数集合经验模态分解 (单位: d)

(a) 原始序列, (b~f) 第1~5模态

Fig. 4 The results of EEMD of rainstorm days in Hunan form 1981 to 2017 (unit: d)

(a) original values, (b-f) the 1-5th IMF

1986年, 距平为 $-5.48 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 其次为1985年, 距平为 $-5.39 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 近37年来年平均暴雨强度距平以 $0.17 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 的速率增加 ($P < 0.01$)。

湖南的大暴雨强度变化与暴雨变化不尽相同(图5b)。大暴雨的平均强度为 $130.7 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 1981—2017年, 其强度变化趋势不明显, 每10年稍增加 $0.8 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 比暴雨增加的幅度小, 且没有通过0.01的显著性检验。大暴雨强度最大的年份出现在1991年, 距平为 $15.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 其次为1998年, 为 $13.4 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 最小的年份出现在2005年, 距平为 $-14.7 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 其次为2001年, 为 $-13.2 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

5 暴雨贡献率的变化特征

暴雨的贡献率是指该地区总降水量中暴雨占了多少的比例。图6为湖南年暴雨量及大暴雨量分别占年降水量的比例变化。从图6a可以看出, 1981—2017年, 湖南多年平均暴雨贡献率为20.3%, 即湖南年降

水中有2成多是由暴雨所贡献的。最大暴雨贡献率出现在1999年, 达28.4%, 最小暴雨贡献率发生在1985年, 为13.3%。近37年来年暴雨贡献率以1.8%/10a的速率显著增加, 通过了0.01的显著性水平检验, 增加趋势较明显。

对湖南大暴雨的贡献率计算得知, 1981—2017年湖南大暴雨的对年降水的平均贡献率为4.7%, 最多年份出现在1996年, 贡献率为8.5%, 最小出现在1991年, 贡献率为1.6%, 从近37年来看, 湖南大暴雨对年降水的贡献率也呈显著增加的趋势, 每10年增加了0.9%, 通过了0.01的显著性水平检验。

湖南的年降水量(图略), 1981—2017年变化趋势不明显, 而暴雨与大暴雨对降水的贡献率呈增加的趋势, 这与湖南暴雨的发生频次及暴雨强度增强的结论相一致。这也说明了, 在气候变暖的大背景下, 湖南极端强降水事件有增强的趋势。

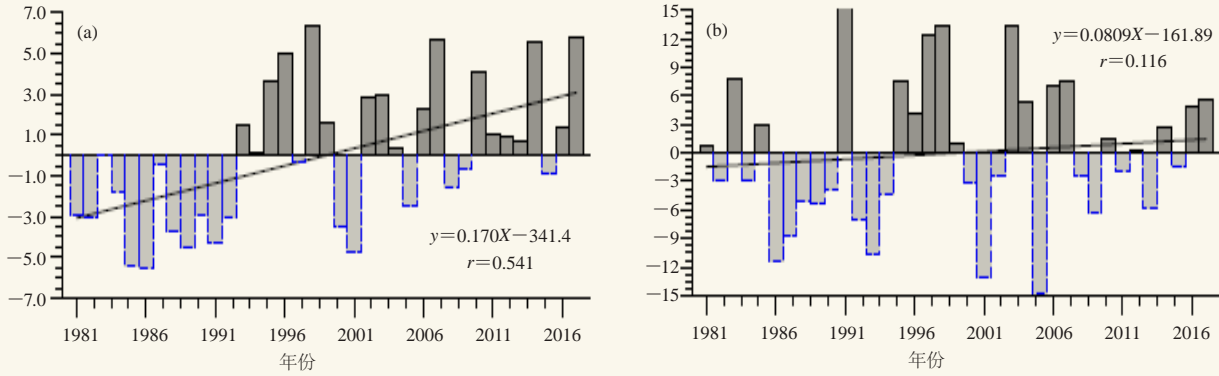


图5 湖南1981—2017年年暴雨 (a) 及大暴雨 (b) 平均强度距平变化
(单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 色条表示强度值, 实线表示线性趋势)

Fig. 5 Annual variations of intensity of rainstorm (a) and heavy rainstorm (b) in Hunan from 1981 to 2017
(unit: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, colored bar: intensity values, solid line: its linear trend)

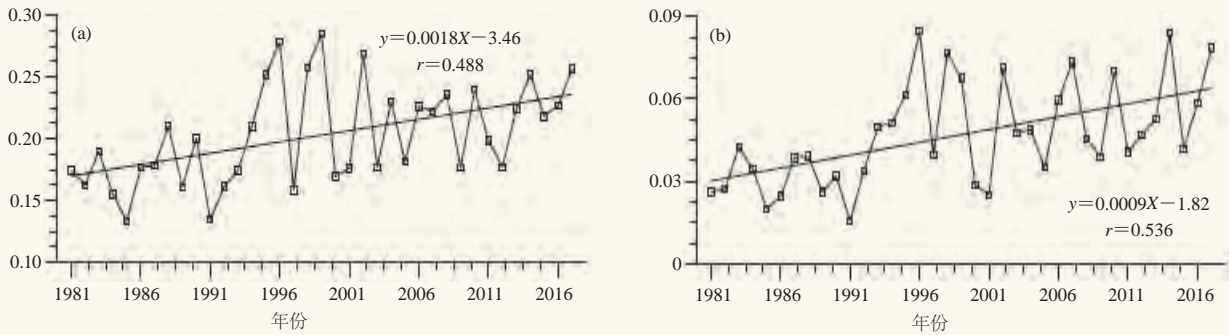


图6 湖南1981—2017年暴雨 (a) 与大暴雨 (b) 贡献率年际变化
(虚线: 暴雨贡献率, 实线: 线性趋势线)

Fig. 6 Annual contribution rate to total rainfall of rainstorm (a) and heavy rainstorm (b) in Hunan from 1981 to 2017 (line with markers represents contribution rate, solid line represents the linear trend)

6 结论

1) 1981—2017年湖南平均暴雨与大暴雨日数总体呈现北多南少的分布特征, 大值中心除开南岳高山站外, 另外一个中心就是安化(暴雨6.1 d, 大暴雨1.16 d), 说明安化是本省的一个主要暴雨中心。暴雨出现最少的区域为湘西南, 城步出现的暴雨与大暴雨均最少, 分别为2.4 d与0.11 d。

2) 湖南近37年来年平均暴雨日数为3.88 d, 大暴雨日数为0.51 d, 暴雨与大暴雨日数与降水的季节分布较为相近, 呈单峰型, 6月发生频次最多。20世纪90年代中后期至本世纪初, 是暴雨与大暴雨多发时期, 近些年又有增多的趋势。1981—2017年湖南暴雨与大暴雨日数均为显著增多的趋势。

3) 湖南暴雨与大暴雨日数具有2~3年、4~8年、18年、21年、36年等周期变化性质, 其中2~3年与4~8年的周期变化最为明显, 但其周期性在20世纪

90年代中期发生变化, 近期有周期加快的趋势。

4) 湖南暴雨强度平均为 $74.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 大暴雨强度为 $130.7 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 1981—2017年暴雨与大暴雨强度呈现显著增加的趋势。平均暴雨与大暴雨贡献率分别为20.3%与4.7%, 近37年来, 暴雨与大暴雨贡献率也呈显著增加的趋势, 可能主要是由于暴雨频次增加与暴雨强度增加所引起的。

参考文献

- [1] 鲍名, 黄荣辉. 近40年我国暴雨的年代际变化特征. 地球科学进展, 2006, 30(6): 1057-1067.
- [2] 孙杰, 许杨, 陈正洪, 等. 华中地区近45年来降水变化特征分析. 长江流域资源与环境, 2010, 19(Z1): 45-51.
- [3] 贺芳芳, 赵兵科. 近30年上海地区暴雨的气候变化特征. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1260-1267.
- [4] 朱宵峰, 钱永甫, 宁亮, 等. 长江下游地区汛期暴雨气候特征分析. 热带气象学报, 2008, 24(2): 136-146.
- [5] 白淑英, 顾海敏, 史建桥, 等. 近50a长江流域暴雨日数时空变化分析. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1255-1262.
- [6] 张天宇, 范莉, 孙杰, 等. 1961—2008年三峡库区气候变化特征分析. 长江流域资源与环境, 2010, 19(Z1): 52-61.

1960—2018年洞庭湖生态经济区极端气温和降水事件的变化规律

许建伟^{1, 2} 彭保发^{1, 2} 郭蓉芳³ 王夏青^{1, 2}

(1 湖南文理学院资源环境与旅游学院, 常德 415000; 2 洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同创新中心, 常德 415000; 3 湖南省常德市气象局, 常德 415000)

摘要: 洞庭湖生态经济区是我国重要的粮食基地和生态环境保护的关键区, 研究该区域的极端气温、降水事件对防灾减灾、应对气候变化具有重要意义。基于站点观测数据分析了1960—2018年洞庭湖生态经济区极端气温、降水事件的变化规律, 得出如下结论: 该区域极端气温指数呈现出显著的变化规律, 冷夜日数(TN10p)、霜冻日数(FD)、冰冻(ID)日数等冷指数显著减少, 暖夜日数(TN90p)、夏季日数(SW)、热带夜数(TR)、持续暖期指数(WSDI)等暖指数显著增加。强降水事件的降水量和发生频次均增加, 强降水量(R95p)以18.85 mm/10 a的速度增加, 大雨日数(R20mm)与暴雨日数(R50mm)分别以0.36 d/10 a和0.19 d/10 a的速度增加。复合高温热浪事件和夏季极端高温干旱事件发生的频次和持续时间在近20年明显增加, 21世纪10年代平均每年分别发生1.08次和5.41次。

关键词: 洞庭湖生态经济区, 极端气候事件, 时间变化特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.014

Variation of Extreme Temperature and Precipitation Events of the Dongting Lake Ecological Economic Zone in 1960–2018

Xu Jianwei^{1, 2}, Peng Baofa^{1, 2}, Guo Rongfang³, Wang Xiaqing^{1, 2}

(1 Hunan University of Arts and Science, Changde 415000

2 Hunan Province Cooperative Innovation Center for the Construction and Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Changde 415000

3 Changde Meteorological Bureau, Changde 415000)

Abstract: Dongting Lake Ecological Economic Zone (DT Lake) is not only an important grain base but also a key region of ecological environment protection in China. It is necessary to investigate extreme temperature and precipitation events for disaster prevention and mitigation, climate change adaption in this region. Based on station observations, variation of extreme temperature and precipitation events in 1960–2018 over DT Lake was analyzed and conclusions are as following: extreme temperature indices show significant change with cold indices such as TN10p, FD and ID are decreasing, warm indices such as TN90p, SU, TR and WSDI are increasing. Both amount and frequency of heavy precipitation increase, as R95p, R20mm and R50mm increase at the rate of 18.85 mm/10a, 0.36 d/10a and 0.19 d/10a, respectively. Frequency and duration of compound heat wave and summer extreme warm dry events obviously increase in the last 20 years. On average, 1.08 compound heat waves and 5.41 extreme warm dry events occur in each year in 2010s.

Keywords: Dongting Lake Ecological Economic Zone, climate extreme, temporal variation characteristics

0 引言

相对于平均气候的变化, 极端气候事件的变化对人类社会和自然生态环境的影响更大, 20世纪80年代以来, 中国极端天气气候灾害的影响范围逐渐扩大, 影响程度日趋严重, 直接经济损失不断增加^[1], 因而

受到广泛关注。随着气候变暖, 我国不同地区的极端气温事件发生了显著变化, 总体表现为极端暖指数显著增加, 极端冷指数显著减小^[2-5], 例如湖南省暖昼指数和暖夜指数分别以0.68 d/10 a、2.73 d/10 a的速度增加, 而冷昼指数和冷夜指数分别以-0.45 d/10a、-2.46 d/10a的速度减小^[4]。我国处于东亚季风区, 受极端降水的影响较大, 在全球变暖的背景下极端强降水事件呈现出明显的变化规律, 全国平均暴雨和极端

收稿日期: 2019年6月27日; 修回日期: 2019年11月28日
第一作者: 许建伟(1987—), Email: xjw_huas@163.com

强降水事件频率和强度有所增长，特别是长江中下游和东南地区、西北地区有较明显增长，而华北、东北中南部和西南部分地区减少^[6-7]。平均降水和极端降水呈现相反的变化趋势，加剧了不同气象灾害的威胁，如西南地区总降水量减少、但极端强降水增加，从而面临洪涝和干旱的双重威胁^[8]。长江中下游地区是极端降水事件频发的区域，近52年来该区域极端降水率以9.3 mm/10 a的速率显著增加，使该区域面临更加严峻的灾害风险^[6,9]。

目前关于极端气温和降水事件开展了大量研究，大部分研究往往只考虑单变量的极端事件，例如极端降水和极端气温等，忽略了变量之间的相互作用。复合极端事件（Compound extreme events）是多种气候驱动因子或致灾因子共同作用下形成的高影响气候事件^[10]，比单一极端气候事件的危害性更强，对生态系统、粮食安全、森林火灾和人体健康等方面都具有深远影响，因而受到越来越多的关注^[10-13]。例如风暴潮和强降水的同时发生会导致沿海地区的洪涝灾害^[14]。传统的高温热浪事件仅考虑白天的最高气温，而夜间的持续高温会加剧白天热浪的危害，因此基于日最高气温和最低气温的复合高温热浪事件对人体健康、农业病害、电力和水资源供给具有更大的影响^[15]。持续高温和降水偏少会导致极端高温干旱事件^[16-17]，而极端高温干旱事件对粮食生产具有较大的不利影响^[12-13]。

洞庭湖生态经济区（以下简称洞庭湖区）位于东亚季风区，极端天气气候事件频发。20世纪90年代以来，由极端气温、降水事件导致的旱、涝灾害加剧，对该区经济社会发展和生态系统造成了重大影响^[18-20]。例如，2008年初洞庭湖发生冰冻灾害，导致湖面结冰，部分区域结冰厚度达到10 cm，给越冬候鸟造成严重伤害。在全球持续升温的背景下，未来洞庭湖区极端降水的强度和频率可能进一步增加，旱涝灾害风险将进一步加剧。因此，研究洞庭湖区极端气温、降水事件的变化规律对保障经济社会安全、保护生态环境具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 研究区域

2014年4月14日，中华人民共和国国务院正式批复同意《洞庭湖生态经济区规划》。洞庭湖区，包括岳阳、常德、益阳3市，长沙市望城区和湖北省荆州市，总面积为6.05万 km²，区域范围如图1所示。该区域是我国重要的商品粮基地、养殖渔业区、长江主要的分洪、蓄洪区，人口、产业密集，也是长江流域主

要的湿地分布区，在粮食安全、防洪减灾、生态环境保护等方面具有重要意义。

1.2 数据

选取了洞庭湖生态经济区11个气象观测站点逐日气温和降水数据，数据来源于中国气象局国家气象信息中心（<http://data.cma.cn/>）。气象观测站点的分布如图1所示，包括荆门、石门、常德、监利、洪湖、南县、岳阳、沅江、安化、湘阴和平江等11个站点。首先对数据进行质量控制，选取数据完整的1960—2018年作为分析时段。

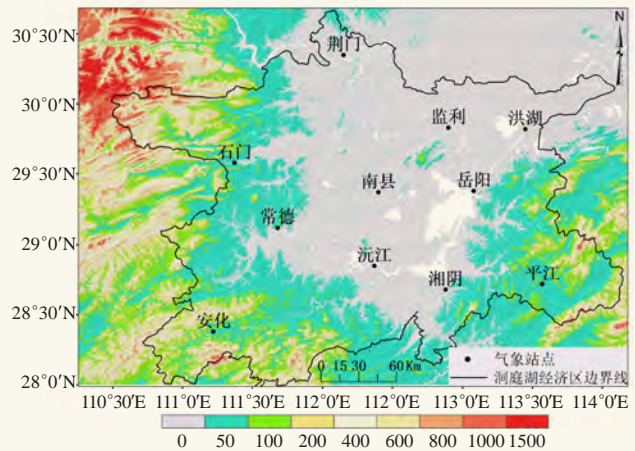


图1 洞庭湖区气象站点分布

Fig. 1 Meteorological stations of Dongting Lake Ecological Economic Zone

1.3 极端气温和降水指数

极端气候指数的定义方法有多种，文中采用的是气候变化检测和指标专家组（ETCCDI）规定的27个极端气温和降水指数的标准，具体定义和计算方法见网址：http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml。从中选取15个极端气温指数和9个极端降水指数（表1）。另外分析了2个复合极端指数，分别为复合高温热浪事件和极端高温干旱事件。

高温热浪事件对人体健康、电力供给等具有重要影响，传统的高温热浪的定义仅考虑了最高气温。复合高温热浪比传统的高温热浪对人体健康的危害更大。为研究复合高温热浪事件，将至少连续3 d最高气温和最低气温同时分别高于最高和最低气温90%分位值定义为一次复合高温热浪事件。两次高温热浪事件之间间隔至少连续2 d，要求最高气温、最低气温分别或同时低于90%分位值。根据以上定义，可以计算一年中复合高温热浪事件发生的次数、持续时间和强度，具体计算方法参考Li等^[15]的方法。

根据Lu等^[13]的定义方法，将日平均气温高于90%

表1 极端气温和降水指数的定义
Table 1 Definition of extreme temperature and precipitation indices

极端指数	英文缩写	单位	定义
最高气温最大值	TXx	℃	每年日最高气温的最大值
最低气温最大值	TNx	℃	每年日最低气温的最大值
最高气温最小值	TXn	℃	每年日最高气温的最小值
最低气温最小值	TNn	℃	每年日最低气温的最小值
冷夜指数	TN10p	d	每年日最低气温小于基准期内10%分位数的日数
暖夜指数	TN90p	d	每年日最低气温大于基准期内90%分位数的日数
冷昼指数	TX10p	d	每年日最高气温小于基准期内10%分位数的日数
暖昼指数	TX90p	d	每年日最高气温大于基准期内90%分位数的日数
霜冻日数	FD	d	每年日最低气温<0℃的日数
冰冻日数	ID	d	每年日最高气温<0℃的日数
夏季日数	SU	d	每年日最高气温>25℃的日数
热带夜数	TR	d	每年日最低气温>20℃的日数
持续暖期指数	WSDI	d	每年至少连续6 d最高气温>基准期内90%分位数的天数
持续冷期指数	CSDI	d	每年至少连续6 d最低气温<基准期内10%分位数的天数
气温日较差	DTR	℃	每年日最高气温与最低气温的差的平均值
日最大降水量	RX1day	mm	每年最大的1 d降水量
五日最大降水量	RX5day	mm	每年最大的连续5 d降水量
强降水量	R95p	mm	每年大于基准期内95%分位数的日降水量之和
中雨日数	R10mm	d	每年日降水量≥10 mm的日数
大雨日数	R20mm	d	每年日降水量≥20 mm的日数
暴雨日数	R50mm	d	每年日降水量≥50 mm的日数
连续干日	CDD	d	每年日降水量连续<1 mm的最大日数
连续湿日	CWD	d	每年日降水量连续≥1 mm的最大日数
降水强度	SDII	mm/d	年降水量与降水日数(日降水量≥1 mm)的比值

分位值、同时日降水量低于10%分位值的连续日数(≥1 d)定义为一次极端高温干旱事件,可以计算每年发生极端高温干旱事件的频次,每次事件持续的日数和一年中出现极端高温干旱的总日数。Lu等^[13]分析了全国小麦和玉米生长季期间的极端高温干旱事件,而洞庭湖区的主要粮食作物是水稻,因此分析了该区域对水稻生长有重要影响的夏季发生的极端高温干旱事件。气温采用动态阈值,以某日为中心,选取该日前后10 d建立一个长度为21 d的滑动窗口,选取1960—2018年所有年份中该窗口的气温得到一个1239 d(21 d/a×59 a)的气温数据,以该样本中90%分位值作为该日极端高温的阈值。以此类推得到每日的气温阈值。与气温不同,降水发生的天数相对较少,因此选取1960—2018年所有夏季雨日(降水量>0 mm/d)降水量的10%分位值作为降水的阈值。

2 结果分析

2.1 极端气温指数的变化规律

洞庭湖区1960—2018年15个极端气温指数的年际变化规律如图2所示, TXx和TXn呈较弱的上升趋势,而TNx和TNn分别以0.21℃/10 a和0.55℃/10 a的速度

显著上升。TN10p显著减少,速率为-3.85 d/10a, TN90p显著增加,速率为9.86 d/10 a,表明夜间的气温显著增加。TX10p变化较小,而TX90p显著增加。FD以2.76 d/10 a的速率显著减小, ID呈不显著的减小趋势,近20年ID接近0 d,但2008年和2018年冬季气温偏低,导致ID突增。SU、TR和WSDI分别以2.92 d/10 a、3.05 d/10 a和2.40 d/10 a的速率显著增加。CSDI存在较大的年际变率,呈不显著的减小趋势。最低气温比最高气温的升温速率更快,导致DTR显著减小。总体而言,基于最低气温计算的极端气温指数变化较快,基于最高气温计算的极端气温指数变化相对较慢。TN10p、FD冷指数均显著减少,而TN90p、SU、TR和WSDI等暖指数显著增加。从极端气温指数变化趋势的空间分来看(图3),洞庭湖区11个站点的极端气温指数呈现出较为一致的变化趋势。

2.2 极端降水指数的变化规律

9个极端降水指数的年际变化如图4所示,极端降水指数存在较大的年际波动,变化趋势均没有通过0.05的显著性检验。RX1day、RX5day和R95p分别以2.64 mm/10a、2.28 mm/10a和18.85 mm/10a的速度增加(图4a~4c)。从R10mm、R20mm和R50mm的

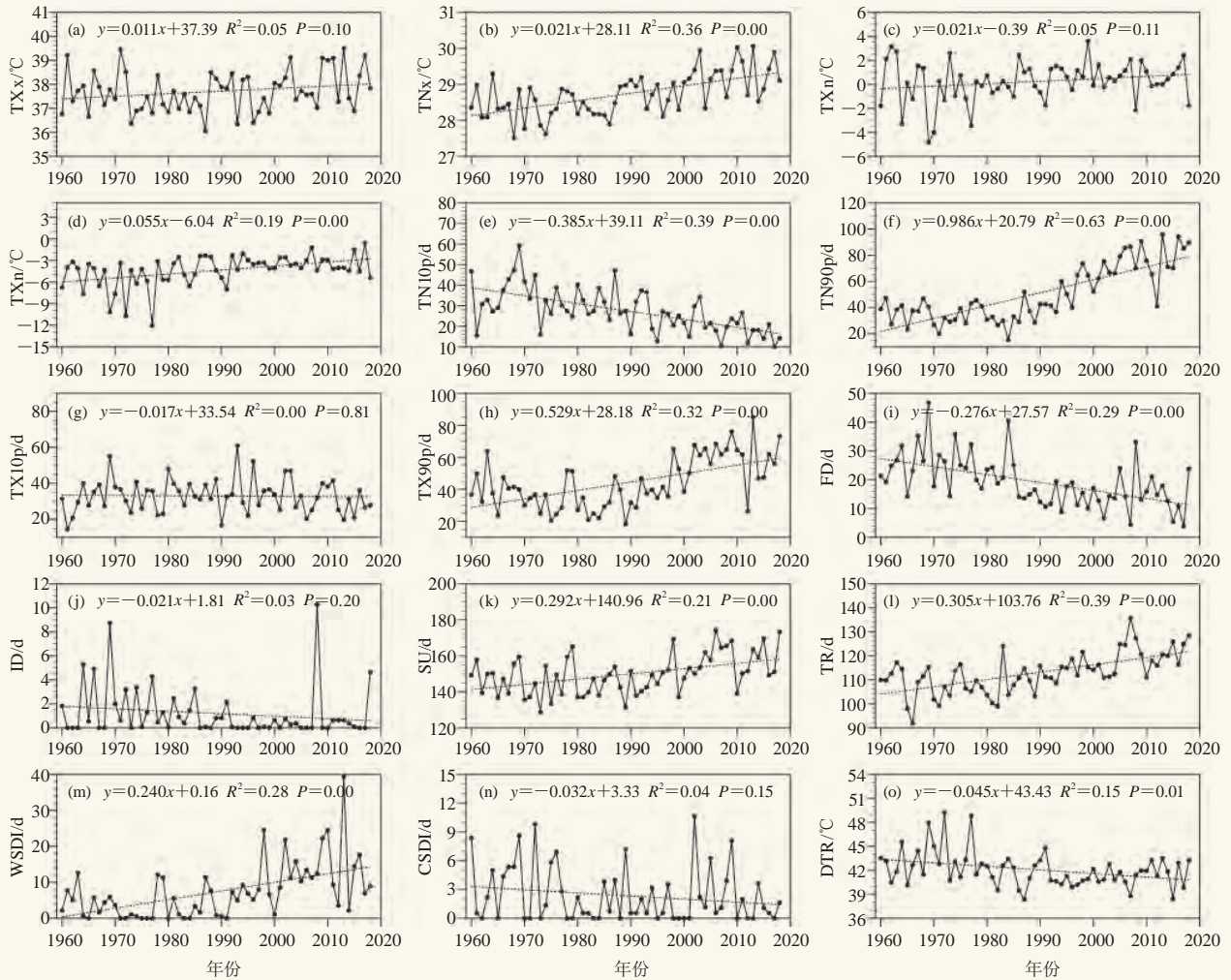


图2 1960—2018年洞庭湖区15个极端气温指数的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of 15 extreme temperature indices in 1960—2018 over the DT Lake

变化规律来看，发生强降水的天数在增加，R20mm与R50mm分别以0.36 d/10 a和0.19 d/10 a的速度增加（图4d~4f）。CWD和CDD均呈减小趋势，表明降水在时间方面分布更加均匀（图4g~4h）。SDII的增加趋势较为明显，速率为0.25 mm/d/10 a（图4i）。总体而言，洞庭湖区的极端降水指数存在不显著的变化规律，强降水事件的降水量和发生频次均呈现增加趋势。

从变化趋势的空间分布（图5）来看，大部分站点的极端降水指数的变化趋势较为一致，但相比极端气温指数变化的一致性差。R95p、R20mm、R50mm、SDII均呈增加趋势，CDD呈减小趋势，其他4个极端降水指数均存在3个站点的变化趋势与整个区域的变化趋势相反。

2.3 气温和降水复合极端事件

复合高温热浪事件的年代际变化规律如图6所示。由于很多年份没有发生复合高温热浪事件，因此

采用10 a平均值的变化展示其变化规律。图6a显示，2000年之前，复合高温热浪事件发生的频次较低，平均每年发生0.16次，而在2000年之后，复合高温热浪事件明显增加，21世纪00年代和10年代平均每年发生0.94次和1.08次。20世纪60—80年代，复合高温热浪事件发生的频次较少，但其强度随着气温升高而增加，20世纪90年代强度出现最小值，随后增加（图6b）。复合高温热浪事件持续时间先减小、后增加，20世纪80年代出现最小值3.79 d，21世纪10年代达到最大值（4.45 d）。很多年份没有出现复合高温热浪事件，且各个站点计算得到的变化趋势并不显著，但近20年来复合高温热浪事件发生频次增加、强度增强的变化事实不容忽视。随着气温持续升高，未来复合高温热浪事件发生的频次、持续时间和强度均将进一步增加，对生态系统、人体健康、电力供给等产生的不利影响将加剧。

对比全国不同区域的变化显示，北方地区复合高

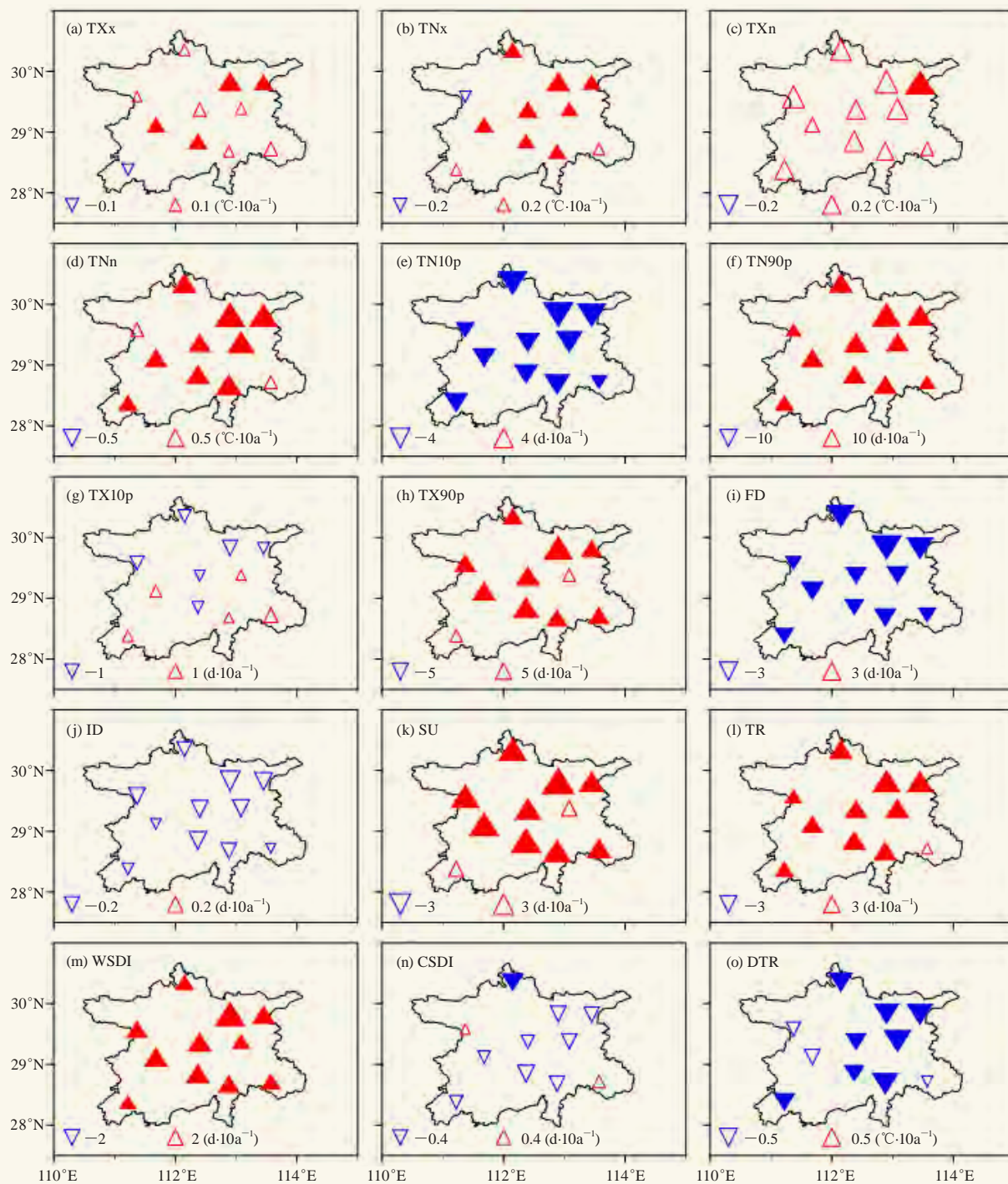


图3 1960—2018年洞庭湖区15个极端气温指数变化趋势的空间分布

(上三角表示增加，下三角表示减小，实心三角表示变化通过了0.05的显著性检验)

Fig. 3 Distribution of trends for 15 extreme temperature indices over the DT Lake in 1960—2018 (Up pointing triangle means increase, down pointing triangle means decrease. Filled triangle means trend passes the 0.05 significant test)

温热浪事件的强度增加较多，而持续时间变化较小，南方地区的持续时间增加较多。长江流域的复合高温热浪事件发生频次、强度和持续时间均较大，且均表现出较快增加趋势^[13]。洞庭湖区复合高温热浪事件的频率、强度在近20年明显增加，持续时间增加相对较

慢，具有一定的独特性。

图7为夏季极端高温干旱事件的年代际变化规律。极端高温干旱事件发生的频次从20世纪80年代起快速增加，21世纪00年代和10年代平均每年发生5.74次和5.41次。从持续时间来看，20世纪60—90年代呈

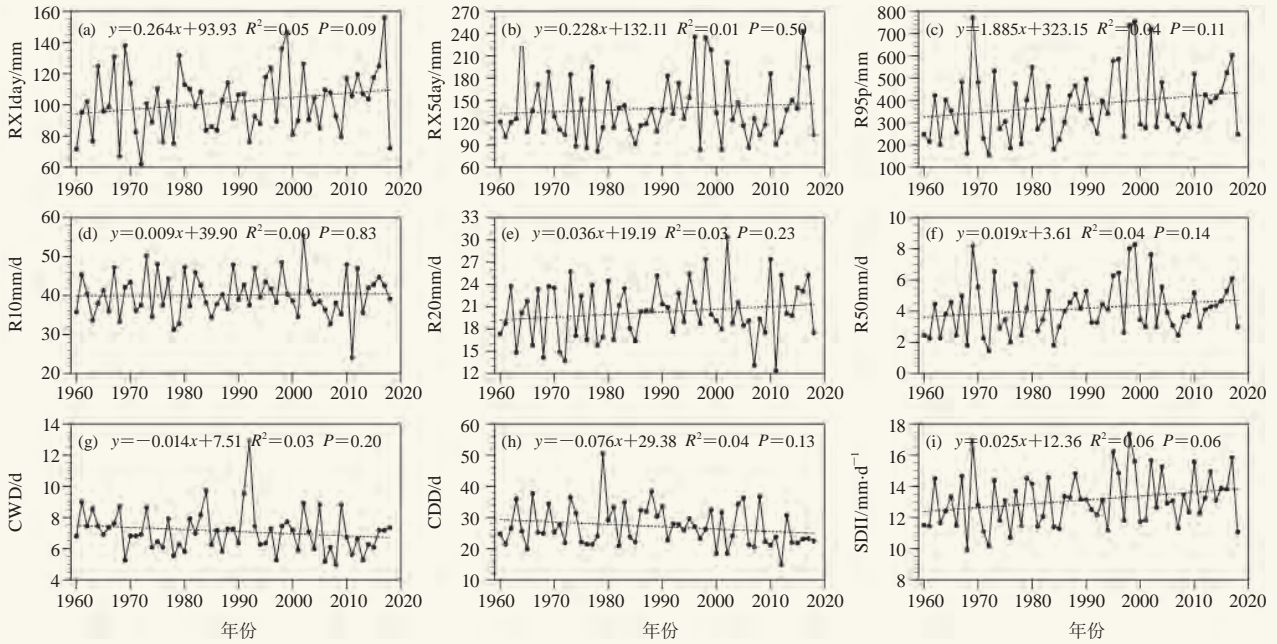


图4 1960—2018年洞庭湖区9个极端降水指数的年际变化
Fig. 4 Interannual variation of 9 extreme precipitation indices in 1960—2018 over the DT Lake

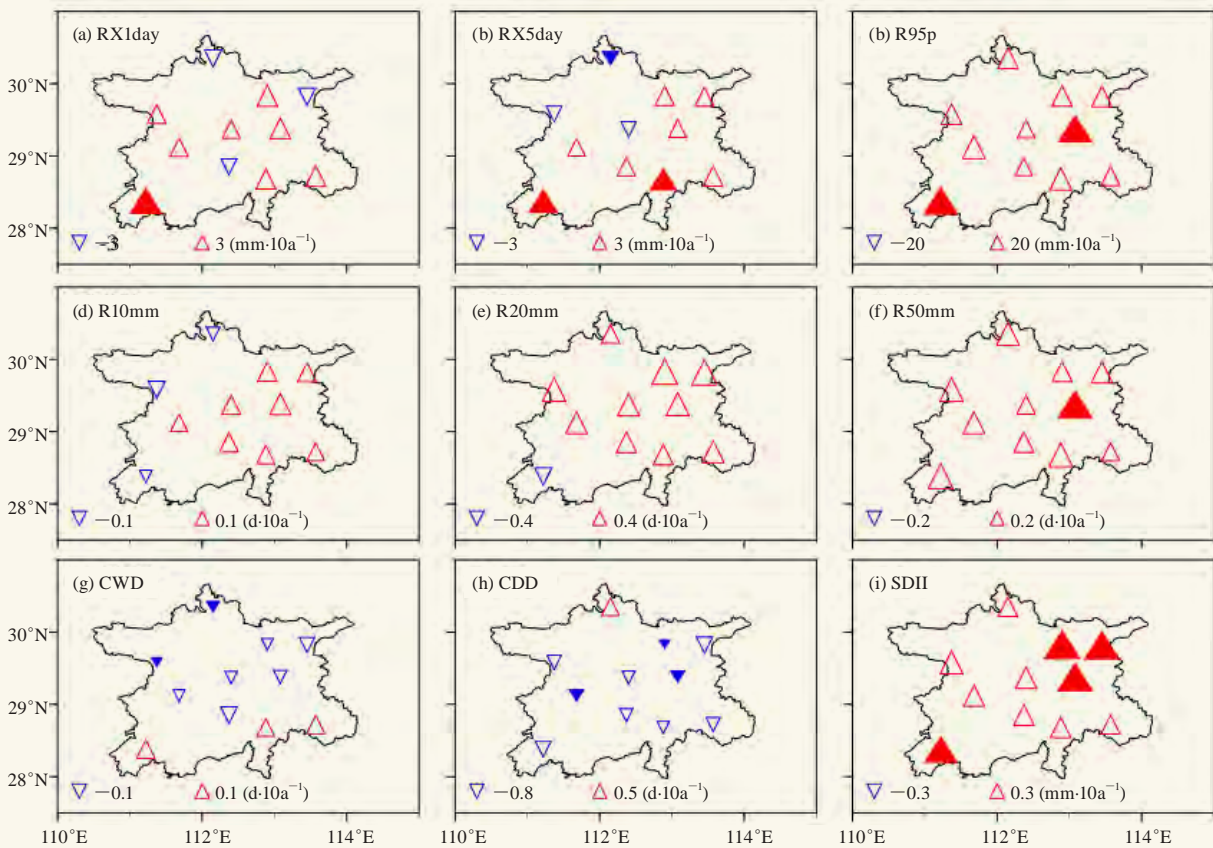


图5 1960—2018年洞庭湖区9个极端降水指数变化趋势的空间分布
(上三角表示增加, 下三角表示减小, 实心三角表示变化通过了0.05的显著性检验)

Fig. 5 Distribution of trends for 9 extreme precipitation indices over the DT Lake in 1960—2018
(Up pointing triangle means increase, down pointing triangle means decrease. Filled triangle means trend passes the 0.05 significant test)

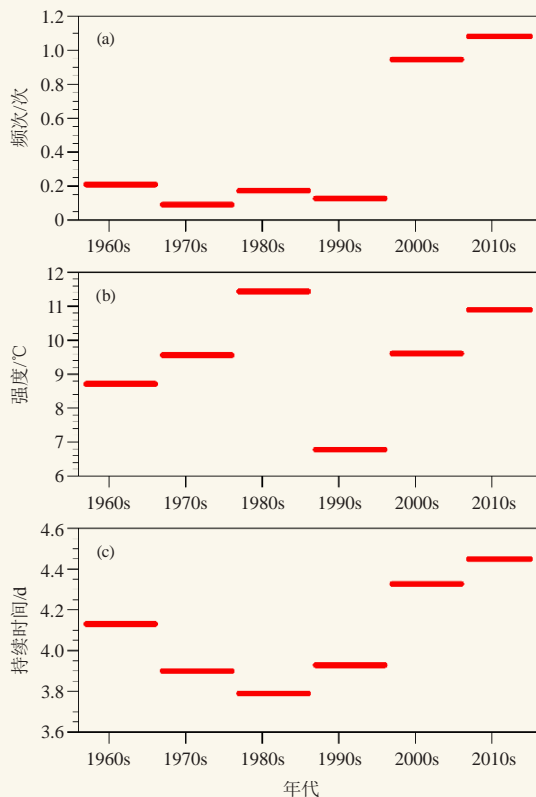


图6 1960—2018年复合高温热浪事件发生频次、强度和持续时间的年代际变化

Fig. 6 Interdecadal variations of frequency, intensity and duration of compound heat wave events in 1960—2018

减小趋势，之后快速增加，21世纪10年代平均每次事件持续2.71 d。20世纪90年代之前，夏季极端高温干旱事件发生的总日数变化较为平缓，之后由于发生频次和持续时间有较大增长，总日数亦明显增加，21世纪10年代平均每年达到14.69 d。从变化趋势的空间分布来看，大部分站点极端高温干旱事件的频次、持续时间和总日数均显著增加，东北部监利、洪湖、南县等站点的增加速率较大（图略）。Lu等^[13]对小麦和玉米生长季的极端高温干旱事件的研究表明，1980—2015年极端高温干旱事件的频率出现显著增加，华北、西北和西南部分地区的发生频次较其他地区更多，且不同作物生长季发生的复合极端事件存在一定差异。小麦和玉米生长季的极端高温干旱事件的发生频次在2010年之后出现减小趋势，洞庭湖区夏季极端高温干旱事件也表现出相同的变化规律。

3 结论

1) 极端气温指数具有显著的变化特征，基于最低气温计算的指数变化较快，基于最高气温计算的指数变化相对较慢。冷夜日数、霜冻日数等冷指数显著减少，暖夜日数、夏季日数、热带夜数、持续暖期指

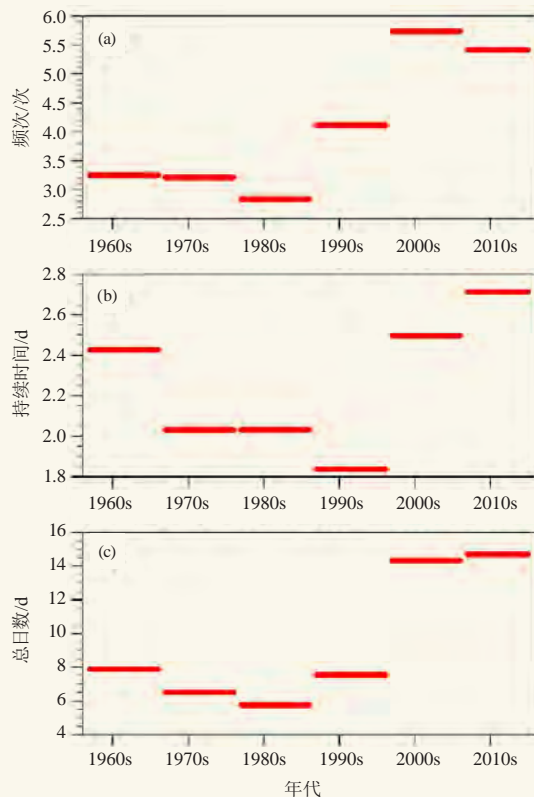


图7 1960—2018年夏季极端高温干旱事件的发生频次、持续时间和总日数的年代际变化

Fig. 7 Interdecadal variations of frequency, duration and day number of summer extreme warm dry events in 1960—2018

数等暖指数显著增加。11个站点的变化规律较一致。

2) 极端降水指数存在不显著的变化规律，强降水事件的降水量和发生频次均增加，强降水量以18.85 mm/10 a的速度增加，大雨日数与暴雨日数分别以0.36 d/10 a和0.19 d/10 a的速度增加，降水强度以0.25 mm/(d·10 a)的速度增加。大部分站点的变化趋势较为一致，少数站点存在相反的变化规律。

3) 复合高温热浪事件发生的频次、强度和持续时间在近20年明显增加，21世纪10年代平均每年发生1.08次，平均每次持续4.45 d。夏季极端高温干旱事件的频次、持续时间和总日数均显著增加，21世纪10年代平均每年发生5.41次，平均持续时间为2.71 d，总日数达到14.69 d。

参考文献

- [1] 秦大河, 张建云, 闪淳昌, 等. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 刘青娥, 吴孝情, 陈晓宏, 等. 珠江流域1960—2012年极端气温的时空变化特征. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1356-1366.
- [3] 孙玉燕, 孙鹏, 姚蕊, 等. 1961—2014年淮河流域极端气温时空特征及区域响应. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(1): 1-11.
- [4] 朱歆炜, 叶成志, 彭晶晶, 等. 湖南省55a极端气温事件变化特征.

(下转98页)

东洞庭湖湿地“观鸟气象指数”研究

黄菊梅¹ 刘学² 李奇¹ 覃鸿¹ 向伟¹

(1 湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000; 2 湖南省华容县气象局, 华容 414200)

摘要: 东洞庭湖观鸟时段为深秋至冬季。影响观鸟的气象要素包括降雨、风速、能见度, 以及雾、降雪、积雪、雨淞、大风等天气现象。通过历史资料的对比分析, 制定观鸟气象指数影响因子取值规则, 采用因子加权法, 将逐日观鸟气象影响因子判别指标序列划分为5个取值区间, 设计了观鸟气象判别指标和观鸟气象指数, 并定义观鸟气象指数含义。

关键词: 观鸟, 气象指数, 东洞庭湖, 湿地, 天气

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.015

Study on the Weather Index of Bird-Watching in the East Dongting Lake Wetland

Huang Jumei¹, Liu Xue², Li Qi¹, Qin Hong¹, Xiang Wei¹

(1 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000 2 Huarong Meteorology Bureau, Huarong 414200)

Abstract: Bird-watching time is from late autumn to winter in East Dongting Lake. Meteorological factors affecting bird-watching include precipitation, wind speed, visibility, fog, snow cover, rime, wind and other weather phenomena. Based on the comparative analysis of historical data, this paper formulates the rules for determining the weather factors of bird-watching by using the factor weighting method, divides the index series of identifying factors of bird-watching weather into five value ranges, designs the weather indicators of bird-watching and the weather index of bird-watching, and defines the meaning of the weather index of bird-watching.

Keywords: bird-watching, meteorological index, East Dongting Lake, wetland, weather

0 引言

东洞庭湖地处长江中游荆江南岸, 是国际重要湿地, 也是国际重要的鸟类越冬地, 在东北亚鹤类迁徙网络、东亚雁鸭类迁徙网络和东亚—澳大利亚涉禽迁徙网络等区域物种保护网络中具有十分重要的地位。东洞庭湖冬季水温适宜, 近地层的温度比同纬度远离东洞庭湖的平均温度高出2℃左右, 为鸟儿前来越冬提供了良好的气候条件。同时东洞庭湖季节性的半陆半水, 丰富了植物种类, 也为鸟类提供了必备的越冬食物和饮用淡水。

洞庭湖丰富的鸟类资源是开展观鸟旅游的良好基础^[1]。每年越冬候鸟达20万只以上, 过境候鸟达数百万只。为缓解并消除保护与利用之间的矛盾, 在生态保护与生态产业上寻找结合点, 推动生态文化建设, 2002年开始, 东洞庭湖国家级自然保护区打造出了知名的生态品牌“中国(洞庭湖)国际观鸟节”。

收稿日期: 2019年6月19日; 修回日期: 2019年11月12日
第一作者: 黄菊梅(1969—), E-mail: hjm17@163.com
资助信息: 湖南省气象局2019年面上项目(XQKJ19B026)

1 资料

本文气象资料来源于岳阳气象观测站, 该站位于东洞庭湖滨湖, 是湖南省唯一的滨湖气象站, 气象观测数据能较好地代表东洞庭湖的天气和气候。

2 观鸟气象指数的设计思路

观鸟是在不打扰野生鸟类生存栖息的基础上, 利用望远镜等光学仪器, 到自然环境中去观察、认知和探索鸟类形态及其习性的户外活动。但观察者应尽量避免在不良的天气条件下观鸟, 根据气候条件确定适宜的观鸟时间。

根据候鸟的生活习性, 每年10月之后, 随着北方气温的降低、东洞庭湖水位逐渐退落, 小天鹅、灰鹤、小白额雁等候鸟乘着南下的冷空气从西伯利亚、蒙古等北国陆续向南迁移, 11月开始大规模向东洞庭湖湿地迁徙, 东洞庭湖进入了观鸟“黄金季节”, 次年2月是候鸟集结准备北迁的时候。冬季鹤鹳类、天鹅集中在2月末北迁, 雁类在3月中旬, 小白额雁、白额雁在3月中下旬进行北迁^[2]。从历届洞庭湖观鸟节观鸟比赛时间来看, 有两届在12月12日, 其余八届均在12月2—9日, 而东洞庭湖鸟类调查一般在1月中上旬

的隆冬时节开展, 这个时间段正值水鸟越冬中期, 鸟群集中, 人为干扰比较少, 利于取得准确数据^[3]。因此, 东洞庭湖观鸟时段为深秋至冬季, 而初冬至隆冬季节是东洞庭湖的最佳观鸟时段, 此时东洞庭湖常年平均气温进入一年中最低的时段。因此, 本研究观鸟气象指数设计时段为11月1日一次年3月31日。

严明良等^[4]依据人类生活环境对气象条件的敏感性和依从性, 提出了多种行业的环境气象指数的7种设计方法。由于缺乏量化的候鸟观测数据, 因此预报量为定性的, 本文从鸟类调查中寻找具有与观鸟相关的气象因子, 再根据不同因子对观鸟的影响程度赋予无量纲的分值, 最后将这些分值累计作为预报量, 采用因子加权法设计观鸟气象指数。

3 观鸟气象指数影响因子取值规则

观鸟者一般不去水边近距离观鸟, 而在东洞庭湖湖堤上观鸟, 空旷的湖堤风速较大。刘电英等^[5]利用风资源测风加密观测资料和洞庭湖区内陆气候的常规观测资料进行对比分析表明, 在水平方向上, 湖面平均风速比陆地平均风速大2.3 m/s, 湖面瞬时风速是陆地瞬时风速的2倍左右。因此, 风速对东洞庭湖观鸟产生较大影响。影响观鸟的气象要素还包括降雨、能见度以及雾、降雪、积雪、雨淞、大风等天气现象。这些因素一方面作用于观察者, 使其观察能力下降; 另一方面又作用于鸟类, 使它们被发现的可能性下降。雾、降雪、积雪、雨淞、大风等是东洞庭湖冬季常见的天气现象, 对东洞庭湖观鸟敏感性和安全性的影响均非常强, 实行“一票否决”的方法直接进行排除, 即如果出现以上天气现象之一, 则不适宜观鸟。降雨、风速、能见度等气象因子对观鸟影响程度不同, 通过制订分量因子取值规则, 分别赋予这些因子不同的权重, 计算加权和作为观鸟气象影响因子判别指标序列。

因观鸟活动基本在白天(08:00—20:00)进行, 为了便于实际工作中推广应用, 各种气象要素应具有针对性。因此, 降水量采用白天总降水量进行取值, 风速和能见度分别采用白天平均风速和平均能见度进行取值。各分量因子取值规则如下:

1) 降水量因子R

- ① $R \geq 30.0$ mm, R取值为0;
- ② 15.0 mm $\leq R < 30.0$ mm, R取值为10;
- ③ 5.0 mm $\leq R < 15.0$ mm, R取值为20;
- ④ 0.1 mm $\leq R < 5.0$ mm, R取值为50;
- ⑤ 无降水, R取值为100。

2) 风速因子F

- ① $F \geq 10.7$ m/s, F取值为0;
- ② 8.0 m/s $\leq F < 10.7$ m/s, F取值为10;
- ③ 5.5 m/s $\leq F < 8.0$ m/s, F取值为20;
- ④ 3.5 m/s $\leq F < 5.5$ m/s, F取值为50;
- ⑤ 0.0 m/s $\leq F < 3.5$ m/s, F取值为100。

3) 能见度因子V

- ① $V \geq 10000$ m, V取值为100;
- ② 5000 m $\leq V < 10000$ m, V取值为50;
- ③ 1000 m $\leq V < 5000$ m, V取值为20;
- ④ $V < 1000$ m, V取值为0。

4) 天气现象因子W

雾、降雪、积雪、雨淞、大风等这些天气现象中, 若出现其中之一或多种天气现象同时出现则W值取值为0, 若均未出现则取值为1。

4 观鸟气象指数含义及判别指标

因气象观测记录中, 2015年以前均采用人工观测获取能见度数据, 且无连续观测记录, 白天仅在08:00、14:00和20:00进行观测, 2015年1月1日开始使用能见度仪获取逐小时能见度数据。因此, 对2015年11月1日—2019年3月31日逐日白天总降水、平均风速、平均能见度等气象因子和雾、降雪、积雪、雨淞、大风等天气现象进行因子取值。

根据观鸟气象指数影响因子取值规则, 定义观鸟综合气象影响因子判别指标(B)如下:

$$B = (R + F + V)W. \quad (1)$$

根据式(1)计算2015年11月1日—2019年3月31日逐日B值, 并将各个不同B值出现天数及占比进行统计。表1中, 判别指标B值从0~30共计12个无量纲值, 其中B值为0出现82 d, 占总统计天数的14%。有67 d雾、降雪、积雪、雨淞、大风这5种天气现象中只出现了1种, 有9 d出现了2种, 有6 d出现了3种且基本是降雪、积雪、雨淞这3种天气现象同时出现。

表1 逐日观鸟气象影响因子判别指标(B)统计表
Table 1 Statistical table of meteorological factor discrimination index (B)

B	0	8	9	12	14	15	16	17	20	22	25	30
天数/d	82	1	6	25	18	7	1	77	39	94	164	91
占比/%	14	0	1	4	3	1	0	13	6	16	27	15

将逐日B值指标序列划分为5个取值区间, 形成观鸟气象判别指标和观鸟气象指数。表2中, 观鸟气象指数为1时表示天气不好, 不适宜观鸟, 为2时表示天气不太好, 不太适宜观鸟, 为3时表示天气还可以, 基本适宜观鸟, 为4时表示天气不错, 比较适宜观鸟, 为5时表示天气很好, 很适宜观鸟。通过和历

表2 观鸟气象指数判别表

Table 2 Discriminating table of weather index for bird-watching

观鸟气象指数	判别指标	指数描述	服务提示
1	0	不适宜	天气不好, 建议您改日观鸟
2	1~15	不太适宜	天气不太好, 但愿您不会失望
3	16~20	基本适宜	天气还可以, 出去观鸟吧
4	21~25	比较适宜	天气不错, 欢迎您观鸟
5	26~30	很适宜	天气很好, 尽情观鸟吧

史资料的对比分析, 观鸟气象指数为1~5占比分别为14%、9%、19%、43%、15%, 即77%的时段适宜观鸟。

5 讨论

候鸟生活习性中最敏感的气象因子是气温, 候鸟因冬季北方寒冷而迁徙到相对温暖的东洞庭湖, 因此初冬至隆冬季节东洞庭湖候鸟最为集中。由于候鸟停留在东洞庭湖后并不会仅仅因为日平均气温持续上升或下降以及日最低气温的高低而成批飞走, 但对人体舒适度会产生影响。候鸟最为集中的时段是东洞庭湖一年中最冷的时段, 如果考虑日平均气温因子, 会因为兼顾人体舒适度等因素导致候鸟数量多的时候不适宜观鸟; 如果考虑日最低气温因子, 将导致最低气温在候鸟气象指数的设计比较困难。一次强冷空气过程后碧空的夜间辐射降温往往导致日最低气温很低, 但次日白天天气晴朗升温也适宜观鸟, 同时候鸟迁徙途中需要借助风力, 这也是一次强冷空气过后的晴冷天气东洞庭湖候鸟数量较多的原因之一, 而寒流南下

往往伴随气温的剧烈变化且早晨日最低气温很低, 对人类而言舒适度下降。如果强冷空气仅仅伴随风速加大, 气温因子将在观鸟气象指数中的风速因子中体现; 如果强冷空气伴随风速加大的同时出现降雨, 则气温因子在观鸟气象指数中的风速和降雨因子中同时体现; 如果强冷空气导致降雪、积雪甚至雨淞等则不适宜观鸟。因此, 为了便于业务推广应用, 本文设计了观鸟气象指数的时段, 影响因子取值规则中没有考虑气温因子。

鸟类调查表明, 城陵矶水位为24~25 m时最适宜候鸟栖息, 水位对东洞庭湖候鸟食物链至关重要, 对东洞庭湖观鸟产生很大影响。步行观鸟时日照和光线对观测一闪而过的鸟类品种产生影响。同时, 观测的鸟类品种和数量更多体现在观鸟者的技术水平, 与天气关系不大。随着生活水平的提高, 观鸟爱好者开展航调观鸟, 航调经验表明, 理想的航调天气为能见度高, 有高层云以减少地面的反射光, 没有雨、雪、雾, 风速低于40 km/h。

参考文献

- 付蓉, 王曼娜, 杨鹏, 等. 洞庭湖观鸟旅游发展现状及对策. 经济地理, 2008, 28(3): 523-526.
- 钟福生, 颜亨梅, 李丽平, 等. 东洞庭湖湿地鸟类群落结构及其多样性. 生态学杂志, 2007, 26(12): 1959-1968.
- 姚毅, 彭祥林. 洞庭湖水鸟监测与研究. 湖泊保护与生态文明建设——第四届中国湖泊论坛论文集. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2014.
- 严明良, 沈树勤. 环境气象指数的设计方法探讨. 气象科技, 2005, 33(6): 583-588.
- 刘电英, 邹希云, 彭杰彪, 等. 洞庭湖湖面风速与湖区陆地风速的对比分析. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 15902-15903.
- 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(2): 82-88.
- 张延伟, 葛全胜, 姜逢清, 等. 北疆地区1961—2010年极端气温事件变化特征. 地理科学, 2016, 36(2): 296-302.
- 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.
- 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望. 气候与环境研究, 2010(4): 337-353.
- Liu M, Xu X, Sun A Y, et al. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes? Environmental Research Letters, 2014, 9(6): 64002.
- 王蒙, 殷淑燕. 近52a长江中下游地区极端降水的时空变化特征. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1221-1229.
- Zscheischler J, Westra S, Den Hurk B V, et al. Future climate risk from compound events. Nature Climate Change, 2018, 8(6): 469-477.
- Hao Z, Singh V P, Hao F, et al. Compound extremes in hydroclimatology: a review. Water, 2018, 10(6): 718.
- Benari T, Boe J, Ciais P, et al. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. Nature Communications, 2018, 9(1): 1627.
- Lu Y, Hu H, Li C, et al. Increasing compound events of extreme hot and dry days during growing seasons of wheat and maize in China. Scientific Reports, 2018, 8(1): 16700.
- Wahl T, Jian S, Bender J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. Nature Climate Change, 2015, 5(12): 1093-1097.
- Li Y, Ding Y H, Li W, et al. Observed trends in various aspects of compound heat waves across China from 1961 to 2015. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(3): 455-467.
- Sedlmeier K, Feldmann H, Schadler G, et al. Compound summer temperature and precipitation extremes over central Europe. Theoretical and Applied Climatology, 2018: 1493-1501.
- Hao Z, Hao F, Singh V P, et al. Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas. Environmental Research Letters, 2018, 13(12): 124022.
- 李景保, 余果, 欧朝敏, 等. 洞庭湖区农业水旱灾害演变特征及影响因素: 60年来的灾情诊断. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 74-81.
- 廖玉芳, 赵辉, 彭嘉栋, 等. 洞庭湖区旱涝灾害加剧的气象成因. 灾害学, 2016, 31(1): 29-32, 54.
- 田玉刚, 覃东华, 杜渊会. 洞庭湖地区洪水灾害风险评估. 灾害学, 2011, 26(3): 56-60.

(上接95页)

洞庭湖地区一次持续性暴雨特征诊断分析

蒋帅 尹依雯

(湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000)

摘要: 利用国家站和区域站逐小时降水观测资料和NCEP再分析资料, 分析了2017年6月29日—7月1日洞庭湖持续性暴雨过程。结果表明: 1) 暴雨发生在切变线南侧, 急流轴左侧; 副热带高压稳定维持, 高低空急流耦合于洞庭湖区上空; 高空槽波动, 中低层低涡和切变线发展, 有利于暖湿气流沿切变线辐合抬升; 2) 从水汽条件来看, 印度洋水汽为主, 其次是孟加拉湾—南海、太平洋地区; 850 hPa水汽通量增强(减弱)对强降水来临(结束)具有较好指示意义, 水汽强辐合带(中心)对暴雨落区有较好对应关系; 3) 洞庭湖上空的对流层中高层处于南亚高压脊线附近, 高空辐散条件较好; 中低空急流的演变对暴雨的发展有明显影响; 垂直上升运动和辐合辐散配置与降水变化有较好的对应关系; 4) 列车效应与逆风区长时间维持与强降雨密切相关。

关键词: 暴雨, 水汽, 逆风区

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.016

Diagnostic Analysis of a Continuous Rainstorm in the Dongting Lake Area

Jiang Shuai, Yin Yiwen

(Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000)

Abstract: In this paper, continuous rainstorm process of Dongting Lake Area from 29 June to 1 July 2017 was analyzed by using hourly precipitation observation data from national and regional stations and NCEP reanalysis data. The results showed that: 1) The rainstorm occurred in the south side of the shear line and the left side of the jet stream axis; The subtropical high maintained stable, making the high and low air jet coupling and staying over the Dongting Lake Area; The fluctuation of the upper trough, the development of the middle and lower vortexes and their shear lines were conducive to the continuous rainstorm weather caused by the convergence of the warm and wet air flows along the shear lines. 2) From the perspective of water vapor conditions, water vapor in the Indian Ocean was the most important source of water vapor transportation, followed by Bangladesh bending, South China Sea and the Pacific Ocean; The enhancement (weakening) of 850 hPa water vapor flux had a good indication significance for the arrival (end) of heavy precipitation; In addition, the strong convergence zone (center) of water vapor had a good correspondence with the rainfall area. 3) The upper troposphere over the Dongting Lake was near the ridge line of South Asia high. The evolution of middle and low level jet had obvious influence on the development of rainstorm. The vertical upward movement and convergence and divergence configuration corresponded well to precipitation changes. 4) The train effect and the long duration of upwind zone were closely related to the strong rainfall in the upwind area.

Keywords: rainstorm, water vapor, upwind

0 引言

为推动深入实施促进中部地区崛起战略, 促进长江中游城市群一体化发展和长江全流域开发开放, 国务院于2014年4月批复成立洞庭湖生态经济区(以下简称洞庭湖区)。洞庭湖区位于长江中游地区, 属于亚热带季风区, 降水丰沛, 加之其水陆分布、地理特征独特, 除广阔的洞庭湖水体外, 内湖内河及港汊众多, 使得湖区洪涝灾害频发^[1], 城市内涝时有发生,

这对该地区的经济、社会生活造成了重大影响^[2-3]。

持续性暴雨事件降雨量大、持续期长, 因而经常引发洪涝灾害, 对经济和生命财产造成的损失较大, 如1998和1999年的长江流域洪涝^[4-5], 2007年的淮河流域洪涝^[4]。胡娅敏等^[6]研究了河南“75·8”强降水事件的极端异常特征。发现强降水事件是在中高纬度环流异常和台风共同作用下发生的, 贝加尔湖以东阻塞高压和副热带高压(以下简称副高)合并阻挡了7503号台风北上。河南“75·8”强降水的水汽来源与7503号台风具有十分密切的联系。周慧等^[7]分析了2016年7月湖南一次极端持续性暴雨成因, 结果表明: 中纬

收稿日期: 2019年6月26日; 修回日期: 2019年11月28日

第一作者: 蒋帅(1990—), Email: trace_m@foxmail.com

度高空槽的东移、带状分布且稳定少动的副高为中低层西南低涡不断生成发展及“人”字型切变线的维持提供了有利的环流条件；低空、超低空西南急流异常旺盛，中尺度对流发展旺盛是造成持续性降水重要原因。孙建华等^[8]利用HYSPLIT模式，对中国江淮流域持续性暴雨过程的江南型和江北型过程的水汽源地进行分析。发现江淮流域的持续性降雨过程中，来自南方的水汽输送主要受索马里越赤道急流、孟加拉湾南部和印度尼西亚群岛附近越赤道气流，以及西太平洋副高这些系统的影响。

2017年6月29日—7月1日洞庭湖地区出现了罕见的持续性暴雨过程，加之上游四水流域来水，洪峰在洞庭湖遭遇，形成恶劣形势，洞庭湖3471 km一线大堤全线超警，这给当地经济社会造成严重危害。鉴于以上原因本文针对2017年6月29日—7月1日的持续性暴雨展开分析，重点分析了暴雨发生发展的高低空配置和物理量场。以便认识洞庭湖此次持续性暴雨特征，为做好持续性暴雨预报预测提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料

本文使用的资料包括洞庭湖地区国家站、区域站站点资料^[9]，以及NCEP再分析资料（时间分辨率6 h一次，水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ）中的大气环流资料，变量包括1000~10 hPa（共17层）上的位势高度、温度、纬向风和经向风，1000~300 hPa各层比湿及1000~100 hPa的各层垂直速度。

1.2 轨迹模拟方案

选择模拟区域：洞庭湖地区域（ 28° — 30.5° N， 110.5° — 114° E），初始场水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，垂直共三层（模拟初始点为90个）。模拟日期为强降水时段2017年6月29日08时（北京时，下同）—7月1日20时。由于水汽主要存在于大气对流层的中低层，因此本文选取3000、1500、700 m，分别代表700、850、925 hPa，作为HYSPLIT的模拟的初始高度。后向模拟气块三维轨迹时间长度为264 h（11 d），每6 h输出气块的位置，并插值得到相应位置的空气块的物理属性（相对湿度、温度、高度），每隔6 h所有轨迹模拟初始点重新后向模拟追踪264 h^[10]。

2 结果

2.1 实况及天气形势演变

2.1.1 实况

为了深入分析洞庭湖地区持续性暴雨特征，选取了2017年6月29日—7月1日的洞庭湖地区的一次少

见的特大暴雨过程。从过程雨量分布来看（图1a），空间分布整体呈现北少南多，除松滋、荆州、公安、石门、澧县外，其他站点均大于或等于50 mm。洪湖、岳阳、赫山和安化沿线以南均超过了200 mm，安化、平江超过了300 mm。从区域站统计来看，此次过程50~100 mm达69站次，100~250 mm达390站次，250~500 mm达79站次。另外选取了岳阳站（ 29.4° N， 113.1° E）和汨罗站（ 28.9° N， 113.1° E）作时间序列图。图1b为岳阳站和汨罗站6月29日09时—7月1日20时的逐小时降水图。从图中可以看出此次强降水主要对应两次强降水时段，分别是29日晚至30日上午（第一阶段）和30日晚上至1日白天（第二阶段），岳阳和汨罗均有多时次降水超过20 mm/h，前一个阶段的降水强度要大于后一阶段。

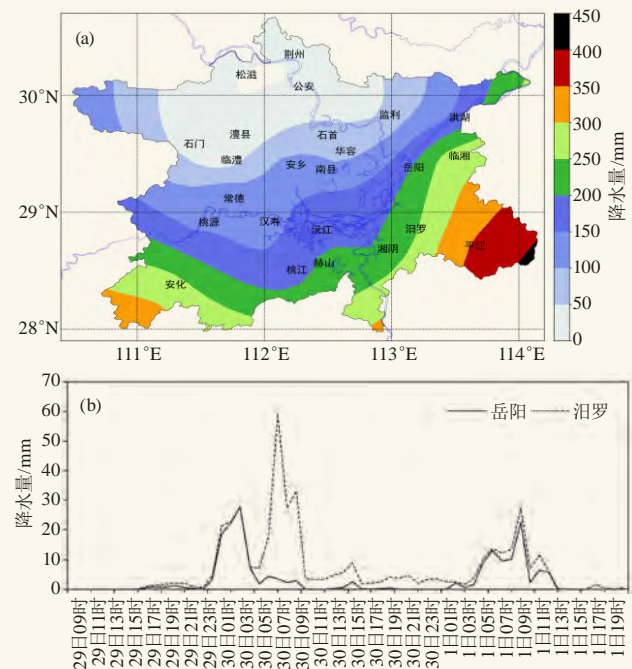


图1 2017年6月29日—7月1日洞庭湖地区累计降水（a），岳阳站和汨罗站逐小时降水（b）

Fig. 1 Accumulated precipitation from June 22 to July 1 (a) and hourly precipitation at Yueyang and Miluo stations (b) in 2017

2.1.2 环流背景

持续性暴雨的发生必须要相对稳定的大尺度环流背景，影响系统有可能在同一地区反复出现或沿同一路径移动，从而造成很大的累积雨量。此次过程中低纬西太平洋副高稳定维持，洞庭湖地区处于副高西侧的强水汽输送带中，有利于水汽源源不断往暴雨区输送。

分析天气尺度系统配置及其演变发现，第一阶段6月29日20时高空200 hPa为分流辐散区，有利于加强高空散热和通风，进而加强对流云团的发生发展。

500 hPa副高南压至广东至福建一带。高空低槽多波动，高空槽位于湖北至湖南西部，洞庭湖区处于槽前偏西南气流控制下，中低空西南急流位于湘中一带。30日08时，200 hPa辐散维持。500 hPa副高稳定维持，高压泵效应明显。夜间伴随低槽发展加强，低涡系统发展深厚（700、850 hPa），位于湖北东部地区。中低层700、850 hPa切变线北推，呈人字形分布。另外切变线南侧的急流和925 hPa超低空急流在夜间显著发展，急流近乎平行切变线。洞庭湖地区处于850、925 hPa出口区的左侧，有利于洞庭湖地区上空水汽辐合抬升。以上系统配置造成洞庭湖区第一阶段强降水发生。

第二阶段6月30日20时，对应200 hPa为稳定的辐散区，提供持续的抽吸作用。500 hPa副高有所南压，新生低槽呈南北向且缓慢东移，位于湖南省西部。中低层切变位于湖北西部和湖南北部。7月1日08时，夜间低槽东移且顺转加强，低涡东移南压，其南侧的中低层切变线南摆，系统发展深厚。925 hPa超低空急流猛烈发展，洞庭湖地区处于超低空急流出口区，存在明显的风速辐合，有利于强降水云团发生发展。以上

系统配置造成了洞庭湖区第二阶段强降水发生。

2.2 物理量诊断分析

2.2.1 水汽条件

对流层中低层水汽通道的建立和水汽的大量集中为对流系统的发展提供了有利的水汽和不稳定条件，进而引发强降水的发生发展。从中低层850 hPa水汽通量图（图2）上可以发现，6月29日20时的水汽通量大值区位于广西至湖南一带，但强度较弱，其水汽通量散度通量同样较弱（图3）。夜间水汽输送发展增强，且从水汽通量散度来看，6月30日08时洞庭湖地区南部存在显著负值区，较6月29日20时明显增强，水汽辐合旺盛发展（图3）。对应实况上，6月29日20—6月30日08时在洞庭湖地区南部出现大暴雨和局地特大暴雨天气。6月30日下午到20时（图略），水汽通量有所减弱，并有所南压，对应洞庭湖地区雨强减小。6月30日20时水汽通量较弱，7月1日凌晨，水汽输送强度再次增强，洞庭湖地区存在较强的水汽辐合（图3），但较上阶段辐合相对较弱，辐合区域较小，对应实况降水强度也弱于上阶段。7月2日水汽通量减弱（图略），位置东移南压，对应水汽辐合减弱

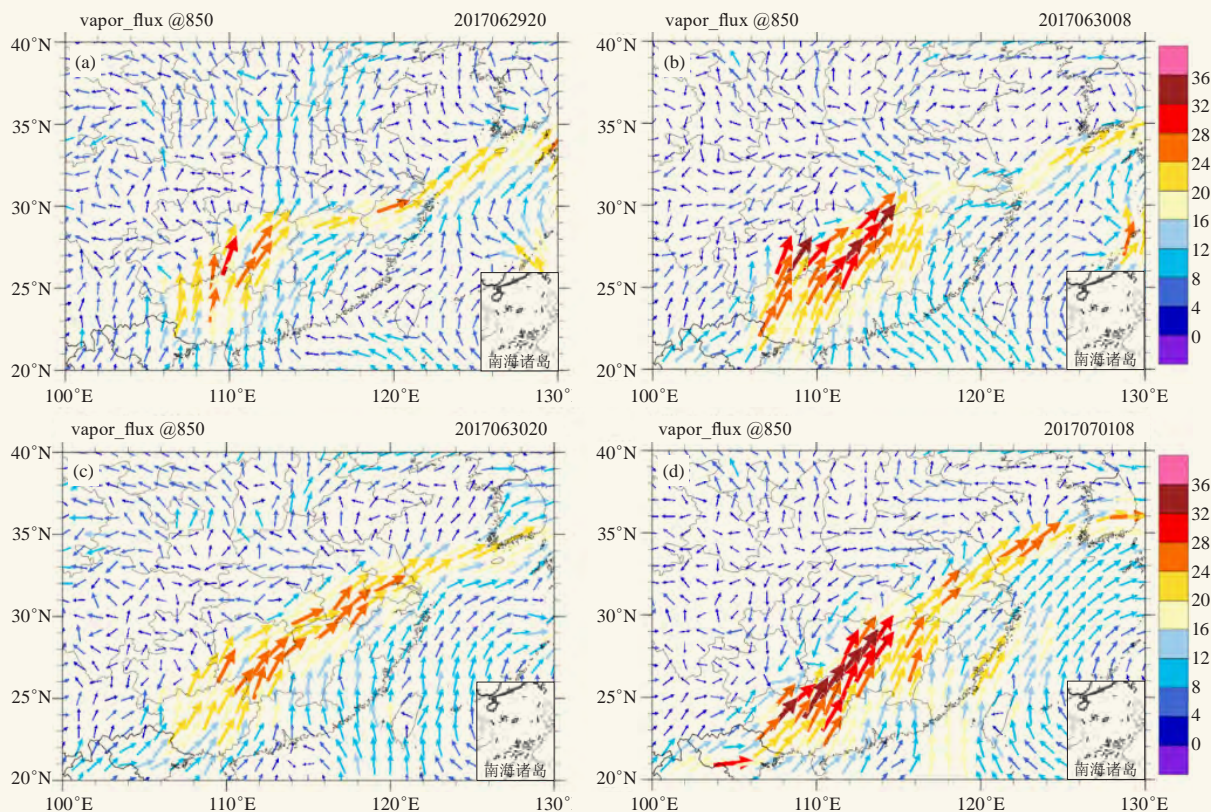


图2 2017年6月29日20时 (a)、30日08时 (b)、30日20时 (c) 和7月1日08时 (d) 850 hPa水汽通量 (单位: $10^{-5}g/(cm \cdot hPa \cdot s)$)

Fig. 2 850 hPa water vapor flux (unit: $10^{-5}g/(cm \cdot hPa \cdot s)$) at 20:00 BT 29 June (a), 08:00 BT 30 June (b), 20:00 BT 30 June (c) and 08:00 BT 1 July 2017 (d)

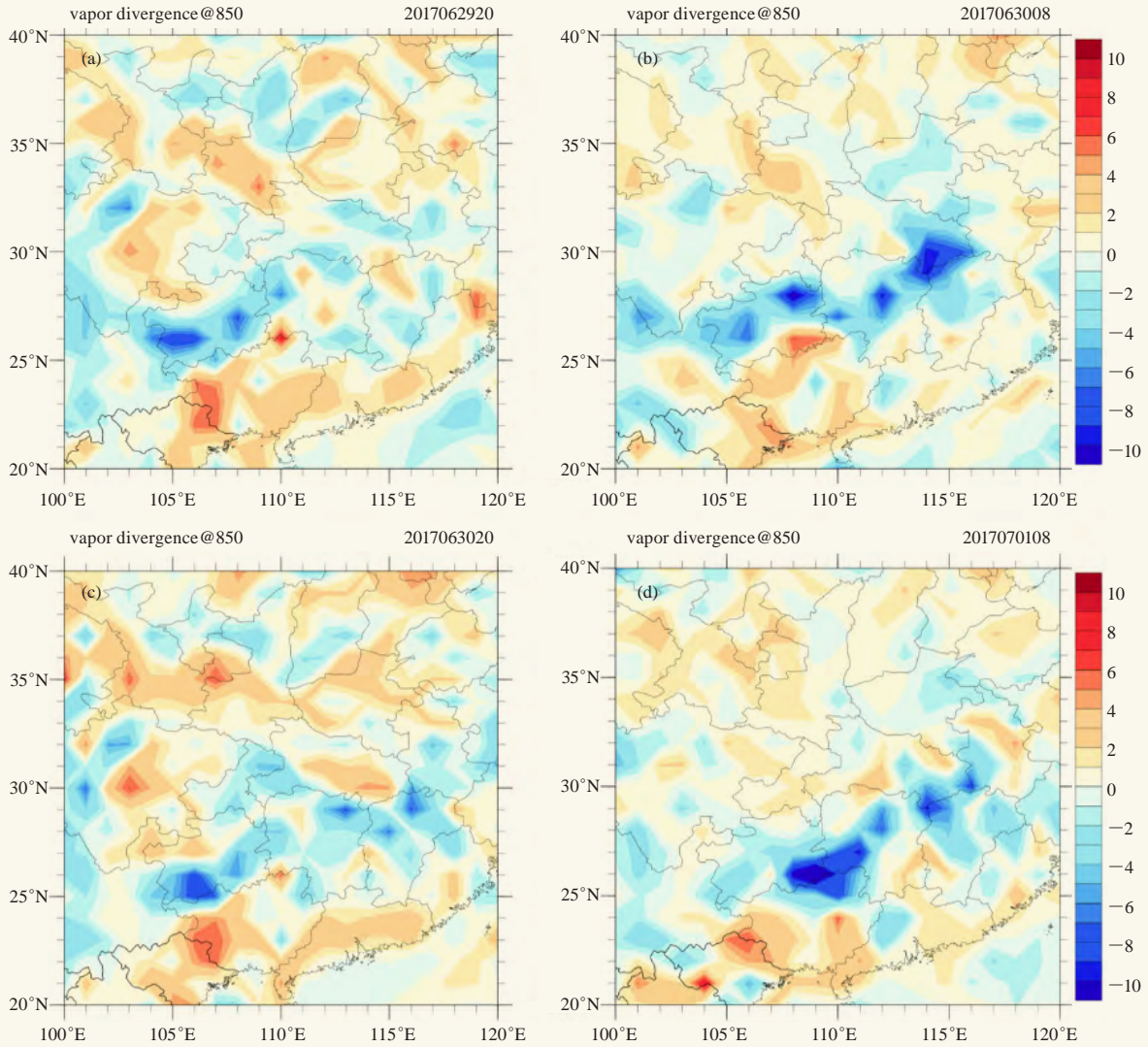


图3 同图2, 但为水汽通量散度 (阴影) 分布 (单位: $10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)

Fig. 3 Same as Fig.2, but for divergence (shading) distribution of moisture flux (unit: $10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)

东移南落 (图3), 降水减弱结束。以上分析表明, 850 hPa水汽通量增强 (减弱) 对强降水来临 (结束) 具有较好指示意义, 此外水汽辐合带 (中心) 对暴雨落区有较好对应关系。

为了分析此次持续性暴雨过程的水汽输送来源, 本文利用HYSPLIT模式模拟此次过程中水汽输送路径和各源地输送贡献, 轨迹模拟方案如方法介绍。本文根据文献[10]划分了欧亚大陆、局地、印度洋、孟加拉湾—南海和太平洋水汽源地 (图4a)。从图4b可以看到, 水汽来源主要位于海洋地区, 一支起源于印度洋地区, 包括印度西部或为索马里地区和印度洋中部地区, 二者经由印度洋东北部共同输送至洞庭湖地区; 另一支起源于南海附近经由中南半岛地区输送水汽。太平洋水汽输送主要起源于菲律宾, 输送轨迹相对较少。从各源地水汽输送贡献来看 (图4b), 欧亚地区

和局部地区的北方源地的没有水汽输送, 主要输送源地为南方的海洋源地, 包括印度洋、孟加拉湾—南海、太平洋地区。从图4c可以看到, 印度洋水汽为最重要的水汽输送源地, 湿 (干) 空气输送贡献达 70.1% (73.6%), 其次是孟加拉湾—南海, 占20.0% (16.6%), 再次是太平洋地区9.9% (9.8%)。

2.2.2 动力条件

高低空急流是暴雨发生、发展最重要的大尺度动力环境因素, 特别是低空急流作为一种动量、热量和水汽的高度集中带, 被认为是给中纬度暴雨提供水汽和动量的最重要的机制。本文基于汨罗站对应经度 113.1°E 作各层风速时间—纬度剖面图 (图5) 分析此次过程发现, 这次过程中高低空急流耦合明显, 从200 hPa (图5a) 看, 高空急流表现为前期强度偏弱, 后期增强, 对应南亚高压脊线 (偏西风位置) 有所南

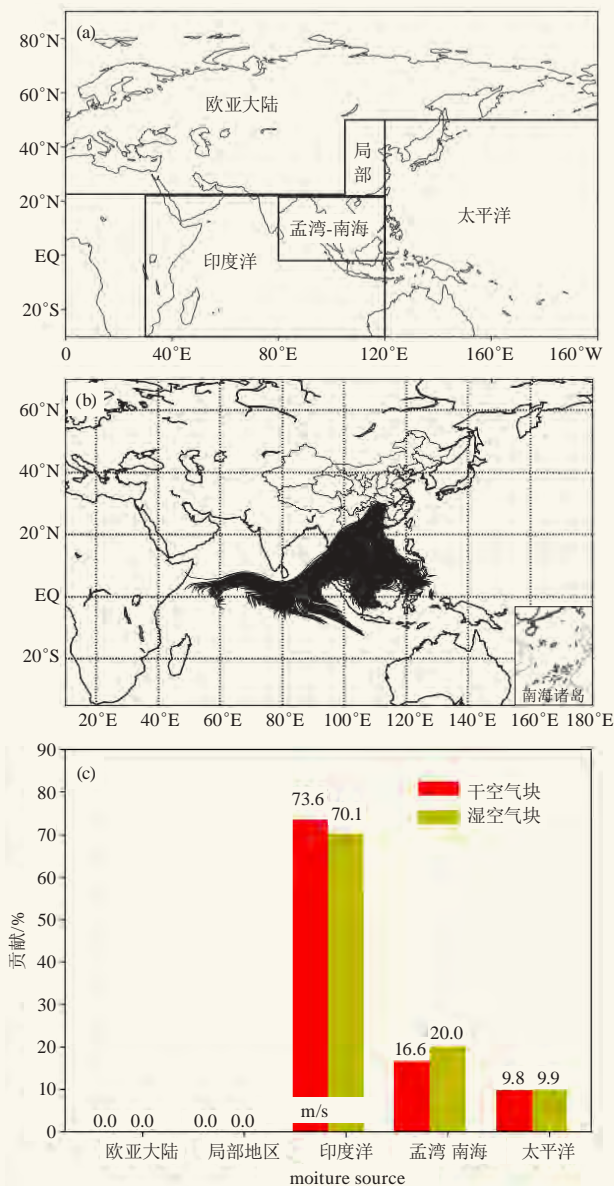


图4 水汽源地划分 (a)、强降水时段水汽输送轨迹 (b)、各源地水汽输送贡献 (c)

Fig. 4 Classification of water vapor source (a), trajectory of water vapor transport during heavy precipitation (b), and contribution of each source to water vapor transport (c)

移, 洞庭湖区整个过程处于高空急流入口处右侧, 高空辐散条件较好且持续时间长。此外中低空急流的演变对暴雨的发展有明显影响。从850 hPa (图5c) 可以发现, 6月29日20时—7月1日20时江南有两次明显的西南气流发展加强的过程, 大值区超过20 m/s西南急流 (最大风速出现在6月30日清晨和7月1日上午), 而且西南气流加强的同时伴有偏东风转东风偏北气流, 气流辐合区位于暴雨区北侧, 形成较强的暖式切变线, 从而引起切变线南侧、急流北侧区域 (强降水落区) 的辐合增强。925 hPa急流发展也具有相同特

征, 同样具有两次急流显著加强过程, 最大急流风速达18 m/s。700 hPa同样具有两次急流加强过程, 但前一次明显较后一次位置偏北, 强度更强, 这与前一次降水更强相对应。不难发现, 暴雨发生区域在切变线南侧, 急流轴左侧, 具有显著的梅雨特征。从同一时段汨罗站逐小时降雨量 (图1b) 可以发现, 对应两次西南急流的加强, 洞庭地区也有两次较强的降雨过程, 汨罗站最强小时降雨量达55.7 mm/h (6月30日06—07时)。7月1日20时随着急流减弱南压, 雨势减弱, 雨带南压。

垂直运动是成云致雨的关键因素, 降水的强度一般与中低层的辐合有关。本文选取了汨罗站 (28.9°N, 113.1°E) 分别做垂直速度、散度的时间—垂直剖面图 (图6)。从垂直速度来看, 同样存在两次较强的上升速度区 (对应着两次强降水阶段), 最大超过2 Pa/s。另外从散度时间—垂直剖面图第一阶段 (6月29日20时至30日上午) 中低层为负值区, 以辐合为主, 辐合层高度延伸至300 hPa, 300 hPa以上高层为强辐散。从第二阶段 (6月30日晚上至7月1日白天) 来看, 7月1日凌晨存在低层 (850 hPa以下) 辐合强烈发展, 但在400 hPa与700 hPa之间转为正值区, 对应辐散。这种低层辐合配合高层辐散有利于垂直运动的维持和加强进而触发强降水的发生。

2.2.3 热力条件

选取了洞庭湖区邻近探空站点长沙站 (黄花站)。分析6月29日20时T-logp图 (图略) 可以发现, LCL (抬升凝结高度) 至0 °C较为深厚, 说明暖云层深厚, 有利于形成高效率降水。其CAPE呈细长分布对应K指数为39 °C, SI指数为-1.31 °C, 有利于短时降水的发生。6月30日08时虽然CAPE值减小, 但由于低层急流加强, 湿空气的强烈输送, 增强中低层不稳定能量和水汽累积, 加强位势不稳定, 对应K指数和SI指数增大, 有利于降水维持, 对应实况6月30日上午降水持续。6月30日20时, 925 hPa至近地面旺盛暖湿气流输送形成低层逆温, 且形成一定大小CIN (195.9 J·kg⁻¹), 有利于低层的水汽和能量的积蓄。对应K指数和SI指数条件较好, 有利于夜间降水增强。7月1日08时K指数为36 °C, 其他指数条件转差, 上午急流再次增强, 对应白天CAPE增大至809.5 J·kg⁻¹, 降水在白天再次发展。随着副高南落, 急流南压, 能量和水汽转弱, 对应雨带移出洞庭湖区。

2.3 中尺度特征分析

6月30日06—07时, 洞庭湖区东部小时雨强达到

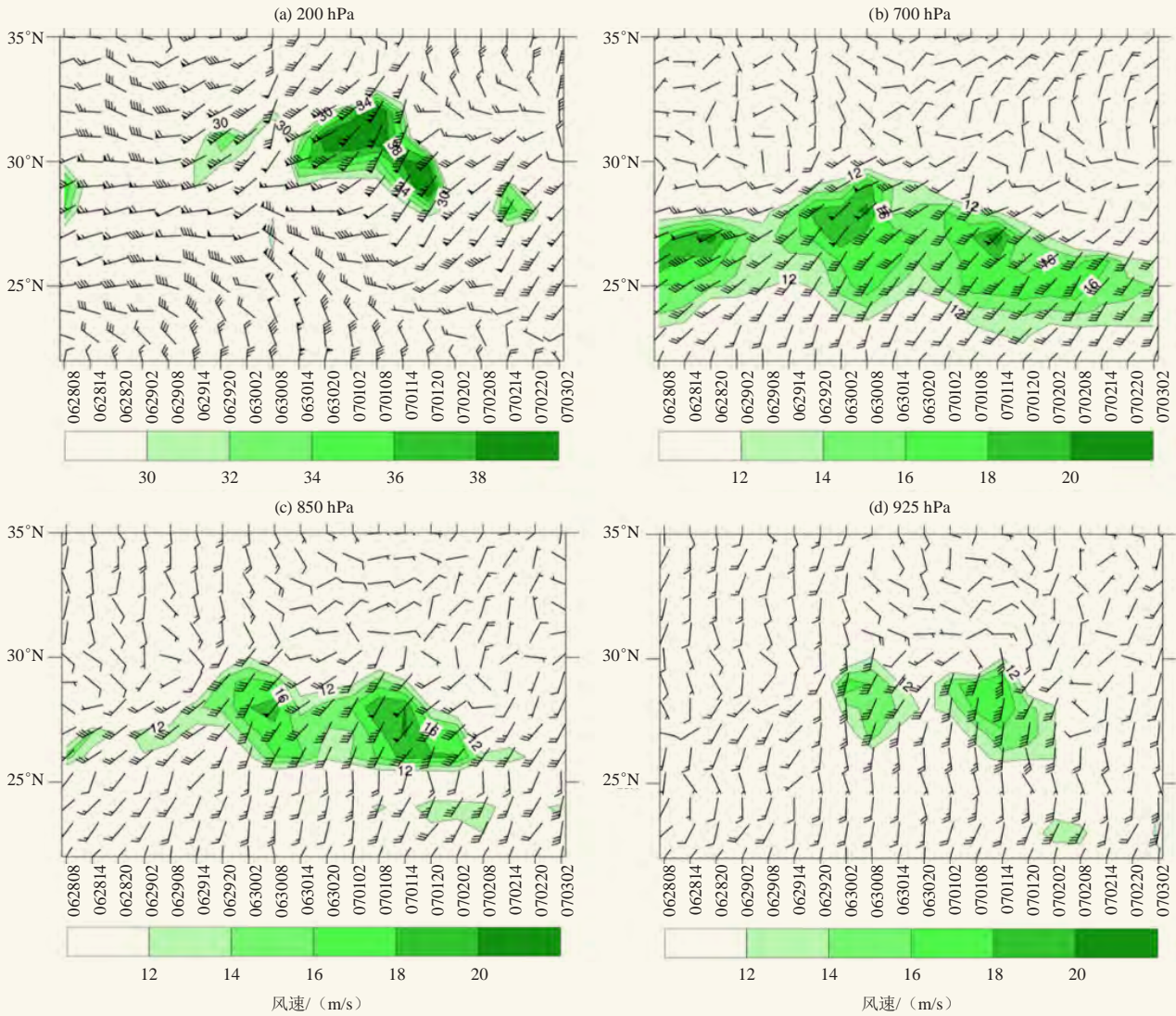


图5 2017年6月28日08时至7月3日02时沿着113.1°E风场: (a) 200, (b) 700, (c) 850, (d) 925 hPa时间—纬度图
Fig. 5 Time-latitude diagram along the 113.1°E wind field: (a) 200, (b) 700, (c) 850, and (d) 925 hPa from 08:00 BT 28 June to 02:00 BT July 2017

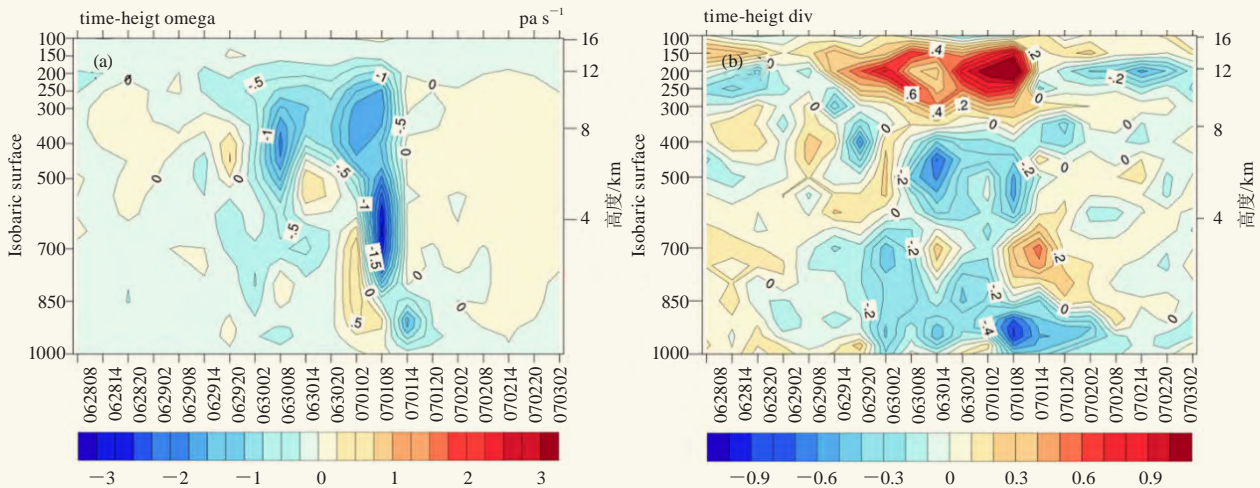


图6 2017年6月28日08时至7月3日02时汨罗站垂直速度(a, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)、散度(b, 单位: $10^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$)时间—垂直剖面图
Fig. 6 Time-vertical profile of vertical velocity(a, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (b: unit: $10^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$) at Miluo Station from 08:00 BT 28 June to 02:00 BT July 2017

50 mm/h以上的区域自动站18个,其中大于80 mm/h达5站,最大98.6 mm/h。从长沙雷达组合反射率因子来看(图7),强回波总体呈东北—西南的带状分布,其移动方向和带状回波的走向夹角很小,利于维持较长的降水时间,最强回波在50~55 dBz。从0.5°径向速度来看,06时12分(图7c),在岳阳南部的湘阴和汨罗地区0.9 km高度(折角处)上存在一个东北—西南向的中尺度辐合性风切变,强降水回波(45 dBz以上)主要位于风切变以北的负速度一侧,中低空急流强盛且稳定维持,为短时暴雨提供丰富水汽。另外其以下0 m/s速度线呈S型,即为暖平流,有利于增强不稳定层结,这与6月30日清晨急流旺盛发展有关;06

时35分,风切变逐渐演化为辐合性的负速度逆风区,强降水回波主要位于逆风区,20 m/s以上的西南急流向下延展到0.7 km高度,此时伴有地面大风,超低空急流得到进一步增强;06时59分,负速度逆风区演化为正速度风场里的弱速度区(10 m/s以下),强降水回波主要位于弱速度区内,超低空西南急流减弱到15 m/s左右,1.5 km以下0 m/s速度线负速度区域大于正速度区域,为低层辐合流场。

分析暴雨区垂直剖面图发现(图8a),强回波中多个对流单体呈线形排列,此次降水过程为低质心强回波造成,其降水效率高,雨强大。在有利的天气系统与中尺度天气条件下,强回波中多个对流单体呈线

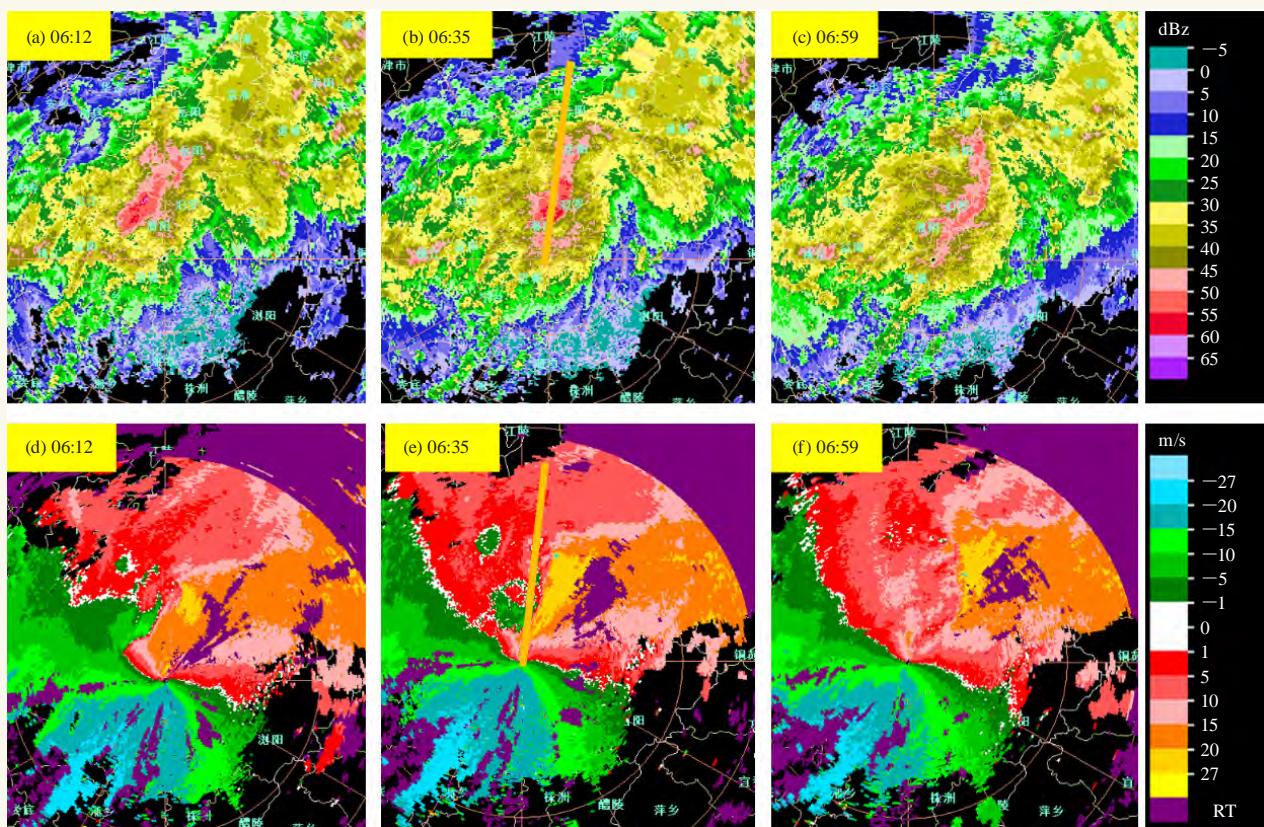


图7 2017年6月30日06—07时雷达基本反射率(a, b, c)和基本速度(d, e, f)图(黄色实线为剖面线)
Fig. 7 Radar basic reflectance (a, b, c) and basic velocity (d, e, f) map from 06:00 BT to 07:00 BT June 30 2017. Solid yellow line represents the section line

形排列,回波在长沙雷达站西北偏北地区(湘阴、汨罗和平江)生成,在500 hPa引导气流的作用下,回波向偏东方向移动,并不断有新生风暴,受其影响形成“列车效应”。从速度图剖面图上(图8b)来看,强回波区对应速度图剖面上存在显著逆风区,从底层一直延伸到4 km上。该逆风区导致湘阴、汨罗短时强降雨(18站>50 mm, 06—07时),可见逆风区的存在与强降水的发生和维持密切相关。

3 结论

1) 暴雨发生区域在切变线南侧,急流轴左侧。副高稳定维持,有利于高低空急流耦合于长期洞庭湖区上空,此外高空槽波动,中低层低涡及其切变线发展,有利于暖湿气流沿着切变线辐合抬升形成持续性暴雨天气。

2) 从水汽条件来看,此次过程中印度洋水汽为最重要水汽输送源地,其次是孟加拉湾—南海、太平

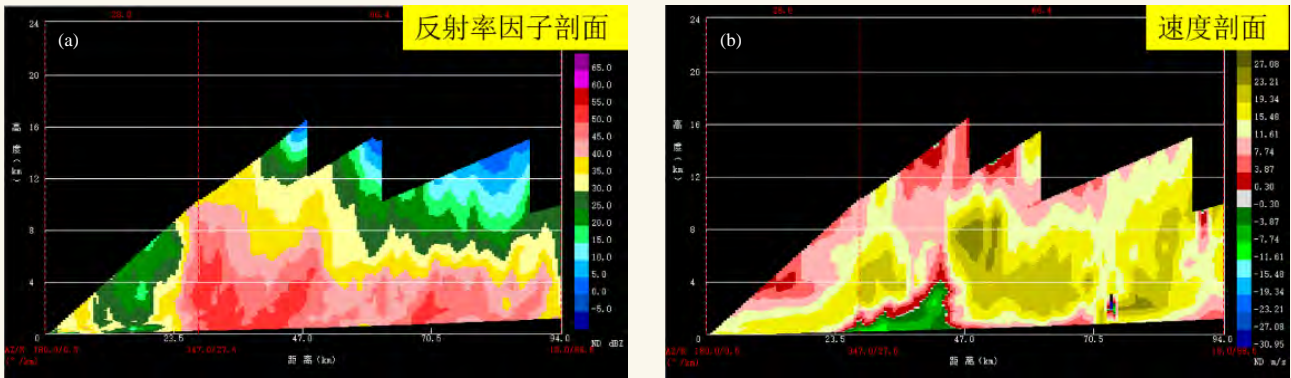


图8 2017年7月1日06时23分强降水发生时对应基本反射率 (a) 和速度 (b) 的剖面图

Fig. 8 Section diagram of the corresponding basic emissivity (a) and velocity (b) diagram when heavy precipitation occurred at 06:23 BT 1 July 2017

洋地区。850 hPa水汽通量增强(减弱)对强降水来临(结束)具有较好指示意义,此外水汽辐合带(中心)对暴雨落区有较好对应关系。

3) 中低空急流的演变对暴雨的发展有明显影响,中低层西南气流加强具有两次急流显著加强过程,对应两次强降水时段。高层洞庭湖处于南亚高压脊线附近,高空辐散条件较好且持续时间长。低空急流强度演变、垂直上升运动和辐合辐散配置与降水变化有较好的对应关系。

4) 混合降水回波维持的时间长,强回波因子对降水贡献大。列车效应导致了强降水的形成,强降水落区的形成与列车效应的存在及其维持时间有密切关系。逆风区和急流的长时间维持与强降雨发生和维持密切相关。

参考文献

- [1] 袁正旋,覃军,曾向红. 湖南岳阳一次大暴雨过程近地层湍流特征分析. 暴雨灾害, 2017, 36(5): 431-439.
- [2] 毛德华. 洞庭湖区洪涝特征分析(1471—1996年). 湖泊科学, 1998, 10(2): 85-91.
- [3] 胡毅鸿, 李景保. 1951—2015年洞庭湖区旱涝演变及典型年份旱涝急转特征分析. 农业工程学报, 2017, 33(7): 107-115.
- [4] 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析. 气候与环境研究, 2007, 12(6): 713-727.
- [5] 陶诗言. 1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 2001.
- [6] 胡娅敏, 翟盘茂, 陈阳. “75·8”持续性强降水事件及其大尺度水汽输送特征. 气象与环境科学, 2015, 38(3): 13-18.
- [7] 周慧, 蔡荣辉, 尹冬德. 2016年7月湖南一次极端持续性暴雨成因分析. 干旱气象, 2018, 36(1): 56-63.
- [8] 孙建华, 汪江洁, 卫捷. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征. 气象学报, 2016, 74(4): 542-555.
- [9] 闵锦忠, 王晨珏, 贾瑞怡. 苏皖地面自动站资料的质量控制及结果分析. 大气科学学报, 2018, 41(5): 63-72.
- [10] 杨浩, 江志红, 刘征宇. 基于拉格朗日法的水汽输送气候特征分析——江淮梅雨和淮北雨季的对比. 大气科学, 2014, 38(5): 965-973.

岳阳市首个县级环境空气质量预报预警系统启动建设

■ 李姿蓉

湘阴县环境空气质量预报预警系统研发于2020年6月正式启动,该系统建成后可预测预报未来72 h内各时段PM_{2.5}、PM₁₀、AQI(空气质量指数)等情况,将为该县生态环境保护提供强有力的技术支持。

据了解,今年来,湘阴县气象、生态环境部门按照“资源共享、优势互补、共同发展”的原则,于2020年4月编制出台了《湘阴环境空气质量预报预警系统》建设方案,日前该系统已进入研发阶段,预计2020年7月该系统将研发完成并上线。

此系统将是岳阳市目前唯一的县级空气质量预报预警系统,由湘阴县气象局组织承建,系统建成后可整合县生态环境、气象部门现有的城市环境空气质量监测站、多要素自动气象站、空气负离子站、大气成分站等站点实时资料和多普勒雷达、卫星、城市地形、工业布局等信息,帮助分析污染的形成原因和污染因素,针对可能出现的污染区域开展防控工作,为改善该县环境空气质量提供技术支持。

(作者单位:湖南省湘阴县气象局)

东洞庭湖湖陆风特征分析

杨伟 刘擎 王威 张巧明 方阳
(湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000)

摘要: 采用岳阳国家气候观测台(简称岳阳站)资料分析东洞庭湖的湖陆风日变化和季节变化特征,结合临湘与华容国家气象站、区域自动气象站资料分析2017年8月4—23日湖区气温、湖陆风、相对湿度的时空四维变化特征,结果表明:岳阳站湖陆风昼夜交替,夏季最强、冬季最弱;湖风强弱主要与南、北风频率相关,城市热岛强弱主要和湖、陆风相关。湖(水)面反光增温效应使湖区一定时空内气温升高,湖面上空气温在中午前后随高度降幅大,夜晚逆温明显;岳阳城市热岛效应明显,以傍晚前后最为突出。受东部丘陵山脉大地形影响,夏季东洞庭湖东北部出现明显的实际湖陆风,西南部主要表现为风速大小的日周期性变化,湖陆风与城市热岛、山谷风存在叠加效应,近距离水体、山丘、建筑物、树木植被等对测站风、气温与湿度等作用明显;实际湖陆风随高度先增大后减小,200 m高度仍存在明显的湖陆风。湖心相对湿度随高度递减明显,湖陆风使岳阳站空气湿度变化显著。

关键词: 东洞庭湖, 湖陆风, 湖心, 湖面反光增温效应, 城市热岛效应, 时空四维特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.017

Analysis of Land-lake Breeze Characteristics of the East Dongting Lake

Yang Wei, Liu Qing, Wang Wei, Zhang Qiaoming, Fang Yang
(Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000)

Abstract: Based on the data of Yueyang National Climate Observatory, the diurnal and seasonal variations of land and lake winds along the east coast of East Dongting Lake from June 2017 to May 2019 were analyzed. Based on the data of Linxiang, Huarong national meteorological station, regional meteorological station, the temporal and spatial four-dimensional variation characteristics of temperature, land-lake breeze and relative humidity in Dongting Lake from 4 to 23 August 2017 were analyzed. The results show that: the lake-land breeze at Yueyang Station alternates day and night, with the strongest in summer and the weakest in winter. The lake wind is positively correlated with the warm and wet air currents, while the urban heat island is positively correlated with the land-lake breeze. Reflecting sunlight from the lake surface causes the air to warm up in a certain area near the lake. In the daytime, especially at noon, the lake surface temperature decreases greatly with the altitude. At night, the inversion layer appears. Yueyang urban heat island effect is obvious, especially around the evening. There are obvious actual lake-land breezes in the northeast and diurnal periodic variations of wind speed in the southwest. There is a superposition effect between lake-land breeze and urban heat island and valley breeze. Close water, hills, buildings, trees and vegetation have obvious effects on wind, temperature and humidity of the station. The actual lake-land breeze increases first and then decreases with the height, and obvious lake-land breeze still exists at the height of 200 m. The relative humidity of the lake center decreases obviously with altitude. The Lake breeze makes the air humidity of Yueyang station increase significantly, and the urban land breeze makes the lake center humidity decrease significantly.

Keywords: East Dongting Lake, lake-land breeze, lake center, lake surface reflective warming effect, urban heat island, four-dimensional characteristics of time and space

0 引言

湖陆风是一种呈现明显日变化特征的中小尺度天

气现象。湖面与陆地显著的温度差异是湖陆风的成因所在,在湖泊附近陆地,白天受太阳短波辐射增温比湖面快,空气膨胀上升,低层空气自湖面流向陆地,形成湖风;夜间陆地比湖面辐射冷却得快,空气下沉,低层空气自陆地流向湖面,形成陆风,从而出现风向昼夜交替的现象。通常来说,离湖区越近,湖陆风越明显^[1]。

中国关于湖陆风的研究多集中在相对较大的内陆

收稿日期: 2019年7月5日; 修回日期: 2019年12月3日
第一作者: 杨伟(1967—), Email: 1093420326@qq.com
资助信息: 湖南省气象局2016年重点科研课题(XQKJ16A003);
湖南省气象局2018年预报员专项(XQKJ18C007);
交通运输部建设科技项目(2013318798320); 湖南省
交通科技项目(201219)

湖泊地区,李连方^[2]、林必元等^[3]、刘电英等^[4]利用洞庭湖周边典型站点资料分析发现,洞庭湖区湖陆风明显,夏季最明显,湖陆风厚度约为300 m。李维亮等^[5]发现长江三角洲城市热岛效应、海陆风与太湖湖陆风相互影响;殷长秦等^[6]和于强等^[7]对巢湖流域典型站点资料分析发现,湖陆温差是湖陆风现象发生的关键因子;王浩等^[8]建立中小尺度数值模式发现,水体对山地的气温和风速影响明显,在湖陆风的上方有返回气流存在;李照国等^[9]选用夏季鄂陵湖湖滨地区的晴天资料分析发现,近地层气象要素受湖陆风环流影响较大,辐射各分量具有典型日变化;张茜等^[10]对博斯腾湖的湖陆风特征及其数值模拟研究发现,博斯腾湖北侧湖风与中天山南侧谷风叠加效应造成局地环流增强。由于探测场地、环境、能力所限,目前尚缺少对湖陆风全面系统、深入细致的研究,湖陆风与城市热岛叠加影响、气温与湿度差异及其成因等研究较少,湖(水)面反射太阳光到湖面上空充沛的水汽、附近陆地建筑物、植被等物体上导致气温上升现象尚未被发现与重视。

东洞庭湖是洞庭湖湖系中最大的湖泊,为长江中游防汛重要地段。岳阳国家气候观象台(简称岳阳站)北部紧邻岳阳楼,西部即为东洞庭湖,是全国唯一建在大型水体附近、且观测资料时间跨度近百年的气象观测站;东部为岳阳市城区,因此兼具湖区和城市气候特征,为湖陆风、湖泊与城市气候相互影响研究提供了得天独厚的宝贵代表性资料。为开展杭瑞高速洞庭湖大桥建设的气象服务需要,2014年10月湖南省气候中心与岳阳市气象局联合在东洞庭湖出口西侧芦苇滩、西桥塔北侧修建了70 m高测风塔,2017年5—12月又在东桥塔H形南塔顶安装了200 m高测风仪。为水上安全气象服务需要,2016年1月在东洞庭湖东岸修建了七里山船舶、鹿角等10个海事站,并且在湖心灯塔修建了扁山与煤炭湾2个自动气象站。本文利用近年较为丰富详实的探测资料分析湖陆风日变化特征和季节特征,夏季气温、湖陆风、湿度的时空四维特征,发现湖(水)面反光增温效应现象、分析湖陆风与城市热岛的叠加影响与主要相关因素,较好地解释了湖陆风强度、维持时间与江湖附近气温、湿度差异等成因,为湖区气象科学研究、科技服务与防灾减灾提供参考。

1 站点选取和方法介绍

气象站点首选位于东洞庭湖北岸滨湖的岳阳站(113.05°E, 29.23°N, 海拔53 m),湖岸线几乎呈南北向,东南方为岳阳市中心城区。另外选取东洞庭

湖西北部华容国家一般气象站(112.33°E, 29.31°N, 海拔31 m, 距离湖面33 km),东北部临湘国家一般气象站(113.27°E, 29.29°N, 海拔60.4 m, 距离湖面37 km)。区域自动气象站选取湖区周边南湖站、风雨山、鹿角、漉湖芦苇场水管站(简称漉湖站)、隆庆莲场、良心堡、穆湖铺、七里山船舶站,煤炭湾与扁山湖心灯塔自动气象站(简称煤炭湾站、扁山站),杭瑞高速洞庭湖大桥测风塔(简称测风塔)等(图1)。



图1 洞庭湖区气象站点分布图
Fig. 1 Distribution map of meteorological stations in Dongting Lake area

采用岳阳站2017年6月—2019年5月的逐时观测资料分析湖陆风的日变化特征和季节变化特征。为全方位了解夏季湖陆风时空变化四维特征,通过资料完整性、灵敏性、典型性检查筛选,选取2017年8月3日21时—23日20时多种气象资料,时间步长为每小时一次,测风塔高度梯度为:10 m、30 m、50 m、60 m、70 m(桥西)、200 m(桥东)共6个层次,综合分析研究湖区平均气温、风场、相对湿度等气象要素变化特征及其成因。该时段洞庭湖出口城陵矶水位26.07~28.19 m,能代表东洞庭湖夏季大致情况。

为有效识别湖陆风,首先将各时次的测站风分解为 u 和 v 分量,分别代表东西方向和南北方向的风(西风、北风为正值,东风、南风为负值),计算出各站的年(季、月、时段)逐时 u 、 v 平均值,之后将24 h的逐时平均值 u 、 v 相加求平均获得全日平均值,再用逐时的年(季、月、时段)平均值 u 和 v 减去全日平均

值得到逐时距平值。全日平均值可以看作是系统风即背景风，逐时平均值视作实际风，用实际风减去系统风得到距平风（西风、北风为正值，东风、南风为负值），通过分析逐时距平值的日变化特征，就可以了解湖陆风发生规律。

2 湖陆风特征分析

2.1 湖陆风日变化特征

分析岳阳站2017年6月—2019年5月逐时风资料可知（图2）， u 的日变化有明显的规律性，09—18时为正距平（西风、湖风），13时最强湖风风速为 $0.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，19—08时为负距平（东风、陆风），05时最强陆风风速为 $-0.48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，湖风强于陆风；由于 u 的全日年平均值仅为 $-0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，因此实际湖陆风也是相当明显的，湖风持续时间长达8 h。 v 的日变化也有明显的规律性，13—21时为正距平（北风），16时最强正距平达 $0.36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，22—12时为负距平（南风），07时最强负距平达 $-0.22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，即午后至初夜距平风由城北吹向城南，持续9 h，夜间和上午由城南吹向城北，持续15 h。由于 v 全日年平均值为 $0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，从图可以看出全日实际风均为北风，只是午后更强。这主要是由于岳阳城市中心位于岳阳站东南部，午后在城市热岛效应作用下，岳阳站附近地区气温南高北低形成的。

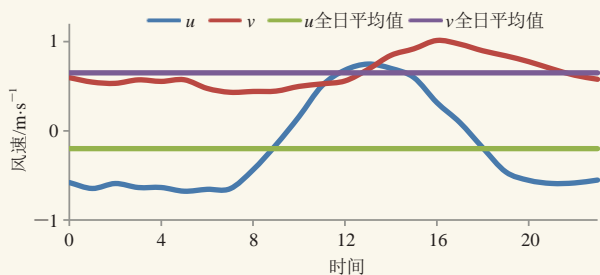


图2 2017年6月—2019年5月岳阳站平均风速逐时变化
Fig. 2 Hourly variation of average wind speed at Yueyang Station from June 2017 to May 2019

2.2 湖陆风季节特征

东洞庭湖水位随季节变化明显，湖水面积冬小夏大，主汛期6—8月最大，因此探讨湖陆风季节特征时采用以下分季方法：春季（3—5月），夏季（6—8月），秋季（9—11月），冬季（12月—次年2月）。

分析岳阳站2017年6月—2019年5月两年逐时风资料（图3）可知，岳阳站春、夏、秋、冬季四季 u 全日平均值分别为 -0.22 、 0.26 、 -0.29 、 $-0.56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，日振幅分别为 1.71 、 2.13 、 1.06 、 $1.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，实际西风持续时间分别为8、10、7、3 h，全日西风正距平（湖风）总和分别为 6.55 、 8.01 、 3.99 、 $3.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，可见湖陆风

夏季最强、冬季最弱。四季 v 全日平均值分别为 0.17 、 -0.41 、 1.43 、 $1.43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，日振幅分别为 0.61 、 0.95 、 0.72 、 $0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，实际北风持续时间分别为20、4、24、24 h，全日北风正距平总和分别为 1.67 、 2.93 、 1.90 、 $1.26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，可见城市热岛效应夏季最强、冬季最弱。

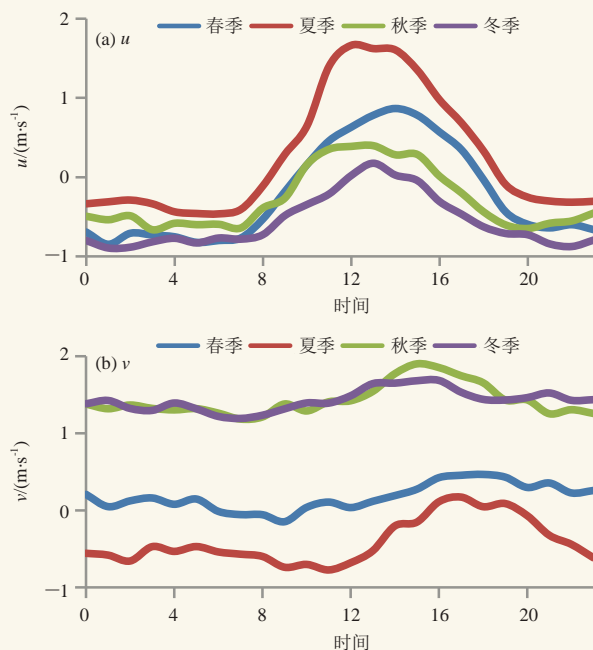


图3 2017年6月—2019年5月岳阳站四季逐时平均风速日变化
Fig. 3 Diurnal variation of hourly average wind speed at Yueyang station from June 2017 to May 2019

从图3可以看出，夏、秋、冬季湖风（西风）在12—13时达到最强，这是因为12—13时城市下班交通高峰、午餐烹调高峰等与太阳辐射叠加形成城市热岛高峰，湖陆温差达到最大所致。春季由于上午降水较多、对流较强，故城市热岛中午高峰较弱；14—15时上班交通高峰与太阳辐射叠加时城市热岛最强，因此湖风最强。

将2017年6月—2019年5月每月15日08时东洞庭湖出口城陵矶水位按季节求算术平均值，得到春、夏、秋、冬四季水位分别为24.39、29.04、25.32、21.7 m。从四季水位数据可以看出，水位高低及湖水面积大小不是湖陆风强弱的主要成因。

计算岳阳站春、夏、秋、冬四季西风（湖风）正距平总和序列 6.55 、 8.01 、 3.99 、 $3.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 与2017年6月—2019年5月16个方位四季的风向频率（图4）序列的相关系数（表1），得出偏南风、偏西风（包括NNW）与湖风强度呈明显正相关，东北风（包括NW）与湖风强度呈明显负相关，即暖、湿系统（气候背景风）越强，湖风越强；冷、干系统越强，湖

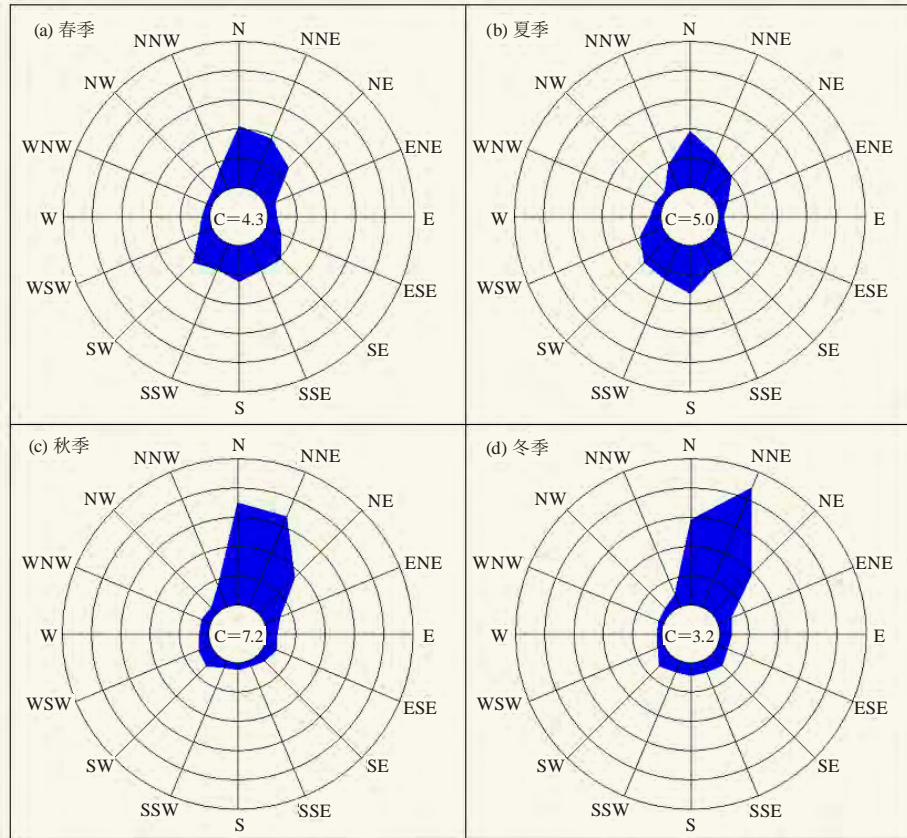


图4 2017年6月—2019年5月岳阳站四季的风向频率玫瑰图（每圈间隔7%）

Fig. 4 Wind direction frequency rose map of the four seasons at Yueyang Station from June 2017 to May 2019 (7% interval per lap)

表1 2017年6月—2019年5月四季湖风（西风正距平）、城市热岛（北风正距平）与16个方位风向频率序列相关系数表
Table 1 Coefficient tables of correlation between four seasons lake wind (westerly positive anomaly), urban heat island (northerly positive anomaly) and 16 azimuth wind direction frequency series from June 2017 to May 2019

种类	16方位风向相关系数								
湖风	风向	SSW	S	SW	SSE	WSW	SE	NNW	W
	相关系数	0.97	0.97	0.95	0.91	0.90	0.90	0.80	0.72
	风向	ESE	WNW	NW	ENE	N	E	NNE	NE
	相关系数	0.10	-0.02	-0.42	-0.84	-0.89	-0.92	-0.98	-0.99
城市热岛	风向	WSW	W	NNW	SSW	S	SW	WNW	SSE
	相关系数	0.98	0.91	0.91	0.73	0.69	0.58	0.52	0.51
	风向	SE	ESE	ENE	N	NW	NNE	NE	E
	相关系数	0.46	-0.36	-0.36	-0.51	-0.66	-0.78	-0.88	-0.97

风越弱，并且系统冷暖（南北风频率）起主导作用。计算岳阳站四季北风正距平总和和序列1.67、2.93、1.90、1.26 $m \cdot s^{-1}$ 与2017年6月—2019年5月16个方位四季的风向频率序列的相关系数，得出偏西风（包括NNW）、偏南风与城市热岛强度呈明显正相关，东部陆地刮来的东风（包括NW）、北偏东风与城市热岛强度呈明显负相关，因此湿、暖系统越强，城市热岛越强；干、冷系统越强，城市热岛越弱，并且系统干湿（湖陆风频率）起主导作用。同时可以看出岳阳城

市热岛与湖风强度呈现明显的正相关。

3 夏季湖陆风特征

3.1 气温

3.1.1 水平分布特征

分析2017年8月4—23日逐时平均气温日变化（图5）可知：煤炭湾与扁山湖心灯塔站日平均最低气温为27.7 $^{\circ}C$ 、27.8 $^{\circ}C$ ，分别出现在07、06时；滨湖岳阳站、南湖站日平均最低气温为28.0 $^{\circ}C$ 、27.8 $^{\circ}C$ ，略高

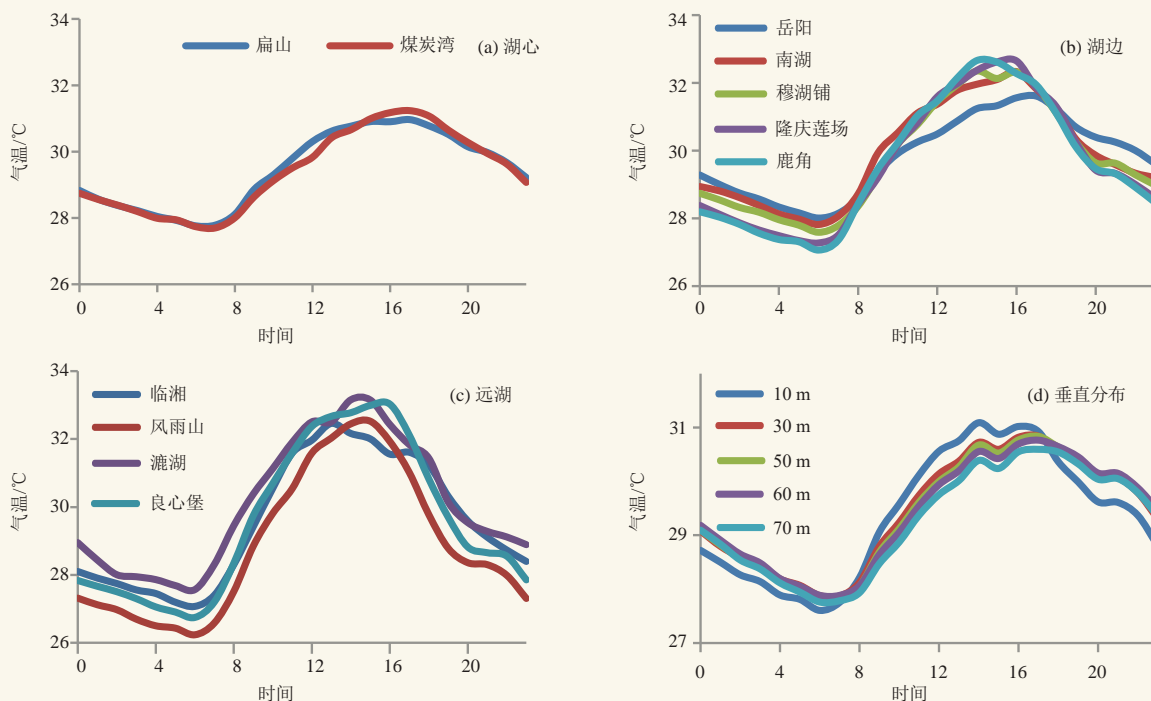


图5 2017年8月4—23日东洞庭湖区逐时气温分布图

Fig. 5 Hourly temperature distribution of East Dongting Lake area during 4 August to 23 August 2017

于湖心，其他各站均低于湖心，风雨山、良心堡日平均最低气温分别为 $26.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，比湖心低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，湖边及较远地区最低气温均出现在06时。煤炭湾与扁山站日平均最高气温为 $31.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $31.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，均出现在17时；受白天湖风影响，岳阳站最高气温 $31.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，略高于湖心；其他湖边站及较远地区最高气温均出现在16时以前，达 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。总而言之，湖心气温日较差小于周边陆地。

3.1.2 垂直分布特征

从测风塔气温资料（图5）可知，白天气温随高度降低，中午前后降温幅度最大，12时10 m高度气温比70 m高度高 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；夜晚气温则以10 m最低，30~70 m温差很小，并以60 m气温最高，23时60 m气温比10 m高 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气温随着高度升高而下降的一般规律是：从地面到高空11 km时，每升高1 km气温下降 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，由上述气温昼夜变化可知，湖面上空中午降温幅度明显大于一般规律，夜晚出现明显的逆温层，这表明湖面上空白天为下沉气流，12时左右最强；夜晚为上升气流，23时左右最强。

3.1.3 湖（水）面反光增温效应

湖（水）面如镜，白天太阳光照射在湖（水）面上发生反射作用，反射到湖区上空充沛的水汽、气溶胶上以及周边陆地建筑物、树木植被、丘陵山脉等，使得一定时空范围内气温升高，以早晨和傍晚最明

显。从图6可以看出，岳阳站西部湖面反光明显，且2019年7月21日16:56的反射强度明显强于16:29。例如2017年8月4—23日08—09时东洞庭湖与悦来湖西部良心堡站平均气温升高 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而东岸的岳阳站、七里山船舶站升温仅 0.8 、 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，傍晚16—17时岳阳站、七里山船舶站气温升高 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而良心堡站气温下降 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。湖心最高气温出现时间明显晚于陆地，也主要是傍晚强盛的湖面反光增温效应和湖陆风锋面向湖面移动的叠加影响所致。

岳阳、扁山、煤炭湾、临湘站2018年1月、4月逐时气温分布如图7所示，1月午后最高气温从高到低依次为临湘 $6.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、煤炭湾 $5.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、岳阳 $5.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、扁山 $5.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，傍晚17—18时气温降幅大小依次为临湘 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、岳阳 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、煤炭湾 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、扁山 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。临湘站位于丘陵山区，气温日较差最大、傍晚降幅最大；该时段岳阳站主导风向为NNE，其次为N、NE，在主导风向控制下，湖面反光增温效应与湖风对岳阳站影响较小，因此岳阳站气温日较差与傍晚降幅较大；扁山站位于湖心岛灯塔上，四周为宽广湖面，因此气温日较差最小，傍晚受湖面反光增温效应影响，气温下降缓慢、降幅最小；该时期东洞庭湖出口城陵矶水位维持在 $20\sim 21.5\text{ m}$ ，湖区露出大面积泥涂、沙洲，煤炭湾站位于沙洲上，东侧为湖面，西侧为大面积泥涂区，同时受水面、沙洲与泥涂等影响，因此气

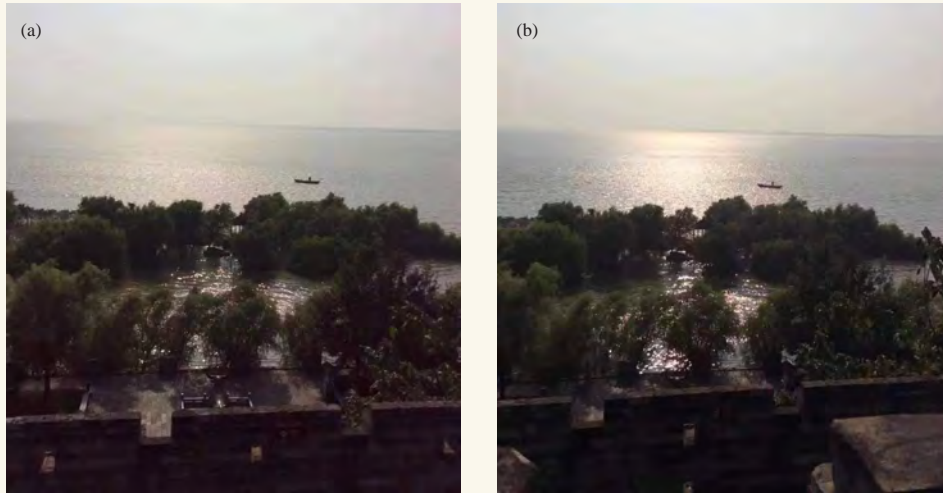


图6 2019年7月21日岳阳站西边东洞庭湖实景
(a) 16:29; (b) 16:56

Fig. 6 The scene of East Dongting Lake in the west of Yueyang Station on 21 July 2019
(a) 16:29; (b) 16:56

温日较差、傍晚降幅大于扁山站。岳阳、扁山、煤炭湾3站20—21时气温略有上升，是因为该月20—21时有十多次强弱不同的日周期性暖锋影响（其他要素亦然）。4月东洞庭湖区偏南风已占主导地位，城陵矶水位大部分时候在22~24 m，湖区沙洲基本淹没，泥涂面积减小、湿度增大。东南风致使岳阳站、扁山站受城市热岛效应影响，早晨前后气温较高；西南风致

使湖风吹向岳阳站，下午到傍晚岳阳、扁山、煤炭湾三站环境背景与湖面反光增温效应基本一致，因此气温差别很小。

3.2 湖陆风

分析2017年8月4—23日东洞庭湖东、西、南、北、湖心以及测风塔不同高度逐时平均风向风速日变化，得到以下结果。

3.2.1 东部

湖区东部岳阳、鹿角、南湖、临湘站逐时平均风速日变化如图8所示，4站逐时平均 u 的日振幅分别为2.38、1.22、1.66、0.94 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，全日平均值为0.20、-0.23、0.49、0.46 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，正距平时段为10—18、09—17、08—17、11—17时，西风正距平（湖风）总和分别为8.08、4.18、4.6、2.33 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可见日变化有明显的规律性， u 分量白天为正距平西风，由湖面吹向陆地；夜间和清晨为负距平东风，由陆地吹向湖面，岳阳站湖陆风最强、南湖次之，随着与湖面距离的增加，湖陆风逐渐减弱，但持续时间更长，从图8可以看出实际湖陆风也是相当显著的。

4站逐时平均 v 的日振幅分别为1.09、0.99、1.20、1.40 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，全日平均值为-1.33、-0.85、-0.75、-1.06 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，正距平时段为14—21、15—22、14—22、17—07时（04时除外），北风正距平总和分别为3.26、2.19、3.39、3.85 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 v 分量正距平北风持续时间以岳阳、鹿角8 h最短、临湘14 h最长，振幅、北风正距平总和以临湘最大、鹿角最小。临湘站北部为丘陵、南部为城区，南北风转换是山谷风与城市热岛效应相叠加形成的；岳阳站西部为东洞庭湖，东北

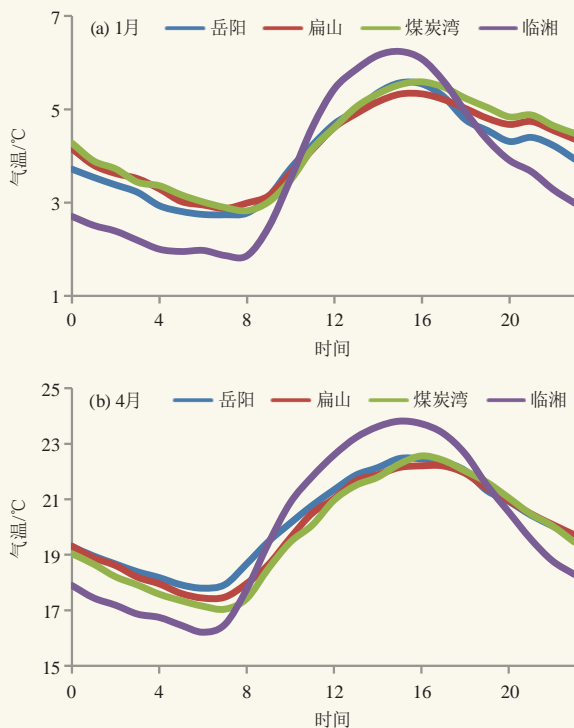


图7 2018年1月、4月东洞庭湖区逐时气温演变图
Fig. 7 Hourly temperature distribution map of East Dongting Lake area in January and April 2018

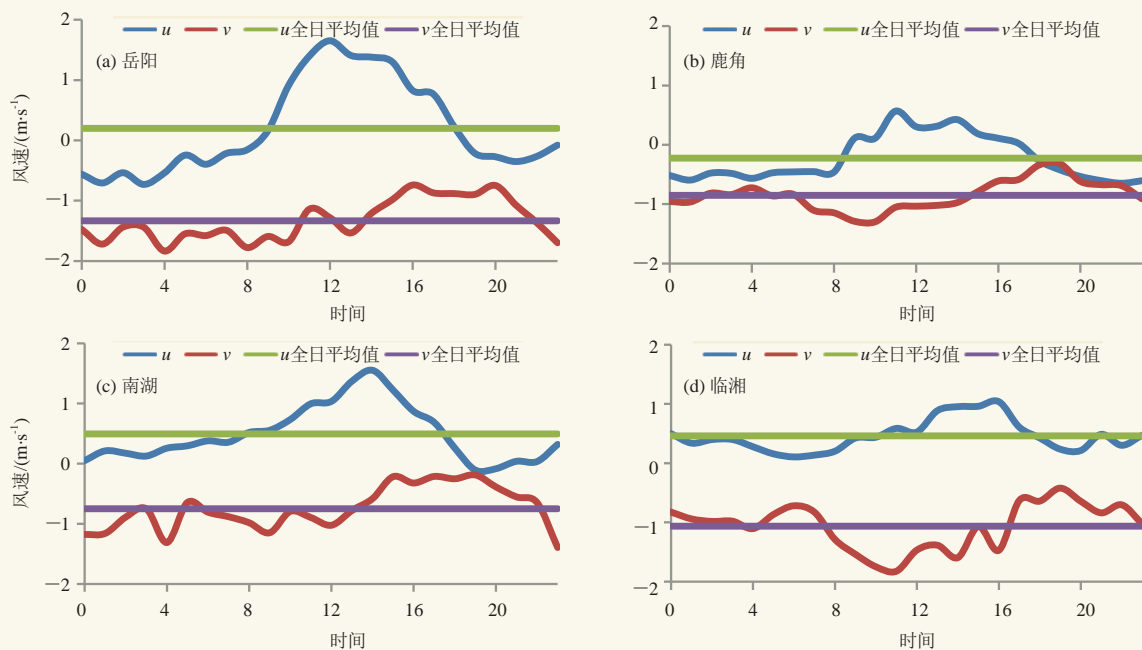


图8 2017年8月4—23日东洞庭湖东部逐时平均风速日变化

Fig. 8 Diurnal variation of hourly average wind speed in eastern Dongting Lake during 4 August to 23 August 2017

部为岳阳楼景区以及郊区，东南部为城市中心、较远处为南湖和南部丘陵山区，南北风转换主要是城市热岛效应、南湖下午到傍晚反光增温效应叠加形成的，因此北风正距平较大值从下午16时持续到20时；南湖站位于岳阳市区南部边缘、南部为南湖，稍远为丘陵山区，南北风转换主要是南湖湖陆风、山谷风与南湖下午到傍晚反光增温效应叠加形成的，与岳阳站相似但正距平较大值位相提前约1 h；因为该站南部受东南—西北向的龙山等山脉阻挡，故南风风速较小。鹿角镇呈向东洞庭湖突出的鹿角状，鹿角站东南部百余米有较大池塘、西南部距离洞庭湖水体仅百余米，南北风转换主要是湖陆风效应和湖（水）面反光增温效应叠加形成的；鹿角站位于岳阳县地方海事处院内，受建筑物与树木遮挡影响较大，因此风速较小。从图8可以看出，上述4站实际上都吹南风，南北风距平转换实际表现为南风风速大小的日周期性变化。

3.2.2 西部

湖区西部良心堡站逐时平均风速日变化如图9所示，逐时平均 u 的日振幅为 $0.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，全日平均值为 $-0.60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，负距平时段为09—16时，风速总和为 $1.96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，实际东风持续时间24 h。可见 u 分量白天为负距平东风，由湖面吹向西部陆地；夜晚到清晨为正距平西风，由西部陆地吹向湖面。由于河湖密布，导致影响因素较多，故呈现波动状态。良心堡东部有东北—西南向悦来湖，受早晨湖面反光增温效应影响，气温西高东低明显，因此最强湖风出现在09时，负距

平达 $-0.48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，实际东风 $1.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。逐时平均 v 的日振幅为 $0.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，全日平均值为 $0.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，较明显正距平时段为16—00时，负距平时段为10—15时。 v 分量傍晚前后为正距平，中午前后为负距平，北风正距平持续时间为9 h，南风最强负距平 $-0.37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，这主要是由良心堡北部七女峰、桃花山等山脉丘陵形成的山谷风造成的。

隆庆莲场站逐时平均 u 的日振幅为 $1.41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，全日平均值为弱西风 $0.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，08—16时为正距平西风，17—07时（00时除外） u 为负距平，与良心堡明显不同。由于隆庆莲场站西边为莲场水体，东部靠近东洞庭湖，故日出后首先受湖面反光增温效应影响，气温西低东高，之后受西湖东陆大地形影响，西风逐渐增大，13—14时 u 正距平达 $0.74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；傍晚前后，莲场水体东部因反光效应增温，东洞庭湖西部气温则明显下降，该站附近气温东低西高， u 东风负距平傍晚以后达到最大，20时达 $-0.67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，从图9可以看出，实际湖陆风的日周期性变化是相当明显的。该站逐时平均 v 的日振幅为 $0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，全日平均值为南风 $-0.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，18—01时为正距平，08—13时为负距平，与良心堡相似，但南风较大。

3.2.3 南部

湖区南部漉湖站（图10）逐时平均 u 的日振幅为 $1.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，全日平均值为东风 $-0.72 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，16—23时为正距平，08—13时为负距平。逐时平均 v 的日振幅为 $0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，全日平均值为弱北风 $0.20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，

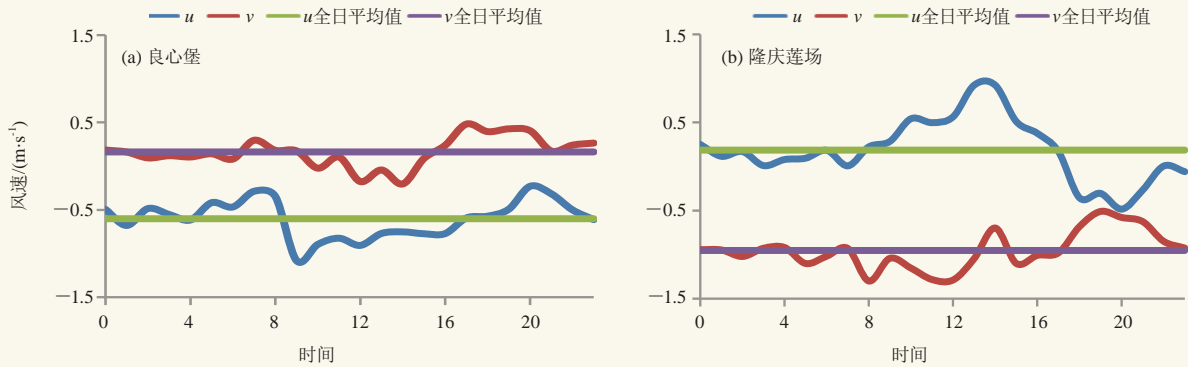


图9 2017年8月4—23日东洞庭湖西部逐时平均风速日变化

Fig. 9 Diurnal variation of hourly average wind speed in the west of East Dongting Lake during 4 August to 23 August 2017

07—12时为正距平, 13—19时为负距平。由于澧湖站南边为草尾河、东部靠近湘江, 故日出后首先受草尾河、湘江水面、澧湖等向西反光增温效应和弱东北背景风影响, 站点附近气温西南高东北低, 东北风逐渐增大, 12时 u 负距平达 $-0.59 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 10时 v 正距平达 $0.44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 午后主要受湘江、洞庭湖水面等向东反光增温效应和东北部麻布大山丘陵山脉大地形叠加影响, 该站附近气温东北高西南低, 西南风逐渐增大, u 正距平20时达 $0.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 且午后到傍晚为较弱的南风负距平。从图10可以看出, 澧湖站实际上以东偏北风为主, 风距平转换表现为东偏北风风速大小的日周期性变化。

3.2.4 北部

湖区北部穆湖铺站(图10)逐时平均 u 的日振幅为 $0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 全日平均值为弱东风 $-0.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 09—16时为正距平, 17—08时 u 为负距平。逐时平均 v 的日振幅为 $1.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 全日平均值为南风 $-1.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 13—21时为正距平, 22—12时为负距平。由于穆湖铺南部为湖面, 东部为岳阳市北部郊区、稍远为丘陵山脉, 东南部为岳阳市区, 故白天气温西南低东北高, 受湖风、谷风影响, 西南风较大, 11时 u 正距平西风达 $0.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 09时 v 负距平南风达 $-0.52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 午后受湖面反光增温效应、岳阳城市热岛效应和南湖北陆大地形影响, 该站附近气温逐渐转为南高北低, v 正距平北风午后到傍晚十分明显, 18时高达 $0.92 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 从图10可以看出, 穆湖铺站实际上以南偏东风为主, 白天出现弱西风, 下午到初夜南风明显减小, 南风风速大小的日周期性变化明显。

3.2.5 湖心

湖心煤炭湾、扁山站(图10)逐时平均 u 的日振幅分别为 1.74 、 $1.36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 全日平均值为 -0.16 、 $0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 即煤炭湾为弱东风、扁山为西风; 日变化有较明显的规律性, 煤炭湾09—18时为正距平,

扁山23—11时为正距平。逐时平均 v 的日振幅分别为 2.76 、 $3.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 全日平均值为明显的南风 -3.0 、 $-1.88 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 日变化规律相似, 11—21、10—19时为正距平。由于煤炭湾东南部为距东洞庭湖较近的麻布大山丘陵山脉主体, 故白天湖风、谷风叠加形成西北风, 13时 u 正距平西风达 $0.99 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 16时 v 正距平北风达 $1.58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 夜晚则转为东南风, 负距平均较小, 即陆风、山风较小。由于扁山站西部为宽广湖面, 北偏西部为扁山小岛、东部为南湖、东北部为岳阳市区、东南部为南湖新区, 受南湖水体及城市热岛效应等综合影响, 扁山站东西向温差较小, 湖陆风较弱; 由于扁山东偏北部到南湖之间有甑壁山、月山等较小范围丘陵, 东南部为大范围丘陵山脉, 且距离陆地较煤炭湾近, 因此上午湖风与谷风叠加形成西北风, 出现时间较煤炭湾早; 下午甑壁山、月山、扁山岛等小范围丘陵东侧背阳面气温下降较快, 西南部湖心气温上升, 扁山站气温东北低、西南高, 山风与陆风叠加形成东北风, 17时 u 负距平东风达 $-0.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v 正距平北风达 $1.53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从图10可见, 煤炭湾站实际湖陆风转换明显, 扁山站仅17—18时出现弱东风(陆风); 湖心南北距平风变化明显, 实际表现为南风风速昼小夜大。

3.2.6 测风塔

测风塔风速(图11) u 分量白天为西风, 10~60 m高度维持约14 h, 200 m高度维持7 h; 湖风(西风)随高度先增大后减小, 午后14时60 m最大为 $1.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 200 m上空仍有 $1.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。夜晚60 m以下风速较小, 200 m上空则为明显的东风(陆风), 21时达 $2.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。近地面东风较弱的主要原因是湖东七里山丘陵、高楼大厦等建筑物、树木植被等阻挡摩擦造成的。风速 v 分量下午至初夜正距平较强, 峰值出现在18—19时, 200 m上空更加明显, 19时正距平北风高达 $1.49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。大桥西侧测风塔10~60 m正距平北风峰值主要和东洞庭湖主体位于测风塔以南、湖面反

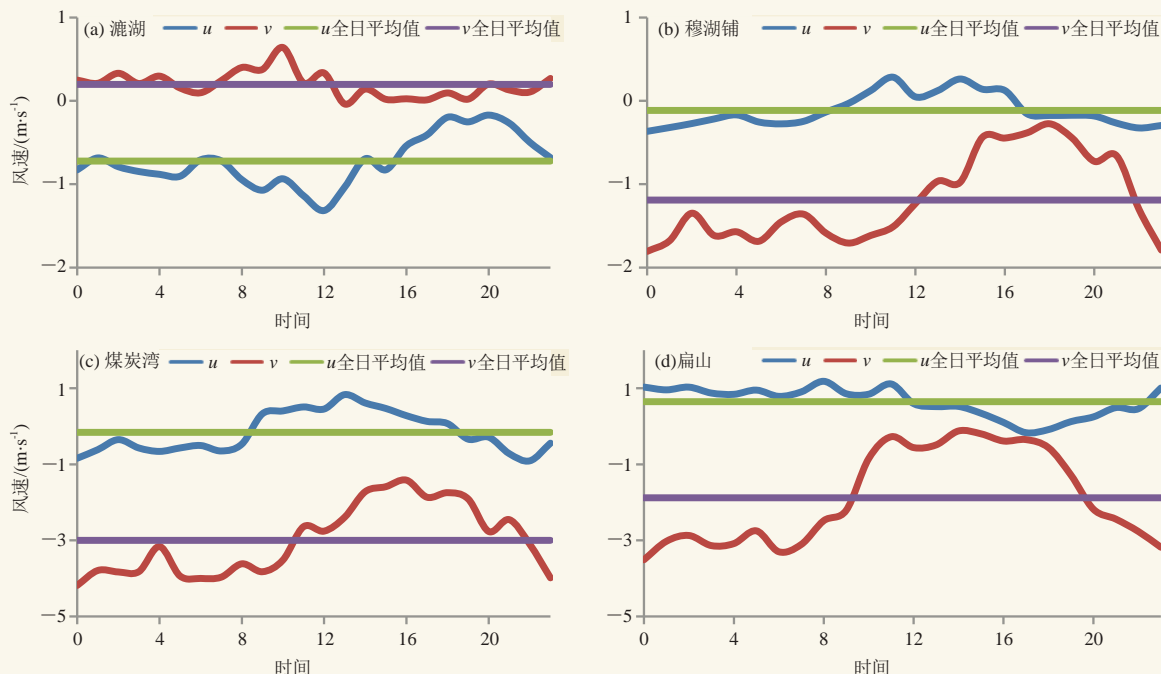


图10 2017年8月4—23日东洞庭湖南部、北部、湖心逐时平均风速日变化

Fig.10 Diurnal variation of hourly average wind speed in the south, north, lake center of East Dongting Lake during 4 August to 23 August 2017

光增温效应致使气温南高北低有关；大桥东岸200 m测风塔南部为岳阳市区，傍晚18—19时下班交通高峰、晚餐烹调高峰等叠加形成城市热岛高峰，加之东洞庭湖主体位于测风塔西南以及湖面反光增温效应，致使测站附近气温南高北低显著，因此200 m正距平北风最大峰值出现在19时，12时、14时为城市热岛效应高峰，亦出现相应峰值。夜晚60 m高度以下v风速随高度波动加大，200 m上空为明显的南风，03时达 $-4.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3.2.7 不同位置湖风的差别

通过比较各个站点的逐时风日变化可知，地理环境差异越明显，其湖陆风效应越显著，如东洞庭湖东部为丘陵山区，西部为湖区，因此东北方向的岳阳、南湖、穆湖铺、煤炭湾站与洞庭湖大桥测风塔等站湖陆风显著，其他方向则不太明显；地理环境复杂，其湖陆风效应相应也变得复杂，测站附近小微尺度水体、山丘、建筑物与植被等都可能造成较大影响，如隆庆莲场、良心堡、扁山、鹿角与澧湖站等，需要进行实地考察分析研究，才能了解其真实成因。

测站越高、探测环境越开阔，风速越大，如煤炭湾、扁山、岳阳站与大桥东岸200 m测风塔等；湖面上空风速大小随高度呈波动性变化（表2），与刘电英等^[4]研究结论相似。

表2 洞庭湖大桥测风塔各高度风速（单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）

Table 2 Wind velocities at different heights of wind tower of Dongting Lake Bridge (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

类别	数值				
高度	10 m	30 m	50 m	60 m	200 m
风速	2.0	3.3	3.1	3.8	5.3

3.3 相对湿度

从图12可以看出，湖面上空逐时平均相对湿度差异明显，大桥西侧测风塔位于洞庭湖出口西侧芦苇滩中，距离湿地10 m，西部为长江弯道水面，因此相对湿度最大；七里山船舶站位于大桥东侧船舶顶上，距离水面约10 m，东南部靠近陆地及岳阳市区，相对湿度较小；煤炭湾与扁山站位于湖心灯塔上，距离水面二十余米，相对湿度最小，20时煤炭湾与测风塔湿度相差最大达13.3%，11时相差最小为7.5%。这表明湖面相对湿度随高度增加迅速减小；受湖陆风环流等影响，白天湿度下降，下午最小；夜晚湿度上升，凌晨湿度最大。

岳阳站受湖陆风与城市建筑影响明显，白天湖风（西风）控制时相对湿度明显大于远离湖区的临湘与华容站，晚上陆风控制时，因城市建筑物、道路固化、植被与水体较少，导致湿度明显偏小。鹿角站西部为洞庭湖，东南部、东北部亦有较大面积池塘水体，因此相对湿度始终较大。

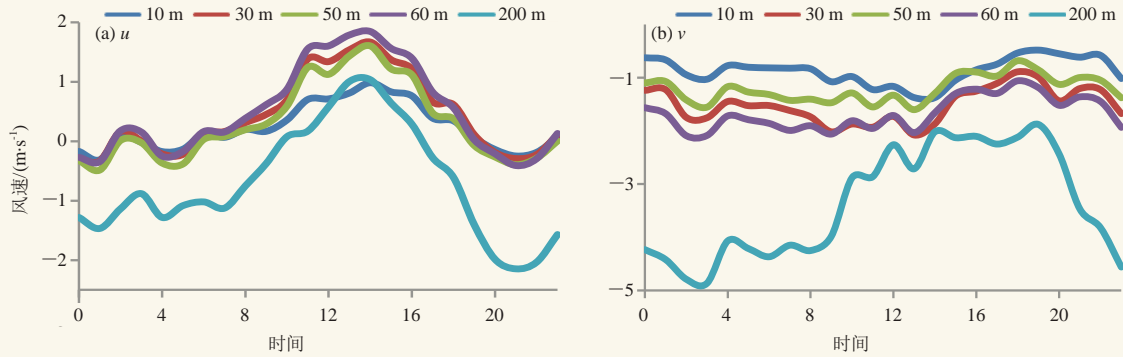


图11 2017年8月4—23日洞庭湖大桥测风塔逐时平均风速日变化

Fig. 11 Daily variation of hourly average wind speed in wind tower of Dongting Lake Bridge during 4 August to 23 August 2017

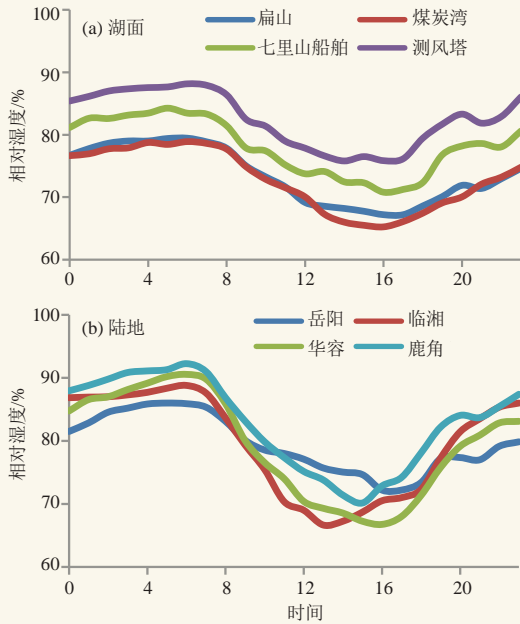


图12 2017年8月4—23日东洞庭湖区逐时平均相对湿度日变化

Fig. 12 Diurnal variation of hourly average relative humidity in East Dongting Lake area during 4 August to 23 August 2017

4 小结与讨论

1) 岳阳站存在明显的湖陆风, 夏季最强、春季次之, 冬季最弱; 受城市热岛效应叠加影响, 夏、秋、冬季最强湖风出现在中午前后。由于城市热岛效应等, 岳阳站午后到傍晚存在南北风距平转换, 春夏季出现实际南北风向转变。岳阳站湖风大小和南风频率正相关, 城市热岛和湖风频率正相关, 湖陆风与城市热岛效应相辅相成。

2) 湖心与周边陆地水平温差存在昼夜反转现象, 湖心气温日较差小, 周边陆地气温日较差大。湖面反光增温效应致使一定时空范围内气温上升。湖面上空气温白天随高度逐渐降低, 中午前后降温幅度最

大, 夜晚出现明显的逆温层, 这表明湖面上空白天为下沉气流, 夜晚为上升气流。

3) 夏季湖陆风明显, 受洞庭湖东部大范围丘陵山脉影响, 东北部更加显著。洞庭湖大桥附近上空东西向湖风随高度先增强后减小, 60 m高度最强; 南北方向城市热岛与湖面反光增温效应叠加影响随高度上升逐渐明显, 200 m高度更加显著, 12时、14时、尤其是18—19时城市热岛效应高峰得到清晰展现。

4) 湖面相对湿度随高度迅速减小, 湖心相对湿度较大, 湖边相对湿度较小; 岳阳站受湖风与城市干燥环境交替影响, 白天相对湿度偏大, 夜晚相对湿度偏小; 鹿角站周边水体较多, 相对湿度始终偏大。测站气象要素演变受附近小微尺度水体、山丘、建筑物、树木植等影响较大。

致谢: 湖南省益阳市气象局杨令女士、华容县气象局侯勇军、苏韬先生以及谢学武先生等提供相关资料, 英国考文垂大学李福嘉博士为本文整理相关资料, 在此特表感谢。

参考文献

- [1] 曹渐华, 刘照明, 李国平, 等. 鄱阳湖地区湖陆风特征及成因分析. 高原气象, 2015, 34(2): 426-435.
- [2] 李连方. 岳阳(洞庭湖畔)的湖陆风. 气象, 1978(4): 30.
- [3] 林必元, 李敏娴. 洞庭湖湖陆风特征与降水. 南京气象学院学报, 1988(1): 78-88.
- [4] 刘电英, 邹希云, 彭杰彪, 等. 洞庭湖湖面风速与湖区陆地风速的对比分析. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 15902-15903.
- [5] 李维亮, 刘洪利, 周秀骥, 等. 长江三角洲城市热岛与大湖对局地环流影响的分析研究. 中国科学, 2003, 33(2): 97-04.
- [6] 殷长泰, 王体健, 石春娥, 等. 巢湖流域典型站点的风场特征分析. 大气科学学报, 2012, 35(2): 249-256.
- [7] 于强, 陆佩玲. 巢湖对冬季陆面辐射和热量过程的影响. 湖泊科学, 1996, 8(1): 8-15.
- [8] 王浩. 湖陆风演变过程的数值模拟. 南京大学学报, 1991, 27(2): 383-395.
- [9] 李照国, 吕世华, 奥银焕, 等. 鄂陵湖湖滨地区夏季近地层微气象特征与碳通量变化分析. 地理科学进展, 2012, 31(5): 602-608.
- [10] 张茜, 杨军, 高雅. 博斯腾湖的湖陆风特征及其数值模拟研究. 高原气象, 2019, 38(1): 165-178.

岳阳2015—2017年暴雨空间分布与天气形势特征分析

喻长建¹ 陈姣荣¹ 喻宇² 钟泽洲³

(1 岳阳市气象局, 岳阳 414000; 2 湘阴县气象局, 湘阴 414600; 3 汨罗市气象局, 汨罗 414400)

摘要: 利用岳阳市2015—2017年232个区域气象站、6个国家气象站降水资料和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)预报形势场资料,采用统计学方法、天气学原理及中尺度分析技术,总结了近3年暴雨空间分布特征,分析了暴雨产生的中低层影响系统。结果表明:岳阳市暴雨主要出现在东部山区,药姑山区是岳阳市暴雨最易产生和暴雨强度最大的地区,连云山区也是暴雨极易产生和局地暴雨强度较大的区域。地形是岳阳市暴雨出现频率高和暴雨强度大的重要因素,天气系统是暴雨出现的触发因素。影响岳阳市暴雨的中低层天气系统有低涡急流型、低涡切变型、急流辐合型、暖切变影响型、切变控制型和切变东移南压型,低涡急流型降水强度大、范围广,多为全市性暴雨或大暴雨;急流辐合型降水强度大、范围集中且较大,多为区域性暴雨或大暴雨;切变控制型降水强度较大、范围集中且较大,多为区域性暴雨或跨区暴雨;低涡切变型、切变东移南压型降水强度较大、范围集中,多为区域性暴雨;暖切变影响型降水强度较大、范围较小,多为区域性暴雨。

关键词: 暴雨, 空间分布, 形势分型, 岳阳

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.018

Spatial Distribution and Characteristics of Heavy Rain in Yueyang from 2015 to 2017

Yu Changjian¹, Chen Jiaorong¹, Yu Yu², Zhong Zezhou³

(1 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000 2 Xiangyin Meteorological Bureau, Xiangyin 414600 3 Miluo Meteorological Bureau, Miluo 414400)

Abstract: Based on the precipitation data of 232 regional meteorological stations, 6 national meteorological stations, and ECMWF forecast situation data from 2015 to 2017 in Yueyang City, the spatial distribution characteristics of rainstorms in recent three years and the impact systems of rainstorms in the middle and lower levels were analyzed by using statistical methods, synoptic principles, and mesoscale analysis techniques. The results showed that the rainstorm mainly occurred in the eastern mountainous area of Yueyang City. Yaogu Mountainous area was the area where the rainstorm was most prone to occur and the intensity of the rainstorm was the largest. Liyun Mountainous area was also the area where the rainstorm was prone to occur and the intensity of the local rainstorm was great. The topography was an important factor for the frequency and intensity of the rainstorm in Yueyang City. Climate system was the trigger of the rainstorm. The climate systems affecting the rainstorm in Yueyang City included low eddy jet type, low eddy shear type, jet convergence type, warm shear influence type, shear control type, shear eastward-moving and southward pressure type. The low eddy jet type usually corresponded to large intensity and wide range of precipitation, mostly urban rainstorm or torrential rain. The jet convergence type usually resulted in large, mostly regional rainstorms or torrential rainstorms. The shear control type usually resulted in rainstorms with large intensity, large concentration, and large scope, mostly regional rainstorms or trans-regional rainstorms. The low eddy shear, shear-eastward-moving and southward pressure types usually corresponded to rainstorms with large intensity and concentrated scope, mostly regional rainstorms. The warm shear influence type was usually associated with rainstorms with large intensity and small scope, mostly regional rainstorms.

Keywords: rainstorm, spatial distribution, situation analysis, Yueyang

0 引言

洞庭湖区地处中纬度亚热带地区,是受气象灾害

严重的地区,暴雨是洞庭湖区汛期主要灾害性天气^[1-3]。多年来许多学者对暴雨时空分布、日变化特征、高山站风对特定区暴雨的作用和地形对暴雨的影响进行了深入研究^[4-8],暴雨过程的环流形势分型对提高暴雨预报能力有很大的促进作用^[9-11]。叶成志等^[12]根据地形

收稿日期: 2019年7月23日; 修回日期: 2019年8月26日

第一作者: 喻长建(1961—), Email: 837594574@qq.com

作用对“碧利斯”台风造成的湖南大暴雨环流特征进行了分析。喻长建等^[13]根据地形作用指出药姑山、幕阜山、连云山山地是岳阳盛夏强对流天气的主要发源地。本文利用2015—2017年全市暴雨个例,统计了岳阳暴雨空间分布规律,为暴雨预报落区、范围提供有效参考;利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF,以下简称EC)细网格850 hPa和700 hPa天气形势特征分析,为预报岳阳暴雨强度、落区提供客观、有效的科学依据。

1 岳阳地形特征

岳阳市西部为湖区、东部为山区(图1)。华容县地处北洞庭湖平原,湘阴县位于南洞庭湖平原,临湘市、平江县为药姑山、幕阜山、连云山山地,岳阳县、汨罗市则为湖区与山地的丘陵地带。药姑山位于临湘市东侧龙源乡,海拔高度为1260 m,幕阜山主峰位于平江县东北南江和虹桥之间,海拔高度1596 m,连云山主峰位于平江县东南献冲乡,海拔高度1600 m,幕阜山、连云山呈东北—西南走向,两山之间为东北—西南低谷山地,在山谷之间形成一条河流为汨罗江向西偏北流入洞庭湖,幕阜山北侧也有一东北—西南低谷山地,也形成一条河流为新墙河向西流入洞庭湖,药姑山、幕阜山、连云山呈南北向排列,是影响湘东北地区天气的主要地形。



图1 岳阳市地形图
Fig. 1 Topographic map of Yueyang

2 暴雨资料来源及分区标准

2.1 资料来源及统计标准

暴雨资料来源于岳阳国家气象站和区域气象站共

计238站,以白天(08—20时)或夜间(20—08时)12 h成片 ≥ 10 站雨量 ≥ 50.0 mm作为暴雨个例统计,以白天(08—20时)或夜间(20—08时)12 h成片 ≥ 3 站雨量 ≥ 100.0 mm作为大暴雨个例统计。资料覆盖时间段为2015—2017年。

在统计的暴雨个例中,以暴雨站数 \geq 总站数的25%的个例作为全市性暴雨过程,全市性暴雨个例之外的暴雨分为区域性暴雨和跨区域暴雨,暴雨区集中在华容县、岳阳市区、临湘市作为北部暴雨,暴雨区集中在岳阳县作为中部暴雨,暴雨区集中在湘阴县、汨罗市、平江县作为南部暴雨,暴雨区集中在平江县、岳阳县东部、临湘市东部作为东部山区暴雨,暴雨区同时出现在两个区域作为跨区域暴雨。

国家气象站和区域气象站雨量资料均经过质量控制,在质控中凡是出现一次缺测或失真数据的站点,该站点数据不参与统计。全市238个测站经过质量控制后,删除62个数据失真测站,保留176个测站数据进行统计。

2.2 暴雨概况

2015—2017年全市共有暴雨过程61次,其中全市性暴雨10次,跨区域暴雨6次,区域性暴雨45次,61次暴雨过程中有大暴雨17次。

3 暴雨空间分布特征

3.1 全市暴雨平均雨量分布和暴雨频次分布特征

2015—2017年全市61次暴雨过程平均雨量分布如图2所示,平均雨量 ≥ 50.0 mm降水区主要出现在临湘市东部的药姑山区,分别是龙源、观山、许畈、明星、城南、詹桥、羊楼司、临湘站、苗圃基地、桃矿站,平均雨量 ≥ 40.0 mm降水区主要出现在华容县东部、岳阳市区、临湘市大部、岳阳县东北部、平江县连云山区,最大降水中心出现在临湘市龙源站,平均雨量55.0 mm。

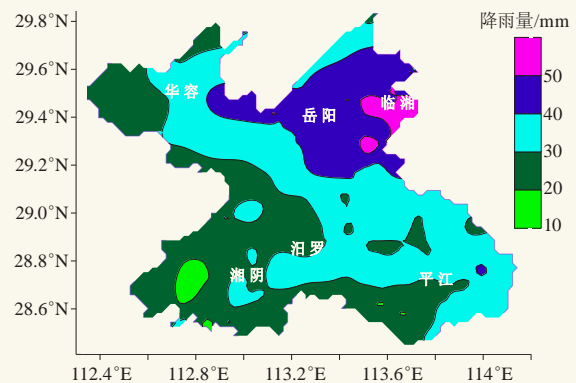


图2 岳阳市暴雨平均雨量分布图
Fig. 2 Distribution of average rainstorm amount in Yueyang

图3为2015—2017年全市61次暴雨过程频次分布图，暴雨频次 ≥ 17 次的区域分布在临湘市的药姑山区、平江县的幕阜山区和连云山区。药姑山区 ≥ 17 次的暴雨区域有龙源、壁山、詹桥、观山、大云山和相思6个站， ≥ 13 次的有33站；连云山区 ≥ 17 次的有芦头林场和石牛寨2个站， ≥ 13 次的有11站；幕阜山区 ≥ 17 次的有幕阜山站， ≥ 13 次的有3站。

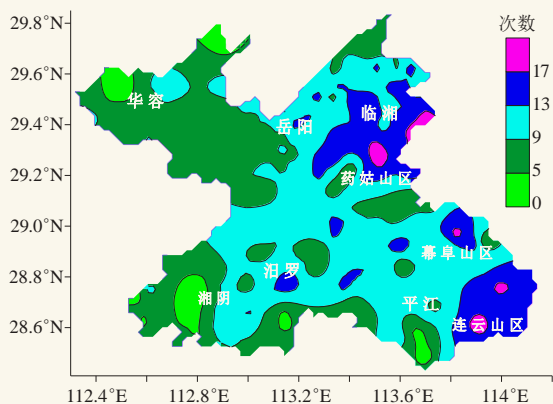


图3 岳阳市暴雨频次分布图

Fig. 3 Frequency distribution of rainstorm in Yueyang

综合图2和图3的暴雨规律，并结合图1地形，通过分析得出：临湘市东部的药姑山区范围广，坡度平，非常有利于气流的上升运动，加之洞庭湖蒸发的水汽正好由西南气流输送到药姑山区，因而药姑山区是岳阳市暴雨最易产生和暴雨强度最大的地区；平江县东南部的连云山区坡度较陡，山顶较高，有利于局地的上升运动，也是暴雨极易产生和局地暴雨强度较大的区域；平江县东北部的幕阜山区虽有暴雨极易产生的区域，但暴雨强度均小于药姑山区和连云山区；华容、湘阴地处湖区平原，暴雨频次和强度都最小。综合全市暴雨平均雨量分布和暴雨频次分布，岳阳市暴雨主要出现在东部山区，地形是岳阳市暴雨出现频率高和暴雨强度大的重要因素，天气系统是暴雨出现的触发因素。

3.2 全市性大范围暴雨强度分布特征

2015—2017年全市性大范围暴雨过程共计10次，其平均雨量分布如图4所示。平均暴雨区范围包括华容县南部、岳阳市区、临湘市中部、南部、岳阳县、湘阴县北部、汨罗市北部、平江县局部； >75.0 mm暴雨范围出现在岳阳市区、临湘市西南部、岳阳县中北部；最大降水中心出现在岳阳市区东风湖站，平均雨量85.1 mm。

从全市性大范围暴雨过程出现的强度和范围来看，全市性大范围暴雨受天气系统影响更明显，地形也是全市性大范围暴雨的重要影响因素。因而暴

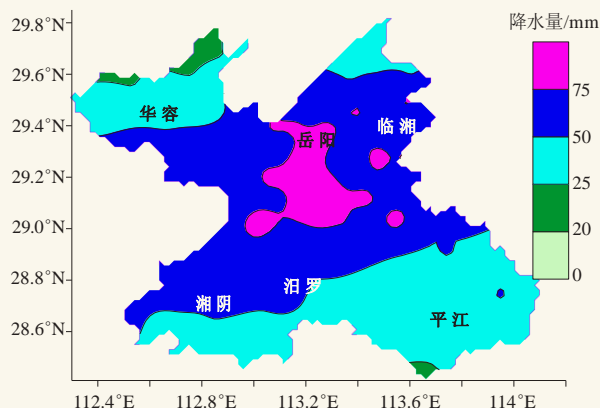


图4 岳阳全市性暴雨强度分布图

Fig. 4 Distribution of heavy rainfall intensity in Yueyang

雨区从洞庭湖东岸一直伸展到临湘市、岳阳县的东部山区。

3.3 区域性暴雨分布特征

2015—2017年全市16次北部暴雨、7次中部暴雨、17次南部暴雨、11次东部山区暴雨个例，经过数据处理后的176个测站数据统计区域暴雨平均雨量。

图5a~5d分别为北部暴雨、中部暴雨、南部暴雨、东部山区暴雨强度分布图，北部暴雨平均雨量以华容县东部、岳阳市区、临湘市大部雨量最大，最强暴雨中心出现在临湘市许畈站，平均暴雨量64.4 mm；中部暴雨平均雨量以岳阳县中东部、临湘市南部雨量最大，最强暴雨中心出现在岳阳县甘田站，平均暴雨量65.2 mm；南部暴雨平均雨量以湘阴县东南部、汨罗市南部、平江县南部雨量最大，最强暴雨中心出现在平江县河东站，平均暴雨量63.0 mm；东部山区暴雨平均雨量以平江县东部地区雨量最大，最强暴雨中心出现在平江县石牛寨站，平均暴雨量80.0 mm。

区域性暴雨综合显示，东部暴雨强度高于西部，药姑山区暴雨不仅次数多，同样强度大。平江幕阜山区既是南部暴雨中心，又是东部暴雨中心，有暴雨重叠区域，是岳阳市区域性暴雨中心。

4 暴雨出现时的中低层形势分型

为便于分析，选择850 hPa、700 hPa的EC细网格数据资料较全的47次暴雨个例进行天气形势分析，结果显示，影响岳阳市暴雨的中低层环流形势主要有6种，分别是低涡急流型、低涡切变型、急流辐合型、暖切变影响型、切变控制型、切变东移南压型。各类天气形势分型对应的暴雨个例数、全区暴雨数、跨区暴雨数、区域性暴雨数和大暴雨数见表1。

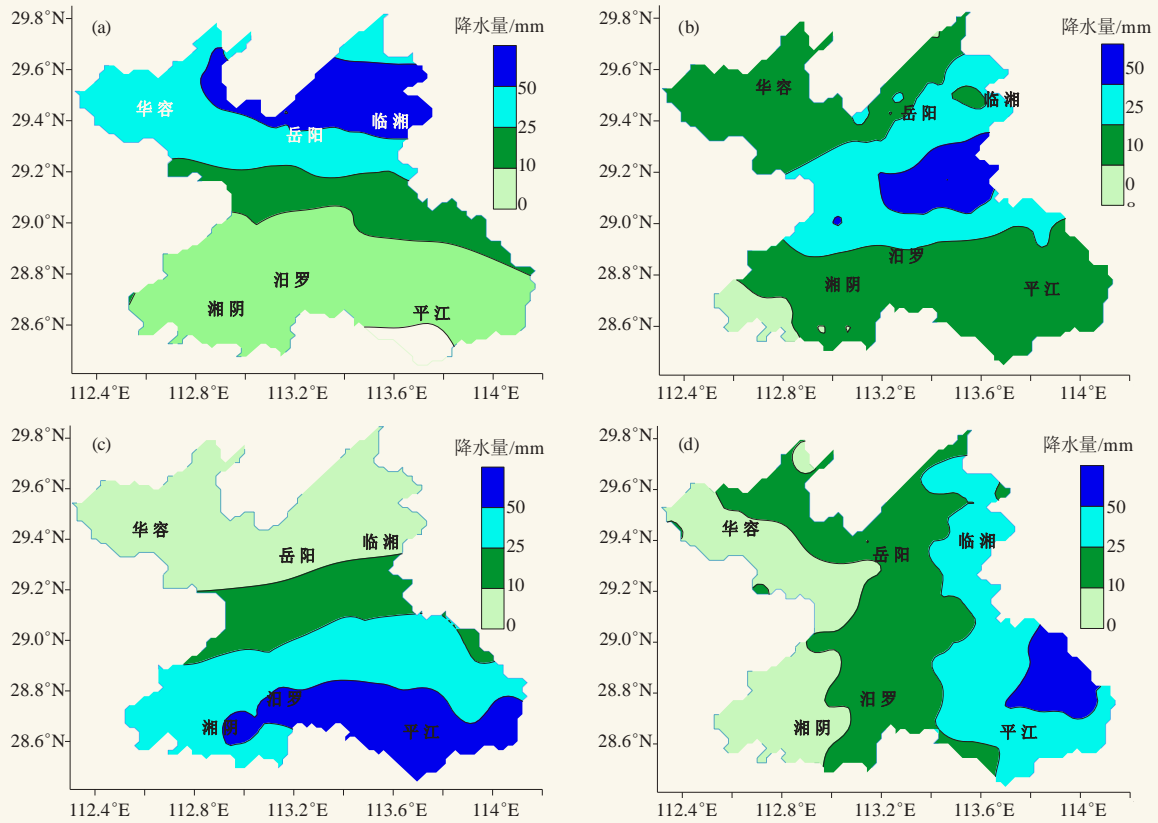


图5 北部暴雨 (a)、中部暴雨 (b)、南部暴雨 (c)、东部 (d) 山区暴雨强度

Fig. 5 Storm intensity in northern (a), central (b), southern (c) and eastern (d) mountainous areas respectively

表1 天气形势分型对应的暴雨分类数 (单位: 个)

Table 1 Classification of rainstorms for various weather patterns (unit: number of events)

形势类型	个例数	全区暴雨数	跨区暴雨数	区域性暴雨数	大暴雨数
低涡急流型	9	5	1	3	7
急流辐合型	10	3	1	6	7
低涡切变型	4	1	1	3	1
切变控制型	11	1	2	8	2
暖切变影响型	5			5	1
切变东移南压型	8	1		7	2

4.1 低涡急流型

850 hPa EC细网格初始场或3 h、6 h、9 h、12 h 预报场2个时次以上在28.5°—29.5°N、110.5°—113°E 范围内有低涡环流, 低涡移动方向为东偏北方向, 低涡东侧有 ≥ 16 m/s的西南急流存在。配合700 hPa EC细网格在28.5°—29.5°N、110.5°—112°E范围内有低涡环流, 低涡中心落后于850 hPa, 低涡东侧有 ≥ 20 m/s的西南急流存在。形势分型见图6, 此类过程降水强度大、范围广, 暴雨区出现在低涡的东部、急流最强盛区域或急流出口区, 9次过程有5次为全市性暴雨, 1次跨区暴雨, 3次区域性暴雨, 其中7次过程出现大暴雨。

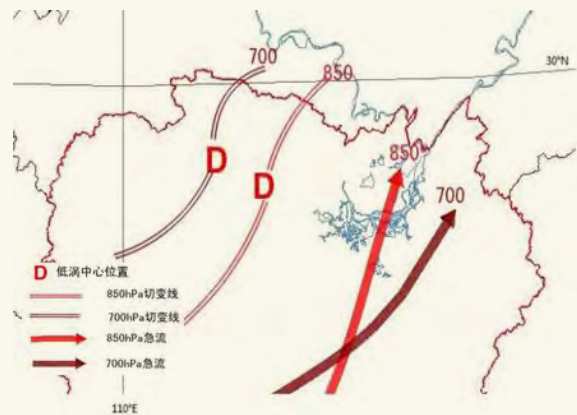


图6 低涡急流型暴雨

Fig. 6 Rainstorm affected by low vortex torrential type

4.2 低涡切变型

850 hPa EC细网格初始场或3 h、6 h、9 h、12 h 预报场2个时次以上在28°—29°N、110.5°—113°E 范围内有切变存在, 切变线上有弱低涡环流, 低涡沿切变向东偏北方向移动, 切变南侧有12 m/s左右的西南急流。配合700 hPa EC细网格在28°—29°N、110.5°—113°E范围内有切变存在, 切变线上有弱低涡环流, 切变南侧有12 m/s左右的西南气流。形势分

型见图7，此类过程降水强度较大、范围集中，暴雨区主要出现在850 hPa切变南侧、12 m/s西南气流区附近，4次过程3次为本市南部区域性暴雨，1次为跨区暴雨，其中1次过程出现大暴雨。



图7 低涡切变型暴雨

Fig. 7 Rainstorm affected by low vortex shear type

4.3 急流辐合型

850 hPa EC细网格初始场或3 h、6 h、9 h、12 h预报场在湘中、湘南及洞庭湖区西南气流逐渐加强，并出现成片 ≥ 14 m/s的西南急流，在洞庭湖区西部或北部出现 ≥ 8 m/s以上的风速辐合。配合700 hPa的EC细网格在湘中、湘南及洞庭湖区出现成片的 ≥ 14 m/s的西南急流。形势分型见图8，此类过程降水强度大、范围集中且较大，暴雨区出现在急流最强盛区域或急流出口区，10次过程有3次全区性暴雨，1次跨区暴雨，6次区域性暴雨，其中7次过程出现大暴雨。

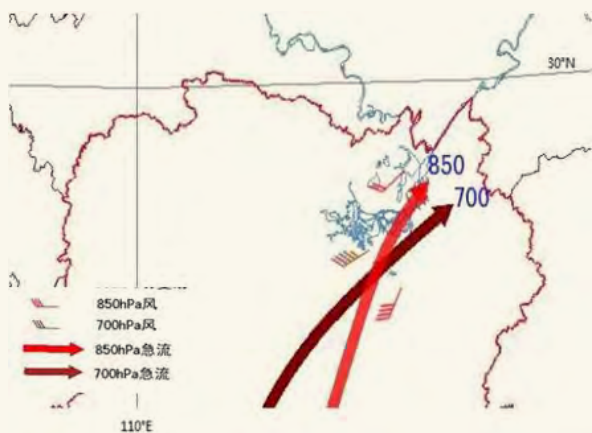


图8 急流辐合型暴雨

Fig. 8 Rainstorm affected by rapid convergence type

4.4 暖切变影响型

850 hPa的EC细网格初始场或3 h、6 h、9 h、12 h预报场2个时次以上在 28° — 30° N、 112° — 115° E范围内有暖切变存在，切变北侧为偏东气流，切变南侧为

西南气流，切变区域较宽广。700 hPa的EC细网格形势与850 hPa相近。形势分型见图9，此类过程降水强度较大、范围较小，暴雨区出现在曲率最大的区域或风速辐合最大的区域。5次过程均为区域性暴雨，其中1次过程出现大暴雨。



图9 暖切变影响型暴雨

Fig. 9 Rainstorm affected by warm shear type

4.5 切变控制型

850 hPa的EC细网格在湘北有东北—西南向切变缓慢东移南压进入洞庭湖区，维持时间在12 h以上，切变北侧为东北（偏北）气流，切变南侧为西南气流（大多 ≥ 12 m/s），切变移距12 h大多 ≤ 1 个经纬距。当850 hPa切变压至岳阳北部时，700 hPa一般为 ≥ 12 m/s的西南急流，暴雨区在岳阳北部或中部，多为区域性暴雨。当850 hPa切变压至岳阳南部时，700 hPa一般有切变相配合，并出现 ≥ 12 m/s的西南急流，暴雨区在岳阳南部或东部山区，并可出现大暴雨。形势分型见图10，此类过程降水强度较大、范围集中且较大。11次过程中其中1次为全区暴雨，2次为跨区暴雨，8次为区域性暴雨，其中2次过程出现大暴雨。



图10 切变控制型暴雨

Fig. 10 Rainstorm affected by shear control type

4.6 切变东移南压型

850 hPa的EC细网格在湘北有东北—西南向切变东移南压南压过洞庭湖区，影响时间在6~9 h，切变北侧为偏北气流，切变南侧为西南急流（大多 ≥ 12 m/s），切变移距6 h超过2个经纬距。配合700 hPa的EC细网格一般为 ≥ 14 m/s西南急流，或有小槽或切变影响洞庭湖区。形势分型见图11。此类过程降水强度较大，范围集中，多为区域性暴雨，暴雨区主要出现在850 hPa切变南侧、西南急流区附近。当850 hPa西南急流风速 ≥ 20 m/s时有大暴雨出现。8次过程均为区域性暴雨，其中2次过程出现大暴雨。

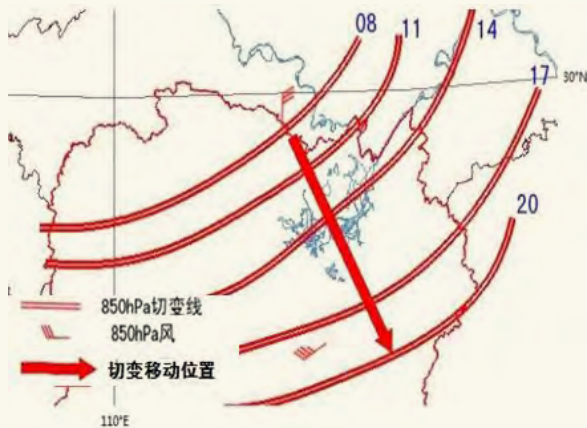


图11 切变东移南压型暴雨

Fig. 11 Rainfall affected by shear—eastward—moving and south—pressure type

5 小结与讨论

药姑山区范围广、坡度平，非常有利于气流的上升运动，加之洞庭湖蒸发的水汽正好由西南气流输送到药姑山区，因而药姑山区是岳阳市暴雨最易产生和暴雨强度最大的地区；连云山区坡度较陡、山顶较

高，有利于局地的上升运动，也是暴雨极易产生和局地暴雨强度较大的区域；幕阜山区虽有暴雨极易产生的区域，但暴雨强度小于药姑山区和连云山区。地形是岳阳市暴雨出现频率高和暴雨强度大的重要因素，天气系统是暴雨出现的触发因素。

低涡急流型降水强度大、范围广，多为全市性暴雨或大暴雨；急流辐合型降水强度大、范围集中且较大，多为区域性暴雨或大暴雨；切变控制型降水强度较大、范围集中、多为区域性暴雨或跨区暴雨；低涡切变型、切变东移南压型降水强度较大、范围集中，多为区域性暴雨；暖切变影响型降水强度较大、范围较小，多为区域性暴雨。

参考文献

- [1] 喻长建. 汛期南洞庭湖高洪水位与湖南暴雨分析. 气象, 1992, 18(2): 47-49.
- [2] 吴贤云, 叶成志, 王琪. 两湖流域雨季降水气候特征分析. 暴雨灾害, 2016, 35(6): 497-503.
- [3] 喻长建, 喻宇. 岳阳市2017年汛期暴雨决策服务成败分析. 湖南气象, 2017, (3): 15-17.
- [4] 卢瑞荆, 樊兰峰. 1961—2008年贵州暴雨的时空分布特征分析. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(3): 17-21.
- [5] 王国荣, 王令. 北京地区夏季短时强降水时空分布特征. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 276-279.
- [6] 黄秋霞, 方雯, 王春燕, 等. 新疆昌吉市主汛期降水日变化特征. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(6): 19-23.
- [7] 唐冶, 陈春艳, 赵克明. 伊宁市1991—2011年降雨特征分析. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(6): 41-46.
- [8] 叶成志, 陈静静, 傅承浩. 南岳高山站风对湖南2011年6月两例暴雨过程的指示作用. 暴雨灾害, 2012, 31(3): 242-247.
- [9] 郑丽娜, 孙兴池. 气旋类山东暴雨过程天气学特征研究. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 74-80.
- [10] 王成福, 谢蕊, 吉哲君, 等. 甘南高原大到暴雨天气过程分型及特征. 干旱气象, 2019, 37(1): 97-108.
- [11] 王小龙, 朱拥军, 李悦, 等. 天水地区暴雨特征、环流形势及概念模型分析. 中国农学通报, 2015, 31(16): 259-266.
- [12] 叶成志, 李昀英. 湘东南地形对“碧利斯”台风暴雨增幅作用的分析. 暴雨灾害, 2011, 30(2): 122-129.
- [13] 喻长建, 喻宇, 昌立伟. 湘东北盛夏午后热对流降水分析. 安徽农业科学, 2014, 42(21): 7136-7138.

岳阳气象防灾减灾体系建设

■ 王威

为应对气候变化的挑战，提高城市抵抗各种气象灾害的能力，岳阳市气象部门的水、陆、空、天四位一体的立体化智能综合气象观测网络体系构建完成；基于精准化、智慧化网格预报的气象灾害监测预报预警体系建立，旅游景区、交通干线等重点区域的短时强降雨、大风、冰雹、雷电、龙卷等



强对流天气的预报预警服务有序开展；广覆盖、高时效的岳阳市突发事件预警信息发布系统建设完成；气象灾害风险普查和风险区划逐步推进，岳阳气象灾害风险防范体系初步建立。

(作者单位：湖南省岳阳市气象局)

南湖富营养化与气象影响因子的关系研究

覃鸿¹ 刘学² 黄菊梅¹ 王波³

(1 湖南省岳阳市气象局 414000; 2 湖南省华容县气象局 414200; 3 湖南省岳阳市生态环境局 414000)

摘要: 基于2004—2018年南湖的水质监测数据, 利用湖泊综合营养状态指数 ($TLI(\Sigma)$) 对南湖水质营养状况进行综合评价, 然后对南湖的 $TLI(\Sigma)$ 与各气象因子的关系进行研究。结果表明: 2004—2008年南湖水质富营养化程度呈明显的上升趋势, 2008年达到峰值, 呈中度富营养状态, 并且首次暴发蓝藻水华; 自2010年开始, 两监测点总体呈下降趋势。两监测点夏季 $TLI(\Sigma)$ 最高, 春季为次高, 冬季最低, 均呈明显的季节性波动。两监测点月 $TLI(\Sigma)$ 峰值均出现在7月, 谷值出现在10月。南湖水体富营养化程度麦子港比湖心高, 其可能原因是麦子港的人类活动影响更强。南湖 $TLI(\Sigma)$ 与气温、日照时数、风速呈现显著的正相关关系, 与气压呈现显著的负相关关系。春夏季, 气温与日照为形成南湖富营养化的主导因子。

关键词: 南湖, 水质评价, 富营养化, 气象因子

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.019

Study on the Relationship Between Eutrophication and Meteorological Impact Factors of the Nanhu Lake

Qin Hong¹, Liu Xue², Huang Jumei¹, Wang Bo³

(1 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000 2 Huarong Meteorological Bureau, Huarong 414200

3 Yueyang Ecological Environment Bureau, Yueyang 414000)

Abstract: Based on the method of Lakes comprehensive nutrition state index $TLI(\Sigma)$, water quality monitoring data of Nanhu Lake from 2004 to 2018 was used to evaluate water quality of nutritional status in Nanhu Lake and then analyze its relationship with meteorological factors. It was shown that $TLI(\Sigma)$ in Nanhu Lake had an increase trend during the years of 2004 to 2008, and the $TLI(\Sigma)$ reached the maximum in 2008 when an outbreak of algae blooms first occurred, then there was a decrease trend after 2010. The $TLI(\Sigma)$ showed obvious seasonal fluctuations with the maximum in summer and the minimum in winter. For the monthly $TLI(\Sigma)$, it reached the maximum in July and the minimum in October. Compared with the Huxin station in the center of Nanhu Lake, the Maizigang station had higher $TLI(\Sigma)$. It should be related with stronger human activities. $TLI(\Sigma)$ and air temperature, sunshine time, wind speed had significantly positive correlation, but the air pressure was significantly negatively correlated with the $TLI(\Sigma)$. In spring and summer, temperature and sunshine were the dominant factors for causing the eutrophication of Nanhu Lake.

Keywords: Nanhu Lake, water quality evaluation, eutrophication, meteorological factor

0 引言

南湖位于岳阳市中心城区南侧, 西临东洞庭湖, 是岳阳城区最大的天然湖泊。20世纪80年代南湖清可见底, 主要受纳集雨区域内的地表水径流和部分经二至三级天然氧化塘处理后的生活废水, 并用作饮用水源。但自20世纪90年代以来, 由于岳阳城市化进程加快, 沿湖特别是北岸人口剧增, 以及度假区开发建设, 并在开发建设中填埋了90%以上的天然氧化塘, 导致大量城市污水未经处理直接排入南湖, 南湖水质迅速恶化^[1-2]。南湖已由20世纪70年代初的草型湖转变

为藻型湖, 水生态系统严重退化^[3]。

湖泊水体中氮、磷逐渐富集, 致使浮游藻类异常增殖, 水生生物多样性和生态系统稳定性降低, 进而使水体透明度下降, 水质恶化^[4-5]。国际经济发展合作组织(OECD)将“水体中由于营养盐的增加而导致藻类和水生植物生产力的增加、水质下降等一系列的变化, 从而使水的用途受到影响”的现象定义为湖泊的富营养化。水华是富营养化过程最为明显的表征。地理、水文和气象特征为水华暴发提供了合适的温度和水动力条件, 是水华暴发的外因, 草型湖向藻型湖的转变以及氮、磷营养盐的高负荷输入更利于蓝藻生长^[6]。大量研究表明, 气象因素对流域内水质变化存在显著影响, 水文气象因子对湖泊富营养化和蓝藻水

收稿日期: 2019年6月29日; 修回日期: 2019年12月16日

第一作者: 覃鸿(1974—), Email: qh0126@163.com

华暴发具有很重要的驱动作用^[7-13]。近些年南湖水质恶化,自2008年首次出现蓝藻水华后,至今南湖每年都会出现蓝藻水华现象,而目前对南湖水质作进一步研究的很少。因此,本文基于最新监测数据对近年来南湖水体富营养化趋势进行分析,并且对南湖水体富营养化与气象因子的相关关系进行研究,以期对南湖水环境保护协调发展提供科学的参考依据。

1 数据与研究方法

1.1 区域概况

南湖是洞庭湖东岸的一个大湖湾,原与洞庭湖相通,后因修筑大堤,与洞庭湖相分隔,仅出口处建有一个与洞庭湖相通的控制性闸口,成为了一个几近封闭的湖泊,湖水补给依赖湖面降水、集雨区径流水。南湖现有水面面积为11.83 km²,沿湖岸线50 km,平均水深3 m,最大水深9 m,最高控制水位27.68 m,正常蓄水量为3549万 m³,集雨面积约为150 km²,是岳阳抗御城市内涝、容纳城区集水的重要水体。

1.2 数据

水质数据为岳阳市环境监测中心提供的2004—2018年原始水质监测数据,监测点分别为位于南湖北岸的麦子港(29°35'N, 113°11'E)以及南湖湖心(29°33'N, 113°11'E)(图1)。每月在两个监测点同时取样1次,监测频率为每年12次,采样监测一般在当月上旬进行。气象数据来源于岳阳气象观测站。选取了月平均气温、月平均降雨量、月平均日照、月平均气压、月平均风速等气象数据,监测时段和频率与水质数据一致。若某次的某一水质观测数据为观测缺失值,则该日的气象指标值也不计入分析中。常年气候值采用30年平均值(1981—2010年),湖泊综合营养状态指数(TLI(Σ))常年值采用15年平均值(2004—2018年)。冬季为上年12月—当年2月,春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月。



图1 研究区域概况和监测点位置

Fig. 1 Study area and location of monitoring points

1.3 研究方法

采用SPSS 20.0软件进行数据分析。对监测站点水质按照综合营养状态指数法进行富营养化综合评价。选择Pearson算法对富营养化综合评价指数与气象因子进行相关性分析,探讨气象因子与南湖水体富营养化间的内在联系。富营养化综合评价的年、季、月变化趋势分别选取年度、季度、月度算术平均值进行统计。

1.4 评价方法

根据中国环境监测总站制定的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》^[14],选取叶绿素a(Chla)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})等为参数,采用综合营养状态指数法,对南湖水体营养状况进行评价。

综合营养状态指数计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot TLI(j), \quad (1)$$

式中: w_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数。以 $Chla$ 作为基准参数, w_j 的计算公式为:

$$w_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^m r_{ij}^2, \quad (2)$$

式中: r_{ij}^2 表示 $Chla$ 与其他参数之间的相关关系,其值见表1^[14]。

表1 中国湖泊(水库)部分参数与Chla的相关关系^[14]
Table 1 Correlation between some parameters of Chinese lakes (reservoirs) and Chla^[14]

参数	Chla	TP	TN	SD	COD _{Mn}
r_{ij}^2	1	0.71	0.67	0.69	0.69

各参数的营养状态指数计算公式为:

$$TLI(Chla) = 10(2.5 + 1.086 \ln(Chla)), \quad (3)$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln(TP)), \quad (4)$$

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln(TN)), \quad (5)$$

$$TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln(SD)), \quad (6)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10(0.109 + 2.661 \ln(COD_{Mn})), \quad (7)$$

式中: $Chla$ 单位为 mg/m^3 , SD 单位为 m , 其他指标单位均为 mg/L 。

湖泊(水库)营养状态分级见表2,采用0~100的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级。在同一营养状态下,指数值越高,其营养程度越重。

2 结果与分析

2.1 南湖水体富营养状态的变化特征

根据2004—2018年南湖逐月水质监测数据,由叶

表2 湖泊(水库)营养状态分级^[14]

Table 2 Nutrient status classification of lakes (reservoirs) ^[14]

级别	范围
贫营养	$TLI(\Sigma) < 30$
中营养	$30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$
轻度富营养	$50 < TLI(\Sigma) \leq 60$
中度富营养	$60 < TLI(\Sigma) \leq 70$
重度富营养	$TLI(\Sigma) > 70$

绿素a (*Chla*)、总磷 (*TP*)、总氮 (*TN*)、透明度 (*SD*) 和高锰酸盐指数 (*COD_{Mn}*) 共5项指标分别计算湖心与麦子港的 *TLI*(Σ) 的逐年平均值 (图2)。两个监测点水体均长期稳定处于轻度富营养水平, 两监测点均在2008年呈现峰值, 2018年为近年来最低。两监测点多年季节平均 *TLI*(Σ) 均为夏季最高, 春季次高, 冬季最低, 呈明显的季节性波动。

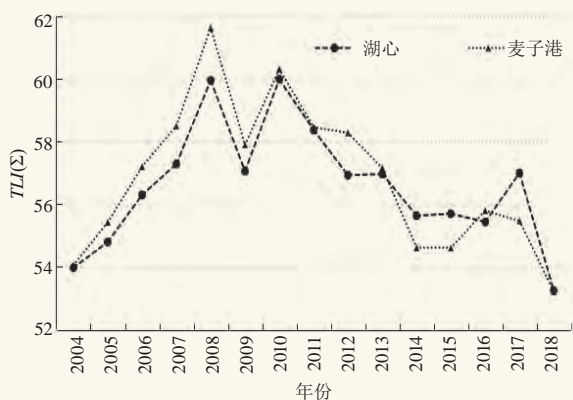


图2 2004—2018年南湖各测点 *TLI*(Σ) 逐年平均值

Fig. 2 The yearly *TLI*(Σ) average value at each monitoring point in Nanhu Lake from 2004 to 2018

2.2 南湖 *TLI*(Σ) 与气象因子的关系

利用2004—2018年水质监测数据, 将多项气象因子分别与湖心和麦子港 *TLI*(Σ) 进行相关分析 (表3) 可知, 两监测点 *TLI*(Σ) 与月平均气温、月均最高气温、月均最低气温、月日照时数、月平均风速均呈显著的正相关 ($P < 0.01$), 与月平均气压、月均最高气压、月均最低气压呈显著的负相关 ($P < 0.01$)。湖心 *TLI*(Σ) 与月降水量、月日降水量 ≥ 50 mm 日数有相关性 ($P < 0.05$), 而麦子港 *TLI*(Σ) 与月降水量、月日降水量 ≥ 50 mm 日数相关性不明显 ($P > 0.05$)。 *TLI*(Σ) 和日照、风速的相关系数麦子港比湖心的大, 与其他气象因子的相关系数湖心比麦子港的大。

2.3 影响气象因子分析

选取月平均气温、月平均日照时数、月平均风速、月平均气压作为气象影响因子进行分析。两监测点 *TLI*(Σ) 多年月平均值变化与月平均气温、月平均日照、月平均风速的变化趋势基本吻合, 与月平均气压

的反向变化趋势基本吻合 (图3)。

蓝藻的生长与水华的形成可以分为休眠、复苏、生长、上浮及聚集等4个阶段。蓝藻的生长速率和光合作用速率在25 °C以上显著增加^[15-16]。岳阳属亚热带季风湿润气候类型, 气温四季变化分明, 具有夏季酷热、隆冬寒冷的特征。每年10月—次年4月岳阳的月平均气温为5.1~19.4 °C; 5—9月月平均气温为22.9~29.5 °C, 其中7月为最热月 (图3a)。春季气温的升高使水中蓝藻逐步复苏及生长。进入夏季, 气温的急剧升高使得蓝藻水华形成所需的积温时间缩短, 有利于蓝藻的生长。同时降水的减少使水体中的污染物和营养盐浓度升高, 富营养化程度加大, 更有利于蓝藻的生长, 水质进一步恶化。

在水中, 蓝藻大量繁殖时需要较多的光照。岳阳日照充足, 各月平均日照时数为74.0~229.8 h, 为藻类生长提供了良好的光照条件。岳阳的日照时数以7月日照最长 (图3b)。

沉积物中积累了大量营养盐的情况下, 强烈的风浪扰动使得沉积物与水体的营养盐交换频繁, 能够快速补充水华暴发期间的营养盐需求, 同时风力作用使上浮蓝藻水华聚集在下风处, 发生“淘洗作用”而对水华发生较为有利。风速的下降使得对水体的搅动减小, 有利于蓝藻生长发育和向某一区域漂移聚积, 气压偏低, 利于蓝藻颗粒上浮到水体表面, 对蓝藻的暴发较为有利^[15-17]。岳阳各月平均风速为2.3~3.2 m/s, 其中6月风速为2.3 m/s, 7月为3.2 m/s (图3c)。岳阳的各月平均气压为997.9~1021.2 hPa, 7月气压最低, 12月最高 (图3d)。

随着春季温度的升高与日照的增多, 两监测点 *TLI*(Σ) 显示南湖水体富营养程度增大明显。6月的风速比5月的小, 同时气压偏低, 有利于蓝藻生长发育, 并且由湖心向麦子港方面漂移聚积; 7月风力增大, 利于蓝藻颗粒上浮到水体表面, 有利于蓝藻上浮聚集。两监测点夏季 *TLI*(Σ) 最大, 是南湖暴发蓝藻水华的高发时段。10月开始, 随着气温的降低, 至次年2月水中蓝藻处于休眠期, 南湖水体富营养化程度随之减小。因此, 春夏季气温与日照为形成南湖富营养化的主导因子, 风速与气压为次要因子。

3 典型气候条件对水质富营养化影响的分析

3.1 2007—2008年南湖 *TLI*(Σ) 实况

南湖两监测点2007年春季 *TLI*(Σ) 较常年偏低, 从5月开始呈上升趋势。进入夏季后 *TLI*(Σ) 迅速升高, 8月达到最高, 湖心和麦子港分别为69.53、67.41, 为湖心和麦子港历年最高值。直至2008年3月两监测点

表3 南湖各测点TLI(Σ)与气象因子的相关性分析

Table 3 The correlation analysis between TLI(Σ) and meteorological factors at each monitoring point in Nanhu Lake

TLI(Σ)	气象因子											
	月平均气温	月均最高气温	月均最低气温	月降水量	月日降水量 ≥ 0.1 mm日数	月日降水量 ≥ 50 mm日数	月日照时数	月平均气压	月均最高气温	月均最低气温	月平均风速	
麦子港	相关系数	0.233**	0.236**	0.230**	0.086	0.053	0.118	0.270**	-0.285**	-0.280**	-0.294**	0.316**
	显著性	0.002	0.002	0.002	0.256	0.482	0.118	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
湖心	相关系数	0.262**	0.260**	0.263**	0.154*	0.102	0.150*	0.239**	-0.324**	-0.319**	-0.333**	0.271**
	显著性	0.000	0.000	0.000	0.04	0.177	0.046	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关, *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

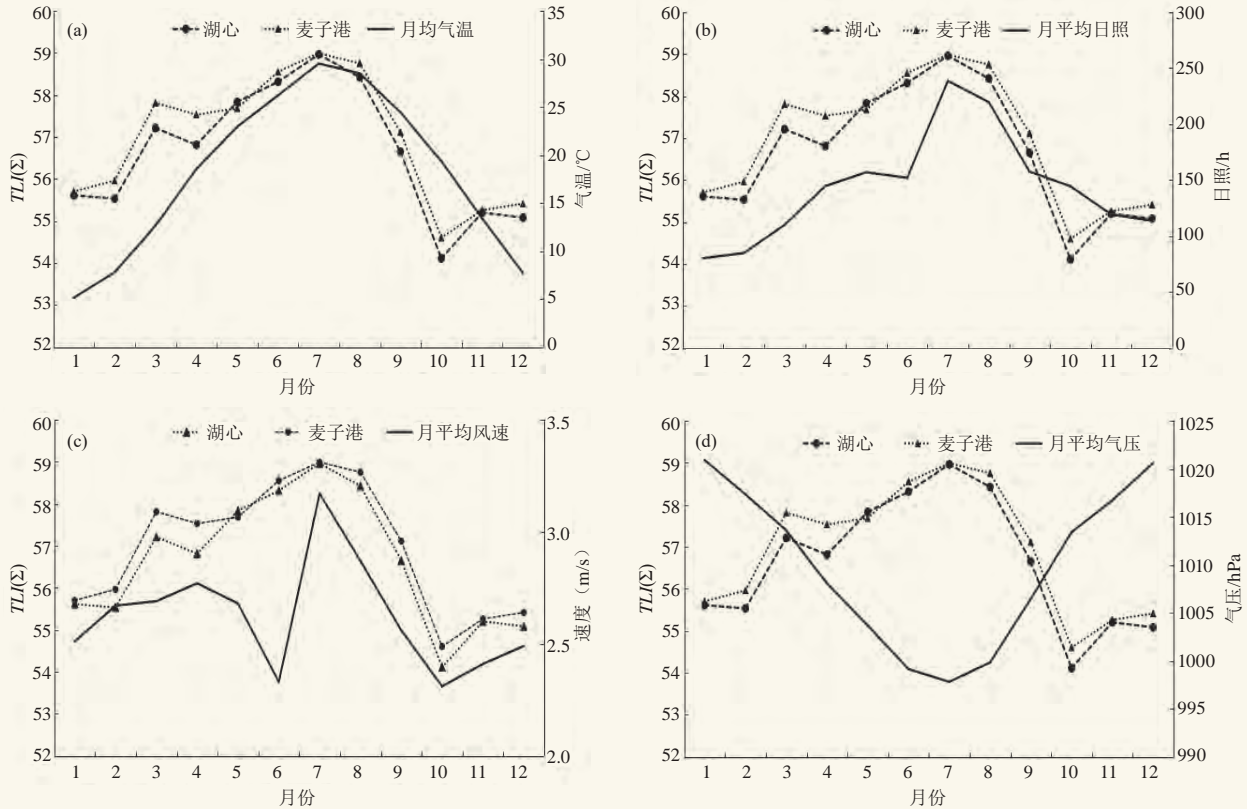


图3 2004—2018年南湖各测点月平均TLI(Σ)与月平均气温(a)、月平均日照(b)、月平均风速(c)、月平均气压(d)时间变化特征

Fig. 3 Monthly average TLI(Σ) and monthly average temperature (a), monthly average sunshine (b), monthly average air pressure (c), monthly mean wind speed (d) at each measuring point of South Lake from 2004 to 2018

TLI(Σ)均较常年偏高(图4)。

3.2 2007—2008年气候实况

2007年岳阳四季气温都较历史同期偏高,冬季为暖冬,入春、入夏均较常年早,夏季延长,并且2月和5月月平均气温均为当地自1952年以来的最高值。3月末出现连续多日日最高气温 ≥ 30.0 °C、5月下旬初出现了 ≥ 35.0 °C的高温天气。2007年岳阳日照时数除夏季较常年偏少外,其余各季较常年均偏多。春、夏季风速较常年偏高。平均气压冬、春、夏季均较常年偏高。岳阳2008年年初出现了1954年以来最具规模的低温雨雪冰冻天气,但2008年春季气温打破了当地56

年来最高记录,夏秋气温继续偏高。日照偏多,月平均风速全年持续偏大。

3.3 南湖水体富营养化气候条件影响的分析

2007年,岳阳春季气温的急剧升高与强光照有利于蓝藻生长,使得蓝藻水华形成所需的积温时间提前。风浪所产生扰动作用使湖体内源负荷明显增强。因此,2007年夏季以来南湖水体富营养化程度持续较高。蓝藻水华的出现,从表现现象上看确实是瞬时的“暴发”,但是其本质却有一个逐渐发展与形成过程,是藻类生物量水体中的逐渐增加的一个缓慢的过程^[18]。2008年冬季岳阳遭遇当地自1954年以来最具规

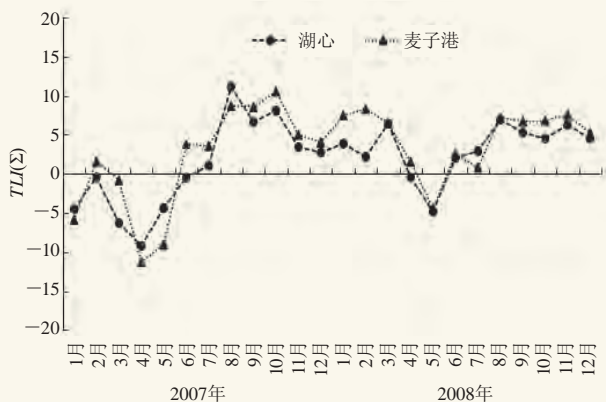


图4 2007—2008年南湖两监测点逐月 $TLI(\Sigma)$ 距平的变化
Fig. 4 Monthly $TLI(\Sigma)$ anomaly changes at two monitoring points in Nanhu Lake from 2007 to 2008

模的低温雨雪冰冻天气，虽然气温偏低，但蓝藻正处于休眠期，对其生长并无大影响，而春、夏季气温持续偏高，有利于蓝藻的生长。2008年年平均风速较常年偏高，气压偏低，说明南湖湖面受到大风的瞬时扰动增多。在强烈风扰动下，表层沉积物受水体的冲击较大，利于蓝藻颗粒上浮到水体表面，使悬浮的量增多，对蓝藻的暴发较为有利。因此受2007年夏季以来水体蓝藻基数较高、上游截污管网不到位等因素影响，2008年南湖暴发了首次蓝藻水华。

由此可见，气温异常偏高、日照偏多、风速偏大等多种气象要素的综合作用是造成2007年南湖水体富营养程度高以及2008年南湖首次暴发蓝藻水华现象的气象因素。

4 小结

气象因素是形成南湖富营养化的重要条件之一。春、夏季气温与日照为形成南湖水体富营养化的主导因子。南湖水体长期稳定处于轻度富营养水平，且富营养程度偏高，这与全球气候变暖使水体春季升温提前，秋季温度下降时间延迟，延长了蓝藻生长的时间有关。南湖水域主要功能包括风景名胜、水上娱乐、水产养殖、防洪蓄水及纳污自净。麦子港位于南湖北面的湖汊，富营养程度高于湖心，最主要的原因是岳阳市南湖周边大量生产生活的污染物进入水体，增加了总磷和总氮浓度，使水体富营养化居高不下。由于南湖水体目前长期稳定处于轻度富营养水平，岳阳的气候条件决定了南湖的蓝藻水华现象在短期内不会完

全解决。

水流流量对水华有限制作用，因修筑大堤，南湖人为地成为了一个几近封闭的湖泊，这也是造成南湖水质富营养化状态居高不下的原因之一。南湖已于2018年下半年与洞庭湖重新连通，水流交换有助于南湖水体的富营养状态的进一步缓解。对于水流流量对南湖水质富营养化的影响，可在将来的工作做进一步分析。

自2010年开始，南湖富营养化程度总体呈下降趋势，2018年 $TLI(\Sigma)$ 为近年来最低，这应该与当地政府按照“截污、禁养、清淤、活水、严管”治理方针治理南湖有关，使入湖氮、磷负荷得到有效削减，减缓了南湖水体富营养化进程。

参考文献

- [1] 葛大兵, 廖柏寒, 程育芝, 等. 岳阳南湖水环境现状评价及对策. 湖南农业大学学报, 2001, 27(2): 128-129.
- [2] 葛大兵, 廖柏寒, 程育芝, 等. 岳阳南湖水环境容量研究. 湖南农业大学学报, 2001, 27(4): 321-323.
- [3] 简永兴, 王建波, 何国庆, 等. 洞庭湖区三个湖泊水生植物多样性的比较研究. 水生生物学报, 2006, 30(2): 160-167.
- [4] Reynold CS. The Ecology of Freshwater Phytoplankton (Cambridge Studies in Ecology). Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [5] 杜桂森. 浮游植物与淡水湖泊的富营养化. 生物学通报, 1990, (5): 25, 43.
- [6] 杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼, 等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策. 湖泊科学, 2019, 31(1): 18-27.
- [7] 林素梅, 王圣瑞, 金相灿, 等. 湖泊表层沉积物可溶性有机氮含量及分布特性. 湖泊科学, 2009, 21(5): 623-630.
- [8] 任健, 蒋名淑, 商兆堂, 等. 太湖蓝藻暴发的气象条件研究. 气象科学, 2008, 28(2): 221-226.
- [9] 王成林, 张咏, 张宇红, 等. 太湖藻源性“湖泛”形成机制的气象因素分析. 环境科学, 2011, 32(2): 401-408.
- [10] 吕兴娜, 尚佰晓. 降雨径流对柴河水库总磷、总氮的水质影响分析. 中国环境管理干部学院学报, 2011, 21(2): 64-66.
- [11] 刘乐, 蔡敏, 陈非洲, 等. 模拟酸雨对不同营养水平湖泊pH值的影响. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 917-923.
- [12] 王丽, 唐纪伟. 螺旋藻生长的气象条件分析. 山东气象, 1998, 18(4): 43-45.
- [13] 王成林, 潘维玉, 韩月琪, 等. 全球气候变化对太湖蓝藻水华发展演变的影响. 中国环境科学, 2010, 30(6): 822-828.
- [14] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉, 等. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [15] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算. 中国科学 (D辑), 2003, 33(8): 760-768.
- [16] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. 湖泊科学, 2009, 21(3): 314-328.
- [17] Wu T F, Qin B Q, Brookes J, et al. The influence of changes in wind patterns on the areal extension of surface cyanobacterial blooms in a large shallow lake in China. Science of the Total Environment, 2015, 518: 24-30.
- [18] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.

基于Landsat遥感数据的洞庭湖面积变化研究

王威^{1, 2} 隋兵¹ 林南² 陈太龙²

(1 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118; 2 湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000)

摘要: 洞庭湖是长江中下游最大的调蓄湖泊, 近年来由于受气候的变化和人类因素的影响, 湖泊面积呈现萎缩的趋势。为更精确的研究洞庭湖面积变化的趋势。利用1994—2017年洞庭湖区高分辨率的Landsat影像, 通过分析不同水体提取方法的优劣, 采用水体指数分析和目视解译相结合的方法, 提取洞庭湖水体面积, 并分析了1994—2017年洞庭湖年内、年际和年代际变化。结果表明: 2017年洞庭湖水体面积有非常明显的丰水期和枯水期的年内变化; 洞庭湖水体面积在1996年(2438 km²)最大, 在2013年(1054 km²)最小; 从25年的洞庭湖面积来看, 25年内洞庭湖经历了扩展—萎缩的变化趋势。

关键词: 洞庭湖, 面积提取, 面积变化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.020

Study on Area Changes of the Dongting Lake Based on Remote Sensing Data

Wang Wei^{1, 2}, Suibing¹, Lin Nan², Chen Tailong²

(1 Key Laboratory of Hunan Province for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118

2 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000)

Abstract: Dongting Lake is the largest regulating lake in the middle and lower reaches of the Yangtze River. To study the trend in area changes of Dongting Lake accurately, the Landsat images from 1994 to 2017 were used to extract the water body area of Dongting Lake. Different water body extraction methods were compared. The water body was extracted based on water body index and visual interpretation, and the inter-annual and annual changes of Dongting Lake from 1994 to 2017 were analyzed. The results show that the normalized vegetation index (NDVI) combined with visual interpretation could accurately extract water body from complex features. The water body area of Dongting Lake changed significantly within the year. The maximum was in 1996 (2438 km²) and the minimum was in 2013 (1054 km²), respectively. From 1994 to 2017, the area of Dongting Lake had a rising trend in 1990s and then decreased in 2000s and 2010s.

Keywords: Dongting Lake, area extraction, area change

0 引言

水体尤其是大型湖泊具有调节气候、含蓄水源的作用, 随着全球气候变化和人类活动的影响, 湖泊生态环境发生了巨大的变化, 这些变化影响着全球淡水资源的分布, 甚而影响区域的可持续发展^[1]。卫星遥感技术为大尺度的水文监测提供了强有力的手段, 研究者借助遥感资料对湖泊面积的变化开展了很多研究。梁丁丁^[2]、阎利等^[3]利用Landsat影像分析了青藏高原湖泊面积变化。徐浩杰等^[4]利用Landsat、MODIS、NOAA/AVHRR数据, 分析了近30年柴达木盆地湖泊面积的变化及其对气候变化的响应关系。

洞庭湖是长江中下游最大的调蓄湖泊, 我国第

二大淡水湖泊, 它的存在对调节湖区周边气候具有重要的作用。目前洞庭湖由于受气候的变化和人类因素的影响, 湖泊面积呈现萎缩的趋势。据湖南省水电勘测设计院测算, 1949年洞庭湖湖泊面积为4300 km², 1983年减至2691 km², 到20世纪90年代末, 面积仅为2579.2 km²^[5]。崔亮等^[6]通过分析1993—2010年洞庭湖水体面积动态变化, 发现18年间湖面积萎缩严重, 秋季平水期萎缩比例少于40%。田伟国等^[7]、王慧等^[8]发现除受气候影像以外, 三峡大坝的建立对洞庭湖面积变化影响也很大。这些研究借助的手段均比较粗略, 遥感影像大多采用分辨率较低的MODIS数据, 利用较高空间分辨率分析洞庭湖面积的研究相对而言较少。为了更精确地分析洞庭湖面积的变化情况, 需要借助更高分辨率的遥感影像, 本文利用Landsat TM/OLI数据研究洞庭湖面积的变化。

收稿日期: 2019年9月2日; 修回日期: 2019年11月25日

第一作者: 王威(1988—), Email: 657484303@qq.com

通信作者: 隋兵(1975—) Email: 2565711@qq.com

1 研究区概况

洞庭湖位于长江中下游，北接长江，西南面与湘、资、沅、澧四水相通，跨岳阳、常德、益阳三市^[9]。洞庭湖主体大致可分为东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖三部分，湖体之间通过星罗密布的河网和洪道相连。洞庭湖属于季节性湖泊，水位始涨于4月，7—8月最高，11月—翌年3月为枯水期。多年最大水位变幅，岳阳达17.76 m。素有“洪水一大片，枯水几条线”“霜落洞庭干”之说。洞庭湖水体面积经历了“扩张—萎缩—扩张—萎缩”的发展阶段，在鼎盛时期洞庭湖曾号称“八百里洞庭”，在近一百年内，由于人为和政策的原因，湖泊萎缩速度加剧。人类过度的干预导致洞庭湖区域洪灾泛滥，尤其在经历了1996、1998、1999年连续几次大水灾之后，洞庭湖进入了新的历史时期，以水利建设为重点的洞庭湖治理工程相继开展，其中尤以三峡水利工程影响最大，三峡大坝建成后，洞庭湖防洪压力减轻，但与此同时大坝的建成也对洞庭湖水体面积变化产生了巨大影响。

2 数据来源与方法

2.1 Landsat 数据

遥感数据选取的是Landsat 5 TM和Landsat 8 OLI数据，本研究使用波段的空间分辨率皆为30 m。由于丰水期（4—10月）和枯水期（11月—次年3月）的洞庭湖面积差异巨大，枯水期面积较稳定，丰水期更能体现洞庭湖面积变化趋势，因此，本文选用1993—2017年4—10月的Landsat影像进行分析，每期影像由轨道号123/40、124/40两幅影像经过校正、拼接而成。表1为本文所使用遥感数据详细信息。

2.2 湖泊面积提取方法

本研究利用遥感影像提取湖泊面积的方法包括单波段阈值分析法、植被指数法、多波段谱间关系法、目视解译法等^[4]。其中，单波段阈值分析法，主要利用对水体界限反映较敏感的近红外波段提取水体面积^[10]；植被指数法分别基于归一化植被指数（NDVI）、归一化水体指数（NDWI），该类方法考虑水体在不同波段不同的透射性和吸收量，并利用波段数值差和数值和的比值作为水体的判识依据；多波段谱间关系法，利用水体独特的谱间关系来提取水体的面积，本研究使用水体指数（WRI）法。各指数的具体计算公式可参考文献[4, 10-11]。

借助上述方法对2017年丰水期的洞庭湖水体面积进行提取（图1和图2），5种提取水体方法均能成功提取出洞庭湖水体面积。单波段法在提取水体时需根据水体在影像中呈现的波段特征进行反复试验，本试

验中阈值 $T=7200$ ，但该方法水体信息缺失率较高。多波段谱间关系法虽然克服了利用单波段提取水体信息时造成的缺失问题，但将水田、阴影等误判为水体的概率较高。植被指数法和归一化植被指数法较单波段法和多波段谱间关系法误判率较低。其中，归一化植被指数能较准确的识别水体，但其在地物复杂地段，尤其是水体、水田、裸露滩地共存的部分，该方法也很难将水体区分，因此需要借助目视解译法，利用丰富的专业知识从复杂地物中提取出水体。

3 结果与分析

3.1 年内湖泊面积变化

Landsat卫星重访期为16 d，且易受云雾干扰，因此本文仅以2017年丰水期和枯水期来分析年内湖泊面积变化情况。丰水期采用2017年7月的两幅影像、枯水期采用2017年12月的两幅影像。分析可知，2017年丰水期洞庭湖面积约为1920 km²，枯水期面积约为607 km²，两者相差1313 km²。洞庭湖2017年湖泊面积变化如图3所示，可见洞庭湖湖泊面积变化受季节影

表1 遥感影像详细信息
Table 1 Details of remote sensing images

年份	传感器类型	轨道号 (Path/Row)	采集日期
1994年	Landsat 5 TM	123/40	1994-08-03
	Landsat 5 TM	124/40	1994-08-12
1995年	Landsat 5 TM	123/40	1995-06-28
	Landsat 5 TM	124/40	1995-07-21
1996年	Landsat 5 TM	123/40	1996-09-02
1998年	Landsat 5 TM	123/40	1998-08-23
	Landsat 5 TM	124/40	1998-10-01
1999年	Landsat 5 TM	123/40	1999-09-11
	Landsat 5 TM	124/40	1999-08-01
2000年	Landsat 5 TM	123/40	2000-07-27
	Landsat 5 TM	124/40	2000-07-19
2006年	Landsat 5 TM	123/40	2006-06-10
	Landsat 5 TM	124/40	2006-07-19
2007年	Landsat 5 TM	123/40	2007-07-31
	Landsat 5 TM	124/40	2007-08-07
2011年	Landsat 8 OLI	123/40	2011-07-26
	Landsat 8 OLI	124/40	2011-08-18
2013年	Landsat 8 OLI	123/40	2013-06-13
	Landsat 8 OLI	124/40	2013-08-07
2014年	Landsat 8 OLI	123/40	2014-10-06
	Landsat 8 OLI	124/40	2014-09-27
2016年	Landsat 8 OLI	123/40	2016-06-05
	Landsat 8 OLI	124/40	2016-05-11
2017年	Landsat 8 OLI	123/40	2017-07-26
	Landsat 8 OLI	124/40	2017-07-17
	Landsat 8 OLI	123/40	2017-12-17
	Landsat 8 OLI	124/40	2017-12-08

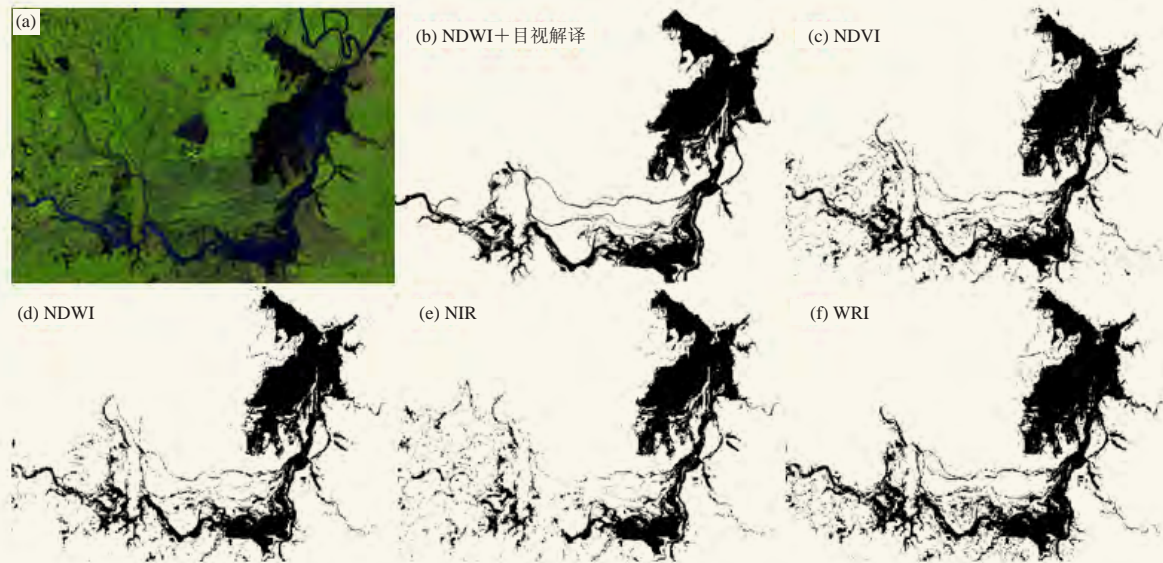


图1 利用不同方法提取的2017年丰水期洞庭湖面积
Fig. 1 Dongting Lake area extracted by different methods in 2017

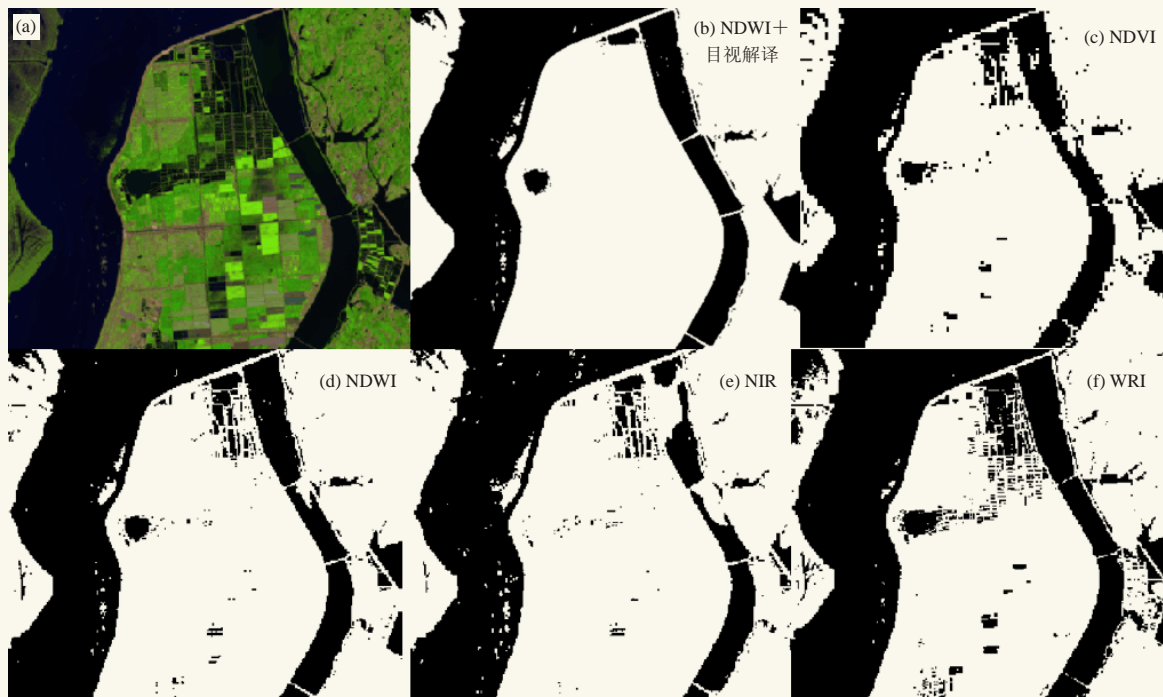


图2 不同方法提取的洞庭湖水体局部对比
Fig. 2 Local comparison of DDongting Lake extracted by different methods

响很大。在丰水期湖体丰满、接联成片，在枯水期湖体枯瘦、似断似联，这种变化与洞庭湖区域汛期和非汛期时间变化相吻合。丰水期正直洞庭湖区域雨季，全年80%以上降水集中于该时期，其次洒水及长江上游来水也多集中于该时期；枯水期恰逢湖区的非汛期，降水量减少，三峡大坝此时也处于蓄水期，导致上游来水减少，使得湖泊面积减小，因此也造就了洞庭湖“洪水一大片，枯水几条线”的奇异景象。

3.2 年际湖泊面积变化

研究^[7]表明，洞庭湖枯水期水体面积较稳定，丰水期水体面积年际变化比较明显。因此，选取1994—2017年丰水期的Landsat影像分析洞庭湖水体面积年际变化。本文提取的洞庭湖水体仅为东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖和南湖部分水体。结果显示（图4和表2）：洞庭湖水体面积在1996年最大（2438 km²），其次是1998年（2285 km²）、2016年（2025 km²）。

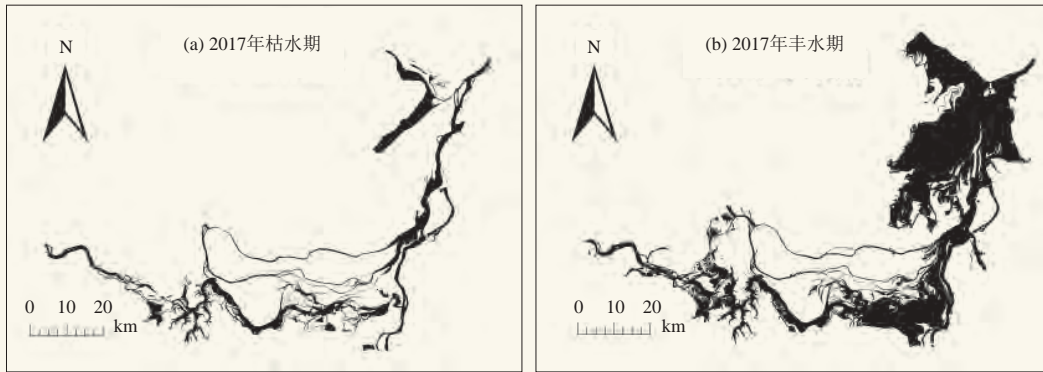


图3 2017年洞庭湖枯水期 (a) 和丰水期 (b) 水体面积对比

Fig. 3 Comparison of water area in Dongting Lake during between the dry season (a) and the wet season (b) in 2017



图4 1994—2017年洞庭湖面积年际变化

Fig. 4 Area changes of Dongting Lake from 1994 to 2017

表2 不同遥感影像提取的洞庭湖水体面积对比 (单位: km²)
Table 2 Comparisons of Dongting Lake area extracted by different remote sensing images (unit: km²)

卫星	面积	1994	1995	1996	1998	2000	2006	2007	2011	2013	2014	2016	2017
风云卫星	面积最大值	1513	1978	3024	2375	1838	1360	1635	1406	1518	1929	2262	2229
	面积最小值	470	437	491	470	442	272	417	443	520	609	445	602
MODIS	面积最大值					1859	1468	1530					
	面积最小值					1366	242	657					
Landsat	面积	1501	1990	2438	2285	1832	1342	1630	1217	1054	1590	2025	1920

洞庭湖水体面积最小的3年均是在2000年后, 分别是2013年(1054 km²)、2011年(1217 km²)和2006年(1342 km²)。

为验证利用NDWI加目视解译法提取Landsat影像中洞庭湖水体面积的可信度, 本研究对比分析了以往利用不同遥感影像提取洞庭湖面积^[12]与本文的差别, 对比结果如表2所示, 可以发现, 本文提取的洞庭湖水体面积除1995年超过风云卫星提取的水体面积最大值外, 其他年份提取的水体面积均在年最大面积和年最小面积范围之内, 说明利用NDWI加目视解译提取Landsat中洞庭湖水体面积方法较为可靠。

3.3 年代际湖泊面积变化

表3给出了不同时期洞庭湖湖泊面积变化趋势, 其中, 20世纪90年代的面积变化基于1998年与1994年的差值; 21世纪00年代的基于21世纪00年代与20世纪90年代的差值; 2010年以来与21世纪00年代的算法相同。20世纪90年代平均扩展面积为20世纪90年代面积变化值的平均值, 参与计算的年份为1994、1995、1996和1998年; 21世纪00年代与2010年以来的算法相同, 其中21世纪00年代参与计算的年份为2000、2006和2007年, 2010年以来参与计算的年份为2011、2013、2014、2016和2017年。由表3可知, 1994—2017年, 洞庭湖经历了扩张—萎缩的变化过程。20世纪90年代洞庭湖呈扩张趋势, 2000年以后, 湖面呈萎缩趋势, 21世纪00年代相较20世纪90年代湖泊面积缩小452 km², 2010年以来洞庭湖湖泊面积缩小40 km²。

表3 不同时期洞庭湖湖泊面积变化趋势

Table 3 Trend in Dongting Lake area between different periods

年代	湖泊面积/km ²	面积变化/km ²	平均扩展面积/km ²	分析结果
20世纪90年代	2054	784	196	扩张
21世纪00年代	1601	-52	-150	萎缩
2010年以来	1561	-40	-8	萎缩

4 结论

利用5种不同水体提取方法, 对Landsat影像中的洞庭湖面积进行了提取, 分析了不同方法的优劣, 并选择NDWI加目视解译的方式对1994—2017年间洞庭

湖水体面积进行提取。结果表明:

1) 单一的提取水体的方法在提取Landsat影像中的洞庭湖水体时均存在较大的误差, 选用NDVI结合目视解译的提取方法能较准确地从复杂地物中识别出水体。

2) 洞庭湖水体面积年内变化明显, 2017年洞庭湖丰水期与枯水期面积相差1313 km²。在丰水期湖体丰满、接联成片, 在枯水期湖体枯瘦、似断似联。

3) 洞庭湖水体面积在1996年最大(2438 km²), 其次是1998年(2285 km²), 2016年(2025 km²)位列第三。洞庭湖水体面积最小的3年均是在2000年后, 分别是2013年(1054 km²)、2011年(1217 km²)和2006年(1342 km²)。

4) 1994—2017年洞庭湖湖体经历了扩张—萎缩的变化过程, 20世纪90年代洞庭湖呈扩张趋势, 2000年以后, 湖面呈萎缩趋势, 21世纪00年代相较20世纪90年代湖泊面积缩小452 km², 2010年以来相较21世纪00年代洞庭湖湖泊面积缩小40 km²。

参考文献

- [1] 邓帆. 基于遥感技术的洞庭湖淹没频率和湿地植被关系研究. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [2] 梁丁丁. 1975—2010青藏高原湖泊面积变化及对气候变化的响应. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [3] 阎利, 张延斌, 易桂花. 2000年以来青藏关于湖泊面积变化与气候要素的响应关系. 湖泊科学, 2019, 31(2): 573-589.
- [4] 徐浩杰, 杨太保. 1981—2010年柴达木盆地气候要素变化特征及湖泊和植被响应. 地理科学进展, 2013, 32(6): 868-879.
- [5] 中国水利百科全书第二版编辑委员会. 中国水利百科全书. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [6] 崔亮, 李永平, 黄国和, 等. 基于Landsat-TM影像的洞庭湖水动态变化. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 63-66.
- [7] 田伟国, 彭嘉栋, 沈军等. 基于MODIS影像序列的三峡截流前后洞庭湖面积变化序列分析. 安徽农业科学, 2012, 40(16): 9141-9145.
- [8] 王慧, 谢小魁, 米胜渊. 基于遥感的洞庭湖面积变化及其影响研究. 农业网络信息, 2017, (1): 90-95.
- [9] 张猛, 曾永年. 基于多时相Landsat数据融合的洞庭湖区水稻面积提取. 农业工程学报, 2015, 31(13): 178-185.
- [10] 周成虎, 骆剑承. 遥感影像地学理解与分析. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] Gautam V K, Gaurav P K, Murugan P, et al. Assessment of surface water dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and K-T transformation. Aquatic Procedia, 2015, 4: 739-746.
- [12] 梁婕, 蔡青, 郭生练, 等. 基于MODIS的洞庭湖湿地面积对水文的响应. 生态学报, 2012, 32(21): 6628-6635.

利用区域自动站资料分析岳阳市城郊以及山区降水差异

袁泉¹ 吴思雁¹ 肖平^{1,2} 李奇¹

(1 湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000; 2 湖南省湘阴县气象局, 湘阴 414600)

摘要: 利用2016—2018年岳阳地区9个区域自动气象站的逐日降水观测资料对岳阳市城区、郊区以及山区降水差异进行了分析。结果表明,岳阳市城区全年雨岛效应不明显,其影响体现在郊区,城区、郊区及山区的降水差异还受到地形和湖陆效应的影响。但在降水极端性较强的年份,降水明显的月份雨岛效应在城区有一定的体现。山区地形作用对降水强度有明显加强作用,暴雨发生频次山区大于城区和郊区,东部山区山洪泥石流的风险较大。在大强度降水情况下岳阳市城区和郊区降水差距很小,雨岛效应不明显,郊区的丘陵地形使降水稍有增强。

关键词: 区域自动站,岳阳市,降水,差异

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.021

Analysis of Differences of Rainfall Between Urban, Rural and Mountainous Areas in Yueyang Municipality by Using Regional Intensive Automatic Stations

Yuan Quan¹, Wu Siyan¹, Xiao Ping^{1,2}, Li Qi¹

(1 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000 2 Xiangyin Meteorological Bureau, Xiangyin 414600)

Abstract: The precipitation differences between urban, rural, and mountainous areas in Yueyang municipality were analyzed based on the hourly rainfall observation data from 2016 to 2018 at the 9 regional intensive automatic stations. The results showed that there were obviously rain-island effects in the rural region but not in the urban region of Yueyang. The precipitation differences between urban, rural, and mountainous areas were also affected by the region and the interaction of lake and land. But in the years when there was extreme rainfall events, urban areas retained some rain-island effect in months with significant rainfall. The effect of mountain terrain strengthened the rainfall intensity. The frequency of storm was higher in the mountainous areas than urban and rural regions. There was big risk of mountain torrents and debris flow in the eastern mountain areas. Under the situation of heavy rainfall event, there was a small rainfall gap between urban and rural regions in Yueyang, without obviously rain-island effect. Rainfall intensity was slightly strengthened by the hilly land in the rural regions.

Keywords: regional intensive automatic station, Yueyang, rainfall, difference

0 引言

由于城市内空气流通不畅,凝结核较多,下垫面粗糙,城市热岛导致局地大气不稳定有利于对流性降水发生发展,而产生雨岛效应。对多个大城市的研究表明,城市化会增加城区及下风方向的降水量^[1]。曹琨等^[2]对上海的研究发现热岛和雨岛关系密切。Chen^[3]针对上海地区的研究表明,随着长三角城市群的发展,降水量是增长的。对2003年6月4日北京对流系统的研究^[4],发现在城市和郊区的交界处降水增多,降水的峰值中心在城市的下风方向。但是另有

一些研究得出其他结论,如王喜全等^[5]研究发现北京地区冬季城市热岛效应和干岛效应增强,使城区及南部地区的降水相对减少。陈圣劫等^[6]对南京地区的研究,认为一般性降雨的降水量城郊差异不明显,城市化对其的落区分布影响较小。

岳阳是城市规模类似于邯郸的中型城市,虽然已有对邯郸的研究表明像邯郸这样的中型城市雨岛效应与热岛效应遥相呼应,汛期城市雨岛效应明显^[7],但岳阳市气候属亚热带季风湿润气候。境内东部为山地和丘陵地区,西部为平原湖泊地区,在地形和气候上和邯郸颇有不同,且对于岳阳市的雨岛效应的研究是不足的,因而加强对岳阳的雨岛效应的影响研究仍是非常必要的。

收稿日期: 2019年6月23日; 修回日期: 2019年11月12日
第一作者: 袁泉(1981—), Email: 65196063@qq.com

1 资料和方法

根据岳阳市区域自动站网的分布情况(图1),选取位于市区的中储棉站(海拔39.6 m)、修防处站(海拔36.3 m)、南湖站(海拔32.0 m),代表岳阳市城区降水量。云溪水厂站(海拔68.6 m)、三荷站(海拔88.7 m)位于岳阳城区远郊丘陵地区,代表郊区降水量。毛田站(海拔107.7 m)、相思站(海拔318.6 m)、红光水库站(海拔304.2 m)、虹桥水厂站(海拔282.0 m)位于幕阜山区,可以代表山区降水量。城区3个站点均匀分布在北部、中部和南部,郊区的2个亦呈南北均匀分布,代表山区的4个站沿着山势布局。9个站点探测环境好,资料连续,检定正确,可以有效代表岳阳市的整体情况。利用2016—2018年这9个区域自动气象站的逐日降水观测资料进行研究。这9个自动气象站分别代表城区、郊区和山区,使用统计方法对降水量进行对比分析。



图1 岳阳市代表站点位置分布图

Fig. 1 Distribution of selected meteorological observation stations in Yueyang

2 结果分析

2.1 全年降水量分析

利用中储棉站、修防处站、南湖站、云溪水厂站、三荷站、毛田站、相思站、红光水库站、虹桥水厂站9个代表站2016—2018年全年降水量资料进行对比分析可知,3年总体来说岳阳市城区代表站全年降水量均小于郊区代表站。究其原因在于岳阳市城区面积相对较小,由于热岛影响,城市大气不稳定利于产生热对流,而产生对流云^[2],随着系统东移,反而使城区雨岛效应不明显而影响位于下风方向的郊区。而其他大型城市城区面积广大,和岳阳有所不同,雨岛效应是城区明显。同时岳阳地形是东高西低,城区位于洞庭湖畔平原半岛上,而岳阳市郊区地形是以丘陵为主,从而对于岳阳市来说,城区、郊区和山区的降水差异还受到地形和湖陆效应的影响,故岳阳市城区全年降水量要小于郊区。幕阜山区,由于地形作用明

显,降水量远大于岳阳市城区和郊区(表1)。

表1 2016—2018年岳阳市城区、郊区和山区年平均降水量
Table 1 Yearly rainfall amounts from 2016 to 2018 in urban, rural and mountain areas of Yueyang

		2016年/mm	2017年/mm	2018年/mm	平均/mm
城区 站点	中储棉	1517.1	1934.2	/	1725.7
	修防处	1399.9	1771.2	1227.8	1466.3
	南湖	/	1704.4	1366.9	1535.7
城区平均		1458.5	1803.3	1297.4	1519.7
郊区 站点	云溪水厂	1764.0	1871.8	1430.9	1688.9
	三荷	1212.6	1807.0	1404.9	1474.8
	郊区平均	1488.3	1839.4	1417.9	1581.9
山区 站点	毛田	1886.2	2031.9	1423.0	1780.4
	相思	1955.1	2146.3	1610.0	1903.8
	红光水库	1668.5	1761.3	1487.1	1638.9
	虹桥水厂	2018.3	1872.5	1481.6	1790.8
	山区平均	1882.1	1953.0	1500.4	1778.5

分年份讨论,以郊区降水量为基准。降水极端性较强的2016年,城区降水偏少2.0%,山区降水偏多26.5%。降水充沛的2017年,城区降水偏少2.0%,山区降水偏多6.2%。降水量接近常年的2018年,山区降水偏多5.8%。进一步说明对于全年来说,岳阳市雨岛效应影响在下风方向的郊区,地形的作用也不容忽视。2016年降水极端性较强,多数月份强降水以对流性降水为主,山区地形抬升的动力作用对对流的发生发展作用明显;反之降水充沛的年份以系统性降水为主,中低层急流旺盛,整个岳阳地区水汽充足,同时有高空槽和中低层切变线的配合,天气系统的动力作用远大于地形的动力作用,山区地形作用反而显得不那么明显。

2.2 分月降水分析

3年总体来说,城区和郊区以及山区月降水量的季节变化趋势较为一致,其月平均降水量有一定的差异(图2)。城区和郊区的分月平均降水量差异不大,郊区略多于城区,但是山区汛期(4—9月)明显多于城区和郊区。参考已有的研究,表明岳阳城区汛期降水夜雨多发,空间上西少东多,西水东陆的格局是形成降水时空差异的重要原因^[8],城区雨岛效应不明显,降水的增加出现在下风方向的郊区。同时4月和7月是山区与城区及郊区平均降水量差异最大的月份,这两月降水有显著的对流性,说明山区地形对岳阳市对流性降水的增幅十分明显。

降水极端性较强的2016年(图3),4月和7月城区降水量较明显大于郊区降水量。即在降水分布不均极端性较强的年份,降水明显的月份雨岛效应在城区有一定的体现。但是山区降水量仍明显大于城区和郊



图2 岳阳地区2016—2018年总平均分月降水量
Fig. 2 Total monthly average rainfall amounts in Yueyang from 2016 to 2018

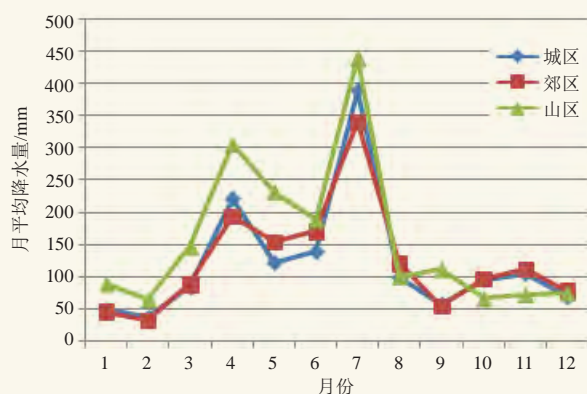


图3 2016年岳阳地区月平均降水量
Fig. 3 Monthly average rainfall amounts in Yueyang in 2016

区，山区地形的抬升作用仍然很强。2017年（图4）降水充沛，汛期降水以系统性强降水为主，这一年汛期城区降水曲线与郊区降水曲线基本重合，雨岛效应基本没有。同时在降水最强的月份城区和郊区的降水量明显大于山区，这与洞庭湖区夜雨多发、夜晚洞庭湖水较陆地温度稍高形成的热效应和增湿效应是分

不开的。这一年8月又处于对流性降水明显的时段，山区降水量明显多于城区和郊区，更进一步说明在对流性降水明显的时段，山区地形的抬升作用对降水的增幅明显。降水接近常年的2018年（图5），汛期山区降水最多，城区降水少于郊区，雨岛效应影响处于城区下风方向的郊区。

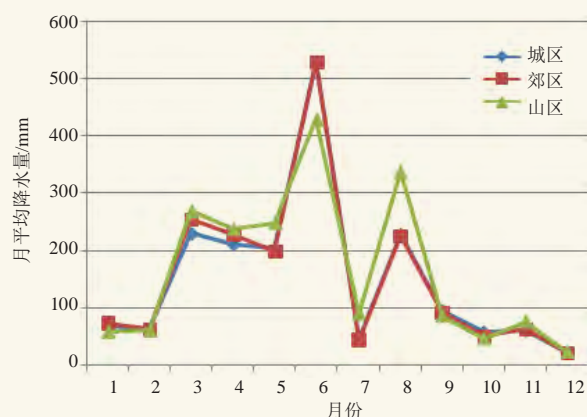


图4 2017年岳阳地区月平均降水量
Fig. 4 Monthly average rainfall amounts in Yueyang in 2017

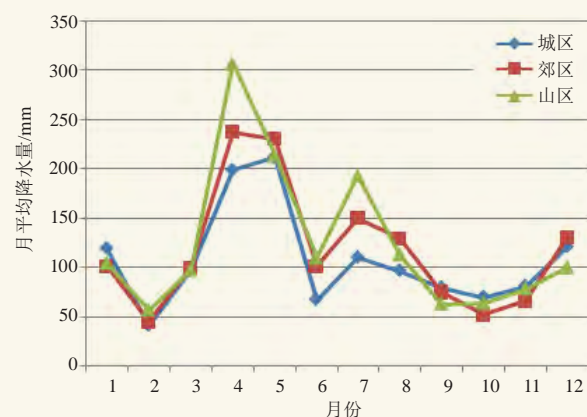


图5 2018年岳阳地区月平均降水量
Fig. 5 Monthly average rainfall amounts in Yueyang in 2018

综上所述，雨岛效应的影响存在地区差异和季节差异，其很大程度上受到天气系统环流的影响。在降水极端性较强的年份，降水明显的月份雨岛效应在城区有一定的体现。但是地形抬升作用仍然最强，特别大的降雨容易出现在山区，要注意山洪泥石流等地质灾害。对于降水充沛的年份，雨岛效应基本没有，天气系统环流占主导地位，地形的抬升作用亦不明显；洞庭湖区夜雨明显，夜晚洞庭湖水较陆地温度稍高形成的热效应和增湿效应具有明显作用。降水接近常年的年份，雨岛效应体现在下风方向的郊区，山区地形对降水的增幅作用较明显。

2.3 不同量级降水频次分析

分析岳阳市3年不同量级降水频次的平均值可以发现，不同等级降水频次中小雨最多，中雨次之，暴雨及以上量级频次最少。小雨量级降水频次占到了全年各量级降水总频次的72%，中雨为17%，大雨为8%，暴雨及以上量级只占3%。从区域来说，小雨频次是城区、郊区、山区逐步增加，中雨频次是郊区最多，山区次之，城区最少，大雨频次城区和郊区差不多，山区最多，暴雨及以上量级频次为城区、郊区、山区逐步增加。

分月来看，小雨量级的降水频次也基本呈现城

区、郊区、山区逐步递增的趋势（图6）。具体为10—1月是岳阳市小雨量级降水日数最多的季节，其次为2—6月，最少的是7—9月。

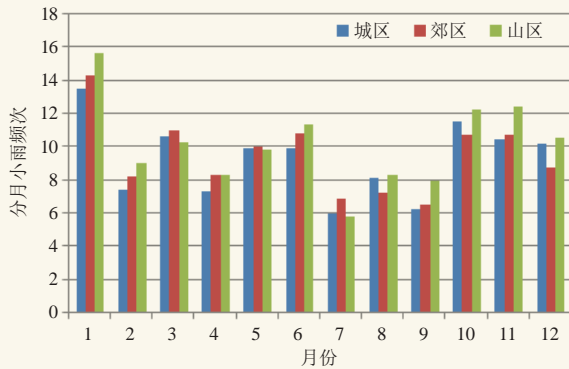


图6 2016—2018年岳阳地区分月小雨频次
Fig. 6 Monthly frequency of light rainfall from 2016 to 2018 in Yueyang

中雨量级的降水频次分布呈现单峰特征（图7），峰值出现在3月，2月出现了一个极小值。按季节来分的话，春季3—5月是岳阳市中雨日数最多的季节。按地域来说，3月郊区中雨日数最多，4月城区中雨日数最多，山区在中雨日数较少的夏季体现为日数最多。

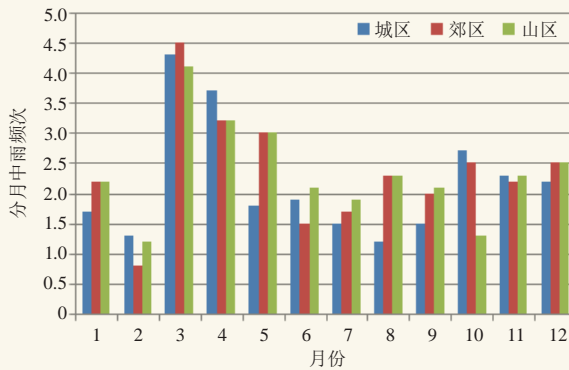


图7 2016—2018年岳阳地区分月中雨频次
Fig. 7 Monthly frequency of moderate rainfall from 2016 to 2018 in Yueyang

大雨量级的降水频次分布（图8），从时间段来看，大雨集中期出现在4—6月，最少时段为10—2月，说明对于整个岳阳市来说冬半年出现大雨的可能性较低。同时10月又是全年大雨日数最少的月份。从地域分布来看，大多数月份山区大雨日数最多，山区大雨日数的峰值出现在5月，次峰值出现在7月，7月山区大雨日数比城区和郊区多出一倍，说明降水对流性强的月份地形的增幅作用很明显。

暴雨及以上量级的降水频次分布（图9），从时间段来看，暴雨及以上量级降水集中出现在4—8月，3月和9月暴雨极少，冬半年的10—2月没有暴雨出现。从地域分布来看，山区暴雨日数4月，6月和7月

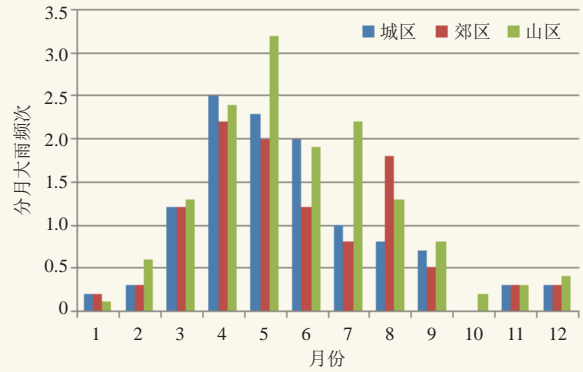


图8 2016—2018年岳阳地区分月大雨频次
Fig. 8 Monthly frequency of heavy rainfall from 2016 to 2018 in Yueyang

分布较多且比较平均，峰值在4月。对于郊区来说，暴雨日数的单峰值在6月，4月和7月也较多且平均分布。城区为暴雨日数最少的区域，峰值在8月。6月是城区、郊区和山区暴雨日数差异最为显著的月份，岳阳正好处于降水集中期，以系统性降水为主，降水系统自西向东通过洞庭湖区有增湿作用，又在处于丘陵区的郊区有所抬升，造成郊区的降水最为猛烈。4月和7月，岳阳降水不全是大规模天气系统性降水，有部分地形作用的强对流降水，在山区的迎风面地形抬升的动力作用形成强对流性暴雨，而丘陵区动力作用不足以形成强对流，故郊区暴雨日数不如山区。综上所述，虽然暴雨以上量级降水是以地形作用为主，但是在降水最为集中的6月，洞庭湖水域的作用也不可忽视，水域的作用和地形抬升作用共同造成了郊区暴雨日数最多。

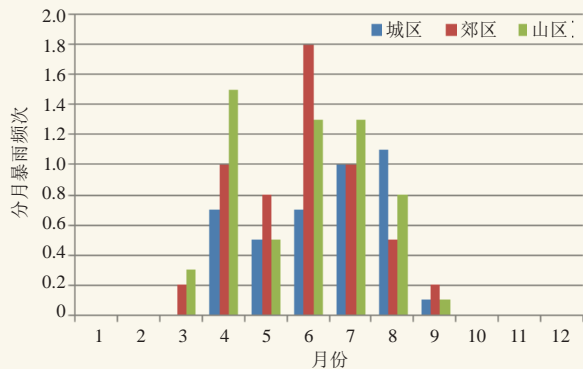


图9 2016—2018年岳阳地区分月暴雨频次
Fig. 9 Monthly frequency of storm from 2016 to 2018 in Yueyang

2.4 大强度致灾暴雨时城区和郊区短时强降水发生频次及强度分析

2016—2018年的岳阳市区附近大强度致灾暴雨过程为2016年7月1—4日过程（过程持续4 d）、2017年6月22日下午至24日早晨过程（过程降水于24日08时以

前基本结束,过程持续2 d)、2017年6月29日至7月1日过程(过程持续3 d),以及2018年4月30日晚至5月1日上午的过程(过程持续1 d)。

综合上述4次暴雨过程,分析在大强度暴雨过程中发生短时强降水的平均频次(平均频次的计算方法为:每个站点3次过程出现的短时强降水总次数除以过程总日数,再分城区和郊区分别求平均),发现城区发生短时强降水的平均频次为每日1.07次,而郊区为每日1.10次,郊区与城区短时强降水平均频次数相当,郊区略高。

计算短时强降水的强度(强度的计算方法为:每个站点3次过程出现的短时强降水总降水量除以短时强降水的总小时数,再分城区和郊区分别求平均)发现,城区站点的平均强度约为31.4 mm/h,郊区站点的平均强度约为31.7 mm/h,郊区短时强降水平均强度略大。

综上,在大强度暴雨过程时,城区和郊区短时强降水频次相当,郊区略高;强度也是郊区略高于城区。说明在大强度降水情况下岳阳市城区和郊区降水差距很小,雨岛效应不明显,郊区丘陵地形对降水强度的增加稍有作用。

3 结论

岳阳市城区全年雨岛效应不明显,其影响位于城区下风方向的郊区,城区、郊区和山区的降水差异还受到地形和湖陆效应的影响。在汛期降水极端性较强的年份,降水明显的月份雨岛效应在城区有一定的

体现,山区的地形抬升作用最强。对于降水充沛的年份,雨岛效应基本没有,天气系统环流占主导地位,地形的抬升作用不明显,洞庭湖区夜雨,夜晚湖区暖水面的增温增湿效应具有明显作用。降水接近常年的年份,雨岛效应影响处于城区下风方向的郊区,山区地形对降水的增幅作用较明显。

对于岳阳市来说全年平均小雨量级降水日数占到了全年各量级降水总日数的72%,中雨为17%,大雨为8%,暴雨及以上量级只占3%。暴雨发生频次和强度山区大于城区和郊区,说明暴雨以上量级降水日数的分布仍然是以地形作用为主,城市雨岛效应并不明显。大强度降水情况下岳阳市城区和郊区降水差距很小,雨岛效应不明显,郊区丘陵地形对降水强度的增加稍有作用。

参考文献

- [1] 严昇.我国大型城市暴雨特性及雨岛效应演变规律.上海:东华大学,2015.
- [2] 曹琨,葛朝霞,薛梅,等.上海城区雨岛效应及其变化趋势分析.水电能源科学,2009,27(5):31-33,54.
- [3] Chen J. Genetic analysis of a heavy rainstorm on June 29, 2006 in Henan Province. Meteorological and Environmental Research, 2012, 12: 37-41.
- [4] 郑祚芳,高华,王在文,等.北京地区降水空间分布及城市效应分析.高原气象,2014,33(2):522-529.
- [5] 王喜全,王自发,齐彦斌,等.城市化进程对北京地区冬季降水分布的影响.中国科学(地球科学),2008,38(11):1438-1443.
- [6] 陈圣劫,尹东屏,李玉涛,等.南京地区城郊降雨差异特征分析.气象与环境学报,2016,32(6):27-33.
- [7] 周世志,瞿常杰.邯郸城区“雨岛效应”初步分析.河南水利与南水北调,2013(14):20-21.
- [8] 朱浩,谢友文,张凤.岳阳市中心城区汛期降水时空分布特征.沙漠与绿洲气象,2017,11(8):100-103.

岳阳气象服务为大岳高速洞庭湖大桥建设保驾护航

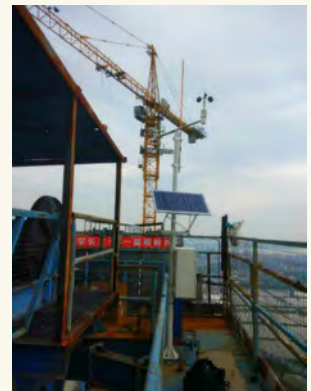
■ 王威

大岳高速洞庭湖大桥是杭瑞高速控制性工程,大桥建设自2013年启动至2018年通车运行,历时5年。大桥主体工程位于洞庭湖岳阳境内,处于湘江入长江的咽喉地段。



桥梁规划、设计、施工、营运均受到洞庭湖复杂气象条件制约。为规避大桥气象风险,保障大桥建设安全,岳阳市气象局联合湖南省气候中心在桥位区建

立70 m垂直测风塔,在桥梁主塔208 m高度建立高空测风站,结合岳阳市气象部门已有的水、陆、空基立体观测网,为大桥建设提供了全方位气象监测。在气象监测网基础上,通过开发洞庭湖大桥气象保障服务系统,成立专业的气象服务团队,提供跟进式气象服务,为大桥施工建设提供气象保障。



(作者单位:湖南省岳阳市气象局)

岳阳市近30年城市气象灾害变化特征分析

许丽丽 陈世文 昌立伟
(湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000)

摘要: 基于岳阳市1989—2018年地面基本气候资料, 统计岳阳市主要的城市气象灾害, 结合城市发展信息, 分析得出灾害变化规律。结果表明: 1) 内涝、热害、大风、雷电、大气污染等城市气象灾害呈现明显的变化特征。城市暴雨日数有2~4天的变化幅度, 近10年暴雨日数有所下降, 但短时强降水频数、24 h最大降水量都是上升态势, 且1 h最大降水量数值都较大, 极端降水越来越多。2) 年雷电日数呈现下降趋势, 且近12年都在平均数以下, 下降率为-31 d/10 a, 但雷电强度有所增强, 灾害影响明显。高温日数年际变化较大, 呈增加趋势, 且高温极值有所提高。3) 大风日数呈减少趋势, 但城市内小尺度瞬时大风的现象日渐增多。4) 2005年之后, 大雾年际变化明显、霾日数明显增加, 即恶劣能见度天气日趋增多。

关键词: 城市发展, 气象灾害, 变化特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.022

Analysis of Urban Meteorological Disasters in Yueyang in the Last 30 Years

Xu Lili, Chen Shiwen, Chang Liwei
(Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000)

Abstract: Based on the climate data of Yueyang from 1989 to 2018, several types of major urban meteorological disasters affecting Yueyang were analyzed and the change law of disasters was obtained by combining with urban development information. As the increasing scale of cities and the increasing number of industrial enterprises in cities, urban meteorological disasters such as torrential floods, high temperature heat waves, gales, thunderstorms, fog and haze show obvious changes. Urban rainstorm had an oscillating period of 2-4 days, and the number of rainstorm days has decreased in the recent 10 years. However, the frequency of short-term heavy rainfall and the maximum precipitation in 24 hours are rising, and the maximum precipitation in 1 hour is larger. The annual thunderstorm days had a downward trend, and were lower than the average in the past 12 years. The decline rate was -31 d/10 a, but the intensity of thunderstorm increased, and the impact of disasters was obvious. The high temperature days varied greatly from year to year with an increasing trend, and the high temperature extreme value increased. The number of days of urban gale decreased, but the phenomenon of small-scale instantaneous gale increased. After 2005, the annual variation of urban fog was obvious, and the number of days of haze increased obviously.

Keywords: urban development, meteorological disaster, change characteristics

0 引言

城市气象灾害是指发生在城市区域, 由于典型或不明显的气象要素异常或其组合异常, 对城市各行各业、居民生命及健康、城市生态环境及资源造成损害的各类事件^[1]。国内外学者对城市气象灾害的关注及研究由来已久, 最早且最透彻的是城市热岛效应的研究, 继而对城市雨岛、浑浊岛、干岛的研究也越来越多。柳笛^[2]基于武汉及其周边区25年降雨量情况, 分析得出市区降雨明显高于周边地区, 验证了城市雨岛效应的存在。陈正洪等^[3]提出了中国城市气象灾害的

主要几种类型, 如暴雨、高温热浪、低温冰冻等等。汪如良等^[4]利用南昌站60年气候资料, 分析了城市气象灾害变化特征, 为城市建设规划、如何应对气候变化提供了策略。

岳阳是长江中游重要的区域中心城市。城市建成区由40年前的10 km²到2017年底的105 km², 城镇化率达到了57.21%。本文分析了岳阳市近30年城市暴雨、高温热浪、冰雹、大风等城市气象灾害的变化特征, 为气候宜居城市的建设、制订应对气候变化措施提供参考。

1 资料处理

选取1989—2018年岳阳站的地面观测资料, 对降水、大风、高温、雾、霾等天气现象涉及的气象要素进行对比计算, 统计其年、月、日气候特征值, 进一

收稿日期: 2019年6月26日; 修回日期: 2019年10月30日
第一作者: 许丽丽(1987—), Email: hanshuizhenglan@163.com

步分析得出岳阳市近30年的城市气象灾害变化特征。基于气候平均态数据统计发现,影响岳阳的城市气象灾害中最多为雷电,其次是大气污染(雾、霾)。气象灾害影响时段覆盖全年,春夏季多雷电、暴雨、热害、冰雹等,秋冬季节有大气污染、大风、冷冻等灾害。春夏季复合灾害较多,雷电、局地暴雨、冰雹、大风等会同时出现,灾害影响加剧。

2 城市气象灾害变化特征

按照灾害发生时间的长短和缓急,可以将城市气象灾害分为突发型和累积型两大类。在城市气象灾害中,内涝、大气污染、高温等属于累积型,而雷电、大风等通常被划分为突发型。

2.1 累积型

2.1.1 内涝

城市内涝是重要的城市气象灾害之一,其形成的原因即(局地暴雨)降水强度大、土壤渗水能力减弱、降雨向低洼地区汇集,进而形成城市内涝。内涝一旦发生,交通受阻,房屋受淹,影响市民的正常工作和生活,严重时甚至会造成人员伤亡。

图1a为近30年岳阳市年暴雨日数变化,可以看出,岳阳市共出现暴雨日数136 d,2000—2014年有下滑趋势,且整体呈现一定的周期变化,变化幅度为2~4 d。

随着城市高层建筑越来越多,热岛环流进而增强,利于城市上空对流云的生成发展,同时城市大量污染物排放,利于凝结核形成,促使降水强度进一步与增强。图1b为年强降水频数及最大1 h和24 h降水量

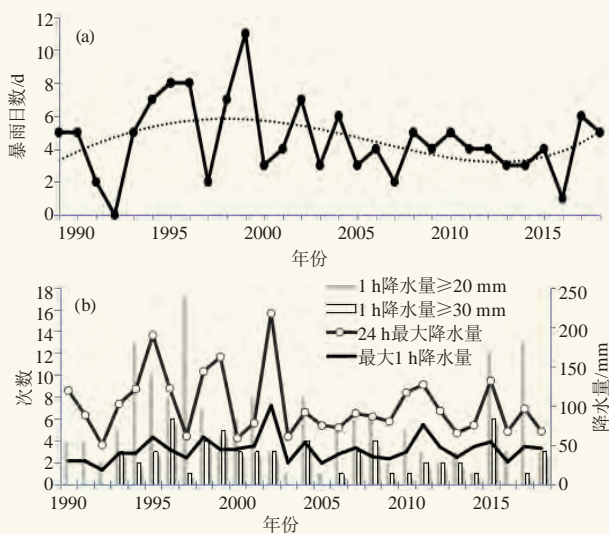


图1 1989—2018年岳阳市年暴雨日数变化(a)、年强降水频数及最大1 h和24 h降水量分布(b)

Fig. 1 Change of annual rainstorm days (a), frequency of annual heavy precipitation and distribution of maximum 1 h and 24 h precipitation (b) in Yueyang from 1989 to 2018

分布,分析后可得出,24 h最大降水量在1989—2002年之间年际变化较大,之后3年有所下降,但2005年之后有上升趋势; $R_{1hmax} \geq 50$ mm的次数每10年均均为两次,但在前15年 $R_{1hmax} \geq 45$ mm的有6次,近15年则有8次,尤其是近8年间 $R_{1hmax} \geq 45$ mm的就有6次; $R_{1h} \geq 20$ mm和 $R_{1h} \geq 30$ mm的短时强降水次数变化规律大致相近,在1993—2001年两者频数达到最高值,之后年际变化差异较大,但近10年两者都呈现出上升趋势。

因此,在气候不断增暖的同时,虽然近10年暴雨日数有所下降,但短时强降水频数、24 h最大降水量都是上升态势,且1 h最大降水量数值都较大,极端降水越来越多。随着城市发展导致的雨水渗透能力不断减弱,市区出现积涝的频率越来越高。

2.1.2 大气污染

据气象数据统计分析,1989—2018年岳阳市共出现雾为711 d,年平均为23.7 d,其中1992—2006年维持在一个稳定的数值(20 d)上下,2006年后年际变化明显;近30年霾日数共有614 d,年平均为20.5 d,并呈现增加趋势,2005年之后增加明显(图2)。统计低能见度天气(雾、霾日数之和)后得出,2005年之后,低能见度天气日趋增多,影响城市交通、航空安全,并对人体呼吸道健康产生不利影响。

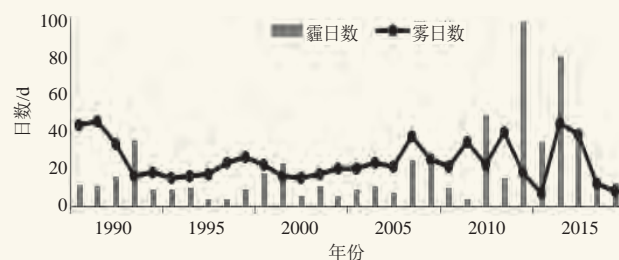


图2 1989—2018年岳阳市年雾、霾日数变化

Fig. 2 Change of days of annual fog and haze in Yueyang from 1989 to 2018

岳阳市北部是平原地区,外来污染物的扩散南下,也是造成岳阳霾日数明显增加的原因之一。同时岳阳城镇化率的增加,意味着城市高层建筑物总量增多、密度增加,风速在洞庭湖得到增强动力,在到达市区后明显衰减,污染物不易扩散。再者,城市工企业发展、民用汽车量的增加,都造成了废气的排放,大气颗粒物增多,造成低能见度天气的增多。

2.1.3 高温

气象学上,将日最高气温 ≥ 35 °C定义为高温日,高温炎热天气不仅会影响人们的正常工作生活,也对人体健康带来一定的负面作用,同时还导致用电负荷激增、城市供水紧张等,是重要的城市气象灾害之

一。图3表明，岳阳高温日数年际变化较大，并呈增加趋势，2013年出现极大值（26 d）； $\geq 35^\circ\text{C}$ 高温日数大于10 d的年份共有17年，而近10年就出现7年；1989—2004年， $\geq 37^\circ\text{C}$ 高温年份有3年，共计4 d，而2005—2018年， $\geq 37^\circ\text{C}$ 高温年份有7年，共计21 d，表明高温灾害日趋严重，高温极值有所提高。

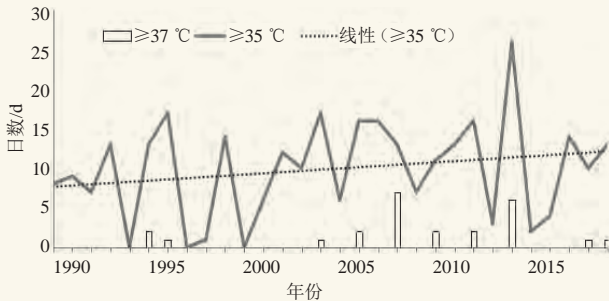


图3 1989—2018年岳阳市高温日数变化

Fig. 3 Change of high temperature days in Yueyang from 1989 to 2018

大规模的城市建设，导致“热岛效应”加剧；下垫面性质的改变，导致城市白天因太阳辐射快速增暖；夜间由于城市空气中较多的层粒、 CO_2 等气体反射地面长波辐射，导致辐射降温减弱，进而加剧后续高温的出现。同时，由于大型水体洞庭湖的影响，岳阳国家观测站的气温比城市密集区的气温普遍偏低，出现高温的频次不是很高，尤其是 37°C 以上的高温，所以在城市密集区高温灾害更加严重。

2.2 突发型

2.2.1 雷电

图4显示，雷暴在近30年共出现863 d，年平均为28.8 d；年雷暴日数呈现下降趋势，且近12年都在平均数以下，下降率为 $-31\text{ d}/10\text{ a}$ 。究其原因，城市发展导致城市内底层风速明显减弱，空气湿度变小，雷暴云不易形成，但近年来城市污染日趋严重，空气中细粒子气溶胶增多，雷暴强度有所增强，灾害影响明显。

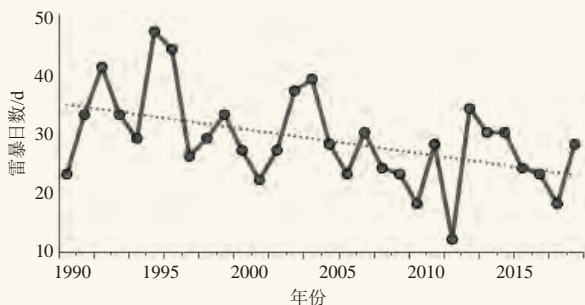


图4 1989—2018年岳阳市年雷暴日数变化

Fig. 4 Change of thunderstorm days per year in Yueyang from 1989 to 2018

2.2.2 大风

灾害性大风，是指风力达到八级或八级以上，即风速 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，一般可分为冷空气偏北大风、低压偏南大风、台风大风和雷雨大风。图5表明，岳阳市1989年以来风的观测资料可得出，大风共计出现115 d，年平均3.8 d；年大风日数整体呈现下降趋势，变化率为 $-7.3\text{ d}/10\text{ a}$ ；大风日数出现最多的年份为2006年，为11 d。由于城市规模化扩大，建筑物显著增多，地面摩擦力增大，造成近地面风速有所减小，大风日数有所减小。但是因为城市“热岛效应”的增强，城市间环流增强，加之高层建筑之间“狭管效应”导致城市内常出现小尺度的瞬时风力明显加大的现象，可造成电力、通信等设施受损，吹倒树木，吹落户外广告牌等，并易造成意外伤害。

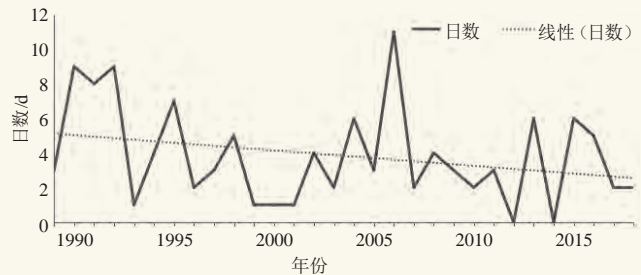


图5 1989—2018年岳阳市大风日数分布

Fig. 5 Change of gale days in Yueyang from 1989 to 2018

3 结论

1) 1989—2018年，岳阳市内涝、高温、大风、雷电、大气污染等城市气象灾害呈现明显的变化特征。城市暴雨日数有2~4 d的变化幅度，近10年暴雨日数有所下降，但短时强降水频数、24 h最大降水量都是上升态势，且1 h最大降水量数值都较大，极端降水越来越多。

2) 年雷电日数呈现下降趋势，且近12年都在平均数以下，下降率为 $-31\text{ d}/10\text{ a}$ ，但雷电强度有所增强，灾害影响明显。高温日数年际变化较大，呈增加趋势，且高温极值有所提高。

3) 大风日数呈减少趋势，但城市内小尺度瞬时大风的日数日渐增多。2005年之后，大雾年际变化明显，霾日数明显增加，即恶劣能见度天气日趋增多。

参考文献

- [1] 王迎春, 郑大玮, 李青春. 城市气象灾害. 北京: 气象出版社, 2009.
- [2] 柳笛. 城市化对雨洪径流的影响——以武汉市为例. 科技创业月刊, 2009(1): 66-67.
- [3] 陈正洪, 杨桂芳. 城市气象灾害及其影响相关问题研究进展. 气象与减灾研究, 2012, 35(3): 1-7.
- [4] 汪如良, 吴凡, 刘志萍, 等. 南昌市近60年城市气象灾害变化特征分析. 气象与减灾研究, 2014, 37(2): 44-49.

岳阳市冬季暴雪和一般性降雪条件对比分析

昌立伟¹ 黄海波¹ 许丽丽¹ 李晶² 黄卓禹³

(1 湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000; 2 湖南省湘潭市气象局, 湘潭 411100; 3 湖南省娄底市气象局, 娄底 417000)

摘要: 利用NCEP/NCAR 2.5°×2.5°再分析资料和常规气象观测资料, 对1989—2018年岳阳市近30年的暴雪和一般降雪天气进行异同点归纳研究: 1) 频次差异: 岳阳平均每年有0.4个暴雪日, 一般降雪日平均每年出现3.8 d; 2) 环流形势差异: 暴雪期间, 500 hPa中高纬度阻塞形势明显, 岳阳处于深厚的高空槽前, 700 hPa为强盛西南低空急流、850 hPa为冷式切变线, 地面1030 hPa表征线已南压过岳阳地区; 而一般降雪高空环流平直, 700 hPa西南风和850 hPa偏北风均偏弱, 尤其是地面1030 hPa表征线还处于岳阳的北侧; 3) 温度层结差异: 暴雪期间各层温度均低于0 °C, 700 hPa、850 hPa和近地面关键层的温度分别是-6 °C、-5 °C和-2 °C左右, 而一般降雪期间, 700 hPa、850 hPa和近地面关键层的温度分别是-2 °C、-1 °C和1 °C左右, 虽然中层以上也表现为较明显的冷层, 但关键层温度整体较一般暴雪偏高3 °C以上; 4) 暴雪时近地面冷空气侵入, 利于中层暖湿气流的强迫抬升, 利于地面的降温和降雪天气的持续, 散度、垂直速度和水汽条件等物理量均具有持续强降水特征。

关键词: 岳阳, 暴雪, 异同点归纳, 温度层结

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.023

A Comparison of Winter Blizzard and General Snowfall Conditions in Yueyang

Chang Liwei¹, Huang Haibo¹, Xu Lili¹, Li Jing², Huang Zhuoyu³

(1 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000 2 Xiangtan Meteorological Bureau, Xiangtan 411100

3 Loudi Meteorological Bureau, Loudi 417000)

Abstract: Based on NCEP/NCAR 2.5°×2.5° reanalysis data and conventional meteorological observation data, the similarities and differences between snowstorms and general snowfall weather in Yueyang City in the past 30 years from 1989 to 2018 were studied. Results show that: 1) frequency differences: Yueyang City had 0.4 snowstorm days and 3.8 general snowfall days each year; 2) circulation field differences: during the snowstorms, the blocking situation of 500 hPa in middle and high latitude was obvious, Yueyang was in front of a deep high trough, 700 hPa was the strong southwest low-altitude jet stream, 850 hPa was the cold shear line, and the surface 1030 hPa line had been southward over Yueyang. During the general snowfall weather condition, the upper air circulation was flat, and the southwest wind of 700hPa and the northerly wind of 850 hPa were weak. In particular, the ground 1030 hPa characterization line was still on the north side of Yueyang; 3) temperature differences of layer: during the snowstorms the temperature of each layer was lower than 0 °C, and the temperature of 700 hPa, 850 hPa and the key layer near the ground was about 6 °C, 5 °C and 2 °C respectively. During the normal snowfall period, the temperatures of 700 hPa, 850 hPa and the key layer near the ground were about 2 °C, 1 °C and 1 °C respectively. It is worth noting that, during the normal snowfall period, although the middle layer and above also show obvious cold layer, the overall temperature of the key layer was over 3 °C higher than the snowstorms; 4) the invasion of cold air near the ground during snowstorm was conducive to the forced uplift of the middle layer warm and wet air flow, and the continued cooling and snowfall on the ground. Physical quantities such as divergence, vertical velocity and water vapor conditions had the characteristics of continuous heavy precipitation.

Keywords: Yueyang, blizzard, similarity and difference, temperature stratification

0 引言

降雪预报一直以来都是南方冬季主要的预报业务, 尤其是暴雪的预报, 国内进行了大量的个例研究。例如, 黄小玉等^[1]指出500 hPa低槽不断带动地面

冷空气南下, 使得地面气温降为0 °C以下, 中层大气强盛的西南气流使得大量水汽不断向中国大陆输送, 有利于2008年南方暴雪天气的形成; 姚蓉等^[2]指出冷暖气团长时间交汇产生锋生强迫, 在静止锋区上界形成强辐合上升运动, 是2011年初湖南大范围持续暴雪天气的主要原因; 陈红专等^[3]指出700 hPa西南急流的建立和加强为暴雪区带来源源不断的水汽供应和不稳

收稿日期: 2019年7月1日; 修回日期: 2019年11月7日

第一作者: 昌立伟(1986—), Email: 357860159@qq.com

定能量,持续而强盛的水汽输送和水汽辐合对暴雪维持和加强至关重要;徐双柱等^[4]指出地面冷空气、700 hPa江南西南急流和500 hPa西风带低槽是决定湖北省冬季大雪的3个主要天气系统,700 hPa江南西南急流强弱决定湖北省大雪强度,地面冷空气强度决定湖北省降温幅度。也有很多研究^[5-12]针对冬季降水相态进行了大量统计分析,但关于湖南尤其是岳阳的降雪天气形势的分析很少。本文试图根据历史个例,从环流形势、物理量特征等方面分析岳阳暴雪与一般降雪的区别,为日常预报提供参考依据。

1 资料和方法

利用NCEP/NCAR 2.5°×2.5°再分析资料和常规气象观测资料,对1989—2018年岳阳市近30年的暴雪天气和一般降雪的气候特征及其成因进行归纳分析,利用统计平均方法,分析两种降雪天气的常规气象要素特征和物理量特征,建立岳阳暴雪天气和一般降雪天气的预报指标。

2 岳阳市暴雪和一般降雪的气候特征

南方的降雪天气不同于北方,降雪发生时常常伴随着雨、冰粒,降水相态的复杂变化导致降水量和积雪深度线性相关较差,所以,对南方降雪的选择标准就不能只考虑降雪量这一个特征量,还必须同时考虑积雪深度。根据国家气象局降水量级划分的规定,24 h内降雪量大于10 mm或积雪深度达8 mm的降雪过程为暴雪。按此标准岳阳市1989—2018年全市共出现

了12个暴雪日,暴雪日均集中在12月下旬和1月中旬后下旬前期;暴雪以下的降雪量级统称为一般降雪,统计1989—2018年岳阳市30年共出现113个一般降雪日,降雪出现日期较分散,最早出现的在11月10日,最晚出现在3月24日。

3 影响岳阳降雪天气形势特征

徐双柱等^[4]研究指出湖北冬季的大雪天气,主要取决地面冷空气、700 hPa西南急流、500 hPa西风带低槽的变化。岳阳地处湖南的北部与湖北相接,是否具有相同的表现特征,需要进一步统计分析。利用NCEP/NCAR的逐日再分析资料分析暴雪和一般降雪的环流形势是否具有明显不同的特征。

3.1 500 hPa 环流特征分析

分析近30年岳阳12个暴雪样本和113个一般降雪样本的500 hPa平均环流形势场(图1)可以看出,在暴雪环流形势中,在中高位纬地区为一脊一槽型,沿岸大槽南伸至长江中下游以南地区,槽后的阻塞高压强度较强,利于槽前强冷空气的堆积及大举向南入侵,整个岳阳处于深槽前影响,564 hPa压至岳阳地区;而与之相对应的一般降雪,中高纬度地区也表现为一脊一槽型,但槽脊的强度较暴雪明显偏弱,岳阳地区的平均等高线较暴雪偏高4 hPa以上。影响岳阳的低槽也较平直,多表现为小波动。总的来看,暴雪发生时,500 hPa中高纬度地区表现为强的经向环流,槽脊的强度较强,岳阳地区则表现为明显的深槽,北侧有强的冷平流的输送。

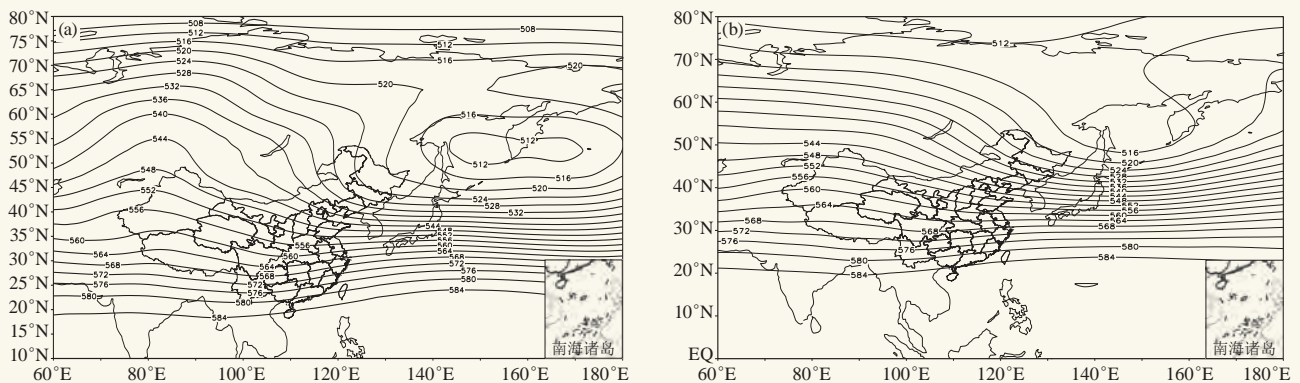


图1 500 hPa平均环流形势场(单位: dagpm)

(a) 暴雪, (b) 一般降雪

Fig. 1 500 hPa average circulation situation field (unit: dagpm)

(a) snowstorm, (b) general snowfall

3.2 700 hPa 和 850 hPa 环流特征分析

分析暴雪和一般降雪的样本中700 hPa的平均风场信息(图2)可以看出,两者均存在着低空急流,但在暴雪期间700 hPa低空急流从孟加拉湾一直延伸至岳

阳地区,整个西南急流强度较强,而一般降雪期间,在岳阳的上空及南侧也存在低空急流,但急流的偏西分量略大,且强度偏弱,此外在暴雪期间岳阳北侧为偏北风,而一般降雪期间则多表现为偏西风。

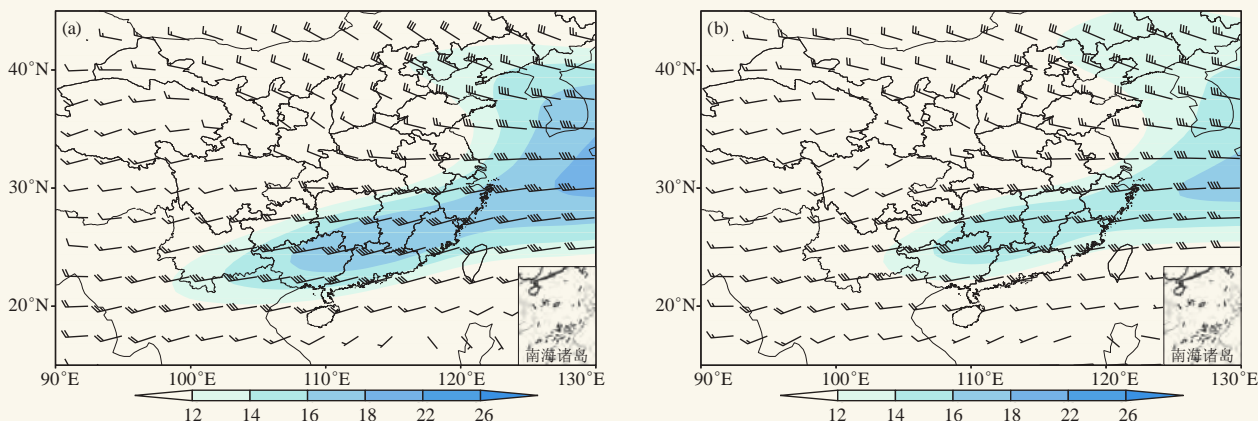


图2 700 hPa平均风场 (单位: m/s, 阴影: 风速>12 m/s)

(a) 暴雪, (b) 一般降雪

Fig. 2 Average wind field of 700 hPa (unit: m/s, shadow: wind speed: > 12 m/s)

(a) snowstorm, (b) general snowfall

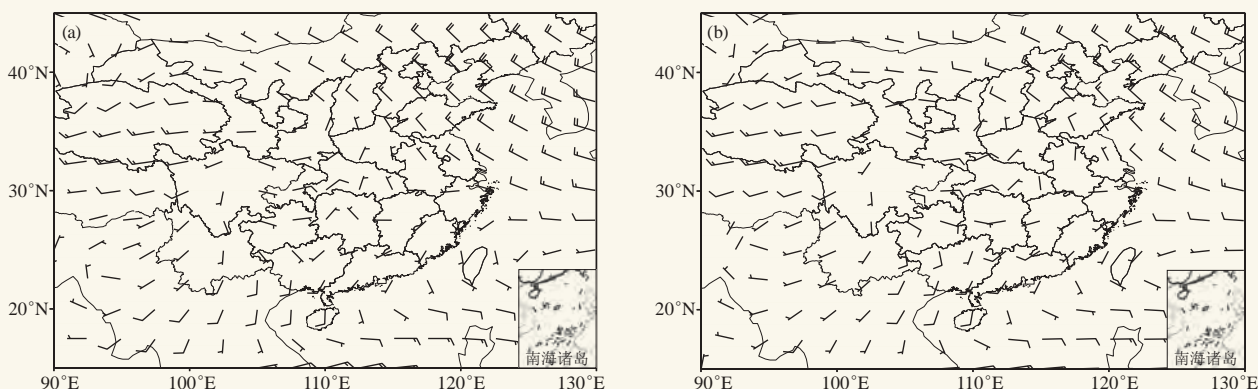


图3 850 hPa平均风场 (单位: m/s)

(a) 暴雪, (b) 一般降雪

Fig. 3 Average wind field of 850 hPa (unit: m/s)

(a) snowstorm, (b) general snowfall

分析暴雪和一般降雪的样本中850 hPa的平均风场信息(图3)可以看出,暴雪期间岳阳上空存在明显的冷式切变线,有利于强降雪天气的出现,而一般降雪期间岳阳的上空多为偏东风影响。

3.3 地面环流形势特征

分析暴雪与一般降雪的平均海平面气压场(图4)可以看出,在暴雪与一般降雪的冷空气源地均为西伯利亚的中部地区,其南下影响岳阳地区均为西北路径。但从强度来看,暴雪期间冷高压强度明显强,其高压中心的强度为1042.5 hPa,而一般降雪期间冷高压强度1037.5 hPa,较暴雪天气偏低5 hPa左右;从冷空气影响岳阳的强度来看,暴雪期间岳阳1030 hPa线正压至上空,而一般降雪期间则是1027.5 hPa线,强度较暴雪偏弱。因此从平均环流形势场看,暴雪期间冷高压强度一般在1042 hPa以上,1030 hPa影响岳阳地区有利于暴雪天气的出现。

4 影响岳阳降雪的温度特征分析

4.1 地面气温

统计近30年岳阳暴雪和一般降雪的地面温度(表1),可以发现,暴雪期间,全市平均日最高气温为1.8℃,其中日最高气温最大值为5.9℃,全市平均日最低气温为-1.4℃,其中日最低气温最大值为0.1℃;一般降雪期间,全市平均日最高气温为4.3℃,其中日最高气温最大值为16.6℃,全市平均日最低气温为0.7℃,其中日最低气温最大值为3.6℃;根据历年暴雪和一般降雪的地面统计结果可以看出,暴雪发生期间全市地面气温均要降至0℃左右,而一般降雪天气发生时地面最高气温可维持在0℃以上,甚至是超过10℃,地面最低气温也可维持在0℃以上。

4.2 垂直温度层结

根据上述的统计分析,除了绝大多数的暴雪天

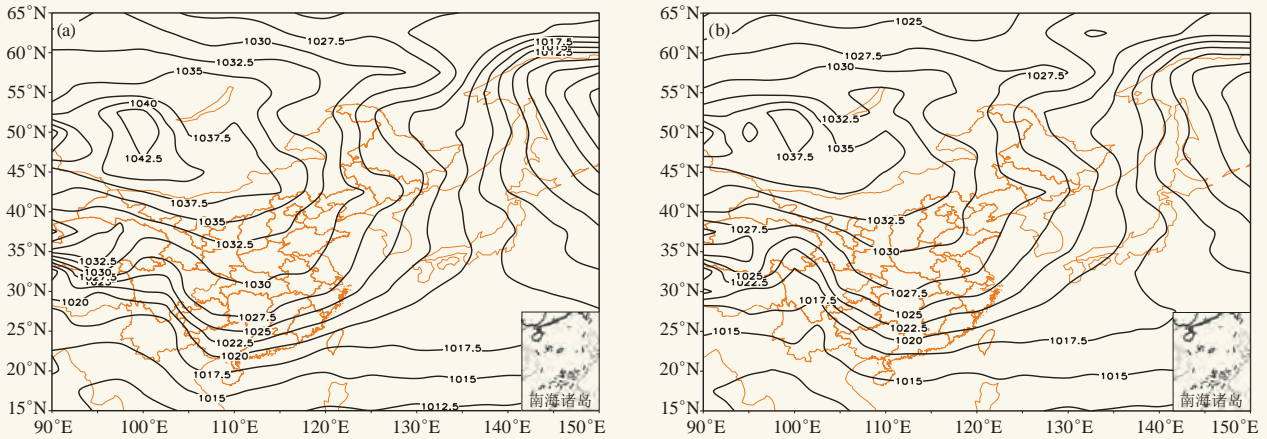


图4 平均海平面气压场 (单位: hPa)
(a) 暴雪, (b) 一般降雪

Fig. 4 Mean sea level pressure field (unit: hPa)
(a) snowstorm, (b) general snowfall

表1 1989—2018年岳阳市暴雪和一般降雪日气温的统计特征
Table 1 Statistical results of daily temperatures of snowstorms and general snowfalls in Yueyang from 1989 to 2018

降雪类型	平均日最高气温/℃	平均日最低气温/℃	日最高气温最大值/℃	日最低气温最大值/℃
暴雪	1.8	-1.4	5.9	0.1
一般降雪	4.3	0.7	16.6	3.6

气地面气温为0℃以下,对于一般降雪天气并不都在0℃以下,因此要发生水汽的凝结现象,则多表现在高空;统计分析暴雪和一般降雪样本的垂直温度层结(图5)可以看出,暴雪期间各层温度均低于0℃,

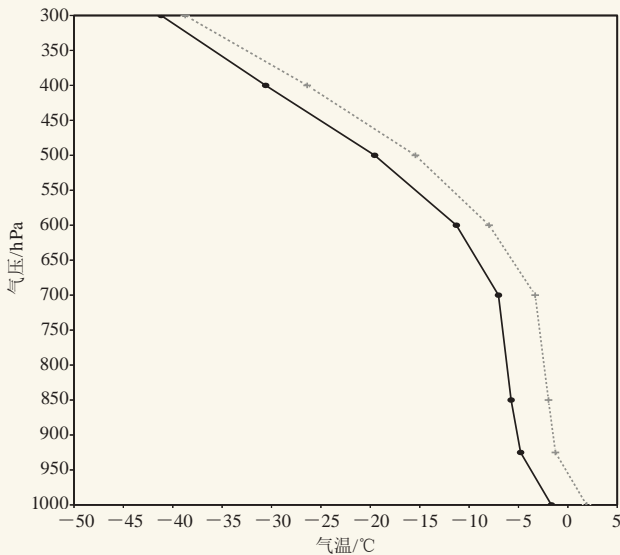


图5 降雪样本的各气压层气温的平均变化曲线
(单位:℃,实线为暴雪,虚线为一般降雪)

Fig. 5 Average variation curve of air temperature in each pressure layer of snowfall sample (unit:℃, solid line is snowstorm, dotted line is general snowfall)

700 hPa温度为-6℃左右,850 hPa温度为-5℃左右,近地面的温度维持在-2℃左右;而一般降雪期间,中层以上也表现为较明显的冷层,700 hPa温度为-2℃左右,850 hPa温度为-1℃左右,近地面的温度维持在1℃左右,因此在中低层暴雪各层的温度整体较一般降雪偏低3℃以上,此外从中低层的探空曲线可以看出,在暴雪和一般降雪期间,925~700 hPa温度递减率很小,表现一定等温或逆温层结。

5 影响岳阳降雪的物理量特征分析

5.1 水汽条件

水汽是降雪的物质基础,所以水汽的分布也是形成降雪的重要因素之一。下面分别从暴雪和一般降雪的样本中平均水汽通量和水汽通量散度等来分析两者的异同点。

700 hPa西南水汽的输送作为冬季降雪的水汽输送主要来源,分析该层暴雪与一般降雪的水汽通量及散度(图6)可以看出:暴雪期间,岳阳处于强盛的反气旋环流水汽输送的西北侧,有来自于洋面的源源不断地水汽向岳阳上空输送且伴随强的水汽通量辐合,多年暴雪平均水汽通量值达 $6 \times 10^2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,和明显的负的水汽通量散度值;在一般降雪期间,洋面也表现出水汽的反气旋式旋转,但岳阳处于反气旋环流的北侧,整个湖南西部的地区表现明显的辐散区,岳阳上空的水汽辐合也偏弱。

5.2 动力条件

垂直运动使水汽冷却凝结,是产生降雪的重要条件。分析岳阳上空暴雪与一般降雪的平均垂直速度的经向剖面可以发现,暴雪发生时(图7a),岳阳上

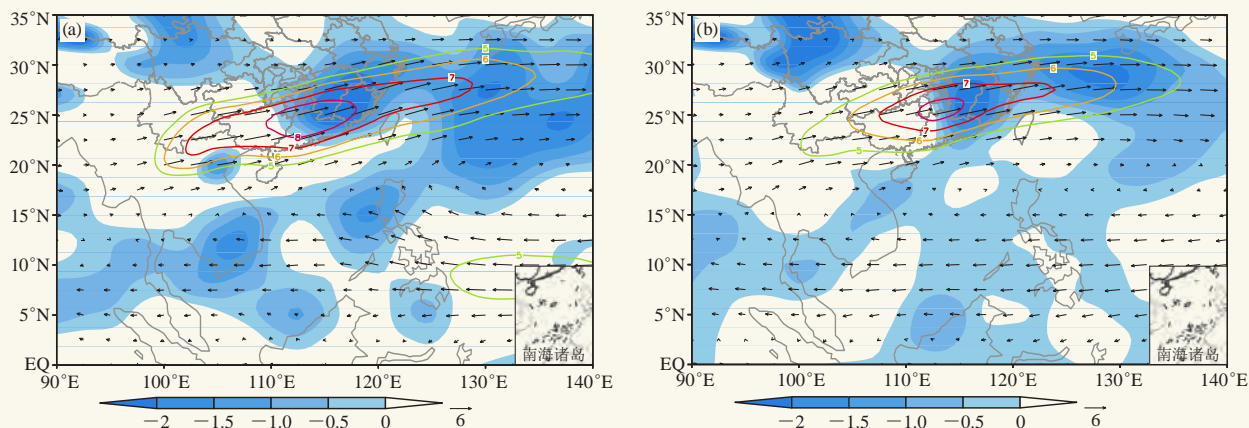


图6 700 hPa水汽通量和水汽通量散度 (等值线和风杆为水汽通量, 单位: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 阴影为水汽通量散度, 单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)
(a) 暴雪, (b) 一般降雪

Fig. 6 700 hPa water vapor flux and water vapor flux divergence (contour line and wind bar are water vapor flux in $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, and the shadow is water vapor flux divergence in $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

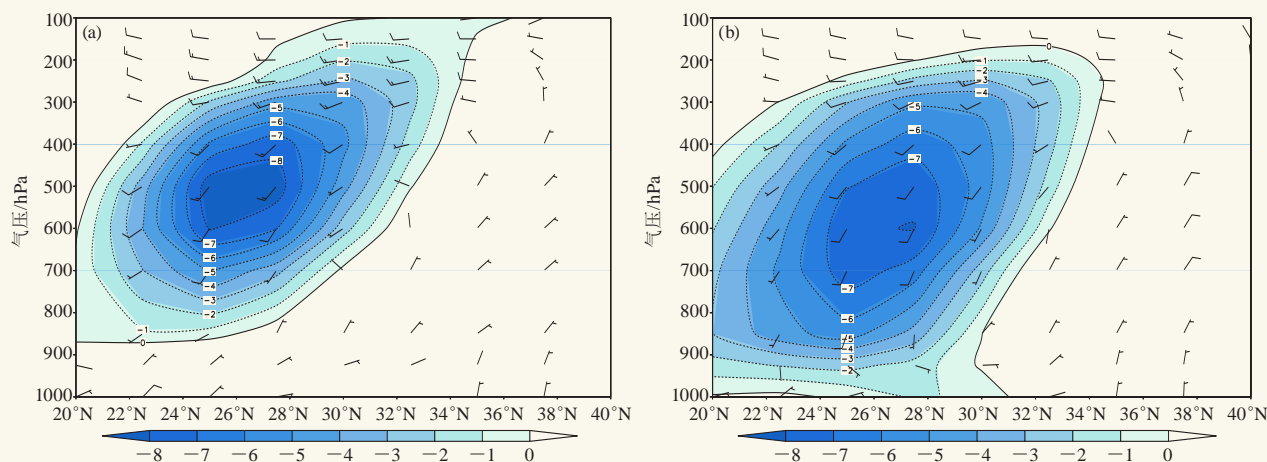


图7 沿着113°E垂直速度和经向环流 (单位: $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 暴雪, (b) 一般降雪

Fig. 7 Vertical velocity and meridional circulation (unit: $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) along 113°E
(a) snowstorm, (b) general snowfall

空的垂直速度的大值区集中对流层中层附近, 上升运动伸展高度较高; 而一般降雪时 (图7b), 虽然也表现出一定的上升运动, 但强度较暴雪偏弱, 上升运动的伸展高度较暴雪偏低; 此外在近地面附近, 暴雪时表现强的偏北气流的侵入, 利于中层暖湿气流的强迫抬升, 利于地面的降温和降雪天气的持续; 而一般降雪时近地面的偏北风较弱, 不利于产生系统性的上升运动。

另外分析岳阳暴雪和一般降雪的散度空间分布 (图8) 可以看出, 暴雪时, 表现出明显的低层负散度, 高层正散度分布, 低层负散度值达到 $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 而一般降雪时虽然也表现出一定的低层负散度, 高层正散度分布, 但强度较暴雪要偏弱。

6 结论

利用NCEP/NCAR $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 再分析资料和常规气象观测资料, 对1989—2018年岳阳市近30年的暴雪天气和一般降雪的气候特征及其成因进行归纳分析, 结果表明:

1) 岳阳平均每年出现0.4个暴雪日, 暴雪日均集中在12月下旬和1月中旬后下旬前期; 平均每年出现3.8个一般降雪日, 降雪出现日期较分散; 在暴雪时日最低气温普遍在 0°C 以下, 仅有一次暴雪的日最低气温在 0°C 以上 (为 0.1°C), 而一般降雪时, 地面温度明显高于暴雪天气, 其平均日最低气温在 0°C 以上 (达到 0.7°C)。

2) 暴雪发生时, 岳阳地区表现为明显的深槽、

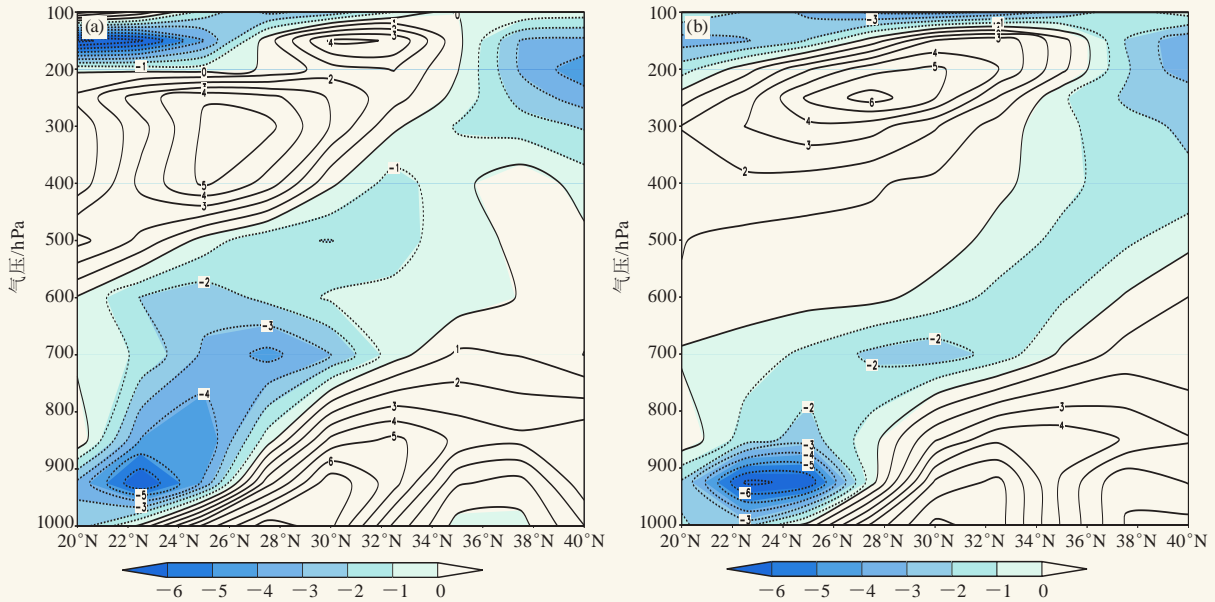


图8 沿着113°E散度分布 (单位: $10^{-5} s^{-1}$):

(a) 暴雪, (b) 一般降雪

Fig. 8 Distribution of divergence along 113°E (unit: $10^{-5} s^{-1}$):

(a) snowstorm, (b) general snowfall

700 hPa强盛低空急流和850 hPa明显的冷式切变线, 地面1030 hPa已南压至岳阳上空; 而一般降雪高空环流平直, 一般不存在低空切变线, 地面冷空气强度不强。

3) 暴雪期间各层温度均低于 $0^{\circ}C$, 近地面的温度维持在 $-2^{\circ}C$ 左右, 而一般降雪期间, 中层以上也表现为较明显的冷层, 但近地面的温度维持在 $1^{\circ}C$ 左右, 中低层暴雪的各层的温度整体较一般降雪偏低 $3^{\circ}C$ 以上。

4) 暴雪时近地面表现强的偏北气流的侵入, 利于中层暖湿气流的强迫抬升, 利于地面的降温 and 降雪天气的持续; 而一般降雪时近地面的偏北风较弱, 不利于产生系统性的上升运动, 暴雪期间散度、垂直速度和水汽条件等物理量均具有持续强降水特征。

参考文献

[1] 黄小玉, 刘红武, 李超, 等. 2008年湖南两次暴雪灾害过程初步分析. 防灾科技学院学报, 2018, 10(2): 15-19.

- [2] 姚蓉, 叶成志, 田莹, 等. 2011年初湖南暴雪过程的成因和数值预报模拟分析. 气象, 2012, 38(7): 848-857.
- [3] 陈红专, 叶成志, 龙丽华. 2011年1月湖南罕见持续性暴雪天气成因分析. 暴雨灾害, 2012, 31(2): 141-148.
- [4] 徐双柱, 王晓玲, 王平, 等. 湖北省冬季大雪成因分析与预报方法研究. 暴雨灾害, 2009, 28(4): 333-338.
- [5] 漆梁波, 张瑛. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究. 气象, 2012, 38(1): 96-102.
- [6] 唐熠. 一次雨淞天气与一次飘雪天气过程形势异同分析. 广西气象, 2003, 24(3): 21-22.
- [7] 胡中明, 周伟灿. 我国东北地区暴雪形成机理的个例研究. 南京气象学院学报, 2005, 28(5): 679-684.
- [8] 朱红, 黄玲琳. 南方大雪预报温度条件浅析. 浙江气象, 2003, 24(1): 26-28.
- [9] 姚蓉, 许霖, 张海, 等. 湖南2008/2011年两次低温雨雪冰冻灾害成因与影响对比分析. 灾害学, 2012, 27(4): 75-79.
- [10] 杨成芳, 姜鹏, 张少林, 等. 山东冬半年降水相态的温度特征统计分析. 气象, 2013, 39(3): 355-361.
- [11] 尤凤春, 郭丽霞, 史印山, 等. 北京降水相态判别指标及检验. 气象与环境学报, 2013, 29(5): 49-54.
- [12] 张琳娜, 郭锐, 曾剑, 等. 北京地区冬季降水相态的识别判据研究. 高原气象, 2013, 32(6): 1780-1786.

岳阳百年气象站在长江经济带发展中的历史作用探究

■ 向伟 彭洁 吴劭远 王威

岳阳，古称巴陵，又名岳州，地处长江黄金水道和洞庭湖连接点，自古就是商贾云集之地、洞庭湖平原的区域物流中心。1899年，清政府在岳州正式开埠，海关设在城陵矶。之后，岳阳的海关进出贸易额逐年增大，开往岳阳的各国商船穿梭长江及洞庭水面，长江沿线城市经济商贸的迅速发展，水上气象条件的恶劣多变，催生了海关气象测候所的诞生。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.024

1 岳阳气象测候所建立之初

清同治八年十月（1869年11月），时任清政府海关总税务司赫德提出在我国沿海、长江重要口岸海关及近海岛屿灯塔附设气象观测站的建议。此后，清政府海关及民国政府海关相继在我国沿海重要口岸、岛屿（含台湾地区）及长江沿岸、边关商埠城镇建立气象观测站70多处，其中就包括了岳州海关的气象测候所（图1）。1909年，上海徐家汇观象台在城陵矶岳州海关建气象测候所。作为国内第一批建立在长江沿线的气象测候所，经过一百多年的风雨沧桑，当年的气象测候所便是今天岳阳国家基本气象站的前身，该站2018年1月被中国气象局授为“中国百年气象站”。



图1 岳州海关及测候所旧址

测候所当时的业务按海关总署颁布的《气象工作须知》作为技术规范，观测内容主要为温度、湿度、风、气压、降水、云、能见度等常规要素，观测时次

为03、06、09、12、15、18、20、23时8个时次。在当时的仪器条件下，能见度主要还是依靠人工目测的方式进行，由于水上突发的大风和低能见度对航运安全影响很大，因此是常规观测要素中必不可少的项目。海关气象观测在海关总税务司直接管理下进行，所观测的资料直接报送海关总署。截至1938年4月30日，由于抗日战争爆发，岳州测候所正式结束气象观测。迄今，测候所1909—1938年的气象资料仍被完整地保存在大英博物馆以及湖南省气象档案馆内（图2）。



图2 岳州气象月总簿（1909年12月—1912年12月）

除了承担观测任务，测候所还担负着编发气象报告和发布大风信息警报的任务。在陆路交通尚不完善的清末时期，水上交通是不可替代的物流和客运方式，长江中游地段由于地势险要、冷暖气流交汇频繁，气象灾害导致的水上安全事故频发。清同治七年（1868年），清政府设长江水师，其中驻城陵矶、象骨港千总各1员。清乾隆十年，岳州设立救生局，添

收稿日期：2019年10月28日；修回日期：2020年3月13日
第一作者：向伟（1985—），Email：99765054@qq.com

置船只梭巡于长江和洞庭湖，拯救遇险之人。水上气象信息是救灾抢险的重要参考，所以当时测候所的资料主要为当时来往于长江、洞庭湖的各国商船特别是英国商船服务。

2 气象资料在长江航运中的安全保障作用

1952年7月1日，湖南省军区重新选址，在距原海关测候所7 km处建立气象站，1954年3月气象站扩充为气象台，系全省最早建立的县级气象台，1955年4月正式发布24小时天气预报。20世纪50年代建站初期，观测和预报工作融为一体，气象站同时负责观测和预报。

长江航运对长江沿岸的经济发展起着至关重要的作用，自古有“黄金水道”之说。大风、恶劣能见度 and 突发的各种强对流天气是影响水上航运安全的重要气象因素。建国之初，由于气象监测手段的落后和信息传输方式的缺乏，气象站的观测资料和预报信息显得尤为珍贵，受到来往船只的高度关注。受气象技术发展条件限制，当时的工作方法除了最原始的手工绘制天气图分析以外，还有两种重要的手段，一是参考地方典籍。如清代编纂的《洞庭湖志》记载洞庭湖候风，《文选注·江赋》：“江豚见，则知风之顺逆。盖江豚出没起伏于水中，头向上则北风至，向下则南风至，舟人谓之“拜风””。因此观测员也会时常观察江豚活动为次日风的预报提供信息。二是征询洞庭湖老渔民意见。因渔民世代生活船上，对本地天气现象有独到见解，因此采纳渔民意见成为天气预报来源的重要途径之一，如岳阳地方风被当地渔民归纳为18种风，每一种风都代表不同的天气背景。因此预报员每日拜访和征询渔民对后期天气的看法就成为工作中必不可少的一个流程。预报结论一旦出来，气象通信员跑步将气象信息送至县委县政府或者信函邮寄给各有需求的单位，同时在洞庭湖边挂上风球，并在观测站外面的黑板上用粉笔将天气实况和预报结果写上，供来往行人和船只渔民观看参考。

当时主要有湘航、长航、鄂航三大航运公司长期往来于长江岳阳段上，从湖北进入岳阳境内的船要了解当地风向风速和未来风的变化，除了依靠长期跑船的经验外，主要办法是到气象站来询问或者看观测站外面挂的风球。观测站在洞庭湖边上设置三角形的风球指示牌主要为渔民和来往商船服务，往上指示为南风，往下指示为北风；风球下设置黑板，上面写有天气预报内容，提供给老百姓了解。特别值得一提的是当时的湘航公司，作为湖南省内最大的水上航运公司，对水上气象条件的变化尤为关注。1959年，湘航

公司派一名工程师从长沙专程来到岳阳观测站，表达了对长江岳阳段长期天气预报的需求。当时的年轻预报员李连方与湘航公司工程师经过多次讨论，最终以仅有的7年资料做出一份气候概率图，以此为船舶航行提供参考。该图主要包含了历年暴雨极值和风向风速极大值，使用者能清晰地了解暴雨和大风日主要集中的月份和日期。鉴于当时这方面的观测资料非常有限，预报方法也相对落后，这份气候图在湘航公司防范水上灾害天气方面提供了重要参考，该公司还专门写信到观测站表示感谢。该图还被运用到岳阳铁路施工、公路工务段、食品搬运、种子储备等业务中，一直使用到20世纪80年代，得到了用户的肯定和认可。

1983年4月23日，岳阳境内发生死伤逾千人的大龙卷风事件，灾情现场惨烈异常。在地方政府组织下，岳阳气象观测站立即抽调资深观测员与预报员加入调查小组在辖区三个县市调查此事。在灾情最严重的湘阴县，调查小组在确定为龙卷风后，立即挑灯奋战，连夜找资料制作科普宣传资料，印发10万份宣传资料送至各乡镇，及时安抚民心。经过不分昼夜的步行走访，调查取证，最终提交了完整的报告，这也是湖南省第一份全面的龙卷风资料。

3 气象站为大型项目建设提供的服务保障

岳阳是个以化工立市的沿江城市，石化产业是其支柱产业。20世纪60—70年代，国家在中西部地区开展热火朝天的“三线建设”，一批中央、省属大中型企业相继在岳阳建成投产，中国人民解放军2348工程便是其中之一。该工程始建于1969年，是我国特大型石油化工企业——中国石化巴陵石化公司和长岭炼油化工有限责任公司的前身。作为20世纪60年代中国人民解放军总后勤部首家石油化工联合企业，工程选址要符合既邻近长江方便运输，又能防止敌人空袭方便隐蔽这两个条件，岳阳长江边的云溪区一个纵横交错的山沟便是最好的选址。

考虑到工程投产后将对大气环境产生一定污染，项目指挥部提议成立环境影响评价科学考察组。考察组组长由任阵海（现为中国工程院院士）担任，成员分别来自于中国科学院大气所、地理所和湖南气象部门的一批技术骨干，其中就包括岳阳气象站的李连方和周国珍。考察组的主要任务是日夜监测工程所在地的气象条件，监测模拟气流的流向、流速，以得出当地的大气污染扩散条件，为决策者们的建设规划做参考。当时建立了一个临时气象站，包括温湿度、气压、风、降水等各种常规气象要素，并在模拟车间布设带有拍照功能的监测仪器，以实时监测气流的流

向。由于条件有限，而且工程保密要求很高，考察组工作生活都在一个简易窝棚里进行，连家人都不知道去向和工作内容。考察组在任阵海的带领下，运用他留苏期间所学到的气象知识，结合当地的实际情况，获得了大量的科学数据。李连方的主要任务是高空探测，以期得出工地的逆温情况，为烟囱建设高度提供依据。经过3个月的观测分析，考察组建议烟囱的高度必须在120 m之上，才最有利于污染物的排放。

最终，在与家人完全隔绝3个月后，考察组成员顺利完成任务，离开人迹罕至的山沟，各自返回原来的工作岗位。

4 气象站的历史传承在新时期里不断发展

4.1 助力长江经济带立体交通建设

2013年，岳阳市气象局基于环东洞庭湖气象观测站30年的大风监测资料，对东洞庭湖区大风灾害的特征及其对水上交通安全的主要影响进行了深入研究。两年后，岳阳水上安全气象预测预警系统一期工程建设完成，实现对东洞庭湖与湘江沿岸天气状况的实时监控。借助该系统，岳阳市气象部门为海事部门与来往船舶等及时发布水上气象预报预警信息，极大的减少了因气象灾害导致的水上交通事故。据地方海事部门统计，2018年岳阳水上交通事故的发生率创历史最低。2014年，大岳高速洞庭湖大桥投入建设，作为一座主跨1480 m、两跨不对称、索塔高度达208 m的钢桁梁悬索桥，大岳高速洞庭湖大桥建设过程中对天气因素尤为敏感。为此，岳阳市气象局派出专业气象服务团队全程跟踪建设进度，借助岳阳国家基本气象站50年观测资料，结合桥位区邻近气象站数据推算出大桥的设计风速和设计基准风速及有关风参数，为工程设计提供权威、可靠的设计参数值，并就不同阶段制定详细的气象服务方案。在洞庭湖大桥吊梁关键时期，服务团队在大桥建设主塔238 m高度建立高空测风站，及时滚动发布桥位高空天气精细化预报，确保了大桥的施工安全。

4.2 主动融入城市发展和洞庭湖生态经济区建设

近年来，岳阳市气象局主动融入城市发展和洞庭湖生态经济区建设，助推岳阳市成功申报全国28个气候适应型城市建设试点之一，积极推进国家气候标志认证、全域旅游美丽岳阳宣传等。2016年，市气象局

与长江修防处联合开展城市防汛气象预报预警系统，为城市内涝防御提供气象保障。

此外，在生态旅游、森林火险、地质灾害区域、雷电防护等领域，市气象局与旅游、林业、国土、交通、城管、石化等部门及企业也在加强合作。2018年，岳阳市气象局与中科院亚热带农业研究所联合开展洞庭湖湿地生态现状调查和需求分析，深入开展资料共享和技术合作。2019年1月，岳阳作为洞庭、鄱阳两湖平原湖河综合气候关键区的代表性站点，被中国气象局认定为全省唯一、全国24个国家气候观象台之一。同年3月，由市气象局精心打造的岳阳百年老站气象科普馆正式开馆，参观的市民和游客络绎不绝，目前已成为岳阳楼核心景区内气象科普的一张闪亮名片（图3）。



图3 市民参观岳阳气象科普馆

深入阅读

- 陶澍, 万年淳, 2003. 洞庭湖志. 长沙: 岳麓书社.
 王海燕, 田刚, 王继竹, 等, 2018. 长江黄金水道交通气象服务的现状与展望. 气象科技进展, 8(4): 116-119.
 吴增祥, 2007. 中国近代气象台站. 北京: 气象出版社.
 郑治斌, 崔新强, 田刚, 2017. 长江经济带气象保障问题分析与对策. 气象科技进展, 7(1): 216-219.
 朱浩, 2014. 东洞庭湖区大风灾害及其对水上交通安全的影响. 科技与创新, 24: 95-97.
 朱祥瑞, 2005. 中国气象史研究文集(二). 北京: 气象出版社.

(作者单位: 向伟、彭洁、王威, 湖南省岳阳市气象局;
 吴劭远, 上海大学钱伟长学院)



进 2020 展报告 洞庭湖生态气象

<http://cmalibrary.cn/amst/202003/>

河北省气象灾害预警信号分布特征研究

杨荣芳 王红侠 王贺

(河北省气象服务中心, 石家庄 050021)

摘要: 利用2015—2018年河北省气象灾害预警信号发布资料, 运用对比分析、分类统计等方法, 得出了近4年河北省各类预警信号发布的时空分布特征、发布频次。分析表明: 河北省发布频次最多是暴雨、雷电、大雾、大风4类害性天气预警信号, 发布地区主要分布在河北省中南部, 预警发布总数由中南向西北减少的趋势, 预警信号中南部所占比例为68%。发布级别占比中黄色和蓝色预警占的比例最大, 红色级别预警信息比例最小, 造成的危害和影响最严重, 主要发布在石家庄、邢台、邯郸、沧州和衡水中南部地区。通过研究分析预警信号的时空分布特征, 为不同地区建立相应的防御措施提供科学依据, 以进一步增强气象防灾减灾预警水平。

关键词: 气象灾害, 预警信号, 分布特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.025

Study on Meteorological Disaster Warning Signal Distribution Formation in Hebei

Yang Rongfang, Wang Hongxia, Wang He

(Hebei Province Meteorology Service Center, Shijiazhuang 050021)

Abstract: The temporal and spatial distribution characteristics, the frequency of early warning release were studied using the warning notices issued in Hebei from 2015 to 2018 and the evaluation forms, by means of classification and statistics methods. The results show that the most frequent warning signals are rainstorm, lightning, fog and gale, which are mainly distributed in the central and southern parts of Hebei Province. The total number of warning signals decreases from the central and southern parts to the northwest. The proportion of warning signals in the central and southern part is 68%. By studying and analyzing the spatial and temporal distribution characteristics of early warning signals, this paper provides a scientific basis for establishing corresponding defensive measures in different regions, so as to further enhance the level of meteorological disaster prevention and mitigation early warning.

Keywords: meteorological disaster, warning signal, distribution

0 引言

河北省是气象灾害种类最多的省份之一, 自2012年河北省突发公共事件预警信息综合发布系统依托省内气象业务系统和气象预报信息发布系统建设以来, 实现覆盖省、市、县三级的预警信息发布, 共计发布9万多条突发事件预警信号, 涵盖气象、山洪和地质灾害等领域, 进一步提高防灾减灾能力。

突发气象灾害预警信号是为有效防御和减轻突发气象灾害而向社会公众发布的警报信息图标, 国内相关学者对预警信号的发布和特征作了相关的研究和分析。黄归兰等^[1]对广西发布的预警信号分析得出各类预警信号发布的时空分布特征、发布频次及发布准确率, 张硕等^[2]对辽宁省气象灾害预警信号的分布特

征、发布频次进行了统计分析。本文利用2015—2018年河北省连续突发预警信息有效发布数据, 对该地区预警信号的特征以及时空分布进行了系统的分析, 旨在为突发事件多发区提供科学依据, 并加深对该地区各种自然灾害的了解和认识, 对有效发挥预警信息作用具有重要意义。

1 资料与方法

选取2015—2018年河北省13个地市及所辖县级气象局以及行业对应部门发布的预警信号发布数据进行统计, 因河北省突发预警信息发布系统2015年正式业务化运行, 并对发布数据进行整理入库。2015—2018年河北省气象灾害预警信号共计发布9.3万条, 其中红色预警0.2万条, 红色级别预警信号种类主要为暴雨、暴雪、大雾、高温、雷电、大风、大雾、霾, 寒潮、沙尘暴、干旱、台风和霜冻未出现过红色预警事件; 橙色1.6万条, 黄色5.4万条, 蓝色2.1万条, 其中, 橙

收稿日期: 2019年9月16日; 修回日期: 2019年11月16日
第一作者: 杨荣芳(1977—), Email: 464322028@qq.com

色、黄色和蓝色级别预警事件中，13种预警信号类别都有不同频次的发生。

目前河北省突发气象灾害预警信号包含暴雨、暴雪、大风、寒潮、大雾、高温、沙尘暴、台风、霜冻、干旱、雷电、冰雹、霾13种。气象灾害预警信号依据气象灾害可能造成的危害程度、紧急程度和发展态势一般划分为四级，分别为蓝色、黄色、橙色和红色四个等级（IV、III、II、I级），分别代表一般、较重、严重和特别严重。气象部门根据不同种类灾害性天气的特征、预警能力对所影响区域发布相应级别的预警信号。

为统计分析河北省内突发事件预警信号的分布特征，本文采用比率分析法和统计比较法对该地区灾害预警信号的时空变化特征进行分析，并通过与气候态下预警类型的空间分布进行了对比检验。

2 结果

2.1 气象预警信号级别空间分布特征

河北省是自然灾害种类较多的省份，每年均有不同程度的自然灾害发生。在统计的河北省预警信息发布级别占比图（图1）中可以看出，影响最大的红色预警级别信号占有发布总条数的比重3%，易发生红色灾害预警信号的类型主要有：暴雪、暴雨、冰雹、大雾、大风、高温、雷电天气。由图2a可以发现，红色预警信息主要发布地区为石家庄、邢台、邯郸、沧州和衡水，集中在中南部地区，由中南部向北部逐渐减少；暴雨红色预警发布频率较高的在河北省中南部以及唐山、承德地区，发布时间主要在7—8月；大雾红色预警主要发生在沧州和衡水地区一带的11月至次年的2月，高温红色预警主要在沧州、衡水地区的6—7月。由数据统计结果可以看出，沧州沿海和衡水容易出现特别严重的天气过程。沧州地处河北省东南部沿海地区，易受副热带高压外围暖湿气流及台风外

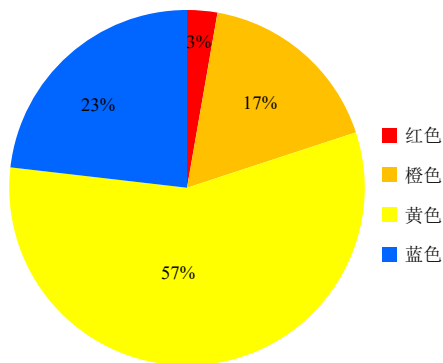


图1 河北气象预警信息发布级别占比图

Fig. 1 Proportion of weather warning information release level in Hebei

围环流影响，台风常带来狂风暴雨，容易出现特大暴雨和大风天气，破坏力极大，所以沧州沿海地区发生红色预警的频次较高。另外，沧州、衡水地区受地形辐合影响极易出现强浓雾天气。

橙色占17%，易发生红色灾害预警信号的类型主要有：暴雨、大雾、大风、冰雹、雷电和高温天气。空间分布（图2b）和红色趋势一致，中南部发布频次较高；大雾橙色预警在沧州地区、衡水地区、承德地区全年时段都有发生，全省范围的大雾过程主要集中在1—2月，频发时段为10月至次年4月。暴雨、冰雹、雷电橙色预警主要发生在沧州地区、衡水地区、承德地区，频发时段为4—8月。

黄色占比最大57%，由图2c可以看出，黄色灾害预警信号频次高发区在河北省中南部和承德地区发布次数最多。雷电黄色预警信号主要集中在4—8月，暴雨黄色预警信号主要集中在7—8月，大雾4—12月均有发生，冰雹黄色预警主要发生7—9月，分布在石家庄地区、沧州、张北和秦皇岛，大风黄色预警信号全年均有发生，2015年石家庄、邯郸、邢台、保定使用过暴雪黄色预警信号，其他年份都在承德地区使用过。

蓝色预警信息发布条数占23%，承德和张家口西北部发布蓝色预警信号次数最高（图2d）。在2015—2018年统计数据中，黄色和蓝色预警信号发布的频次较高，预警信号频次高发区也是各种气象灾害的重灾区^[3]。

2.2 气象预警信号发布数量分布特征

2015—2018年发布的气象预警信号发布数量分布如图3所示，发布灾害预警信号频次最高的主要为石家庄、承德、邢台和保定地区。灾害预警发布数量整体分布为南多北少，2015—2018年南部地区发布数量基本在1万条以上，沧州、邯郸和张家口都在8000条左右，衡水和廊坊频次为6000条，全省范围和秦皇岛分布频次较低，在3000条左右。

2.3 气象预警信号发布类型时空特征

对2015—2018年间暴雨、雷电、大雾、大风、高温、寒潮、冰雹、暴雪8类常用的灾害预警信号进行分析统计（图4），发现河北省发布频次最多是暴雨、雷电、大雾、大风4类灾害预警信号。暴雨预警信号每年发布数量基本在3000~4000条，每年变化率不大。雷电预警信号发布次数明显高于其他预警信号，每年均在8000~1万条，这是由于雷电灾害预警信号定义比较宽泛，空间分布广泛和分散，局地性比较强，另外说明雷电监测预警对有可能发生闪电的区

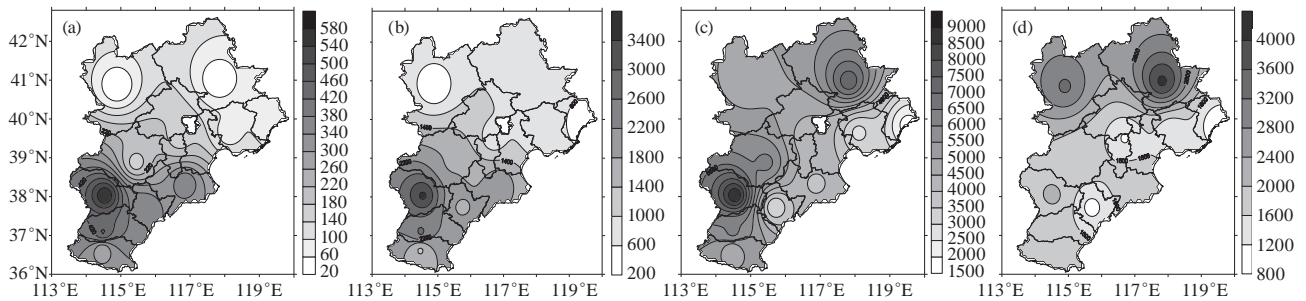


图2 预警信号发布数量等值线图
(a) 红色预警, (b) 橙色预警, (c) 黄色预警, (d) 蓝色预警
Fig. 2 Isoline map of warning signal release quantity
(a) red level, (b) orange level, (c) yellow level, (d) blue level

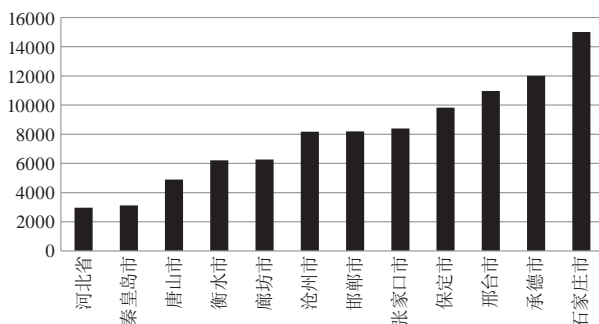


图3 2015—2018年河北省气象台各地市预警信号发布数量
Fig. 3 Early warning signals issued by Hebei Meteorological Observatory during 2015–2018

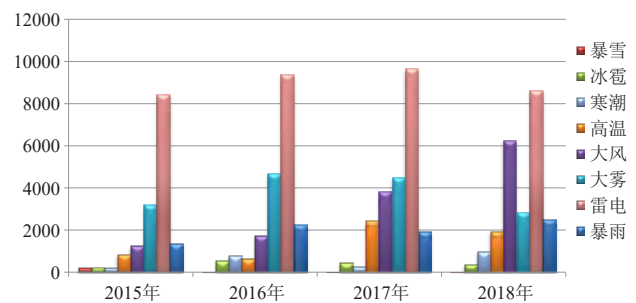


图4 河北省灾害预警信号发布类型情况
Fig. 4 Types of disaster warning signals issued in Hebei Province

域进行识别、跟踪和预报预警的能力越来越强; 2016年和2017年发布雷电预警信号次数最多, 2018年略微有所下降。大雾预警信号发布条数在3000~4000条, 2015—2017年发布数量逐年增加, 2018年有所下降。大风预警信号发布次数多的年份大雾的预警发布数量相应减少; 大风预警信号发布次数逐年增加, 2018年较2015年增长了将近6倍, 俞海洋等^[4]对河北省1984—2013年142个地面气象观测站大风数据统计分析得出, 河北省大风日数逐年减少, 风灾发生次数总体呈增加趋势, 与连年增长的灾害预警信号数量是一致的。

3 结论

1) 河北省发布频次最多是暴雨、雷电、大雾、大风4类灾害预警信号。受气候、地理位置、地形等因素的影响, 北部地区冬春两季多大风、沙尘暴、大雪和冰雹, 夏季多干旱、暴雨及霜冻, 东部地区易受台风、海啸袭击, 且多冰雹危害。全省冬季受强冷空

气影响, 寒潮大风天气居多。

2) 河北省发布灾害预警信号频次较高的地区主要为石家庄、承德、邢台和保定地区, 石家庄、保定和邢台处于太行山东麓, 受到迎风坡的抬升作用, 易发生暴雨, 承德地处燕山北部, 易受雷电和大风影响, 灾害预警信号发布数量整体分布为南多北少。

3) 河北省预警信息发布级别占比中黄色和蓝色预警占的比例最大, 红色级别预警信息比例最小, 造成的危害和影响最严重, 主要发布在石家庄、邢台、邯郸、沧州和衡水中南地区。

参考文献

- [1] 黄归兰, 赵宇, 马继华, 等. 广西气象灾害预警信号分布特征及发布. 气象科技, 2015, 43(2): 343-348.
- [2] 张硕, 王一文, 纪永明, 等. 辽宁省气象灾害预警信号分布特征及发布. 安徽农学通报, 2017, 23(18): 115-118.
- [3] 娄朋举, 赵铁松, 张静. 河北省致人死亡的气象灾害时空分布与致灾因子研究. 防灾科技学院学报, 2018, 20(3): 67-72.
- [4] 俞海洋, 李婷, 陈笑娟, 等. 河北省近30年大风时空分布及成灾特征分析. 灾害学, 2017, 32(2): 59-63.

首届世界气象中心研讨会简评

■ 周庆亮 任璐 王蒙

2019年3月26—29日，世界气象组织（WMO）和中国气象局在北京共同主办了“世界气象中心研讨会”，这是自WMO认定世界气象中心52年以来的第一次。简要评述了首届世界气象中心研讨会举办的会议概况、取得的主要成果，分析了研讨会给予世界气象中心（北京）的启示。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.026

世界气象中心，作为世界气象组织（WMO）业务系统的核心——全球资料加工和预报系统（GDPFS）中的业务体系设置，其主要职责是为世界各国实时气象预报、预测业务提供稳定、丰富、高质量的无缝隙天气气候分析、预报、预测指导产品，并牵头开展国际气象预报技术交流、技术培训等活动，旨在支持发展中与最不发达国家的气象预报业务能力提升。截至2019年12月31日，全球共有9个世界气象中心。

1 会议概况

由中国积极倡导的首届世界气象中心研讨会于2019年3月26—29日在北京举行。此次研讨会的主题是“共同建立地球系统预报，倾力服务经济社会发展”，由WMO和中国气象局共同主办，世界气象中心（北京）运行办公室承办。本次研讨会，设置了无缝隙全球资料加工和预报系统实施计划，最不发达国家和小岛屿发展中国家的气象水文部门能力发展，世界气象中心之间、世界气象中心与区域专业气象中心之间的综合协调机制以及支持人道主义机构的气象服务等四项主要议题。研讨会还对现有9个世界气象中心履职的未来规划、产品应用、多部门合作与协作、支持WMO成员能力建设等方面开展了问卷调查。每一个接受调查的世界气象中心都做出了积极的反馈，表1仅给出了欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的反馈结果。

2 会议成果

第一，制定滚动的无缝隙全球资料加工和预报系统用户需求评估。实施无缝隙全球资料加工和预报系统计划，建议首先要针对用户的需求开展滚动评估。滚动评估可以充分吸取WMO全球综合观测系统

（WIGOS）的做法：利用滚动评估来设计框架、计划推进和评估表现，合理利用区域协会和技术委员会已建立联系的利益相关方，如全球气候服务框架、公共天气服务计划和水文学委员会等资源。虽然全球资料加工和预报系统的目标用户是国家气象水文部门，但滚动用户需求评估的设置需考虑各国家气象水文部门的服务对象（如人道主义援助机构等）的真正需求，要在时间、空间和跨领域等方面最大限度地提供无缝隙服务。

第二，促进研究与业务共同设计无缝隙全球资料加工和预报系统。在全球资料加工和预报系统中，建议加强科研与业务的协同性，使相关用户积极参与，共同开发相关产品并提供服务。新的业务需求将决定未来研究的方向和重点，创新型的研究将会为用户提供更切实有效的解决方案。依托现有世界气象中心、区域协会、各会员国已开展和未来将要开展的研究与预报示范项目（如灾害性天气预测示范项目）的经验，建立最佳的协调机制，通过“科学转化为服务”，使会员国从中受益。

第三，与WMO信息系统（WIS）相协调，促进无缝隙全球资料加工和预报系统提供高质量产品和服务。建议确定如下几个方面为WIS 2.0未来规划的优先活动，来促进全球资料加工和预报系统的可访问性，协助最不发达国家和小岛屿发展中国家克服与有限带宽相关的一些挑战，主要包括：优先使用网页应用程序接口的服务（例如交互式地图、进行数据选择和数据操作的工具），并将通过网址链接来体验；优先使用开放标准实现网络上的互可操作性；优先使用云技术来进行数据处理以避免移动大数据；优先使用新的全球通信系统信息队列技术，保持交换观测和产品的

收稿日期：2020年2月9日；修回日期：2020年3月13日
第一作者：周庆亮（1965—），Email: zhouql@cma.gov.cn

表1 ECMWF对首届世界气象中心研讨会问卷调查的反馈结果表

调查问题	调查反馈结果
作为世界气象中心，在未来的规划中，贵中心将在哪些领域有所发展？	发展基于集合的分析与预报业务，到2025年对高影响天气的集合预报能力达到2周以上，将大尺度环流特征及调整预报能力提高到4周以上，对全球气候异常预报提高到一年以上；通过哥白尼大气监测服务和哥白尼气候变化服务两个计划，发展环境预报，特别是海浪、空气质量、洪水（GLOFAS）、火灾预报和气候再分析。
为了支撑WMO战略计划目标，贵中心还可以发挥哪些作用？	继续提高基于综合集合预报系统的资料服务，提供次季节时间尺度以及空气质量、水文等更多的环境预报；发展产品服务云技术，继续强化在相关技术培训中的角色。
请提供与贵中心合作的组织机构名称以及合作内容？	与ECMWF的22个成员国、12个合作国以及其他用户、学术界开展合作：作为世界气象中心，免费提供确定性、集合和季节性的数据，同时通过有偿定制的方式提供更广泛的数据；参与WMO灾害性天气预报示范项目（包括培训），通过双边、以及WMO的S2S、WGNE项目等开展科研合作，参加欧洲气象卫星应用组织（EUMETSAT）、WMO等观测提供者的项目活动。
贵中心在履职方面遇到的最大的挑战是什么？	围绕灾害性天气预报示范项目等制定培训需求的优先次序，并且最好通过全球资料加工和预报系统来更加组织结构化地实施。
贵中心与其他中心之间的协调机制中的成功案例？	与中国气象局、巴西国家太空研究院（INPE）、美国国家海洋和大气管理局（NOAA）等全球诸多组织拥有正式合作协议，面向于专业技术交流、经验分享以及ECMWF相关产品使用反馈；建立了很多的非正式科研合作，每年发表的150篇科学论文中，80%都有来自非ECMWF成员的作者参与。
对小岛屿发展中国家和最不发达国家有何特殊需求？	维持乃至进一步扩大观测数据的自由交换，包括降雪、水文观测等更广泛的地球系统观测；请求一直对ECMWF产品质量反馈。
贵中心将如何帮助最不发达国家和小岛屿发展中国家开发数值模式产品应用？	继续给予非商业用户的优惠产品使用许可；未来利用欧洲天气云来改善对数值天气预报数据的访问，并已利用云技术免费提供哥白尼计划气候数据访问。

灵活方式。

第四，确保最不发达国家和小岛屿发展中国家的气象水文部门能力建设机制。建议因地制宜地制定世界气象中心、区域专业化气象中心支持各会员国的、可持续的运行模式，优先满足于最不发达国家、小岛屿发展中国家的需求。这些运行模式，要依托现有的WMO相关支持计划，特别是要汲取这些支持计划在资料产品和服务、培训和能力发展、基础设施、管理实践以及其他正在继续的支持计划和示范项目、区域气候预测论坛、灾害性天气预报示范项目等方面取得的成功经验。

第五，确保世界气象中心、区域专业气象中心之间建立完善的协调机制来支持会员国。建议建立面向用户不断发展的需求、可持续且明确的协调机制，促进世界气象中心与世界气象中心之间、世界气象中心与区域专业气象中心之间开展有效的沟通；建议世界气象中心研讨会每两年或四年定期举行，相关的技术研讨会按需组织，同时要进一步明确世界气象中心协调机制的内涵、职责定位。

第六，利用好最容易实现的成果应用，面向已有或已规划的科研业务转化平台、试点项目等促进全球资料加工和预报系统计划实施。建议制定一些标准，将其作为评定新项目的基础，用其来确定用户的优先需求，测试无缝隙全球资料加工和预报系统的新成效和在各区域内以及世界气象中心、区域专业化中心、灾害性天气预报示范项目之间建立的协调机制。

另外，研讨会还要求各位代表给今后的“全球资料加工与预报系统”起一个简单、明了的新名字。与会代表一共起了10个新名字，诸如“地球系统分析与预报（ESAP）”、“WMO创新地球预报系统

（WIEPS）”等等。中国代表也给出了“全球资料加工、预报和服务系统（GDPFSS）”的建议，进一步体现未来WMO预报与服务业务体系融合发展的新运行理念。

3 会议启示

本次研讨会，是自1967年WMO认定世界气象中心以来的第一次关于世界气象中心未来业务和研究发展的研讨会。会议的成果、特别是针对无缝隙全球资料加工和预报系统实施、世界气象中心之间以及与区域专业气象中心之间建立协调机制等6项建议，全部被WMO第十八届世界气象大会采纳。

研讨会提出的未来无缝隙全球资料加工和预报系统执行计划实施的三个主要行动领域和关键优先重点：系统和服务、研究和创新、资料可获取性和网络平台，对今后世界气象中心（北京）的能力发展都给予了很大的指引；

提出的确保世界气象中心、区域专业气象中心之间建立完善的协调机制来支持会员国、确保最不发达国家和小岛屿发展中国家的气象水文部门能力建设机制等建议，对今后世界气象中心（北京）的作用的发挥也给予了很大的指导。世界气象中心（北京）应着眼全球，着力区域，对外保持跟其他世界气象中心的技术交流，对内强化核心业务顶层设计，以及与北京核环境应急响应区域专业气象中心、北京区域气候中心、亚洲沙尘暴预报区域专业气象中心、北京海洋气象服务区域专业气象中心以及WMO区域培训中心的工作协调，力争多打造几个名牌拳头产品，在WMO支持人道主义援助等新全球服务中争当先锋。

（作者单位：周庆亮，任璐，王蒙，国家气象中心；任璐，世界气象组织）

编辑选编

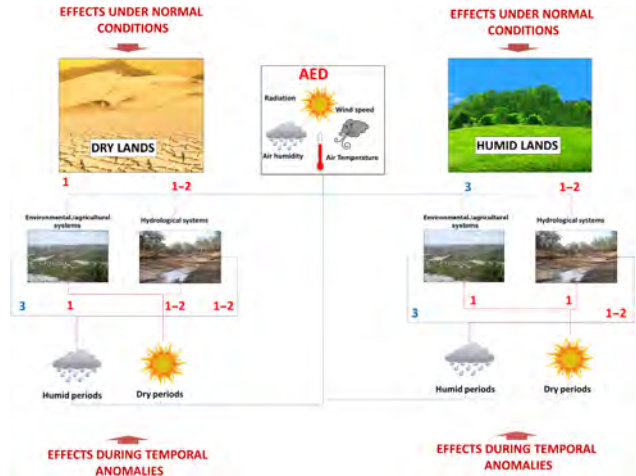
揭开大气蒸发需求对干旱的复杂影响

西班牙比利牛斯生态研究所的Vicente - Serrano等综述了大气蒸发需求 (atmospheric evaporative demand, AED) 在干旱中的作用及其对气候变化的响应。AED是一个复杂的概念, 它不同于表示从土壤、自由水面和/或植被到大气的水通量的ET (陆地蒸发)。AED不对应于陆-气通量, 而是对应于大气对水的需求 (即干燥或蒸发能力), 是大气边界层状态和动力学的函数。

理解AED对干旱的影响, 对于研究当前和未来的干旱严重程度和干旱趋势至关重要。虽然降水对干旱严重程度的影响最为明显, 但由于不同的物理和生理过程, 在潮湿和干燥的环境中, AED的影响是复杂的, 从而导致了不同的干旱敏感性。AED与干旱和半干旱地区干旱严重程度的增加有较强的相关性, 干旱和半干旱地区的水限制导致AED增加, 增强了ET赤字, 并对低降雨量期间的环境/农业干旱产生负面影响。在湿润地区, AED对环境/农业干旱的影响比水限制地区更为复杂, 且取决于前期降水/土壤湿度。

从驱动力和反馈来看, 干旱是一个复杂的现象, 尽管气象记录不断增加, 但研究者无法就长期干旱动态及其主要驱动因素达成共识。每个干旱指标的适用性取决

于所评估的干旱类型, 因此将AED纳入这些评估的相对重要性也是如此。



大气蒸发需求 (AED) 影响环境/农业和水文系统的简化框架。不同数字代表对干旱严重程度的影响不同: “1”表示AED增加导致水分胁迫增加, “2”表示增加AED几乎没有影响, “3”表示AED增加有间接的正效应

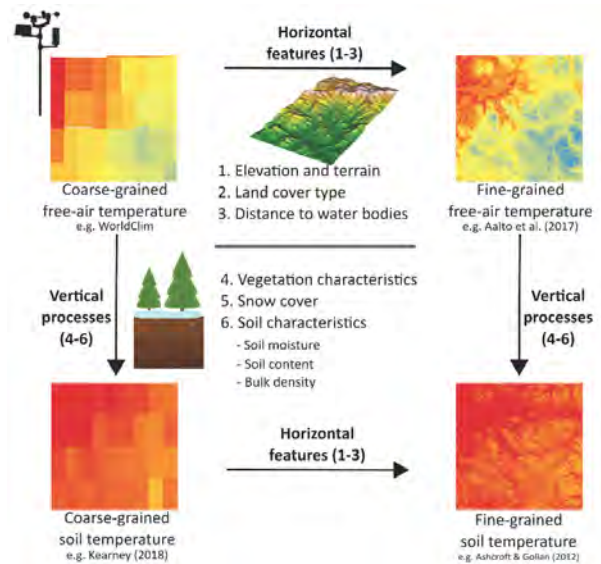
来源: Vicente-Serrano S M, McVicar T R, Miralles D G, et al. Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change. *WIREs Climate Change*, 2020, 11: e632..

(侯美亭 编译)

SoilTemp: 全球近地表温度数据库

目前生态学中空间显式模式和过程的分析 and 预测大多依赖于从标准气象站插值的气候数据。然而, 插值气候数据仅代表粗空间分辨率下的长期平均条件。因此, 许多在精细时空分辨率下运行的气候强迫因子被忽略。这对于与观测高度 (例如植被、雪和土壤特性) 有关的影响、以及不同的栖息地环境 (例如地形、辐射强迫或冷空气汇集) 的影响尤为重要。由于生活在靠近地面的生物体与这些小气候条件的关系比与自由空气温度的关系更为密切, 因此需要小气候地面和近地表数据, 以便对这些生物体在人为气候变化下的变化以及它们所生活的生态系统的功能作出现实的预测。

为了填补这一关键空白, 比利时安特卫普大学的Lembrechts以及世界范围内众多的科学家呼吁向SoilTemp数据库提交温度时间序列, SoilTemp是一个地理空间数据库倡议, 它汇编了世界各地的土壤和近地表温度数据。目前, 该数据库包含来自51个国家的7538个温度传感器在所有关键生物群落中的时间序列。该数据库将为改善全球对小气候的了解铺平道路, 并弥补现有气候数据与大多数生物和生态系统过程相关的精细时空分辨率的气候之间的差距。



驱动小气候的水平和垂直要素及特征

来源: Lembrechts J J, Aalto J, Ashcroft M B, et al. SoilTemp: a global database of near-surface temperature. *Global Change Biology*, 2020, doi:10.1111/gcb.15123.

(侯美亭 编译)

中华人民共和国成立以来气象研究和业务的进展

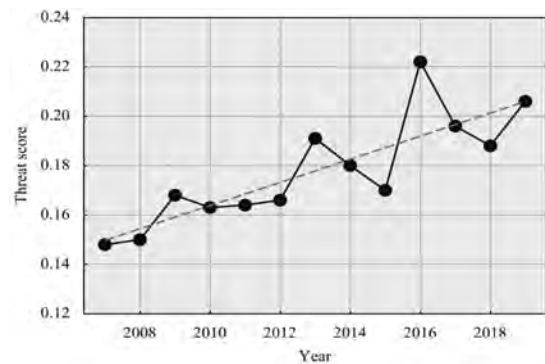
《气象学报》(英文版)从2020年第1期起陆续推出了“新中国气象事业70周年”的专栏文章。来自中国科学院大气物理所、南京信息工程大学和中國气象局系统的十余位作者从气候与地球模式的发展、MJO对东亚的影响、热带海气相互作用、PDO预测、强对流研究与业务、城市气象、气候变暖、气候预测、强降水预报、边界层高度估算以及干旱成因等方面介绍了中国在这些领域的研究进展。

中国气象科学研究院罗亚丽等回顾了改革开放以来中国在强降水科学与预报方面的重大进展。文章从相关的天气系统、强降水的主要区域和台风诱发的强降水三个方面综述了我国强降水物理机制的研究进展。从数值预报技术和客观预报方法两方面综述了强降水预报技术的发展和應用。由于气象观测技术的迅速发展和电子计算技术的显著进步,我国强降水研究已发展到对产生强降水的风暴的演变过程的研究以及对云微物理特征的观测分析。对天气系统对产生强降雨的重要性也有了更深入和更系统的认识。我国强降水的业务预报已由主观的天气事件预报向主观和客观相结合的定量降水预报发展,并向提供预报不确定性信息的概率定量降水预报发展。

在全球范围内,暴雨预报一直是气象业务预报中最困难的挑战之一。2007—2019年,中国气象局国家气象中心发布的24 h提前量暴雨预报的TS得分增长约2.9%,这种改进主要是由于NWP技术的进步。

中国气象局气象干部培训学院的俞小鼎等综述了近几十年来我国强对流研究和业务的进展,重点介绍了强对流天气的有利天气形势(SCW)、强对流风暴的主要组织模式(SCS)、SCW和SCS的天气雷达回波和卫星图像的有利环境条件和特征,以及SCW的预报和临近预报技术。总的来说,中国科学家已经通过雷达和卫星观测深刻了解了SCW的天气形势、组织和演化特征,以及中国不同类型对流天气的机制。深入理解了对流触发的多种类型,以及超级单体风暴和飚线的环境条件、结构和组织模式、维持机制。阐明了中尺度对流系统的组织模式、气候分布和SCW的不同类型,以及基于雷达、卫星、闪电观测和灾调的大冰雹、龙卷、下击暴流和破坏性对流阵风的多尺度特征和形成机制。在业务应用方面,已经开发了不同类型的识别和中尺度分析技术,以及利用“配料法”和深度学习算法等各种预测和临近预报技术。因此,我国SCW业务预报水平得到了显著提升。

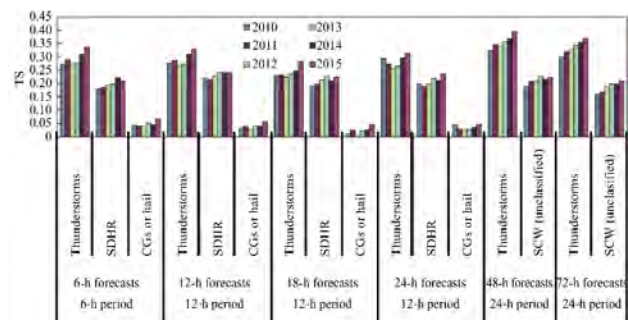
对2010—2015年4—9月国家气象中心SCW预报的验证结果表明,SCW业务预报能力有明显的上升趋势,



中国气象局国家气象中心2007—2019年24 h强降水预报 (≥50 mm/d) TS评分 (2019年的TS评分为1—9月)

来源: Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al, Science and prediction of heavy rainfall over China: Research progress since the reform and opening-up of new China. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(3), 427-459, doi: 10.1007/s13351-020-0006-x

势,在相同的预报时段和提前量,雷暴、短时强降水(SDHR)、对流阵风(CGs)和冰雹预报能力依次下降。CGs和冰雹的预报能力明显低于前两类,但发生大面积的CGs和冰雹时预测能力通常较高。



2010—2015年分类SCW预报的年度TS评分

来源: Yu X D, Zheng Y G. Advances in severe convection research and operation in China. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(2), 189-217, doi: 10.1007/s13351-020-9875-2

(张萌 编译)

我所认识的人才学

■ 张家诚

人才学是一门开发人力资源的学问，它应在现代科学体系中占有突出地位。人才学也应该是人人皆知的一门学问，这是由于任何人都必需与人才问题打交道。一般说，教育工作者是培育人才的人，领导干部是使用人才的人，学生则是作为人才被培养的人，具体工作人员则是作为人才而被使用的人。经常，一身而二任焉，一方面培育人才，另一方面则作为人才而被培育；一方面使用人才，另一方面则作为人才而被使用。人才是一种社会力量，产生于社会，而在社会中显露其光芒。因此，最有效地促使人才的产生而发挥其作用不仅是个人的事，而只有全社会协调一致的努力，才能取得最好的成果。

我们认为人才学可以在达到“和谐一致的努力”的目的中发挥作用。这种情况，不仅宏观人才如此，而且微观人才学也是如此。所谓宏观人才学既整个社会培养和人才的政策、方针、措施、组织等所组成。其中包括教育制度、考核制度、干部政策以及实施这些制度的一系列精神的、物质的原理、原则、技术等在内。很显然，宏观人才学的研究，将会为整个社会正确培养和人才提供指导方针。微观人才学即个别的、具体的人才有关的一系列原理、原则和技术等所组成。

人对事物的认识是从盲目状态而逐步进入自觉状态的。自然科学使人类摆脱对自然界的盲目性，给人类带来了巨大物质财富。马克思主义把人类对社会规律的认识从盲目性改变成自觉状态。历史唯物论就是贯穿全部社会科学的基本原理，是从全社会的（即宏观的）角度观察社会问题的结晶，是建立宏观人才学的真正的科学基础。

作者作为一个气象工作者讨论人才学的问题，主要只能凭籍在这一行业中的经验和知识。尽管如此，还是感觉到困难重重，因为气象学本身也是十分复杂的，也同样在任何问题上都有出状元的潜力，即使每个问题大费笔墨，也不易抓住要领。那么问题从哪里谈起呢？我想问题还是从对气象科研人员的全面要求谈起。即将对一个从事气象科学研究的全面人才的角

【编者语】

2020年3月10日，中国气象科学研究院研究员张家诚因病去世，享年93岁。本文摘自张家诚于1981年5月完成的《科学研究的人才结构》报告中的第1节，完整报告代表了改革开放初期，气象研究机构领导干部对人才问题的思考，体现了气象研究从业者的思想和智慧。

度谈气象科学的人才学问题。当然，在论述的过程中，随时随地都不能忘记下列事实，即使不具备全面的能力，在某一个细小的技术环节上也可以达到前人未曾达到过的水平，也可以作到被认为是一个有了一定的贡献的人才。

可以说科研工作是一种智力密集行业，人才问题带有关键性。其主要原因是科研必需创新、任何精巧的机器，包括电子计算机在内，只能按人们所提供的程序完成任务。当然，用同样的程序也可以得出人们事先未知的事物或规律性，但这仍属于人类已有智力的扩大。

由于从事过一定的研究工作，同时又承担基层科研单位的行政任务。忙忙碌碌中也大量地接触过许多科研工作者的思想问题，其中很大一部分牵扯到课题、成果和科研能力的问题。在广大的科研战线上还有着数不清的个人成败事例，进行综合、比较，使人深受教益。所以，抱着一个朴素的愿望，能不能把思想工作转化为一门科学，用科学的逻辑力量进行说服，就能更好动员广大的科研工作者，奔赴四化第一线。



图1 张家诚做报告



图2 张家诚晚年出版的专著

本文摘自张家诚编写的《科学研究的人才结构》（中央气象局气象科学研究院，1981）；一些文字用法遵照原文未做修改。

我所知道的陈受钧：一位有国际声望的学者

■ 陶祖钰

精于教学：一张小纸片、一个小黑包

1949年以前，中国高校没有自己的教材，都用英美教材。中华人民共和国成立后，在苏联援助下建立了一个学科比较完整的高校系统，教材也改用苏联教材。20世纪50年代中后期，高教部组织编写了一批自己的教材，谢义炳主编的《天气学基础》是其中之一。陈受钧作为助教，一边辅佐谢义炳教授天气学课程，一边协助谢义炳将讲课内容改编成《天气学基础》。1959年地球物理系成立，天气学和动力气象学专业及大气物理专业都有天气学课程，陈受钧成为大气专业的天气学主讲教师，一位刚刚25岁的助教。

文化大革命后期办短训班，陈受钧是数值预报班和暴雨班的主力讲师。对于1978年恢复招收硕士研究生，陈受钧是非常兴奋的。他承担了第一届硕士研究生考试的出题和批阅工作。陈受钧的教学任务是研究生课程“大气环流研究进展”。陈受钧的授课重点突出、新颖、吸引人。他上课从不带讲稿，只带一张小纸片。他说有时候就写在烟盒纸的反面。每次上课前最重要是在脑子里过一遍，上课时就能一气呵成。教师一人在台上，台下几十双眼睛盯着你，讲课中一丁点儿差错都逃不过学生的眼睛。我的办公室和陈受钧对门，常见他在桌前呆坐。实际上是他在备课，在脑子里“过电影”。

陈受钧退休后清理办公室，把一个小黑包交给我，说里面装的是他的讲稿。上课和出差讲学，提上这个包就走。那是一种曾经流行过的公文包，是“北



本文作者（左一）和陈受钧教授在一起

【编者语】

2020年5月，北京大学气象系陈受钧教授不幸去世，本期摘刊陈受钧老师的挚友和同事陶祖钰教授的怀念文章，与读者一起怀念逝者在气象科学教育和学科建设上做出的贡献。

方暴雨学术交流会”上发的。陈受钧不是没有讲稿，而是上课时不看讲稿。

我经常和陈受钧一起参加研究生论文答辩。陈受钧的质疑非常有特色。他提的问题看起来很小，几句话就能回答。但如果学生基本概念模糊，在资料和方法上有缺陷，或对自己的研究结果认识肤浅，学生一回答，马上就原形毕露。陈受钧的质疑都是一针尖见血的关键所在，能够迅速考察出学生的真实水平，对学生也是一次重要的指导。

瞄准高原和暴雨——中国学者做出国际声望

在暴雨和中尺度气象领域，陈受钧教授是一位具有国际声望的学者，他用个人的国际声望推动了中尺度气象的中外学术交流。我本人在境外的工作访问，包括美国国家大气研究中心（NCAR）、德国慕尼黑大学、韩国首尔大学、中国的台湾大学和香港科技大学，无一不是陈受钧介绍的。20世纪80年代其他高校的教师出国做访问学者，不少也是陈受钧帮助联系的。陈受钧开辟的交流渠道至今仍在发挥作用。

每年一次的东亚和太平洋地区中尺度气象学术研讨会是陈受钧最重要的贡献之一。他是主要发起者和组织者，单是为了确定研讨会的名称，他和NCAR的郭英华博士当时就费了很多周折。另一个重要贡献是与韩国的郑用升院士一起推动建立了中韩大气科学研究中心。

陈受钧讲过，“发表中文论文再多，外国人不看，你做了再多的工作，他们也不知道。”所以20世纪80年代后他的精力都花在写英文论文上。陈受钧的国际声望就是建立在在国外学术刊物上发表的一批论文上。大约是2013年，陈受钧将他1984—1999年发表的21篇英文论文进行了汇总。这些论文内容包括西南涡和暴雨、梅雨和季风、爆发性气旋等方面。这些选题大多和青藏高原有关，而青藏高原的影响是全球数值模式中一个关键性难点。

（作者单位：北京大学）

写作日期：2020年5月11日

纪念全球气候变化科学评估的先驱John Houghton教授

■ 丁一汇

英国著名气候变化和大气物理学教授J. Houghton爵士不幸感染新冠病毒于近期逝世。政府间气候变化委员会（IPCC）和他曾经工作的剑桥大学与英国气象局的同事们为此感到震惊和难过。大家对他在全球气候变化研究和评估中的杰出贡献和领导作用永不能忘怀，他与中国科学家的友谊及其热诚帮助也永远值得赞赏和怀念。

Houghton教授1990—2003年曾担任IPCC第一工作组共同主席，主持编写了IPCC第一次到第三次评估报告的科学卷，并领导撰写了特别报告《气候变化1994：气候变化的辐射强迫和对IPCC IS92排放情景的评估》与《航空和全球大气》。他为IPCC评估报告的科学问题评估以及科学结论的总结和普及做出了杰出贡献。

我在1990—2003年与他在IPCC第一工作组长期合作（图1）。在他的领导下，出色地完成了全球气候变化的关键科学问题的评估，尤其是在解释全球气候变暖的事实基础上，确认人类活动造成的温室气体的不断增加是导致全球变暖的主要原因。这为2015年巴黎气候协定的签署，为全球2℃减排目标的确定做出了重大贡献。在十余年间Houghton教授带领第一工作组的众多科学家以坚定的信心和毅力，高度的智慧和领导能力克服气候变化科学中一个又一个的科学



图1 John Houghton、丁一汇和秦大河（从左至右）在IPCC全会上（宋亚芳提供）

【编者语】

英国著名气候变化和大气物理学教授J. Houghton爵士不幸感染新冠病毒逝世。本刊特别邀请丁一汇院士撰写了纪念文章，以怀念Houghton教授与中国科学家在IPCC合作期间结下的友谊。

难题和疑问，又以极大的耐心听取各种不同的声音和异议。在求同存异的基础上取得了全球气候变化事实、原因和预测的共识，最后与IPCC第二与第三工作组一起，倡导全球减排行动的共识。这是人类走向社会可持续性发展治理、走向低碳和清洁能源之路的关键一步。

Houghton教授对中国人民和科学家十分友好。他与中国气象局前两任局长邹竞蒙先生和郑国光先生都有深厚的友谊。他的《全球变暖》一书第一版中译本，曾在中国出版（气象出版社，1998年）。邹局长为此书撰写了序言。后来郑国光局长又为该书的第四版中译本（气象出版社，2013年，图2）撰写了序言。教授知悉此书将出版中译本后，都在该书出版前两次撰写了中文版序言，尤其在第一版出版前赶写了第二个序言，进一步对邹局长与中国科学家表示感谢和赞赏。他特别在序言结尾引用了中国的一句古老的谚语“以其昏昏使人昭昭”（《孟子·尽心下》），强调了使决策建筑在最完善的科学技术基础上，头等重要的是要详尽和广泛地了解目前对气候变化及其可能的影响所造成后果。他希望这本书的中文版将有助达到此目的。

最后可以预期中国科学家将会记住Houghton教授对全球变化科学评估问题杰出的贡献，并怀念他与中国科学家的友谊。



图2 《全球变暖》（第四版）封面

（作者单位：中国气象局国家气候中心）

写作时间：2020年5月23日

进潮量 (tidal prism) 是指在一个完整的潮汐周期中, 泻湖或河口与外海之间交换的水量。气象出版社2012年出版的《英汉英大气科学词汇(第二版)》收录了该词条并翻译为进潮量。商务印书馆2016出版的《综合英汉科技大词典(第2版)》对该词条的翻译则进行了不同学科的区别, 海洋学领域多译为潮棱体、地理学翻译为纳潮量、水利水文学译为进潮量。

tidal的中文含义为潮汐, prism为棱体, 故译为潮棱体是采用直译的方式。此概念的定义为河口或海湾平均高潮位与平均低潮位之间水的体积, 其形状近似于棱体, 译为潮棱体颇为直观、形象; 翻译为进潮量或纳潮量则更倾向于意译。

在百度搜索中, 进潮量最为常见, 结果有近2000万条; 纳潮量较常见, 结果超过20万条; 潮棱体只有46条搜索结果。而在中国知网的学术搜索中, 纳潮量的结果超过200条; 进潮量和潮棱体使用数量较少。检索结果体现了大众科普和学术研究对同一个概念在用词上的巨大差别。

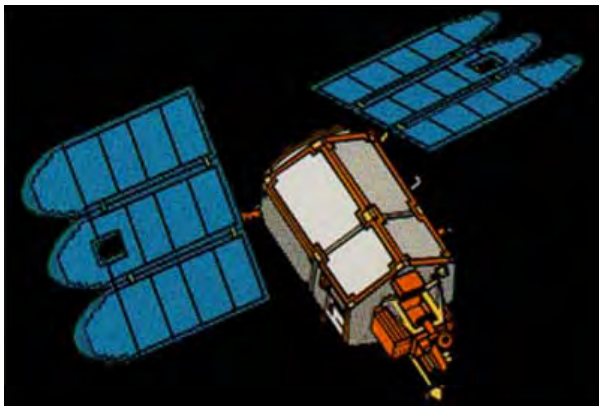


进潮量 (tidal prism)

与

臭氧总量测绘光谱仪 (TOMS)

AMS 词汇



臭氧总量测绘光谱仪 (Total Ozone Mapping Spectrometer, TOMS) 首次于1978年11月搭载在美国发射的Nimbus-7气象卫星上, 后来又搭载在Meteor-3, ADEOS以及其他国际卫星上。南极的臭氧空洞最初就是通过分析TOMS获取的数据发现的。

以TOMS为主题词在Web of Science平台的SCI数据库中检索可得到1400多条结果。其中, 发文量超过100篇的学科按照发文量由多到少的顺序为气象与大气科学(584篇)、环境科学(191篇)、地球科学多学科(161篇)、食品与动物科学(140篇)以及遥感技术(115篇)。气象与大气科学为主题的文献远超其他学科, 可见TOMS在气象与大气科学研究, 尤其是在对大气臭氧、气溶胶、紫外线辐射等数据观测和研究中的重要作用与地位。近5年来每年发表的SCI文献均维持在40篇及以上, 说明历经多年, 围绕TOMS的研究依旧维持着较高的热度。表1给出被引480次以上的相关论文信息。

张 伊 编辑
张 萌

表1 气象与大气科学领域被引480次以上的TOMS主题相关论文

序号	论文题目	第一作者	来源	被引次数
1	Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product	Prospero J M	Reviews of Geophysics, 2002, 40(1)	1707
2	Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and Sun photometer measurements	Chin M	Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59(3): 461-483	798
3	Aerosol properties over bright-reflecting source regions	Hsu N C	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(3): 557-569	726
4	Saharan dust storms: nature and consequences	Goudie A S	Earth-Science Reviews, 2001, 56(1): 179-204	653
5	Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations	Duncan B N	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2003, 108(D2)	482

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, Yang Xiuhun, 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 Yuwen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Weidan, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoming, Yi Lan, Yu Yubin, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Li li, Ji Wenbin, Jiang Jianmin, Cui Xiaojun

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

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

http://cmalibrary.cn/amst

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

(Including Advance Report 2020: Ecological Meteorology in the Dongting Lake Region)

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

Article

- 2 Xu Xiaofeng/ Meteorological Smallsats: Expanding the Field of Space-Based Meteorological Observations
- 8 Lu Longhua/ Arctic Ozone Hole
- 10 Guo Ni, Wang Xiaoping, Wang Wei, Wang Lijuan, Hu Die, Sha Sha/ Review of Drought Monitoring Based on Remote Sensing Technology
- 21 Kuang Qiuming, Yu Tingzhao / Review of Leveraging AI for Exploitation of Satellite Observations
- 30 Zhu Zhihui, Wang Qin, Li Li/ Difference of the Diurnal Temperature Variations Between Urban and Harbor Area in Shanghai
- 36 He Yufei, Gao Zhuyu/ Analysis on Wind Profiling Radar Data of a Rainstorm at Lin'an
- 43 Zhao Xiangang, Lin Manyun, Xie Lizhi, Wei Lan, Fan Cunqun/ Computer Network System of FY Satellite Ground Segment
- 49 Lyu Wenzhong, Cai Xiuhua, Sun Jingli/ Impact Assessment of AMDAR Data in NWP
- 55 Miao Yunling, Gong Hengrui, Zhang Yunhui, Chai Yanhong/ The Different Orders Rainy Days Spatiotemporal Variation Characteristics of the East Tianshan Mountain North Slope in Rainy Season from 1961 to 2016
- 62 Li Guoyang, Xu Qiheng, Chen Kuanwen, Cao Yongchao/ Spatial and Temporal Characteristics of Net Primary Productivity of Forest Ecosystem in Guangdong Province from 2005 to 2015
- 66 Wu Jun, Yu Jinqiu, Haung Dongzhi/ Analysis on the Relationship Between the Change Trend of Climate, Climate Productivity and Grain Yield in Maoming
- 76 Peng Jie, Jiang Shuai, Yuan Quan, Yin Yiwen/ Meteorological Differences Between Land and Water in the East Dongting Lake
- 84 Wang Qi, Wu Xianyun/ Climate Characteristics of Rainstorm in Hunan in the Last 37 Years
- 89 Xu Jianwei, Peng Baofa, Guo Rongfang, Wang Xiaqing/ Variation of Extreme Temperature and Precipitation Events of the Dongting Lake Ecological Economic Zone in 1960-2018
- 96 Huang Jumei, Liu Xue, Li Qi, Qin Hong, Xiang Wei/ Study on the Weather Index of Bird-Watching in the East Dongting Lake Wetland
- 99 Jiang Shuai, Yin Yiwen/ Diagnostic Analysis of a Continuous Rainstorm in the Dongting Lake Area
- 107 Yang Wei, Liu Qing, Wang Wei, Zhang Qiaoming, Fang Yang/ Analysis of Land-lake Breeze Characteristics of the East Dongting Lake
- 117 Yu Changjian, Chen Jiaorong, Yu Yu, Zhong Zezhou/ Spatial Distribution and Characteristics of Heavy Rain in Yueyang from 2015 to 2017
- 123 Qin Hong, Liu Xue, Huang Jumei, Wang Bo/ Study on the Relationship Between Eutrophication and Meteorological Impact Factors of the Nanhu Lake
- 128 Wang Wei, Suibing, Lin Nan, Chen Tailong/ Study on Area Changes of the Dongting Lake Based on Remote Sensing Data
- 133 Yuan Quan, Wu Siyan, Xiao Ping, Li Qi/ Analysis of Differences of Rainfall Between Urban, Rural and Mountainous Areas in Yueyang Municipality by Using Regional Intensive Automatic Stations
- 138 Xu lili, Chen Shiwen, Chang Liwei/ Analysis of Urban Meteorological Disasters in Yueyang in the Last 30 Years
- 141 Chang Liwei, Huang Haibo, Xu Lili, Li Jing, Huang Zhuoyu/ A Comparison of Winter Blizzard and General Snowfall Conditions in Yueyang