

# Advances

in Meteorological Science and Technology

# 气象科技进展

ISSN 2095-1973  
CN 10-1000/P

## No.5

2018年10月  
第8卷 第5期

### 长江生态气象



农田生态梯度观测系统

温室气体监测系统

江汉平原生态  
气象监测平台

气象要素雷达系统

溃害监测系统

降水降尘自动采样系统

APS-3A型降水降尘自动采样器

气象科技 **进展**  
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

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

**副主编**

王志强 中国气象局气象干部培训学院  
肖子牛 中国科学院大气物理研究所  
翟盘茂 中国气象科学研究院  
罗云峰 中国气象局  
李维京 国家气候中心  
胡永云 北京大学  
谈哲敏 南京大学  
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)**

成秀虎	高学浩	龚建东	郭虎	郭学良
李柏	李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉
任小波	沈文海	王存忠	王卫丹	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	金飞飞
雷小途	李集明	李俊	李良福	李耀辉
李跃清	李忠	梁旭东	刘晶森	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	汤绪	田红海
万齐林	王斌	王斌(海外)	王东海	王海元
王建林	王式功	王延青	王迎春	吴立广
王自发	卫晓莉	温敏	翁富忠	杨松
谢志辉	闫冠华	延晓冬	杨萍	杨大林
杨昭明	姚学祥	伊兰	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	周凌晔	周显信	朱定真
朱小祥	朱玉洁	祝燕德	邹立尧	邹晓蕾

**编辑部**

张萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民  
崔晓军

地址: 北京市中关村南大街46号,  
中国气象局气象干部培训学院 100081

电话: (010) 68409927/68409933

邮箱: amst@cma.gov.cn

Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA

网址: http://cmalibrary.cn/amst

投稿系统: http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx

官方微博: http://weibo.com/2115232930/profile

印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 侯美亭

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

定价: 30元

# 目次

第8卷 第5期 2018年10月

(内含: 进展报告2018“长江生态气象”)

1 许小峰: 主编语

## 研究论文

### 研究进展

- 6 赵俊芳, 姜月清, 詹鑫, 孔祥娜: 我国气溶胶污染对农作物影响研究进展
- 11 姜灵峰: 近76年我国洪涝灾损度变化特征分析
- 17 李国梁, 李俊, 李享: 一次强雷电天气特征分析

## 论坛

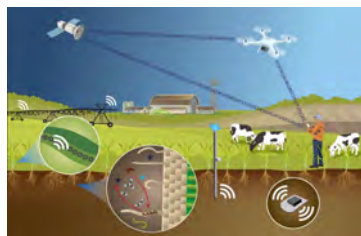
- 23 罗红磊, 何如, 苏志, 周绍毅: 广西气候可行性论证发展与建议

### 特写

- 27 彭宇翔, 刘国强, 田英, 李德泉, 车云飞: 贵州省人工影响天气弹药物联网管理系统应用

## 科学观察

- 2 读图 数字 榜单



P2

## 阅读

### 信息

- 10/16 新书架
- 123 高被引论文选编
- 125 编辑选编
- 127 涓流细语
- 封3 媒体扫描

封3



## 主编语

生态气象学是一门交叉学科,它以包括大气环境在内的生态系统为主要研究对象,利用天气学、气候学、应用气象学、生态学原理与方法研究生态系统诸因子间的相互作用及变化规律。在全球气候变暖、生态环境问题日益突出的背景下,生物资源和土地资源退化等问题直接威胁到了人类的生存和可持续发展。考虑到未来气候变化的不确定性和负面影响,如何维持生态系统的健康演变,适应环境变化,需要将气象学和生态学结合起来开展交叉研究,探讨各相关要素相互作用的过程和因果关系,这是生态气象学需要探讨、解决的问题。

水生生态系统是全球生态系统重要的组成部分。长江作为我国最长的河流,其流域的生态环境与天气、气候变化对于沿江区域的经济有着重要影响。特别是在“万里长江,险在荆江”的荆江流域,夏季的强降水使得这片素有“九曲回肠”之称的流域始终面临着洪水宣泄不畅、极易溃堤成灾的威胁。因此,研究该流域的生态气象特征,对于这里以农业、水产养殖业为特色的地方经济、及清洁环境和健康生态系统的维持具有重要的气象服务价值。近年来,湖北省荆州市气象局在生态气象领域做了

大量工作,对一些科技问题进行了积极探索和总结,本期以“刊中刊”的形式集中刊登了依托于荆州市气象局的“江汉平原生态气象遥感监测技术协调创新中心”有关成员单位在湿地生态与农业气象等方面的最新研究文章。

本期“进展报告:长江生态气象”在荆州市气象局的支持下,展示了该局科研业务人员独立或与高校等机构学者合作,在江汉生态气象方面近年来取得的主要成果。这些研究分别从产量预报(P36)、洪涝灾害(P51)、农作物遥感(P58、P72)、水体遥感(P85、P91)以及流域生态环境保护(P105)等不同角度阐述了生态气象领域在当地的研究进展,这些研究与长江流域生态保护与可持续发展问题密切相关。

来自长江大学等单位的专家在本期进展报告组稿过程中,对基层气象人员为主开展的研究给予了肯定,并向论文作者提出了大量具体和有建设性意义的修改意见,使得本期主题报告能够顺利出版。编辑部组稿过程中,还得到洪湖市水利部门的支持,并提供了素材,在此一并表示衷心的感谢!

许小峰

## 进<sup>2018</sup>展报卷 长江生态气象

### 研究论文

#### 研究进展

- 36 艾劲松,孙雨轩,刘凯文:荆州市冬小麦产量动态预报方法对比研究
- 40 秦鹏程,夏智宏,陈伟亮:农业气候年景评估指数构建及在江汉平原的应用
- 46 谭江红,陈伟亮,王珊珊:一种机器学习方法在湖北定时气温预报中的应用试验
- 51 张丽文,梁益同,李兰:基于高分一号影像的武汉市洪涝遥感监测与分析
- 58 柴振刚,胡佩敏,熊勤学:基于面向对象的光学和Sentinel-1 SAR数据油菜种植空间分布信息提取方法研究
- 63 刘可群,周守华,黄永平,汤阳,李仁东,李梦璠:土地利用变化对洪湖流域洪涝灾害影响
- 67 邓艳君,赵卓勋,李玲,张伦瑾:2014—2016年荆州城区空气质量与气象要素的关系分析
- 72 范剑,尤慧,刘凯文,高华东:不同播期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型
- 78 刘韬,夏智宏,朱浪:气象条件对湖北长湖水质的影响研究
- 81 耿一风,黄永平:近60年荆州四季趋变特征及给作物生长影响的对策
- 85 梁益同,夏智宏,文雄飞,柳晶辉,张丽文,邓艳君:基于卫星遥感的40年洪湖水面变化及驱动力分析
- 91 柳晶辉,万君:利用HJ-1卫星多光谱数据监测城市湖泊蓝藻研究
- 96 黄端,池泓,朱浪,邓艳君,夏智宏:荆州市农田植被净初级生产力时空特征分析

- 101 王凯,高媛,刘敏,潘汉标,夏智宏,靳艳秋,王芳芳:利川市旅游气候适宜性的评价和比较

### 论坛

- 105 冯奇,夏智宏,肖飞,童雯婷:生态画廊建设中流域水资源生态补偿机制的建立
- 109 张怀胜,艾劲松,温华军,张玉铭,李鹏飞,杨涛,朱建强:石首麋鹿栖息地环境生态现状及保护
- 113 帅文卫,何菊,黄忠:天门市茶产业发展的气候适宜性分析和对策
- 116 贺程程,周霞,杨峰,周莉莉:江汉平原气候变化及其对农业生态的影响与对策

### 阅读

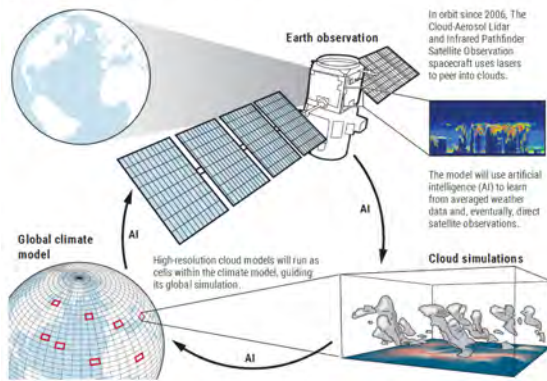
#### 书评

- 119 朱玉洁,郝伊一:《“三农”气象服务探索》评介
- 120 侯美亭:《生态气候学:概念与应用(第二版)》评介

## 图说 长江生态气象

- 32 陈伟亮:荆江航运气象灾害预报预警系统
- 34 梁益同,陈伟亮:气候变化对洪湖湿地的影响研究

A new data-driven climate model will use satellite observations and high-resolution simulations to learn how ice best to render its clouds. Similar methods will also be applied to other, small-scale phenomena, such as sea ice and ocean eddies.



### 用AI构造新的气候模式

美国加州理工大学的学者，将在谷歌前首席执行官和微软创始人等的支持下，启动一个5年计划，利用AI和卫星成像、高分辨率模拟等技术，设计一个全新的气候模式。新模式将借助AI带来一些改变，例如关键的初始场输入不是数据而是低云图像，而这些云图代表的区域内云的演变，更多基于高分辨率LES（大尺度涡旋模拟）的结果。

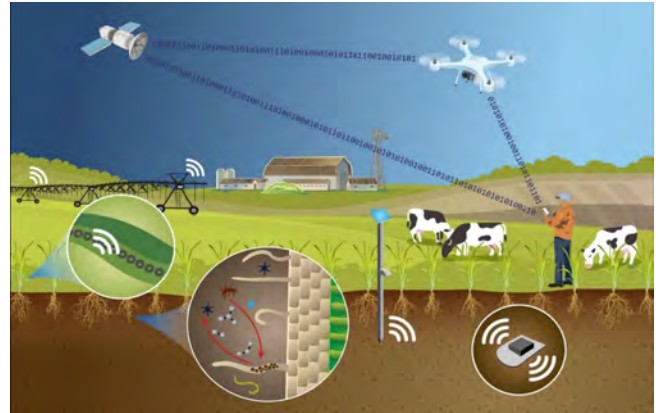
来源：Science



### 美国2017年灾害：16次损失超过10亿美元的灾害

NOAA最新出版的《数字NOAA》给出2017年美国16次损失超过10亿美元的天气气候灾害事件。据统计，1980—2017年美国损失超10亿美元的天气气候灾害总计超过219次，总损失超过1.5万亿美元。2017年和2011年目前并列成灾数最多年份。

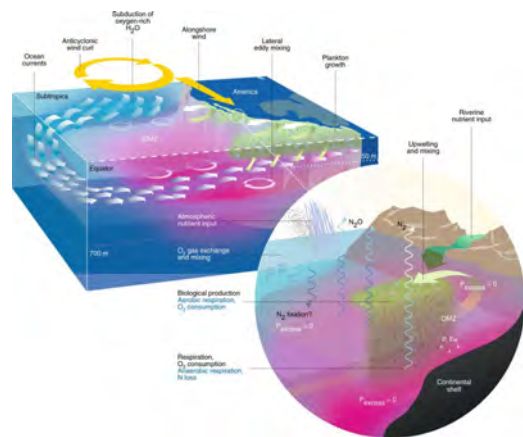
来源：NOAA



### 未来技术推动精准和智能农业监测

美国科学院（NAS）在最新的一份报告中，描述了未来针对土壤、作物、水和牲畜等的连续和实时监测体系，这样的体系利用微机电和生物降解传感器获得数据，通过分析和模拟来描述和预测农业生态系统。

来源：NAS



### 海洋温跃层是通风层？

德国学者在研究海洋脱氧的驱动和机制时发现，海洋温跃层或许起到了通风的作用。其中亚热带海洋表面的风压力在其中起到了推手作用。类似研究结果对于在海气耦合模式中，更加准确地把握大气环流与海洋物理化学和生物过程的互动起到推进作用。

来源：Nature Geoscience

数字

**20**年 在2017年召开的一次学术会议上，有学者认为大气河流（atmospheric rivers）的概念始于1990年代，然而英国学者指出，早在1973年就发表了针对低层湿急流的研究成果，从而将大气河流概念的出现提前了20年。

**13.2%** 美国和澳大利亚等国学者的最新研究表明，地球海洋目前仅有13.2%（约5500万km<sup>2</sup>）可以被称为荒原海洋（marine wilderness），其中被保护的面积仅占4.9%。

**160**位 在中国传媒大学高教传播与舆情监测研究中心首次发布的“2018年本科专业社会影响力排行榜”中，大气科学位列总计355个专业领域的第160位，在该领域，南京信息工程大学、兰州大学、南京大学、成都信息工程大学和云南大学等5所高校上榜。

## 国际“生态气象/生态气候”主题被引频次最高的前10篇论文



## 先睹为快：2019年WMO日历图

超过1000幅来自世界各地的图片参加WMO“太阳、地球和天气”主题2019年日历图竞赛，最终75幅图参加12幅2019年日历图的竞争。

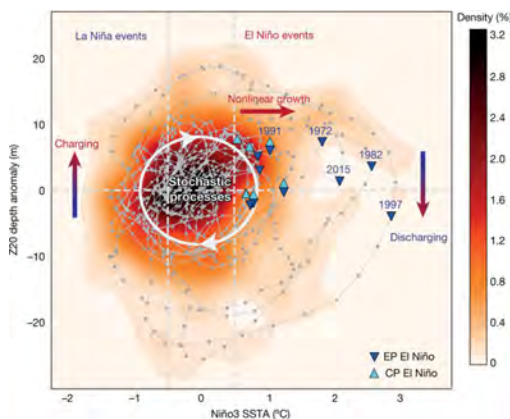
来源：WMO

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	Trophic levels are differentially sensitive to climate	Voigt, W	Ecology, 2003, 84(9)	193
2	Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystems	Jentsch, A	Comptes Rendus Geoscience, 2008, 340(9-10)	161
3	Integrating experimental and gradient methods in ecological climate change research	Dunne, JA	Ecology, 2004, 85(4)	143
4	A comparison of empirical and neural network approaches for estimating corn and soybean leaf area index from Landsat ETM+ imagery	Walthall, C	Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4)	103
5	Latitudinal gradients as natural laboratories to infer species' responses to temperature	De Frenne, P	Journal of Ecology, 2013, 101(3)	102
6	Climatic adaptation of trees: Rediscovering provenance tests	Matyas, C	Euphytica, 1996, 92(1-2)	92
7	The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): Overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols	Andreae, MO	Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(18)	50
8	Observational and modeling studies of the impacts of agriculture-related land use change on planetary boundary layer processes in the central US	Adegoke, JO	Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142(2-4)	49
9	Competitive exclusion along climate gradients: Energy efficiency influences the distribution of two salmonid fishes	Finstad, Anders G.	Global Change Biology, 2011, 17(4)	48
10	On the use of elevation, altitude, and height in the ecological and climatological literature	McVicar, TR	Oecologia, 2013, 171(2)	42

来源：SCI-E数据库

检索时间：2018年9月28日

侯美亭 提供



## 认识ENSO

包括中国学者在内的多国学者，在*Nature*杂志“热带”专栏中发表了以“ENSO复杂性”为题的评述文章，对这一最强的全球气候系统年际变化的时空复杂性及其对地球系统影响的科学认知进行了梳理。文章用图诠释了ENSO的时间复杂性。

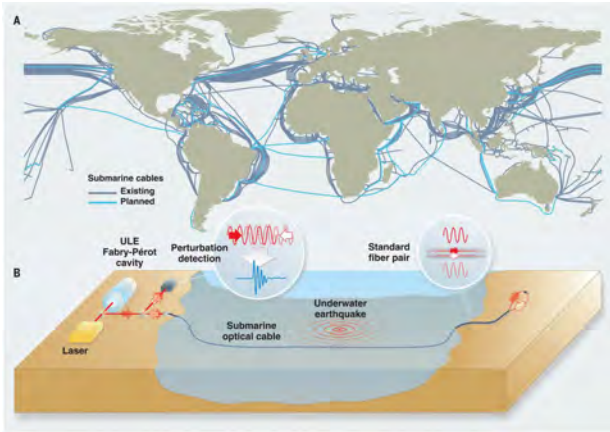
来源：Nature

**8.21**亿 全球饥饿人群数量逐年减少的趋势被翻转，从2016年的8.04亿增加到2017年的8.21亿，其中大部分是因气候变化使粮食减产导致，南美和非洲是增加的重灾区。

**3%** 美国学者在最新的一份报告中指出，最近5年中国的碳排放增速为3%或更小，尽管同期中国经济增长了40%。

**1236**个 第二次青藏高原综合科考初步结果表明，过去50年来青藏高原及其相邻地区冰川面积退缩了15%，高原多年冻土面积减少了16%；青藏高原大于1 km<sup>2</sup>的湖泊数量从1081个增加到1236个，湖泊面积从4万 km<sup>2</sup>增加到4.74万 km<sup>2</sup>。

**70%** 公元800—1000年前后玛雅文明的消失，一般被认为和一场持续干旱有关，英美学者利用气候替代资料的研究表明，该时期降水减少41%~54%，干旱峰值期降水减少达70%。



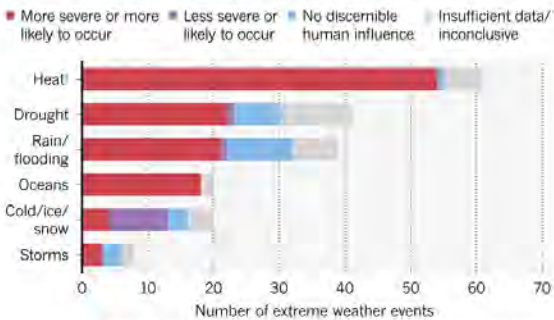
### 海底通信基础设施与地震探测网共建

海底光缆（A）是国际和大陆间通信的支撑设施，目前全球布设的海底光缆长度超过100万 km。利用这类通信基础设施开展地震监测（B）试验，被多国学者设计和实施。

来源：Science

### Attribution science

Researchers have published more than 170 studies<sup>1</sup> examining the role of human-induced climate change in 190 extreme weather events.



<sup>1</sup>Studies from 2004-18 collated by Nature and CarbonBrief. <sup>2</sup>Heat includes heatwaves and wildfires. Oceans includes studies on marine heat, coral bleaching and marine ecosystem disruption.

### 极端天气事件与气候变化的联系：“说法”将改变

以往提及极端天气增加趋势时，其与气候变化的联系常常被强调。然而具体到某一次事件与气候变化的关系，则难以说清楚。目前这种状况正在改变。对2004—2018年Nature等期刊上发表的相关论文统计表明，170项研究涉及了190起极端天气事件，研究结论支持极端天气事件与气候变化之间更加清晰的联系。

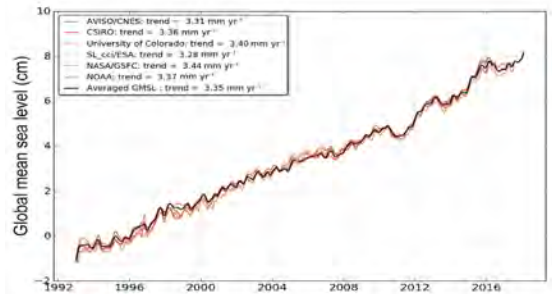
来源：Nature



### 卫星高度计数据接力：精准监测全球海平面

1993年以来，携带雷达高度计的卫星开始获得全球海平面高度数据，成为系统化和全球化监测海平面的唯一技术。卫星监测数据表明，1993年以来，海平面平均年上升大约3 mm，而针对这些记录的再分析表明，全球变暖已经导致海平面上升加速。

来源：ESA



### 全球海平面25年进程：升高8 cm

全球气候研究计划（WCRP）全球海平面收支研究组发表的最新报告中，给出了1993年以来全球海平面的变化。报告显示，25年来全球海平面在加速上升，平均每年上升了3.1 mm，25年累计升高了约8 cm。图中给出6个不同数据来源代表的过去25年全球海平面变化（图中剔除了年信号，给出相对于1993年数值的6个月滑动值）。

来源：WCRP

## 数字

**1000**↑

尼日利亚气象局计划用4年的时间在全国建设1000个气象站，这是该局局长在与WMO秘书长会晤时给出的目标，同时承认该国气象观测的有效覆盖需要大约9000个气象站才行。

**8%**

日前召开的第一届全球导航卫星系统（GNSS）遥感及其探测资源应用国际研讨会上，欧洲中期天气预报中心分析表明，如果全球NWP初始场数据有3%来自GNSS掩星探测，其对减少NWP误差贡献率可达到8%。

**200**英里

海洋加热大气的方式或许与海洋上小尺度海洋涡旋有关，为此美国伍兹霍尔海洋研究所将开展一项次中尺度海洋动力和垂直传输（Submesoscale Ocean Dynamics and Vertical Transport）调查，针对旧金山沿海200英里（1英里≈1.6千米）海洋利用飞机和船只开展观测。

榜单

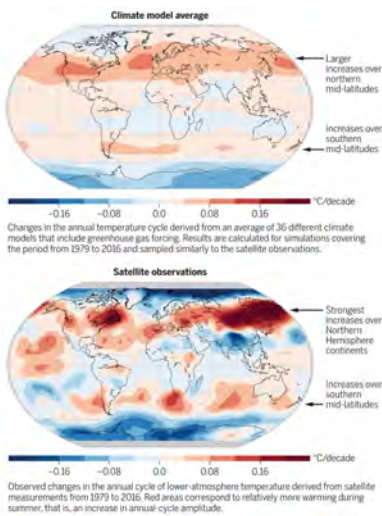
中国“生态气象/生态气候”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	红富士苹果品质与生态气象因子关系的研究	魏钦平	应用生态学报, 1999, (3)	133
2	论屋顶环境与屋顶绿化	林夏珍	浙江林学院学报, 1998, (1)	94
3	我国森林植被带的生态气候学分析	方精云	生态学报, 1991, (4)	83
4	果园生草对龙眼园微生态气候和光合作用的影响	刘殊	福建农业大学学报, 1996, (1)	80
5	应用农业气候相似距分析假高粱在我国的适生范围	蒋青	植物检疫, 1994, (5)	68
6	农业生态气候适宜度研究进展	罗怀良	中国农业资源与区划, 2004, (1)	66
7	玉米产量与生态气候因子的关系	马雅丽	中国农业气象, 2009, (4)	65
8	中国主要森林群落植物生活型谱的数量分类及空间分布格局的研究	郭泉水	生态学报, 1999, (4)	58
9	太白山树木年轮宽度资料对过去生态气候要素的重建	戴君虎	第四纪研究, 2003, (4)	54
9	河西走廊玉米生态气候分析与适生种植气候区划	薛生梁	中国农业气象, 2003, (2)	54

来源: CAJD数据库

检索时间: 2018年9月28日

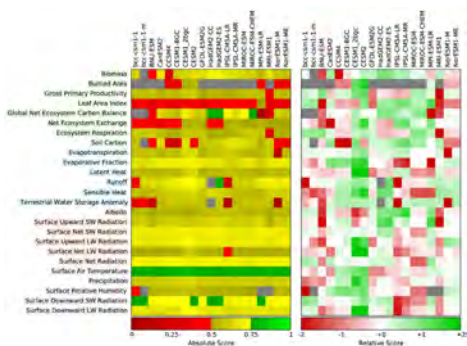
侯美亭 提供



人类活动“打扰”温度的季节循环

过去40年卫星数据和加入温室气体驱动的模拟结果, 均显示出南北半球中纬度地区大气低层温度循环发生的改变, 而当不考虑温室气体驱动时, 模拟给出的改变则不存在。

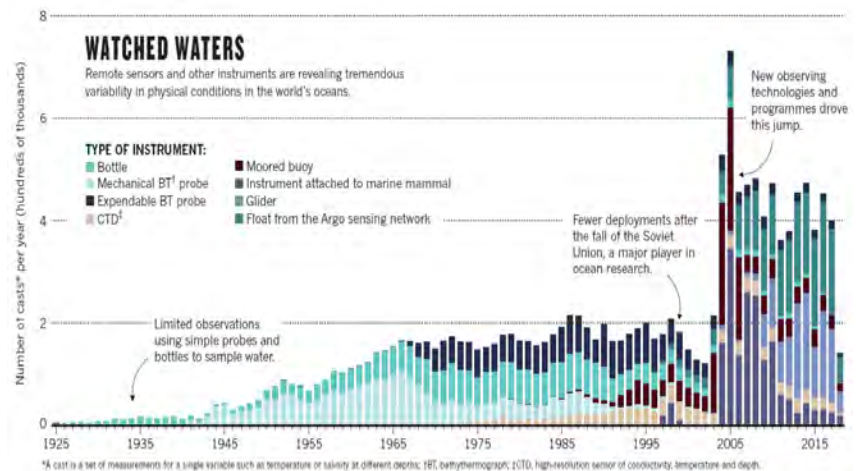
来源: Science



ILAMB系统校准陆地模式

地球系统模式复杂性的增加启发学者基于最优观测数据对模式进行严格对比来量化评估模式的精确度, 美国学者开发了支持ILAMB (International Land Model Benchmarking, 国际陆地模式基准) 的开源模式基准软件和世界上主流模式评估结果。

来源: Journal of Advances in Modeling Earth Systems



海洋数据的多样性大幅度提升

近一个世纪以来, 人类对海洋水体的观测, 无论是视角还是精细化程度, 都在大幅度提升, 这些观测对了解地球水圈及其与其他圈层的作用, 起到至关重要的作用。

来源: Nature

**90%** 德国2018年4—7月是自有温度记录以来最暖的4个月, 使得自2月开始的干旱持续蔓延, 到8月份德国全国90%国土受到干旱的影响。

**0.68%/2.1%** 美国学者的研究表明, 月平均温度每升高1°C, 美国和墨西哥的自杀率将分别升高0.68%和2.1%, 研究在数据中消除了贫困和拥有枪支等因子的影响。

**9%** 每年6—9月给印度带来降水的西南季风今年偏弱, 导致印度东北部地区降水减少了9%, 2017年季风降水整体偏少了5%。

**70%** WMO表示, 继2015—2016年厄尔尼诺发生后, 2018年年底前有70%的可能再次发生这一天气事件, 从而对全球天气造成影响。

# 我国气溶胶污染对农作物影响研究进展

赵俊芳<sup>1</sup> 姜月清<sup>2</sup> 詹鑫<sup>1,3</sup> 孔祥娜<sup>1,3</sup>

(1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2 国家气象中心, 北京 100081;

3 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 污染气体形成的大气气溶胶自工业革命以来有大幅度增加。在气溶胶污染日趋严重的背景下, 气溶胶对农业的影响受到科学界的密切关注。综合论述了我国大气气溶胶对作物影响的研究状况, 从气溶胶污染对农作物的可能影响出发, 综述了我国气溶胶污染对作物生长发育以及产量形成影响方面的研究成果; 并通过分析现状, 指出了存在的问题、有待改进的方面和研究发展的方向。

**关键词:** 气溶胶污染, 辐射效应, 农作物生长发育, 产量, 影响

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.001

## Advances in Research of Impacts of Aerosol Pollution on Crop in China

Zhao Junfang<sup>1</sup>, Jiang Yueqing<sup>2</sup>, Zhan Xin<sup>1,3</sup>, Kong Xiangna<sup>1,3</sup>

(1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Resources College, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

**Abstract:** Aerosol emissions formed by polluting gases are rapidly increasing since the industrial revolution. Consequently, haze and fog frequently occur and there are widespread concerns about the possible harmful effects of aerosol pollution on crop. This paper summaries a series of scientific achievements of the impacts of aerosol pollution on crop in China in recent decades, including mainly about the possible impact of aerosol pollution on crop, the impacts of aerosol pollution on crop growth and development and yield formation, and so on. Finally, based on the current researches, we point out the insufficiency at present studies and some areas which is needed to be improved, then put forward prospects of the researches in the future.

**Keywords:** aerosol pollution, radiation, crop growth and development, yield, effect

### 0 引言

全球气候变化及其影响是20世纪90年代以来最为引人注目的环境和科学问题之一<sup>[1]</sup>。近50多年来, 人为气溶胶含量显著增加, 截获更多的地表向外长波辐射, 而太阳辐射是地球表面能量交换的主要来源, 它为植物光合作用提供能量, 是影响陆地生态系统生产力、碳收支和水循环的重要因子。大气气溶胶是悬浮在大气中的固态和液态颗粒物的总称, 它通过改变太阳辐射平衡、云物理状况和生物地球化学循环过程影响全球气候<sup>[2]</sup>。因此, 大气气溶胶不仅在全球气候变化中起着重要作用, 也是区域大气灰霾污染的主要构成。由于大气系统是一个互相联系的整体, 不同种类

的空气污染物通过相互耦合的物化过程引起区域气候变化, 从而对作物的光合作用、呼吸作用造成不同程度的直接或间接影响。气溶胶的辐射效应不仅通过改变光合有效辐射的总量, 还通过改变光谱分布、光的质量以及在直接和散射成分之间的分配, 来影响作物的光合作用, 并最终影响作物产量。因此, 气候变化背景下气溶胶污染对农业生产的影响越来越受到科学家们的重视<sup>[2-4]</sup>。

近几十年来, 科学家们在大气气溶胶增加对农业的影响方面, 特别是我国气溶胶污染对作物生长发育以及产量形成影响等方面开展了大量的科学研究工作, 取得了一系列研究成果。本文拟从这些方面对研究成果进行综述, 以期为准评价气候变化对我国农业生产的影响、制订相应对策、采取适应措施等提供理论依据。

### 1 气溶胶污染及其产生的原因

气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒

收稿日期: 2017年11月15日; 修回日期: 2018年4月18日

第一作者: 赵俊芳(1977—), E-mail: zhaojf@cma.gov.cn

资助信息: 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金人才项目(2017R001); 国家重点研发计划项目(2017YFA0603004)

共同组成的多相体系（图1）。尽管气溶胶只是地球大气成分中含量很少的组分，但其对地圈、生物圈的影响与作用不可低估。气溶胶化学成分复杂，其颗粒物可以作为大气中反应表面或催化剂，以及很多气相物质的接收体。大气气溶胶负载的化学物质，特别是工业污染物在风系的作用下，可进行几百至几千千米的长距离传输。大气污染影响是不分国界和地区的，是全球性问题，其对人类生存环境的严重危害已日益加剧。大气输入物质对海洋的生物地球化学循环、大气环境、冰雪化学组成、海底沉积和气候演变等有着重要的影响。从全球变化角度看，大气污染物通过大气的大尺度传输，改变了全球大气化学物质的含量、结构和组成，破坏了全球的辐射平衡，进而可能对全球气候变化造成影响。

既散射又吸收，还有非均相反应

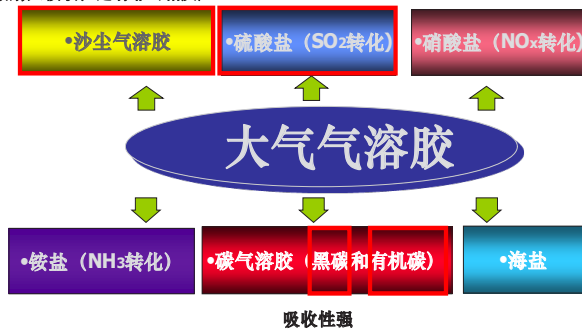


图1 大气气溶胶包含的六类七种粒子组分

Fig. 1 Seven types of six kinds of particle components included in atmospheric aerosols

气溶胶按污染成因可分为一次气溶胶（以微粒形式直接从发生源进入大气）和二次气溶胶（在大气中由一次污染物转化而生成）两种。它们可以来自被风扬起的细灰和微尘、海水溅沫蒸发而成的盐粒、火山爆发的散落物以及森林燃烧的烟尘等天然源，也可以来自化石和非化石燃料的燃烧、交通运输以及各种工业排放的烟尘等人为源。一般说来，半径小于1 μm的粒子，大都是由气体到微粒的成核、凝结、凝聚等过程所生成；而较大的粒子，则是由固体和液体的破裂等机械过程所形成。它们在结构上可以是均相的，也可以是多相的。已生成的气溶胶在大气中仍然有可能再参加大气的化学反应或物理过程。

## 2 我国气溶胶污染对作物生长发育及产量形成的影响

气溶胶污染对作物生长发育影响如图2所示。接下来从气溶胶辐射效应对作物光合有效辐射的影响、气溶胶污染引起的酸性沉降对作物的影响、气溶胶污染引起昼夜温差减小对作物产量的影响、气溶胶污染

导致的降水变化对作物产量的影响和沙尘气溶胶对作物产量的影响这五方面展开论述。

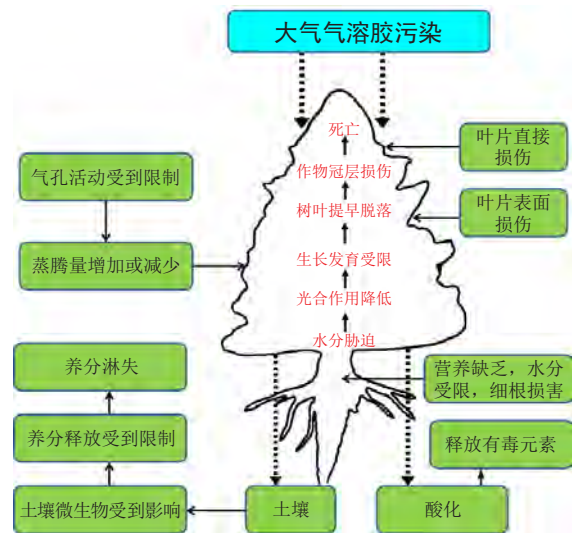


图2 气溶胶污染对作物生长发育的影响

Fig. 2 Effect of aerosol pollution on the growth and development of crop

### 2.1 气溶胶辐射效应对作物光合有效辐射的影响

太阳辐射是地球大气运动及作物生长的主要动力源泉。但伴随着气溶胶的增加，导致陆地区域云的覆盖度增加了5%~10%，这样就直接造成到达地表的太阳辐射呈现减少的趋势<sup>[5-11]</sup>。大气气溶胶一般通过改变作物进行光合作用的唯一能量来源——光合有效辐射（Photosynthetically Active Radiation, PAR）的数量和质量或主要气候要素影响作物的生长发育<sup>[9]</sup>，主要表现为太阳辐射受到近地面气溶胶的散射和吸收，造成作物获得的PAR减少，从而影响作物发育。Chameides等<sup>[10]</sup>基于CERES作物生长模式评估气溶胶对南京地区冬小麦和水稻产量的影响，以用于衡量气溶胶光学厚度（Aerosol Optical Depth, AOD）对总辐射的削弱结果，发现辐射的降低与产量的降低呈1:1的线性关系，最终造成冬小麦和水稻5%~30%的减产。王春乙等<sup>[12]</sup>对南京地区冬小麦和水稻的研究同样证实了气溶胶浓度与光合有效辐射之间负相关性，即气溶胶浓度增加导致生育期内的光合有效辐射减少，冬小麦比水稻的减少趋势更明显。气溶胶辐射效应也并非完全造成不利环境条件，基于全球第一生产力模型，Gu等<sup>[13]</sup>发现太阳辐射经气溶胶散射会对陆地生态系统生产力具有有利的影响，例如提高林冠有效光能的利用率，降低林冠光合作用饱和度。

### 2.2 气溶胶污染引起的酸性沉降对作物的影响

大气气溶胶通过干湿沉降可对农作物产生广泛而深刻的影响。一般认为，导致降水pH<5.6的酸性物质

主要是由人类排放的硫氧化物和氮氧化物引起。大气中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{NO}_3$ 颗粒物是重要的致酸物质。在大气中经过各种氧化反应生成了硫酸盐、硝酸盐气溶胶，这类气溶胶可经远距离迁移，通过干湿沉降抵达地面，导致大面积雨水、土壤、水体酸化；环境保护部联合多部委发布的2014年《中国环境状况公报》显示，在2014年开展降水监测的470个城市（区、县）中，有29.8%的城市出现了酸雨且主要分布在长江以南—青藏高原以东地区<sup>[14]</sup>，酸雨频率平均达17.4%，我国南方7省大豆因酸雨受灾面积约158.67万 $\text{hm}^2$ ，因酸雨减产约 $20 \times 10^7$  kg，减产幅度约6%，平均年经济损失约1400万元。影响了大面积陆生植被、粮食作物和水生生物的生长发育。

酸性沉降对农作物的危害，主要是通过对作物生长环境和生长活动造成破坏，从而产生直接和间接危害，影响作物产量。这种危害在环境上表现为对土壤性质和土壤微生物的影响，作物生长发育上表现为生理状况的破坏：酸性沉降能够改变作物生长所需的元素的吸收，如氮、磷、钾和硫元素，其中对钾元素的吸收影响最严重。酸雨同时也会导致土壤酸化。土壤中原有含铝氢氧化物，经土壤酸化后，形成作物可吸收的形态铝化合物，作物在生育期内吸收过量铝化合物易导致中毒甚至死亡。此外，酸性沉降还能加速土壤矿物质营养元素的流失，改变土壤结构，导致土壤贫瘠化。降低土壤中氨化细菌和固氮细菌的数量，造成土壤细菌个体变小，生长繁殖速度降低，使土壤微生物的氨化作用和硝化作用能力下降<sup>[15]</sup>，影响营养元素的良性循环，造成农业减产。

对作物生理状况的影响也尤为显著。酸雨作用于作物叶片，严重时会使保卫细胞的功能丧失，作物对于气体的交换过程失去控制，最终导致蒸发和蒸腾作用失调，使作物更易受到有害气体的伤害，降低对干旱环境的抵御能力<sup>[16]</sup>，同时破坏作物的叶绿体，削弱其光合作用强度，减少作物产量。

### 2.3 气溶胶污染引起昼夜温差减小对作物产量的影响

气温及其日较差是影响作物生长发育的重要气候因子之一，对农业生产具有十分重要的意义。气溶胶对气温的作用具有双重效应：一方面由于气溶胶光散射和吸收减少了白天直接到达地表的入射光，导致气温降低；另一方面，被气溶胶颗粒物散射的太阳辐射一部分以长波辐射形式被返还到周围大气之中，从而又起到了增温的作用，降低了昼夜的气温日较差<sup>[17]</sup>。Stenchikov等<sup>[18]</sup>运用气候模式发现在没有水汽影响条

件下，气溶胶依旧能够使气温日较差呈现下降趋势。其中由 $\text{SO}_2$ 排放所形成的气溶胶对气温日较差影响十分显著<sup>[19]</sup>。

气温日较差的减小在理论上不利于作物的干物质积累，但因作物和区域特殊性的缘由，气温日较差变化对作物产量影响模拟试验结果各异<sup>[20-23]</sup>。Xiao等<sup>[24]</sup>通过对华北地区冬小麦产量结果进行模拟分析，结果表明减小的昼夜温差是该地区冬小麦产量在天气因素驱动下降低的主要因素，而姜丽霞等<sup>[25]</sup>在对黑龙江省气温日较差与作物产量的时空变化特征分析中发现春夏季的气温日较差较小，对作物增产有利。

### 2.4 气溶胶污染导致的降水变化对作物产量的影响

气溶胶污染还会对影响作物产量的重要气候因素——降水量造成影响<sup>[26-28]</sup>。一方面气溶胶可起到凝结核的作用，同时对太阳辐射进行吸收和反射，对云层微物理特性和宏观云量产生影响，从而改变大气中的水循环<sup>[29-30]</sup>。段婧等<sup>[31]</sup>分析了华北地区人为气溶胶污染对区域降水的可能影响，结果表明由于人为气溶胶参与对流活动，影响到了对流云的降水效率，气溶胶污染的确导致局地降水量减少。特别在干旱、半干旱区的春夏季节，这一因素可能对作物产量造成更强烈的负效应。另外，黑碳气溶胶辐射强迫对于降水的影响更为显著。总体上我国在黑碳气溶胶的影响下，冬季和夏季降水量都有明显的减少，分别为20 mm和100 mm，冬季降水量减幅远小于夏季<sup>[32]</sup>。具体而言，黑碳气溶胶对我国降水的影响因地区而异，我国南部的降水量会有所增加；因气流下降，我国北部则出现干旱。极端的南涝北旱不仅影响着南北地区农作物生育状况与病虫害，也影响着我国的农业格局<sup>[33]</sup>。

### 2.5 沙尘气溶胶对作物产量的影响

沙尘气溶胶，即矿物沙尘（Mineral Dust），是对流层气溶胶的主要成分之一。据估计，全球每年进入大气的沙尘气溶胶大约占了对流层中气溶胶总量的一半<sup>[34-35]</sup>。沙尘气溶胶光学厚度大，分布范围广，对红外辐射表现出较高的吸收率，能够通过直接辐射效应吸收和散射太阳辐射以及地面长波辐射从而影响地球辐射收支和能量平衡<sup>[36]</sup>。

沙尘暴是沙尘气溶胶的极端体现，发生时影响范围广，对农作物危害强烈。强劲的气流携带沙砾，通过机械掩埋、风力打击、阻挡光线、大气污染的形式，严重威胁农作物生长发育，同时半干旱地区疏松浅薄的土壤表层极易被风力侵蚀掉，降低农业环境质量，扩大土壤沙化范围。研究显示在我国长江流域，由于植物叶面沙尘气溶胶的积聚，导致35%的光合有

效辐射量被减少<sup>[37]</sup>, 减少了作物的光合作用, 从而抑制了作物正常的生长<sup>[38-40]</sup>。

沙尘气溶胶对于农业生产也有一定有利的作用, 能够远距离搬运沙尘源区地表土壤中的有机质和微量元素, 为沙尘沉降地农作物生长提供有利的种植条件<sup>[41]</sup>。同时沙尘气溶胶中的土壤粒子还能对酸雨起到碱化中和的促进作用。Wang等<sup>[42]</sup>通过区域沙尘输送模式结合算与数值, 发现由于沙尘的中和作用, 中国北方地区降水的pH值增加0.8~2.5。

### 3 存在问题与研究展望

大气气溶胶含量增加对农业影响的研究成果, 对准确评价我国气候变化对农业生产的可能影响及其发展趋势、制订适应与减缓气候变化不良影响的对策与措施起到了重要作用。气溶胶污染种类繁多, 形成原因多样, 过程复杂, 影响范围也十分广泛。近年来, 由于大气气溶胶浓度的增加, 气溶胶污染日趋严重, 但因目前认知的局限, 关于气溶胶污染对我国农业影响评估方法和结果方面还存在很大的不确定性和许多亟待解决的问题, 尚需进一步深入研究。

1) 区域尺度上针对气溶胶污染对我国农业生产影响的系统研究有待进一步加强。区域尺度上气溶胶污染对我国农业生产影响的研究是从站点向全球尺度扩展的重要环节, 也是当前气候变化对农业生产影响研究中最不充分的部分, 特别是如何定量揭示气候变化背景下气溶胶污染对我国农作物生长发育及产量形成的影响机理, 仍需要进行大量的基础研究。此外, 目前对于大气气溶胶污染物在大气非均相化学反应中的作用机制, 污染物的空间、季节分布规律与来源仍缺乏深入的了解<sup>[43]</sup>, 这些必要的基础性研究对进一步完善区域大气污染对农业生产影响的研究具有重要意义。

2) 农作物对气溶胶污染的动态响应研究薄弱。我国农作物类型复杂多样, 各类型作物虽然受气溶胶污染影响的机理过程具有相似性, 但各种过程的反应速度、调节因子、作物生理过程的变化等均存在较大的差异。此外, 影响气溶胶污染物分布的因子很多, 涉及大气、自然环境、人类活动等许多方面, 且各个因子之间的关系比较复杂。因此, 关于农作物对气溶胶污染的动态响应研究有待进一步加强。

3) 气溶胶污染监测预警方法技术上需进一步提高和完善。由于当前大气污染物主要地面监测站分布集中在大中城市, 数量少, 监测手段和精度也各不相同, 不能满足大面积、多种类的大气污染监测。结合卫星遥感监测手段与地面监测站互为补充将成为未来

大气污染监测预警的重要方式, 以达到高效、快速、动态、大尺度反演区域大气污染, 节约经济和人力成本的目的。目前已有国内外学者开始运用卫星遥感、雷达等现代化手段对大气污染进行监测, 但对气溶胶污染的类型、光学厚度的估算等仍存在诸多不足之处<sup>[44]</sup>。因此, 准确监测预测气溶胶污染物的动态变化趋势和幅度仍是当前气溶胶污染对农作物影响研究中面临的重要问题。

4) 气溶胶污染对农业生产影响的评估指标体系有待构建。这样一个指标体系是建立在上述对气溶胶污染内外成因和各方面特性综合掌握的基础上, 较准确地量化不同类型气溶胶污染对于农业生产的具体影响, 并为决策部门处理不同类型和等级的污染提供科学依据。

### 参考文献

- [1] IPCC. Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Field C B, Barros V R, Dokken D J, et al(Eds). United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Vijayakumar K, Safai P D, Devara P C S, et al. Effects of agriculture crop residue burning on aerosol properties and long-range transport over northern India: A study using satellite data and model simulations. *Atmospheric Research*, 2016, 178-179: 155-163.
- [3] Lu X L, Chen M, Liu Y L, et al. Enhanced water use efficiency in global terrestrial ecosystems under increasing aerosol loadings. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 237: 39-49.
- [4] Roderick M L, Farquhar G D. Geoengineering: Hazy, cool and well fed? *Nature Climate Change*, 2012, 2: 76-77.
- [5] 王民俊, 韩永翔, 邓祖琴, 等. 全球主要沙源区沙尘气溶胶与太阳辐射的关系. *中国环境科学*, 2012, 32(4): 577-583.
- [6] 邓祖琴, 韩永翔, 白虎志, 等. 中国北方沙漠戈壁区沙尘气溶胶与太阳辐射的关系. *中国环境科学*, 2011, 31(11): 1761-1767.
- [7] 沈新勇, 黄伟, 陈明诚, 等. 人为气溶胶的直接辐射效应及其对南亚冬季风的影响. *气候与环境研究*, 2014, 19(4): 393-406.
- [8] Dilip G, Racsh P J, Wang H L, et al. Climate response of the South Asian monsoon system to anthropogenic aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D13209.
- [9] Bergin M. The influence of aerosols on plant growth. Honolulu: Georgia Institute of Technology, 2002.
- [10] Chameides W L, Yu H, Liu S C, et al. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls. *PNAS*, 1999, 96(24): 13626-13633.
- [11] Eck T F, Holben B N, Dubovik O, et al. Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D06202.
- [12] 王春乙, 白月明. 臭氧和气溶胶浓度变化对农作物的影响研究. 北京: 气象出版社, 2009.
- [13] Gu L H, Dennis B, Shashi B V, et al. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107: ACL 2-1-ACL 2-23.
- [14] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境状况公报. 北京, 2014.
- [15] 俞元春, 丁爱芳. 模拟酸雨对酸性土壤铝溶出及其形态转化的影响. *土壤与环境*, 2001, 10(2): 87-90.
- [16] 金腊华. 广州地区酸雨特征及其对植物的影响研究. *城市环境与城市生态*, 2002, 11(15): 11-13.
- [17] 汪凯, 叶红, 唐立娜, 等. 气温日较差研究进展: 变化趋势及其影响因素. *气候变化研究进展*, 2010, 6(6): 417-423.

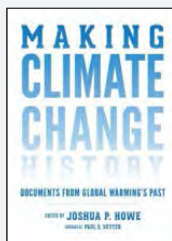
- [18] Stenchikov G L, Robock A. Diurnal asymmetry of climatic response to increased CO<sub>2</sub> and aerosols: forcings and feedbacks. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D12): 26211-26227.
- [19] Makowski K, Wild M, Ohmura A. Diurnal temperature range over Europe between 1950 and 2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8: 6483-6498.
- [20] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(27): 9971-9975.
- [21] Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I, Asner G P, et al. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 2005, 94(2): 250-256.
- [22] Kanno K, Makino A. Increased grain yield and biomass allocation in rice under cool night temperature. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56(3): 412-417.
- [23] Chen C Q, Lei C X, Deng A X, et al. Will higher minimum temperatures increase crop production in Northeast China? An analysis of historical data over 1965-2008. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1580-1588.
- [24] Xiao D P, Tao F L. Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52: 112-122.
- [25] 姜丽霞, 吕佳佳, 王晾晾, 等. 黑龙江省气温日较差的变化趋势及其与作物产量的关系. *中国农业气象*, 2013(2): 179-185.
- [26] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 1989, 245(4923): 1227-1230.
- [27] King M D. Radiative properties of clouds. In: Hobbs P V, ed. *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*. San Diego, Calif: Academic Press, 1993. 123-149.
- [28] Ferek R J, Hegg D A, Hobbs P V, et al. Measurements of ship-induced tracks in clouds off the Washington coast. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D18): 23199-23206.
- [29] 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展. *大气科学*, 2003, 27(4): 628-652.
- [30] 毛节泰, 李成才. 气溶胶辐射特性的观测研究. *气象学报*, 2005, 63(5): 621-635.
- [31] 段靖, 毛节泰. 华北地区气溶胶对区域降水的影响. *科学通报*, 2008, 53(23): 2947-2955.
- [32] 李建云, 张杰, 田密. 中国地区黑碳气溶胶直接辐射效应的数值模拟研究. *气象与减灾研究*. 2009(1): 17-24.
- [33] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, Luo Y F. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [34] 郝丽, 杨文, 吴统文, 等. 沙尘气溶胶的光学特性及辐射强迫效应. *中国沙漠*, 2010, 30(6): 1477-1482.
- [35] 盛阳, 杨胜利, 韩永翔, 等. 格尔木地区沙尘气溶胶硝酸盐含量及来源. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 792-797.
- [36] 宿兴涛, 王宏, 许丽人, 等. 沙尘气溶胶直接气候效应对东亚冬季风影响的模拟研究. *大气科学*, 2016, 40(3): 551-562.
- [37] Bergin M H, Greenwald R, Xu J, et al. Influence of aerosol dry deposition on photosynthetically active radiation available to plants: A case study in the Yangtze delta region of China. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(18): 3605-3608.
- [38] Sharifi M R, Gibson A C, Rundel P W. Surface dust impacts on gas exchange in Mojave Desert shrubs. *Journal of Applied Ecology*, 1997, 34(4): 837-846.
- [39] 翟薇, 赵艳霞, 王春乙, 等. 大气气溶胶变化对农业影响的研究进展. *气象科技*, 2006, 34(6): 705-710.
- [40] 王宏伟, 曹琼辉, 黄峰, 等. 尘污染对植物的生理和生态特性影响. *广西植物*, 2009, 9(5): 621-626.
- [41] 张万儒, 杨光滢. 强沙尘暴降尘对北京土壤的影响. *林业科学研究*, 2005, 18(1): 66-69.
- [42] Wang Z, Akimoto H, Uno I. Neutralization of soil aerosol and its impact on the distribution of soil aerosol and its impact on the distribution of acid rain over East Asia: observations and model results. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D19): 4389-4395.
- [43] 王峰威, 李红, 柴发合, 等. 大气气溶胶酸度的研究进展. *环境污染与防治*, 2010, (01): 67-72.
- [44] 胡子梅. 基于卫星遥感和地面监测数据的上海市气溶胶污染研究. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 2014.

## 新书架

### NEW BOOK

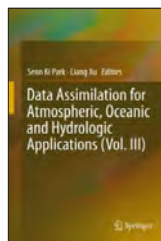
编辑: 张萌

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



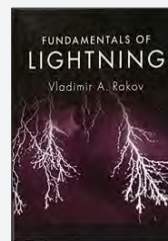
Making Climate Change History: Documents from Global Warming's Past  
《描绘气候变化历史: 全球变暖的历史档案》

编著者: Joshua P. Howe 等  
出版者: University of Washington Press  
出版年: 2017



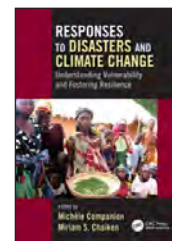
Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. III)  
《大气、海洋和水文应用中的资料同化(卷三)》

编著者: Seon Ki Park 等  
出版者: Springer  
出版年: 2017



Fundamentals of Lightning  
《雷电基本原理》

编著者: Vladimir A. Rakov  
出版者: Cambridge  
出版年: 2016



Responses to Disasters and Climate Change: Understanding Vulnerability and Fostering Resilience

《应对灾害和气候变化: 了解脆弱性和建立恢复力》

编著者: Michele Companion 等  
出版者: CRC Press  
出版年: 2016

# 近76年我国洪涝灾损度变化特征分析

姜灵峰

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 根据《中国统计年鉴(2017)》《中国水旱灾害公报(2016)》和民政部年度《社会服务发展统计公报》、以及气象部门统计历年降雨量等资料,对1950年以来我国的洪涝灾损度特征进行了综合分析。结果表明,我国因洪涝造成的农业受灾和成灾面积、房屋倒塌、人口死亡、直接经济损失等灾损度均呈下降趋势,尤其进入21世纪以来的下降幅度较大,但年际和年代际全国降雨量呈波动性变化,并无明显增减趋势。由此,可以说明尊重自然规律、科学治理和防御洪涝灾害取得了成效。

**关键词:** 洪涝灾害, 灾损度, 灾害防御

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.002

## Analysis on the Characteristics of Flood Disaster Damage in China in Recent 76 Years

Jiang Lingfeng

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

**Abstract:** According to the China Statistical Yearbook (2017), China Flood and Drought Disaster Report(2016), National Ministry of Civil Affairs Annual Social Service Development Statistical Report and meteorological department statistics on rainfall over the years, this paper analyzed the characteristics of flood damage in China since 1950a. The results show that the flood damage and the area of disasters, house collapse, population death, and direct economic losses in China had a decreasing trend, especially in 21th century, while there was no significant increase or decrease of precipitation in China. Thus, it illustrates that China had achieved significant results in last 76 years based upon respect for natural laws and scientific governance to against floods disasters.

**Keywords:** flood disaster, disaster damage degree, disaster prevention

### 0 引言

我国是世界上洪涝灾害多发频发的国家之一,从南到北每年都会发生损失程度不同的洪涝灾害,最严重的年份南北洪涝灾害大范围同时发生,洪涝灾害不仅造成重大经济损失和人员伤亡,而且对整个经济社会发展构成严重威胁。因此,治理和防御洪涝灾害一直被列为我国经济社会发展的一项基础性工程。我国治理和防御洪涝灾害的效果如何,不仅需要分析灾害损失绝对量是否有增减,还应研究灾害损失相对量的变化。即使灾损绝对量可能有增加,但相对量也可能大幅下降,也能反映灾害防御效益,即开展洪涝灾损度研究具有一定现实意义。

近些年来,许多研究者对我国洪涝灾害变化规律开展了比较客观的分析研究,取得了较多研究成果。如李茂松等<sup>[1]</sup>对中国近50年洪涝灾害灾情分析,认为

洪涝灾害发展具有面积增大和危害加重的趋势。王金红等<sup>[2]</sup>认为1990年以来,年度洪涝灾害的强度呈现波动性降低的趋势,未来可能出现年度洪涝灾害强度高值区由南向北的转移情况。邱海军<sup>[3]</sup>利用1950—2010年的受灾面积灾情数据,分析了洪涝灾情发展趋势,得出未来一段时间洪涝灾害受灾面积会呈现逐步增加的趋势。张葆蔚等<sup>[4]</sup>分析2000年以来的主要洪涝灾情统计数据,认为从洪涝灾害整体趋势上判断,受灾面积、受灾人口、死亡人口、倒塌房屋、直接经济损失占GDP比重等主要灾害指标将呈现波动性降低的趋势。刘会玉等<sup>[5]</sup>认为我国洪涝灾害成灾面积同样存在着3年左右、7~9年和17年的主要周期。以上研究均从不同角度分析了我国洪涝灾情变化趋势和规律。但是,洪涝灾情程度变化比较复杂,客观分析洪涝灾情程度变化规律,既应研究因洪涝造成某项承灾因子灾损量变化与某项承灾因子总量的变化关系,又应分析造成洪涝灾害致灾降水因子的变化趋势,还需综合分析洪涝孕灾环境的变化,从而比较客观地分析洪涝灾

收稿日期: 2018年3月25日; 修回日期: 2018年7月19日  
作者: 姜灵峰(1983—), Email: jianglf\_email@aliyun.com

损变化特征, 以及认识致灾降水因子变化和社会防御洪涝灾害的成效。

基于以上考虑, 本文提出了洪涝灾损度的概念, 洪涝灾损度是指因洪涝灾害造成某项承灾因子的灾损量与某项承灾因子总量的比值关系<sup>①</sup>。如假定致灾降水、洪涝孕灾环境和洪涝灾害防御措施等因子不变, 洪涝灾损度越大, 则洪涝灾情就越重; 反之, 洪涝灾损度越小, 则洪涝灾情就越轻。洪涝灾损度是一个相对量, 对其进行年代际比较和长时间尺度趋势分析, 既具有可比性, 又可比较客观地分析洪涝灾情变化原因, 并由此提出更有针对性的治理和防御措施。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

1950—2016年全国因洪涝造成的受灾面积、成灾面积、房屋倒塌、直接经济损失、洪涝死亡人数, 以及相应时间的农业种植总面积、农村人均居住面积、国内生产总值(GDP)、全国总人口等资料, 分别来源于《中国统计年鉴(2017)》《中国水旱灾害公报(2016)》和民政部年度《社会服务发展统计公报》, 其中GDP以2013年不变价计算至2016年, 资料起始时间均以此为据。部分数据起始年, 以公布的正式统计开始年为准。1961—2016年降水量资料, 来源于中国气象局国家气候中心整编数据。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 常规统计分析方法

分析20世纪50年代以来我国洪涝灾损度变化趋势, 用到回归分析法、相关系数分析法、距平分析法和综合统计分析方法。

#### 1.2.2 洪涝灾损度计算方法

1) 年际洪涝灾损度计算公式为

$$Z_j = R_j / \Sigma R_j \quad (1)$$

式中,  $Z_j$ 为第 $j$ 年洪涝灾损度,  $R_j$ 为第 $j$ 年某项承灾因子因洪涝造成的损失量,  $\Sigma R_j$ 为第 $j$ 年某项承灾因子的总量,  $j$ 为自然年(1950, 1951, ..., 2016)。

2) 年代际洪涝灾损度计算公式为

$$Z_{Ij} = (0.1 \cdot \Sigma R_{Ij}) / R_{\Sigma Ij} \quad (2)$$

式中,  $Z_{Ij}$ 为第 $I$ 年代洪涝灾损度,  $R_{Ij}$ 为第 $I$ 年代第 $j$ 年某项承灾因子因洪涝造成的损失量,  $R_{\Sigma Ij}$ 为第 $I$ 年代第 $j$ 年某项承灾因子的总量,  $I$ 为年代(20世纪50年代, 20世纪60年代, ..., 21世纪10年代)。

① 灾损度与传统灾度概念, 联系在于都属研究灾损程度的概念, 区别在于前者根据灾损相对量划分等级, 后者则依据灾损绝对量划分量级。目前, 我国各类自然灾害等级划分均以绝对量为标准。

### 1.2.3 灾损度等级划分

计算洪涝灾损度( $Z$ )范围时, 一般取平均值等距为中度, 中度向上则洪涝灾损度程度增加, 中度向下则洪涝灾损度程度降低。为此本文根据 $Z$ 的范围, 将灾损度划分为轻、较轻、中度、较重、重大、特重六个等级。等级之间 $Z$ 的绝对值相等, 使等级划分具有客观性和可比性。

本文中降水量与平均比差, 系指当年降水量与气候平均值之比减1的差值, 正值为偏多, 负值为偏少。

## 2 结果分析

### 2.1 年际洪涝灾损度趋势

#### 2.1.1 洪涝受灾和成灾面积灾损度分析

洪涝受灾、成灾面积灾损度, 系指受灾、成灾面积与种植总面积之比,  $Z$ 为百分比(%)。根据以上洪涝灾损度计算公式可得出表1, 从表1分析, 1950—2016年全国洪涝受灾面积灾损度 $Z < 5.5$ 有27年次, 即洪涝轻灾、较轻灾年次占40.3%, 其中从1965—1976年连续12年次的 $Z$ 低于5.5;  $Z > 9.5$ 有13年次, 即洪涝重大灾、特重灾年次占19.4%, 其中20世纪90年代就达6年次。洪涝受灾面积灾损度主要呈波动变化, 并无明显增加趋势(图1)。

表1 1950—2016年全国洪涝受灾面积灾损度  
Table 1 Disaster loss index of affected areas caused by flooding in China for 1950—2016

统计量	灾损度					
	轻	较轻	中度	较重	重大	特重
$Z$ /%	<3.5	3.5~5.5	5.5~7.5	7.5~9.5	9.5~11.5	>11.5
年次	13	14	19	8	8	5
占比/%	19.4	20.9	28.4	11.9	11.9	7.5

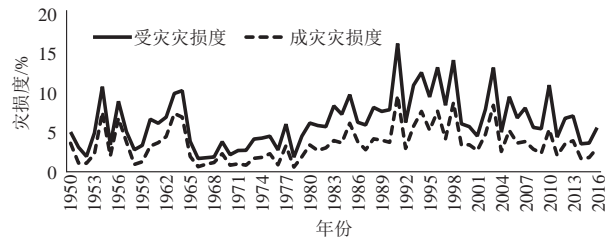


图1 1950—2016年全国洪涝受灾、成灾面积灾损度变化趋势  
Fig. 1 Variation and trends of disaster loss index of affected areas caused by flooding in China during the period from 1950 to 2016

根据洪涝灾损度计算公式得出表2, 从表2分析, 1950—2016年全国洪涝成灾面积灾损度 $Z < 3.5$ 有37年次, 即洪涝成灾轻灾、较轻灾年次占55.2%, 其中从

1965—1982年连续18年次 $Z$ 低于3.5;  $Z > 6.5$ 有9年次, 即洪涝成灾重大灾、特重灾年次占13.4%, 其中20世纪90年代达4年次, 其分布并无明显周期性。洪涝成灾面积灾损度 $Z$ 也主要呈波动变化, 但进入21世纪则呈明显下降趋势(图2)。

表2 1950—2016年全国洪涝成灾面积灾损度  
Table 2 Disaster loss index of injured areas caused by flooding in China for 1950—2016

统计量	成灾灾损度					
	轻	较轻	中度	较重	重大	特重
Z/%	<1.5	1.5~3.5	3.5~4.5	4.5~6.5	6.5~8.5	>8.5
年次	12	25	14	7	6	3
占比/%	17.9	37.3	20.9	10.4	9.0	4.5

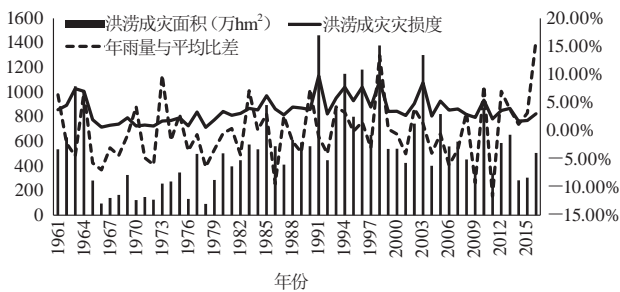


图2 1961—2016年全国洪涝成灾面积及灾损度变化趋势  
Fig. 2 Variation of injured areas and its disaster loss index caused by flooding, relative anomalies of annual precipitation in China during the period from 1961 to 2016

根据图2分析, 1961—2016年, 以1991年洪涝灾害成灾面积最多为界线, 前30年呈逐渐增加, 后20年呈逐渐降低趋势。从理论上讲, 洪涝受灾和成灾面积应当与年降水总量相关, 一般讲降水量多的年份洪涝受灾和成灾面积会较多, 降水量少的年份洪涝受灾和成灾面积会相对较小。但根据对1961—2016年的数据分析, 降水量的多少与洪涝受灾和成灾面积多少并不是一种简单线性相关关系, 经过相关性统计分析, 当受灾面积和成灾面积分别超过总种植面积的9%、5%时, 其年降水量与平均比差为正值概率均为8/12 (66.7%), 这说明受灾、成灾面积达到一定量级, 就与降水量偏多相关; 当受灾面积<4%时, 年降水量与平均比差为负值的概率均为9/12 (75%), 当成灾面积<2%时, 年降水量与平均比差为负值的概率均为10/14 (71%)。这就足以说明降水量偏多或偏少, 与洪涝受灾和成灾面积偏多或偏少相关。但是, 当4%<受灾面积<9%, 以及2%<成灾面积<5%时, 其相关性则不明显。这也说明影响洪涝受灾、成灾面积多

少还有其他因素, 诸如降水季节、时段、区域分布, 以及防御能力的变化等因素。

### 2.1.2 洪涝倒塌房屋灾损度分析

洪涝倒塌房屋灾损度, 系指洪涝倒塌房屋间数与农村人均居住面积乘农村人口总数所得积之比<sup>①</sup>,  $Z$ 为间数与万平方之比。根据以上洪涝灾损度计算公式可得出表3, 从表3分析, 1978—2016年全国洪涝倒塌房屋灾损度 $Z < 0.8$ 共有23年次, 即农村每万平方米倒塌房屋小于0.8间, 属于洪涝倒塌房屋轻灾、较轻灾的年次占59%, 其中2000—2016年间有15年次;  $Z > 2.0$ 有6年次, 属洪涝倒塌房屋重大、特重灾的年次占15.4%, 21世纪以来没有发生 $Z > 2.0$ 的年次。

表3 1978—2016年全国洪涝倒塌房屋灾损度  
Table 3 Disaster loss index of collapsed houses caused by flooding in China for 1978—2016

统计量	灾损度					
	轻	较轻	中度	较重	重大	特重
Z/%	<0.2	0.2~0.8	0.8~1.4	1.4~2.0	2.0~2.6	>2.6
年次	4	19	8	2	2	4
占比/%	10.3	48.7	20.5	5.1	5.1	10.3

1978—2016年, 全国洪涝倒塌房屋灾损度(图3)呈现波动下降趋势, 1982年 $Z$ 最高达到3.98, 即农村每万平方米倒塌房屋3.98间, 2015年最小值仅为0.06, 即农村每万平方米倒塌房屋0.06间, 2004—2016年, 除个别年份外, 整体呈逐年下降趋势。洪涝倒塌房屋灾损度与全国年均降水总量相关性不明显。

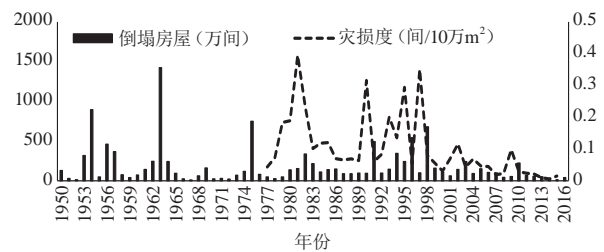


图3 1950—2016年全国洪涝倒塌房屋及灾损度变化趋势  
Fig. 3 Variation and trends of average collapsed houses per  $10^4 \text{m}^2$  and its disaster loss index caused by flooding in China during the period from 1950 to 2016

### 2.1.3 洪涝造成死亡灾损度分析

洪涝人口死亡灾损度, 系指洪涝造成人口死亡数与全国总人口数量之比,  $Z$ 为每10万人口洪涝灾害死亡人数。根据洪涝灾损度计算公式, 可得出表4, 从表4分析, 1950—2016年洪涝死亡灾损度 $Z < 0.6$ 的年次达55年, 即洪涝灾害人口死亡率小于 $0.6/10^5$ 的轻灾

① 因洪涝倒塌房屋主要在农村, 从理论讲农村房屋总面积越多, 洪涝倒塌房屋概率越高, 本文取农村每万平方米洪涝倒塌房屋间数为洪涝倒塌房屋灾损度。

和较轻灾年占82.1%，其中2008年以来，除个别年份外， $Z$ 均 $<0.1$ ； $Z>1.6$ 的有4年次，即洪涝灾害人口死亡率大于 $1.6/10^5$ 的重大、特重灾年次占6.0%，其中最高的1954年 $Z$ 达到7.04，次高的1975年为3.21。

表4 1950—2016年全国洪涝灾害人口死亡灾损度  
Table 4 Disaster loss index of mortalities caused by flooding in China for 1950–2016

统计量	灾损度					
	轻	较轻	中度	较重	重大	特重
Z/%	<0.1	0.1~0.6	0.6~1.1	1.1~1.6	1.6~2.0	>2.0
年次	10	45	7	1	2	2
占比/%	14.9	67.2	10.4	1.5	3.0	3.0

1950—2016年，全国洪涝灾害人口死亡灾损度（图4）呈明显下降趋势，其中最高的1954年 $Z$ 达到7.04，次高的1975年为3.21，2008年以来，除个别年份外， $Z$ 均小于0.1，2015年最低， $Z$ 仅为0.02，即因洪涝灾害的人口死亡为千万分之二。根据统计，洪涝灾害造成的死亡人口变化与年降水总量变化相关性不明显。

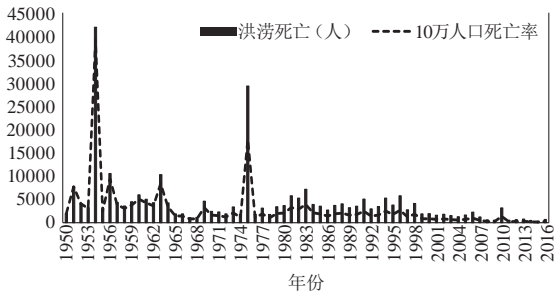


图4 1950—2016年全国洪涝灾害死亡人口及灾损度趋势  
Fig. 4 Variation and trends of mortalities and its disaster loss index caused by flooding in China during the period from 1950 to 2016

### 2.1.4 洪涝直接经济损失灾损度分析

洪涝直接经济损失灾损度，系指洪涝灾害造成直接经济损失量与全国GDP之比。根据以上洪涝灾损度计算公式可得出表5，从表5分析，1990—2016年洪涝直接经济灾损度 $Z<1.0$ 的有18年次，即洪涝灾害直接经济损失小于1.0%的轻灾和较轻灾年占66.6%，其发生年次均在1999年以后； $Z>1.8$ 的年次有6年次，即洪涝灾害直接经济损失大于1.8%的重大、特重灾年份占

表5 1990—2016年洪涝直接经济损失灾损度  
Table 5 Disaster loss index of direct economic losses caused by flooding for 1990–2016

统计量	灾损度					
	轻	较轻	中度	较重	重大	特重
Z/%	<0.6	0.6~1.0	1.0~1.4	1.4~1.8	1.8~2.2	>2.2
年次	12	6	1	2	1	5
占比/%	44.4	22.2	3.7	7.4	3.7	18.5

22.2%，6年次均发生在20世纪90年代。

1990—2016年全国洪涝灾害直接经济损失度（图5）呈明显下降趋势，其中最高的1994年 $Z$ 达到3.7，即洪涝灾害造成直接经济损失占当年GDP的比重高达3.7%；进入21世纪以来， $Z$ 均 $<1.0$ ，其中2015年最低， $Z$ 仅为0.02，即洪涝灾害造成直接经济损失仅占GDP的0.02%。

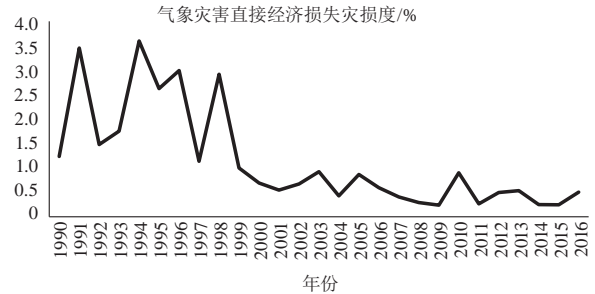


图5 1990—2016年洪涝直接经济损失灾损度趋势  
Fig. 5 Variation and trends of disaster loss index of direct economic losses caused by flooding during the period from 1990 to 2016

洪涝灾害造成的直接经济损失呈增加趋势（图6），也与全国年均降水呈中低度正相关， $R$ （相关系数）为0.22，即降水偏多10%的年份，洪涝灾害直接经济损失明显偏多；涝灾直接经济损失灾损度与GDP增长呈负相关，即GDP增幅越大洪涝灾害直接经济损失灾损度越小，洪涝灾害直接经济损失灾损度与所占GDP成反比， $R$ 值为-0.6。

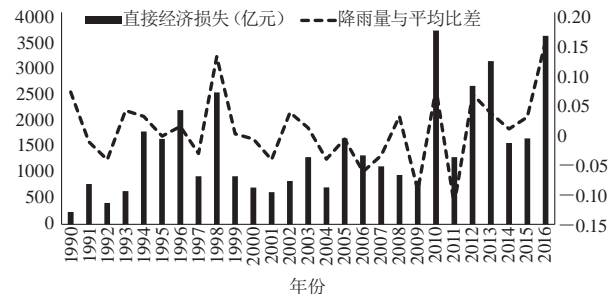


图6 洪涝灾害直接经济损失变化及年降水量与平均比差变化趋势

Fig. 6 Variation and trends of direct economic losses caused by the floods, relative anomalies

## 2.2 年代际洪涝灾损度趋势

### 2.2.1 年代际洪涝受灾和成灾面积灾损度分析

根据式（2），可以得出表6，从表6分析，1950—2016年，年代际洪涝灾损度呈波动性变化。20世纪70年代，受灾和成灾灾损度均为最低值， $Z$ 分别为3.6、1.5，即在70年代洪涝灾害造成的受灾和成灾面积只占种植总面积的3.6%、1.5%；90年代受灾和成灾灾损度

表6 年代际洪涝受灾和成灾面积灾损度变化

Table 6 Interdecadal variations of disaster loss index for affected areas and injured areas caused by the floods

年代	受灾年均灾损度	成灾年均灾损度	降水量距平
1950—1959	5.0%	3.1%	
1960—1969	5.4%	3.3%	-1.6%
1970—1979	3.6%	1.5%	-1.0%
1980—1989	7.2%	3.8%	-0.7%
1990—1999	10.6%	6.0%	2.2%
2000—2009	7.3%	4.0%	-1.9%
2010—2016	6.1%	3.1%	3.9%

均为最高值，Z分别为7.2、3.8，即在90年代洪涝灾害造成的受灾和成灾面积占种植总面积的7.2%、3.8%。21世纪以来，年际洪涝面积灾损度有明显下降趋势。

从年代际计算结果和变化趋势分析，洪涝受灾和成灾的灾损度，从20世纪50年代到80年代有逐渐增加趋势，到90年代达到最高，进入21世纪呈逐渐下降趋势，其中成灾面积灾损度回落到20世纪五六十年代水平，但从全国年降水量分析，21世纪初降水量总体偏多，这进一步说明除年总降水外，洪涝成灾面积灾损度的高低还受到其他因素影响。

### 2.2.2 年代际洪涝倒塌房屋灾损度分析

根据年代际洪涝灾损度计算公式，可以得出表7，从表7分析，1950—2016年，年代际洪涝灾害造成的房屋倒塌绝对数在20世纪90年代前呈波动上升，到90年代达到最大，房屋倒塌年均达到293.2万间。进入21世纪则呈大幅下降，至2010—2016年房屋倒塌年均仅70.3万间，不到最高时的1/4。从年际灾损度分析，下降趋势特别明显，至2010—2016年间Z仅为0.3，即农村每万平方米居住面积年均房屋倒塌仅为0.3间。

表7 年代际洪涝倒塌房屋灾损度

Table 7 Interdecadal variations of collapsed houses caused by flooding in China during the period from 1950 to 2016

年代	洪涝年均倒塌房屋/(万间)	年均灾损度/(间/万 $m^2$ )
1950—1959	240.5	
1960—1969	251.1	
1970—1979	123.4	
1980—1989	154.2	1.6
1990—1999	293.2	1.7
2000—2009	112.3	0.5
2010—2016	70.3	0.3

### 2.2.3 年代际洪涝人口死亡灾损度分析

根据年代际洪涝灾损度计算公式，可以得出表8，从表8分析，1950—2016年，年代际洪涝灾害造成的人口死亡无论是绝对量，还是灾损度均呈大幅下降，从绝对量分析，20世纪50年代最高时达到每年平均死

亡8571人，到21世纪初降至年均死亡954人；从灾损度分析，洪涝造成的人口死亡下降趋势则更为明显，即在总人口量不断增加，洪涝强度趋势变化不明显的情况下，洪涝造成的人口死亡大幅下降，到21世纪初Z降至0.07，即每10万人口洪涝灾害死亡0.07人，相当于每千万人口死亡7人，仅为20世纪50年代的1/20。

表8 洪涝灾害人口死亡年代际灾损度趋势

Table 8 Interdecadal variations of mortalities caused by the floods

年代	10万人口气象灾害死亡率	年均死亡(人)
1950—1959	1.41	8571
1960—1969	0.58	4091
1970—1979	0.56	5181
1980—1989	0.42	4349
1990—1999	0.33	3909
2000—2009	0.11	1452
2010—2016	0.07	954

### 2.2.4 年代际洪涝直接经济损失灾损度分析

根据年代际洪涝灾损度计算公式，可以得出表9，从表9分析，1990—2016年，洪涝直接经济损失灾损度呈明显下降，20世纪90年代Z最高达年均达到2.3，即洪涝直接经济损失占年均GDP的2.3%，到21世纪初Z降至0.5，即洪涝直接经济损失仅占年均GDP的0.5%，但由于GDP总量的增加，洪涝直接经济损失的绝对总量仍呈增加趋势。

表9 年代际洪涝直接经济损失灾损度

Table 9 Interdecadal variations of direct economic losses caused by flooding in China during the period from 1990 to 2016

年代	年均直接经济损失/亿元	年均灾损度/%
1990—1999	1214.2	2.3
2000—2009	1010.6	0.6
2010—2016	2536.5	0.5

## 3 结论

1) 1950—2016年，全国洪涝灾损度总体均呈下降趋势，且进入21世纪下降趋势更为明显。其中到21世纪初，洪涝成灾、倒塌房屋、人口死亡、直接经济损失灾损度较20世纪90年代分别下降100%、500%、400%、460%，充分说明了我国尊重自然规律，科学治理与防御洪涝灾害取得了显著成就。

2) 自20世纪60年代向公众发布气象预报以后，我国洪涝灾害造成的死亡人口，60年代较50年代就减少了50%，但这一比例直至90年代再没有出现新低。进入21世纪自2005年全国向公众传播气象灾害预警，各级政府根据洪涝灾害预警及时组织人员转移安置后，因洪涝灾害造成的人口死亡则出现大幅下降。根

据统计从2006—2016年,因各种自然灾害,各级政府根据应急预案,主动组织紧急转移人口年均达到1231万人次,这成为有效减少和避免洪涝灾害造成人口死亡的重要举措,关键在于预警等非工程性措施发挥了主要作用。

3) 21世纪16年来,洪涝灾害农业成灾面积逐步下降,在此时段并非全国年代际降水量减少,其主要原因在于极大地改善了洪涝灾害承灾体:一则因水稻种植面积减少,根据统计21世纪近10年水稻种植面积较20世纪90年代年平均少种植200万  $\text{hm}^2$ ;二则除涝面积增加207.8万  $\text{hm}^2$ 。

4) 洪涝灾害造成的直接经济损失总量,与年降水量呈低弱正相关,与GDP总量增长呈较强正相关,更与水产经济发展高度相关,根据农业部年度渔业经济报告统计,21世纪初水产年均直接经济损失为20世纪90年代的5倍。但可预计随着我国GDP总量增长趋稳,洪涝灾害造成的直接经济损失总量也会逐步趋稳

或下降。

5) 我国气候年际降水量并无明显增减趋势,但年际波动比较明显,在可比较的56年中有2年次偏多超过10%,基本为30年一遇,未来波动性洪涝灾害仍不可避免。因此,治理和防御洪涝灾害必须尊重自然规律,既须给洪水出路,又须为洪水让路,还须用好洪水之利;既要继续改善洪涝灾害承灾体,又要更加注重发挥非工程性措施作用。

#### 参考文献

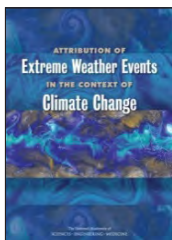
- [1] 李茂松,李森,李育慧. 中国近年洪涝灾害灾情分析. 中国农业气象, 2004, 25(1): 38-41.
- [2] 万金红,张葆蔚,刘建刚,等. 1950—2013年我国洪涝灾情时空特征分析. 灾害学, 2016, 31(2): 63-68.
- [3] 邱海军. 1950—2010年中国洪涝灾情的频率规模关系. 自然灾害学报, 2013, 22(4): 114-118.
- [4] 张葆蔚,万金红. 2003—2012年我国洪涝灾情评估与成因分析. 中国水利, 2013(11): 35-37.
- [5] 刘会玉,林振山,张明阳. 建国以来中国洪涝灾害成灾面积变化的小波分析. 地理科学, 2005, 25(1): 43-48.

## 新书架

### NEW BOOK

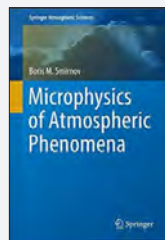
编辑: 张萌

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change  
《气候变化背景下极端天气事件的归因》

编著者: The National Academies of Science Engineering Medicine  
出版者: The National Academies Press  
出版年: 2016



Microphysics of Atmospheric Phenomena  
《大气现象的微物理学》

编著者: Boris M. Smirnov  
出版者: Springer  
出版年: 2016



《气象现代化评估方法与实践》

编著者: 朱玉洁, 唐伟, 王喆  
出版者: 气象出版社  
出版年: 2017



《地面综合观测业务软件常见问题解答手册》

编著者: 中国气象局气象探测中心  
出版者: 气象出版社  
出版年: 2017

# 一次强雷电天气特征分析

李国梁<sup>1</sup> 李俊<sup>2</sup> 李享<sup>1</sup>

(1 湖北省防雷中心, 武汉 430074; 2 湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430074)

**摘要:** 研究旨在探讨雷电发生前各探测资料的变化特征, 以为雷电的预报提供指标。利用湖北闪电定位资料、多普勒天气雷达以及气象卫星的观测资料, 从环流背景、系统形成机理、雷达反射率、回波顶高、垂直液态水含量和云图特征等方面, 对湖北2014年8月30—31日的一次强雷雨天气过程进行分析。分析表明, 在中尺度对流云团的影响下产生雷雨天气, 雷雨天气过程发生时间及区域与雷达回波强反射率、高云顶高度区域的位置相吻合。当区域回波强度大部分达到40 dBz, 最大达到45 dBz, 回波顶高大部分在9 km 以上, 最大达到17 km, K指数 $\geq 36$ 和垂直液态水含量大部分在6 kg/m<sup>2</sup>以上, 最大达到20 kg/m<sup>2</sup>时, 对强对流天气的雷电预报有明确的指示作用。

**关键词:** 雷电天气, 特征分析

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.003

## Analysis of Characteristics of Lightning

Li Guoliang<sup>1</sup>, Li Jun<sup>2</sup>, Li Xiang<sup>1</sup>

(1 Hubei Lightning Protection Center, Wuhan 430074 2 Hubei Meteorological Information and Technical Support Center, Wuhan 430074)

**Abstract:** This research aimed to improve the detection of lightning before it occurs in order to provide an improved prediction method for lightning. Using observation data from a lightning locator, Doppler weather radar and meteorological satellite data from the Hubei area, this paper analyzed a strong Hubei thunderstorm and weather processes from August 30th to 31st, 2014. The study considered the circulation background, system mechanisms, radar reflectivity, high echo top, vertically integrated liquid and characteristics of cloud maps. Our analysis showed that under the influence of a mesoscale convective cloud system, time and area of the lightning corresponded to the area of the radar with intense echo reflectivity and high cloud tops. When the regional echo intensity was 40 dBz, maximum of 45 dBz, echo top was above 9 km, maximum up to 17 km, K index was not below 36 and most of the vertically integrated liquid was more than 6 kg/m<sup>2</sup>, with the largest range of up to 20 kg/m<sup>2</sup>, thunder and lightning weather were forecast.

**Keywords:** weather of the thunder, characteristics analysis

## 0 引言

雷电灾害给国家安全和人民生命造成重大威胁, 研究雷电发生的环境条件, 为雷电预报提供参考依据, 具有重要的现实意义。目前, 国内外专家学者对雷电的预报进行了许多研究分析, Xu<sup>[1]</sup>在研究用于雷电预报的雷达回波后得出, 回波强度40 dBz的部分达到-10℃高度, 且回波顶高超过9 km, 云体很快发生闪电; Liu等<sup>[2]</sup>在研究热带和亚热带多个雷暴形成时的雷达回波发现, 单体回波中40 dBz以上回波的顶高必须高于7 km; 王洪霞等<sup>[3]</sup>指出, 负地闪出现在40 dBz的回波发展区域内, 而正地闪出现在强度为30 dBz左右的风暴后部。由于雷电的发生除了与天气系统有

较大关联外, 还存在较大的地域差异<sup>[4-5]</sup>。本文通过对2014年8月30—31日湖北省强雷电天气特征进行分析, 旨在为建立湖北雷电的预报方法提供基础和指标, 为雷电预警预报提供参考依据。

## 1 闪电实况统计

2014年8月30—31日, 湖北省总闪电次数36747次, 其中正闪1742次, 负闪35005次, 而武汉、荆门、随州、孝感总闪电次数25137次(其中, 正闪1228次, 负闪23909次, 闪电强度 $\geq 100$  kA的有2279次, 强度在50~100 kA的有9948次), 占全省总闪电次数的73.2%。30日20时—31日11时全省总闪电次数30628次, 平均2041.9次/h。资料来源于湖北省二维闪电定位资料, 从湖北省2014年8月30—31日闪电活动分布图(图1)可知, 这次强雷电过程, 闪电频次大、位置和时间非常集中, 闪电主要发生在武汉北部和荆门北部、随州南部、孝感北部区域, 从湖北省

收稿日期: 2017年7月3日; 修回日期: 2018年5月28日  
 第一作者: 李国梁(1963—), E-mail: guoliang\_li@163.com  
 通信作者: 李俊(1988—), E-mail: glamourray@qq.com  
 资助信息: 湖北省雷电灾害防御科研专项(FY-Z-201402)

2014年8月30—31日各小时闪电次数图(图2)可知,时间主要集中在30日20时—31日11时期间,且电流强度大。闪电频数和强度远大于有闪电资料以来同期历史平均值<sup>[6-8]</sup>。在闪电发生时段全省伴有大范围降水,强降水主要区域和时间与闪电发生区域和时间基本一致。

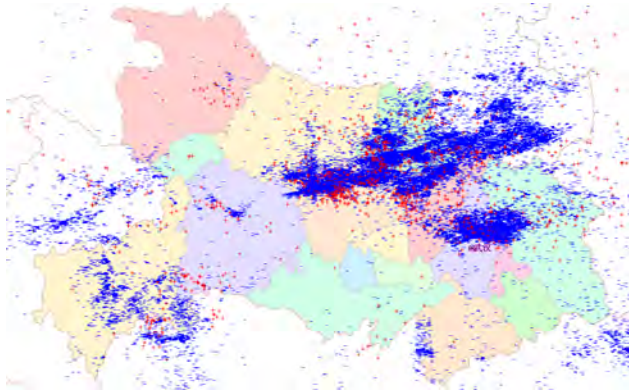


图1 湖北省8月30—31日闪电活动分布图

Fig. 1 Lightning activity distribution in Hubei Province on August 30 and 31

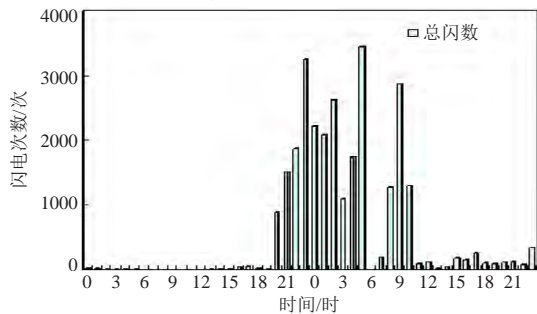


图2 湖北省8月30—31日各小时闪电次数图

Fig. 2 Lightning frequency in Hubei Province on August 30 and 31

## 2 大气环境特征分析

8月30—31日,500 hPa欧亚大陆中高纬维持两槽两脊形势,贝加尔湖附近有稳定西南—东北向长波槽,从贝湖槽底部不断有短波槽分裂东移南下,副热带高压呈东西带状稳定控制了30°N以南地区,588 dagpm西脊点在105°E以西地区;850 hPa有西南涡沿着江淮切变线东移;从卫星云图(图3)可知,中尺度系统在低槽云系底部前沿开始发展东移,并逐渐增强,冷云罩面积增大,云顶亮温下降,几个中尺度云团合并发展,在鄂中上空形成椭圆形的MCC;从武汉探空站的 $T-lnp$ 得知,鄂中 $K$ 指数维持在36~40℃,对流有效位能(CAPE)维持在2200~2500 J/kg(图4)。

强大的副热带高压给长江中下游提供了必要的热力和水汽条件,短波槽引导冷空气与副高外围暖湿气流在长江中下游地区交汇,干冷和暖湿气流在长江中

下游剧烈碰撞,850 hPa有西南涡沿着江淮切变线东移,为这次强对流雷电天气过程提供环流条件。中尺度系统出现在低槽底部与副热带高压外围、干冷和暖湿气流剧烈交汇的地方,有利于强对流天气的形成。 $K$ 指数和对流有效位能指标表明,鄂中地区具有强的不稳定能量累积,为本次强天气的发生创造了充足的不稳定条件。中低层风垂直切变存在并增强,加上中层的西南暖湿气流,容易使上升气流发生倾斜,有利于对流形成的降水脱离出上升气流,而不至于因拖带作用减弱上升浮力<sup>[9-13]</sup>,而且风的垂直切变可增加中层干冷空气的吸入,加强风暴中的下沉气流和冷空气的外流,通过强迫抬升使流入的暖湿空气更强烈上升,对流的加强更容易产生雷电。

## 3 雷达产品分析

由于雷暴云内的起电与其中的微物理过程息息相关,可以使用天气雷达观测云中粒子的形态特征,确定雷暴云的位置、移动方向及传播速度<sup>[14-16]</sup>。为了寻找雷达资料与闪电发生的关系,将闪电发生的时间和地点与雷达产品进行匹配分析,根据雷达资料变化情况,将8月30日19:30和19:42,8月31日02时、05时、08时、11时雷达产品演变图进行分析。

### 3.1 雷达反射率因子的分析

通过对雷达回波强度的大小,强回波中心,强回波区的产生、发展以及移动的方向和速度进行分析,可以做出对强对流单体的预报和追踪。图5是湖北省雷达组合反射率演变图,红色区域属于强回波区域,往往是雷暴云的中心<sup>[17-18]</sup>,从图5可以看到,8月30日19:30在荆门和随州西北方向出现两个较强回波区域,回波强度在40 dBz以上,荆门局部达到45 dBz以上(荆门初次闪电时间为19:55),之后强回波逐渐向东南方向移动,强回波区域有所增大,19:42随州局部达到45 dBz以上(随州初次闪电时间为20:01),8月31日02时,强回波区域继续向东南方向移动,到当日05时,强回波区域移动到京山、安陆、大悟一线,并形成连成一体的强回波区域,同时远安北部有强回波形成,到当日08时强回波到达孝感、黄陂、新洲一线,远安北部强回波逐渐南移到远安南部,到11时强回波减弱消失,仅有秭归有强回波生成。根据闪电发生时间和回波强度的相关性统计分析,在雷暴发生前,该区域回波强度大部分在40 dBz以上,且最大回波强度 $\geq 45$  dBz,从图5也可看出,强回波所在区域,降水量增大,闪电次数明显增加。

### 3.2 回波顶高的分析

回波顶高是在 $\geq 18$  dBz反射率因子被探测到时,

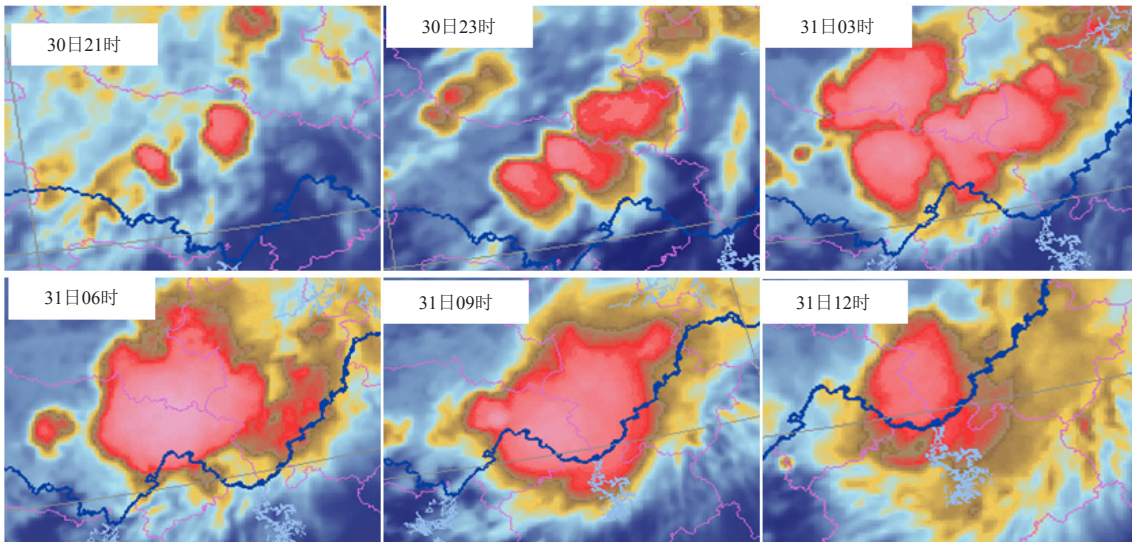


图3 8月30日21时—31日12时中尺度系统活动演变图  
Fig. 3 Activities for mesoscale system diagram from 09 pm, August 30, to 12 pm, August 31

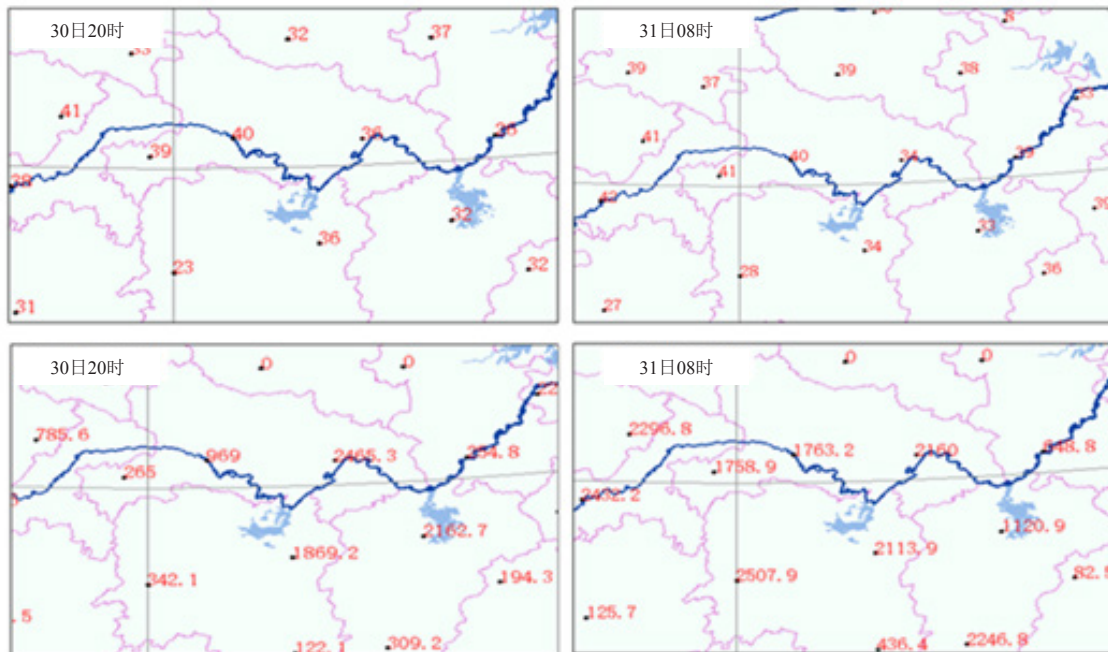


图4 8月30日20时、31日08时K指数和对流有效位能图  
Fig. 4 K index and convection effective potential energy at 08 pm, August 30, and 08 am, August 31

以最高仰角为基础的回波顶高度<sup>[19]</sup>。一般回波顶高上升越高，代表对流发展越为旺盛。图6为湖北省8月30—31日回波顶高演变图，红色区域即为对流发展最旺盛的区域。8月30日19:30在十堰和随州、远安等地回波顶高大于9 km，局部达到17 km以上，并逐渐向东南方向移动，回波顶高逐渐上升，区域有所扩大，并到达随州和荆门西北部，8月31日02时，回波顶高高值区域继续向东南方向移动，到05时，回波顶高高值区域移动到京山、安陆、大悟，并形成连成一体的

大区域，同时远安北部回波顶高上升，08时回波顶高高值区域到达麻城、黄陂、新洲一线，巴东、远安北部回波顶高上升，11时回波顶高下降，秭归回波顶高上升。对比图5中高反射率区域发现，对流发展旺盛区域与回波顶高高值区域相吻合，一般都是雷暴云的中心区域，且回波顶高区域中心的移动与回波强度区域中心移动相吻合。从图6中可以看出，在雷暴发生前，其周围雷暴云的回波顶高大部分在9 km以上，最大回波顶高达到17 km。

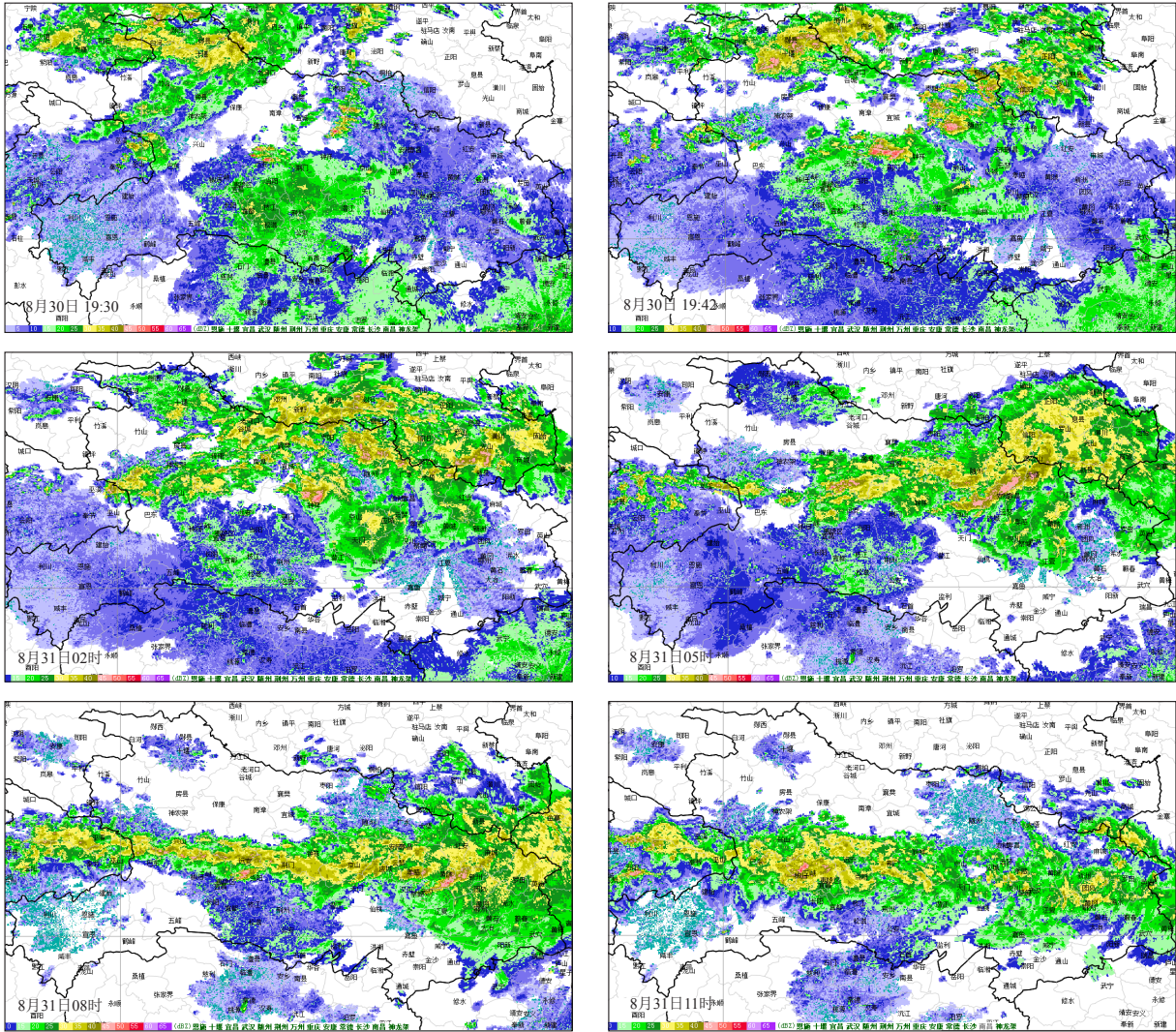


图5 8月30日19:30和19:42, 31日02时、05时、08时、11时雷达回波 (dBZ)

Fig. 5 Radar echo (dBZ) at 7:30 pm and 7:42 pm, August 30, and 02, 05, 08, 11 am, August 31

### 3.3 垂直液态水含量分析

关于云内起电机制的假说有很多,但无一例外地都要求云中必须有充足的水汽,云中含水量对云内电荷的分离和累积的贡献是不可忽视的,也是闪电发生的一个重要条件<sup>[20]</sup>。

图7中的粉红色区域属于液态水含量较高的区域,8月30日19:30在十堰和随州、远安等地液态水含量大于 $6 \text{ kg/m}^2$ ,局部达到 $20 \text{ kg/m}^2$ ,并逐渐向东南方向移动,液态水含量逐渐上升,区域有所扩大,并到达随州和荆门西北部,8月31日02时,高液态水含量区域继续向东南方向移动,到05时,高液态水含量区域移动到京山、安陆、大悟,并形成连成一体的大片区域,同时远安北部液态水含量上升,08时高液态水含量区域到达孝感、黄陂、新洲一线,巴东、远安北部液态水含量上升,11时液态水含量下降,秭归液态

水含量上升。正好与闪电降水区域相吻合,从图7中可以看出在雷暴发生前,区域的液态水含量大部分在 $6 \text{ kg/m}^2$ 以上,最大液态水含量达到 $20 \text{ kg/m}^2$ 。

### 4 结论

1) 贝湖槽冷空气与长江中下游暖湿气流交汇,同时中低层风速增强,垂直风切变增强,加之低层有西南涡沿着江淮切变线东移,为这次强雷电天气的发生准备了充足的不稳定条件。

2) 中尺度系统首先在低槽云系底部前沿开始发展,随着低槽云系东移,中尺度系统发展增强,几个中尺度云团合并发展,冷云罩面积增大,云顶亮温下降,为这次强雷电天气发生提供了中尺度环境。

3) 通过常规天气资料能够了解大尺度环境背景与层结的稳定;卫星资料在时间和范围上有提前量和广域性,有助于宏观地了解中尺度系统的基本情况;

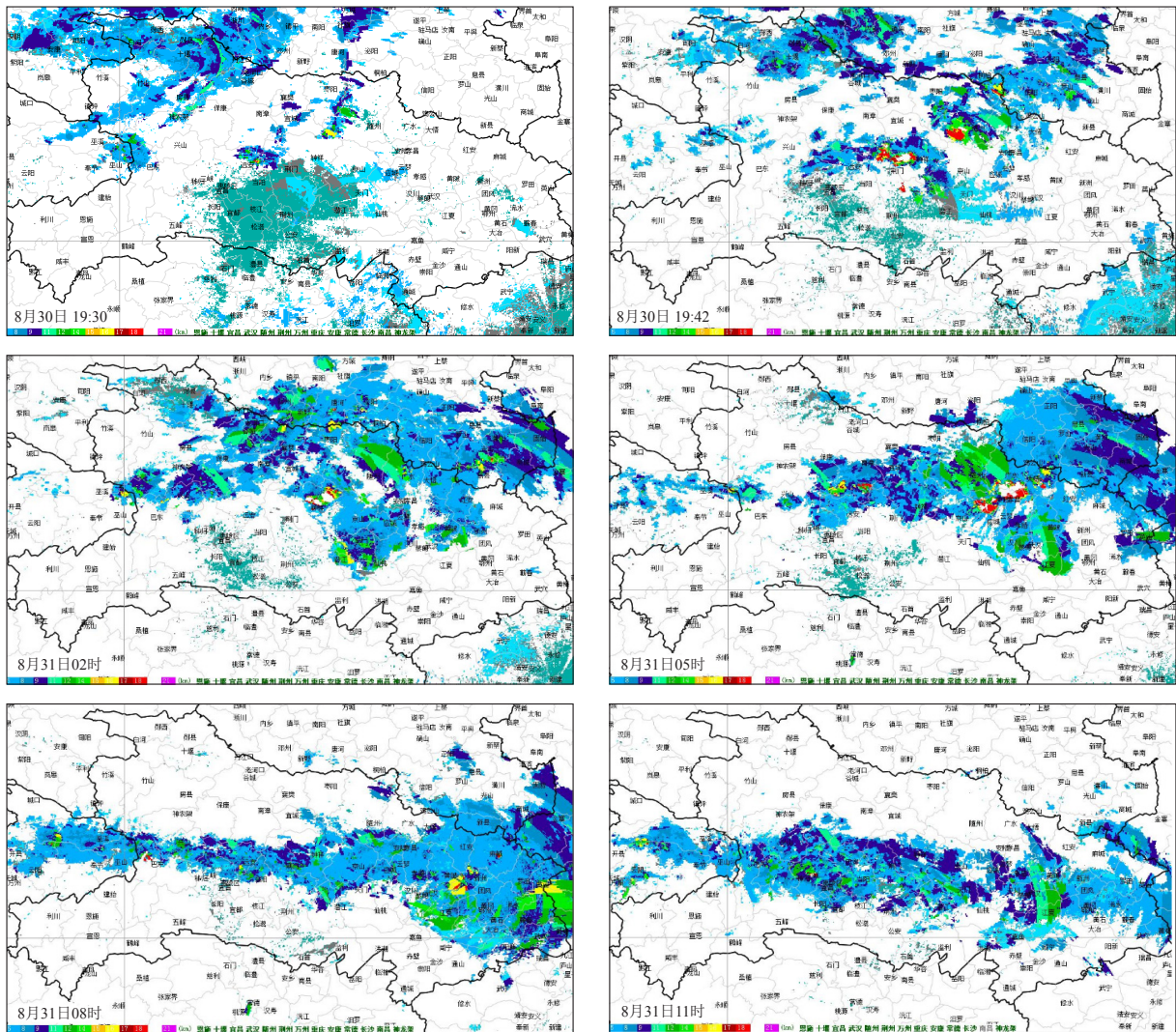


图6 8月30日19:30和19:42, 31日02时、05时、08时、11时回波顶高 (km)

Fig. 6 Echo top high (km) at 7:30 pm and 7:42 pm, August 30, and 02, 05, 08, 11 am, August 31

雷达资料有助于比较具体地了解天气系统的发展和移动趋势; 大气电场资料能直观反映雷电发生前的电场变化; 闪电定位资料能够证实闪电发生的具体位置。

4) 雷电发生时间及区域与雷达强回波区域的位置相吻合, 与高云顶高度区域相吻合。当区域回波强度大部分在40 dBz以上、回波顶高大部分在9 km以上, 且最大回波强度 $\geq 45$  dBz、最大回波顶高达到17 km时, 发生雷电的可能性较大。

5) 水汽辐合和不稳定状况是雷雨天气发生的重要要素, 当K指数 $\geq 36$ , 最大值达到40和垂直液态水含量 $\geq 6$  kg/m<sup>2</sup>, 最大值达20 kg/m<sup>2</sup>时, 对强对流天气的雷电预报有明确的指标作用。

闪电定位仪的实时性、雷达探测的精确性、卫星探测的广域性, 雷达回波图能看到云底及云层的垂直分布, 云图对于云顶分布的直观性, 这些资料的相互

配合, 取长补短, 对中小尺度雷电天气的分析和预报就能提供较全面的信息。多种观测手段的加入, 帮助我们多方面了解天气系统的实况, 更准确地分析其特征。卫星资料与雷达资料的结合分析, 在时间和空间上做到了优势互补, 可以有效地对雷电的发生做出可靠的预报预警。

尽管上述的分析初步揭示出大气探测资料对灾害性天气过程中雷电的预警和预报方面具有一定的参考价值, 然而, 对雷电活动特征的全面认识还需要积累更多的典型个例和足够的大气电场仪网络, 相信随着强对流天气分析个例的增多, 人们对雷电参数在强对流天气短时预报中的运用将有更深的认识。

#### 参考文献

- [1] Xu Q.J. Methods of lightning nowcasting based on radar echo extrapolation technology. Meteorological and Environmental

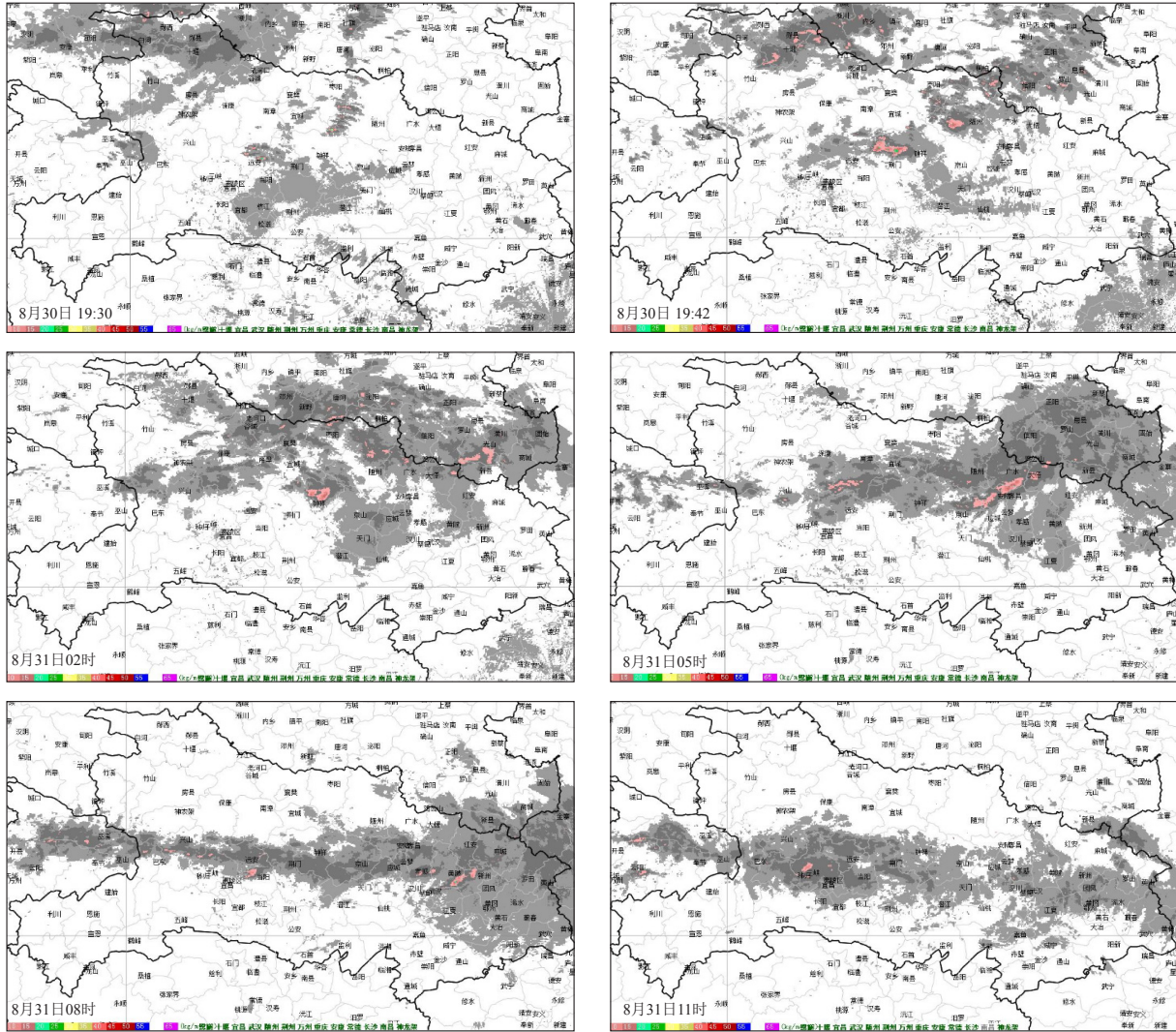


图7 8月30日19:30和19:42, 31日02时、05时、08时、11时垂直液态水含量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

Fig. 7 The vertical liquid water content ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) at 7:30 pm and 7:42 pm, August 30, and 02, 05, 08, 11 am, August 31

Research, 2016(5): 46-49.

[2] Liu C, Cecil D J, Zipser E J, et al. Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117, D06212, doi: 10.1029/2011JD017123.

[3] 王洪霞, 苗爱梅, 郑皓文. 一次锋前暖区暴雨成因分析. *中国农学通报*, 2016, 32(17): 157-164.

[4] 王凯, 朱浩, 鞠晓雨, 等. 安徽省皖南山区地闪特征对比分析. *气象与环境学报*, 2016, 32(3): 83-88.

[5] 李国梁, 李俊, 李享, 等. 武汉地区雷电预警阈值研究. *气象科技*, 2015, 43(5): 874-879.

[6] 王学良, 张科杰, 张义军, 等. 雷电定位系统与人工观测雷暴日数统计比较. *应用气象学报*, 2014, 25(6): 741-750

[7] 杨春明, 马林, 曹辉. 2010—2012年安徽省闪电特征分析与应用研究. *中国农学通报*, 2016, 32(29): 155-160.

[8] 宋敏敏, 郑永光. 我国中东部3—9月云、地闪电密度和强度分布特征. *热带气象学报*, 2016, 32(3): 322-333.

[9] 叶朗明, 苗峻峰. 华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析. *暴雨灾害*, 2014, 33(4): 342-350.

[10] 徐双柱, 韦惠红. 关于强对流天气预报的几点思考. *暴雨灾害*, 2016, 35(3): 197-202.

[11] 王伟. 西北太平洋快速增强热带气旋及其与垂直风切变的关系. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2013.

[12] 唐佳, 姚蓉, 王晓雷, 等. 2015年春季湖南两次混合对流天气过程对比分析. *干旱气象*, 2017, 35(2): 250-259.

[13] 周丽雅, 王凯, 刘倪. 基于Logistic回归蚌埠地区致灾雷电预报研究. *气象与环境学报*, 2016, 32(5): 147-153.

[14] 刘蕾, 李宜爽, 张凌云, 等. 广西汛期2次暖区暴雨成因的对比分析. *中国农学通报*, 2016, 32(5): 136-143.

[15] 祁海霞, 辜旭赞, 白永清, 等. 2013年湖北一次大暴雨 $\beta$ 中尺度分析和模拟诊断. *气象*, 2017, 43(3): 268-277.

[16] 余蓉, 杜牧云, 杜九三, 等. 基于多对流参数的武汉地区雷电活动预报方法研究. *气象科技*, 2016, 44(2): 269-274.

[17] 赵娴婷, 赵玉春, 汪小康, 等. 宜昌峡口区夏季暴雨天气分型及多普勒雷达特征. *暴雨灾害*, 2016, 35(4): 334-343.

[18] 唐明晖, 王强, 叶成志, 等. “威马逊”台前飊线环境场及多普勒雷达回波特征. *气象科技*, 2016, 44(2): 275-282.

[19] 翟园, 洪起, 乔娟, 等. 湖南地区多普勒天气雷达回波与云地闪关系研究. *中国农学通报*, 2016, 32(11): 115-120.

[20] 王宁宁, 谭涌波, 师正, 等. 气溶胶对云中水成物粒子电荷情况的影响. *南京信息工程大学学报:自然科学版*, 2013, 5(4): 331-335.

# 广西气候可行性论证发展与建议

■ 罗红磊 何如 苏志 周绍毅

开展广西气候可行性论证发展与对策研究,对进一步促进广西气候可行性论证工作高效、快速地发展,为更好地应对气候变化、提升防灾减灾能力、促进广西经济社会可持续发展有着积极的意义。

气候可行性论证是在全球气候变化加剧、气象灾害频发的背景下,合理开发和保护气候资源、评估气候影响、应对气候变化并正在逐步规范起来的一项技术咨询工作。广西因地理位置、地形地貌和天气气候的特殊性、复杂性,属暴雨洪涝、大风、雷暴等气象灾害的多发区,气象灾害已经成为制约广西社会和经济可持续发展的重要因素之一。重大工程对气象灾害和气候变化具有高度的敏感性,灾害性气象因子是影响工程安全性设计、投资成本和运营效益的关键因子。部分城市规划、重点建设工程和重大区域开发项目等在规划和建设之初因没有充分考虑气候影响,当面临不利的天气或气候考验时极易造成较大的损失。因此,开展科学的、有针对性的可行性论证工作,对气候条件密切相关的规划和建设项目的气候适宜性、风险性以及可能受局地气候产生影响进行分析评估,为建设项目设计提供合理的气象参数,可以最大限度减轻气象灾害造成的影响和损失,保障工程项目的建设与安全运营,使人类应对气候变化和防灾减灾的具体行动和应对措施更为细致、更加到位。

广西国民经济和社会发展“十三五”规划纲要提出,要以节能优先、绿色低碳为导向,推动能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系;统筹推进地震、气象、消防和防灾减灾能力建设,提高防灾减灾监测预警、灾害防御和紧急救援水平。新的发展形势对气候可行性论证工作提出了更高和更迫切的要求。加强气候可行性论证工作不仅是法律要求的具体落实,也是广西经济社会发展的现实需求,更是广西构建和谐友好的生态文明体系的重要组成部分。为此,开展广西气候可行性论证发展与对策研究,对进一步促进广西气候可行性论证工作高效、快速地发展,为更好地应对气候变化、提升防灾减灾能力、促进广西经济社会可持续发展有着积极的意义。

## 1 广西气候可行性论证发展概况

广西气候可行性论证工作起步于20世纪80年代末,工作初期是根据客户的需求提供气象资料,如风

玫瑰图、风向风速稳定度联合频率等基本参数。2008年《气候可行性论证管理办法》出台后,特别是2011年《广西壮族自治区气候资源开发利用和保护管理办法》的出台,为广西气候可行性论证工作的发展提供了新的机遇。进入“十二五”阶段,广西气候可行性论证工作实现了跨越式发展,广西在城市规划、重点建设工程、重大区域性经济开发项目、气候资源开发利用等方面开展了大量的论证工作,2011—2015年共完成200个气候可行性论证项目。“十二五”期间气候论证业务连年增长,2015年广西完成项目数74个,是2011年的7倍。广西的气候可行性论证工作广泛应用于能源(风能、核电、输变电路、太阳能等)、交通设施(公路、铁路、桥梁、码头、机场等)、城镇规划(暴雨公式、城市规划、城市灾害等)、化工业(LNG、化工厂)、重大工矿(如火电、石化炼油、有色金属)、水利工程(大型水利、水库)、旅游(旅游风景区规划、开发)等诸多领域。其中,风电场选址所占比重最大,约占26%;其次为交通设施、城镇规划,均占10%,化工和工矿业占9%。

## 2 广西气候可行性论证在发展中存在的问题

### 2.1 气候可行性论证制度没有落实到位

气候可行性论证是法律赋予气象部门的职责和义务。近年来,《中华人民共和国气象法》《气候可行性论证管理办法》《广西壮族自治区气象灾害防御条例》《广西壮族自治区气候资源开发利用和保护管理办法》等法律法规和自治区级相关文件都对气候可行性论证做出了明确规定,但长期以来这些法令犹如一纸空文,对气候可行性论证执行情况核查制度没有完全落实到位,气候可行性论证没有正式纳入项目行政审批程序或竣工验收等环节中强制执行的范畴,对社会并未真正产生约束力。广西的绝大多数重大工程气候可行性论证项目都是来源于业主单位在工程中技术性的需求,造成了基本上还是由业主方自愿开展气候可行性论证的现象,主观上并未受到相关法律法规的影响。同时,气象部门缺乏有效的问责机制,对违背

气候条件或具有气候风险的项目没有“惩罚”或“叫停”的权力，导致气候可行性论证工作的执法难度较大。因此，众多涉及公共安全、生态环境的重大、重点规划或建设项目并未进行气候可行性论证。例如，2014年，自治区层面统筹推进的131项新开工重大项目，仅有8项进行了气候可行性论证；2015年，自治区层面统筹推进的159项新开工重大项目，仅有5项进行了气候可行性论证。

## 2.2 社会对气候可行性论证的认识存在偏差

目前对气候可行性论证工作的宣传和普法力度不够，致使社会各行业对气候可行性论证工作的重要性认识不足。长期以来，社会对气候可行性论证的重要性缺乏了解，一定程度上阻碍了气候可行性论证工作的开展。一方面，主要是源于对气象部门本身认知的偏差，一直以来广大公众对气象部门的了解，仅停留在把气象业务简单等同于天气预报，认为气象是一门高深的技术行业，忽视了气象部门具备行业社会管理部门的另一重身份；另一方面，是对气象与社会经济发展关系认识的偏差，尽管近年来气象经济学已经成为一个热门的研究领域，但社会各行业对气象与经济发展之间的关系认知有限，不了解重大工程建设与气候的相关程度，甚至部分规划和建设项目部门没有充分考虑气候的影响，忽略了气候可行性论证对工程项目的重要性，导致很多工程主管部门只注重眼前利益，为了节省资金，不愿意开展气候可行性论证。

## 2.3 气候可行性论证服务领域和规模发展受限

气候可行性论证的领域和规模发展受到当地经济建设导向和部门内地域发展不均衡的影响较大。一方面，“十二五”期间，广西气象部门承接的气候可行性论证项目几乎都集中在风能、交通等基础设施建设方面，诸如太阳能资源开发利用、农业结构调整建设等方面气候可行性论证工作少有开展；另一方面，广西全区的气候可行性论证业务存在地域发展不均衡的现象。近年来，部分地市已经可以独立或通过上下联动的方式开展气候可行性论证，但由于气候论证的技术水平和团队攻关能力等方面的优势，全区绝对多数的重大规划、重点工程项目的气候可行性论证工作主要由自治区级业务单位承担。另外，开展气候可行性论证工作较好的地市主要集中在少部分地市，如柳州市、河池市、崇左市、桂林市、百色市等，且地市承担的项目呈现工程规模较小、服务领域较窄、服务产品较单一等特点。

## 2.4 气候论证业务能力和技术水平有待提升

随着社会经济发展的需要和对气候论证认识的

不断深入，气候可行性论证工作在广度和深度上的要求都越来越高，既要进行综合评价或预测，全面论证气候环境现状，特别是灾害性天气气候事件的影响；又要从重大工程项目的合理布局和保护气候环境的基点出发，全面论证项目所在地区和场地的适宜性，保持经济与生态环境的协调，这些都对气候可行性论证的业务能力和技术水平提出了较高的要求。目前广西开展领域的气候可行性论证工作仍存在着论证内容单一、技术方法手段传统、论证的结论不能与规划或建设项目有机地衔接等情况。一方面，广西的气候可行性论证技术能力有待提高，首先，缺乏不同领域有针对性的论证内容和方法的基础性研究；其次，由于气象信息监测网络不完善，常规的观测方式和仪器往往无法测量到工程需要的关键和高精度数据，卫星遥感资料、地理信息数据、数值模拟技术等没有最大限度地应用于气候论证服务当中。另一方面，气候可行性论证技术服务系统开发不够完善，气候服务产品不够丰富，不能满足当前气候论证不断发展的需求，目前地市一级缺少一套统一的业务技术平台和数据支撑，缺乏能够共享的可靠的数据集产品，一定程度上制约了气候可行性论证的服务效果和服务领域。

## 2.5 气候可行性论证人才队伍建设亟待加强

从整体来看，绝大多数气候可行性论证技术人员均为应用气象学相关专业，缺少熟悉气象数值模拟、卫星遥感、软件编程开发等应用技术专业的综合人才，因此在研究气候论证关键核心技术、提升论证报告技术含量和研发论证业务系统等能力方面稍显欠缺。另外，既懂业务又懂市场的拓展人员也相对缺乏，从事气候论证的人员缺乏系统的理论知识，尤其在基层业务单位，现有从事气候可行性论证的工作人员大多未经过系统的专业培训，主要表现为缺乏市场拓展、商务谈判、技术分析、报告编制等相关从业经验，且在地市级存在综合业务复杂、每人身兼数职的现象，因此绝大多数地市业务单位仍然不具备独立完成气候可行性论证项目的能力。由此可见，广西现有的气候论证专业队伍和能力建设还不能满足当前业务工作开展的需要，在一定程度上影响了气候论证工作的效率，也影响了气候论证拓展服务领域的速度。

## 3 促进广西气候可行性论证发展的建议

### 3.1 抓住机遇推进气候可行性论证工作

广西气候可行性论证工作的关键在贯彻落实气象相关政策法规和加强管理，我们应当利用好政府出台

有利于气候可行性论证发展的政策规章的机遇,进一步增强相关制度的可执行性与可操作性。在做好贯彻落实《广西壮族自治区气候资源开发利用和保护管理办法》等气象相关法规的同时,根据《精简审批事项规范中介服务实行企业投资项目网上并联核准制度工作方案》(国办发〔2014〕59号)的要求,将气候可行性论证列入企业投资项目核准的前置审批事项,按照《国务院关于印发清理规范投资项目报建审批事项实施方案的通知》(国发〔2016〕29号)的要求,将重大规划、重点工程项目气候可行性论证列入涉及安全的强制性评估,自治区级和市级相关业务部门要抓住时机,及时跟进。

另一方面,“十三五”是广西大力推进生态文明建设、转变经济发展方式、促进绿色低碳发展的重要战略机遇期,“十三五”规划在加快经济社会建设的同时也为气候可行性论证工作的开展提供了更多的可能。气象部门应抓住机遇,积极地为广西经济建设和持续健康发展保驾护航,使气候可行性论证更好地为广西经济社会发展服务。

### 3.2 强化气候可行性论证管理机制

广西气候可行性论证实行全区统一策划、上下联动推进的管理体系,加强气候可行性论证机构及相关工作管理,充分发挥气候可行性论证资质的作用,在自治区各级项目审批监管平台要做好规范中介服务工作,在审批窗口公开有资质的中介服务机构;进一步落实区市两级业务服务单位上下联动工作机制,要求对外统一服务方案和服务技术标准,统一服务市场议价标准,统一开展相关业务的服务工作,充分发挥各自优势形成合力实现全区气候可行性论证协调发展;各级论证机构要严格依照法律法规和相关标准规范的要求和程序,科学开展评估论证,依法编制气候可行性论证报告,逐步形成自治区级项目的气候可行性论证由区级业务单位制作完成,市级项目由市级业务单位负责产品的制作、鼓励县级参与制作的方式,部分重大或重点项目根据需求采取上下联动、区市共同合作完成的方式;建立健全气候可行性论证项目验收评审制度、气候可行性论证报告专家评审制度等管理制度,严格把关服务质量;进一步完善气候资料服务管理制度,杜绝低价出售气象原始资料的现象,提高气象部门的权威性和重要优势;建立科学合理的考核激励机制,建立科学、分类的目标考核与评价机制,以及服务对象满意度调查和反馈制度;加强推进工作监督检查,在全区范围内通过简报等方式通报各地开展情况,督促全区各地市气候可行性论证工作稳步快速

发展,实现广西气候可行性论证管理工作的集约化和规范化发展。

### 3.3 积极拓宽气候可行性论证优势领域

要结合广西经济社会发展的特点和重点,抓住“十三五”规划的契机,紧密围绕市场服务的需求,大力开展有广西特色的气候可行性论证服务领域。气候论证服务的对象有很大一部分是针对特定的行业、特定的项目,其服务内容针对性强、时效性高、随机性大,所以,必须树立长期发展、灵活适应、主动求变的需求理念和服务理念。坚持以需求为引领,深入调查分析,注重与政府有关部门和相关企业的沟通和联系,针对重点行业、重点工程,如城市规划、暴雨公式、交通、水利、电力以及近海和海上风能资源和太阳能资源等评估和开发利用等项目,大力发展城市气象、交通气象、工程气象、能源气象、旅游气象等特色优势领域,加大政策引导和业务管理力度,以广西投资项目在线并联审批监管平台为重要渠道,争取在做好传统优势项目的同时积极开拓新领域,达到多元、均衡、协调发展,努力建立有特色的气候论证服务体系,树立广西气候可行性论证的品牌效应。

### 3.4 加强气候可行性论证的宣传力度

加强气候可行性论证工作是建设生态文明社会的重要组成部分,全球气候变化已是不争的事实,应对气候变化议题已经从科学层面提升到政治层面,广西“十三五”规划纲要中对构建和谐友好的生态文明体系做了明确阐述。气候可行性论证工作应当抓住这一议题,打好“生态文明”牌,大力宣传气候可行性论证的重要意义和必要性,积极主动向政府、企业和社会公众宣传气候变化对生态环境的影响,强调气候可行性论证的重要性以及缺少该项工作所带来的严重后果,提高社会各界对气候可行性论证工作的认识和重视程度,营造良好舆论氛围。对政府和相关部门要加强气候可行性论证对保障项目建设安全和区域大气环境安全的宣传,强调气候可行性论证对社会公益的服务。对企业重点突出气象灾害风险评估的宣传,强调气候可行性论证能为业主带来的经济效益和安全保障。依靠社会媒体和舆论对气候可行性论证进行正面的宣传,解决公众疑虑,营造推进工作的良好氛围;广泛收集重点项目受气象灾害影响的事例,利用各种传媒大力宣传气候可行性论证法规政策和典型实例,增强社会公众法制观念和气象防灾减灾意识。

### 3.5 提升气候论证服务产品技术含量

首先,气候可行性论证工作涉及各行各业,需

求也不尽相同, 需要根据不同行业、项目的具体要求, 加强多门类专业知识的积累、技术方法的引进和科学问题的研究, 不断完善气候可行性论证的技术标准体系, 以适应不同行业重大工程建设气候可行性论证的需要, 不断加大技术攻关, 提高气候可行性论证的科技含量, 研究针对性强、科技含量高、精细化的气候论证服务产品, 才能有针对性地开展气候论证工作。其次, 加强与国家级业务单位、先进省(自治区、直辖市)业务单位、高等院校、研究机构合作, 总结已有的气候论证服务经验和技術方法, 开展工程气象理论和专项服务研究, 建立针对不同行业的气候论证服务理论体系, 加强气候可行性论证科技创新和成果转化, 不断提高服务产品科技水平。再次, 大力开发和建设全区的气候论证服务的业务平台, 建立全区气候可行性论证数据支撑系统, 建立和完善气候及极端气候事件对工业、交通、建筑、旅游等各个行业的影响评价等专用数据库。最后, 努力争取相关部门的支持, 拓宽科研经费筹集渠道, 加大科研资金和设备投入, 建议每年从科技服务发展基金中提取部分资金用于提升现代化装备和科研开发, 并制定奖励创新机制。

### 3.6 加强气候可行性论证人才队伍建设

加强队伍建设, 建立配套机制, 不断优化人才资源配置方式, 充分利用好现有人才资源, 加大技术骨干的重点培养, 适当扩大气候可行性论证队伍, 整合气候可行性论证队伍资源, 重点考虑培养或引进气候应用相关专业和熟悉气象数值模拟、卫星遥感、软件开发能力等方面的优秀技术人才。在全区范围内可以通过合理抽调、项目带动、引进培训等方式尽快建立一支高素质的论证服务队伍, 每个服务领域行业或专业均需有1~2名骨干带头人物; 同时, 引进抽调几

个领军人物, 带动科研创新, 保证队伍快速成长和事业的可持续发展。加大在岗培训力度, 在实践中提高队伍素质, 建立人才培养和培训体系, 尤其要着力强化基层技术人员培训力度, 建立健全长效培训机制, 提高业务人员的水平, 强调责任意识; 多组织高层次的培训, 邀请国家局、先进省份的学者和大学的老师、教授进行授课。部门内气候可行性论证从业人员实行执证上岗制度。部分服务产品的制作可以通过外包形式, 充分吸引部门外技术人员参与到气候可行性论证工作中。业务攻关队伍建设方面, 除了培养部分既懂业务又懂市场的在职人员外, 重点要通过聘用懂市场的社会人才, 通过专业培训形成优秀的“气象经纪人”; 也可以通过与广告公司等专业营销公司签订推广协议, 由气象部门负责专业培训, 通过营销公司的资源拓展服务市场。

致谢: 本文由广西自然科学基金青年基金项目(2015GXNSFBA139189)和广西气象服务中心科研项目(201805)共同资助。

#### 深入阅读

- 房小怡, 郭文利, 马京津, 等, 2014. 低碳城市规划与气候可行性论证. 气象科技进展, 4(5): 42-47.
- 广西壮族自治区发展和改革委员会, 2016. 广西壮族自治区国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要.
- 韩颖, 2010. 浅论重大项目气候可行性论证. 气象软科学, (1): 113-118.
- 宋丽莉, 2013. 我国气候可行性论证的作用与实践. 阅江学刊, (3): 31-34.
- 伍毓柏, 周显信, 2012. 我国气候可行性论证的现状、问题与对策. 阅江学刊, (5): 51-56.

(作者单位: 广西壮族自治区气象服务中心,  
广西壮族自治区气候中心)

# 贵州省人工影响天气弹药物联网管理系统应用

■ 彭宇翔 刘国强 田英 李德泉 车云飞

贵州作为全国人工影响天气弹药物联网管理系统建设试点省份，通过构建集自动化作业装备、数字化采集装置、规范化弹药编码、智能化扫码终端和集约化信息平台于一体的人雨弹火箭弹物联网管理系统，着力提升了人工影响天气安全监管能力和业务技术水平。

物联网（Internet of Things, IoT）一词于2015年11月在国际电信联盟（ITU）发布的题为“ITU Internet reports 2005—the Internet of things”的报告中正式提出，并引发了广泛关注。物联网是一种新兴的网络技术和产业模式，它利用互联网将物与物联系起来，进行数据交换、信息共享和监控。随着信息技术和互联网的快速发展，物联网技术开始应用于电网、物流医疗以及农业等领域。

由于强对流天气是造成气象灾害的主要天气类型，为了减少雷雨大风、冰雹等强对流天气造成的损失，贵州省地面人影作业次数和用弹量逐年增多。而人雨弹、火箭弹都属于爆炸物品管理范畴，为进一步保障人雨弹、火箭弹的购置、运输、储存、流转及使用等环节的安全，贵州省快速推进人工影响天气物联网管理系统建设。

该系统基于物联网技术，以人影弹药从购置到使用的各个环节的安全作为重点，通过构建集自动化作业装备、数字化采集装置、规范化弹药编码、智能化扫码终端以及集约化信息平台于一体的人雨弹、火箭弹物联网管理系统，对省、市、县及炮站四级人工影响天气弹药的购置、运输、储存、流转和使用等环节进行全生命周期跟踪监控，并与中国气象局相关管理系统进行实时对接，以提升人工影响天气安全监管能力和业务技术水平。

## 1 总体架构

系统以前端采集为基础，通过网络传输将弹药信息进行集中存储分析；以B/S架构建立带权限的用户使用环境。网络传输充分考虑信息安全。用户使用环境界面清晰、操作简便并具备弹药信息分析能力。系统的总体架构见图1。

该系统主要包括：省级、市级、县级和作业点的各级物联网系统及终端设备、数据库、物联网弹药、信息采集设备、专业运输车辆、带有作业信息自动采集终端的自动化高炮和火箭、各级弹药库和视频监控



图1 系统架构图

系统等。

由于人工影响天气弹药属于民爆物品的管理范畴，国家虽有相关管理法规，但对人雨弹进行传统的纸质管理存在管理与调拨工作效率不高、弹药身份追溯与库存弹药查询工作量大、运输过程无法全程监控等问题，特别是在出现了不可抗因素破坏了弹药库之后，对弹药身份的核实更加困难。曾经就出现过山洪冲毁了弹药库，部分弹药丢失，但却很难确定丢失弹药数量的情况。因此，这对弹药的安全管理提出了更高的要求。如何提高弹药管理能力，提高弹药管理的便捷性、高效性和安全性成为了人影部门的迫切需求。因此，由中国气象局牵头，贵州省作为唯一的人雨弹物联网试点研发人雨弹物联网管理系统，推进作业弹药的智能化、集约化管理工作。

## 2 硬件设备

### 2.1 弹药标识

《人工影响天气作业装备与弹药标识编码技术规范》规定：在人雨弹的火药筒用激光镌刻二维码，在包装筒上贴条形码，作为每发弹药的唯一身份；在弹药箱的外部贴二维码、内部贴无源RFID标签作为每箱弹药的管理标识；在火箭弹外部贴无源RFID标签作为每发火箭弹的唯一身份，对弹药的全生命周期进行监管。

## 2.2 扫描设备

### 1) 超高频扫描平板

超高频扫描平板通过对弹药、弹药箱的RFID进行实时自动扫描识别,并对弹药运输车辆进行全程的GPS监控,实现弹药运输过程的全程监控。

### 2) 固定信息采集终端

固定信息采集终端通过信号感应的方式对弹药箱的RFID进行实时自动扫描识别,实现弹药批量出入库,并核对出入库弹药身份信息。

### 3) 手持信息采集终端

手持信息采集终端对弹药、弹药箱的二维码和RFID进行识别,并利用GPRS网络将数据向中心传送,实现对弹药存储和出入库情况的实时监控。

## 2.3 作业装备

### 1) 自动化高炮

自动化高炮由37 mm高炮加装特制的方位角、仰角和用弹量自动采集终端改造而来。在作业过程中,自动化高炮与物联网系统进行衔接,进行GPRS通信传输,实现作业时间、方位角、仰角和用弹量等作业参数的实时采集、存储、显示和上报。

### 2) 自动化火箭

自动化火箭是利用加装了发射姿态自动调整设备、信息自动采集终端和无线遥控接收设备的火箭发射架作为发射平台发射安装了无源RFID标签的火箭弹,并进行火箭信息自动识别和作业信息的自动采集上报。

## 3 系统功能与工作流程

人雨弹火箭弹物联网系统采用国家级、省级、市级、县级分级管理,各级部门根据不同的账号登录管理所属区域的弹药信息,对弹药采购、弹药生产、出厂验收、弹药转运、弹药仓储及作业等环节进行全生命周期的监控与管理。同时通过物联可以实时监测到库房状态、弹药出入库情况、作业点的实况、全省弹药库存情况、过期弹药仓储情况、弹药运输情况、废弃弹仓储情况以及弹药作业使用情况等。系统还具备了弹药总数统计、厂家弹药质量统计、作业点故障统计、弹药消耗能力统计等功能,实现对弹药全生命周期的信息化管理。

采购环节:县级根据各作业点的作业需求向市级提交弹药需求,市级统计辖区内县级所有弹药需求上报省级,省级根据全省的用弹需求向厂家订购弹药。

生产与出厂验收环节:弹药生产厂家按照《人工影响天气作业装备与弹药标识编码技术规范》利用激光在火药筒上镌刻二维码,在包装筒上贴条形码作为

每发弹药的唯一身份;在弹药箱内部贴无源RFID标签、外部贴二维码,作为每箱弹药的管理标识;在火箭弹外部贴二维码与无源RFID标签。弹药生产完成后,上海物管处赴生产厂家进行弹药验收,将合格弹药批次信息自动录入人影装备弹药质量管理数据库,纳入到人影装备弹药管控流程,从源头上保障装备弹药的质量。

转运环节:厂商将上海物管处检验合格的弹药发往省级,并利用配有车载超高频扫描平板的专用运输车辆对弹药进行运输并进行全程GPS监控。省级部门根据各市、州、县各作业点的弹药需求填写弹药调拨单,进行省内转运。

弹药存储与出入库环节:各级部门通过选配固定或手持信息采集终端实现对弹药出入库信息的实时采集上报。

发射作业环节:将自动化作业高炮和只安装作业数据采集器的高炮与物联网软件系统进行衔接,实现实时作业信息的采集、存储、显示和上报。

## 4 小结

经过一年的研制,人雨弹物联网系统基本实现人雨弹的全流程管理及省级与国家级之间的信息实时流转。下一步将按照人影业务现代化三年行动计划的要求,全面推进物联网系统的建设,结合项目任务和试点要求制定物联网安全管理相关流程和制度,完成省、市、县、炮站软、硬件的部署;对试点相关的管理人员和作业人员进行培训,实现弹药全生命周期的监控与管理,并在主要作业期开展三七高炮人雨弹实弹作业试用,尽快完成人工影响天气弹药物联网管理系统的建设,并进一步努力使该系统进一步完善,为实现安全人影、科学人影、智慧人影奠定坚实基础。

致谢:本文由2015年中国气象局小型业务项目资助。

### 深入阅读

Welbourne E, Battle L, Cole G, et al, 2009. Building the internet of things using RFID: The RFID ecosystem experience. *IEEE Internet Computing*, 13(3):48-55.

刘海明, 崔莉, 谢开斌, 2013. 物联网体系结构与实现方法的比较研究. *计算机学报*, 36(1): 168-188.

俞小鼎, 2011. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警. *气象科技进展*, 1(3): 31-41.

朱洪波, 杨龙祥, 于全, 2010. 物联网的技术思想与应用策略研究. *通信学报*, 31(6): 2-9.

朱洪波, 杨龙祥, 朱琦, 2011. 物联网技术进展与应用. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 31(1):1-9.

(作者单位: 彭宇翔, 刘国强, 田英, 贵州省人工影响天气办公室; 李德泉, 车云飞, 中国气象局人工影响天气中心)

## 进展报告2018：长江生态气象



支持机构：湖北省荆州市气象局

## 图说 长江生态气象

- 32 陈伟亮: 荆江航运气象灾害预报预警系统
- 34 梁益同, 陈伟亮: 气候变化对洪湖湿地的影响研究

## 信息 阅读

- 90 邓超, 陈伟亮: 降雨对江汉平原农业面源污染的影响不容忽视
- 108 邓超, 陈伟亮: 开展洪湖湿地保护区生态气象保障
- 112 邓超, 陈伟亮: 荆州市气象局着力做好“水文章”
- 115 邓超, 陈伟亮: 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心成立



进 2018  
展报告长江生态气象  
2018年8月 / 8卷5期

进展报告2018

## 特约专家

汪正祥 (湖北大学)  
朱建强 (长江大学)  
熊勤学 (长江大学)  
艾劲松 (湖北省荆州市气象局)  
何志学 (湖北省气象局)  
刘敏 (武汉区域气候中心)  
胡爱军 (湖南省气象局)  
周月华 (武汉区域气候中心)  
田刚 (湖北省气象台)  
吴义城 (湖北省咸宁市气象局)

## 特约编辑

夏智宏 (湖北省荆州市气象局)  
刘凯文 (湖北省荆州市气象局)

## 聚焦长江大保护，推进江汉平原沿江湿地生态保护气象服务

万里长江，险在荆江。长江荆江段九曲回环，流域内河网密布、湖泊纵横，孕育出了典型的江汉平原沿江湿地生态环境。洪湖，是我国第七大淡水湖，湖北省第一大湖，“国际重要湿地”；天鹅洲麋鹿、白鳍豚国家级自然保护区，守护着两种国家一级保护动物；此外，“稻虾共生”、“双水双绿”、生态立体农业等湿地生态绿色农业发展模式均缘起江汉平原。江汉平原沿江丰富的湿地资源在发展农业、调节气候、涵养水源、净化水质、美化环境、维持生物多样性等方面发挥了极为重要作用，然而，随着气候变化和人类活动的影响，沿江湿地生态环境破坏与退化风险也突显出来，直接威胁长江流域生态安全，因此，迫切需要加强沿江湿地生态保护修复气象服务工作，助力长江大保护。

荆州市气象局依托荆州农业气象试验站，长期关注湿地生态保护与湿地农业发展气象服务，近年来，通过开放合作、融合发展，与中国农业科学院、北京大学、浙江大学、武汉大学、中科院测量与地球物理研究所等单位联合开展湿地生态与农业气象服务关键技术研究，重点围绕气候变化对湿地生态与农业影响评估、生态功能修复气象评价、平湖湿地涝渍地开发、农业面源污染气象风险监测预报、稻田综合种养模式气象保障、湿地生态环境遥感监测评估、湿地生物多样性保护气象服务等方面进行了有益探索，取得了丰富的实践成果，发挥了气象职能作用。

本期的主题为长江生态气象，主要汇总了荆州市气象局牵头成立的“江汉平原生态气象遥感监测技术协调创新中心”各成员单位在湿地生态与农业气象服务等方面最新研究成果，既有区域代表性，又可作为长江中下游地区乃至全国湿地生态保护气象服务工作的参考，服务“共抓长江大保护，不搞大开发，实现高质量发展”的战略部署。

## 目录

## 研究进展

- 36 艾劲松, 孙雨轩, 刘凯文: 荆州市冬小麦产量动态预报方法对比研究
- 40 秦鹏程, 夏智宏, 陈伟亮: 农业气候年景评估指数构建及在江汉平原的应用
- 46 谭江红, 陈伟亮, 王珊珊: 一种机器学习方法在湖北定时气温预报中的应用试验
- 51 张丽文, 梁益同, 李兰: 基于高分一号影像的武汉市洪涝遥感监测与分析
- 58 柴振刚, 胡佩敏, 熊勤学: 基于面向对象的光学和 Sentinel-1 SAR数据油菜种植空间分布信息提取方法研究
- 63 刘可群, 周守华, 黄永平, 汤阳, 李仁东, 李梦璠: 土地利用变化对洪湖流域洪涝灾害影响
- 67 邓艳君, 赵卓勋, 李玲, 张伦瑾: 2014—2016年荆州城区空气质量与气象要素的关系分析
- 72 范剑, 尤慧, 刘凯文, 高华东: 不同播期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型
- 78 刘韬, 夏智宏, 朱浪: 气象条件对湖北长湖水质的影响研究
- 81 耿一风, 黄永平: 近60年荆州四季趋变特征及给作物生长影响的对策
- 85 梁益同, 夏智宏, 文雄飞, 柳晶辉, 张丽文, 邓艳君: 基于卫星遥感的40年洪湖水面变化及驱动力分析
- 91 柳晶辉, 万君: 利用HJ-1卫星多光谱数据监测城市湖泊蓝藻研究
- 96 黄端, 池泓, 朱浪, 邓艳君, 夏智宏: 荆州市农田植被净初级生产力时空特征分析
- 101 王凯, 高媛, 刘敏, 潘汉标, 夏智宏, 靳艳秋, 王芳芳: 利川市旅游气候适宜性的评价和比较

## 论坛

- 105 冯奇, 夏智宏, 肖飞, 童雯婷: 生态画廊建设中流域水资源生态补偿机制的建立
- 109 张怀胜, 艾劲松, 温华军, 张玉铭, 李鹏飞, 杨涛, 朱建强: 石首麋鹿栖息地环境生态现状及其保护
- 113 帅文卫, 何菊, 黄忠: 天门市茶产业发展的气候适宜性分析和对策
- 116 贺程程, 周霞, 杨峰, 周莉莉: 江汉平原气候变化及其对农业生态的影响与对策

## 书评

- 119 朱玉洁, 郝伊一: 《“三农”气象服务探索》评介
- 120 侯美亭: 《生态气象学: 概念与应用(第二版)》评介

# 荆江航运气象灾害预报预警系统

■ 陈伟亮

(荆州市气象局)

## 荆江航运气象灾害预报预警系统投入运行

该系统由荆州市气象局和荆州海事局联合开发，整合了共享船舶自动识别系统 (Automatic identification system, 简称 AIS)、水域闭路电视监控系统 (Closed-circuit television, 简称 CCTV)、海巡艇 CCTV、气象雷达、精细化网格预报、预警信息发布等多个平台及系统，通过将航运信息与气象监测预警信息实时叠加，能面向具体船只提供精准及时的气象灾害预报预警服务。

### 细网格预报叠加层

提供各气象要素的中短期精细化网格预报，集合了各类数值预报模式，预报产品时间分辨率为 3 h，空间分辨率为 5 km，能实现定点、定时、定量的气象预报。

### 雷达叠加层

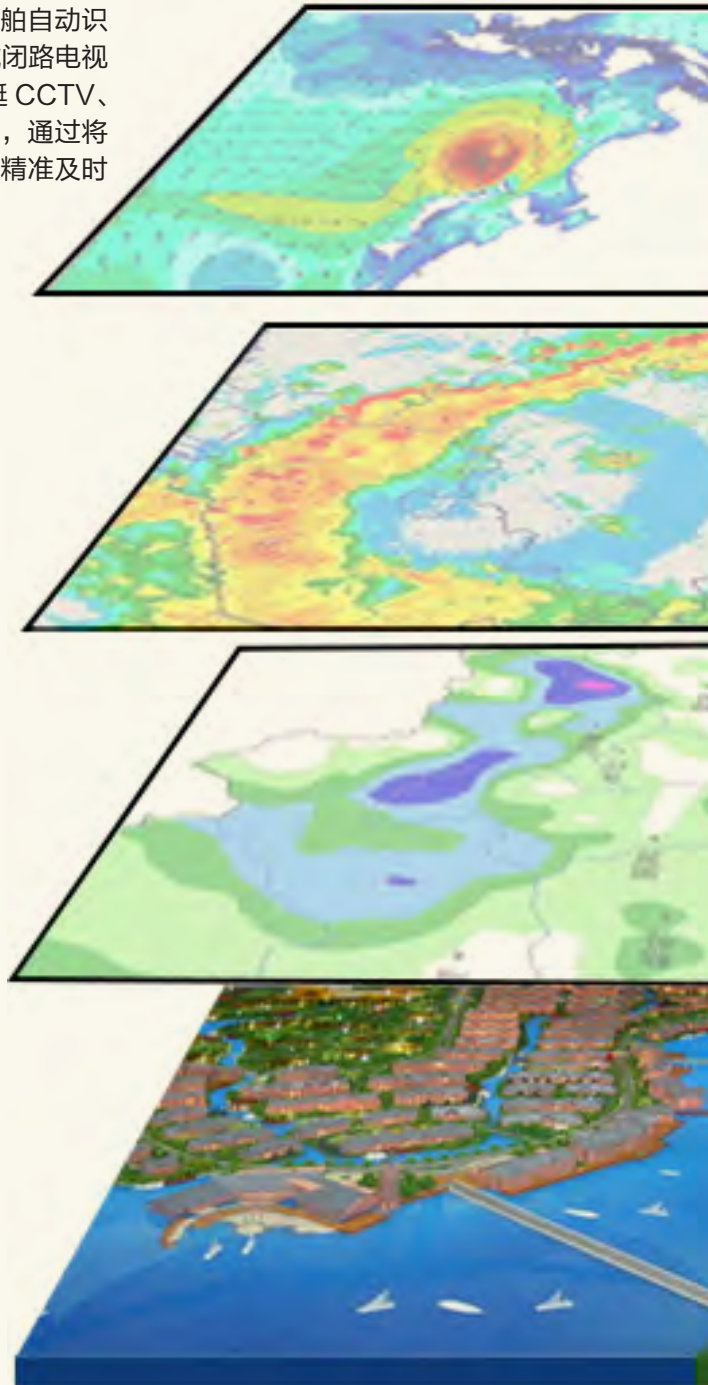
雷达产品拼图能实时显示对流风暴状态，通过算法可追踪风暴路径，叠加中气旋、冰雹指数等产品，便于短时临近天气的监测和预警。

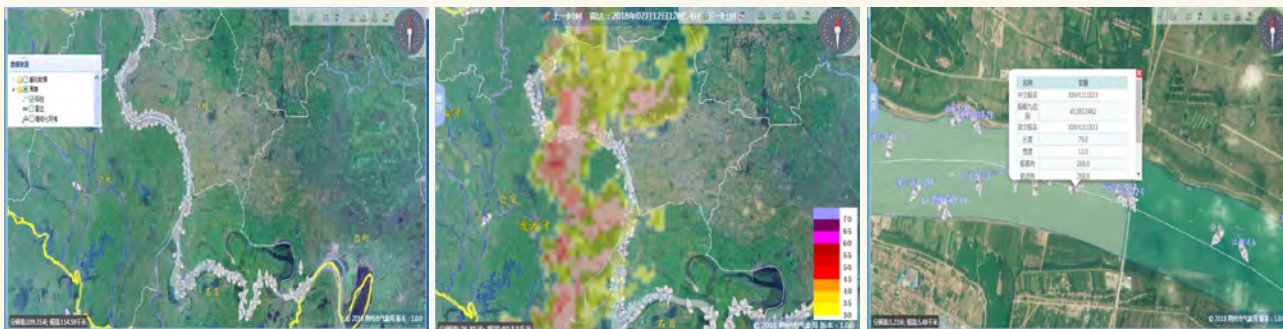
### 自动站叠加层

接入 CIMISS，实时调阅区域内自动气象站网数据，包括气温、降水、风、能见度等要素，统计生成数值填图、色斑图。对沿长江干线的重要站点设置观测要素报警值域，出现恶劣天气时及时报警。

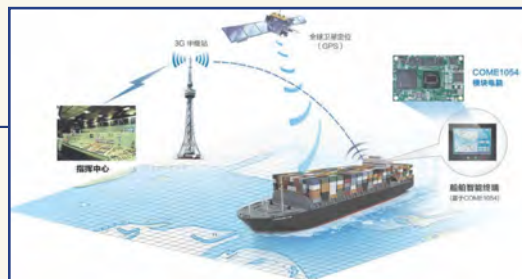
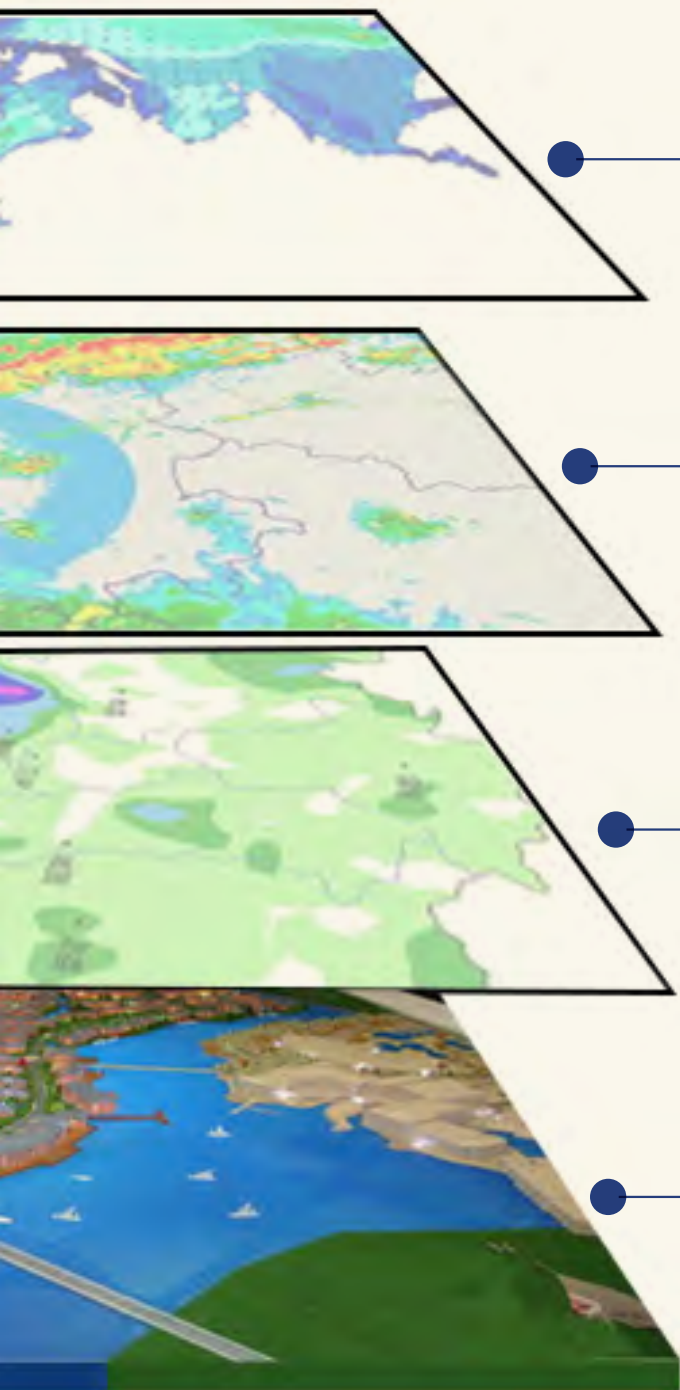
### 底图层

数据读取自 AIS 船舶自动识别系统，能显示航道区域上所有在线船舶信息，包括船名、呼号、吃水、货物等静态信息和船位、船速、航向、航向改变率等动态信息。数据每 30 s 更新一次。





汇总资源：预警系统的多层信息联动



# 气候变化对洪湖湿地的影响研究

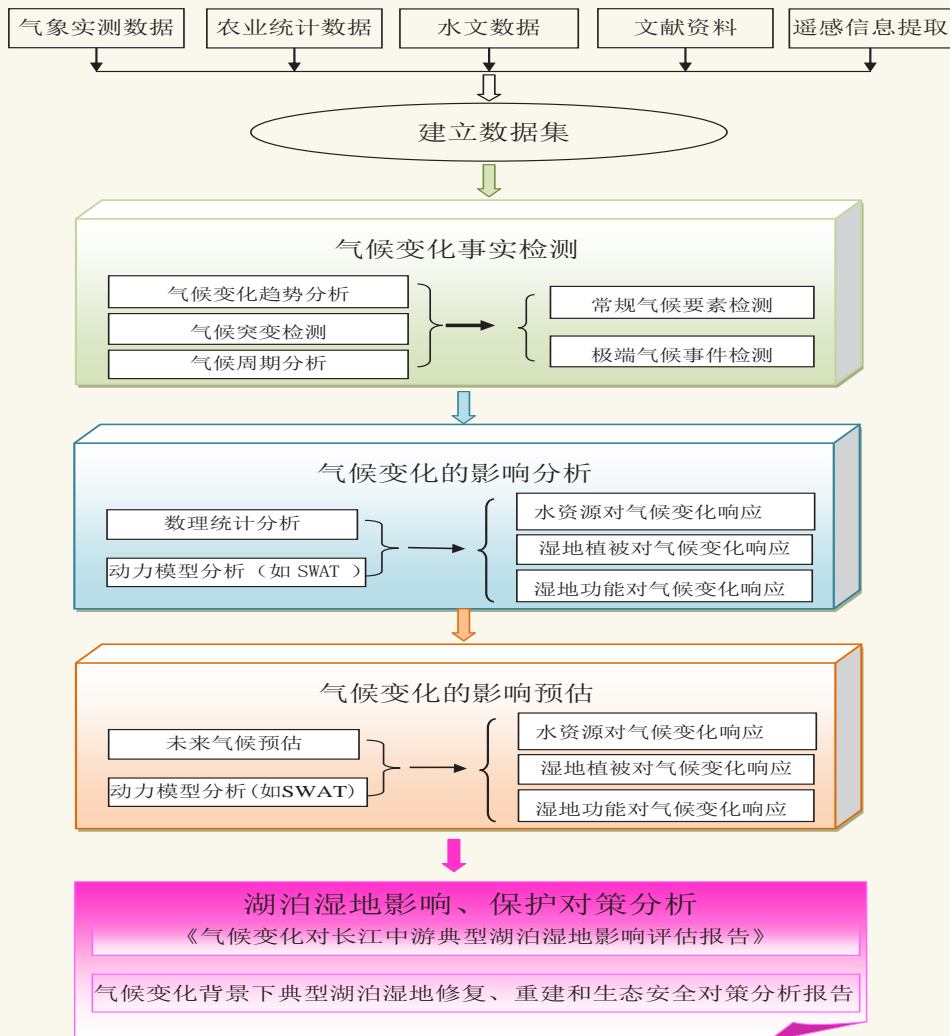
■ 梁益同<sup>1</sup> 陈伟亮<sup>2</sup>

( 1 武汉区域气候中心; 2 荆州市气象局 )

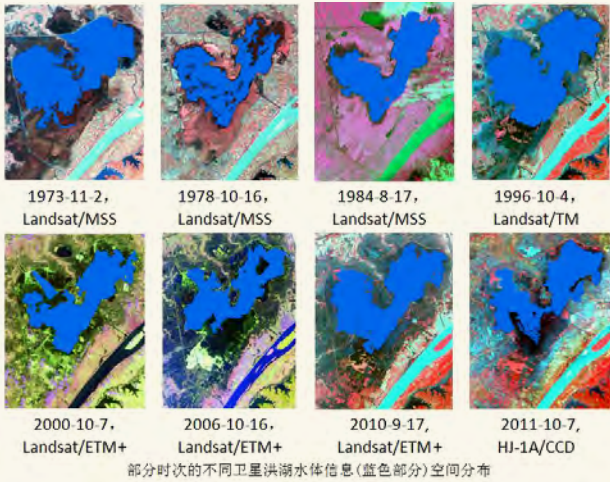
## 引言

湖泊湿地具有调蓄洪水、保护生物多样性等生态价值,对于调节气候、供水(蓄水)、水产业、航运等具有经济价值。在全球气候变化背景下,区域气温及降水条件等也发生着明显的变化,对湿地水文、生物地球化学过程、水质与水循环、湿地能量平衡与湿地生态功能等产生较大的影响。本项目以长江中游典型湖泊湿地——洪湖为例,通过分析过去 50 年洪湖湿地气候、水文与生态系统发展变化过程及湿地生态与影响因子之间的相关关系,初步弄清气候变化对长江中游典型湖泊湿地的影响及其生态脆弱性的表征,确定湿地退化的主导生态因子,探寻湿地退化的驱动机制,为长江中游湖泊湿地生态系统改善、修复、重建和生态安全提供科学依据。

## 一、技术路线

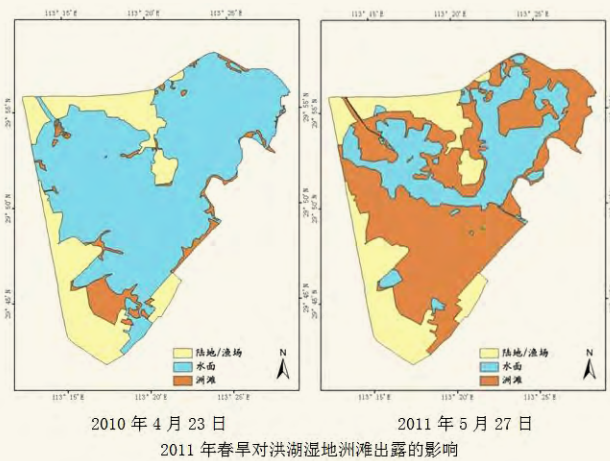


## 二、研究成果



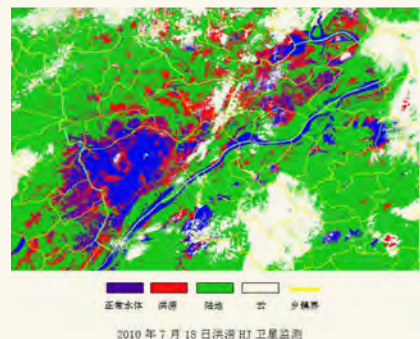
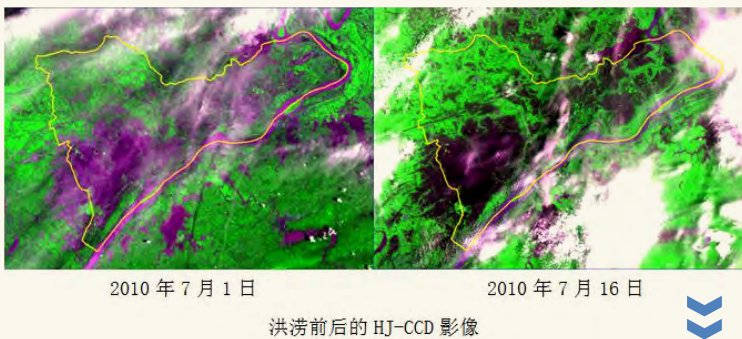
### 洪湖水面积年际变化明显

不同时段卫星影像水体信息显示, 不同年份的洪湖水面积有较大差异, 面积最大是 1996 年的 2.81 万  $\text{hm}^2$ , 最少是 2006 年的 1.31 万  $\text{hm}^2$ , 两个年份相差 1 倍多; 无论多雨年(降水距平  $>10\%$ )、少雨年(降水距平  $<-10\%$ ) 或年代平均之间的比较, 洪湖水面积有下降趋势。



### 春旱对洪湖湿地洲滩出露的影响

与 2010 年相比, 受旱情影响, 2011 年洪湖洲滩在各个区域都有所增加。受洪湖湖底地形的影响, 新增洲滩主要在湖区的外围岸线附近, 其中湖区南部及西南部新增洲滩面积最大, 湖心及东北部地区新增洲滩面积较小, 整体洲滩面积增加趋势明显。春旱导致的洲滩增加面积达  $10^8 \text{ km}^2$ , 约占整个洪湖湿地保护区面积的 1/4, 洪湖水面积比正常年份缩小了 1/3 以上。在新增的洲滩中, 大部分为原有的沉水植被分布区, 因而极端干旱条件对洪湖沉水植物造成了较大影响。同时, 受水位下降影响, 挺水植被面积有所增加, 而鱼类和底栖动物所受影响更大。



### 洪涝对洪湖湿地生态系统的影响

将洪涝灾害监测图像与洪湖市土地利用类型组合分析, 可以统计各乡镇不同土地利用类型的洪涝淹没面积。2010 年 7 月的这次洪涝造成耕地及湖泊、水库、坑塘淹没面积较大, 表明农业及水产养殖业受灾严重, 从行政区看, 受灾严重的乡镇或管理区有新滩镇、大沙湖管理区、大同湖管理区、黄家口镇、叉河镇等, 淹没率均在 30% 以上。

# 荆州市冬小麦产量动态预报方法对比研究

艾劲松<sup>1, 2</sup> 孙雨轩<sup>3</sup> 刘凯文<sup>1, 4</sup>

(1 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025; 2 荆州市气象局, 荆州 434020;  
3 长江大学资源与环境学院, 荆州 434025; 4 荆州农业气象试验站, 荆州 434025)

**摘要:** 利用湖北省荆州市1970—2016年日照、降水、温度及冬小麦生长期、产量数据, 采用作物丰歉指数、气候适宜指数方法, 开展了荆州市冬小麦产量动态预报, 并对两种预报方法的效果进行检验。结果表明, 丰歉指数方法的预报准确率高于气候适宜指数法, 计算过程也相对简单。在产量预报精度不下降的前提下, 4月10日可作为产量预报的最优预报日期。

**关键词:** 冬小麦, 丰歉指数, 气候适宜指数, 产量预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.004

## Comparison of Winter Wheat Output Forecast Methods in Jingzhou

Ai Jinsong<sup>1, 2</sup>, Sun Yuxuan<sup>3</sup>, Liu Kaiwen<sup>1, 4</sup>

(1 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 2 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020 3 College of Resources and Environment, Yangtze University, Jingzhou 434025 4 Jingzhou Agrometeorological Trial Station, Jingzhou 434025)

**Abstract:** The data for sunshine duration, precipitation, daily temperature, development stage and yield of winter wheat between 1970 and 2016 in Jingzhou were used in this research for establishing an output forecast method. A meteorological influence index and a climatic suitability index were tested to compare the forecast accuracy. The results showed that the prediction accuracy of the meteorological influence index method was higher than the climatic suitability index, and its calculation is relatively simple. Under the premise that the prediction accuracy is relatively stable, the optimal date for winter wheat harvest is April 10th in Jingzhou, according to the model forecast.

**Keywords:** winter wheat, meteorological influence index, climatic suitability index, output forecast

### 0 引言

荆州市位于长江中游、江汉平原腹地, 是全国重要商品粮基地, 秋播作物主要为小麦和油菜<sup>[1]</sup>。小麦是我国第二大粮食作物, 小麦的产量在我国农业粮食产量中占20%~50%, 平均产量已由20世纪50年代的750 kg/hm<sup>2</sup>左右, 逐渐提高到目前的5575.5 kg/hm<sup>2</sup>。<sup>[2]</sup>

早在20世纪80年代冬小麦产量的定量预报技术就已起步。当时的核心技术是分析气象条件与粮食产量的关系, 通过数理统计方法建立农业气象条件与气象产量的回归模型。近些年来, 随着现代农业生产的发展, 现代农业气象服务的能力进一步提升, 对产量预报精细、动态、量化的需求又提出了更高更新的

要求, 其中, 在冬小麦生长过程的任一时段, 提供动态、定量的产量预报信息是气象科技保障农业生产的重要职责之一。

现有的冬小麦产量预报方法主要包括气象统计学方法、农学方法、作物生长模型及遥感技术估产法等<sup>[3-10]</sup>。例如, 杜春英等<sup>[10]</sup>利用水稻生育期、气象资料和水稻生理指标结合, 根据相似系数和相似距离方法对水稻生育阶段的气象因子进行综合聚类分析, 建立黑龙江省水稻产量气象影响指数, 从而预测产量, 很好地预报天气气候条件对水稻产量丰歉的影响。刘伟昌等<sup>[11]</sup>、周守华等<sup>[12]</sup>分析了河南省冬小麦生态生理特征, 利用模糊数学等方法分别构建了温度、降水及日照时数适宜度函数。

作物产量预报的方法具有一定的区域和特定作物适用性, 需要经过比较分析, 选择适合本地区、本作物的最适宜预报方法。本文在以往的研究基础上, 采用综合诊断指标和气候适宜度两种方法, 结合冬小麦

收稿日期: 2018年6月21日; 修回日期: 2018年8月7日  
第一作者: 艾劲松(1972—), Email: 234154303@qq.com  
通信作者: 孙雨轩(1995—), Email: 2055730170@qq.com  
资助信息: 荆州市气象局科技发展基金项目(JZ201706)

的生长气象指标，分别构建产量动态预报模型。在此基础上开展小麦丰歉指数和气候适宜指数预报的效果对比，选择最优的荆州市冬小麦动态产量预报模型和最适宜的预报时间，应用于荆州市作物产量气象预报业务中。

## 1 资料来源与处理

### 1.1 资料来源

气象资料来源于荆州市气象局1970—2016年地面气象观测资料、荆州农业气象试验站1970—2016年农业气象观测资料；历史产量预报资料来源于荆州市统计局。其中，2012—2016年的资料用于回代检验。

#### 1) 产量资料处理

相关研究表明，相同区域内，相邻两年作物单产的变化主要是由相邻两年气候因素的差异引起的<sup>[13]</sup>。为此，对冬小麦单产进行如下处理：

$$\Delta Y_i = (Y_i - Y_{i-1}) / Y_{i-1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中， $i$ 代表第 $i$ 年， $i-1$ 为第 $i$ 年的上一年。 $\Delta Y_i$ 为第 $i$ 年与第 $i-1$ 年的冬小麦平均单产的丰歉值， $Y_i$ 和 $Y_{i-1}$ 分别为第 $i$ 年和第 $i-1$ 年冬小麦的平均单产。

#### 2) 发育期资料处理

冬小麦资料采用1970—2016年发育期及产量资料，包括播种、出苗、三叶、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、开花、乳熟、黄熟和成熟的日期。

### 1.2 冬小麦预报模型的建立

#### 1.2.1 基于丰歉指数法的产量预报模型

##### 1) 气候资料处理

从作物开始播种到每个月的1日、6日、11日、16日、21日和26日每隔5 d（或4 d、6 d）累积一次。分别计算候积温、候累积日照和候累积降水量。

在冬小麦的生长发育过程中，降水量的时间分布和降水量具有同等重要性，为了考虑降水量及其时间分布差异对冬小麦生长发育的影响，采用下式把累积降水量进行了标准化处理<sup>[14]</sup>。将处理后的降水量称为标准化降水量

$$\hat{P}_i = \frac{P_i}{S_{pi}}, \quad (2)$$

$$S_{pi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - \bar{P})^2}{m-1}}, \quad (3)$$

式中， $\hat{P}_i$ 为标准化降水量， $P_i$ 为累积降水量， $S_{pi}$ 为累积降水量的标准差， $m$ 为样本长度， $\bar{P}$ 为累积降水量平均值。

##### 2) 预报方法

利用欧氏距离和相关系数法计算预报年气象因子与历史上任意一年同一时段同类气象要素差异，建立

丰歉指数综合诊断指标。

欧氏距离计算方法如下

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (X_{ij} - X_{kj})^2}, \quad (4)$$

相关系数计算方法如下

$$r_{ik} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_i)(X_{kj} - \bar{X}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 \sum_{j=1}^N (X_{kj} - \bar{X}_k)^2}}, \quad (5)$$

丰歉指数计算方法如下

$$c_{ik} = \frac{r_{ik}}{d_{ik}} \times 100\%, \quad (6)$$

式(4)~(6)中， $i$ 为历史上的任意一年， $j$ 为气象要素符号， $X_{ij}$ 为预报年作物播种至发布预报时第 $j$ 个气象要素差异， $X_{kj}$ 为历史上任意一年同一时段同类气象要素差异， $N$ 为样本长度， $c_{ik}$ 为预报年与历史上某一年的丰歉指数。 $c_{ik}$ 越大，则预报年与历史上某一年的相似程度越高。

##### 3) 预报模型

丰歉指数法的预报年产量从丰歉指数序列中，选取丰歉指数最大的前9个年份作为相似年，以其对应的单产为依据，统计获得预报年的预报产量。其统计方法包括大概率法和加权法。

大概率法计算公式如下

$$\Delta Y = \begin{cases} \frac{\sum \Delta Y_{i(+)}}{l} & (l > m) \\ \frac{\sum \Delta Y_{i(-)}}{m} & (l < m) \end{cases}, \quad (7)$$

加权法计算公式如下

$$\Delta Y = \frac{\sum \Delta Y_{i(+)} \times a_{(+)}}{l} + \frac{\sum \Delta Y_{i(-)} \times a_{(-)}}{m}, \quad (8)$$

$$a_{(+)} = \frac{l}{3} \times 100\%, \quad (9)$$

$$a_{(-)} = \frac{m}{3} \times 100\%, \quad (10)$$

式中， $\sum \Delta Y_{i(+)}$ 为9个历史相似年型中结果为正值的累加， $\sum \Delta Y_{i(-)}$ 为9个历史相似年型中结果为负值的累加， $l$ 为预报结果为正值的个数， $m$ 为预报结果为负值的个数。

#### 1.2.2 基于气候适宜度的产量预报模型

##### 1) 温度适宜度处理

根据前人建立的作物温度适宜度模型，通过确定模型中冬小麦各生长发育期所需的最低温度 $t_l$ 、最高温度 $t_h$ 和适宜温度 $t_o$ <sup>[15-21]</sup>。

站点温度适宜度可以按照下式计算

$$F_{(t)} = \frac{(t_i - t_l) \times (t_h - t_i)^B}{(t_o - t_l) \times (t_h - t_o)^B}, \quad (11)$$

$$B = \frac{t_h - t_o}{t_o - t_l}, \quad (12)$$

式中,  $t_l$ 为日平均温度,  $t_h$ 为冬小麦生长过程所能承受的最高气温,  $t_o$ 为适宜温度,  $t_l$ 为最低温度。其中,  $t_l$ 、 $t_o$ 和 $t_h$ 各值如表1所示。

表1 冬小麦各时段的 $t_l$ 、 $t_o$ 和 $t_h$ 值<sup>[16]</sup>

Table 1 The constants for  $t_l$ ,  $t_o$  and  $t_h$  in each development stage

旬序	$t_l$	$t_o$	$t_h$
1—3	4	15	33
4—15	3	14	30
16—19	10	16	33
20—23	12	20	33

区域旬温度适宜度则用下面公式计算

$$F_{(t_{ij})} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F_{(ti)} \quad (13)$$

### 2) 日照适宜度处理

日照是冬小麦进行光合作用、提高产量及品质的必要条件<sup>[22]</sup>。本文以日照时数达可照时数的70%为临界点<sup>[23]</sup>, 70%以上为达到适宜状态。

区域日照适宜度计算公式如下

$$F_{(si)} = \begin{cases} 1 & S_i \geq S_0 \\ e^{-[(S_i - S_0)/b]^2} & S_i < S_0 \end{cases}, \quad (14)$$

式中,  $S_i$ 为实际日照时数(h),  $S_0$ 为日照百分率为70%的日照时数,  $b$ 为常数,  $S_0$ 和 $b$ 值见表2。区域旬日照适宜度计算方法如下

$$F_{(s_{ij})} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F_{(si)} \quad (15)$$

表2 冬小麦不同生育期的 $S_0$ 和 $b$ 值<sup>[24]</sup>

Table 2 The constant for  $S_0$  and  $b$  in each development stage of winter wheat

生育期	$S_0$	$b$
播种期	7.69	4.15
分蘖期	7.68	4.14
拔节期	8.55	4.61
抽穗期	9.21	4.93
成熟期	9.25	4.99

### 3) 降水适宜度处理

降水是土壤水分和作物水分的主要来源, 其对作物生长适宜性的影响具有层次性特点, 目前国际通用的降水适宜度模型大多是建立在作物蒸散量模型的基础之上, 作物处于不同的降水阶段会表现出不同的生理反应<sup>[25]</sup>。本文是根据中国气象局和荆州本地实际情况选择的适宜的降水适宜度模型。

降水适宜度计算公式如下

$$F_{(p)} = \begin{cases} 1 & -30\% \leq \text{某时段降水距平百分率} \leq 30\% \\ P/R & \text{某时段降水距平百分率} < -30\% \\ R/P & \text{某时段降水距平百分率} > 30\% \end{cases}, \quad (16)$$

$$\text{降水距平百分率} = (P - R) / R \times 100\%, \quad (17)$$

式中,  $P$ 为区域某旬降水量,  $R$ 为多年区域平均降水量。

### 4) 预报模型

气候适宜度计算公式

$$F_{i(c_{ij})} = \sqrt[3]{F_{(t_{ij})} \times F_{(p_{ij})} \times F_{(s_{ij})}}, \quad (18)$$

式中,  $F_{(t_{ij})}$ 、 $F_{(p_{ij})}$ 和 $F_{(s_{ij})}$ 分别是温度、降水和日照适宜度。

基于气候适宜度的预报模型的计算公式如下

$$F_{(c)} = \sum_{i=1}^n K_i F_{i(c_{ij})}, \quad (19)$$

式中,  $K_i$ 、 $F_{i(c_{ij})}$ 分别为第 $i$ 旬的权重系数和气候适宜度。

$$K_i = R_i / \sum_{i=1}^n R_i, \quad (20)$$

式中,  $R_i$ 为各旬气候适宜度与小麦单产丰歉值的相关系数,  $n$ 为冬小麦全生育期的旬数。

## 1.4 回代检验

运用准确率计算公式如下

$$\text{准确率} = \left( 1 - \left| \frac{Y_a - Y_b}{Y_b} \right| \right) \times 100\%, \quad (21)$$

式中,  $Y_a$ 为预报值,  $Y_b$ 为实际产量。

## 2 结果与分析

### 2.1 丰歉指数法产量动态预报

采用丰歉指数法计算出历年的综合诊断指标序列, 可分别采用大概率法和加权法两种统计方式, 计算预报年的产量。为了比较两种统计方法的效果, 采用两种方式分别对2012—2016年小麦产量动态预报做回代检验, 得到其预报准确率(表3)。

表3 丰歉指数产量动态预报准确率(%)

Table 3 The prediction accuracy of meteorological influence index method (%)

预报日期	方法	2016	2015	2014	2013	2012
3月20日	大概率法	65.32	89.40	75.43	78.24	92.67
	加权法	76.71	91.33	81.69	95.14	92.74
3月31日	大概率法	71.73	87.07	85.50	79.11	92.74
	加权法	90.69	88.87	86.77	95.47	93.21
4月10日	大概率法	69.41	91.25	67.17	73.11	92.74
	加权法	96.44	94.91	77.51	93.22	92.67
4月20日	大概率法	95.58	91.25	83.63	93.81	92.47
	加权法	96.45	94.92	89.70	96.73	91.05
4月30日	大概率法	67.59	92.17	76.83	66.26	91.84
	加权法	83.25	95.18	82.40	78.94	96.79

对比表明,采用加权法得到的产量预报准确率均显著高于大概率法。可见大概率法选取相似年型的误差较大,不能代表相似年型的气象产量平均水平。而加权法综合考虑了增产年份和减产年份的平均水平,数值波动较小,代表性优于大概率法。此外,随着预报日期越来越接近成熟收获期,产量预报的准确率更高,其中多数年份4月份预报的产量准确率均在90%以上。通过对比4月10日、20日、30日预报结果来看,三次的预报准确率差异较小,随着预报时间推迟,其准确率提高的幅度有限。由此可认为,荆州市冬小麦丰歉指数产量预报选择4月10日作为预报日期比较适宜。

## 2.2 气候适宜指数法产量动态预报

以2012—2016年作为回代检验年,分别以1—5月的月末为预报时间点进行预报,分析了预报回代检验准确率(表4)。

表4 气候适宜指数法预报回代检验准确率(%)  
Table 4 Climatic suitability index back generation test accuracy (%)

预报日期	2016	2015	2014	2013	2012
1月末	71.20	68.72	93.79	82.07	77.08
2月末	81.49	68.39	85.58	80.98	74.71
3月末	80.80	66.22	93.89	91.41	72.28
4月末	89.82	73.49	96.87	97.20	83.92
5月末	94.94	78.79	98.59	99.93	86.61

由上表可见,预报时间越接近收获期,产量预报准确率越高,这与丰歉指数法的产量动态结论相似。但从预报效果来看,年际间预报准确率差异较大,2015年预报准确率低于80%,2012年预报准确率最高也仅为86.61%。可见,丰歉指数预报模型的预报效果相对优于气候适宜指数法。这也可能与气候适宜指数法中计算温度、日照适宜度所需参数值有关。本文采用的预报参数直接引用其他地区的值,未经过本地化订正,存在一定误差,导致预报结果有较大差异。

## 3 结论与讨论

在产量预报方法选择方面,综合比较来看,丰歉指数法的预报效果优于气候适宜指数法。在小麦产量动态预报时间选择方面,1—3月产量预报准确率相对较低,4—5月的产量预报准确率均在90%以上。其中,4月10日、20日、30日的丰歉指数产量预报准确率差异较小。此外,荆州市冬小麦品种一般为半冬性或偏春性,一般在5月中下旬收获。为了兼顾预报准确率和尽量提前预报时效,可以选择4月10日作为产量预报的预报日期。

对于气候适宜性方法的应用,本文仅参考其他地方的方法,直接引用相关参数指标,未做本地化订正,导致预报效果低于丰歉指数法,且预报准确率稳定性较差,年际差异大。后期有必要进一步开展指标订正,进一步检验该方法的适用性。

作物产量除了受气象条件影响外,品种、土壤、施肥水平等因素的影响更大。此外,荆州市地处江汉平原易涝易渍地区。长期以来,小麦产量水平普遍低于其他小麦主产区,而且赤霉病等病虫害为害较严重,品质较差。这些因素都对产量预报准确率产生一定影响,在开展产量预报中也应做相应的考虑。

## 参考文献

- [1] 韩昌友.荆州市粮食生产潜力分析及发展对策.农村经济与科技,2014,25(8):62-63.
- [2] 孟自力,陈昆,闫向泉,等.气象因子变化及其对小麦生产的影响.安徽农业科学,2018,46(7):27-29.
- [3] 成林,刘荣花.农学模式在冬小麦产量动态预报中的应用.气象与环境科学,2017,40(2):28-32.
- [4] 尹东.农业产量预报技术的研究和应用.干旱气象,2007(2):12-16.
- [5] 黄晚华,薛昌颖,李忠辉,等.基于作物生长模拟模型的产量预报方法研究进展.中国农业气象,2009,30(S1):140-143,147.
- [6] 杨霏云,朱玉祥,李文科,等.统计方法在中国农业气象中的应用进展.气象与环境科学,2016,39(3):121-129.
- [7] 王春玲,申双和,王润元,等.中原地区地温对冬小麦发育期、生长量和产量的影响.干旱气象,2012,30(1):66-70.
- [8] 陈振林,张建平,王春乙,等.应用WOFOST模型模拟低温与干旱对玉米产量的综合影响.中国农业气象,2007(4):440-442,445.
- [9] 帅细强,王石立,马玉平,等.基于水稻生长模型的气象影响评价和产量动态预测.应用气象学报,2008(1):71-81.
- [10] 杜春英,李帅,王晾晾,等.基于历史产量丰歉影响指数的黑龙江省水稻产量动态预报.中国农业气象,2010,31(3):427-430.
- [11] 刘伟昌,陈怀亮,余卫东,等.基于气候适宜度指数的冬小麦动态产量预报技术研究.气象与环境科学,2008(2):21-24.
- [12] 周守华,黄永平,熊勤学.江汉平原盛夏冷害的发生趋势和气候背景.中国农业气象,2008(2):234-236.
- [13] 郑昌玲,王建林,宋迎波,等.大豆产量动态预报模型研究.大豆科学,2008,27(6):943-948.
- [14] 罗蒋梅,王建林,申双和,等.影响冬小麦产量的气象要素定量评价模型.南京气象学院学报,2009,32(1):94-99.
- [15] 李曼华,薛晓萍,李鸿怡.基于气候适宜度指数的山东省冬小麦产量动态预报.中国农学通报,2012,28(12):291-295.
- [16] 刘伟昌,陈怀亮,余卫东,等.基于气候适宜度指数的冬小麦动态产量预报技术研究.气象与环境科学,2008,31(2):21-24.
- [17] 王建林,赵四强.全国棉花产量预报模式.气象,1990,16(5):26-30.
- [18] 宋迎波,王建林,陈晖,等.中国油菜产量动态预报方法研究.气象,2008,34(3):93-99.
- [19] 马树庆.吉林省农业气候研究.北京:气象出版社,1994.
- [20] 宋迎波,王建林,杨霏云.粮食安全气象服务.北京:气象出版社,2006.
- [21] 俞芬,千怀遂,段海来.淮河流域水稻气候适宜度及其变化趋势分析.地理科学,2008,28(4):537-542.
- [22] 王德燕.天长市一季稻气候适宜度及其变化特征分析.安徽农业科学,2018,46(4):159-162.
- [23] 黄璞.中国红黄壤地区作物生产的气候生态适应性研究.自然资源学报,1996,11(4):340-345.
- [24] 赵峰,千怀遂,焦士兴.农作物气候适宜度模型研究.资源科学,2003,11(6):76-82.
- [25] 刘畅.气候变化对京津冀冬小麦的影响研究.南京:南京信息工程大学硕士学位论文,2017.

# 农业气候年景评估指数构建及在江汉平原的应用

秦鹏程<sup>1, 3</sup> 夏智宏<sup>2, 3</sup> 陈伟亮<sup>2, 3</sup>

(1 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2 荆州市气象局, 荆州 434020;

3 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025)

**摘要:** 基于分层指标构建综合评估指数是开展气象服务的基础和主要手段之一。从农业气候资源优劣和农业气象灾害发生程度两个方面, 基于气候适宜度和气象灾害指标分别构建指标体系, 并采用百分位数进行等级划分, 建立了农业气候年景评估综合指数。以江汉平原为例, 从气候变化背景下的农业气候年景趋势演变, 以及任意年份农业气候年景等级评定, 展示了农业气候年景评估指标体系在业务服务中的应用。结果表明: 该指标体系能够客观反映农业气候年景的年际差异以及气候变化背景下的演变特征, 内涵丰富且物理意义明确, 便于公众理解和服务宣传, 可以满足农业气象及生态气象服务的需求。

**关键词:** 农业气候资源, 农业气象灾害, 农业气候年景, 江汉平原

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.005

## Construction of a Comprehensive Index for Assessing Agroclimatic Patterns by Year and Application on the Jiangnan Plain

Qin Pengcheng<sup>1,3</sup>, Xia Zhihong<sup>2,3</sup>, Chen Weiliang<sup>2,3</sup>

(1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074 2 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020

3 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025)

**Abstract:** Construction of a comprehensive evaluation index based on hierarchical indicators is important for meteorological services. Taking into consideration the degree of agroclimatological resources and agrometeorological disasters, a general framework and comprehensive index for the assessment of agroclimatic patterns by year was proposed based on the climate suitability functions and agrometeorological disaster indices; a division was made according to percentiles. The proposed index was then applied to a case study in the Jiangnan Plain, demonstrating the potential for a long-term climate change assessment and ranking of the patterns for each specific year. Results showed that the comprehensive index reflected the interannual variability of agroclimatic conditions, as well as the temporal trends in the background of climate change. With a relatively comprehensive content and sound physical basis, the indicator system was convenient for public understanding, and thus could meet the needs of agricultural and ecological meteorology operations.

**Keywords:** agroclimatic resources, agrometeorological disasters, agroclimatic year patterns, Jiangnan Plain

### 0 引言

气候年景评估是对一年(或一个生产周期)气候要素异常程度及其对国民经济影响利弊的综合评价, 是开展气候以及气候变化对敏感行业影响评估的基础<sup>[1]</sup>。农业是一个高度依赖于天气气候条件的敏感性行业, 农业气候年景的评估是气候评估业务的重要内容之一, 而作物播种前开展的农业气候年景预测和展望可为农业生产布局安排、资源配置和灾害防御提供

重要参考。

20世纪90年代以来, 为了探索量化的作物年景评价方法, 相关学者相继以作物产量丰歉、综合气象要素、气象灾害灾情等为指标建立了评价模型和指标。如王建林等<sup>[2]</sup>综合逐旬气象要素建立了棉花年景评价方法, 娄秀荣等<sup>[3]</sup>以各生育期气象要素距平为指标建立了晚稻气候年景评价方法, 孙家民等<sup>[4]</sup>利用降水距平绝对值累计方法, 从旱涝灾害等级的角度开展了中国农业气候年景评估研究, 吴义城等<sup>[5]</sup>、刘敏等<sup>[6]</sup>先后对湖北省旱涝与中稻、早稻、棉花年景进行了系统分析, 吴义城等<sup>[7]</sup>以作物生育期内的气温、积温、日照及降水为指标, 从气候异常度角度建立了农作物

收稿日期: 2018年5月31日; 修回日期: 2018年7月30日

第一作者: 秦鹏程(1986—), Email: qinpengcheng027@163.com

资助信息: 湖北省气象局科技发展基金重点项目(2018Z06)

气候年型划分方法, 石磊等<sup>[1]</sup>、王胜等<sup>[8]</sup>分别以气象灾害和气候适宜度指标构建了安徽省气候年景和作物年景评估指标。上述研究为开展农业气候年景评价提供了重要依据, 但各类方法局限于单方面因子的年际变异描述, 以产量丰歉为依据评价气候年景, 忽略了农业生产技术水平提高及防灾救灾措施对不利气象条件的补偿作用, 可能低估气候的不利影响; 以气象灾害灾情等级为基础的农业气候年景评价, 考虑的灾害类型尚不全面, 且未反映光、温、水等气候资源的优劣。

综合前人研究成果, 农业气候年景的内涵应至少包括农业气候资源优劣和气象灾害发生程度两个方面, 为此, 本文以光、温、水气候适宜度为指标, 建立作物生长季农业气候资源等级评价指标, 以旱、涝、冷、热等气象灾害指数为指标, 建立农业气象灾害等级评价指标, 并通过有效综合建立农业气候年景综合指数。最后, 以江汉平原为例, 对农业气候年景评估指数在气候变化评估以及业务服务中的应用进行了案例分析。

## 1 农业气候年景指数构建

### 1.1 农业气候资源评价

#### 1.1.1 气候适宜度模型

根据农作物生长发育对气候资源的需求和生理特点, 可采用模糊数学理论中的隶属函数对农作物气候适宜度及气候资源有效性进行量化, 参考已有研究成果<sup>[8-12]</sup>, 分别建立气温、降水和日照的气候适宜度模型如下

$$S(T) = \frac{(T - T_{\text{base}})(T_{\text{top}} - T)^B}{(T_{\text{opt}} - T_{\text{base}})(T_{\text{top}} - T_{\text{opt}})^B}, \quad (1)$$

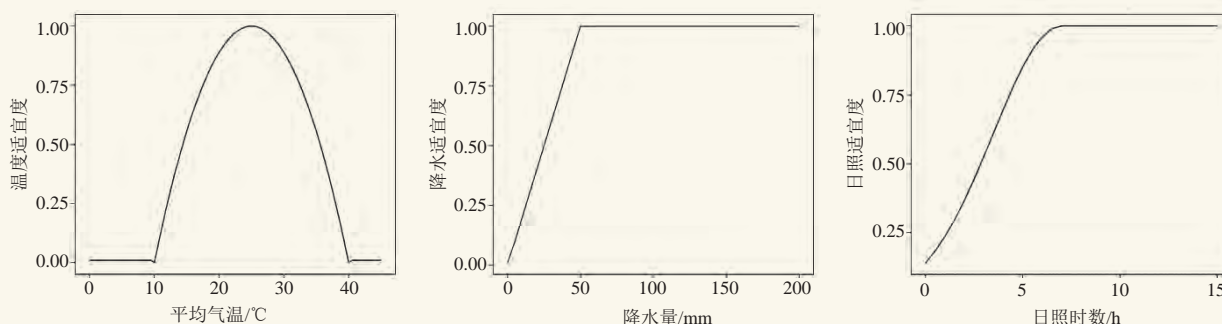


图1 农作物温度、降水、日照气候适宜度曲线

Fig.1 The climatic suitability curves of crop for temperature, precipitation, and sunshine duration

#### 1.1.2 气候资源评价

为了综合评价光、温、水气候资源及其匹配程度, 采用几何平均法对各气候要素单因子适宜度求取平均值构建综合气候适宜度模型<sup>[11]</sup>, 计算公式为

式中,  $S(T)$ 为作物生长发育的温度适宜度,  $T$ 为日平均气温,  $T_{\text{top}}$ 、 $T_{\text{base}}$ 、 $T_{\text{opt}}$ 分别为作物生长发育所需的上限温度、下限温度和最适温度。 $B$ 为形状参数, 计算公式为:  $B = (T_{\text{top}} - T_{\text{opt}}) / (T_{\text{opt}} - T_{\text{base}})$ 。

$$S(R) = \begin{cases} \frac{R_e}{R_0} & R_e < R_0 \\ 1 & R_e \geq R_0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $S(R)$ 为作物生长发育的降水适宜度,  $R_0$ 为作物需水量的临界值,  $R_e$ 为当前日有效降水量, 是对前期降水量的加权累积值, 计算公式为<sup>[13]</sup>

$$R_e = \sum_{n=0}^N w_n R_n, \quad (3)$$

式中,  $n$ 为距离当前的日数,  $R_n$ 为当前日期前第 $n$ 天的日降水量,  $w_n$ 为权重系数, 可近似表示为:  $w_n = (1-a)a^n$ ,  $a$ 为降水衰减参数, 取值0.95。

$$S(S) = \begin{cases} e^{-[(S-S_0)/b]^2} & S < S_0 \\ 1 & S \geq S_0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $S(S)$ 为作物生长发育的日照适宜度,  $S_0$ 为作物生长发育达到适宜状态所需的临界日照时数,  $b$ 为形状参数。

$S(T)$ 、 $S(R)$ 、 $S(S)$ 的形状分布如图1所示, 其值域介于0~1, 因此不同气候要素的适宜度具有可比性。受作物三基点温度生理特性的影响, 当平均气温低于或高于最适温度时, 热量条件的有效性下降, 因此温度适宜度曲线呈抛物线形式, 降水和日照适宜度则呈现逐渐增加并趋于稳定的形式, 当降水或日照低于最适需求量时其适宜度为小于1的数值, 并逐渐升高, 达到最适需求量以上时其适宜度为1。

$$S = \sqrt[3]{S(T) \times S(R) \times S(S)}. \quad (5)$$

为了综合评价某地一年气候资源总体状况, 根据该地区农业种植结构, 选择主要农作物及其生长发育时段, 分作物分别计算各作物每日温度、降水、日照

适宜度及其综合气候适宜度，然后以作物种植面积比例为权重，计算该地每日的气候适宜度，最后将一年内各日气候适宜度平均值作为该年度的气候适宜度。

通过对历年气候适宜度进行排序，采用百分位法建立气候资源等级划分依据，分别按照25%和75%百分位数对应的适宜度值，将气候资源年景划分为偏差、一般、偏好年景。

### 1.2 农业气象灾害年景评价

综合考虑作物生长季内影响生长发育、产量形成以及农事活动开展的旱、涝、冷、热等气象灾害类型，

利用相关农业气象灾害指标或模型建立主要农业气象灾害发生程度的量化表达指数（表1），统计历年各类气象灾害过程强度（年内多次过程取各过程强度之和），通过经验累积频率转换或离差标准化将其归一化为0~1的无量纲指标，以历年实际灾情统计资料为基础，根据农作物受灾面积确定不同灾害的权重系数，最后将归一化后的各灾害指数进行加权平均，构建农业气象灾害年景指数。采用百分位法建立农业气象灾害年景等级划分依据，分别按照25%、75%百分位数将气象灾害年景划分为偏轻、一般和偏重年景。

表1 主要农业气象灾害及气象指标  
Table 1 Main agrometeorological disasters and meteorological indices

灾害名称	发生时段及影响作物	气象指标
干旱	年内任意时间均可能发生，影响所有作物	综合气象干旱指数（MCI） <sup>[14]</sup>
洪涝	主要发生在汛期4—9月，影响所有作物	有效降水指数（EP） <sup>[15]</sup>
湿渍害	主要发生在春、秋季，影响油菜、小麦作物	权重湿润指数（WMI） <sup>[16]</sup>
连阴雨	主要发生在春、秋季，影响油菜、小麦及春播作物	日降水量≥0.1 mm持续3 d及以上 <sup>[17]</sup>
高温热害	主要发生在盛夏期间，影响早、中稻和玉米作物	日平均气温≥30℃，或日最高气温≥35℃ <sup>[17]</sup>
倒春寒	主要发生在春季，影响春播作物	《倒春寒气象指标》国家标准 <sup>[18]</sup>
五月寒	主要发生在5月下旬—6月上、中旬，影响早稻孕穗抽穗	日平均气温<20℃持续3 d及以上 <sup>[17]</sup>
寒露风	主要发生在9月下旬—10月上、中旬，影响晚稻抽穗	日平均气温<22℃持续3 d及以上 <sup>[17]</sup>
盛夏低温	主要发生在6—8月，影响中稻孕穗抽穗	日平均气温<20℃持续3 d及以上 <sup>[17]</sup>
低温冻害	主要发生在冬、春季，影响油菜、小麦、露地蔬菜等	日最低气温低于作物生长发育临界温度 <sup>[17]</sup>

### 1.3 农业气候年景综合评价

对农业气候资源年景和气象灾害年景等级分别进行打分：一般年景为0，偏好或偏轻年景为1，偏差或偏重年景为-1，将两类年景得分累积，若累积得分等于2，则认定该年度农业气候年景等级为较好年景，累积得分等于1为一般偏好年景，累积得分等于0为一般年景，累积得分等于-1为一般偏差年景，否则为偏差年景。

## 2 江汉平原农业气候年景评估应用

江汉平原地处长江中游，由长江及其支流汉江冲积而成，土壤肥沃，水源充足，气候温和，农业生产自然条件优越，是我国重要的粮、棉、油、鱼生产基地，素有“鱼米之乡”之称。同时，因受季风气候以及地形、地理位置制约，雨季降水集中、洪涝灾害多发，盛夏在副热带高压控制下，常出现持续晴热高温天气，造成农作物高温热害，春、秋季易受冷空气南下影响，常发生阴雨湿渍灾害，农业年景因气候资源和气象灾害的程度不同而呈现较大的年际变异，是制约粮食生产稳定性的主要限制因子之一。

根据江汉平原分县作物种植面积及产量统计资料，选择油菜、小麦、早稻、中稻、晚稻、玉米、棉花等主要农作物为农业气候年景评估对象，利用区

域内农业气象观测站作物发育期观测资料确定各作物的平均发育期，结合《大宗作物气象服务手册》<sup>[19]</sup>、《湖北省公共气象服务手册》<sup>[17]</sup>以及前人相关研究成果<sup>[8-11]</sup>，确定各作物气候适宜度模型的参数以及相关灾害指标，利用区域内16个气象台站1961—2017年逐日气象观测资料，分别计算历年气候资源和气象灾害年景指数，在此基础上通过区域平均和等级划分建立江汉平原农业气候年景序列。

### 2.1 农业气候资源评价

图2为江汉平原1961—2017年逐年温度、降水、日照适宜度序列，从图中可以看出，适宜度指数的年际间具有明显波动，能够反映气候资源优劣的年际差异，其中温度适宜度数值介于0.58~0.7，降水适宜度介于0.6~0.9，日照适宜度介于0.45~0.65，三者中以降水适宜度的变化幅度最大，这是由于降水的年际变异大，且降水资源不足引起水分亏缺通常会持续一定的时间，日照和温度适宜度年际变化相对较小，表明本地区热量和光照资源相对稳定。从图中还可以看出，温度和日照适宜度在近60年中呈现明显的趋势性变化，这与近百年全球气候变化的背景有关，研究表明近60年来江汉平原气温呈显著上升趋势，与此同时热量资源有所改善，但地表总辐射呈显著下降趋势，

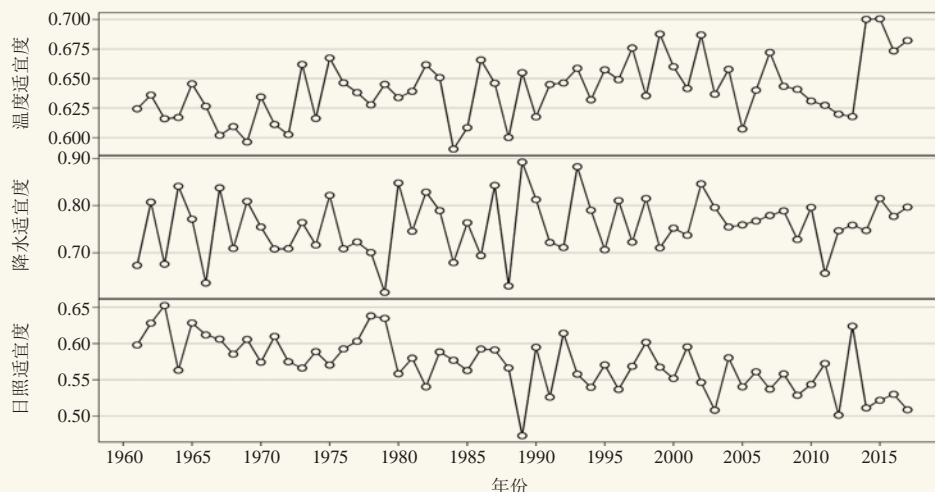


图2 1961—2017年江汉平原农作物温度、降水、日照适宜度变化

Fig.2 Temporal changes in climatic suitability of temperature, precipitation, and sunshine for the Jiangnan Plain from 1961 to 2017

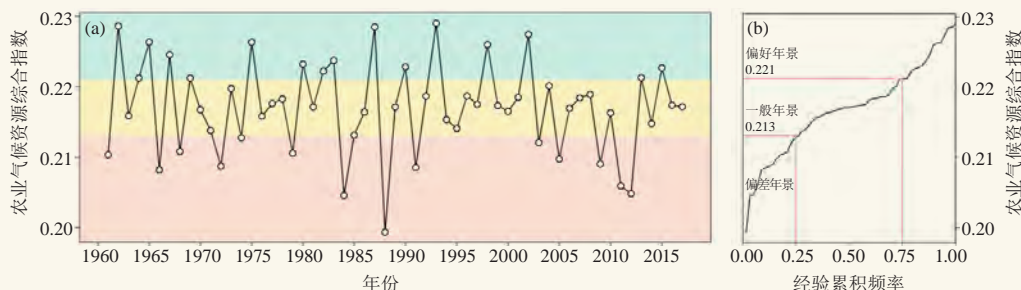


图3 1961—2017年江汉平原 (a) 农业气候资源综合指数时间演变及 (b) 年景等级划分

Fig.3 Temporal change of (a) comprehensive index of agroclimate resources and (b) classification of patterns by year for the Jiangnan Plain from 1961 to 2017

导致光照资源有减少趋势。综合光、温、水及其匹配状况的气候适宜度指数序列(如图3a所示),并基于百分位数划分农业气候年景等级(图3b),统计表明1961—2017年农业气候资源共计有偏好年景16年,偏差年景15年,一般年景26年,不同年代间20世纪70年代和21世纪以来,以偏差或一般年景为主,20世纪90年代以偏好年景为主,20世纪80年代气候资源变化幅度最大。可见,在气候变暖背景下,尽管江汉平原热量资源有所增加,但由于光照资源的下降以及降水资源的年际变异,导致农业气候资源总量及其匹配协调的有效性下降,表明气候变化对江汉平原农业气候资源的影响总体以不利为主。

## 2.2 农业气象灾害年景

图4是基于表1农业气象灾害指标和模型反演的1961—2017年江汉平原主要农业气象灾害时间序列,从图中可以看出,江汉平原地区发生频率较高的农业气象灾害主要有暴雨洪涝、干旱、湿渍害、连阴雨、高温热害、倒春寒等,几乎每年均有发生,五月寒、

寒露风、盛夏低温及低温冻害发生频率相对较低。近几十年来在气候变暖背景下,低温冷害、冻害的发生频率明显减少,高温热害的频率和强度有所增加,春、秋季连阴雨和湿渍害的强度在21世纪以来有所减弱,暴雨洪涝和干旱的发生频率和强度没有明显的趋势性变化。图5为农业气象灾害综合指数的时间序列及其年景等级,从图中可以看出,20世纪60年代至70年代前期,气象灾害年景以一般和偏差年景为主,期间寒露风、低温冻害和连阴雨灾害较重,20世纪70年代后期至90年代前期,气象灾害年景的年际变幅较大,期间出现了1961年以来最严重的暴雨洪涝(1983年)和湿渍害(1991年),21世纪以来农业气象灾害年景以一般或偏好年景为主,这与低温冷害、冻害及湿渍害、连阴雨的强度减弱有关,但部分年份(如2016年)由于个别气象灾害异常偏重,气象灾害年景总体偏差,且强度居历史前列。

## 2.3 农业气候年景综合评价

综合农业气候资源和农业气象灾害年景建立农业



图4 1961—2017年江汉平原主要农业气象灾害时间演变  
Fig.4 Temporal changes of main agrometeorological disasters

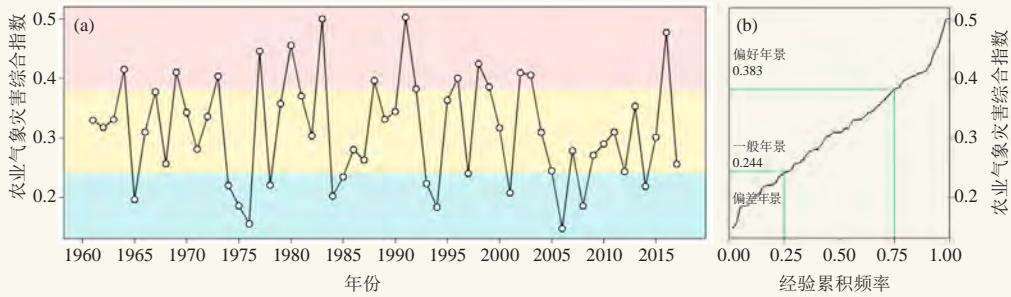


图5 1961—2017年 (a) 江汉平原农业气象灾害综合指数时间演变及 (b) 年景等级划分  
Fig.5 Temporal change of (a) comprehensive index of agrometeorological disasters and (b) classification of patterns by year for the Jianghan Plain from 1961 to 2017

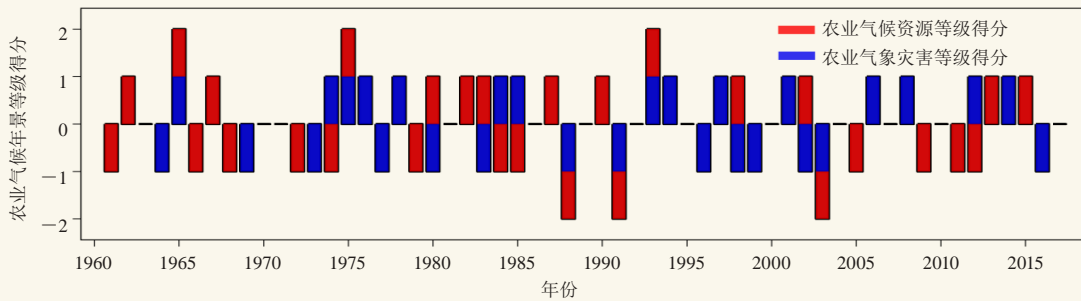


图6 1961—2017年江汉平原农业气候年景等级  
Fig.6 Agroclimatic patterns by year for the Jianghan Plain from 1961 to 2017

气候年景等级（如图6所示），江汉平原1961—2017年较好年景有3年（1965，1975，1993年），上述年份农业气候资源总量和匹配程度较好，农业气象灾害发生程度总体偏轻，较差年份有3年（1988，1991，

2003年），上述年份农业气候资源总量和匹配程度较差，且农业气象灾害发生程度偏重，一般偏好和一般偏差年景各有15年，一般年景有21年。以2017年为例，综合图2~6可以看出，该年度温度适宜度处于历

史较高水平, 热量条件较好, 降水适宜度为一般偏好等级, 基本满足农业用水需求, 但日照适宜度接近历史最低水平, 日照条件异常偏差, 农业气候资源总体属一般年景, 年内高温热害和连阴雨灾害较为突出, 部分时段还出现了暴雨洪涝、湿渍害、干旱、倒春寒、五月寒、寒露风和盛夏低温灾害, 但发生程度相对较轻, 农业气象灾害年景总体属一般年景, 综合农业气候资源状况和气象灾害发生程度, 2017年江汉平原农业气候年景为一般年景。

### 3 结论与讨论

本文从农业气候资源优劣和农业气象灾害发生程度两个方面, 基于气候适宜度和气象灾害指标分别构建指标体系, 并采用百分位数进行等级划分, 建立了农业气候年景评估指标体系和综合指数。该指数综合反映了农业生产的气候资源总量和匹配程度, 以及不利气象灾害的影响程度, 物理意义清晰、易于扩展和应用, 可作为农业气象及生态气象业务服务指标。

以江汉平原为例, 利用农业气候年景评估指标体系对1961—2017年江汉平原农业气候资源、农业气象灾害以及农业气候综合年景的时间演变特征分析表明, 江汉平原农业气候资源、气象灾害发生程度具有明显的年际和年代际变化, 在气候变暖背景下, 江汉平原热量资源有所增加, 降水资源变化不明显, 但光照资源明显减少, 农业气候资源总量及其匹配协调的有效性下降; 随着气候变暖, 江汉平原倒春寒、五月寒、寒露风、盛夏低温及低温冻害等农业气象灾害发生频率明显减少, 高温热害的频率和强度有所增加; 由于气候变化对农业气候资源和气象灾害影响的复杂性, 近60年来江汉平原农业气候综合年景虽有波动, 但未呈现明显的趋势性变化。以2017年为例, 对开展任意年份农业气候年景评估示例, 该年度热量条件较好, 降水资源一般, 光照资源偏差, 农业气候资源属一般年景, 年内出现严重的高温热害和连阴雨灾害, 但暴雨洪涝、湿渍害、干旱等其他灾害发生程度较轻, 农业气象灾害总体为一般年景, 综合农业气候资源状况和气象灾害发生程度, 2017年江汉平原农业气候年景为一般年景。

如何界定农业气候年景的优劣尚没有统一的标准<sup>[4, 20-21]</sup>。以往研究通常以产量丰歉作为年景划分的依据<sup>[21-22]</sup>, 但粮食产量是气候条件与农业生产管理多

方因素综合的结果, 因此农业气候年景不等同于农业年景, 此外, 不同农作物产量水平和经济价值存在差异, 当用于评价某地某年气候年景的总体状况时, 如何确定不同作物的权重是年景划分的难点, 也是影响年景评价结果科学性和公众理解、接受程度的关键。本文从农业气候年景的内涵出发, 基于气象指标建立了年景评估和划分方法, 是对农业气候年景评估技术体系的有效补充, 由于缺乏必要的验证, 其应用效果尚需要在业务应用和实践中逐步检验。本文提出的指标体系不仅适用于年度气候影响评价, 同时可应用于单作物的气候年景评价和产量预报, 在不同地区应用时根据需要可进一步对指标体系进行细化和完善。

#### 参考文献:

- [1] 石磊, 王胜, 盛绍学. 近50年安徽省气候年景评估方法. 地理研究, 2012, 31(9): 1580-1588.
- [2] 王建林, 大华杰. 棉花年景评价方法. 气象, 1997, 23(4): 25-28.
- [3] 姜秀荣, 侯英雨. 全国晚稻气候年景评价方法研究. 气象, 2003, 29(2): 21-25.
- [4] 孙家民, 黄朝迎. 中国农业气候年景的评估及预测. 应用气象学报, 2005, 16(S1): 111-115.
- [5] 吴义城, 倪国裕, 刘敏. 湖北省中稻年景与旱涝灾害. 湖北气象, 1995, 14(3): 13-15.
- [6] 刘敏, 吴义城, 柯怡明, 等. 湖北省春夏旱涝特征对早稻年景的影响. 湖北气象, 1995, 14(3): 10-12.
- [7] 吴义城, 袁业物, 任耀武, 等. 农业气候影响评价: 农作物气候年型划分方法GB/T 21986-2008. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-6.
- [8] 王胜, 田红, 党修伍, 等. 安徽淮北平原冬小麦气候适宜度分析及作物年景评估. 气候变化研究进展, 2017, 13(3): 253-261.
- [9] 易灵伟, 杨爱萍, 刘文英, 等. 湖北中稻气候适宜度指标构建及其对产量影响的定量评估与应用. 中国农学通报, 2015, 31(23): 109-115.
- [10] 张建军, 陈晓艺, 马晓群. 安徽油菜气候适宜度评价指标的建立与应用. 中国农学通报, 2012, 28(13): 155-158.
- [11] 黄淑娥, 田俊, 吴慧峻. 江西省双季水稻生长季气候适宜度评价分析. 中国农业气象, 2012, 33(4): 527-533.
- [12] 魏端江, 宋迎波, 王鑫. 基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法. 应用气象学报, 2009, 20(5): 622-627.
- [13] Lu E. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: Rationale. Geophysical Research Letters, 2009, 36(12): L12707.
- [14] 秦鹏程, 刘敏. 气象干旱诊断评估方法及其在长江中下游地区的应用. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1969-1976.
- [15] 秦鹏程, 刘敏, 李兰. 有效降水指数在暴雨洪涝监测和评估中的应用. 中国农业气象, 2016, 37(1): 84-90.
- [16] 秦鹏程, 刘志雄, 万素琴, 等. 基于权重湿润指数的作物湿渍害监测与检验. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 328-334.
- [17] 崔讲学. 湖北省公共气象服务手册. 北京: 气象出版社, 2014: 1-256.
- [18] 吴义城, 杨文刚, 黄永学, 等. 倒春寒气象指标GB/T 34816-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-6.
- [19] 毛留喜, 魏丽. 大宗作物气象服务手册. 北京: 气象出版社, 2015.
- [20] 符琳. 东北三省农业气候年景评估研究. 北京: 中国气象科学研究院学位论文. 2011.
- [21] 徐敏, 徐经纬, 高苹, 等. 基于海温和大气环流特征量的农业气候年景预测. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 435-439.
- [22] 魏丽, 陆叔鸣. 农业气候年景预测和决策服务系统的研究. 应用气象学报, 1997, 8(2): 97-102.

# 一种机器学习方法在湖北定时气温预报中的应用试验

谭江红<sup>1, 2</sup> 陈伟亮<sup>1, 2</sup> 王珊珊<sup>3</sup>

(1 荆州市气象局, 荆州 434020; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025;  
3 武汉中心气象台, 武汉 430074)

**摘要:** 利用2015—2017年湖北89个气象站地面观测温度、欧洲中心再分析资料和0~12 h预报资料回归模式输出要素与地面气温之间的关系, 建立了LightGBM模型, 并在2018年数据集上进行测试。结果表明, 定时气温平均绝对误差由模式本身的1.8 °C下降到1.1 °C, 2 °C以内预报准确率由65.9%上升至86.6%, 决定系数(拟合优度)高达0.97。该模型已经在武汉中心气象台业务化, 初步选取定时气温中的极值进行2018年2—6月预报评分, 24 h高、低温预报准确率分别为76.9%和91.4%, 在客观产品中排名前列, 较数值预报模式产品提升明显, 低温预报准确率超过预报员水平。LightGBM作为一个年轻的机器学习框架, 在气象要素预报方面具备良好的应用前景。

**关键词:** 机器学习, 决策树, LightGBM, 气温, 预报试验

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.006

## Using a Machine Learning Method for Temperature Forecast in Hubei Province

Tan Jianghong<sup>1, 2</sup>, Chen Weiliang<sup>1, 2</sup>, Wang Shanshan<sup>3</sup>

(1 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020 2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 3 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

**Abstract:** A prediction model using LightGBM was established according to a regression analysis using ground observations of temperature, ERA-Interim data and 0-12 h forecast data. Tests on the data set from January to April in 2018 showed that the mean absolute error of the temperature decreased from 1.8 °C to 1.1 °C with the EC model, the prediction accuracy increased from 65.9% to 86.6% and the coefficient of determination was 0.97. This model has been operationalized by the Wuhan Central Meteorological Observatory. The forecast score from February to June in 2018 showed that the accuracy of the highest and lowest temperature forecasts were 76.1% and 91.5%, respectively, which was significantly higher than that of the numerical weather prediction, and the minimum temperatures were better than current forecasters. As a young machine learning frame, LightGBM has strong prospects for application in meteorological forecasting.

**Keywords:** machine learning, decision tree, LightGBM, temperature, forecast experiment

### 0 引言

机器学习是人工智能的重要解决方案, 包括监督学习和非监督学习<sup>[1]</sup>。天气预报中的很多问题都可以转化为标签已知的监督学习问题: 标签即待预报量, 机器学习中的特征即预报因子。机器学习模型具有一定黑盒性, 但其使用效果经常出乎意料。

经验表明, 代表全球数值模式最高水平的欧洲中期天气预报中心(以下简称“欧洲中心”)在形势预报方面日益进步, 达到了非常高的可用水平, 预报员在订正形势预报方面操作空间很小, 但数值预报的要素误差仍有较大订正空间。随着人工智能浪潮的来临, 客观化智能化预报是未来天气预报的发展方向。2017年湖北省气象局开始开展智能网格预报业务。在湖北地区, 黄治勇等<sup>[2]</sup>使用了带海拔高度的距离权重温度插值方法和灰色预测模型来预报湖北温度。另外一些见诸文献的方法还包括卡尔曼滤波订正模式温度预报<sup>[3]</sup>、神经网络方法中的BP网络<sup>[4]</sup>、Barnes插值<sup>[5]</sup>、时效偏差消除<sup>[6]</sup>、统计降尺度<sup>[7]</sup>等。

收稿日期: 2018年5月10日; 修回日期: 2018年8月5日  
第一作者: 谭江红(1987—), Email: 343017729@qq.com  
通信作者: 陈伟亮(1991—), Email: ouchenweiliang@163.com  
资助信息: 中国气象局预报员专项基金(CMAYBY2016-045);  
湖北省气象局科技发展基金重点项目(2016Z02)

在温度预报中使用的线性方法主要包括多元线性回归、逐步线性回归、最优子集回归，但由于天气演变的非线性特征、预报量与预报因子关系的非线性特征，线性方法的局限性较大。除了神经网络外，非线性方法还包括支持向量机、相似预报理论等<sup>[8]</sup>。预报员的思维一般是基于历史经验，本质上也是一种相似预报的主观方法，只不过是基于抽象经验，难以通过生物神经系统准确记住海量历史个例，故难以客观量化，而通过机器学习方法进行数据挖掘正是从历史数据中挖掘规律，本质是一种基于历史相似样本的客观定量方法。数据挖掘技术也早已在精细化温度预报中得到探索<sup>[9]</sup>，前人研究多为BP神经网络、时间序列数据挖掘方法，近年来改进并兴起的树类机器学习方法暂未得到广泛使用。本文探索和引入了数据挖掘中比较年轻的树类集成数据挖掘方法在历史数据集上进行预报应用，并在预报实践中检验其效果。

## 1 资料与方法

本文使用的资料为2015—2017年湖北89个气象站地面观测温度，时间为每天逐3 h正点观测时间（北京时间20, 23, 02, 05, 08, 11, 14, 17, 20时），数据来源为自动站数据库，欧洲中心（EC）再分析资料、0~12 h预报场（每天08、20时2次）。最优训练期方案<sup>[10-11]</sup>证明，样本时间尺度的选择对于温度预报的影响较大。选取的时间尺度足够长，才能优于传统的季节固定期分类，才能更好地衡量不同天气条件下的各类不同情形。通俗地说，机器学习需要“大数据”支持，足够多的样本才能使模型“见多识广”，例如，建模数据不包括台风过程，在预报时段出现台风，模型很可能无法识别罕见低气压的意义，无从知道台风低压会造成何种结果。

LightGBM是微软于2016年开源的一种以决策树作为基学习器的梯度提升（boosting）机器学习框架，较以往的树类集成学习方法（如随机森林、XGBoost<sup>[12]</sup>）有明显优势，LightGBM算法相关文章<sup>[13]</sup>有详细介绍。与之前的梯度提升类决策树相比，LightGBM具有更快的训练效率、低内存使用、更高的准确率、支持并行化学习等很多优点，其基学习器决策树<sup>[14]</sup>的思想本质是一系列if-then条件判断的嵌套集合，与预报员的思路不谋而合：预报员正是基于各种因子（比如灾害性天气的形成的水汽、动力、热力条件）对结果进行分析，从而判断各条件的组合是否会产生特定的天气现象。

由于决策树具有高度非线性的特点，所以可以解决非线性很强的天气预报问题。单一的决策树往往效

果一般，但包括随机森林、XGBoost在内的树类集成机器学习方法在结构化数据挖掘方面有非常广泛的应用，特别是近年来，XGBoost、LightGBM在数据挖掘竞赛中应用非常广泛，被誉为冠军选手的“杀器”，同时这些方法在工业预测领域也有了大量相关应用<sup>[15-25]</sup>，应该借鉴到气象预报中。而在预报领域，集合预报与集成预报的思路同样广为应用，已经有大量温度预报客观方法采用了集成MOS方法<sup>[3, 26-28]</sup>，随机森林、XGBoost、LightGBM等集成方法正是构建“多棵树”作为基预测器实现集成效果，相当于拥有多个预报成员。

大多数机器学习工具都无法直接支持类别特征作为输入，一般需要进行one-hot码，转换成多维特征。LightGBM增加的针对类别特征的决策规则在处理温度预报时很有用，因为预报实践证明地形气候、观测环境在气象要素预报中是不可忽略的，正是地形因素使模式温度预报在山区经常与站点观测存在较大差异（模式很好地处理了物理过程，而对地形的处理仍有缺陷），因而需要分站点建模以区分局地因子的差异，这里以站号来区分不同站点，作为预报因子输入，使模型自动学习不同站点，相当于考虑了不同站点的预报要素与因子之间的统计关系差异。由于该方法是最新开源的树类机器学习框架，暂未见集成决策树类相关模型在温度预报中应用的中文文献（黎光智<sup>[29]</sup>在“透过网页内容预测新闻热门程度”研究中使用了LightGBM方法），因此在天气预报领域的应用具有一定示范性。

之所以选取模式0~12 h预报进行建模是由于以下两个原因：1）模式时效越近，模式的预报效果越好，更容易反映大气的真实情况。这本质上是一种更接近PP法的MOS预报方法，回归出的预报关系比较可靠，这样可以尽量避免模式重大的性能调整带来的回归关系误差。2）使用模式要素进行MOS建模，相比PP法，其预报因子更加丰富：模式同化了包括卫星资料在内的大量气象观测资料，弥补了建模的时空分辨率，也有大量二次计算加工的物理量，同时可以更方便地直接利用模式输出资料进行任意时效的预报应用，由于相同的数据格式，无需额外的数据处理，对于一线业务预报非常实用。

## 2 特征工程

特征工程相当于描述了机器学习模型的内在构成因子，所以特征工程与数据质量决定了机器学习模型效果的上限，此步骤尤为重要，需要确保不丢失重要特征的基础上避免冗余特征、无关特征和维

数灾害<sup>[1]</sup>，即选取与待预测量相关性最强的影响因子是必要的，否则无法学习到数据之间的内在客观规律，而选取的因子过多也可能会引起机器的无效学习或陷入过拟合，增加计算开销和学习难度，需要一定理论知识和业务经验。根据天气学原理<sup>[30]</sup>，局地温度的变化主要取决于温度平流（大气内部的热量交换）和非绝热因子（大气与外部的热量交换）。本项目选取的特征如下：风场包括10 m、925 hPa、850 hPa、700 hPa，一定程度上体现了影响某地的天气系统和冷暖空气活动状态（例如吹南风和吹北风的热力性质是不一样的）。实践经验表明，相对湿度越大，水汽凝结倾向越高，相对湿度是否超过80%与该层的云量状况直接相关，例如工作经验表明，模式预报地面相对湿度超过95%时，大概率有雾出现，故选取1000~100 hPa（1000，925，850，700，600，500，400，300，200，100 hPa）各层相对湿度，用于体现当地上空的天空状况以衡量辐射因子。温度方面，选取了1000~850 hPa温度，以体现大气的基本冷暖状态，不仅考虑了天气尺度的时空差异，也相当于考虑了季节因素，而已经有研究表明，聚类分析方法进行季节划分可改善极端温度预报效果<sup>[11]</sup>。这些层次接近地面，与地面温度相关性高。此外还选取了海平面气压以及变压，用于衡量冷空气的强度及其活动。选取模式本身输出的2 m温度作为基准量，

选取站号和时间作为分类变量。矢量场分解为 $u$ ， $v$ 分量，共计26个因子。数值预报格点的经纬距分辨率为 $0.125^\circ\sim 0.25^\circ$ ，取值方式采用站点最邻近格点方式。

该特征工程选取温、压、湿、风等基本气象要素来衡量大气的基本状态（其他派生量实际上也均可通过基本量计算得到），从物理上体现出了影响温度的主要因子，其基本思想是，建立统计机器学习回归模型，用于学习大气不同状态下模式本身的2 m温度预报误差，其本质是基于历史相似数据分布或排列组合进行相似订正从而做出最终预报。通过数据处理，形成了预报因子和实况数据对应的建模样本矩阵数据库。

### 3 模型建立与评估

本文利用Python进行机器学习建模，为避免过拟合采用5折CV交叉验证，给定参数列表字典通过遗传进化算法进行参数搜索完成机器学习超参数寻优，最终形成了LightGBMRegressor模型，并保存模型用于预测。相关使用方法和原理可参考LightGBM<sup>[12]</sup>、scikit-learn<sup>[31]</sup>、tpot<sup>[32]</sup>等项目文档，最终使用的模型参数见表1。使用scikit-learn随机选取模型1%的样本数进行拟合效果评估，模型的误差见表2，可以看出模式的均方根误差RMSE和平均绝对误差MAE较小，而衡量回归效果的决定系数很高，正负误差样本数基本相同，表明了模型预报能力的平衡性。

表1 模型主要参数

Table 1 Main parameters of LightGBM

n_estimators	learning_rate	num_leaves	lambda_l2	boosting_type	min_child_samples	colsample_bytree	subsample
1000	0.05	250	0.001	gbdt	1	0.7	1.0

表2 模型拟合效果评价

Table 2 Goodness of fitting using regression

RMSE	MAE	决定系数	正误差样本数	负误差样本数
0.82	0.63	0.99	3657	3796

图1是模型给出的特征重要性排名，从大到小（图1从右至左）依次为：站点、模式2 m温度、100 hPa相对湿度、海平面气压、925 hPa温度、700 hPa相对湿度、200 hPa相对湿度、850 hPa温

度、时间、700 hPa经向风速 $v$ 、700 hPa纬向风速 $u$ 、600 hPa相对湿度、850 hPa相对湿度、1000 hPa相对湿度、300 hPa相对湿度、500 hPa相对湿度、1000 hPa温度、400 hPa相对湿度、850 hPa  $v$ 风速、850 hPa  $u$ 风速、925 hPa相对湿度、3 h变压、925 hPa  $v$ 风速、925 hPa  $u$ 风速、10 m  $v$ 风速、10 m  $u$ 风速。

可见在温度预报方面，站点的因素排位第一，即需首要考虑观测环境不同导致的模式预报误差的不同，充分证明了特征工程设计的合理性。模式2 m温度排名第二，意味着温度预报最重要的参考资料仍然是模式输出的2 m温度，排名第三位的是100 hPa相对湿度，当100 hPa湿度较大的时候，往往意味着云层的伸展高度较高（较厚），这是影响温度的辐射因子的重要体现。排名第四位的是海平面气压，与冷空气的活动相关性很大。可以看出，机器学习的结果与天气学原理和实际预报经验是一致的。排名三位以下的因

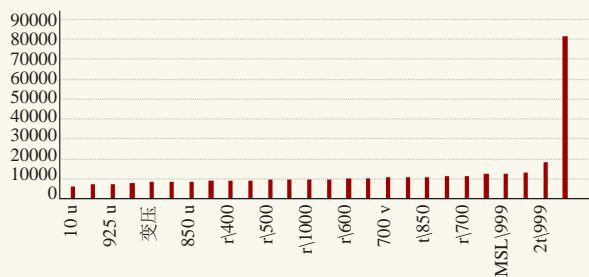


图1 特征重要性排名

Fig. 1 The feature importances

子的特征重要性在数量级上相差不大，但并不一定意味着这些特征并不重要，因为这是以单一因子进行度量，而实际情况是这些因子排列组合起来的结果，如上所述，各层相对湿度就与云高云厚有对应关系，进而影响光照或长波辐射。

#### 4 预报检验与预报实例

利用2018年独立样本进行预报检验，并与现行智能网格预报结果进行对比，其检验效果如图2。可以看出模型的预报和实况变化趋势一致，经计算其决定系数高达0.97。平均绝对误差1.1℃，而相同样本欧

洲模式2 m温度预报误差为1.8℃。2℃以内的预报准确率由欧洲数值预报本身的65.9%提高到86.6%，而同期省台智能网格客观产品12 h以内的定时气温预报准确率约为70.1%。例如，对57453站2018年1月9日08时的预报，欧洲中心数值预报为-12.3℃，而模型预报为1.6℃，实况为0.4℃，预报绝对误差由欧洲中心的12.7℃下降到模型的1.2℃。又如表3，相比欧洲中心模式，2018年3月10日05时，LightGBM模型大部分站点预报误差都在2℃以内（现行业务准确率评价标准），相比数值预报本身模型降低预报误差的趋势明显，仅仅57256站出现了预报错误。

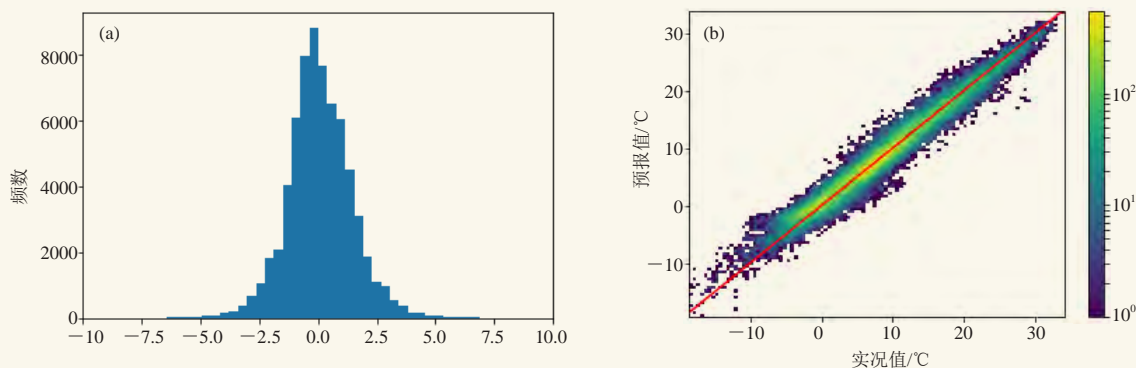


图2 预报与实况对比检验 (a: 误差频数分布直方图; b: 散点及其密度和趋势图)

Fig. 2 Inspection of forecast in contrast to the observed data  
(a: frequency distribution; b: scatterplot and its density and trend line)

表3 2018年3月10日05时模型预报示例(单位:℃)  
Table 3 Examples of model forecast at 5:00AM on March 10, 2018 (°C)

站号	实况	LightGBM	EC	LightGBM误差	EC误差
57249	3.6	5.3	7.6	1.7	4.0
57251	3.5	4.3	5.3	0.8	1.8
57253	4.4	5.2	3.8	0.8	-0.6
57256	4.6	7.1	6.6	2.5	2.0
57257	5.6	5.9	4.5	0.3	-1.1
57259	4.1	3.7	6.5	-0.4	2.4
57260	7.9	5.9	4.6	-2.0	-3.3
57264	7.1	6.1	5.0	-1.0	-2.1
57265	4.3	3.9	4.2	-0.4	-0.1
57268	7.7	6.1	5.4	-1.6	-2.3
57278	6.5	7.4	5.9	0.9	-0.6
57279	7.5	8.0	5.8	0.5	-1.7
57351	6.7	6.8	4.5	0.1	-2.2
57352	6.8	8.6	7.8	1.8	1.0
57353	8.0	8.2	4.5	0.2	-3.5
57354	-1.9	-1.3	-0.9	0.6	1.0
57355	8.2	9.0	6.0	0.8	-2.2
57358	7.3	7.2	4.5	-0.1	-2.8
57359	6.9	7.0	4.4	0.1	-2.5
57361	5.8	5.1	4.1	-0.7	-1.7

本模型现已接入了武汉中心气象台智能网格预报平台进行业务化应用，日常业务一般检验的是最高、最低气温，由于本模型预报的是定时气温，所以初步产品只是简单地从24 h内8个定时气温中挑选出最高、最低温度作为高、低温预报。对2018年2—6月预报产品进行评分（表4），该模型的高、低温预报位居所有客观预报产品前列（其中省台产品是预报员最后主观订正后的产品），特别是24 h低温预报准确率高达91.4%，位居所有预报产品第一位，但分析其平均误

表4 2018年2—6月高、低温预报评分  
Table 4 Maximum and minimum temperature forecast score from February to June, 2018

产品	24 h高温 准确率/%	24 h低温 准确率/%	24 h高温 平均误差/℃	24 h低温 平均误差/℃
EC	56.2	79.1	-1.7	-0.3
SCMOC	66.2	73.9	-0.1	0.2
GRAPES	57.2	65.6	-1.5	0.7
T639	56.7	42.1	-0.5	-2.3
NCEP	63.0	67.8	0.3	0.1
省台产品	77.8	86.1	0.1	-0.3
MOS订正	76.4	83.8	0.4	-0.3
LightGBM	76.9	91.4	-0.7	0.3
集合优选	68.2	82.8	-0.2	0.1

差,发现高温预报有系统性偏低,低温预报有系统性偏高,这是不难理解的:由于建模和预报使用的是定时气温,从定时气温中挑选出的最大、最小值实际上仍不能完全代表日极端值,例如,在晴朗天气下,高温常常比14时气温要高,经常出现在15时左右,可以推测,针对日最高、最低气温直接建模应该可以获得更大提升空间,后期可以继续探索,优化模型。

## 5 结论与讨论

1) 机器学习模型的决策过程有一定的黑盒性,但使用效果好(0~24 h气温预报模型相比数值模式准确率可提高10%以上),可以将预报员的主观预报经验进行高效地客观定量化,具备广阔的应用前景。

2) 由于不同时间辐射状况不同,模式误差不同;不同站点小气候特点(例如海拔)不同,模式误差也不同,需要将相对标准化的模式输出进行系统订正,而LightGBM可以直接处理数值本身没有意义的分类变量,无需离散编码,从而相当于针对不同时段和站点进行建模,效率有很大的进步。

3) 由于LightGBMRegressor叶子数、学习率等超参数寻优需要一定的经验,更好的模型效果需要更多的试验,由于超参数寻优的专业性和计算密集型,具备一定的软硬件要求和难度,需要进一步探索和专业软硬件支持。

4) 由于不同时效的数据格式相同,业务化简便易行,在模式分析场质量不剧烈变化、模式性能、模式不同时效基本形势的预报没有明显改变,即预报稳定时,该模型不同时效的温度预报能力是相同的。

### 参考文献

[1] 周志华. 机器学习. 北京: 清华大学出版社, 2016.  
 [2] 黄治勇, 张文, 陈璇, 等. 湖北省乡镇温度预报方法初探. 气象, 2011, 37(12): 1578-1583.  
 [3] 罗聪, 曾沁, 高亭亭, 等. 精细化逐时滚动温度预报方法及检验. 热带气象学报, 2012, 28(4): 552-556.  
 [4] 赵声蓉. 多模式温度集成预报. 应用气象学报, 2006(1): 52-58.  
 [5] 邱学兴, 王东勇, 朱红芳. 乡镇精细化最高最低气温预报方法研究. 气象与环境学报, 2013, 29(3): 92-96.  
 [6] 李佰平, 智协飞. ECMWF模式地面气温预报的四种误差订正方法的比较研究. 气象, 2012, 38(8): 897-902.

[7] 陈国华. 基于统计降尺度的中国地面气温精细化预报方法研究. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2013.  
 [8] 薛志磊, 张书余. 气温预报方法研究及其应用进展综述. 干旱气象, 2012, 30(3): 451-458, 464.  
 [9] 段文广, 周晓军, 石永炜. 数据挖掘技术在精细化温度预报中的应用. 干旱气象, 2012, 30(1): 130-135.  
 [10] 吴启树, 韩美, 郭弘, 等. MOS温度预报中最优训练期方案. 应用气象学报, 2016, 27(4): 426-434.  
 [11] 车钦, 赵声蓉, 范广洲. 华北地区极端温度MOS预报的季节划分. 应用气象学报, 2011, 22(4): 429-436.  
 [12] Chen T, Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system. arXiv:1603.02754v3.  
 [13] Ke G, Meng Q, Finley T, et al. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. //31st Conference on Neural Information Processing Systems(NIPS 2017).  
 [14] 张桢, 曹健. 面向大数据分析的决策树算法. 计算机科学, 2016, 43(S1): 374-379, 383.  
 [15] 叶倩怡, 饶泓, 姬名书. 基于Xgboost的商业销售预测. 南昌大学学报(理科版), 2017, 41(3): 275-281.  
 [16] 王焱. 基于随机梯度提升决策树的行人检测算法设计与实现. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2017.  
 [17] 陈子之. 基于GBDT的地方政府债务风险评级和预警研究. 上海: 上海师范大学硕士学位论文, 2017.  
 [18] 郑凯文, 杨超. 基于迭代决策树(GBDT)短期负荷预测研究. 贵州电力技术, 2017, 20(2): 82-84, 90.  
 [19] 肖琴. 基于互联网数据的个人信用风险评估的研究与应用. 成都: 电子科技大学硕士学位论文, 2017.  
 [20] 凌筱玥. 基于XGBoost算法的上证指数预测方案设计研究. 上海: 上海师范大学硕士学位论文, 2017.  
 [21] 霍荣瑞. 柳州市手足口病发病率预测模型的建立与评估. 南宁: 广西医科大学硕士学位论文, 2017.  
 [22] 叶倩怡, 饶泓, 姬名书. 基于Xgboost的商业销售预测. 南昌大学学报(理科版), 2017, 41(3): 275-281.  
 [23] 乐明明. 数据挖掘分类算法的研究和应用. 成都: 电子科技大学硕士学位论文, 2017.  
 [24] 张昊, 纪宏超, 张红宇. XGBoost算法在电子商务商品推荐中的应用. 物联网技术, 2017, 7(2): 102-104.  
 [25] 王尉同, 潘毅群, 黄治钟. 梯度渐进回归树在建筑能耗短期预测中的应用. 建筑节能, 2018, 46(3): 112-116.  
 [26] 张秀年, 曹杰, 杨素雨, 等. 多模式集成MOS方法在精细化温度预报中的应用. 云南大学学报(自然科学版), 2011, 33(1): 67-71, 76.  
 [27] 熊敏谏. 基于集合预报系统的日最高和最低气温预报. 气象学报, 2017, 75(2): 211-222.  
 [28] 林春泽, 智协飞, 韩艳, 等. 基于TIGGE资料的地面气温多模式超级集合预报. 应用气象学报, 2009, 20(6): 706-712.  
 [29] 黎光智. 透过网页内容预测新闻热门程度. 台北: 台湾大学电机工程学研究所学位论文, 2017.  
 [30] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 2007.  
 [31] Pedregosa F, Gramfort A, Michel V, et al. Scikit-learn: machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 2012, 12(10): 2825-2830.  
 [32] Olson R, Moore J. TPOT: A tree-based pipeline optimization tool for automating machine learning. Workshop on Automatic Machine Learning. 2016(64): 66-74.

# 基于高分一号影像的武汉市洪涝遥感监测与分析

张丽文<sup>1,2</sup> 梁益同<sup>1,2</sup> 李兰<sup>1</sup>

(1 武汉区域气候中心, 武汉 430070; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025)

**摘要:** 2016年6月30日—7月6日, 强降雨引发了武汉及其邻近地区多处的城市内涝及河堤溃坝等严重洪涝灾害。以洪涝前后高分一号(GF-1)WFV影像和2015年30 m土地覆盖类型图为数据源, 在分析典型地物与洪涝期不同水体的GF-1光谱曲线特征的基础上, 对比NDWI阈值法与面向对象分析法提取研究区各类水体信息的适宜性, 采用最优算法对武汉市洪涝灾害范围进行识别和判定。结果显示, 面向对象分类法对洪涝期不同城市水体类型的遥感提取结果总体上要优于水体指数阈值法提取结果; 城市郊区由河水漫堤和河堤溃坝等原因导致的洪涝淹没范围可以通过GF-1 WFV数据有效地进行识别。该研究成果可以对国产高分一号影像在城市洪涝灾害监测气象业务服务提供科学参考。

**关键词:** 高分一号, 水体识别, NDWI, 面向对象, 洪涝监测

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.007

## Characteristic Analysis of Flood Monitoring in Wuhan City Based on GF-1 Remote Sensing Data

Zhang Liwen<sup>1,2</sup>, Liang Yitong<sup>1,2</sup>, Li Lan<sup>1</sup>

(1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan, 430074 2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jianghan Plain, Jingzhou 434025)

**Abstract:** Severe flooding and river embankment dam collapse in Wuhan City was caused by heavy rainfall from June 30 to July 6, 2016. In this study, GF-1 WFV images before and after the floods were used to analyze the spectral characteristics of water bodies during the flooding period and to compare the suitability of this data for extracting various types of information about the water bodies using NDWI thresholds and object-oriented classification. An optimal algorithm was adopted for monitoring the flood disaster. The results showed that the object-oriented classification method was superior to the NDWI threshold method for extracting the results of different types of urban water bodies during the flood season. The flood submergence area caused by flooding of rivers and river embankments was effectively identified from GF-1 WFV images using object-oriented classification methods. The results provide a reference for the application of GF-1 image analysis to monitor urban flood disasters.

**Keywords:** GF-1 WFV, flood monitoring, NDWI, object-oriented, water identification

### 0 引言

城市洪水和内涝作为我国当前主要的城市生态风险与灾害之一受到公众、学界与政府部门的广泛重视<sup>[1]</sup>。城市的防洪抗涝能力取决于城市水生态循环系统的结构和完善程度<sup>[2]</sup>。随着城市化进程的不断发展, 城市水生态失衡问题日渐突出<sup>[3]</sup>, 一旦在雨季出现强降水天气, 就会频繁出现严重的城市洪涝问题, 严重威胁人身、财产安全。受到自然地理环境及气候条件、“雨岛效应”、城市快速发展给水生态环境带来的负面问题等多种因素的综合作用<sup>[4]</sup>, 武汉城市湿地防洪蓄水生态功能下降、城市洪涝灾害频繁。在此背景下, 提高洪涝灾害监测与评估的时效性和精度是

加强洪涝灾害管理的迫切需求<sup>[5]</sup>。

卫星遥感监测技术因具有客观、时效性强、覆盖范围广且不受地面监测条件影响等优势, 在对洪涝灾害开展及时准确的动态监测及影响评估中及为国家相关部门提供重要科学决策数据中发挥着重要作用<sup>[6]</sup>。不同类型的遥感数据源在洪涝灾情信息提取中具有各自的优势和特点, 应用比较广泛的光学数据主要有风云气象卫星、MODIS、Landsat、SPOT、环境减灾卫星等, 微波遥感数据主要有SAR、ASAR、SSM/I、MRI等<sup>[5, 7-9]</sup>。以上中、低等分辨率卫星常用于省域或区域范围洪涝, 难以捕捉城市尺度细小洪涝灾情、满足行业应用精度要求。2013年4月国产高分一号卫星成功发射投入使用, 为城市尺度洪涝监测打开了全新的局面。目前针对GF-1影像进行水体信息识别的研究较多, 立足于城市洪涝水体监测的案例尚不多见。水

收稿日期: 2018年6月16日; 修回日期: 2018年7月27日  
第一作者: 张丽文(1985—), Email: luomarsp2013@163.com

体作为洪涝灾害的基本载体，但洪涝淹没区有别于纯水体区，淹没水深及淹没覆盖土地类型的不同，往往导致洪涝期水体光谱信息较非灾期更为复杂。本文旨在以2016年6月30日—7月6日梅雨期强降水导致的武汉市洪涝灾害为例，开展高分一号影像洪涝期不同水体光谱特征分析及水体识别适宜度性对比，弥补现有研究与应用空白。

## 1 研究背景

### 1.1 研究区概况

本文以武汉市区边界到达的四方区域为研究区域，包括武汉市主城区、新洲区、黄陂区、蔡甸区、东西湖区、江夏区、汉南区及其接壤的周边地区，如2016年6月14日GF-1 WFV 4、3、1（近红外、红、蓝）三波段合成图（图1）所示。研究对象为区内地表水体，包括长江及其支流等河流、湖泊、养殖水域、降雨导致的淹没区域及其他形式的小面积水体。

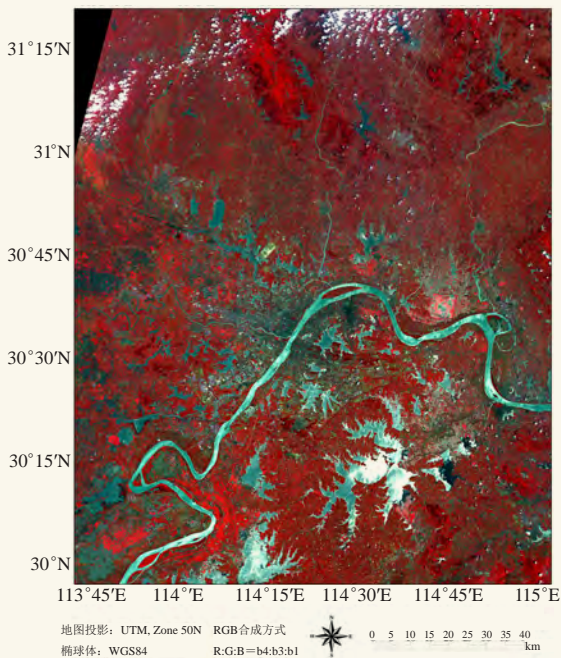


图1 研究区GF1-WFV多通道合成图

Fig. 1 GF1-WFV multi-channel composite map in the study area

### 1.2 强降雨过程

对2016年梅雨期（6月18日入梅，7月21日出梅）武汉市5个国家站（蔡甸、黄陂、新洲、江夏和武汉）日降雨量统计显示，6月30—7月6日（以下简称7日）武汉市出现大范围连续强降水过程（图2），据湖北省气象灾害评估报告（第9卷第2期）记载，江夏、新洲等站7日过程雨量突破历史极值。同时对武汉市及周边地区国家站和区域自动站降雨观测数据

进行IDW空间插值，以显示7日累积面雨量空间分布特征。由图3可知，武汉市为强降雨中心所在地，武汉中心城区、江夏区、新洲区、黄陂区及蔡甸区大部地区7日的累积降雨量均超500 mm，局地超700 mm。此次强降雨过程造成以上地区出现严重的城市内涝和河流洪涝灾害。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

根据气象数据的分析，选择强降雨过程前后时间最近且为晴空条件的2016年6月14日和7月9日的GF-1 WFV多光谱卫星影像作为本研究遥感数据源。GF-1卫星搭载了WFV1、WFV2、WFV3和WFV4四个WFV传感器，同时成像的幅宽可达800 km左右。WFV传感器的主要参数如表1所示。

为排除不同传感器及天气差异造成的影响，遥感数据的预处理过程包括：首先对来源及时相不同的洪涝前后两景GF-1 WFV影像进行辐射定标，再通过FLAASH大气校正方法得到地表反射率。以15 m Landsat8 OLI全色影像和30 m DEM为基准，对洪涝前后两景影像进行正射校正以消减地理变形和偏差，使两幅需对比的影像空间高度匹配。最后，选取研究区矢量边界，对多时相影像进行裁剪，获得研究区内洪水发生前、发生时的影像及水体动态变化范围。以上所有GF-1 WFV数据的预处理过程均在ENVI5.3和ArcGIS平台上实现。

同时，还结合研究区乡镇界及以GlobeLand30产品为基础更新的2015年30 m土地覆盖类型栅格数据开展灾情评估。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 水体类型光谱特征分析

以7月6日研究区范围预处理后的GF-1影像为例，选择农田、林地、建筑物、裸地、云、水体及阴影7种地物类型（其中水体又细分成河流、湖泊、养殖池塘及盐水区4类）的典型样地作为感兴趣区，统计GF-1影像4通道平均地表反射率绘制光谱特征曲线。如图4a所示，农田和林地都具有相似而典型的植被光谱特征，即低蓝光和红光波段反射、较高绿光反射和极高的近红外反射，且四个通道的反射率都是农田大于林地。建筑物及裸地信息随着波段数的增加，反射率不断增加，但变幅较植被要小。和其他地物相比，云在各个通道都有较高的反射率，在近红外通道达到最高。而水体信息，则独特地表现出在从绿光通道到近红外通道反射率逐渐下降的趋势。在近红外波段（B4），水体信息与其他地物信息反射率差距最

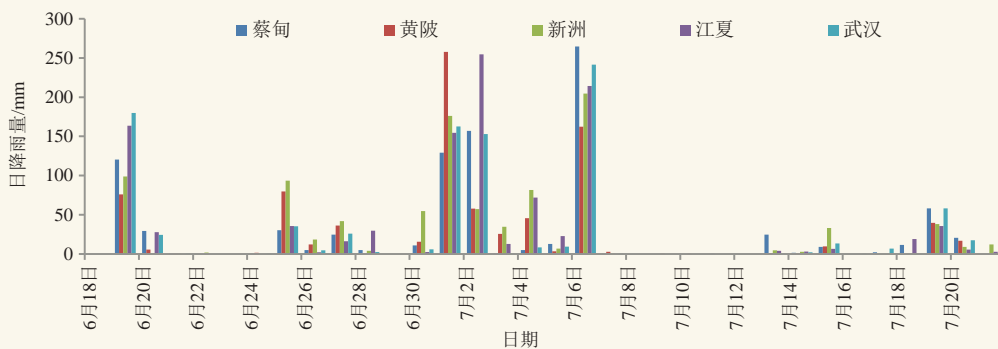


图2 武汉市5个国家站2016年梅雨期日降雨量统计分析

Fig. 2 Daily rainfall characteristics of five national meteorological stations in Wuhan municipality during the rainy season in 2016

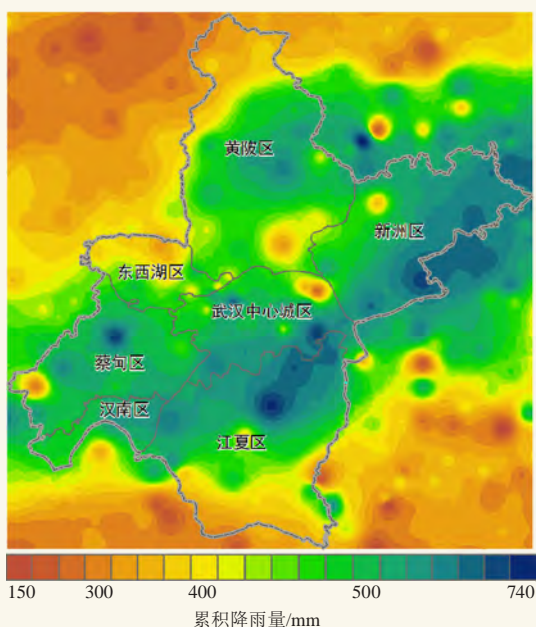


图3 研究区2016年6月30日—7月6日累积降雨量空间分布图  
Fig. 3 Spatial distribution of cumulative rainfall during 30 June to 6 July in 2016 in the study area

表1 WFV 传感器的主要参数

Table 1 Main parameters of remote sensors

波段	波长范围/ $\mu\text{m}$	空间分辨率/m
B1 (蓝)	0.45~0.52	16
B2 (绿)	0.52~0.59	16
B3 (红)	0.63~0.69	16
B4 (近红外)	0.77~0.89	16

大。图4b为洪涝时期(7月9日)不同水体类型GF-1影像四波段光谱曲线,可知洪涝发生时,由于水中泥沙含量明显增加,且受到不同深度及不同淹没土地类型的影响,洪涝水体光谱特性变得复杂。

### 2.2.2 水体遥感识别方法

洪水遥感监测的关键技术在于水体的识别技术。根据GF-1 WFV波段设置及数据特点,选择操作容易

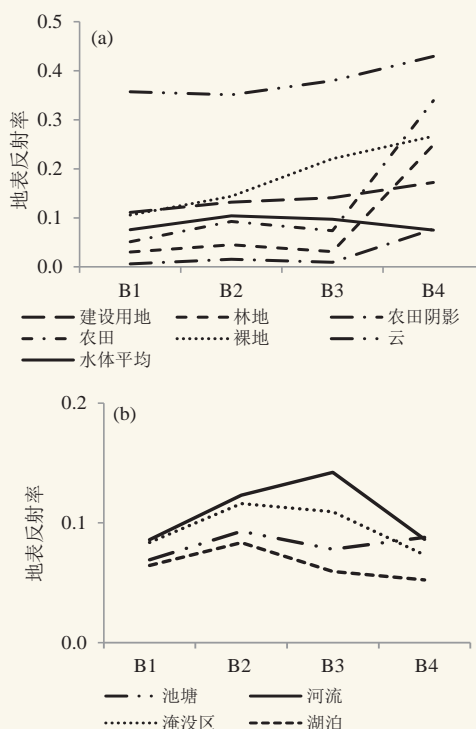


图4 多种地物 (a) 及洪涝期不同水体 (b) GF-1 WFV光谱特征

Fig. 4 Spectrum characteristics of GF-1 WFV for various land covers (a) and water bodies during the flooding period (b)

的归一化水体指数 (NDWI) 阈值法和研究较为热门的面向对象方法来研究不同水体提取方法监测此次区域洪涝灾害的适用性,并以GF-1 WFV影像4、3、1通道组合的RGB合成图为目的参考,评价对比两种方法提取的水体分布效果。选择最优方法提取研究区洪涝前后水体分布,得出洪涝分布及面积。

#### 1) NDWI 阈值法

NDWI是根据水体在可见光与近红外波段的波谱特点,利用绿波段与近红外波段的比值构建而成<sup>[10]</sup>。相比于其他指数如归一化差值植被指数 (NDVI) 和

地表水分指数 (LSWI) 等, NDWI 可以最大程度地抑制植被信息, 突出水体信息。式 (1) 为 NDWI 的计算公式, 其中,  $\rho_{Green}$  和  $\rho_{Nir}$  分别对应 GF-1 WFV 数据的绿光通道 (B2) 和近红外通道 (B4) 的地表反射率。

$$NDWI = (\rho_{Green} - \rho_{Nir}) / (\rho_{Green} + \rho_{Nir}) \quad (1)$$

对预处理后的 GF-1 影像进行 NDWI 运算并对其进行灰度分布统计, 根据灰度分布曲线反复调试得到相应阈值, 实现普适用于各类水体的水陆最佳分割, 将  $NDWI \geq 0.11$  作为 6 月 14 日影像水体提取阈值; 将  $NDWI \geq 0.28$  作为 7 月 9 日影像水体提取阈值。

### 2) 面向对象的水体识别法

本文采用基于规则的面向对象分类来实现洪涝前后水体提取, 其基本步骤是先对影像进行尺度分割, 然后根据水体的光谱、纹理等特征进行对象特征选取, 最后建立规则得到分类结果。最优尺度分割的效果是使分割后的多边形对象和地物边界基本吻合, 以至于分割对象既不破碎也不过于集中<sup>[11]</sup>。经多次尝试, 确定最优分割尺度为 38、合并阈值为 60, 同时建立以下分类规则: 6 月 14 日  $NDWI \geq 0.10$  且近红外通道平均反射率在 0.174~0.218 之间时有最佳水体识别效果; 7 月 9 日  $NDWI \geq 0.14$  且近红外通道平均反射率在 0.040~0.092 时有较理想的水体识别效果。其中, 近红外通道平均阈值由各类水体目视解译样本感兴趣区统计得到。

### 2.2.3 洪涝遥感监测方法

洪水遥感监测主要是以灾前、灾后多时相遥感数据为主, 辅以灾情信息、气象数据和舆情信息等数据, 分别提取灾前、灾后水体范围, 然后利用变化检测方法开展灾害范围动态监测, 同时结合土地覆盖类型数据, 解译洪水淹没类型及面积等信息<sup>[5]</sup>。

### 2.2.4 技术流程

综上, 总结本研究的技术流程 (图 5) 主要包括: 在站点降雨数据统计分析的基础上, 选择强降水导致的洪涝灾情前后多时相高质量高分一号影像, 经过一系列影像预处理后, 首先分析典型地物及典型洪涝期水体类型光谱、纹理特征, 进而确定 NDWI 阈值法和面向对象分类法提取水体的阈值及法则, 通过目视对比选择最优方法提取的灾前灾后水体范围做变化检测, 得到洪涝空间范围, 最后叠加最新土地覆盖类型数据, 统计洪涝淹没土地覆盖类型及其面积, 对灾情进行特征分析及评估。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 不同水体识别方法结果对比

在 ArcGIS 平台生成随机检验样点, 以提取总精

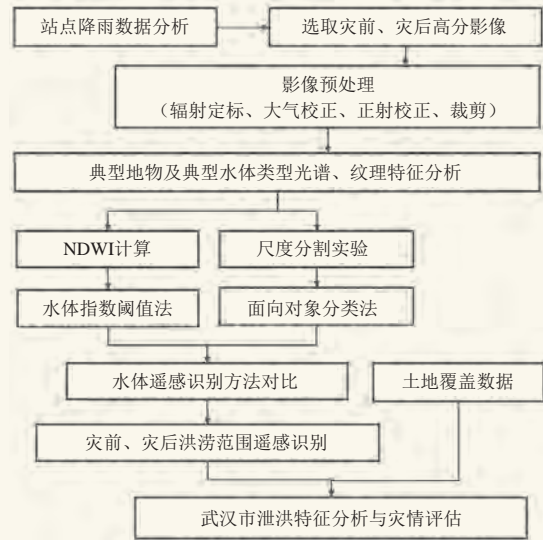


图 5 技术流程图  
Fig.5 Technical flow chart

度为指标开展两种方法在 5 种洪涝期水体识别适用性精度评价, 提取总精度定义为正确提取的水体像素个数占总样本像素个数的百分比<sup>[12]</sup>, 不同方法洪涝期不同水体类型提取总精度统计见表 2。通过目视解译对比可知, 面向对象分类法及 NDWI 阈值法对主要河流和典型湖泊水体的提取范围很一致, 都接近于真实水体分布, 而在河流分支、养殖水域及淹没区三种类型中存在一定差异 (图 6)。对于河流分支等细长型水体, 还有光谱信息复杂的泛洪淹没区, 面向对象分类法识别精度要明显好于 NDWI 阈值法, 识别出的河流分支连贯性和完整性好, 没有出现河流断面的情况, 识别的淹没区集中成片, 避免了阈值法得到的图斑碎片化结果的产生。受到混合像元及面向对象法中尺度分割和对象合并的影响, 两种方法对养殖水域 (图 7) 的提取精度均较低, 面积小且有其他地物干扰的养殖区在两种方法中均出现漏提 (如图 7b 和 7c 中白色框区域), 集中养殖区面向对象分类法提取效果阈值法但剔除水域内的田坎等地类的效果不佳 (如图 7b 和 7c 中黄色框区域)。但总体而言, 面向对象分类法对洪涝期各种水体类型识别效果更佳, 所以本文最终采用面向对象分类法识别的灾前、灾后水体范围作

表 2 洪涝期水体识别精度评价表

Table 2 Accuracy evaluation table for water bodies in the flooding period

方法	提取总精度 (%)				
	主要河流	河流分支	典型湖泊	养殖水域	淹没区
NDWI 阈值法	98.2	71.9	92.0	41.9	72.0
面向对象分类法	100	87.5	97.3	61.3	90.7
检验样本数	55	32	75	31	75

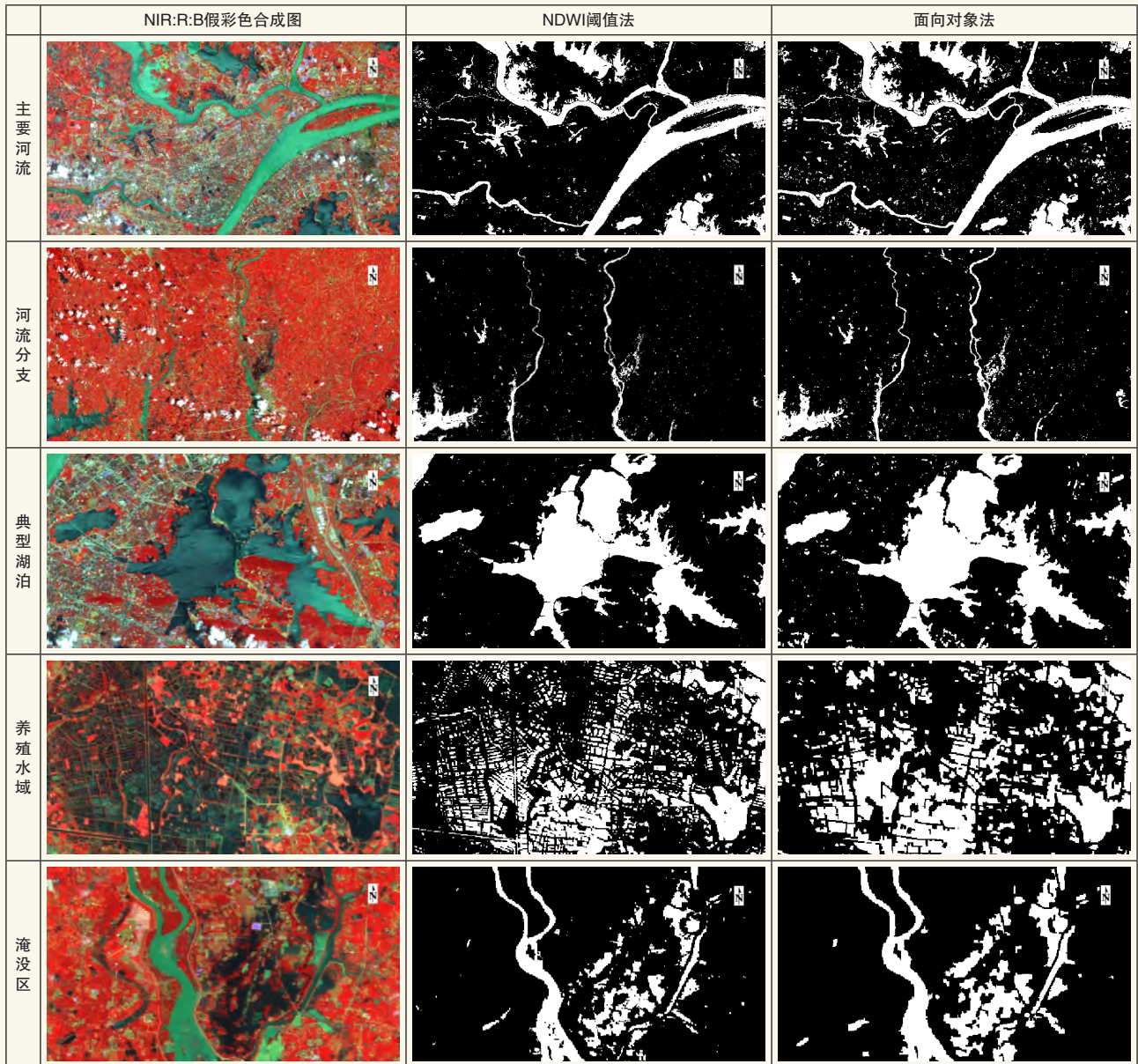


图6 NDWI阈值法与面向对象分类法识别各类水体效果对比图

Fig. 6 Comparison of NDWI threshold and object-oriented method for identifying various water bodies



图7 养殖水域（局部）提取结果对比图

(a) 4:3:1假彩色合成图, (b) NDWI阈值法识别结果+假彩色合成图, (c) 面向对象分类法识别结果+假彩色合成图

Fig. 7 Comparison of extracted results of cultured waters (local)

(a) 4:3:1 false color composite map, (b) NDWI threshold method recognition result + false color composite map, (c) object-oriented method recognition result + false color composite map)

为洪涝灾情范围分析。此分析结论与文献[13]的结论基本一致。

### 3.2 洪涝典型区分析

为更好地显示洪涝灾情分布，在显示典型洪涝受灾区、灾前灾后GF-1假彩色合成影像的同时，将两期GF-1影像面向对象水体识别结果进行二值化处理，形成洪涝前后水体变化检测图，其中蓝色代表（灾前）原有水体，红色代表（灾后）新增水体，白色范围为非水体地类。图8a显示黄陂滠水河支流溃口导致的村子洪涝淹没情况。黄陂区前川街下石村的下石河边有两处溃口，溃堤直接让上游的罗汉寺街和下游前

川街总共10多个村子浸泡在水中。图8b显示因保障天河机场正常运行对童家湖进行人工分洪后的洪涝淹没情况。据新闻报道，童家湖漫溃后导致盘龙城经济开发区附近的村湾6000余亩（1亩 $\approx$ 666.7m<sup>2</sup>）鱼池被淹，临时转移安置周边群众40余人。这与文本统计的9.87 km<sup>2</sup>的湿地河滩淹没面积较为接近。府河附近麦家湖/任恺湖连片，淹没范围明显增加。图8c显示举水河新洲段河道显著增宽，河曲内农田被淹。图8d显示的是由于新洲区举水河支流东河溃口导致的洪涝淹没情况。据报道，7月1日晚上举水河水位急速上涨，22时左右，举水河支流东河在新洲区凤凰镇郑园村陶

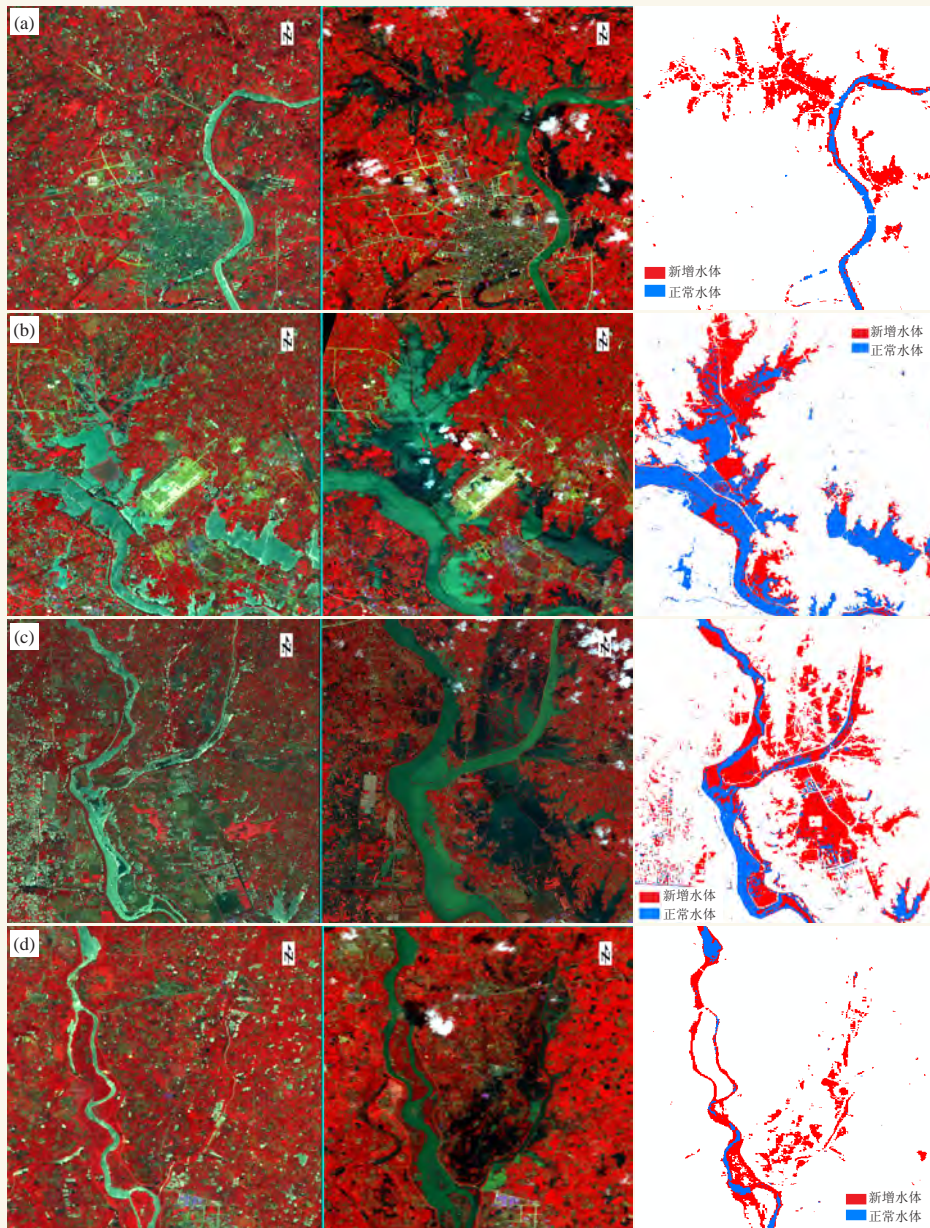


图8 典型洪涝受灾区灾前灾后GF-1号水体监测对比图

Fig. 8 Comparison of water monitoring of GF-1 before and after disasters in typical flooding areas

家河西圩垸处发生溃口，凤凰镇、三店街等20多个村庄，近万名群众被洪水围困。

将洪涝范围高分识别结果与重采样到16 m的土地覆盖类型数据进行叠加，以细致了解受暴雨洪涝灾害影响的各种地类面积。据统计（表3），由于河水漫堤、溃口或人工开垸的以上四个典型淹没区域，涉及淹没地类包含耕地、林地、草地、湿地河滩和建设用。耕地淹没比例四地区均超过50%以上，以举水河新洲段和黄陂童家湖附近区域农田受淹面积最大。

表3 典型洪涝区淹没地类面积统计/km<sup>2</sup>  
Table 3 Statistics of submerged land area in typical floodplain /km<sup>2</sup>

	淹没总面积	耕地	林地	草地	湿地河滩	建设用地
举水河新洲段	30.91	26.11	4.76	0.03		0.01
举水河支流	4.66	2.88	1.74	0.04		0.00
黄陂滢水河支流	5.97	5.27	0.32	0.37		
黄陂童家湖	37.24	20.32	4.55	2.45	9.87	0.05

### 3 小结与讨论

本文以国产高分一号16 m影像为数据，对2016年梅雨期强降雨过程造成的武汉市洪涝开展了最佳水体遥感识别对比及灾情评估。结果显示，对洪涝期间不同城市水体类型的遥感提取结果，面向对象分类法要优于归一化水体指数阈值法，对于城市郊区由河水漫堤和河堤溃坝等原因导致的洪涝淹没范围可以通过GF-1 WFV数据有效地进行识别，分地类灾情统计与实际上报灾情结果较为一致。

此次强降水造成武汉主城区多处街道内涝灾情严重，例如南湖片区文馨街道等地。本研究也试图对其淹没范围灾情进行提取，但受GF-1 WFV数据空间及时间分辨率限制影响，城市主干道（>30 m）滞水信息虽然可以被监测到，但水体范围受混合像元影响难以准确提取，同时主干道上涝排水较及时，高分卫星观测时效性不足难以及时捕捉退水变化。所以仅靠GF-1 WFV 16 m影像暂时难以满足城市街道尺度内涝灾情遥感监测的服务需求，后续可加强对空间分辨率更高的GF-1 PSM（2 m全色/8 m多光谱）资料在城市

内涝监测中的应用研究。另外，不受云雨影响的雷达卫星资料可以实现全天候的洪涝水体监测，利用GF-3等雷达卫星监测城市内涝将具有很好的应用价值。

时间分辨率高、不受天气条件影响全天候观测的卫星资料可以实现洪涝消退的动态监测过程，但空间分辨率低、难以满足空间提取精度要求；而空间分辨率高的卫星影像往往光谱信息少，且重访周期长，难以实现动态监测，所以现阶段城市洪涝遥感监测离真正实时精准的城市尺度洪涝灾害遥感监测还尚有差距。目前，我国正逐步构建更为完善的高时空分辨率遥感综合观测体系，如国产高分卫星系列和风云气象卫星系列，可为今后提供更有力的数据保障。如何加强多源遥感资料的融合应用，实现洪涝淹没范围、淹没时长及深度等多维度洪涝灾情监测与评价，还有许多科学技术问题亟待解决。

### 参考文献

- [1] 吴志峰, 象伟宁. 从城市生态系统整体性、复杂性和多样性的视角透视城市内涝. 生态学报, 2016, 36(16): 4955-4957.
- [2] 王紫雯, 程伟平. 城市水涝灾害的生态机理分析和思考——以杭州市为主要研究对象. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(5): 582-587.
- [3] Wang Z W, Cheng W P. Analysis of ecological mechanism of urban flood and waterlog - Research based mainly on Hangzhou City. Journal of Zhejiang University, 2002, 36(5): 582-587.
- [4] 王肇磊, 丁小珊. 水生态视域下的武汉城市内涝问题研究. 江汉大学学报(社会科学版), 2014, 31(2): 74-79.
- [5] 李加林, 曹罗丹, 浦瑞良. 洪涝灾害遥感监测评估研究综述. 水利学报, 2014, 45(3): 253-260.
- [6] 童庆禧. 遥感在1998年洪水监测中的作用. 气候与环境研究, 1998, 3(4): 27-35.
- [7] 郑伟, 刘诚. FY-3卫星洪涝灾害监测应用. 上海航天, 2017, 34(4): 73-78.
- [8] 范一大, 和海霞, 李博, 等. 基于HJ-1 CCD数据的洪涝灾害范围动态监测研究——以黑龙江省抚远县为例. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 102-108.
- [9] Zhang F, Zhu X, Liu D. Blending MODIS and Landsat images for urban flood mapping. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(9): 3237-3253.
- [10] Mcfeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [11] 黄慧萍. 面向对象影像分析中的尺度问题研究. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003.
- [12] 闫利, 赵展, 聂倩, 等. 利用规则进行高分辨率遥感影像地物提取. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(6): 636-639.
- [13] 段秋亚, 孟令奎, 樊志伟, 等. GF-1卫星影像水体信息提取方法的适用性研究. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 79-84.

# 基于面向对象的光学和Sentinel-1 SAR数据油菜种植空间分布信息提取方法研究

柴振刚<sup>1</sup> 胡佩敏<sup>2, 3</sup> 熊勤学<sup>2, 4</sup>

(1 潜江市气象局, 潜江 433100; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434020;  
3 荆州市气象局, 荆州 434020; 4 长江大学农学院, 荆州 434025)

**摘要:** 为提高Sentinel-1 SAR数据作物种植分布提取精度, 以湖北省江陵县为研究区域, 运用资源三号卫星CCD融合数据(空间分辨率为2 m)提取田间边界对象, 将对象内Sentinel-1 SAR后向散射系数取平均, 以此消除相干斑点噪声的影响, 再通过对各种地物纯像元SAR后向散射特征分析, 发现3—4月油菜后向散射系数明显高于其他作物, 运用得出的油菜分类阈值(4月22日VH极化的SAR后向散射系数大于2.1且小于3.5, 且2月27日NDVI指数大于0.3), 对满足条件的对象进行筛选, 最后得出江陵县油菜种植空间分布信息。运用GPS定点对分类结果进行验证, 得到其KAPPA系数为0.88, 并运用其他两种传统分类方法(直接用SAR数据进行阈值分类、运用其他时段SAR数据进行对象提取)进行了比较, 发现光学遥感数据提取对象、SAR数据确定对象属性的油菜空间分布提取方法的精度有一个质的提高。由于SAR数据不受云层影响, 能定时获取, 因此此方法很适合在多云雨地区的作物种植空间分布信息的提取。

**关键词:** 边界提取, SAR数据, 种植空间分布, 面向对象方法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.008

## The Extraction Method of Rape Oil Planting Distribution Using Per-Field Classification Based Optical and Sentinel-1 SAR Images Data

Chai Zhengang<sup>1</sup>, Hu Peimin<sup>2, 3</sup>, Xiong Qinxue<sup>2, 4</sup>

(1 Qianjiang Meteorological Bureau, Qianjiang 433100 2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434020

3 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020 4 Agricultural College of Yangtze University, Jingzhou 434025)

**Abstract:** The aim of this research was to improve the accuracy of crops distribution classification using Sentinel-1 SAR data. The method involves extracting the crop field border using ZY-3 satellite multi-band optical data based on image segment and merge methods, then averaging the RADAR backscatter coefficient of SAR data within each object which eliminates the influence of coherent speckle noise. Through the analysis of SAR backscattering characteristics of various ground objects which created pure pixels (identified by ground investigating using GPS), we found that the backscattering coefficient values were higher than other crops in March and April. We determined that the rape oil plant areas were characterized with SAR backscattering coefficient values being more than 2.1 and less than 3.5, and the NDVI index being greater than 0.3 on 27th February (filtered for the non-planting areas). Using these rules and SAR data that eliminated the influence of coherent speckle noise, we calculated rape oil planting spatial distribution in Jiangling County. The classification results were verified using GPS within a 5.35 km<sup>2</sup> (length 2.57 km, width 2.08 km) area which had wheat and rape oil planted, and the KAPPA coefficient was 0.88. The accuracy of the spatial distribution of rape oil plants was improved over the use of traditional classification methods. The SAR data from Sentinel-1 is not affected by clouds, therefore data needed for this method can be obtained regularly. This method is suitable for crop cultivation spatial distribution information needed for business operations.

**Keywords:** boundary extraction, Sentinel-1 SAR data, crop cultivation spatial distribution, field-based method

收稿日期: 2018年6月5日; 修回日期: 2018年7月21日  
第一作者: 柴振刚(1967—), Email: 121622659@qq.com  
通信作者: 胡佩敏(1967—), Email: hupm@21cn.com  
资助信息: 2012年度公益性行业(农业)科研专项(201203032)

## 0 引言

运用光学遥感卫星数据提取的作物种植空间分布是目前作物遥感监测最主要的手段, 为确保信息提取的精度, 一般需要指定特定时期(特别物候期间)的

数据资料。但因光学遥感卫星受云层和重访周期的影响,不是所有年份都满足这一要求<sup>[1]</sup>,因此基于光学遥感卫星数据的作物种植空间分布信息业务化提取,其精度得不到保证。合成孔径雷达(SAR)因为不受云层影响、全天候工作等特点,已被广泛应用于作物种植空间分布信息提取<sup>[2]</sup>。目前运用SAR数据进行作物种植空间分布信息提取方法主要有两种,一是基于像素的分类方法,其中单波段、单极化数据分类的准确度比多极化、多时相、多波段低<sup>[3-4]</sup>,如果在分类数据中加入光学遥感数据,其分类准确率会大大提高<sup>[5]</sup>。但不可否认,由于SAR数据影像中相干斑点噪声的存在,严重影响了信息提取的效果,尽管随着星载、机载SAR的空间分辨率和辐射分辨率不断提高,农作物SAR识别的精度有了一定程度的提高,但相对于光学遥感识别效果,其精度还不足85%。不能满足现有对农作物分布信息遥感提取的精度要求<sup>[6]</sup>。另一种方法是基于面向对象的分类方法<sup>[1]</sup>,即运用多景SAR数据提取一系列地物对象,通过计算每个地物对象的空间信息、纹理结构、光谱信息等,并运用这些信息对地物对象进行分类<sup>[7-8]</sup>,可很好地消除相干斑点

噪声的影响,同时提供了比基于像素的分类方法更多的数据,其分类精度有一个质的提高,同样由于SAR相干性的问题,在SAR数据影像中的地物边界也会模糊不清,对地物对象的提取的正确性是影响其分类精度的最大因素。如何利用光学遥感卫星和雷达卫星的优点,提高作物种植空间分布信息提取的精度,是多云雨地区农业遥感要解决的问题之一。

本文旨在以湖北省江陵县为例,在分析油菜花田 Sentinel-1 SAR后向散射系数随时间变化的基础上,运用同期光学影像数据进行地物对象提取,通过SAR地物对象的光谱、纹理信息数据,结合油菜SAR后向散射系数分类特征,实现高精度油菜种植空间分布信息SAR提取。

## 1 研究区概况和数据预处理

### 1.1 研究区概况

江陵县(图1)位于湖北省中南部,长江北岸,面积为1032 km<sup>2</sup>,气候上具有四季分明、热量丰富、光照适宜、雨水充沛、雨热同季、无霜期长等特点,夏收作物主要为小麦和油菜。

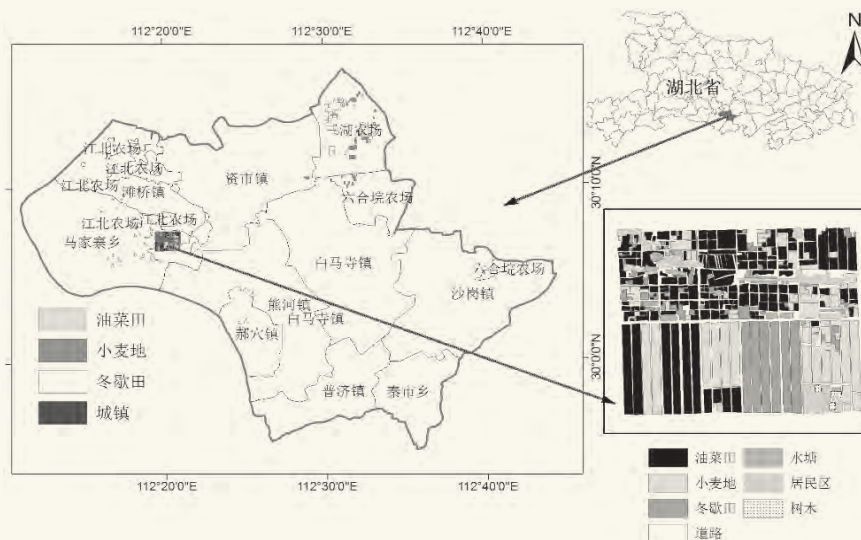


图1 江陵县的位置、调查区的空间分布和结果验证区地物空间分布图

Fig. 1 The location, spatial distribution of the survey area and the spatial distribution of results of verified places in Jiangling County

2016年3月,为分析不同地物SAR后向散射变化特征,特在江陵县进行调查,用Trimble pro XRT高精度GPS仪(定位精度为0.2 m),确定118个纯像元地物边界,其中油菜花田41块,小麦地23块,冬歇田28块,城镇22块,每块面积都在4.2 hm<sup>2</sup>以上;为验证结果的精度,在马家寨乡一块5.35 km<sup>2</sup>小麦与油菜交错地带(长2.57 km,宽2.08 km),用GPS仪详细确定了

各种地物(油菜花田、小麦地、冬歇田、道路、水体、居民区和树林)边界(图1)。

### 1.2 数据的预处理

从中国资源卫星中心购买2016年2月27日资源三号卫星CCD数据多光谱和PAN波段数据各二景,多光谱数据在ENVI软件中经过正射投影转换后,再经过辐射订标、大气校正和几何校正,最后将二景拼接在一

起,生成覆盖江陵县全境的空间分辨率为6 m的四波段光谱数据;PAN波段数据经过正射投影转换后,与多光谱数据运用Gram-Schmidt法进行数据融合<sup>[9]</sup>,生成空间分辨率为2 m的覆盖江陵县全境的四波段光谱数据。

从欧空局的网站上下载2016年1—5月江陵境内Sentinel-1A卫星C波段干涉宽幅(Interferometric wide swath)模式(空间分辨率5 m×20 m)的SAR数据6景(1月17日,2月10日,3月5日,3月29日,4月22日,5月16日),在NEST(Next ESA SAR Toolbox)软件下进行辐射定标、图像配准和多时相产品滤波,将每一景数据进行归一化相关处理,处理公式为

$$\sigma_{(x,y)} = \left( \frac{R_{(x,y)} - avg}{con} + 1 \right) \times 10, \quad (1)$$

式中, $R_{(x,y)}$ 为第 $x$ 行、第 $y$ 列的后向散射系数,avg为图像中所有后向散射系数的均值,而con为图像中所有后向散射系数的方差,为确保图像数据都为正数和以整数方式保存,将所有进行归一化处理的数据加1,并放大10倍,其主要目的是消除大尺度降水对后向散射系数的影响,有利于SAR数据的时序分析<sup>[10]</sup>。

### 1.3 分类结果验证方法

将结果数据和验证区数据运用GIS中的聚类分析生成只含0和1数字的栅格数据,0代表非油菜区、1代表油菜区,然后进行KAPPA系数计算,公式<sup>[11]</sup>如下

$$KAPPA = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c}, \quad (2)$$

其中,

$$P_o = s / n, \quad (3)$$

$$P_c = a_1 b_1 + a_0 b_0, \quad (4)$$

式中, $n$ 为栅格总像元,验证区栅格数据中为1的像元数为 $a_1$ ,为0的像元数为 $a_0$ ,结果模拟数据中为1的像元数为 $b_1$ ,为0的像元数为 $b_0$ ,两个栅格对应像元值相等的像元数为 $s$ 。

KAPPA计算结果通常在0~1:0.0~0.20代表极低的一致性,0.21~0.40代表一般的一致性,0.41~0.60代表中等的一致性,0.61~0.80代表高度的一致性,0.81~1代表几乎完全一致。

## 2 提取方法

先用空间分辨率为2 m融合过的资源三号四波段光谱数据进行特征值提取,即在ENVI软件中Segment Only Feature Extraction功能对图像进行切割和合并,切割算法选择Edge<sup>[12]</sup>,尺度大小为20,合并算法为Full Lambda Schedule<sup>[11]</sup>,合并尺度为30,切割融合的阈值是通过切割融合的效果来确定的,系统会将多光谱相近的相邻像素归为一个地物,作物种植区地物为一块块农田,最后给出地物边界矢量文件。

在ARCGIS中将地物边界矢量文件与预处理后的SAR数据进行统计叠置统计分析,将每块地物内的SAR数据取均值,并进行矢量转栅格计算,得到消除了相干斑点噪声、边界清晰的SAR栅格数据,结合本文分析的油菜SAR数据特征,得到油菜分类规则,分类后得到江陵县油菜种植区空间分布。具体流程图见图2。

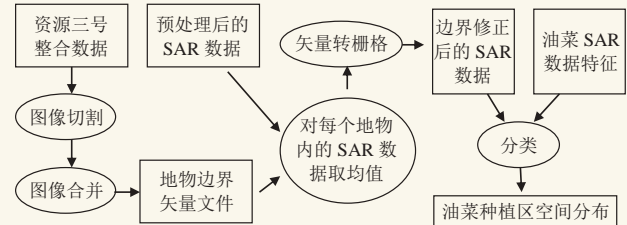


图2 油菜种植空间分布信息提取流程

Fig. 2 Process snaps of spatial distribution information for rape oil plants

## 3 结果与分析

### 3.1 不同极化的油菜 Sentinel-1 SAR 后向散射系数变化特征

由不同地物、不同时期两种极化的SAR后向散射系数变化(图3)可知,在整个生长期内油菜地VH极化的SAR后向散射系数明显高于小麦田和冬歇田,其中4月份最为明显,而VV极化数据这一特征不明显,这与Weise等<sup>[13]</sup>和田海峰等<sup>[14]</sup>观测到的结论一致,因此选取油菜地与小麦田、冬歇田差异最大的4月22日作为阈值,以“均值±80%×方差”作为上下界限,即满足SAR VH极化后向散射系数处理值大于2.1、小于3.5,且2月27日NDVI指数大于0.3(过滤掉非种植区)条件的区域为油菜地。

### 3.2 结果验证

将5.35 km<sup>2</sup>小麦与油菜交错地带获取的油菜地实际空间分布数据(图4a),与采用本文推荐的方法(用光学数据提取田间边界,用SAR数据进行阈值提取的分类方法)计算得到的结果数据(图4b),用式(2)进行KAPPA系数计算,得到KAPPA系数为0.88,计算整个江陵县油菜的种植面积为2.62万hm<sup>2</sup>,2016年江陵实际种植面积为2.21万hm<sup>2</sup>(《2016年荆州市统计年鉴》),结果相对准确;如果不用光学数据提取田间边界,直接用SAR数据进行阈值分类,其结果与实际值进行计算,得到的KAPPA系数为0.68(图4c);而用3月5日、3月29日、4月22日三景SAR数据进行田间边界提取,结合4月22日SAR数据进行阈值提取的分类方法得到的KAPPA系数为0.61(图4d)。比较这三种方法可以看到本文推荐的方法更接

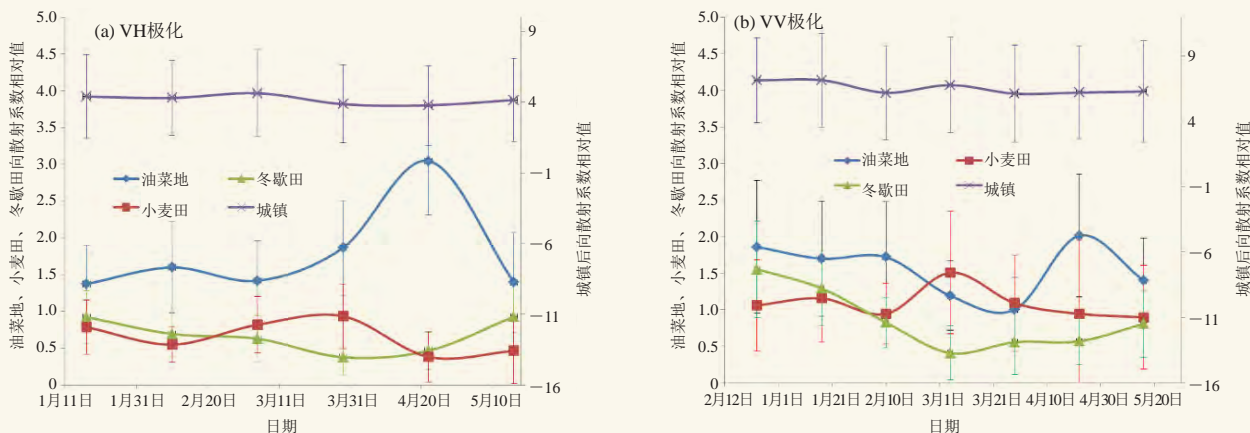


图3 不同地物、不同时期两种极化的SAR后向散射系数变化  
Fig. 3 The SAR backscatter coefficient values for variant objects and variant periods for two kinds of polarization

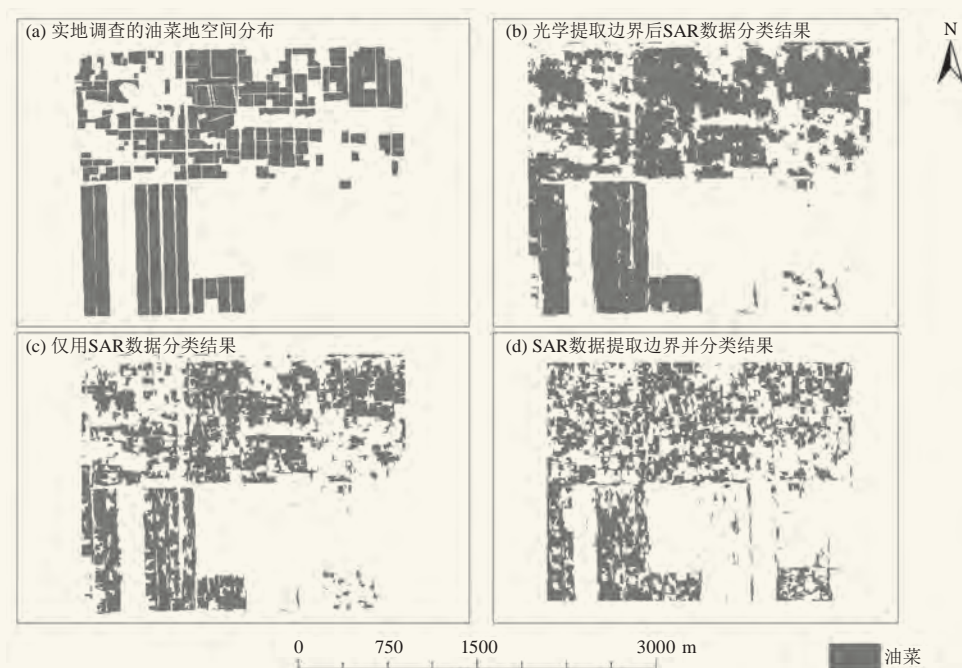


图4 不同方法的分类结果比较  
Fig. 4 The results comparing different classification methods

近实际情况，是三种方法中最好的提取方法，分类方法主要优点有两点：一是完全消除了相干斑点噪声的影响，主要表示在结果图中面积只有几个像素大小的错误结果没有了，田间内部的空白点也少了；二是农田边界清晰。

### 3.3 江陵县油菜种植空间分布

运用光学数据提取田间边界，用SAR数据进行阈值提取的分类方法，得到江陵县油菜种植空间分布信息（图5），江陵县油菜种植空间分布特点主要表现在油菜主要集中江陵县西部，主要集中在马家寨乡、滩桥镇和江北农场，与西部油菜、北部小麦的种植风格一致。

## 4 结果与讨论

本研究利用资源三号卫星CCD融合数据，运用图像切割融合技术，提取江陵县田块边界作为分析对象，并将每个对象内的SAR后向散射系数均值作为对象属性，运用阈值分类方法（即VH极化的后向散射系数大于2.1且小于3.5作为分类标准），判断对象是否为油菜种植区，达到提取油菜种植空间分布的目的，此方法较其他两种传统分类方法（直接用SAR数据进行阈值分类、运用其他时段SAR数据进行对象提取）有更高的分类精度，为多云雨地区农作物种植空间分布的提取提供了一个有效的方法。



图5 江陵县油菜种植空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution map of rape oil in Jiangling County

此方法是建立在油菜的VH极化后向散射系数明显高于其他作物<sup>[13-14]</sup>的基础上,对于其他作物的分类还有待进一步研究。运用光学数据提取田间边界对数据获取时间没有严格要求,只要是作物生育期内便可,而SAR数据,因为雷达卫星不受云层的影响,能定期获取,不会因为关键期遥感数据的缺失而降低作物种植空间分布提取的精度;还有由于完全消除了相干斑点噪声的影响,其分类精度较传统分类方法的精度有一个质的提高,因此该方法可以投入业务化运行。

本文光学遥感数据是采用2016年2月27日资源三号卫星CCD数据多光谱,油菜光谱特征与小麦基本相同,如果光学遥感数据获取日期是作物间差异大的时期,可用光学遥感数据与SAR数据共同参与分类,其精度会有一个更大的提高。

#### 参考文献

[1] Xavier B, Laurent V, Pierre D. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96: 352-365.  
 [2] Jiao X F, John M K, Shang J L. Object-oriented crop mapping and monitoring using multi-temporal polarimetric RADARSAT-2 data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 96(4): 38-46.  
 [3] Alberga, V. A study of land cover classification using polarimetric SAR parameters. *Int J Remote Sens*, 2007, 28: 3851-3870.

[4] Alberga V, Satalino G, Staykova D K. Comparison of polarimetric SAR observables in terms of classification performance. *Int J Remote Sens*, 2008, 29: 4129-4150.  
 [5] McNairn H, Champagne C, Shang J L, et al. Integration of optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery for delivering operational annual crop inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64: 434-449.  
 [6] 王迪,周清波,陈仲新,等.基于合成孔径雷达的农作物识别研究进展. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 203-212.  
 [7] Entezari I, Motagh M, Mansouri B. Comparison of the performance of L-band polarimetric parameters for land cover classification. *Can J Remote Sens*, 2012, 38: 629-643.  
 [8] Benz U C, Hofmann P, Willhauck G, et al. Multi-resolution object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2004, 58: 239-258.  
 [9] Bruno A, Stefano B, Massimo S. Enhanced Gram-Schmidt spectral sharpening based on multivariate regression of MS and Pan data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006, 6: 3806-3809.  
 [10] Konstantinos T, Dimitra K. Sea state primitive object creation from SAR data. *International Journal of Geosciences*, 2014, 5: 1561-1570.  
 [11] Bradley A P. The use of the area under the ROC Curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern Recognition*, 1997, 30(7): 1145-1159.  
 [12] Roerdink, Jos B T M, Meijster A. The watershed transform: definitions, algorithms, and parallelization strategies. *Fundamenta Informaticae*, 2001, 41: 187-228.  
 [13] Weise C, Hochschild V. Multipolarized and multitemporal analysis of Envisat ASAR data for agricultural inventories (InVeKoS) in Germany [M]. *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572)*. 6-10 September 2004, Salzburg, Austria.  
 [14] 田海峰, 郭明权, 牛铮, 等. 基于Radarsat-2影像的复杂种植结构下旱地作物识别. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 154-159.

# 土地利用变化对洪湖流域洪涝灾害影响

刘可群<sup>1,3</sup> 周守华<sup>1,2</sup> 黄永平<sup>2</sup> 汤阳<sup>3</sup> 李仁东<sup>4</sup> 李梦璠<sup>5</sup>

(1 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025; 2 荆州农业气象试验站, 荆州 434020;

3 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 4 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077;

5 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 洪湖流域是著名的鱼米之乡, 长期遭受洪涝渍害威胁, 也是我国血吸虫病流行最严重地区, 搞清该地区洪涝的致灾因子很有必要。利用历史上两个典型相似的暴雨强降水过程气象数据、土地利用资料, 采用暴雨洪涝淹没模型模拟计算, 以及实际洪涝灾情资料进行对比分析。结果表明, 洪湖流域水域面积从1995年的11.70%上升至2010年的14.95%, 增加的水域面积主要为水产养殖面积; 水产养殖导致对洪水承载能力下降, 鱼塘面积的大量增加对洪涝灾害确有放大作用, 加剧洪涝灾害; 真正落实国家“退田还湖”政策, 对于保护湿地生态环境十分重要。

**关键词:** 洪湖流域, 土地利用, 淹没模型, 洪涝灾害

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.009

## The Impact of Land Use Change on Flood Disaster in the Honghu Lake Watershed

Liu Kequn<sup>1,3</sup>, Zhou Shouhua<sup>1,2</sup>, Huang Yongping<sup>2</sup>, Tang Yang<sup>3</sup>, Li Rendong<sup>4</sup>

(1 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 2 Jingzhou Agricultural Meteorological Station, Jingzhou 434020

3 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

4 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077

5 Faculty of Information & Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Abstract:** The Honghu Lake watershed is a district with abundant fish and rice. The area has suffered long-term flood damage and the most serious schistosomiasis epidemic in China. It is necessary to determine the cause of flooding in this area. Based on meteorology and land use data of two locations with a similar history of heavy rainfall, a “torrential rain flood submergence” model was used to simulate, compare and analyze scenarios. The results showed that the water area ratio in the Honghu Lake watershed increased from 11.70% (in 1995) to 14.95% (in 2010), which is mostly aquaculture area. It also showed that it was aquaculture which lead to a decline in bearing capacity for flooding, which was amplified by an increase in fish pond areas. We conclude that protection of ecological environment in wetland should be carried out by implementation of policy of restoring the lake from the land.

**Keywords:** Honghu Lake watershed, land use, submerged model, flood disaster

### 0 引言

20世纪80—90年代以来, 四湖地区的洪水渍涝屡成灾, 灾情越来越严重, 造成了巨大的经济损失, 已成为制约洪湖地区经济可持续发展的重要因素<sup>[1-6]</sup>。尽管洪涝灾害的发生与气象、地貌等自然条件密不可分, 但人类不合理的土地开发利用对洪涝灾害的影响

不容忽视<sup>[7]</sup>。周宏春等<sup>[8]</sup>研究认为长江中游地区增加的洪涝灾害70%是人类不合理的土地利用造成的。刘成武等<sup>[9]</sup>从人地关系角度研究秦汉以来自然灾害的变化是由于人地关系演变导致了“人、土、水”等关系恶化, 进而引发并加重自然灾害; 农业水旱种植不合理会加重旱涝程度<sup>[10]</sup>。吴秀芹等<sup>[11]</sup>研究认为湿地面积的减少及其功能的退化是平原湖区洪涝加剧的重要原因。近些年水产养殖等湿地面积明显增加<sup>[4]</sup>, 这种土地利用的变化对洪涝灾害的影响是加重还是减轻, 笔者将利用基于GIS的洪水淹没模型以及农业灾情数据进行量化分析, 旨在为洪湖湿地生态保护、钉螺扩散与防御, 以及可持续发展提供科学依据。

收稿日期: 2018年5月28日; 修回日期: 2018年6月27日

第一作者: 刘可群(1963—), Email: kequnliu@126.com

通信作者: 周守华(1961—), Email: jzzsh@163.com

资助信息: 国家自然科学基金面上项目(41571487); 中国气象局气候变化专项(CCSF201409和CCSF201821)

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域概况

洪湖流域(图1)境内有长湖、三湖、白露湖、洪湖四个大型湖泊,也称为四湖地区,现只剩下长湖和洪湖;其地域包括荆州市监利县、洪湖市两县(市)全部,荆州市城郊地区,以及石首市、沙阳县、潜江市一部分。流域面积11547 km<sup>2</sup>,地形上,流域西北部地势高,东南部地势低。

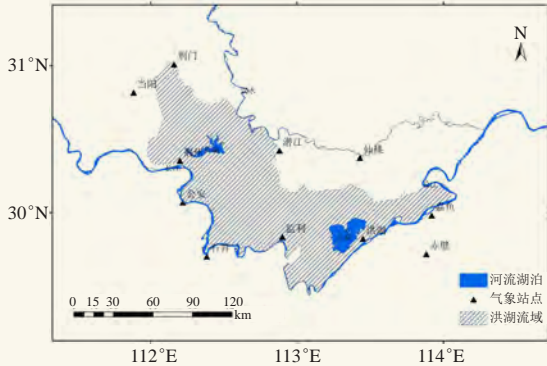


图1 研究区域地理位置示意图  
Fig. 1 Location of the study area

### 1.2 资料来源

气象资料为洪湖流域及其周边各地面气象观测台站实测地面逐日降水量数据,数据来自于湖北省气象档案馆;土地利用采用2010年LandSat TM卫星数据提取的湖北省土地利用分类图;水产养殖面积来自于湖北省统计局湖北农村统计年鉴编辑委员会<sup>[12]</sup>。暴雨过程造成的实际灾情数据来源于洪湖市民政局。

### 1.3 计算方法

#### 1) 面雨量计算

研究区域内气象站点有荆门、荆州、监利、洪湖4个,站点分布不均匀,利用简单的算术平均方法计算其区域降水量不尽合理,精度较低<sup>[13]</sup>;为了较科学准确反映该区域降水情况,本研究对区域以0.025°×0.025°网格化,并增加周边相邻的公安、潜江、仙桃、石首、嘉鱼、赤壁、当阳等站点逐日降水资料,采用距离平方反比法(计算公式见式(1))。计算区域内各网格点降水量,再对所有网格降水值求其平均,即得到区域降水量。

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

式中, $n$ 为格点数目, $R_i$ 为第 $i$ 点的样点值, $d_i$ 为第 $i$ 样点到插值点的距离, $R$ 为待估值。当样点与插值点重合时

样点权重为1,其他点权重为0,插值点值等于样点值。

#### 2) 暴雨洪涝淹没模型

利用GIS栅格分析技术,在DEM基础上运用水动力学建立洪水演进模型,淹没过程中的水流方向由地形坡向所决定。本研究运用改进的D8(最大坡降算法)<sup>[14-16]</sup>计算水流方向,用曼宁公式(Manning-Strichler)计算水流速度与水流流量,以1:5万高程数据为基础,基于水动力学暴雨洪涝演进分布式水文模型<sup>[16-18]</sup>分别对洪湖流域1996年7月14—21日、2010年7月8—16日两次降水特征相似的暴雨过程,而鱼塘面积有较大差异的洪涝受淹面积进行模拟计算。前后两次降水过程造成该地区洪涝中并没有受到周边汇水影响,因此研究中不考虑周边汇水影响。

在发生暴雨洪涝时,为防止鱼塘漫顶鱼外逃带来的巨大损失,鱼塘经营者在暴雨期间将进入塘内的大量雨水外排,确保鱼塘水位低于鱼塘塘坝一定高度以避免不必要的损失。因此本研究采用降水洪水演进与河网漫顶式演进混合模型计算流程<sup>[18]</sup>,亦即通过气象台站观测的降水信息,获取面雨量数据,得到单位时间内每个栅格所增加的水量,通过曼宁公式计算流向其他栅格的水量信息;同时初始化河网和鱼塘水位,鱼塘水位达到鱼塘正常水位的最高值(假定鱼塘塘坝高为 $h$ ,鱼塘正常水位的最高值为 $h-10$  cm)和河网水位高出周围的地形高程为鱼塘与河网漫出高度;依次迭代,计算时间 $T$ 后,地面形成的积水信息,计算过程如图2。由于缺乏每一个水产养殖鱼塘的具体位置,研究中以各县(区)为单元,将各单元内所有水产养殖面积作为一个整体鱼塘且地理位置位于该县(区)中水产面积最集中的乡镇进行模拟计算。

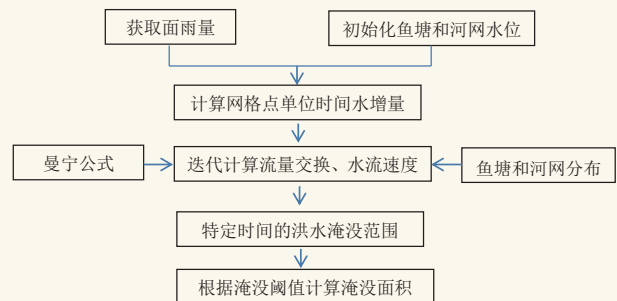


图2 洪水演进计算过程

Fig. 2 Flood evolution calculation process

## 2 结果与分析

### 2.1 近20年土地利用变化

据徐小娇等<sup>[19]</sup>研究江汉平原土地利用中耕地面积占总面积的比例从1995年的71.27%下降到2010年的66.73%,而水域面积则从1995年的11.70%上升至2010

年的14.95%，土地利用变化最大的是耕地转变为水域，占土地变化总量的61.12%；未利用地转变为水域的占土地变化总量的7.84%，两者合计为68.96%，亦即所有转变为水域的土地占总变化量的近70%（表1）。洪湖流域是江汉平原的核心区域，该区域土地利用变化是最具有代表性的，据湖北省统计局统计，洪湖、监利两县分别是湖北省第一、三大水产养殖大县，其水产养殖面积占该地区水产养殖总面积的80%左右。图3是1990年以来洪湖周边两县（市）水产养殖面积

逐年变化情况。从图中可以看出，该地区洪湖、监利两县（市）水产养殖面积2010年是1995年的4倍，增加面积超过洪湖的湖面面积。由此可见，亦即耕地面积大部分转变为水域面积，实际上转变为水产养殖面积。在生产实践中，鱼池水深每增加0.5 m，产量可提高30%；一般情况下鱼塘水位处于正常水位的最高值，尤其在鱼类主要生长季（5—9月）更是如此。因此，同为水域的水产鱼塘用地与湖泊沟渠水域地相比，在遇暴雨洪涝时前者丧失了对洪水的调洪能力。

表1 1995—2010年江汉平原主要土地利用/覆盖类型变化轨迹<sup>[19]</sup>

Table 1 Change in trajectory of main land use/cover types in the Jiangnan Plain from 1995 to 2010

1995—2000—2005—2010	面积/km <sup>2</sup>	1995—2000—2005—2010	面积/km <sup>2</sup>
耕地—水域—水域—水域	423.68	耕地—建设用地—建设用地—建设用地	69.71
耕地—耕地—水域—水域	370.12	耕地—未利用地—未利用地—未利用地	29.73
耕地—耕地—耕地—水域	197.48	水域—耕地—耕地—耕地	46.93
未利用地—水域—水域—水域	80.00	水域—水域—水域—耕地	35.67
未利用地—未利用地—水域—水域	24.09	水域—水域—未利用地—未利用地	30.80
未利用地—未利用地—未利用地—水域	23.01	水域—未利用地—未利用地—未利用地	61.31
耕地—耕地—耕地—建设用地	172.58	建设用地—耕地—耕地—耕地	24.59
耕地—耕地—建设用地—建设用地	21.47	未利用地—未利用地—未利用地—耕地	10.68

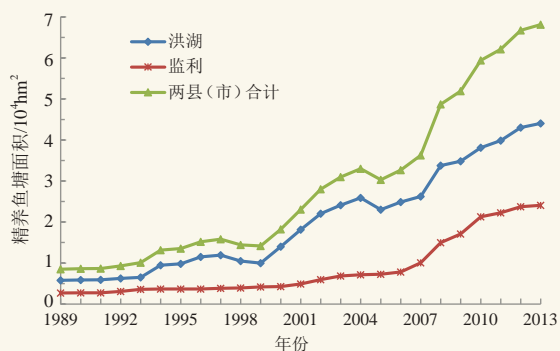


图3 洪湖、监利两县（市）1990年以来精养鱼池年际变化  
Fig. 3 Interannual variation of fine aquarrium at Honghu and Jianli County since 1990

## 2.2 土地利用变化对淹没面积的影响

图4是1996年7月14—21日及2010年7月8—16日降水过程总降水量的分布情况。从图中可以看出，1996年7月14—21日、2010年7月8—16日两次降水过程非常相似，降水中心集中在洪湖市；降水量比较接近，中心累计最大降水量分别为591.4和560.2 mm；累计雨量分别为268.0和245.0 mm；过程最大日面雨量分别为69.5和68.2 mm，见表3。两者都比较接近，也皆为前者略高于后者。

将1996年7月14—21日与2010年7月8—16日降水网格化数据代入暴雨洪涝淹没模型，由此推算两次暴雨过程在不同情景下洪涝灾害的淹没面积情况，其中

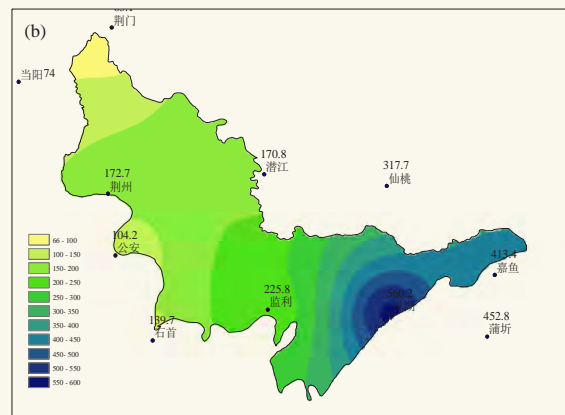
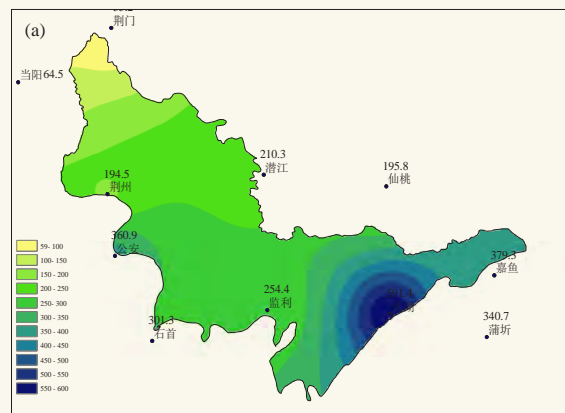


图4 1996年7月14—21日（a）、2010年7月8—16日（b）降水量分布  
Fig. 4 Precipitation distribution between July 14—21, 1996 (a) and July 8—16, 2010 (b)

鱼塘面积分别以当年的实际面积为初始条件计算；淹没阈值设定为40 cm，其计算结果如表2。由于洪湖市地处四湖流域的下游，地势较低，两次降水过程的主要淹没面积均集中在洪湖市，暴雨过程造成洪湖市模型计算的淹没面积占洪湖流域总淹没面积的比例均在52%以上。

表2 利用暴雨洪涝淹没模型计算的不同情景下淹没面积/ $10^3 \text{ hm}^2$   
Table 2 The flood area under different scenarios calculated using the rainstorm flood model / $10^3 \text{ hm}^2$

降水过程	不考虑鱼塘的淹没		考虑鱼塘的淹没		鱼塘造成淹没差	
	全流域	洪湖	全流域	洪湖	全流域	洪湖
1996年7月14—21日	178.72	93.08	181.48	98.73	2.76	5.65
2010年7月8—16日	134.71	92.64	161.81	113.67	27.1	21.03
两者之差	-44.01	-0.34	-19.67	14.94	24.34	15.38

从表2中进一步看出，在不考虑鱼塘因素的影响情况下，1996年7月14—21日的不论是全流域，还是洪湖市暴雨淹没面积均大于2010年7月8—16日淹没面积，其中全流域的淹没面积较2010年7月过程降水淹没面积多 $4.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。在有鱼塘因素情景下，1996年7月14—21日全流域的淹没面积虽然仍较2010年7月8—16日多，但两者之间的差值减少了 $2.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ；洪湖市的淹没面积则相反，2010年7月的过程淹没面积较1996年则多 $1.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。由此可见鱼塘面积的增加，对于洪涝灾害确有放大作用。

### 2.3 实际洪涝受灾面积影响对比分析

表3是1996年7月和2010年7月两次暴雨强降水过程开始前30 d、60 d以及过程降水主要特征值与洪涝受灾的对比情况。从过程降水几个特征值及空间分布（图4）上看，两次降水的强度及其降水中心区均高度相似，且强度1996年略强。从前期的降水情况看，2010年的降水过程前30、60 d的降水均低于1996年的降水，前者分别只有后者的52%和57%。从洪湖

表3 洪湖流域1996、2010年7月暴雨降水相关特征值及灾情  
Table 3 Statistics and disasters related to rainstorms in Honghu Lake watershed in July 1996 and 2010

	1996年	2010年
暴雨洪涝过程发生时间	7月14—21日	7月8—16日
过程开始前30 d累计雨量/mm	304.8	158.4
过程开始前60 d累计雨量/mm	510.0	288.9
过程累计雨量/mm	268.0	245.0
过程最大日雨量/mm	69.5	68.2
区域内单站过程雨量	站点	洪湖
	雨量/mm	591.4
区域周边单站过程雨量	站点	嘉鱼
	雨量/mm	379.3
洪湖市农作物受灾面积/ $\text{hm}^2$	56113	65000

水位上看，1996年7月13日水位为25.91 m，较2010年7月7日的24.75 m水位高1.16 m。但从农作物受灾面积上看，洪湖市2010年的受害面积较1996年增加了 $8000 \text{ hm}^2$ 。由此可见水产养殖导致对洪水承载能力下降，该区域土地利用的变化加剧了洪涝灾情发生。

### 3 小结

随着社会经济的发展，近20年来洪湖流域土地利用变化很大，水域面积从1995年的11.70%上升至2010年的14.95%，增加的水域面积主要为水产养殖面积；洪湖、监利两县（市）精养鱼池面积增加4倍，增加面积超过了洪湖的湖面面积。不论是从暴雨洪涝淹没模型理论计算，还是从实际的洪涝灾情对比分析均发现，水产养殖导致对洪水承载能力下降，鱼塘面积的大量增加对洪涝灾害的确有较显著的放大作用，会加剧了洪涝灾情发生。综上所述，目前土地利用结构不利于该地区生态环境改善及农业可持续发展，应当调整农业结构力度，避免盲目发展水产养殖导致湿地生态破坏；应真正落实国家“退田还湖”政策。

#### 参考文献

- 邱娟, 魏凤华, 刘可群, 等. 湖北省钉螺村级尺度时空分布格局研究. 中国血吸虫病防治杂志, 2015, 27(2): 119-124.
- 彭惠玲, 岑雨萍, 龚新国, 等. 气象水文因素对湖北省长江及汉江流域血吸虫病疫情的影响. 中国血吸虫病防治杂志, 2010, 22(6): 606-608.
- Chang B R, Li R D, Zhu C D, et al. Quantitative impacts of climate change and human activities on water-surface area variations from the 1990s to 2013 in Honghu Lake, China. Water, 2015, 7: 2881-2899.
- 刘可群, 梁益同, 周金莲, 等. 人类活动与气候变化对洪湖春旱影响分析. 生态学报, 2014, 34(5): 1302-1310.
- 李源培, 何忠, 何明祯, 等. 湖沼地区水位变化对钉螺消长影响的广义相加模型研究. 中华流行病学杂志, 2010, 31(10): 1148-1155.
- 陶凯, 杜耘. 洪湖地区涝渍灾害脆弱性评估. 世界科技研究与发展, 2008, 30(2): 177-179.
- 刘慧. 长江中游地区洪涝灾害的土地利用思考. 长江流域资源与环境, 2004, 13(6): 616-620.
- 周宏春, 王毅, 于秀波, 等. 长江中游退田还湖与可持续发展. 北京: 经济科学出版社, 2002.
- 刘成武, 黄利民, 吴斌祥. 论人地关系对湖北省自然灾害的影响. 水土保持研究, 2004, 11(1): 177-181.
- 刘可群, 陈正洪, 周金莲, 等. 近50年来湖北旱涝灾害变化及其驱动因素分析. 华中农业大学报(自然版), 2010, 29(3): 326-332.
- 吴秀芹, 龙花楼, 高吉喜, 等. 江汉平原湿地功能下降与洪涝灾害关系分析. 生态环境, 2005, 14(6): 884-889.
- 湖北农村统计年鉴编辑委员会. 湖北农村统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1989-2011.
- 徐晶, 林建, 姚学祥, 等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用. 气象, 2001, 27(11): 13-17.
- 章国材. 暴雨洪涝预报与风险评估. 北京: 气象出版社, 2012.
- 孙艳玲, 刘洪斌, 谢德体, 等. 基于DEM流域河网水系的提取研究. 资源调查与环境, 2004, 25(1): 18-22.
- 郭生练, 熊立华. 基于DEM的分布式流域水文物理模型. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 2-5.
- 刘仁义, 刘南. 基于GIS的复杂地形洪水淹没区计算方法. 地理学报, 2001, 56(1): 1-6.
- 史瑞琴, 刘宁, 李兰, 等. 暴雨洪涝淹没模型在洪灾损失评估中的应用. 暴雨灾害, 2013, 32(4): 379-384.
- 徐小娇, 周建峰, 王文丽, 等. 近十五年来江汉平原LUCC轨迹分析. 湖北大学学报, 2012, 34(1): 110-115.

# 2014—2016年荆州城区空气质量与气象要素的关系分析

邓艳君<sup>1,2</sup> 赵卓勋<sup>1</sup> 李玲<sup>3</sup> 张伦瑾<sup>1</sup>

(1荆州市气象局, 荆州 434020; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025;

3 荆州市环境保护监测站, 荆州 434000)

**摘要:** 利用2014年1月1日—2016年12月31日荆州城区逐日空气质量数据和同期地面气象要素逐日观测资料, 分析了荆州城区空气质量状况、变化特征及其与气象要素的相关性。结果表明, 荆州城区优良日数偏少, 但2014—2016年荆州城区空气质量略有改善, 首要污染物为PM<sub>2.5</sub>; AQI和PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO的月变化规律一致, 呈V型分布, 冬季空气污染最严重, 夏季空气污染相对较轻, O<sub>3</sub>的变化规律则相反, 呈反V型分布; 除O<sub>3</sub>外, AQI和其他污染物浓度与前一日AQI、气压呈正相关关系, 与气温、水汽压、湿度、云量、降水、风速呈负相关关系, 据此建立了AQI和各污染物浓度的回归预报方程; 进一步分析了2014年1月严重污染天气的成因, 本地污染物的分布、外地污染物的输入和气象扩散条件是影响空气质量的主要因素。

**关键词:** AQI, 污染物浓度, 气象要素, 相关分析, 回归方程

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.010

## Correlation Analysis of the Air Quality and the Meteorological Elements in Jingzhou from 2014—2016

Deng Yanjun<sup>1,2</sup>, Zhao Zhuoxun<sup>1</sup>, Li Ling<sup>3</sup>, Zhang Lunjin<sup>1</sup>

(1 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020 2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology

in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025

3 Jingzhou Environment Protection Monitoring Station, Jingzhou 434000)

**Abstract:** The daily air quality data in Jingzhou city from January 1, 2014 - December 31, 2016 and the daily observation data of ground meteorological elements in the same period were used to analyze the air quality status, variation characteristics and the correlation-ships with meteorological elements in Jingzhou. The results show that the air quality in Jingzhou was slightly improved during the period from 2014 to 2016 and less pollution occurred on fine days. The primary pollutant was PM<sub>2.5</sub>. The monthly AQI, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, and CO has a 'V' shape variation, while O<sub>3</sub> reverses. The air pollution was the most serious in winter and relatively light in summer. The AQI and the concentration of pollutants except O<sub>3</sub> are positively related to the AQI and air pressure on previous day, and are negatively related to the temperature, aqueous vapor pressure, humidity, cloud amount, precipitation and wind speed. The regressive prediction models of AQI and the concentration of pollutants are established based on the analysis. The cause of a serious weather pollution case in January 2014 is further analyzed: the distribution of local pollutants, the importing pollutants and the meteorological diffusion condition are the main factors affecting the air quality in that month.

**Keywords:** AQI, pollutant concentration, meteorological element, correlation analysis, regression model

### 0 引言

随着城市社会经济快速发展, 荆州的工业化、城镇化水平不断提高, 城市空气污染日趋严重, 空气污染、雾霾天气时有发生。近年来, 人们生活水平提高, 人们对生活环境质量的要求也越来越高, 控制

空气污染、改善空气质量的需求越发强烈, 因此对城市空气质量进行全面、客观的认识和评价, 根据本地实际情况准确预测空气污染气象扩散条件, 为环境管理提供决策依据, 预防严重污染事件的发生具有重要意义。

目前, 国内学者对空气质量、大气污染物的时空分布特征、空气污染与气象要素的关系、污染天气空气质量的预报等方面做了大量研究。例如, 建立了城市空气污染数值预报系统(CAPPS)<sup>[1-2]</sup>, 北京<sup>[3]</sup>、广

收稿日期: 2018年5月30日; 修回日期: 2018年7月27日  
第一作者: 邓艳君(1988—), Email: 570517642@qq.com  
资助信息: 荆州市气象局科技基金支持课题(JZ201705)

州<sup>[4]</sup>、上海、沈阳等城市开展了城市空气污染浓度的预报,建立了城市空气污染数值预报模式和统计模式,很多学者<sup>[5-9]</sup>分析了空气污染与气象要素的相关关系。

2012年上半年,国家规定采用空气质量指数(Air Quality Index, AQI)替代原有的空气污染指数(Air Pollution Index, API)。AQI分级参考新的环境空气质量标准(GB—3095—2012),参与评价的污染物包括二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)、细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、臭氧(O<sub>3</sub>)和一氧化碳(CO),因此AQI较API监测的污染物指标更多,评价结果更客观。荆州市环保局从2013年8月开始启用新的环境监测设备,市委党校环境监测站从2014年1月1日开始以AQI代替API。本文利用2014—2016年市委党校环境监测站逐日空气质量监测资料,分析荆州城区空气质量AQI及主要污染物的现状和变化特征,进一步讨论空气质量与气象要素之间的关系,以期对荆州城区空气质量预报提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究资料

荆州城区2014年1月1日—2016年12月31日空气质量数据来源于荆州市环保局市委党校站常规监测项目日均值数据,包括逐日空气质量指数AQI,细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)、二氧化硫、二氧化氮、臭氧、一氧化碳等6种主要污染物浓度,首要污染物,空气质量类别,以及空气质量等级等数据。同期气象资料来源于湖北省荆州区国家基本气象站日值数据,包括逐日气压(平均、最高、最低)、气温(平均、最高、最低)、平均水汽压、相对湿度(平均、最小)、降水量、平均总云量、平均低云量、平均风速、风向风速(最大、极大)等气象要素。

### 1.2 研究方法

Pearson相关系数是反映变量之间相关关系密切程度的统计指标,通过两个离差乘积反映两个变量之间的相关程度,着重研究线性的单相关系数。本文利用统计学中常用的Pearson相关系数来衡量AQI、各污染物浓度和气象要素的相关关系。在相关分析的基础上,选取相关性较高的气象要素作为预报因子组,并排除气象要素间的自相关性,分别建立AQI和污染物浓度的线性回归预报方程。

## 2 结果分析

### 2.1 空气质量变化特征

#### 2.1.1 空气质量现状

2014年1月—2016年12月荆州城区出现频率最高

的空气质量等级是二级良(图1),占总日数的51%;其次是三级轻度污染,占总日数的28%;中度污染日数占8%,优等级的日数占7%,重度污染日数占5%,严重污染出现的频率最低,仅占1%。

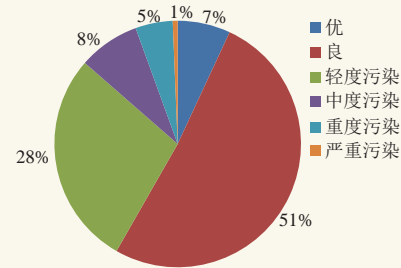


图1 2014年1月—2016年12月荆州城区不同等级空气质量百分比

Fig. 1 Percentage of air quality grades in Jingzhou during the period from January 2014 to December 2016

2014—2016年,荆州城区不同等级空气质量日数(表1)可以看出,这3年间荆州城区空气质量呈上升趋势,优良日数增多,轻度污染以上的污染日数减少,2014年污染日数为175 d,2015和2016年分别为138和139 d,其中重度污染和严重污染日数显著减少,2015和2016年没有出现严重污染。

表1 2014—2016年荆州城区不同等级空气质量日数(单位:d)  
Table 1 Days of various air quality grades in Jingzhou from 2014 to 2016

年份	I	II	III	IV	V	VI	污染日数
2014	18	161	106	30	32	7	175
2015	24	203	90	35	13	0	138
2016	33	192	109	22	8	0	139

2014—2016年,荆州城区首要污染物出现频率最高的是PM<sub>2.5</sub>(表2),共出现565 d,这3年间PM<sub>2.5</sub>出现频率显著下降;其次是臭氧,出现242 d,2014—2016年首要污染物为臭氧的日数显著增加,2014年仅37 d,2016年增加到130 d,主要出现在4—10月;首要污染物为PM<sub>10</sub>的天数为208 d,2014—2016年略微下降;首要污染物为NO<sub>2</sub>的天数仅在2015年出现5 d,2016年出现4 d,首要污染物中没有SO<sub>2</sub>和CO。

表2 2014—2016年首要污染物出现日数(单位:d)  
Table 2 Days of primary pollutants occurred in Jingzhou from 2014 to 2016.

年份	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
2014	0	37	82	224
2015	5	75	55	212
2016	4	130	71	129
合计	9	242	208	565

#### 2.1.2 空气质量和污染物的月变化

由AQI和6种污染物浓度月变化(图2)可知,

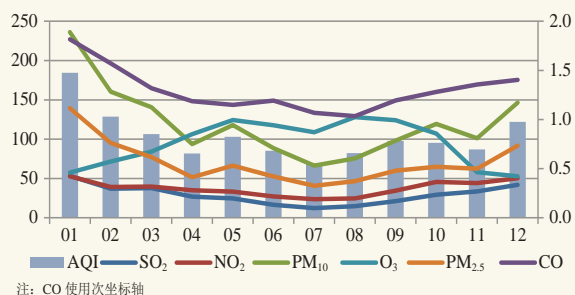


图2 2014—2016年荆州城区AQI和污染物浓度月变化  
Fig. 2 Monthly variation of AQI and pollutant concentration in Jingzhou from 2014 to 2016

PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和AQI的变化规律一致，呈V型分布，高值区在12—3月，其中峰值出现在1月，1月为全年空气质量最差的月份，AQI为128.6，PM<sub>10</sub>高达236.2、PM<sub>2.5</sub>为139.4，2月、12月PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和AQI出现第二和第三高值；低值区出现在7—8月，7月出现最低值，7月为全年空气质量最好的月份，AQI为69.4，PM<sub>10</sub>为66.4、PM<sub>2.5</sub>为40.7，5月、9—10月出现阶段性的峰值。SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>的变化规律比较一致，1—3月两者浓度比较接近，4—12月NO<sub>2</sub>浓度均高于SO<sub>2</sub>，NO<sub>2</sub>浓度高值出现在10—1月，低值出现在6—8月，SO<sub>2</sub>高值出现在12—3月，低值出现在6—8月。CO浓度值域范围较小，在1.03~1.82，7—8月出现低值，浓度为1.03~1.07，1—2月出现高值，浓度为1.57~1.82。O<sub>3</sub>

的变化规律与AQI和其他5种污染物的变化规律相反，呈反V型分布，低值区在11—1月，高值区在8—9月。

## 2.2 气象条件对空气质量的影响

### 2.2.1 AQI、污染物浓度与气象要素相关性

首先初选具有明确物理意义的常规地面观测资料：当日（日平均、日最高、日最低）气压、气压日较差、当日（日平均、日最高、日最低）气温、气温日较差、日平均水汽压、日平均和日最小相对湿度、当日日平均总云量和低云量、当日日降水量、当日（日平均、日最大、日极大）风速、日日照时数，以及前一日AQI共19个因子，利用Pearson相关系数分析AQI和6种污染物浓度与气象要素的相关性。

由表3可知，AQI和6种污染物浓度与19种初选因子的相关分析，除AQI与日日照时数、NO<sub>2</sub>与日日照时数、O<sub>3</sub>与日极大风速、CO与日最小相对湿度没通过显著性检验，PM<sub>10</sub>与日日照时数、O<sub>3</sub>与日最大风速只通过 $\alpha=0.05$ 水平的显著性检验外，其他均通过了 $\alpha=0.01$ 水平的显著性检验。

AQI及各污染物浓度，除O<sub>3</sub>外，与前一日AQI呈正相关关系，AQI与前一日AQI相关系数高达0.73，说明空气质量具有延续性，受前期空气质量影响作用较大，空气质量有一个由好变差的污染物累积过程，也有一个由差转好的污染物稀释过程。

表3 2014—2016年荆州城区AQI及6种污染物浓度与气象要素的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between AQI, concentrations of 6 pollutants and meteorological elements in Jingzhou from 2014 to 2016

初选因子	AQI	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	CO	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>
前一日AQI	0.730**	0.372**	0.352**	0.716**	0.531**	-0.087**	0.741**
日平均气压	0.267**	0.532**	0.475**	0.338**	0.234**	-0.466**	0.333**
日最高气压	0.269**	0.543**	0.477**	0.344**	0.241**	-0.468**	0.335**
日最低气压	0.269**	0.530**	0.489**	0.335**	0.239**	-0.466**	0.336**
气压日较差	0.093**	0.243**	0.106**	0.155**	0.094**	-0.170**	0.111**
日平均气温	-0.304**	-0.524**	-0.431**	-0.377**	-0.349**	0.628**	-0.398**
日最高气温	-0.252**	-0.425**	-0.340**	-0.322**	-0.305**	0.701**	-0.355**
日最低气温	-0.333**	-0.596**	-0.493**	-0.404**	-0.366**	0.535**	-0.413**
气温日较差	0.157**	0.346**	0.317**	0.150**	0.103**	0.498**	0.085**
日平均水汽压	-0.332**	-0.578**	-0.493**	-0.407**	-0.319**	0.477**	-0.396**
日平均相对湿度	-0.188**	-0.331**	-0.217**	-0.203**	0.090**	-0.339**	-0.102**
日最小相对湿度	-0.232**	-0.454**	-0.396**	-0.252**	-0.019	-0.444**	-0.146**
日平均总云量	-0.101**	-0.249**	-0.216**	-0.080**	-0.075*	-0.354**	-0.041
日平均低云量	-0.316**	-0.368**	-0.333**	-0.326**	-0.195**	-0.156**	-0.300**
日降水量	-0.218**	-0.269**	-0.239**	-0.210**	-0.124**	-0.135**	-0.189**
日平均风速	-0.202**	-0.372**	-0.554**	-0.221**	-0.215**	-0.127**	-0.195**
日最大风速	-0.236**	-0.327**	-0.522**	-0.236**	-0.261**	-0.061*	-0.241**
日极大风速	-0.254**	-0.342**	-0.508**	-0.259**	-0.277**	-0.040	-0.266**
日日照时数	-0.0208	0.096**	0.0554	-0.078*	-0.095**	0.565**	-0.127**

注：\*为通过了 $\alpha=0.05$ 水平的显著性检验；\*\*为通过了 $\alpha=0.01$ 水平的显著性检验。

AQI及各污染物浓度,除O<sub>3</sub>外,均与气压呈正相关关系,综合比较,日最高气压相关系数具有微弱优势。气压对AQI和5种污染物浓度有负作用,气压越高越不利于空气质量的提高和污染物浓度的下降,反之,气压越低,空气质量越好,污染物浓度越低,这是由于低压系统控制下,底层空气辐合上升,近地面的污染物随空气上升到高空,有利于近地面污染物的稀释和扩散;当高压系统控制时大气稳定,不利于污染物向高空扩散,滞留在近地面层,导致空气质量变差,污染物浓度升高<sup>[8]</sup>。

AQI及各污染物浓度,除O<sub>3</sub>外,均与气温呈负相关关系;但AQI和6种污染物浓度均与气温日较差呈正相关关系;AQI及各污染物浓度与(日平均、日最高、日最低)气温的相关系数明显大于气温日较差,O<sub>3</sub>与日最高气温相关性最好,AQI及其他污染物浓度均与日最低气温的相关性最好。气温对空气质量有正作用,气温越高,空气质量越好,这是由于近地面气温较高时大气垂直对流作用加强,越有利于污染物向上输送,污染物浓度越低,空气质量就越好;当气温低时,情况则相反<sup>[10]</sup>。

水汽压和相对湿度是表征空气湿度的两个物理量。AQI及各污染物浓度,除O<sub>3</sub>外,均与日平均水汽压呈负相关关系。AQI及各污染物浓度,除CO外,均与日平均相对湿度呈负相关关系,CO与湿度的相关性较差,AQI及其他5种污染物浓度,与日最小相对湿度的相关性要优于日平均相对湿度。

AQI及各污染物浓度,与云量呈负相关关系,云量越多,空气质量越好,除O<sub>3</sub>外,AQI及各污染物浓度与日平均低云量的相关性要优于日平均总云量。

AQI及各污染物浓度与日降水量均呈负相关关

系。分析其原因,降水对污染物具有清除作用,降水可以溶解或与有些污染物起化学反应,降水还可以把颗粒物带到地面。通常,雨滴可兼并粒径大于2 μm的气溶胶粒子,降雨对各污染物的影响不一,对PM<sub>10</sub>的影响最大,SO<sub>2</sub>次之,NO<sub>2</sub>最小<sup>[11]</sup>。

AQI及各污染物浓度,除O<sub>3</sub>外,与风速均呈负相关关系,O<sub>3</sub>与风速的相关性较差,AQI、PM<sub>10</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>与日极大风速的相关性最好,SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>与日平均风速的相关性最好。分析原因,风速越大,大气扩散条件越好,污染物扩散能力越强,空气质量越好;相反,风速小,大气扩散能力差,容易造成污染物的堆积,污染物浓度升高,空气质量就差。

O<sub>3</sub>与日照时数的相关性较好,AQI及其他5种各污染物浓度与日照时数的相关性均较差。

O<sub>3</sub>与AQI和其他5种污染物浓度的特征不一致,O<sub>3</sub>与气温、日照时数、水汽压有显著的正相关关系,与气压、相对湿度有明显的负相关关系,与日降水、风速的关系不大,主要是由于形成原因不同,O<sub>3</sub>主要与大气光化学反应有关,在太阳辐射强,日照时间长,云量少,高温低湿条件时,O<sub>3</sub>浓度升高。

### 2.2.2 建立 AQI 和污染物浓度的回归预报方程

根据上述分析,从预选因子组中选择前一日AQI、气压、气温、水汽压、云量、降水量、风速、日照时数等8类因子作为备选因子,根据相关系数大小,并排除气象要素间的自相关性,分别建立AQI和污染物浓度的线性回归预报方程(表4)。从表4可以看出,各回归方程显著,除CO回归方程复相关系数略低,其他方程的复相关系数均大于0.73,方程均通过显著性检验,可以认为选出的气象因子对AQI及各污染物的影响显著,该方程组的结论值得参考。

表4 AQI及6种污染物浓度的回归预报方程

Table 4 Regressive prediction model for AQI and concentrations of 6 pollutants

预报值	回归方程	复相关系数
AQI	$790.76 + 0.67X_1 - 0.7X_{2b} - 1.02X_{3a} - 0.26X_4 - 1.63X_{5a} - 0.48X_6 - 3.1X_{7b}$	0.773
SO <sub>2</sub>	$128.16 + 0.06X_1 - 0.07X_{2b} - 0.84X_{3a} - 0.38X_4 - 1.01X_{5a} - 0.16X_6 - 6.5X_{7a}$	0.734
NO <sub>2</sub>	$-35.92 + 0.05X_1 + 0.1X_{2a} + 0.13X_{3a} - 0.79X_4 - 0.48X_{5a} - 0.05X_6 - 8.99X_{7a}$	0.766
PM <sub>10</sub>	$737.05 + 0.88X_1 - 0.63X_{2b} - 1.02X_{3a} - 1.16X_4 - 2.42X_{5a} - 0.52X_6 - 4.94X_{7b}$	0.776
CO	$18.71 + 0.004X_1 - 0.017X_{2b} - 0.039X_{3a} + 0.1X_4 - 0.004X_{5a} - 0.002X_6 - 0.033X_{7b}$	0.641
O <sub>3</sub>	$-151.01 + 0.06X_1 + 0.14X_{2b} + 6.31X_{3b} - 3.39X_4 + 1.75X_{5b} + 0.08X_6 - 2.51X_{7a} + 2.77X_8$	0.8
PM <sub>2.5</sub>	$564.95 + 0.54X_1 - 0.5X_{2a} - 1.73X_{3a} + 0.36X_4 - 1.09X_{5a} - 0.27X_6 - 2.95X_{7b}$	0.796

注: X<sub>1</sub>为前一日AQI; X<sub>2a</sub>为日最低气温; X<sub>2b</sub>为日最高气温; X<sub>3a</sub>为日最低气温; X<sub>3b</sub>为日最高气温; X<sub>4</sub>为日平均水汽压; X<sub>5a</sub>为日平均低云量; X<sub>5b</sub>为日平均总云量; X<sub>6</sub>为日降水量; X<sub>7a</sub>为日平均风速; X<sub>7b</sub>为日极大风速; X<sub>8</sub>为日照时数。

### 2.2.3 验证 AQI 回归预报方程

利用2017年逐日地面气象要素观测资料计算AQI,得到空气质量等级,以此来验证AQI回归预报方程的精度(表5),可以看出AQI预报方程准确预报

空气质量等级占72%,偏大一个等级占16.9%,偏大两个等级占0.3%,偏小一个等级占9.2%,偏小2个等级占1.6%,在实际业务中,可以为空气污染气象扩散条件预报提供参考。

表5 AQI回归预报方程验证误差(单位:%)  
Table 5 The hit rate (%) by the regressive prediction model for AQI

偏大2	偏大1	正确	偏小1	偏小2
0.3	16.9	72	9.2	1.6

### 3 典型污染天气过程成因分析

2015和2016年没有出现严重污染日,2014年出现7 d严重污染,1月严重污染日数达到6 d,5月19日出现严重污染。2014年1月除去15日没有资料,出现严重污染日数6 d,分别出现在7日、14日、17日、27日、28日、31日,重度污染日数16 d,中度污染日数5 d,轻度污染日数3 d,没有空气质量优良的天数。本文对2014年1月空气污染成因进行分析。

2014年1月荆州站气温异常偏高,冷空气活动弱,月平均气温排历史第二位;降水偏少,雨日数偏少,只有三次弱降水天气过程;日照时数异常偏多。图3为2014年1月AQI、回归方程计算AQI与同期气象要素的变化图(其中最高气压=日最高气压-1010 hPa),可以看出模型计算的AQI一定程度上能够反映实际AQI的变化规律,但是时间上有滞后,并且模型计算的AQI峰值要小于实际AQI。影响2014年1月空气污染过程的主要气象因子为降水、风速、风向。6—7日受弱冷空气影响、北风加大,北方污染物在本地迅速累积,空气质量变差,8日风力加大,气象扩散条件较好,加上7日雨水冲刷作用,空气质量有一定改善,10—11日降水过程结束后,空气质量进一步提高,14—19日天气晴好,风速较小,大气静稳,气象扩散条件较差,空气污染比较严重,22—24日风力加大,且吹南风,空气质量得到一定改善,此后空气质量维持在较差水平,28—29日出现降水后,空气质量略有改善,但仍处于严重污染。

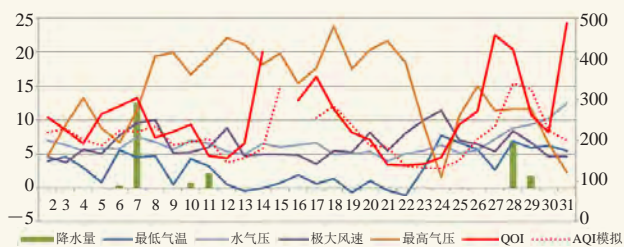


图3 2014年1月AQI与同期气象要素变化(AQI使用次坐标轴)  
Fig. 3 Variations of AQI and meteorological elements in January 2014

### 4 结果与讨论

1) 荆州城区空气质量较差,优良日数偏少,但2014—2016年空气质量略有改善,冬季空气污染最严

重,夏季空气污染相对较轻。影响荆州城区空气质量的主要污染物是PM<sub>2.5</sub>,2016年下降较明显,其次是O<sub>3</sub>,2014—2016年增长很快,到2016年增长到130 d,与首要污染物为PM<sub>2.5</sub>的天数129 d持平,O<sub>3</sub>和PM<sub>2.5</sub>为2016年最主要的污染物。

2) AQI和PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO的变化规律一致,呈V型分布,高值区在冬季,低值区在夏季;O<sub>3</sub>的变化规律与AQI和其他5种污染物的变化规律相反,呈反V型分布,低值区在11—1月,高值区在8—9月。

3) AQI、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO与前一日AQI、气压呈正相关关系,与气温、水汽压、湿度、云量、降水、风速呈负相关关系。O<sub>3</sub>与AQI和其他5种污染物浓度的特征不一致,O<sub>3</sub>与气温、日照时数、水汽压有显著的正相关关系,与气压、相对湿度有明显的负相关关系,与日降水、风速的关系不大。

4) 建立了AQI和各污染物浓度的回归预报方程,方程组复相关系数较高,精度较好,回归系数均通过显著性检验,方程组的结论值得参考,利用2017年地面气象要素观测资料和AQI验证了AQI预报方程的误差,可以为空气污染气象扩散条件预报提供参考。

5) 影响空气质量的因素很多,主要有本地污染源的分布和强度、外地污染物输入和气象扩散条件等,多种因素共同导致了2014年1月的重污染过程。

#### 参考文献

- 朱蓉. 中国气象科学研究院开发的污染预报CAPPS模式已推广到各重点城市及国家气象中心业务(试)运行. 应用气象学报, 2001, 12(3): 367-367.
- 朱蓉, 徐大海, 孟燕君, 等. 城市空气污染数值预报系统CAPPS及其应用. 应用气象学报, 2001, 12(3): 267-278.
- 王迎春, 孟燕军, 赵习方. 北京市空气污染业务预报方法. 气象科技, 2001, 29(1): 42-46.
- 纪忠萍, 罗森波, 邝建新, 等. 广州市空气污染的变化特征及预报. 热带气象学报, 2006, 22(6): 574-581.
- 严晓瑜, 蔡晓辉, 刘玉兰, 等. 银川市大气污染物浓度变化特征及其与气象条件的关系. 气象与环境学报, 2015, 31(2): 21-30.
- 白雪, 张翠艳, 纪源, 等. 锦州市空气质量变化特征及其与气象条件的关系. 气象与环境学报, 2016, 32(2): 52-58.
- 黄菊梅, 周慧, 张驰成, 等. 岳阳城区空气污染的变化特征及气象影响因素. 气象科技, 2015, 43(5): 932-938.
- 郑美秀, 周学鸣. 厦门空气污染指数与地面气象要素的关系分析. 气象与环境学报, 2010, 26(3): 53-57.
- 郭勇涛, 余峰, 王式功, 等. 兰州市空气质量状况及与常规气象条件的关系. 干旱区资源与环境, 2011, 25(11): 100-105.
- 林俊, 刘卫, 李燕, 等. 大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的关系分析. 气象与环境学报, 2009, 25(1): 1-5.
- 唐永顺. 应用气候学. 北京: 科学出版社, 2004.

# 不同播期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型

范剑<sup>1</sup> 尤慧<sup>2,3</sup> 刘凯文<sup>2,3</sup> 高华东<sup>2,3</sup>

(1 荆州市气象局, 荆州 434020; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025;

3 湖北省荆州农业气象试验站, 荆州 434025)

**摘要:** 叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 与植物的光合能力密切相关, 是评价作物长势和预测产量的重要农学参数, 利用高光谱遥感能够实现农作物LAI快速无损监测。为了建立不同播期条件下冬小麦LAI反演的最佳高光谱监测模型, 提高冬小麦LAI估算模型精度, 将地面实测冬小麦LAI数据和冠层高光谱数据相结合, 对4个播期及4个播期组合模拟的混合播期数据进行分析, 选取8种植被指数, 通过相关分析、回归分析等统计方法, 构建不同播期冬小麦叶面积指数监测模型。结果表明, 在4个播期处理和由一个所有播期组合下 (即混合播期) 建立的LAI光谱监测模型中, 播期1和播期4分别以EVI2和mNDVI拟合效果较好, 播期2、播期3及混合播期均与NDGI拟合效果最好。不同播期及混合播期的拟合方程决定系数 ( $R^2$ ) 分别为0.803, 0.823, 0.907, 0.819和0.798; 通过试验田实测LAI与反演LAI数据进行拟合模型验证, 均方根误差分别为0.81, 0.78, 0.63, 0.82, 0.91。通过分析可知, 不同播期的分期监测模型比混合播期统一监测模型的拟合效果更好, 精度更高。因此, 播期1、播期2、播期3、播期4分别选用植被指数EVI2、NDGI、NDGI、mNDVI建立冬小麦LAI反演模型。该结果可为实现不同播期下冬小麦长势精确监测提供理论依据和技术支撑。

**关键词:** 冬小麦, 播期, 叶面积指数, 高光谱遥感, 估算模型

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.011

## Estimation Model of Leaf Area Index of Winter Wheat Based on Hyperspectral Reflectance at Different Sowing Dates

Fan Jian<sup>1</sup>, You Hui<sup>2,3</sup>, Liu Kaiwen<sup>2,3</sup>, Gao Huadong<sup>2,3</sup>

(1 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020 2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology

in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 3 Jingzhou Agrometeorological

Trial Station, Jingzhou 434025)

**Abstract:** Leaf area index (LAI) is closely related to the photosynthetic ability of plants, and its measurement helps to evaluate crop growth status and forecast yield. Hyperspectral remote sensing can be used to acquire crop LAI in real time. This research aimed to establish the best hyperspectral monitoring model for winter wheat LAI under different sowing dates and to improve the forecast precision of the LAI estimation model. The experiments combined ground measurements of winter wheat LAI data with canopy hyperspectral data from four sowing dates. Eight kinds of vegetation indices were comparatively analyzed, then LAI monitoring models for different winter wheat sowing dates were constructed using correlation and regression analyses. The results showed that in comparison to LAI, spectrum monitoring models established for four different sowing dates and from all sowing dates together, the first and fourth sowing dates were better fitted using EVI2 and mNDVI, respectively. The second and third sowing dates and all sowing dates together were best fitted using NDGI. The determination coefficients ( $R^2$ ) for the first, second, third, fourth and all sowing dates together were 0.803, 0.823, 0.907, 0.819, and 0.798, respectively. The model was validated using experimentally collected LAI data and inversion LAI data. The root mean square errors for the fits of the first, second, third, fourth and all sowing dates together were 0.81, 0.78, 0.63, 0.82, and 0.91, respectively. Our results show that monitoring models from different plant stages with different sowing dates were better than a unified monitoring model with a mix of sowing dates, and the precision was higher.

Therefore, the vegetation indices EVI2, NDGI, NDGI, and mNDVI were selected separately to establish the LAI monitoring models for the first, second, third and fourth sowing dates. This result provides technical support for growth monitoring of winter wheat at different sowing dates for farmers.

**Keywords:** winter wheat, sowing date, leaf area index, hyperspectral remote sensing, estimation model

收稿日期: 2018年5月29日; 修回日期: 2018年7月19日  
第一作者: 范剑 (1962—), Email: 2395539244@qq.com  
通信作者: 尤慧 (1987—), Email: youhuinuist@hotmail.com  
资助信息: 荆州市气象局科技课题项目 (JZ201701); 湖北省气象局科技发展基金项目 (2015Q08)

## 0 引言

播期是田间管理的一个重要因子,作物不同播期的变化,其光、温、降水等时空位与质量就会有差别,对作物生长发育、产量、品质等会造成一定的影响<sup>[1]</sup>。聂居超等<sup>[2]</sup>通过对6个玉米品种在5个不同播期处理下产量、产量构成因素及相关性状和抗病性研究中指出,适时早播能延长玉米生育期,并获得高产。张宁等<sup>[3]</sup>在对不同播期夏玉米研究中指出,播期每提前1 d,灌浆时间延长0.74 d,产量增加9%~13.9%。刘艳阳<sup>[4]</sup>指出随播期推迟,小麦全生育期所需天数缩短,播期与产量呈极显著二次曲线关系,并对出粉率、籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、淀粉含量等有明显影响。

叶面积指数(Leaf area index, LAI)是反映作物生理生化过程和生产力状况的良好指标,对农作物长势监测和产量估测等应用具有重要意义<sup>[5]</sup>。传统的作物LAI监测方法(如方格法、激光叶面积法、数码图像处理法等),虽然能相对准确地获得小范围LAI,但成本高、效率低并具有一定的破坏性<sup>[6]</sup>。高光谱遥感的出现,为实现大范围LAI的快速、高效、无损监测提供了有力的技术手段,并得到了有效的应用。梁亮等<sup>[7]</sup>选取18种高光谱指数进行比较分析,筛选出敏感高光谱指数模型OSAVI,并结合地面光谱样本数据建立统一的小麦LAI的反演模型。马驿等<sup>[6]</sup>通过选取12个光谱特征参数和11个植被指数,建立油菜6叶期至角果期LAI的5种线性和非线性定量反演模型,并指出采用统一参数建模难以准确估算全生育期LAI,不同生长期需进行植被指数分段建模估算LAI。贺佳等<sup>[8]</sup>通过相关分析、回归分析等统计方法,利用5种高光谱指数OSAVI、EVI、NVI、mNDVI、mSRI研究不同氮磷水平下冬小麦不同生育时期叶面积指数监测模型。当前国内外相关研究主要集中在针对作物生长发育及品质产量等的影响研究或是不同氮素水平下的作物LAI反演研究,并建立作物统一的LAI监测模型,然而单一的监测模型易受播种时间、小麦品种、气候等因素的影响,导致LAI反演精度不高。

由于各种环境、气候、社会因素(如地理位置、小麦品种、气候条件等)都会造成小麦播种时间的差异,因此通过分析不同播期冬小麦的冠层光谱响应规律以构建不同播期LAI监测模型,具有一定的意义。本文拟通过对不同播期的田间试验,在同步获取分蘖至乳熟期冠层光谱与LAI的基础上,结合不同播期及混合播期的LAI与植被指数之间的定量关系,构建不同播期LAI高光谱遥感监测模型。此外,将4个播期所

有生育期的冠层光谱及LAI数据进行组合,模拟出一个混合播期,并进行研究分析。旨在为不同播期水平下冬小麦长势监测和小麦生产的宏观管理调控等提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

冬小麦分期播种试验于2016年10月—2017年6月,在中国气象局荆州农业气象试验站(30°21'N, 112°09'E)进行,播种期为以当地常年大田实际播种期(10月30日)为界,提前10 d播种为播期1,正常播种为播期2,比正常播种晚10 d播种为播期3,晚20 d为播期4,共播种4期,每期分3个重复,每个试验地块面积为20 m<sup>2</sup>,各地块间留0.5 m保护间隔。小麦种植品种为“郑麦9023”,种植方式采用南北方向条播,保持良好的通风透光,行距统一为20 cm,研究区各个试验地块在小麦生长期采用基本一致的施肥和灌溉管理。

### 1.2 小麦冠层光谱与参数获取

冬小麦冠层光谱反射率的测定采用ASD HandHeld2手持式地物光谱仪,该光谱仪的光谱范围为325~1075 nm,光谱采样间隔约1.5 nm。选择天气晴朗、无云无风的天气进行监测,测定时间控制在北京时间10:00—14:00,分别测定不同播期小麦分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、乳熟期的冠层光谱反射率,每个生长期每隔8 d左右进行一次观测。测量时,传感器距离小麦冠层顶部高度约1 m,探头垂直向下。每个试验样本区每次记录5条光谱曲线,重复测定3次,计算该15条曲线的平均值作为该样本小区的冠层反射率值。每半小时用参考板对仪器进行一次校正以消除环境变化所带来的影响。

### 1.3 叶面积指数测定

在冬小麦冠层光谱反射率监测的相应位置处,连续取10株长势较均匀的小麦,采用面积系数法计算冬小麦叶面积指数。通过测定单株上各叶片长宽乘积之和与校正系数之积,根据单株叶面积与1 m<sup>2</sup>密度之积/10000,求得该区小麦叶面积指数。

### 1.4 植被指数选取

研究采用如表1所示具有代表性的8种植被指数进行不同播期冬小麦LAI的监测,并以不同植被指数为自变量,小麦实测LAI为因变量,进行冬小麦LAI高光谱遥感监测模型的建立。其中播期1、播期2、播期3及播期4参与计算的采样数据量( $n$ )分别为66, 64, 58及64组。

表1 本文采用的植被指数  
Table 1 The vegetation indices

植被指数	计算公式	参考文献
优化土壤调整植被指数 (OSAVII)	$OSAVII = 1.16 \times (R_{nir} - R_r) / (R_{nir} + R_r + 0.16)$	[9]
增强型植被指数 II (EVI2)	$EVI2 = 2.5 \times (R_{nir} - R_r) / (1 + R_{nir} + 2.4 \times R_r)$	[10]
新型植被指数 (NVI)	$NVI = (R_{777} - R_{747}) / R_{673}$	[11]
修正归一化差异植被指数 (mNDVI)	$mNDVI = 2.5 \times (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	[12]
简单比值植被指数 (SR)	$SR = R_{nir} / R_r$	[13]
差值植被指数 (DVI)	$DVI = R_{nir} - R_r$	[14]
归一化差异绿度指数 (NDGI)	$NDGI = (R_g - R_r) / (R_g + R_r)$	[15]
归一化植被指数 (NDVI)	$NDVI = (R_{nir} - R_r) / (R_{nir} + R_r)$	[16]

注:  $R_r$ ,  $R_g$ ,  $R_{nir}$ ,  $R_{445}$ ,  $R_{673}$ ,  $R_{705}$ ,  $R_{747}$ ,  $R_{777}$ 和 $R_{750}$ 分别表示小麦冠层在可见光的红光 (651 nm)、绿光 (491 nm)、近红外波段 (824 nm) 以及在445, 673, 705, 747, 777和750 nm波段处的光谱反射率值。

## 1.5 数据处理与分析

利用ViewSpec软件对采集的冠层光谱数据进行预处理, 首先对每个采样点采集的光谱数据进行筛选, 剔除变化差异较大的误差数据后计算平均, 作为该样本点的光谱反射率数据。其次, 为了减弱噪声对实际光谱数据的影响, 将原始光谱反射率在325~400 nm范围内的数据进行剔除, 以便于进行数学分析及监测模型的建立。再基于SPSS和Excel软件分别对4个播期和基于该4个播期的同生育期数据分别进行平均处理后模拟出的混合播期数据进行相关统计计算分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同播期冬小麦光谱变化分析

随着播期的不同, 冬小麦冠层反射率光谱存在不同的响应。图1为不同播期小麦在同一时段观测的冠层光谱均值曲线, 此时播期1处于孕穗末期, 播期2为孕穗始期, 播期3和播期4均为拔节期。可以看出在550 nm附近出现小的反射峰, 不同播期差异较小; 在760~1075 nm, 不同播期光谱反射率出现明显差异, 反射率随着播期的延后而减小; 在970 nm附近光谱反射率出现吸收谷, 并随着播期的延后, 吸收谷有加深的趋势。

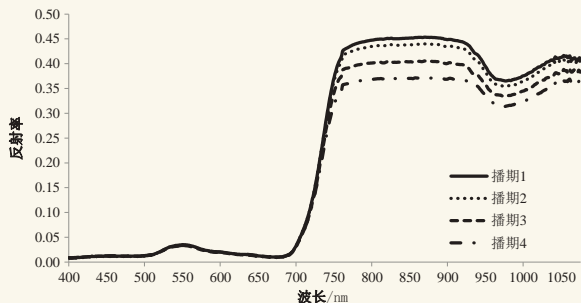


图1 不同播期下冠层光谱反射率的变化

Fig. 1 Changes in spectral reflectance of canopy at different sowing dates

### 2.2 冬小麦冠层反射率与叶面积指数的相关性

将4个播期及利用所有播期模拟的混合播期的冬小麦冠层反射率分别与其对应LAI进行相关分析(图2)。从图中可以看出, 4个播期处理及混合播期的LAI随冠层光谱反射率的变化规律相似。从播期1(图2a)中可以看出, 在400~727 nm冬小麦冠层光谱反射率与LAI呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 在743~1075 nm呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 播期2(图2b)在400~721 nm为显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 在749~1075 nm为极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 播期3(图2c)在400~728 nm为极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 在745~1075 nm呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 播期4(图2d)在400~717 nm为极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 在732~1075 nm呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 混合播期(图2e)在400~725 nm冬小麦冠层光谱反射率与LAI呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 在735~1075 nm呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

通过分析, 在467 nm蓝光波段处有最大负相关, 相关系数约为-0.81; 红光波段最大相关在651 nm, 相关系数为-0.8, 绿光波段最大相关在491 nm, 相关系数为-0.801; 近红外波段824 nm处有最大正相关, 相关系数为0.762。因而植被指数计算时红光波段波长选用651 nm, 绿光波段波长为491 nm, 蓝光波段波长为467 nm, 近红外波段波长为824 nm。

### 2.3 不同播期及混合播期植被指数相关性分析

通过表1计算8种植被指数, 分析不同播期及混合播期冬小麦LAI与对应植被指数的相关性(表2)。从表2中可以看出, 混合播期不同植被指数与LAI均达到极显著性相关水平 ( $P < 0.01$ ), 相关系数 ( $r$ ) 范围为0.798~0.891, 按照统计学规定, 植被指数与LAI 相关系数均达到中度到高度相关水平; 播期1的植被指数与LAI为显著相关 ( $P < 0.05$ ),  $r$ 为0.506~0.799,

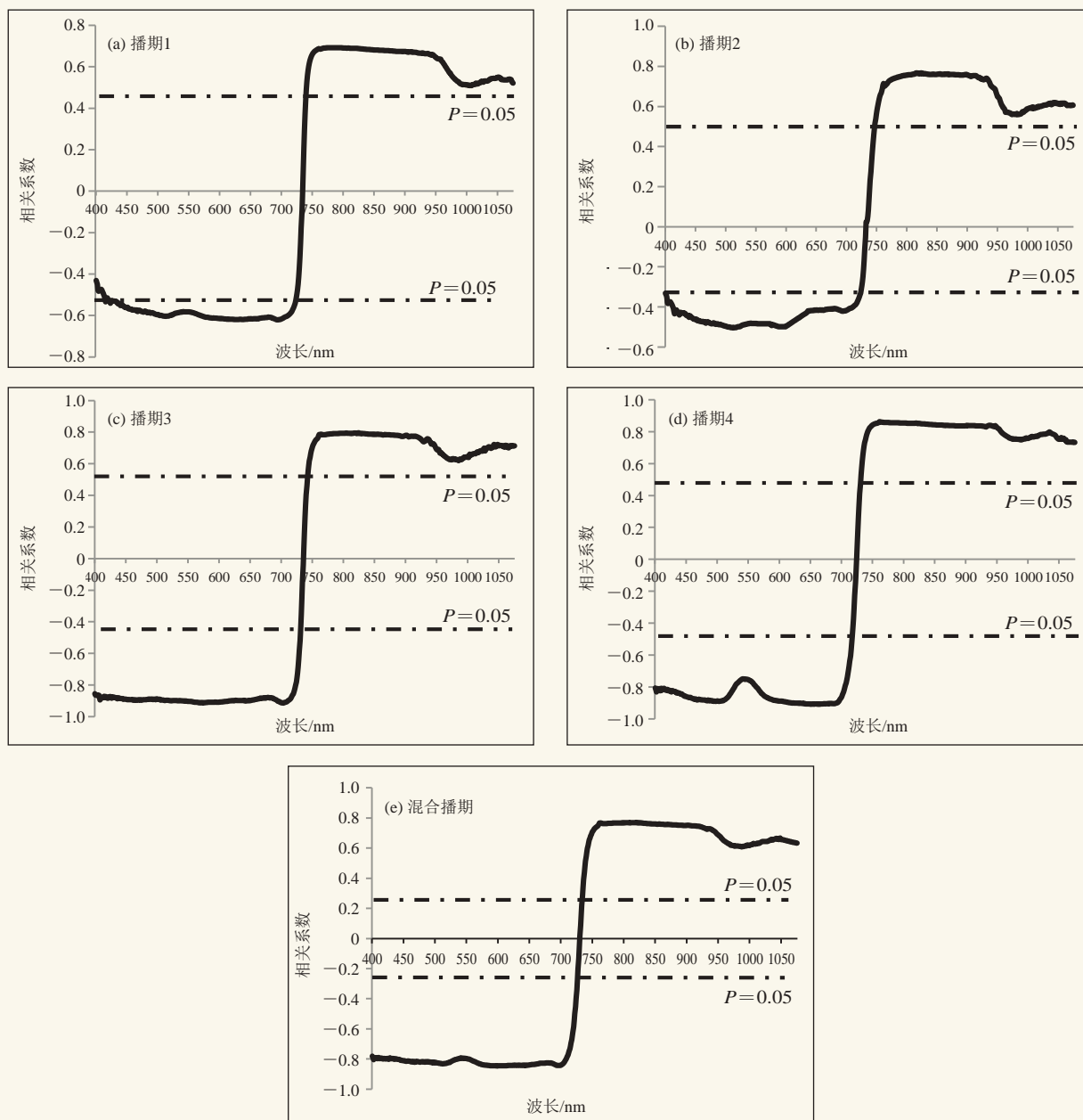


图2 不同播期下冬小麦冠层反射率与LAI的相关性  
(a~e分别为不同播期及混合播期冬小麦冠层光谱反射率与LAI的相关性)

Fig.2 Correlation between canopy reflectance and LAI of winter wheat in different sowing dates  
(a-e shows the correlation between spectral reflectance and LAI of winter wheat canopy at different sowing dates and all sowing dates together)

达中度相关水平；播期2的8种植被指数与LAI为极显著相关水平 ( $P < 0.01$ ),  $r$ 为0.615~0.898, 达中度相关水平；播期3的植被指数与LAI达到极显著相关水平 ( $P < 0.01$ ),  $r$ 为0.828~0.952, 植被指数与LAI为高度相关水平；播期4中植被指数与LAI为极显著相关 ( $P < 0.01$ ),  $r$ 为0.863~0.894, 植被指数与LAI为高度相关；因此所选的8种植被指数均可用来监测不同播期的冬小麦LAI, 以作为构建冬小麦LAI监测

模型参数。

#### 2.4 不同播期叶面积指数监测模型的拟合与验证

将LAI与8种植被指数分别进行拟合, 建立不同播期及混合播期冬小麦LAI分期监测模型(表3), 并以试验田实测LAI与反演LAI数据 ( $n=60$ ) 进行拟合模型的验证。可以发现, 在混合播期中植被指数NDGI与LAI之间线性关系极显著,  $R^2$ 为0.798,  $F$ 统计量为243.192, 实测LAI与反演LAI的均方根误差 (RMSE)

表2 不同播期植被指数与叶面积指数的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients between vegetation indices and leaf area index at different sowing dates

播期	参数	植被指数							
		OSAV1	EVI2	NVI	mNDVI	SR	TVI	NDGI	NDVI
混合播期		0.819**	0.816**	0.850**	0.845**	0.832**	0.798**	<b>0.891**</b>	0.805**
播期1	LAI	0.692*	<b>0.799*</b>	0.594*	0.651*	0.638**	0.698*	0.506*	0.646*
播期2		0.731**	0.734**	0.795**	0.817**	0.615**	0.697**	<b>0.898**</b>	0.693**
播期3		0.880**	0.844**	0.898**	0.922**	0.919**	0.828**	<b>0.952**</b>	0.889**
播期4		0.879**	0.884**	0.863**	<b>0.894**</b>	0.892**	0.871**	0.871**	0.871**

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。

为0.91;播期1基于EVI2建立的监测模型具有较高的拟合精度,  $R^2$ 和 $F$ 统计量分别为0.803和76.187,通过对EVI2监测模型的验证, RMSE为0.81,监测效果较好;播期2、播期3均能基于NDGI建立较高精度的拟合模型,  $R^2$ 分别为0.823和0.907,  $F$ 统计量分别为86.278和127.057, RMSE分别为0.78和0.63,通过验证, NDGI监测模型对播期2及播期3具有较好的验证效果;播期4基于mNDVI建立的监测模型具有较高的拟合精度,  $R^2$ 和 $F$ 统计量分别为0.819和75.698, RMSE为0.82。

从表3中可知,混合播期及播期2和播期3冬小麦叶面积指数反演模型参数中均以NDGI为最佳拟合光谱参数,播期1和播期4分别以植被指数EVI2和mNDVI拟合效果最好。通过综合比较分析来看,混合播期的拟合模型虽然具有一定的普适性,反演效果较好,但不同播期的分期监测模型较混合播期统一拟合模型效果更佳,验证精度也更高,并且播期3的拟合效果最佳。因此对于不同播期的冬小麦LAI的监测时,应建立不同播期的分期监测模型,其中播期1的监测模型为 $LAI=10.401 \times EVI2 - 0.456$ ;播期2监测模型为 $LAI=63.276 \times NDGI + 0.5884$ ;播期3为 $LAI=66.174 \times NDGI + 0.5712$ ;播期4为 $LAI=14.181 \times mNDVI - 4.8695$ 。

### 3 结论

1) 随着播期的不同,冬小麦冠层反射率光谱存在不同的响应。冬小麦LAI与冠层光谱反射率在近红外波段、红光波段、绿光波段和蓝光波段的最大相关波长分别为824, 651, 491和467 nm。通过分析不同播期及混合播期8种植被指数与LAI的相关性,发现不同类型的植被指数与LAI呈极显著相关。在混合播期及播期2、播期3中植被指数NDGI与LAI之间相关性最高,播期1和播期4分别以EVI2和mNDVI为最佳。

2) 通过监测模型拟合及验证可知,混合播期的拟合模型虽然具有一定的普适性,但是播期1至播期4的分期监测模型较混合播期统一监测模型的拟合效

果更好,精度更高,并且播期3的拟合效果及精度最高。因此,反演不同播期的LAI时通过建立统一监测模型的精度较差,应根据不同播期建立LAI分期监测模型更合理,并且LAI估测的最佳播期为播期3。

高光谱数据波段数目多,数据量庞大,且不同植被指数具有各自的特点和优势,但在如何进行植被指数的筛选及监测模型的建立上,仍需不断探索和研究。由于本研究是基于田间小区试验条件下得到的,气候及相关影响因素同质性大,异质性低,所建立的不同播期分期监测模型虽然精确性较高,但适用范围可能较窄,存在一定的局限性。因此,未来的研究方向应集中在不同播期的不同耕作类型、品种、生态条件下的LAI大面积、高精度光谱监测。

### 参考文献

- [1] 李彩虹,冯美臣,王超,等.不同播期冬小麦叶绿素含量的冠层光谱响应研究.核农学报,2014,28(2):309-316.
- [2] 聂居超,李凤海,史振声,等.播期对不同玉米品种产量的影响.园艺与种苗,2010,30(4):275-278.
- [3] 张宁,杜雄,江东岭,等.播期对夏玉米生长发育及产量影响的研究.河北农业大学学报,2009,32(5):7-11.
- [4] 刘艳阳.不同播期对小麦产量和品质的影响.安徽农业科学,2009,37(35):17425-17428.
- [5] 辛明月,殷红,陈龙,等.不同生育期水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型.中国农业气象,2015,36(6):762-768.
- [6] 马驿,汪善勤,李岚涛,等.基于高光谱的油菜叶面积指数估计.华中农业大学学报,2017,36(2):69-77.
- [7] 梁亮,杨敏华,张连蓬,等.小麦叶面积指数的高光谱反演.光谱学与光谱分析,2011,31(6):1658-1662.
- [8] 贺佳,刘冰锋,李军.不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型.农业工程学报,2014,30(24):141-150.
- [9] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95 - 107.
- [10] Jiang Z, Huete A R, Didan K, et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3833 - 3845.
- [11] Gupta R K, Vijayan D, Prasad T S. New hyperspectral vegetation characterization parameters. Advances in Space Research, 2001, 28(1): 201-206.
- [12] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 337-354.
- [13] Jordan C F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. Ecology, 1969, 50(4): 663-666.
- [14] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sensing of

表3 不同播期冬小麦LAI与植被指数的定量关系  
Table 3 Quantitative relationship between LAI and the vegetation indices of winter wheat with different sowing dates

播期	植被指数	拟合方程	R <sup>2</sup>	F统计量	Sig.	实测LAI 与反演LAI均方根误差 ( RMSE )
混合播期	OSAV1	y=18.617x-8.875	0.668	128.478	0.00	1.17
	EVI2	y=15.952x-4.9792	0.732	125.300	0.00	1.19
	NVI	y=0.6045x+1.7345	0.723	164.166	0.00	1.07
	mNDVI	y=18.241x-8.4253	0.716	156.954	0.00	1.08
	SR	y=0.1525x+0.8623	0.693	142.048	0.00	1.12
	DVI	y=22.136x-3.0919	0.633	110.206	0.00	1.23
	<b>NDGI</b>	<b>y=54.548x+1.4308</b>	<b>0.798</b>	<b>243.192</b>	<b>0.00</b>	<b>0.91</b>
	NDVI	y=21.51x-14.335	0.650	115.781	0.00	1.20
播期1	OSAV1	y=14.015x-4.4722	0.479	16.528	0.00	0.82
	<b>EVI2</b>	<b>y=10.401x-0.456</b>	<b>0.803</b>	<b>76.187</b>	<b>0.02</b>	<b>0.81</b>
	NVI	y=0.221x+4.8291	0.353	21.819	0.01	0.92
	mNDVI	y=7.2511x+0.9579	0.423	13.220	0.00	0.86
	SR	y=31.766x-23.282	0.407	12.332	0.0	0.88
	DVI	y=0.2522x+0.7184	0.487	17.118	0.00	5.66
	NDGI	y=7.0328x+2.7324	0.456	16.187	0.00	0.98
	NDVI	y=16.069x-8.637	0.417	12.882	0.00	0.87
播期2	OSAV1	y=0.0106x+0.7304	0.535	14.954	0.00	1.13
	EVI2	y=25.592x-12.034	0.538	15.167	0.00	0.92
	NVI	y=0.7473x+0.7563	0.632	22.363	0.00	0.82
	mNDVI	y=52.899x-35.604	0.667	26.022	0.00	0.78
	SR	y=0.1969x-0.7156	0.465	14.681	0.05	0.97
	DVI	y=29.194x-5.9848	0.485	12.267	0.00	0.98
	<b>NDGI</b>	<b>y=63.276x+0.5884</b>	<b>0.823</b>	<b>86.278</b>	<b>0.00</b>	<b>0.78</b>
	NDVI	y=73.625x-63.515	0.454	12.374	0.14	1.05
播期3	OSAV1	y=25.582x-14.299	0.774	44.585	0.00	0.99
	EVI2	y=18.239x-6.7708	0.713	32.256	0.00	1.11
	NVI	y=0.6281x+1.666	0.807	54.213	0.00	0.91
	mNDVI	y=23.641x-12.666	0.850	73.788	0.00	0.80
	SR	y=0.1822x+0.1772	0.844	70.241	0.00	0.82
	DVI	y=26.268x-4.7804	0.685	28.296	0.00	1.17
	<b>NDGI</b>	<b>y=66.174x+0.5712</b>	<b>0.907</b>	<b>127.057</b>	<b>0.00</b>	<b>0.63</b>
	NDVI	y=32.497x-24.46	0.790	48.949	0.00	0.95
播期4	OSAV1	y=14.379x-6.218	0.772	64.339	0.00	0.98
	EVI2	y=11.878x-3.1368	0.782	68.112	0.00	0.96
	NVI	y=0.683x+1.3516	0.745	55.525	0.00	1.04
	<b>mNDVI</b>	<b>y=14.181x-4.8695</b>	<b>0.819</b>	<b>75.698</b>	<b>0.00</b>	<b>0.82</b>
	SR	y=0.1723x+0.4218	0.796	73.937	0.00	0.93
	DVI	y=17.878x-2.2074	0.759	59.854	0.00	1.01
	NDGI	y=46.39x+1.8459	0.759	59.802	0.00	1.01
	NDVI	y=16.698x-10.398	0.759	59.925	0.00	1.01

Environment, 2002, 80(1): 76-87.

[15] Lyon J G, Yuan D, Lunetta R S, et al. A change detection experiment using vegetation indices. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1998, 64(2): 143--150.

[16] Aparicio N, Villegas D, Casadesus J, et al. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. Agronomy Journal, 2000, 92(1): 83-91.

# 气象条件对湖北长湖水质的影响研究

刘韬<sup>1, 2</sup> 夏智宏<sup>2, 3</sup> 朱浪<sup>2, 3</sup>

(1 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025;  
3 荆州市气象局, 荆州 434020)

**摘要:** 长湖2014—2017年的水质监测和气象数据综合分析表明, 长湖水质的主要问题是富营养化, 主要污染指标为总磷(TP)、总氮(TN)、化学需氧量(COD)和五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)。这些指标的变化呈现出明显的时空异质性。在空间上长湖入水口与出水口的TP、TN、COD差异明显, 但BOD<sub>5</sub>无明显差异。时间维上, 2014—2017年水质总体上有所好转, 但各指标显示出不同程度的季节性变化, 水质变化受气象因素影响明显。其中, TP与降雨变化呈明显的正相关, 而TN与气温存在一定的负相关。

**关键词:** 长湖, 富营养化, 气象, 时空变化

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.012

## Influence of Meteorological Factors on Temporal and Spatial Variation of Water Quality in Changhu Lake, Hubei Province

Liu Tao<sup>1, 2</sup>, Xia Zhihong<sup>2, 3</sup>, Zhu Lang<sup>2, 3</sup>

(1 Faculty of Resources and Environmental Sciences, Hubei University, Wuhan 430062

2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 3 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020)

**Abstract:** The comprehensive analysis of water quality and meteorological data in Changhu Lake for 2014–2017 demonstrates that the main problem of water quality in Changhu Lake is the eutrophication. The main pollution indicators are total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>) on five days. Variations in these indicators show significant spatial and temporal heterogeneity. In the space, the differences of TP, TN and COD between inlet and outlet in Changhu Lake was obvious, but there was no significant difference in BOD<sub>5</sub>. In terms of time scale, the overall water quality was improved during the period from 2014 to 2017, but the indicators showed that seasonal variations appeared at different levels, and the water quality was significantly affected by meteorological factors. The TP was positively correlated to the rainfall, while TN was negatively correlated with the temperature.

**Keywords:** Changhu Lake, eutrophication, weather, temporal and spatial variation

## 0 引言

长湖位于江汉平原荆州市东北部, 是湖北省第三大淡水湖泊, 湖北四湖水系的上游, 夹于汉江与长江之间, 兼具调蓄、灌溉、渔业、生活水源等多种自然和社会功能。长湖流域是湖北省重要的粮棉油生产基地和水产基地, 湖泊水位季节性变化明显<sup>[1-3]</sup>。以往对长湖水质的研究多集中于污染源、水质变化、环境容量等方面, 对于水体污染物变化与气象因素间关联的系统研究还相对较少。大量研究表明, 气象因

素——尤其是降雨、气温等因素, 对流域内污染物质的时空分布存在显著影响<sup>[4-6]</sup>。因此, 系统分析长湖水体污染的时空分布特点及其与气象因素间的内在联系, 对于保障南水北调工程上游供水安全, 保障长湖周边城市居民生产、生活用水质量, 以及长湖水体污染治理和生态恢复都具有重要的现实意义。

## 1 数据与研究方法

### 1.1 区域概况

长湖位于荆州、荆门、潜江三市交界处, 多年平均水位为29.0 m, 现存湖泊面积约132.7 km<sup>2</sup>。湖水主要由拾桥河、龙会桥河、太湖港、广平港汇入, 由刁家口、刘岑闸经四湖总干渠流入洪湖(图1)。

收稿日期: 2018年5月30日; 修回日期: 2018年8月2日  
第一作者: 刘韬(1980—), Email: liutao@hubu.edu.cn  
通信作者: 夏智宏(1981—), Email: 14694209@qq.com



图1 研究区域概况图  
Fig. 1 Map of the studied area

### 1.2 数据获取

水质数据为荆州市环境保护监测站提供的2014—2017年原始水质监测数据，监测站点为戴家洼、习家口、关沮口、桥河口（图1）。从2014年1月起，每两个月监测1次，监测频率为每年6次，采样监测一般在当月上旬进行。

气象数据来源于荆州市气象局，包括月平均气温、月平均降雨量与月日照时长，监测时段和频率与水质数据一致，并单独提取2014—2017年强降雨记录。

### 1.3 研究方法

分别对各监测站点水质进行时空分析，找出主要水体污染指标，对污染数据与气象数据进行聚类分析和相关性分析，探讨气象因素与长湖水体污染变化间的内在联系。

水质分析依照《湖北水功能区划》（鄂政函〔2003〕101号）规定，按照《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中的Ⅲ类水质标准进行对比，确定超标的污染物。

水体污染指标与气象因素间的相关性分析在SPSS 16.0软件中完成，相关性分析选择Pearson算法，计算各指标间相关系数。通过这些指标的时空相关性分析，探究水质时空变化的原因，及其与气象因素间的内在联系。

## 2 结果与分析

### 2.1 长湖水水质状况

2014—2017年水质监测结果显示，长湖水质的主要问题是富营养化，超标指标为总磷（TP）、总氮（TN）、化学需氧量（COD）和五日生化需氧量（BOD<sub>5</sub>），且水质状况存在明显的时空差异。资料显示，长湖水体污染中的TP和TN超过50%来源于周边农村生活污水、种植业污染、畜禽养殖污染和水产养

殖污染等非点源污染，TP的点源污染主要来自城镇生活污水，TN的点源污染则来源于城镇生活污水和工业废水等；COD超过70%来自于城镇生活污水和工业废水等点源污染<sup>[1]</sup>。

从时间变化看，2016—2017年长湖水水质相对2014和2015年有所好转（表1），且主要污染指标呈季节性变化。从空间分布看，TP、TN的变化规律在戴家洼、关沮口和桥河口3处比较接近，习家口监测点的TP和TN浓度明显低于其他监测点。各监测点COD和BOD<sub>5</sub>的年平均均值差异相对较小。

表1 长湖各监测站点主要污染指标及污染程度  
Table 1 The main pollution indexes and polluted degrees at observed sites

监测点	超标指标	年平均值 (mg/l) /SD				规划标准 (mg/l)
		2014	2015	2016	2017	
戴家洼	TP	0.231/0.080	0.234/0.045	0.163/0.079	0.165/0.060	≤0.05
	TN	2.53/2.23	2.69/0.65	3.29/0.73	2.28/0.65	≤1.0
	COD	23.5/10.9	22.5/9.6	16.3/18	20.0/6.5	≤20
	BOD <sub>5</sub>	7.78/3.71	6.83/1.34	4.88/0.97	3.60/0.96	≤4
习家口	TP	0.089/0.048	0.070/0.032	0.067/0.042	0.110/0.025	≤0.05
	TN	2.37/2.17	1.82/0.44	2.38/0.54	1.55/0.83	≤1.0
	COD	20.1/6.0	23.3/2.8	22.4/3.1	19.2/5.7	≤20
	BOD <sub>5</sub>	6.62/1.60	7.83/1.21	5.90/1.60	3.58/0.64	≤4
关沮口	TP	0.209/0.081	0.242/0.060	0.144/0.075	0.152/0.064	≤0.05
	TN	3.38/2.35	2.85/0.76	3.43/0.91	2.44/0.27	≤1.0
	COD	24.1/8.5	21.8/4.7	18.4/1.8	17.8/3.0	≤20
	BOD <sub>5</sub>	7.95/2.88	7.67/0.47	5.43/1.44	3.20/0.40	≤4
桥河口	TP	0.204/0.069	0.226/0.062	0.226/0.062	0.153/0.052	≤0.05
	TN	3.40/2.05	2.83/0.62	3.01/0.94	2.21/0.59	≤1.0
	COD	26.2/7.5	23.1/7.0	13.8/1.4	18.0/4.4	≤20
	BOD <sub>5</sub>	8.28/2.63	7.67/1.70	5.02/1.18	3.43/0.24	≤4

### 2.2 气象条件对水质的影响

除上述原因外，气象因素变化会对非点源污染的运移和扩散产生显著影响<sup>[4-6]</sup>。长湖2014—2017年TP、TN、COD、BOD<sub>5</sub>和降雨曲线、温度曲线对比结果显示：TP浓度变化呈明显的季节性波动，7—10月浓度较高，低值一般出现在1—5月；TN的峰值一般出现在冬季（11月—次年3月）；COD和BOD<sub>5</sub>的变化规律则不明显（图2和图3）。

各监测站点的TP、TN、COD、BOD<sub>5</sub>与降雨、温度之间的相关性分析结果（表2）显示，戴家洼、关沮口和桥河口TP的变化与降雨呈正相关，在习家口相关性较弱。对比2014—2017年长湖地区强降雨数据（表3）也显示，每次强降雨期间TP的值都较高，说明强降雨会造成非点源来源的TP输入量增加，导致水体TP浓度上升。4个监测站点的TN浓度高值都出现在冬季，应与当地春耕前施用化肥有关。所有监测站点

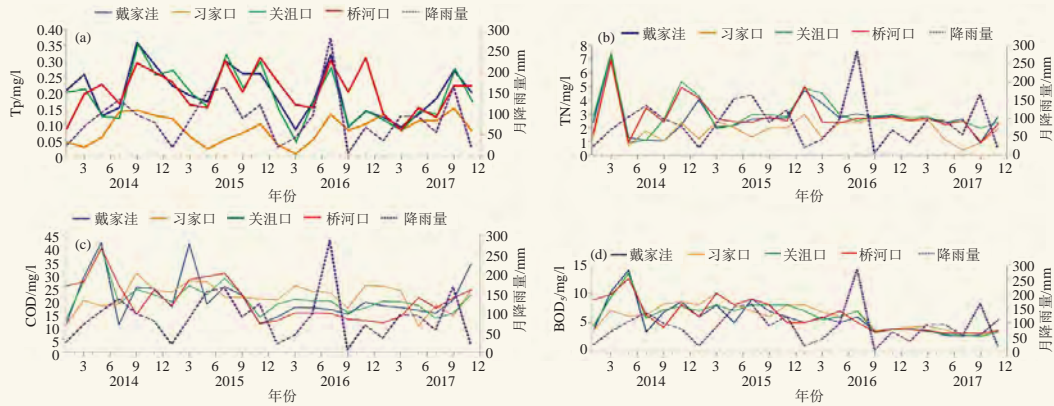


图2 长湖主要污染指标: (a) TP, (b) TN, (c) COD和 (d) BOD<sub>5</sub>及降雨变化曲线  
Fig. 2 Variations of the main pollution indexes (a) TP, (b) TN, (c) COD, (d) BOD<sub>5</sub> and rainfall

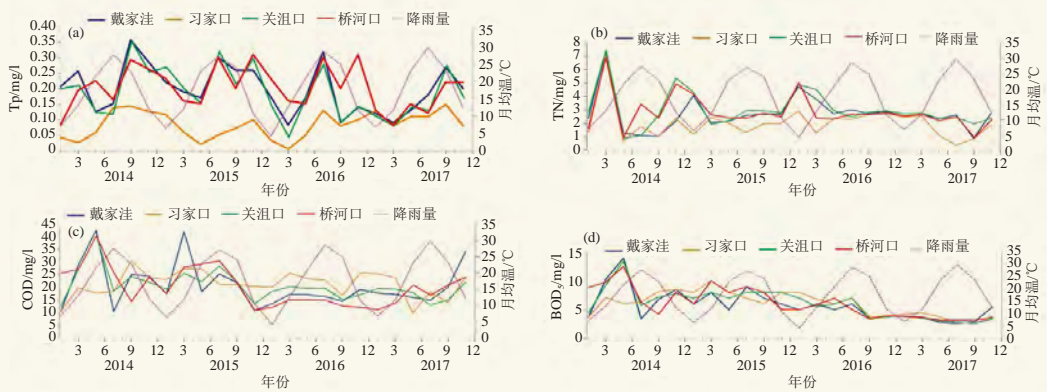


图3 长湖主要污染指标: (a) TP, (b) TN, (c) COD和 (d) BOD<sub>5</sub>及温度变化曲线  
Fig. 3 Variations of the main pollution indexes (a) TP, (b) TN, (c) COD, (d) BOD<sub>5</sub> and temperature

表2 各监测站点污染指标与气温、降水的相关性分析  
Table 2 Correlations of the pollution indexes with temperature and rainfall at observed sites

	戴家洼		关沮口		桥河口		习家口	
	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水
TP	0.198	0.468	0.115	0.431	0.247	0.528	0.233	0.255
TN	-0.413	-0.298	-0.463	-0.326	-0.341	-0.225	-0.307	-0.094
COD	-0.008	0.003	0.119	0.165	0.247	0.190	-0.175	0.051
BOD <sub>5</sub>	-0.019	0.132	0.003	0.234	-0.029	0.108	-0.182	0.200

表3 2014—2017年长湖地区强降雨记录  
Table 3 Statistics of the heavy rainfall in years between 2014 and 2017

年	2014			2015			2016			2017		
月	3	7	8	6	7	8	4	7	5	6	8	9
频次	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1
平均日降雨量 (mm)	53.9	53.6	54.7	62.4	61.4	73.7	53.3	60.8	53.8	68.8	59.1	56.2

的COD和BOD<sub>5</sub>与气象因素间的相关性都较弱, 因为其污染源主要是生活污水和工业废水等点源污染, 受气候影响较小。

### 3 小结

2014—2017年, 长湖水质问题主要是富营养化,

超标指标为总磷、总氮、化学需氧量和五日生化需氧量。长湖入水口和出水口的水质差异明显, 出水口的水质要好于入水口。水体污染指标的空间分布主要受到位置和水文特征的影响。

尽管这几年长湖水质有所好转, 但仍未达标。总磷、总氮、化学需氧量和五日生化需氧量等污染指标浓度呈现出不同程度的季节性波动。其中长湖入水口附近的总磷变化与降雨变化呈正相关, 且受强降雨影响明显; 水体中总氮浓度的峰值一般出现在冬季, 应与春耕前化肥的施用有关。

### 参考文献

- [1] 夏菁, 张翔, 朱志龙, 等. TMDL计划在长湖水污染总量控制中的应用. 环境科学与技术, 2015, 38(7): 176-181.
- [2] 余明勇, 徐圣杰, 徐建华. 长湖流域水质时空分布特征及影响因素. 中国环境监测, 2016, 32(5): 73-79.
- [3] 郝孟曦, 杨磊, 孔祥虹, 等. 湖北长湖水生植物多样性及群落演替. 湖泊科学, 2015, 27(1): 94-102.
- [4] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民. 不同降雨-径流过程中农业非点源污染研究. 环境科学与技术, 2008, 31(10): 5-8.
- [5] 朱红霞, 陈效民, 方莹. 太湖地区旱季、雨季水体污染影响因素分析. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2396-2400.
- [6] 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.

# 近60年荆州四季趋变特征及给作物生长影响的对策

耿一风<sup>1,2</sup> 黄永平<sup>1</sup>

(1 荆州市气象局, 荆州 434020; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025)

**摘要:** 根据荆州站1955—2017年逐日气温资料, 在研究四季长度和起始时间变化特征的基础上, 利用Mann-Kendall检验等方法对季节的时间变化趋势进行研究。结果表明, 季节长度变化上, 荆州夏季季长有极显著的增加趋势 ( $P<0.01$ ), 秋、冬两季季长有极显著的缩短趋势 ( $P<0.01$ ); 即夏季以延长为主, 秋、冬季主要表现为缩短, 而春季季长无明显变化。其中, 夏季的延长趋势率最大 (0.3725), 冬季缩短的趋势率 ( $-0.247$ ) 大于秋季缩短趋势率 ( $-0.1559$ ); 季节起始日上, 冬、秋两季起始日期有极显著的推后趋势 ( $P<0.01$ ), 春、夏季则表现为极显著的提前趋势 ( $P<0.01$ )。

**关键词:** 季节, Mann-Kendall检验, 荆州

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.013

## Temporal Change and Trend Analysis of the Four Seasons in Jingzhou During the Past 60 Years and the Countermeasures in the Crop Growth

Geng Yifeng<sup>1,2</sup>, Huang Yongping<sup>1</sup>

(1 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020 2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jianghan Plain, Jingzhou 434025)

**Abstract:** According to the daily temperature data, the seasonal duration and beginning date for 1955-2017 at jingzhou station, the seasonal time change trend was studied by using the Mann-kendall test and other methods. The results show that the growth season in Jingzhou and summer prolonged significantly ( $P<0.01$ ), while autumn and winter shortened significantly ( $P<0.01$ ). The spring had no obvious change. The extension rate (0.3725) in summer was the largest one, the shortening rate ( $-0.247$ ) in winter was greater than that in autumn ( $-0.1559$ ). The seasonal beginning date delayed significantly in winter and autumn ( $P<0.01$ ), while spring and summer were ahead of time significantly ( $P<0.01$ ).

**Keywords:** season, Mann-Kendall test, Jingzhou

### 0 引言

在全球气候变暖的背景下, 中国近50年极端天气气候事件的频率和强度出现了明显的变化, 同时也影响着季节的更替。中国大部分地区季节长度和起止时间也发生了显著变化<sup>[1-5]</sup>, 江汉平原作为全国重要的粮棉油等商品粮生产基地, 特别是作为江汉平原腹地的荆州市, 由于近些年四季变化导致当地农民对一些主产作物的播种期做了盲目性调整, 由此而导致的农业气象灾害时有发生, 农民感到无所适从。本文旨在分析荆州地区在全球变暖的背景下, 其四季趋变特征及其对作物生长的影响, 并初步做出相应的对策分析。

### 1 资料和方法

资料采用中国气象局荆州国家基本站1954—2017年逐日平均气温作为基础数据。季节划分采用5 d滑动平均法<sup>[6]</sup>确定稳定通过四季界限温度 (即冬季和春季为10 °C, 夏季和秋季为22 °C)<sup>[6-7]</sup>的起止日期。具体方法为: 以5 d为滑动步长, 选取该日与前后两日的日平均气温值计算滑动平均, 一年中, 5 d滑动平均值小于10 °C的最长一段时期内, 在第一个5 d中选取第一个日平均气温小于10 °C日期作为冬季的初日 (入冬日), 依此法可找到大于10 °C的初日 (入春日)、大于22 °C的初日 (入夏日)、小于22 °C的初日 (入秋日), 再由四季的起始时间计算四季长度, 然后将四季季长和各季起始日期以10年为步长做滑动平均, 最后用一元线性拟合方法, 检验四季季长和四季平均起

收稿日期: 2018年5月30日; 修回日期: 2018年8月6日

第一作者: 耿一风 (1986—), Email: 1007047707@qq.com

始日期的变化趋势。

## 2 结果与分析

### 2.1 季节的气候变化趋势分析

以稳定通过四季界限温度的方法得出四季起始日期, 并由此计算四季季长, 每年的季节依次为冬、春、夏、秋, 而年日数为四季季长之和。由表1可知,

荆州地区四季长度变化幅度较大, 同一季节, 最长日数达到最短日数的2~3倍。最短季节日数仅为34 d, 发生在1997年秋天; 而最长为167 d, 发生在1997年夏天。从季节平均长度来看, 夏季持续时间最长, 冬季次之, 春季和秋季长度相接近。夏季的平均长度接近秋季的2倍, 夏冬两季占到全年的63.9%。

表1 1955—2017年荆州地区四季气候变化统计  
Table 1 The statistics of seasonal change during the period from 1955 to 2017 in Jingzhou

		冬季	春季	夏季	秋季
季节长度/d	最长	147 (1955)	108 (2016)	167 (1997)	90 (1979)
	最短	63 (1977)	37 (1955)	87 (1970)	34 (1997)
	平均	111	68	123	64
	气候倾向率/d/10 a	-0.247**	0.0272	0.3725**	-0.1559**
起始日	最早 (月-日)	11-15 (1969)	2-24 (1977)	5-11 (2008)	9-9 (1971)
	最晚 (月-日)	12-30 (1987)	4-21 (1955)	6-30 (1975)	10-24 (1997)
	平均 (月-日)	12-2	3-22	5-30	9-30
	气候倾向率/d/10a	0.1000**	-0.145**	-0.1168**	0.2579**

注: \*、\*\*分别表示通过0.05和0.01水平的显著性检验, 括号内为出现的年份。

四季长度的气候倾向率中, 只有春季未通过0.01水平的显著性检验, 冬、秋两季通过0.01水平的显著性检验且为负值, 夏季亦通过0.01水平的显著性检验且为正值, 说明近70年来, 荆州地区夏季季长有增加的趋势, 冬、秋两季有减少的趋势, 且冬季日数减少的倾向率大于秋季日数减少的倾向率, 而夏季日数增加的倾向率大于冬、秋两季日数减少的倾向率。

四季起始日的气候倾向率中, 冬、春、夏、秋均通过0.01水平的显著性检验, 春、夏为负值, 即春、夏起始日有提前的趋势; 冬、秋为正值, 即冬、秋两季起始日有推后的趋势。

### 2.2 季节气候变化的突变分析

冬、夏、秋三季长度以及冬、春、夏、秋四季起始日期均通过显著性检验。对其进行Mann-Kendall检验(图1), 由图1a的UF曲线<sup>[8]</sup>走势可以看出, 荆州地区冬季季长变化趋势可分为三个阶段, 1955—1962年、1963—1973年以及1974—2017年。1962年前, 冬季日数以减少趋势为主(仅1961年呈增加趋势, 但不显著); 1963—1973年, 冬季日数呈现增加趋势; 1974—2017年冬季日数呈减少趋势, 且在1975年之后, UF曲线超过 $u_{0.05}=\pm 1.96$  ( $P<0.05$ ), 并在1978年突破 $u_{0.01}=\pm 2.58$  ( $P<0.01$ ), 呈极显著减少趋势。图1a中UF和UB曲线相交于1972—1973年, 表明在此期间, 冬季长度发生了突变, 由缓慢波动变化转为单一明显的缩短趋势, 表明冬暖加剧。

由图1b的UF曲线走势可以看出, 荆州地区夏季季长变化趋势可分为两个阶段, 1955—1997年、1998—2017年。1998年前, 夏季日数以减少趋势为主(仅1961和1962年呈增加趋势, 但不显著); 且从

1970年始, UF曲线突破 $u_{0.01}=\pm 2.58$  ( $P<0.01$ ), 呈极显著减少趋势, 这种趋势直至1975年结束。1998年始, 夏季季长呈增加趋势, 且这种趋势在2005年UF曲线突破 $u_{0.01}=\pm 2.58$  ( $P<0.01$ ), 呈极显著增加趋势。图1b中UF和UB曲线相交于1994—1995年之间, 表明在此期间, 夏季长度发生了突变, 由缓慢波动变化转为单一明显的增长趋势。

由图1c的UF曲线走势可以看出, 荆州地区秋季季长变化趋势可分为三个阶段, 1955—1970年、1971—1994年以及1995—2017年。1971年前, 秋季日数变化趋势不明朗; 1971—1994年, 秋季日数呈增加趋势; 1995年后, 秋季日数步入减少趋势, 且这种趋势在2006年UF曲线突破 $u_{0.01}=\pm 2.58$  ( $P<0.01$ ), 呈极显著减少趋势。图1c中UF和UB曲线相交于1992—1993年, 表明在此期间, 秋季长度发生了突变, 由缓慢波动变化转为单一明显的缩短趋势。

时间变化趋势上, 图1d中, 冬季起始时间在1977年之前, 主要表现为提前趋势, 且在1967—1972年均通过0.05水平的显著性检验, 入冬提早显著。1977年后入冬表现为延后趋势, 且在1989—1996年(1994年除外)均通过0.05水平的显著性检验, 入冬延后显著; 另外在2000—2006年均通过0.01水平的显著性检验, 入冬延后极显著; 图1d中UF和UB曲线相交于1972—1973年, 表明在此期间, 冬季起始日发生了突变, 入冬日由提前趋势向延后趋势转变。

图1e中, 春季起始时间自1955年始, 基本上是提前趋势, UF和UB曲线相交于1993—1994年之间, 表明在此期间, 春季起始日发生了突变, 入春日由缓慢波动变化转为单一明显的提前趋势, 且在2001年突破

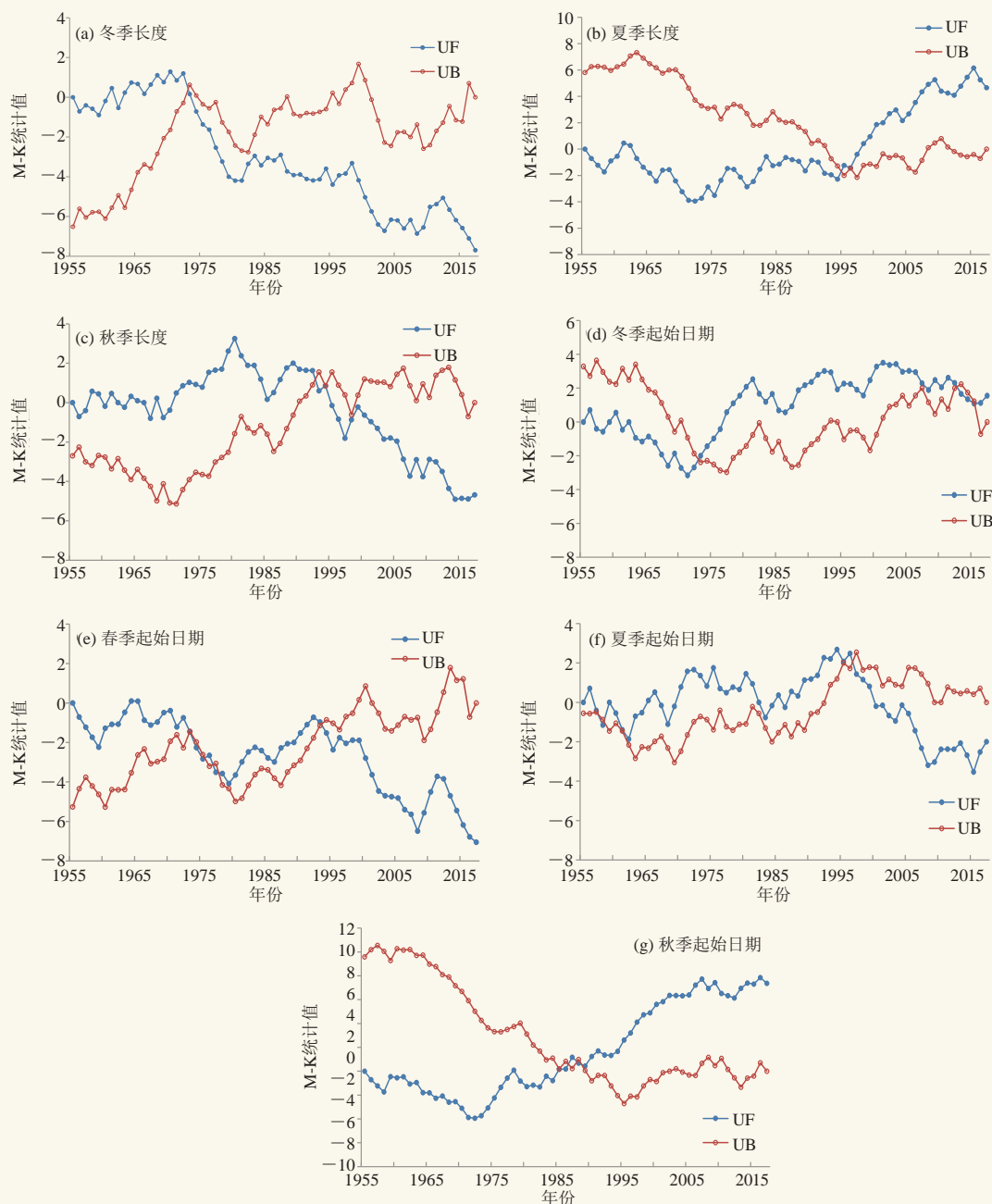


图1 荆州地区季节变化的Mann-Kendall检验 (1955—2017年)  
Fig. 1 The Mann-Kendall test of seasonal changes from 1955 to 2017 in Jingzhou

$u_{0.01} = \pm 2.58$  ( $P < 0.01$ ), 呈极显著提前趋势。

由图1f可看出, 夏季起始日变化主要分为3个时期, 即1955—1969年的小幅提前期、1970—1999年的波动延后期和2000—2017年一致提前期, 只有在2007年之后通过0.05水平的显著性检验, 入夏时间呈显著提早趋势。

由图1g可看出, 秋季起始日变化主要分为2个时期, 以1987年为界, 1987年之前入秋日呈提前趋势, 且在1964—1975年表现为显著提前趋势, 1987年之

后, 入秋日呈延后趋势, UF和UB曲线相交于1986—1987年, 表明在此期间, 秋季起始日发生了突变, 入秋日由缓慢波动变化转为单一明显的延后趋势, 且在1995年UF曲线突破 $u_{0.01} = \pm 2.58$  ( $P < 0.01$ ), 呈极显著延后趋势。

### 3 结论与对策

#### 3.1 结论

近70年来, 荆州的四季长度, 夏季最长, 冬季次之, 春、秋季相接近, 且秋季略短。在变化趋势上,

夏季日数表现为显著增加,且在1994—1995年间发生突变,由缓慢波动转为明显的增长趋势;冬、秋两季日数表现为显著减少,且冬季在1972—1973年间发生突变,由缓慢波动转为明显的缩短趋势,其主要原因表现为20世纪70年代开始,入冬延后,而春季自1955年有资料记录以来,入春日一直呈提前趋势,这种入冬日延后而入春日提前的相向压缩使得冬季季长自然缩短;而秋季在1992—1993年间发生突变,也由缓慢波动转为明显的缩短趋势。

荆州四季起始时间变化,春、夏季起始时间有显著的提前趋势,春季突变发生在1993—1994年,而夏季的突变发生在1996—1997年,春、夏两季起始时间发生突变的时间相接近,说明在20世纪90年代中后期,荆州地区表现为春季来得早,夏季也来得早。而秋、冬起始时间有显著的推后趋势。

### 3.2 对策

1) 勿因气候变暖过早播种早稻。由于入春日提前,近些年来江汉平原与洞庭湖平原部分地方农户,在3月上中旬气温回暖时段即行早稻播种,这虽在有的年份有所“成效”,但不少农户在效法中都适得其反,损失惨重。究其原因,气候变暖过去时段性的低温冷害,并非减少,早稻播种过早,生育期提前,在孕穗期间遭遇了日平均气温连续3 d或以上低于20℃的严重“五月寒”频次增多,使其空壳率明显增高,结实率降低。为此建议,广大农民群众要正确认识与应对气候变暖,不要以为春季出现时段性的急剧增温现象,就盲目地提前过早播种,甚至还采用特早熟品种,使生殖生长期提前,这对早稻来说,不仅抗御低温能力明显减弱,而且遭受低温冷害的风险较高。对于在气候变暖中,如何充分地利用热量资源的问题,应听取当地农业与气象部门的意见,以利于科学性决策。

2) 利用夏季延长、入秋推迟的气候趋变特点,适当推迟中稻播种期,进而在保证产量的前提下,

提高稻米品质。据孟亚利等<sup>[9]</sup>研究,稻米品质受灌浆结实期平均气温、平均太阳辐射、平均相对湿度等因子影响,且温度对米质的作用最大。具体来说,籼稻灌浆结实期最优平均气温为22.0~24.0℃。统计分析表明,江汉平原22.0~24.0℃(80%保证率)的时段,在8月22日—9月8日,如果能将籼型杂交稻抽穗扬花期控制在8月中旬后期,那么现行中稻迟熟品种的播种期,要由4月20日—5月初,相应推迟到5月15—25日。

3) 冬季时间推后,暖冬频现,导致小麦抽穗期提前,由此造成小麦生长“多害并发”。首先是过早拔节,其次是对低温冻害的抗御能力明显减弱,使以后穗粒数减少;尤其是若过早孕穗遇低温天气,将使其花粉不育率明显增高,出现“胎里坏”,导致结实率明显降低。基于江汉平原乃至长江中下游地区,冬小麦品种由传统的半冬性,向偏春性、春性转化,其播期应适当延后,像郑麦9023播种期应安排在10月25日以后。

4) 油菜的播期也应相应推迟,既考虑利用秋季气候资源争“秋发”,又考虑年前有13片绿叶而不抽薹,一旦发现可能生长过旺,就及早叶面喷施多效唑抑旺促壮,以免遭遇冻害。

### 参考文献

- [1] 张世轩,张璐,孙树鹏,等. 全球变暖情况下中国季节的变化. 高原气象, 2011(3): 659-660.
- [2] 郁珍艳,范广州,华维,等. 近47年我国四季长度的变化研究. 高原气象, 2011, 30(1): 182-190.
- [3] 郁珍艳,范广州,华维,等. 气温突变对我国四季开始日期的影响. 气象, 2010, 36(11): 32-37.
- [4] 徐晓,肖天贵,麻素红. 西南地区气候季节划分及特征分析. 高原山地气象研究, 2010, 30(1): 35-40.
- [5] 郁珍艳,范广州,华维,等. 气候变暖背景下我国四季开始时间的变化特征. 气象科学, 2010, 15(1): 82-87.
- [6] 王树廷. 关于日平均气温稳定通过各级界限温度初终日期的统计方法. 气象, 1982(6): 29-30.
- [7] 张宝堃. 中国四季之分配. 地理学报, 1934(1): 33-35.
- [8] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999.
- [9] 孟亚利,高如嵩,张嵩午. 影响稻米品质的主要气候生态因子研究. 西北农业大学学报, 1994(1): 1-4.

# 基于卫星遥感的40年洪湖水面变化及驱动力分析

梁益同<sup>1,3</sup> 夏智宏<sup>2,3</sup> 文雄飞<sup>4</sup> 柳晶辉<sup>1,3</sup> 张丽文<sup>1,3</sup> 邓艳君<sup>2,3</sup>

(1 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2 荆州市气象局, 荆州 434020;

3 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025; 4 长江科学院空间信息技术应用研究所, 武汉 430010)

**摘要:** 为了定量分析气候变化、人类活动对洪湖的影响, 利用20世纪70年代以来的多期Landsat/MSS、TM、ETM+及HJ-CCD卫星数据, 提取洪湖主体湖面的水体面积。采用相关分析方法分析洪湖水体面积与降水、降水日数、蒸发等因素的相关性。结果表明, 不同年份的洪湖水体面积有较大差异, 40年来洪湖水体面积有下降趋势, 特别是20世纪10年代中后期面积一直处于低值; 洪湖水体面积受降水影响非常明显, 降水日数的减少不利于洪湖蓄水; 人类活动的增加导致洪湖水体面积减少; 气候和人类活动对洪湖水体面积影响系数分别为0.78和0.50, 表明气候变化对洪湖水体面积影响大于人类活动, 但需要值得注意的是, 近年来人类活动呈逐年快速上升趋势, 对洪湖水面影响也逐渐加大; 20世纪10年代中后期洪湖水体面积低值的主因是降水连续偏少和人类活动加剧。

**关键词:** 洪湖, 水体面积, 卫星遥感, 气候变化, 人类活动

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.014

## Driving Forces of Changes to Water Surface Area for Honghu Lake over 40 Years Based on Satellite Remote Sensing Data

Liang Yitong<sup>1,3</sup>, Xia Zhihong<sup>2,3</sup>, Wen Xiongfei<sup>4</sup>, Liu Jinghui<sup>1,3</sup>, Zhang Liwen<sup>1,3</sup>, Deng Yanjun<sup>2,3</sup>

(1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074 2 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020

3 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 4 Spatial Information Technology Application Research Institute, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

**Abstract:** To quantitatively analyse the influence of climate change and human activities on Honghu Lake, the water surface area of Honghu Lake was extracted using multi-temporal remote sensing imagery including Landsat MSS, TM, ETM+ and HJ-1 CCD from the 1970's onward. Regression analysis was used to obtain relationships between lake area and precipitation, precipitation days, and evaporation. The results show that there was a relatively large difference in lake area between different years and the area decreased over 40 years, especially in the middle and late 2000's. The area was influenced by precipitation, and the decreasing number of precipitation days had negative implications for Honghu Lake water levels. Increasing human activity contributed to a reduction of lake area. The regression coefficients of climate and human activities to lake area were 0.78 and 0.50, respectively, which suggests the impact of climate change on the lake area is greater than the impact of human activities. However, the impact of human activities on lake area has gradually increased in recent years. Less precipitation and the expanding influence of human activities are the main causes of the reduced area of Honghu Lake in the middle and late 2000's.

**Keywords:** Honghu Lake, water surface area, satellite remote sensing, climate change, human activity

## 0 引言

湖泊是陆地表层系统各要素相互作用的节点,

收稿日期: 2018年6月4日; 修回日期: 2018年8月6日  
第一作者: 梁益同(1966—), Email: yitong2007@hotmail.com  
资助信息: 2018年中国气象局气候变化专项(CCSF201821);  
2018年湖北省气象局科技发展基金重点项目  
(2018Z07)

是地球上重要的淡水资源库、洪水调蓄库和物种基因库, 在维护流域生态平衡、满足生产生活用水、减轻洪涝灾害和提供丰富水产品等方面发挥着不可替代的作用。中国湖泊数量多、类型全、分布广、变化复杂, 据《中国湖泊志》记载, 全国共有面积大于1.0 km<sup>2</sup>的湖泊2759个, 总面积91019.6 km<sup>2</sup><sup>[1]</sup>, 广泛分布于东部平原、青藏高原、云贵高原、蒙新高原、

东北平原与山地等五大湖区。近几十年来，随着区域气候环境变化和人类活动干扰加剧，湖泊数量、形态和分布发生了巨大变化，严重影响流域经济社会可持续发展和居民生活安定，受到各级政府和社会各界的广泛关注。

尽管在不同时期和不同区域湖泊面积变化的原因各不相同，但一般认为是人类活动和气候变化共同作用的结果，但人类活动和气候变化哪个是主因，各有多大影响力至今仍存在较大争议<sup>[2]</sup>。王树基<sup>[3]</sup>认为，1949年以来我国西北干旱地区湖泊面积减少是人类活动所为；杨桂山等<sup>[4]</sup>指出，由于人类围垦活动，长江中下游湖泊数量及面积均大幅减少；方金琪<sup>[5]</sup>研究表明，气候的波动变化对湖泊的变化会产生重要影响，如青藏高原地区、山东半岛和云南东部地区等；许诗等<sup>[6]</sup>认为，吉林省湖泊面积萎缩受气候干旱化、人口增加带来的压力、水利工程修建等因素影响。

20世纪中期以来长江流域中下游出现湖泊水域变迁与水面萎缩现象<sup>[7-9]</sup>，洪湖也不例外，近年来遭遇一系列水面萎缩、水体干涸、水质恶化、湿地退化、旱涝急转等一系列水文与生态问题<sup>[9-11]</sup>。有关洪湖水文、生态环境的研究不少，如王学雷等<sup>[12]</sup>研究了洪湖湿地恢复中生态水位控制；胡学玉等<sup>[13]</sup>分析洪湖水体环境质量演变；朱明勇等<sup>[14]</sup>对洪湖水环境承载力进行了初步研究；杨凯等<sup>[15]</sup>利用遥感技术进行洪湖水生植物分布状况调查；陈世俭等<sup>[16]</sup>分析了洪湖的水资源与水位调控之间关系，但对导致洪湖环境变化的主要因子进行定量分析的研究并不多见。遥感作为一种新兴的对地观测技术，具有观测范围大、时效性强、成本低廉等其他技术手段无法比拟的优势，是进行湖泊动态监测的一种行之有效的技术手段<sup>[17]</sup>。本文利用20世纪70年代以来不同时期的Landsat/MSS、TM、ETM+和HJ-CCD卫星影像数据，分析洪湖水体面积的变化，并利用气候数据、人类活动代表数据定量分析洪湖水面变化中各驱动力因子作用力的大小。

## 1 研究区域及研究数据

### 1.1 研究区域

洪湖是湖北省最大的淡水湖，也是全国第七大淡水湖，其地处湖北省南部长江与东荆河间的洼地中，是长江中游江汉平原上的一个大型浅水湖泊，湖盆极为平坦，湖底平均高程海拔23 m。洪湖湖区为“四湖”（长湖、三湖、白露湖、洪湖）流域下游，地跨洪湖、监利2个市（县），流域面积3314 km<sup>2</sup>。洪湖原为通江湖泊，水位随长江水位涨落，生物资源与长江基本相同。在20世纪50—60年代洪湖经历了3

次大的围垦，1955年修筑洪湖围堤，1958年建成新滩口节制闸，1970年修建新堤排水闸，阻断了洪湖与长江的天然联系，限制了长江水倒灌。现存湖体面积348.2 km<sup>2</sup>，东西长23.4 km，南北宽20.8 km，底部高程为22.5~22.8 m。

## 1.2 研究数据及处理

### 1.2.1 遥感影像数据

收集覆盖洪湖地区的多期Landsat/MSS、TM、ETM+及HJ-CDD卫星遥感影像数据（表1），用于提取洪湖水体面积，影像生成时间除了1999年的一景在12月外，其余都集中在9，10和11月里，基本上为洪湖平水期，能够较客观地反映当年洪湖水面变化。

表1 卫星遥感影像数据明细  
Table 1 Remote sensing imagery data list

日期	卫星/传感器	分辨率/m	日期	卫星/传感器	分辨率/m
1973-11-02	Landsat/MSS	60	1999-12-24	Landsat/ETM+	30
1976-11-14	Landsat/MSS	60	2000-10-07	Landsat/ETM+	30
1978-10-16	Landsat/MSS	60	2001-09-24	Landsat/ETM+	30
1979-11-07	Landsat/MSS	60	2002-10-13	Landsat/ETM+	30
1980-11-02	Landsat/MSS	60	2003-10-16	Landsat/ETM+	30
1982-11-10	Landsat/MSS	60	2005-09-11	Landsat/ETM+	30
1984-09-17	Landsat/MSS	30	2006-10-16	Landsat/ETM+	30
1987-09-26	Landsat/TM	30	2008-10-24	HJ/CCD	30
1993-10-12	Landsat/TM	30	2009-10-01	HJ/CCD	30
1994-09-29	Landsat/TM	30	2010-09-17	Landsat/ETM+	30
1996-10-04	Landsat/TM	30	2011-10-07	HJ/CCD	30

对遥感数据首先进行辐射定标、几何精纠正等预处理。

不同影像数据提取水体信息方法不同。针对Landsat/MSS数据分辨率比较低的特点，而植被与水体在MSS数据第5波段难以区分，土壤和植被在第7波段难以区分，引入生物量指标变换<sup>[18]</sup>

$$I_{\text{bio}} = \frac{I_{B7} - I_{B5}}{I_{B7} + I_{B5}} = \frac{H_1}{H_0}, \quad (1)$$

式中， $I_{\text{bio}}$ 为生物量变化后的亮度值， $I_{B7}$ 和 $I_{B5}$ 分别为MSS-7和MSS-5图像的像元亮度值； $H_1$ 和 $H_0$ 为一阶哈达玛变换后的新影像分量<sup>[18]</sup>

$$\begin{bmatrix} H_0 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{B7} \\ I_{B5} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot \begin{bmatrix} \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \\ \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{B7} \\ I_{B5} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$I_{\text{bio}}$ 在光谱特征空间中的几何意义是类别集群沿辐射射线方向在 $H_1=1$ 的直线上的投影（图1）。由图1中典型土壤、水体和绿色植物在特征空间中分布的位置可见，利用 $I_{\text{bio}}$ 能够有效地将水体从其他两种地物类型区分，利用生物量指标变换特征图像，配合MSS第4、6波段数据应用ISODATA聚类分析算法进行水体提取<sup>[18]</sup>。

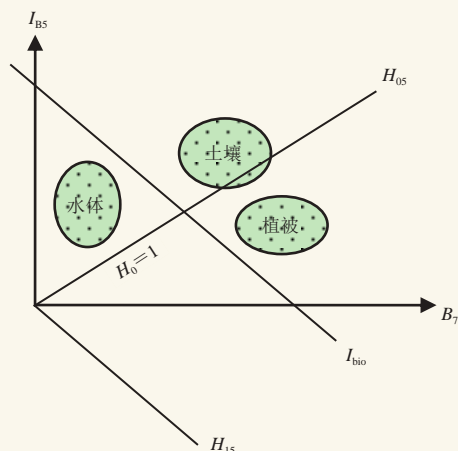


图1 生物量指标变换

Fig. 1 The biomass index transformations

对于空间分辨率达到 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的Landsat/TM、ETM+和HJ/CCD数据，通过PCA主成分变换，提取主成分变换后的第一主分量，结合可见光（TM/ETM+/CCD第3波段）和近红外（TM/ETM+/CCD第4波段）数据构建的归一化植被指数（NDVI）特征参数，以及徐涵秋<sup>[19]</sup>提出的改进的归一化水体指数（MNDWI）特征参数，通过选择植被、水体、城镇等感兴趣地理区域（ROI）样本，采用最大似然法进行分类，并对分类结果进行小斑点剔除、孤岛过滤等分类后处理，得到洪湖水体分布信息，图2是部分时次的不同卫星影像水体信息空间分布图。

### 1.2.2 其他数据

收集洪湖市1:50000的数字地形图用于遥感影像

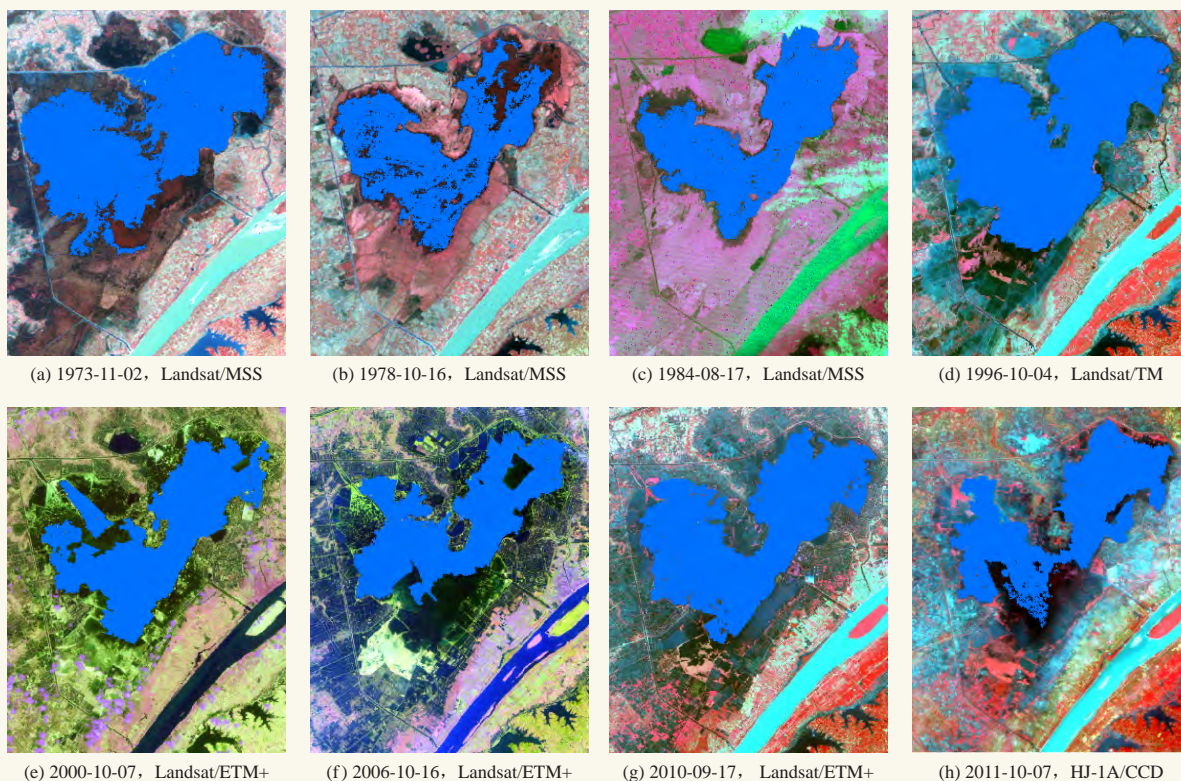


图2 部分不同时次的卫星洪湖水体信息（蓝色部分）空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of Honghu Lake's water surface observed by multi-temporal satellite (Where the blue parts are the water surface in Honghu Lake)

精纠正和辅助解译。

收集洪湖气象站1971年以来逐日降水和蒸发观测资料，整理计算出洪湖1—8月降水量、降水距平、降水日数（日降水量大于 $0.1\text{ mm}$ 的天数）、降水日数距平和蒸发量，其中，对于降水距平和降水日数距平的计算，所用的数据为1971—2010年的平均值。

到湖北省统计局查阅《荆州五十年（1949—1999）》

及2000—2012年后《荆州统计年鉴》等文献，通过按价格换算等处理，得出1971年以来的洪湖市GDP数据（按1990年价格计算）。

## 2 结果分析

经过收集、换算或提取处理后获得的洪湖不同年份的水体面积、1—8月降水数据（降水量及其距平、降水日数及其距平）、蒸发和GDP数据。绘制水体面

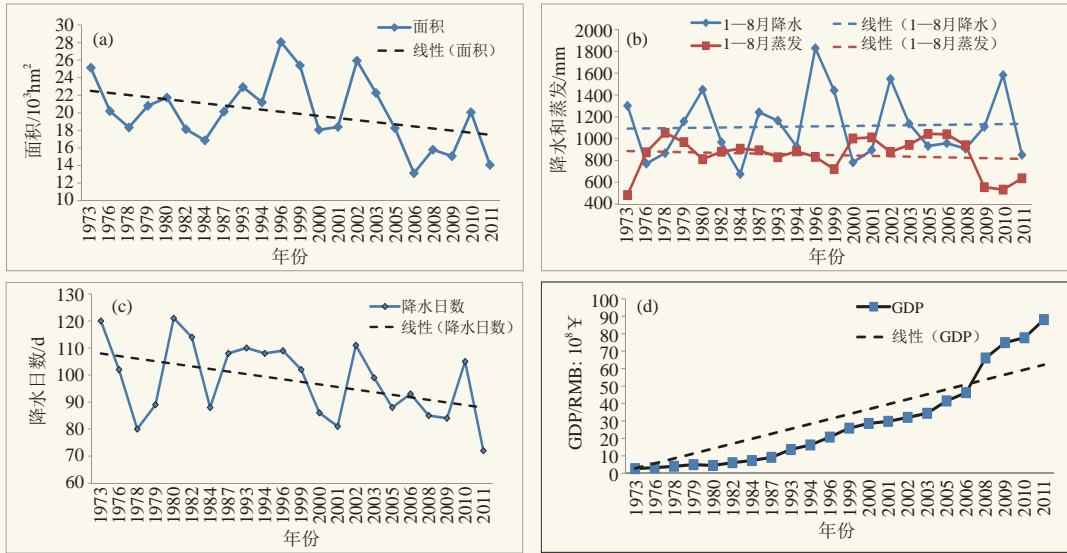


图3 洪湖水体面积 (a)、降水和蒸发 (b)、降水日数 (c) 和GDP (d) 年际变化  
Fig. 3 The annual variation of Honghu Lake water surface area (a), precipitation and evaporation (b), precipitation days (c), and GDP (d)

积、降水量、降水日数、蒸发量和GDP随年份变化曲线 (图3)。

### 2.1 洪湖水体面积年际变化

由图3a可见, 不同年份的洪湖水体面积有较大差异, 面积最大是1996年的2.81万  $\text{hm}^2$ , 最小是2006年的1.31万  $\text{hm}^2$ , 两个年份相差1倍多; 趋势分析表明, 洪湖水体面积总体为下降趋势; 20世纪10年代中后期洪湖水体面积一直处于较低值。

### 2.2 洪湖水体面积变化驱动力分析

湖泊的面积变化由湖泊水量的收支决定, 而气候变化和人类活动均对湖泊水量的收支产生影响。气候方面, 降水是湖泊水量的主要来源, 蒸发则导致湖泊水量自然减少; 人类活动方面, 人口增加、经济发展、土地利用类型改变等需要消耗大量水资源, 同时又会削弱湖泊的调蓄功能。为了分析洪湖水体面积变化驱动力, 将洪湖水体面积与气候因子 (降水和蒸发)、人类活动因子 (为了研究方便, 以GDP为代表) 进行回归分析, 定量分析各因子影响力的大小。

#### 2.2.1 气候因子对洪湖水体面积的影响分析

降水可以补充洪湖水体面积。绘制洪湖水体面积与降水的相关关系图 (图4a), 洪湖水体面积与降水有较高的相关性, 相关系数 ( $r$ ) 达0.7382 ( $P < 0.05$ ), 表明降水对洪湖水体面积的影响非常明显。分析发现洪湖降水年际变化 (图3b) 为略增加趋势, 而洪湖水体面积年际变化呈下降趋势, 特别是20世纪10年代中后期一直处于较低值。为了解释这个现象, 对1973—

2002年和2003—2011年两时段的水体面积和降水量做相关性分析 (图4b~4c) 发现, 1973—2002年洪湖水体面积和降水量的相关系数为0.8950, 而2003—2011年的 $R$ 只有0.5857, 表明2002年之后除降水之外另有其他因素对洪湖水体面积产生较大影响。

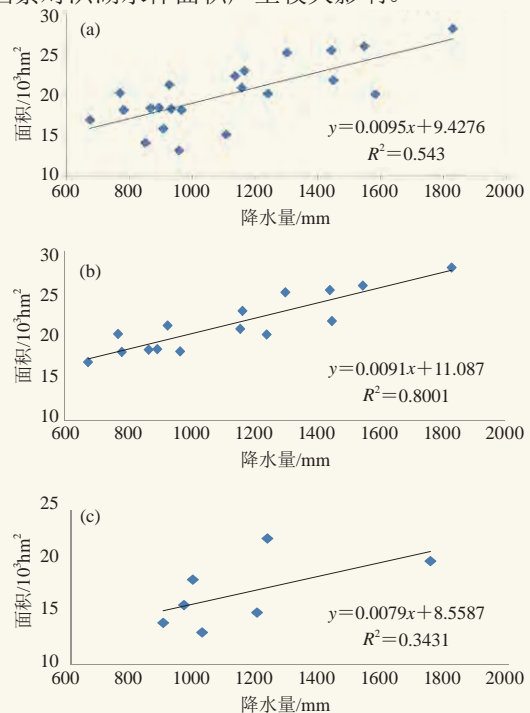


图4 不同时段1973—2011年 (a)、1973—2002年 (b) 和2003—2011年 (c) 的面积与降水相关关系  
Fig. 4 The correlations between area and precipitation between the periods of 1973—2011 (a), 1973—2002 (b) and 2003—2011 (c)

除降水量的直接影响外, 降水的时间分布对洪湖水体面积的影响也不可忽视。分析发现, 洪湖降水年际变化为略增加趋势(图3b), 但降水日数呈减少趋势(图3c)。有研究表明<sup>[20-21]</sup>降水日数减少会加剧降水时间分布不均的现象, 导致地区旱涝风险增大。洪湖本就存在来水过度集中而形成洪涝灾害或来水不足而形成干旱威胁的矛盾<sup>[11]</sup>, 降水日数的减少将加剧这种矛盾。比较典型的例子是1994和2010年。1994年降水量只有927.6 mm, 降水距平为-17.2%, 但降水日数却达108 d, 距平为10.7 d, 因而洪湖水体面积达到较高的2.12万 hm<sup>2</sup>; 2010年, 降水量高达1583.8 mm, 降水距平为41.3%, 但降水日数为105 d, 距平为7.7 d, 因而在降水较多的情况下洪湖水体面积只有2.01万 hm<sup>2</sup>。相关分析(图5)表明, 面积与降水日数相关系数为0.6914 ( $P < 0.05$ )。

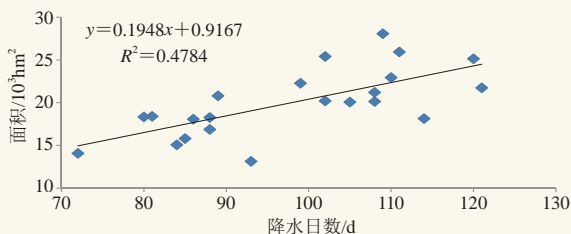


图5 面积与降水日数相关关系

Fig. 5 The correlation between lake area and precipitation days

水面蒸发使洪湖水量减少。洪湖蒸发年际变化为略减少趋势(图3b), 对洪湖水体面积与蒸发量做相关性分析(图6)发现, 二者相关系数为-0.2010 ( $P < 0.05$ ), 表明蒸发对洪湖水体面积的影响不明显。

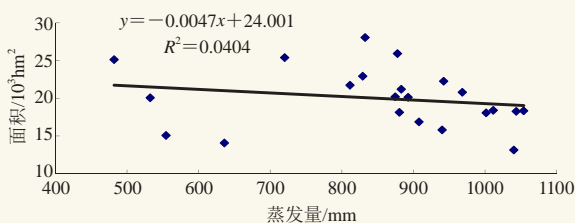


图6 面积与蒸发相关关系

Fig. 6 The correlation between lake area and evaporation

### 2.2.2 人类活动对洪湖水体面积的影响分析

人类活动对洪湖生态环境带来较大影响。肖飞等<sup>[10]</sup>认为, 从20世纪50年代以来, 洪湖湿地类型的面积变化经历四个阶段: 第一阶段是20世纪50年代以来的大规模水利建设和大规模围垦活动, 湿地面积有很大程度缩减; 第二阶段是从20世纪70年代末开始, 围垦基本停止, 湿地总面积略有增加; 第三阶段是, 从20世纪80年代末期, 洪湖开始水面大开发, 围网养鱼

迅速发展, 使自然淡水湖泊面积稍有减小; 第四阶段是湿地格局相对稳定的阶段。随着湿地保护工作的加强, 洪湖湿地面积总体稳定。卢山等<sup>[11]</sup>认为, 大面积的围湖造田, 以及养殖业、旅游业的兴起, 洪湖湖区经济得到很大发展, 但同时带来了生态环境恶化和洪湖面积减少等问题。

分析洪湖市GDP逐年变化(图3d)发现, 洪湖市GDP一直呈增长趋势, 特别从2000年起, GDP增速明显加快。这说明2000年后人类活动对洪湖水体面积的影响开始逐步凸显。这就不难解释洪湖水体面积在2000年后处于低值的原因, 除降水之外, 人类活动也是一个重要因素。

### 2.2.3 洪湖水面积变化各种影响因子影响力分析

为了分析各因子对洪湖水体面积变化的影响力, 将洪湖水体面积与各因子进行多元回归分析, 以确定各因子影响力大小。由于降水量和降水日数存在较好的相关关系, 所以降水因素方面只选择了降水量这个因子。分别将水体面积、降水量、蒸发量和GDP数据进行按标准差方法进行标准化处理

$$z'_i = (z_i - \bar{z}) / s, \quad (3)$$

式中,  $z'_i$ 为样本中第*i*个变量标准化后的值,  $z_i$ 为第*i*个变量实际值,  $\bar{z}$ 为变量的平均值,  $s$ 为标准差。

标准化后, 以降水量( $x_1$ )、蒸发量( $x_2$ )和GDP( $x_3$ )为输入, 水体面积( $y$ )为输出, 进行多元回归分析, 可得到回归模型

$$y = 0.715x_1 - 0.061x_2 - 0.500x_3. \quad (4)$$

根据式(4)计算得到的复相关系数为0.8805。将降水量、降水日数和蒸发量回归系数分别取绝对值后相加, 可得气候因子的影响系数为0.78, 而人类活动的影响系数为0.50, 表明40年来, 气候因子对洪湖水体面积影响大于人类活动, 但值得注意的是, 2000年以来人类活动影响呈快速上升趋势, 如果不加以控制, 未来对洪湖水面积影响也逐渐加大。

## 3 小结

利用20世纪70年代以来的多种卫星(Landsat/MSS、TM、ETM+及HJ-CCD)影像、气象观测和GDP资料, 定量分析40年来洪湖水体面积变化以及气候变化和人类活动对洪湖水体面积的影响。主要得出以下结论:

- 1) 不同年份的洪湖水体面积有较大差异, 面积最大是1996年的2.81万 hm<sup>2</sup>, 最小是2006年的1.31万 hm<sup>2</sup>; 洪湖水体面积年际变化总体为下降趋势, 特别是20世纪10年代中后期面积一直处于低值。
- 2) 洪湖水体面积与降水有较高的相关性,  $r$ 达

0.7382, 表明洪湖水体面积受降水影响非常明显。

3) 40年来, 洪湖降水年际变化为略增加趋势, 洪湖降水日数为减少趋势。这种降水在时间分布上更加不均匀的特点加大了旱涝发生频率, 导致洪湖水体面积减少。

4) 分析显示, 气候和人类活动对洪湖水体面积影响系数分别为0.78和0.50, 表明气候对洪湖水体面积影响大于人类活动。但值得注意的是, 2000年以来人类活动影响呈快速上升趋势, 对洪湖水体面积影响也逐渐加大; 20世纪10年代中后期洪湖水体面积处于低值的主因是降水连续偏少和人类活动加剧。

在人类活动中, 影响洪湖面积的因素是极其复杂的, 由于资料收集的困难, 本文仅以GDP为代表, 另外, 在分析各因子对洪湖水体面积的影响时, 本文所用的模型为线性统计模型, 因此所得的结论需进一步探讨、验证。今后将在全面收集人类活动(人口增长、经济发展、土地利用改变)数据基础上, 尝试采用物理模型(如SWAT模型), 探讨各种因子对洪湖水面变化的影响。

#### 参考文献

[1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.  
[2] 丁永建, 刘时银, 叶柏生, 等. 近50a中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析. 冰川冻土, 2006, 28(5): 623-632.  
[3] 王树基. 近四十年来人类活动对我国干旱区湖泊的影响. 干旱区地理, 1989, 12(1): 1-5.

[4] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.  
[5] 方金琪. 气候波动在我国近期湖泊变化中的作用. 海洋湖沼通报, 1990, (3): 9-14.  
[6] 许诗, 刘志明, 王宗明, 等. 1986—2008年吉林省湖泊变化及驱动力分析. 湖泊科学, 2010, 22(6): 901-909.  
[7] 姜加虎, 黄群, 孙占东. 长江流域湖泊湿地生态环境状况分析. 生态环境, 2006, 15(2): 424-429.  
[8] 黄心一, 陈家宽. 极端气候变化与长江中下游湿地—从2011年的“早涝急转”说起. 科学, 2012, 64(6): 35-37.  
[9] 李迅, 袁东敏, 尹志聪, 等. 2011年长江中下游旱涝急转成因初步分析. 气候与环境研究, 2014, 19(1): 41-50.  
[10] 肖飞, 蔡述明. 洪湖湿地变化研究. 华中师范大学学报(自然科学版), 2003, 37(2): 266-268, 272.  
[11] 卢山, 李世杰, 王学雷. 洪湖的环境变迁与生态保护. 湿地科学, 2004, 2(3): 234-237.  
[12] 王学雷, 宁龙梅, 肖锐. 洪湖湿地恢复中的生态水位控制与江湖联系研究. 湿地科学, 2008, (2): 316-320.  
[13] 胡学玉, 陈德林, 艾天成. 1990—2003年洪湖水体环境质量演变分析. 湿地科学, 2006, 4(2): 116-119.  
[14] 朱明勇, 宁龙梅, 王学雷. 洪湖水环境承载力初步研究. 水资源与水工程学报, 2007, 18(6): 4-6.  
[15] 杨凯, 林开愚. 遥感技术在洪湖水生植物分布状况调查中的应用. 武汉测绘学院学报, 1983, 25(1): 1-13.  
[16] 陈世俭, 王学雷, 卢山. 洪湖的水资源与水位调控. 华中师范大学学报(自然科学版), 2002, 36(1): 121-124.  
[17] 于雪英, 江南. 基于RS、GIS技术的湖面变化信息提取与分析. 湖泊科学, 2003, 15(1): 81-84.  
[18] 孙家炳. 遥感原理与应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.  
[19] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.  
[20] 梅伟, 杨修群. 我国长江中下游地区降水变化趋势分析. 南京大学学报(自然科学版), 2005, 40(6): 577-589.  
[21] 王怀清, 赵冠男, 彭静, 等. 近50年鄱阳湖五大流域降水变化特征研究. 长江流域资源与环境, 2009, 18(7): 615-619.

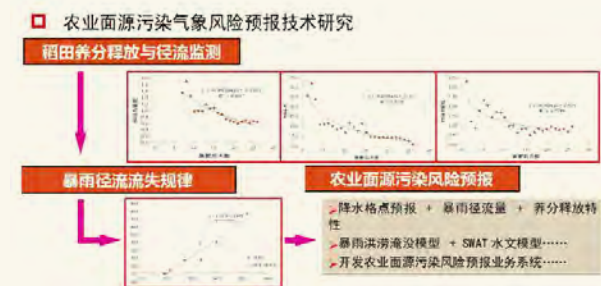
## 降雨对江汉平原农业面源污染的影响不容忽视

■ 邓超 陈伟亮

江汉平原, 鱼米之乡, 农田阡陌纵横, 一眼望去绿油油的农田, 其实并不像人们想象的那样“绿色”。实际上, 农田对化肥的吸收利用率并不高, 有相当一部分随着水体流动而流失, 而其中的氮、磷等元素会造成农业面源污染。

荆州农试站站长刘凯文表示, 在江汉平原这样一个水资源丰沛的地区, 农业面源污染已经构成了对水环境的威胁, 也成为江汉平原乡村振兴示范区建设的痛点, 引起了地方政府的高度重视。

造成面源污染的原因之一是降雨, 假如农民在暴雨来临前施肥, 那么肥料流失比例将非常高。避免这种无意义的流失和污染, 气象预警至关重要。为此, 荆州农试站特别建造了暴雨模拟设备来试验不同



级别降雨对农作物以及面源污染的不同影响, 基于暴雨淹没模型的农业面源污染预报模型也正在开发中。

(作者单位: 荆州市气象局)

# 利用HJ-1卫星多光谱数据监测城市湖泊蓝藻研究

柳晶辉<sup>1, 2</sup> 万君<sup>1</sup>

(1 武汉区域气候中心, 武汉 430070; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025)

**摘要:** 以2009年8月中旬东湖支湖局部暴发蓝藻为案例, 对蓝藻暴发前后三个时期的HJ-1卫星多光谱遥感影像数据进行对比分析, 利用比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)以及增强型植被指数(EVI)三种植被指数对蓝藻信息进行判别提取, 通过已验证的样本点率定判别方法阈值, 并对三种植被指数精度及判别结果进行比较分析。结果表明, 利用HJ-1遥感数据可快速鉴别蓝藻范围及其程度, 大气校正突出了蓝藻水体和其他地物光谱差异, EVI方法精度高, 可剔除水质中泥沙等悬浮物的干扰, 可作为城市湖泊蓝藻变化检测经验模型。

**关键词:** 遥感, 蓝藻, HJ-1, 东湖, 多光谱

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.015

## Monitoring Cyanobacteria Blooms in East Lake Using HJ-1 Multi-Spectral Satellite Images

Liu Jinghui<sup>1, 2</sup>, Wan Jun<sup>1</sup>

(1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan, 430074 2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jianghan Plain, Jingzhou 434025)

**Abstract:** This paper uses the mid-August 2009 cyanobacteria blooms in East Lake as a case study to comparatively analyze three periods of the cyanobacteria bloom using HJ-1 satellite multi-spectral remote sensing data. Using RVI, NDVI and EVI index models to extract cyanobacteria information, we determined the thresholds of the three models using verified sampling points, then analyzed the accuracy of the three models and their discrimination of cyanobacteria blooms. The results show that HJ-1 remote sensing data can be used to quickly identify the range and extent of cyanobacteria blooms. Atmospheric correction highlighted the spectral difference of cyanobacteria and other features. The EVI method has high precision and can eliminate the interference of suspended solids such as sediment when assessing water quality, and it can be used for empirical detection of cyanobacteria in urban lakes.

**Keywords:** remote sensing, cyanobacteria, HJ-1, East Lake, multi-spectral

### 0 引言

蓝藻是水体富营养化的产物。在一些营养过剩的水体中, 遇无风高温晴好天气, 蓝藻便大量繁殖, 形成藻华色带, 在水面漂浮一层蓝绿色并伴有腥臭味的泡沫, 这种大规模的藻华色带被称为“绿湖”(和海洋发生的赤潮对应)。蓝藻暴发加剧了水质恶化, 严重影响城市供水和渔业生产, 威胁湖泊生态环境安全<sup>[1]</sup>, 如何大面积快速监测湖泊蓝藻暴发程度及分布范围是满足当前生态文明建设解决的重要研究方向之一。

遥感技术可监测大范围环境变化, 具有其他手段不可替代的优越性, 国内外学者针对蓝藻遥感监测取得了一些研究进展。Hoge等<sup>[2-3]</sup>利用NASA机载海

洋激光器对藻红蛋白进行主动遥感探测, 首次获取了叶绿素荧光的光谱反射带, 并建立了水中藻红蛋白的MODIS遥感监测算法; Wezemak等<sup>[4]</sup>利用遥感数据建立富营养化指数, 并对磷含量和富营养化指数进行检验, 证实多光谱遥感影像适用于城市内湖富营养评估; 疏小舟等<sup>[5]</sup>在太湖实验区, 采用地物光谱仪实地测量湖水在可见光和近红外波段反射曲线, 同时采样分析叶绿素、总悬浮固体物质浓度等水质参数, 研究内陆水体反射光谱特征与藻类叶绿素浓度之间的关系, 建立藻类叶绿素高光谱定量遥感模型; 段洪涛等<sup>[6]</sup>使用MODIS、CBERS、ETM+以及IRS多种遥感数据, 采用单波段、波段差值及波段比值方法提取不同历史时期太湖蓝藻, 结果表明上述遥感数据均可提取蓝藻信息, 波段比值法更稳定; 徐京萍等<sup>[7]</sup>通过MODIS植被指数数据提取太湖蓝藻水华信息, 用多

收稿日期: 2018年6月6日; 修回日期: 2018年8月6日

第一作者: 柳晶辉(1979—), Email: willowboy@163.com

资助信息: 2018年中国气象局气候变化专项(CCSF201821)

种植被识别模式确定蓝藻分布范围并分析比较其优缺点。

本文针对我国内陆城市湖泊水体特征，以武汉东湖支湖一次蓝藻事件为案例，探讨使用多时相HJ-1卫星遥感数据，采用比值植被指数（RVI）、归一化植被指数（NDVI）以及增强型植被指数（EVI）三种植被指数作为判别方法，开展蓝藻多光谱遥感监测方法研究，旨在为开展遥感监测城市湖泊蓝藻及水质水色变化提供方法参考。

## 1 研究区概况

东湖位于武汉市城区，是国内最大的城市内湖，湖面面积约33 km<sup>2</sup>，从20世纪70—80年代开始，武汉东湖富营养化状况相当严重，进入夏天湖内的蓝藻大量繁殖形成黏稠的水华，经过多年治理，取得了较好的效果。但在2009年8月中旬，东湖支湖官桥湖再次暴发蓝藻，并进入部分主湖（图1）。



图1 2009年8月中旬东湖支湖蓝藻

Fig. 1 Cyanobacteria bloom on the branch lake of the East Lake in mid-August 2009

## 2 蓝藻遥感监测机理

蓝藻暴发形成水华，会引起水体温度、色度和透明度等一系列物理性质发生变化，从而导致水体反射光谱特性也发生变化。此外，蓝藻暴发聚集易受潮流、风向的影响，其在影像上通常呈条带延伸，并具有絮状纹理机构，这与周围的湖泊水面有显著不同。

城市内湖水体遥感反射率 $\rho_w$ 是水体中各种物质的综合反射率的混合反映，除纯水体本身外，水体中还有叶绿素 $a$ 、悬浮物质和黄色物质三类，可用简单的模型近似描述如下<sup>[8]</sup>

$$\rho_w \approx \frac{b_w + b_s + b_p}{a_w + a_s + a_p + a_y}, \quad (1)$$

式中， $b_w$ 、 $b_s$ 、 $b_p$ 分别是水、无机悬浮物和藻类物质的后向散射系数； $a_w$ 、 $a_s$ 、 $a_p$ 、 $a_y$ 分别为水、无机悬浮物、藻类物质和黄色物质的吸收系数。这些不同物质的散射和吸收特性最终反映到影像的不同波段的光谱

特征上。

通过ASD FieldSpec3手持地物光谱仪对湖泊蓝藻进行多次光谱特征采样并制作了典型地物光谱特征曲线（图2）。可以看出，蓝藻和水体的光谱曲线有明显差异，在400~700 nm波段，蓝藻和典型植被的反射率变化区别不明显，但是水体呈现下降趋势，在700~900 nm波段，蓝藻的反射率快速上升，形成一个反射峰顶，反映叶绿素 $a$ 含量在蓝藻光谱特征中具有主导因素，其呈现植被光谱效应。

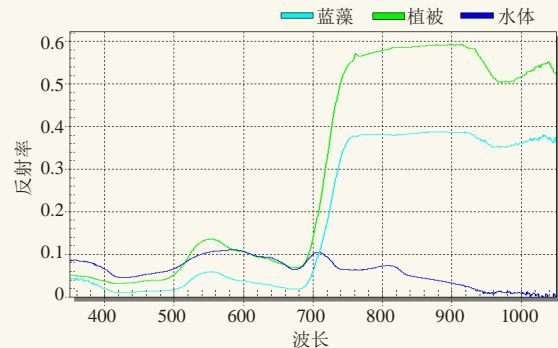


图2 典型地物光谱特征曲线

Fig. 2 Typical surface spectrum characteristic curve

从多种典型地物在HJ-1卫星多光谱波段数据中光谱特征折线图（图3）中可以看出，蓝藻反射率在近红外波段呈现峰值，利用这一重要光谱特征可将水体与蓝藻判别，可提取蓝藻信息。

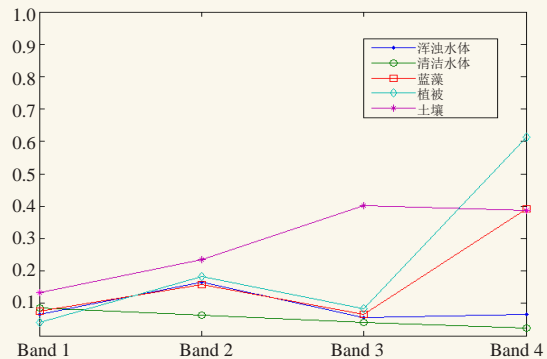


图3 HJ-1影像典型地物多光谱反射率特征值

Fig. 3 HJ-1 image special surface multi-spectral reflectance value

## 3 数据与方法

### 3.1 遥感数据来源

HJ-1a/b号卫星于2008年9月发射升空，是我国首个环境与灾害监测卫星，用于对灾害、生态环境污染进行全天动态监测。HJ-1a搭载了CCD相机和超光谱成像仪（HIS），HJ-1b则搭载CCD相机和红外相机（IRS），其中CCD相机重访周期为2 d，星下像元分辨率为30 m。为了对湖泊蓝藻暴发的全过程进行动态

监测, 本文收集了三个不同时间段的卫星遥感数据, 分别是蓝藻暴发前2009年6月27日HJ-1b CCD、蓝藻暴发时2009年8月19日HJ-1b CCD、蓝藻结束时2009年9月6日HJ-1b CCD数据, 数据来源于中国资源环境卫星中心, 数据级别为2级, 进行了系统的辐射校正, 以湖北省1:5万地形图为准, 利用二次多项式和双线性内插法对图像进行几何校正并掩模裁剪, 经重新选点检验, 误差在一个像元内。

### 3.2 大气校正处理

水质遥感关键在于消除大气和光照等因素的影响, 因此要真实反演蓝藻和其他地物反射率须对获取的遥感影像进行大气校正, 从而剔除大气分子和气溶胶散射对地物反射率干扰。特别是对那些湖泊处于

PM<sub>10</sub>等大气颗粒物居高不下污染严重的城市而言, 大气校正更是必不可少<sup>[9]</sup>。

本研究使用ENVI软件大气校正模块FLAASH对HJ-1b遥感影像数据进行大气校正处理, FLAASH模型是基于MORTAN4+辐射传输模型, 其通过影像像素光谱上的特征来估测大气属性, 不依赖遥感成像时同步测量的大气参数数据。

辐射定标是首先需要对遥感影像表观辐射亮度转化, 式(2)即是表观辐射亮度的测算, 表1是HJ-1的辐射定标系数

$$L_a = (DN / Gain) + Bias, \quad (2)$$

式中,  $DN$ 为亮度值,  $Gain$ 为增益,  $Bias$ 为偏移。

针对HJ-1b卫星需要对FLAASH模型中传感器参数进行设置, 主要涉及传感器类型、成像中心点经纬

表1 HJ-1b CCD传感器波段辐射定标系数  
Table 1 Radiance calibration coefficients of HJ-1b satellite CCD Band1-4

	Band1 ( 0.41 ~ 0.52 $\mu\text{m}$ )	Band2 ( 0.52 ~ 0.60 $\mu\text{m}$ )	Band3 ( 0.63 ~ 0.69 $\mu\text{m}$ )	Band4 ( 0.76 ~ 0.90 $\mu\text{m}$ )
增益 (DN/W·m <sup>2</sup> ·sr <sup>-1</sup> · $\mu\text{m}^{-1}$ )	0.5759	0.5488	0.5737	0.7753
偏移 (W·m <sup>2</sup> ·sr <sup>-1</sup> · $\mu\text{m}^{-1}$ )	3.4608	5.8769	8.0069	8.8583

度、成像时间、高度信息、像元分辨率、数据获取日期和卫星过境时间等, 这些数据可从数据自带的元文件中获取。

在地球大气模式方面, 模块提供热带、中纬度夏季、中纬度冬季、极地夏季、极地冬季和美国标准大气模型, 本研究选择中纬度夏季的大气模型, 区域对应为9月40°N的MLS大气模型, 气溶胶模式设置为城市气溶胶模式与之对应。设置区域特征参数后经FLAASH处理得到大气校正后的研究区反射率图像。本文选取了蓝藻与水体校正前的表观反射率和校正后地表反射率进行对比分析(图4)。分析发现, 校正后变化最大的是蓝波段, 其他波段影响依次减小, 这

也是大气散射的原理, 对短波的影响较长波的大, 大气校正可消除大气散射在可见光波段的增加效应。

## 4 结果

由于蓝藻体内含的叶绿素a对可见光和近红外具有特殊的“陡坡效应”, 使得那些浮游生物含量大的水体兼有水体和植物的反射光谱特征<sup>[10]</sup>。随浮游植物的含量增高, 其光谱曲线与绿色植物的反射光谱越接近, 即在可见光波段反射率低, 而在近红外波段反射率急剧上升, 此特征可作为采用植被指数遥感监测蓝藻的可靠依据。

本文采用了RVI、NDVI和EVI三种植被指数判别方法, 利用水华暴发前后三期遥感影像(图5), 通过ENVI软件分类采样工具选取90个样本点, 范围主要分布在轻度水华、重度水华、正常水体以及植被等4类地物上, 又随机选择了30个样本点作为补充, 共计150个样本, 其中100个样本作为训练数据, 50个样本作为检验数据, 这些样本点数据都通过人工目视解译和实地调查进行分析, 验证样本点的分类正确性。通过反复试验调整RVI、NDVI以及EVI阈值设定使得已验证样本点总体精度在80%以上的样本数据处理后符合判别后的分类。

### 4.1 RVI 阈值监测

由于蓝藻的类植被光谱特征和水体形成强烈反差, 因此通过红波段(R)与近红外波段(NIR)两

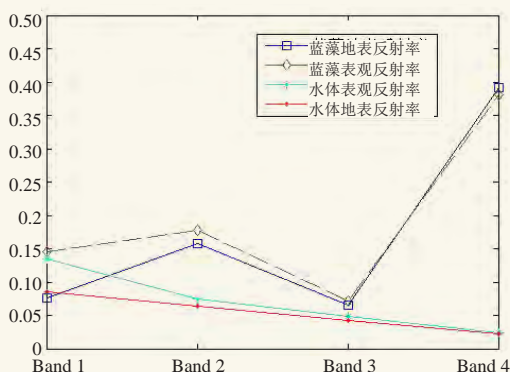


图4 HJ-1影像校正前后地物反射率曲线

Fig. 4 HJ-1 image surface reflectance curve before and after atmospheric correction



图5 蓝藻水华暴发前后三个时相的HJ-1b遥感影像

Fig. 5 Three phases of HJ-1b remote sensing images showing a cyanobacteria bloom

者数值比反映两反射率之间的差异。比值植被指数 (RVI) 可表达为

$$RVI = \rho_{NIR} / \rho_R \quad (3)$$

依据满足81%的训练分类样本正确率条件，基于RVI的阈值判别设定为：

条件1:  $RVI_{NOW} - RVI_{Before} > 0.35$

条件2:  $0.97 > RVI > 0.92$

条件3:  $RVI > 0.97$

满足此条件1判别为水华；在条件1的基础上满足条件2的为轻度水华，满足条件3的为重度水华，其他则为正常水体（表2）。

表2 RVI分类精度评价结果

Table 2 RVI classification accuracy evaluation result

地物类型	轻度水华	重度水华	水体	植被	使用精度/%
轻度水华	29	2	4	3	76.32
重度水华	3	27	1	1	84.38
水体	1	0	18	0	94.74
植被	3	1	0	7	63.64
生产精度/%	80.56	90.00	78.26	63.64	
总精度 81.00%， KAPPA系数=0.733					

分类图（图6a）显示蓝藻分布范围扩散，湖泊中的一些前后变化大的较浑浊水体近红外反射率差异大，易被混分。

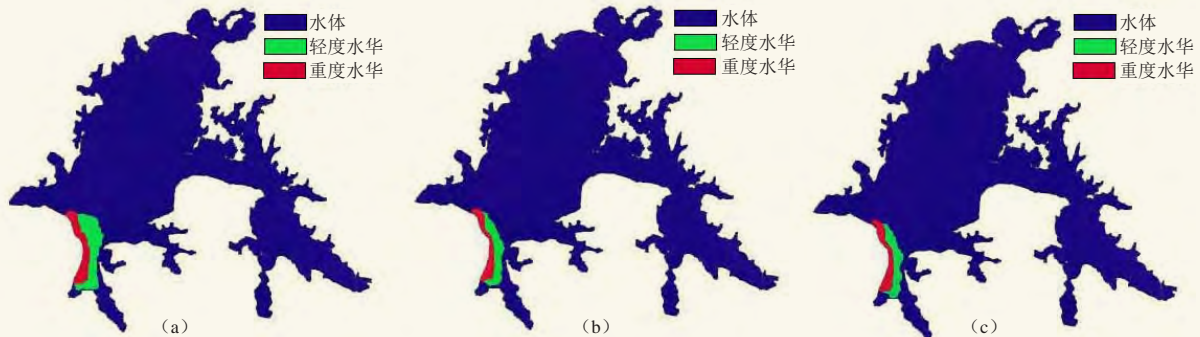


图6 基于三种指数的蓝藻水华分类结果：(a) RVI；(b) NDVI；(c) EVI

Fig. 6 The classified results based on RVI (a), NDVI (b) and EVI (c), respectively

#### 4.2 NDVI 阈值监测

对于蓝藻水华特别严重的水域，其红光反射特别微小，RVI值将会无限增加，会影响到对蓝藻水华污染强度分级阈值确定，因此选用差值植被指数NDVI可以消除此缺点，其算式如下

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R) \quad (4)$$

依据满足82%的训练分类样本正确率条件，NDVI指数的阈值判别设定为：

条件1:  $NDVI_{NOW} - NDVI_{Before} > 0.22$

条件2:  $0.39 > NDVI > 0.31$

条件3:  $NDVI > 0.39$

满足此条件1判别为水华；在条件1的基础上满足

条件2的为轻度水华，满足条件3的为重度水华，其他则为正常水体（表3）。

表3 NDVI分类精度评价结果

Table 3 NDVI classification accuracy evaluation result

地物类型	轻度水华	重度水华	水体	植被	使用精度/%
轻度水华	31	3	4	2	77.75
重度水华	2	24	0	0	92.30
水体	1	0	18	0	94.74
植被	2	3	1	9	60.00
生产精度/%	86.11	80.00	78.26	81.81	
总精度 82.00%， KAPPA系数=0.749					

依据NDVI分类的结果（图6b），显示出的蓝藻范围相对图6a有所减小，湖泊中蓝藻密度大的地方，

对应的指数并没有得到较好反映。

### 4.3 EVI 阈值监测

发生蓝藻水华水域一般都是受人类活动影响较严重的地区，周边水体中存在大量水下植被或者泥沙等浑浊悬浮物，其反射特征趋近于土壤，而EVI通过加入蓝色波段以增强植被信号，可校正土壤背景干扰信息。同时EVI能改进NDVI的某些缺陷，比如大气噪声、土壤背景以及饱和度问题。其算式如下

$$EVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_R - C_2 \rho_B + L} (1 + L), \quad (5)$$

式中， $C_1$ 、 $C_2$ 分别为大气修正红光修正和蓝光修正参数，经验参数为6和7.5， $L$ 为土壤调节参数，经验值为1<sup>[11]</sup>。

依据满足总体精度85%的训练分类样本正确率条件，NDVI指数的阈值判别设定为：

条件1： $EVI_{Now} - EVI_{Before} > 0.26$

条件2： $0.38 > EVI > 0.33$

条件3： $EVI > 0.38$

满足此条件1判别为水华；在条件1的基础上满足条件2的为轻度水华，满足条件3的为重度水华，其他则为正常水体（表4）。

表4 EVI分类精度评价结果

Table 4 EVI classification accuracy evaluation result

地物类型	轻度水华	重度水华	水体	植被	使用精度/%
轻度水华	32	3	3	2	80.00
重度水华	2	26	1	1	86.67
水体	1	0	19	0	95.00
植被	1	1	0	8	80.00
生产精度/%	88.89	87.90	82.60	72.72	
总精度 85.00%，KAPPA系数=0.7791					

分类结果（图6c）显示了蓝藻分布，其和图6b差异不大，但在湖泊沿岸蓝藻高密度地区和湖中蓝藻低浓度地区的差异较NDVI有一些拉升，更有层次感。

### 4.4 检验及分析

分类结果在使用前须进行客观可靠的精度验证和分析，以保证遥感分类结果可靠性，通过对保留50个样本点作为检验数据，对分类结果进行验证分析，得到了三种植被指数分类精度（表5）。

从表5中可以发现EVI监测方法的总体分类精度在检验样本中仍然处于优势，而RVI相对NDVI在KAPPA

表5 三种方法分类精度比较

Table 5 Comparison of classification accuracy of three methods

监测方法	样本数/个	总精度/%	KAPPA系数
RVI	50	84.00	0.757
NDVI	50	84.00	0.768
EVI	50	86.00	0.793

系数上精度较弱。

通过三种植被指数判别方法对HJ-1b遥感影像进行计算，利用样本点确定的判别阈值，对东湖湖面的蓝藻水华面积进行分类提取，结果见表6。

表6 蓝藻水华三种指数判别阈值及提取结果

Table 6 Cyanobacteria blooms identification thresholds and extraction results based on three index models

判别指数	判别阈值	轻度水华面积/km <sup>2</sup>	重度水华面积/km <sup>2</sup>
RVI	$RVI > 0.92, RVI_{Now} - RVI_{Before} > 0.35$	0.527	0.233
NDVI	$NDVI > 0.31, NDVI_{Now} - NDVI_{Before} > 0.22$	0.318	0.201
EVI	$EVI > 0.33, EVI_{Now} - EVI_{Before} > 0.26$	0.293	0.214

从表6可以看出，利用RVI提取的水华面积最大，EVI和NDVI较为接近，NDVI稍小，表明RVI用单纯的比值容易扩大水华范围，效果较后两者差；EVI提取的重度水华面积较NDVI提取得略大，表明EVI对湖泊沿岸一些重度蓝藻提取较为准确。

根据武汉湖泊监管部门的公开数据显示，与实际东湖蓝藻情况相比，遥感监测数据偏大，分析其主要原因可能是部分轻度蓝藻水华面积没统计在内。

## 5 结论与讨论

通过以上对武汉东湖蓝藻案例研究表明，HJ-1 CCD数据完全可以应用到城市内湖的蓝藻水华监测中，其相对EOS-MODIS等中尺度卫星遥感数据具有高空间分辨率优势，同时HJ-1a/b CCD两天的重返周期也使得数据开展动态湖泊生态环境监测的及时可靠性得到保障。

对于城市湖泊水质遥感研究，为剔除城市上空中大气气溶胶散射干扰，大气校正工作必不可少，通用大气参数设置，利用MORTAN4+辐射传输模型对HJ-1卫星快速大气基础校正，可以增强蓝藻水体和其他地物的光谱差异，有利于城市内湖蓝藻水华信息提取。

蓝藻的类植被光谱特征决定了遥感监测方法，通过RVI、NDVI和EVI三种指数方法对湖泊蓝藻监测发现，前期的样本选择和分类训练参数设定都会影响到植被指数的判别公式阈值率定，从而影响到分类精度和指数方法的判断。从实验分类结果看，RVI和其他两种指数检测结果较实际情况差异稍大，对浑浊水体和蓝藻容易混分，而EVI和NDVI的检测效果相近，EVI对于高浓度的蓝藻分类相对NDVI有一定优势。

运用多时相HJ-1遥感影像数据快速监测城市内湖局部的蓝藻技术方法可行，结果与实际情况相吻合，精度较高。但以下问题需进一步研究：1) 湖泊中存

(下转100页)

# 荆州市农田植被净初级生产力时空特征分析

黄端<sup>1, 2</sup> 池泓<sup>1, 3</sup> 朱浪<sup>3, 4</sup> 邓艳君<sup>3, 4</sup> 夏智宏<sup>3, 4</sup>

(1 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025; 4 荆州市气象局, 荆州 434020)

**摘要:** 基于MODIS数据和光能利用率模型估算的植被净初级生产力(NPP)数据, 辅以气候和土地利用数据, 利用趋势分析、GIS分析和统计分析方法, 探讨了2000—2015年荆州农田NPP的时空特征。结果表明: 1) 2000—2015年荆州农田年NPP均值略有下降趋势, 但整体上趋于平稳。年NPP总量呈增加趋势, 2000—2005年呈增加趋势, 2005—2009年呈波动性下降趋势, 2009—2016年呈增加趋势。2) 空间分布上, 2000—2015年荆州市农田NPP存在时空异质性, NPP年均最大值为江陵县, 最低的地区是沙市区和洪湖市。3) 荆州农田NPP有64.32%为无显著变化, 显著上升和显著下降区域分别为3.82%和31.86%。农田NPP呈显著上升的区域主要分布在江陵县、沙市区、监利县以及零星分布在洪湖市和松滋市, 农田NPP呈显著下降的区域主要分布在荆州市西南部的松滋市、公安县和石首市, 东北部的洪湖市, 以及西北部的荆州区。

**关键词:** 荆州, 农田, 植被净初级生产力, 时空特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.016

## Space-Time Characteristics of Net Primary Productivity of Farmland Vegetation in Jingzhou City

Huang Duan<sup>1, 2</sup>, Chi Hong<sup>1, 3</sup>, Zhu Lang<sup>3, 4</sup>, Deng Yanjun<sup>3, 4</sup>, Xia Zhihong<sup>3, 4</sup>

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077 2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 3 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 4 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020)

**Abstract:** Based on MODIS data and light energy utilization rate model to estimate NPP data, supplemented by climate and land use data, by using the trend analysis, GIS analysis and statistical analysis method, we here discusses the space-time characteristics of vegetation net primary productivity of farmland in Jingzhou City for 2000 - 2015. The results show that: (1) the annual average NPP of farmland in Jingzhou decreased slightly, but the overall trend was stable during the period from 2000 to 2015. The total amount of NPP increased in 2000-2005, the volatility decreased in 2005-2009 while increased in 2009-2016; (2) in terms of spatial distribution, there are spatial and temporal heterogeneity in farmland NPP of Jingzhou city for 2000 - 2015. The annual maximum NPP was in Jiangling County, while the lowest area was in Shashi District and Honghu City; (3) there was no significant change in the NPP being about 64.32% of the Jingzhou farmland, while the areas with significant rise and fall were of 3.82% and 31.86% of the farmland, respectively. The areas with significant increase of farmland NPP are mainly distributed in Jiangling County, Shashi district, Jianli County and scattered in Honghu City and Songzi City. The areas with significant decrease of farmland NPP are mainly distributed in in Songzi City, public security county and Shishou City, the southwest of the Jingzhou City, Honghu City; in the northeast, named as Honghu City and in the northwest, i.e. Jingzhou District.

**Keywords:** Jingzhou, farmland, vegetation net primary productivity, space-time characteristics

### 0 引言

净初级生产力(NPP)是指绿色植被在单位时间、单位面积内所累积的有机干物质总量,它能够以统一的标准尺度来衡量生态系统生产力,可以避免以作物产量来衡量农田生产力时由于农业结构调整、农

作物种植品种的改变等干扰,直接反映耕地的现实生产能力,是很好的农田生产力衡量指标<sup>[1]</sup>。遥感科学与地理信息系统以及基于遥感观测的植物生理生态理论研究的迅速发展,为区域甚至全国尺度的生态系统生产力的实时、连续、长时间序列的时空变化特征的探测提供了大尺度、高精度、高时间分辨率的数据与方法<sup>[1-2]</sup>。

MODIS遥感卫星数据自2000年投入使用以来,其高时间分辨率的优势,在农业监测方面得到广泛的应

收稿日期: 2018年6月21日; 修回日期: 2018年9月3日  
第一作者: 黄端(1990—), Email: huangduan@asch.whigg.ac.cn  
通信作者: 朱浪(1989—), Email: 1010405827@qq.com

用。已经对玉米、小麦和大豆等植物进行遥感监测以及在三江平原、华北平原以及黄淮海地区等不同的地区进行了农田生产力的估算。基于遥感估算的NPP已经成为农田生产力监测的一个重要指标。王宗明等<sup>[3]</sup>在三江平原研究了土地利用变化对农田NPP的影响研究；赵晶晶等<sup>[4]</sup>在华北平原基于NPP评估了冬小麦总初级生产力；Yan等<sup>[5]</sup>基于VPM模型在禹城通量站点模拟2003—2004年的冬小麦-夏玉米轮作农田的NPP，结果表明模拟结果和实测具有很好的一致性；Wang等<sup>[6]</sup>在通榆农田生态系统，利用VPM模型对玉米进行了模拟和评估，估算和实测值 $R^2$ 达到0.7984。Doughty等<sup>[7]</sup>在美国俄克拉荷马州基于VPM模型估算NPP，研究了在洪涝干旱条件下对农田NPP的影响。VPM模型是一种光能利用率模型，相比于其他NPP估算模型，其具有输入参数简洁、精度高、计算快等优势。自2004年VPM模型建模以来，已经在农田生态系统上开展了一系列的模型验证工作，具有很好的模拟能力。因此，基于VPM模型对荆州市进行NPP模拟，分析荆州市的NPP时空分布特征以及变化趋势特征，可以清晰地了解荆州市农田生产力的分布特征。

荆州地处长江中游，居长江经济带发展的重要区域位置，是湖北省重要的粮食生产基地，同时也是长江中下游地区重要的粮食主产区。因此，基于MODIS遥感数据和VPM光能利用率模型估算2000—2015年农田NPP，运用趋势分析、GIS分析和数理统计方法，对荆州农田NPP时间变化趋势、空间分布特征和空间趋势特征进行分析。有助于了解荆州农田生产力特征，对促进农业自然资源合理利用、区域农田科学管理、区域农业决策与规划具有重要意义。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

荆州市（图1）地处长江中游、湖北省南部地



图1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

区，位于沃野千里的江汉平原腹地<sup>[8]</sup>。荆州市主要包括洪湖市、监利县、石首市、江陵县、松滋市、公安县、沙市区、荆州区等8个行政区，2015年末常住人口570.59万人，国土面积约为14067 km<sup>2</sup>，国民生产总值为1590.5亿元<sup>[9]</sup>。荆州是中国重要的“鱼米之乡”，2015年末常用耕地面积4693.9 km<sup>2</sup>，其中水田为3489.2 km<sup>2</sup>，旱地为1204.7 km<sup>2</sup>；粮食作物主要以种植水稻、小麦和大豆为主，是湖北省重要的粮食生产基地。

## 1.2 数据

### 1.2.1 遥感数据

VPM模型估算NPP输入的遥感数据主要包括增强型植被指数（EVI）、地表水分指数（LSWI），可以利用MODIS数据（MOD09A1）500 m空间分辨率、8 d时间分辨率的地表反射率数据计算而来。MOD09A1是由MOD09GA逐日产品最大值合成，最大值合成可以有效降低云雨天气对遥感影像数据质量的影响。其中

$$EVI = G \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L}, \quad (1)$$

式中， $L=1$ ， $C_1=6$ ， $C_2=7.5$ ， $G=2.5$ ； $\rho_{nir}$ 、 $\rho_{red}$ 和 $\rho_{blue}$ 分别为遥感数据的近红外波段、红波段和蓝波段的地表反射率。

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}}, \quad (2)$$

式中， $\rho_{nir}$ 和 $\rho_{swir}$ 分别为遥感数据的近红外波段和短波红外波段的地表反射率。

### 1.2.2 气象数据

气象数据来源于荆州市气象局，包括每日平均气温、降水量、日照时数等要素数据。NPP估算中应用的温度数据采用ANUSPLIN4.3软件中的样条插值方法进行插值，获取每天的500 m分辨率的气温栅格数据，然后采用ArcGIS10.4软件计算为8 d平均栅格气温数据。

### 1.2.3 土地利用与土壤数据

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心的2000—2015年1:10万土地利用现状分类数据。荆州市农田主要是土地利用分类中的耕地，包括水田和旱地两类。

## 2 原理与方法

### 2.1 基于VPM模型的NPP模拟

NPP是通过VPM光能利用率模型计算得到<sup>[10-13]</sup>，模型已经在中国农田生态系统进行验证<sup>[14]</sup>。VPM模型是基于植被叶片和冠层可以分为叶绿素部分和非叶

绿素部分的概念, 植被冠层吸收光合有效辐射比例分为叶绿素吸收部分 ( $FPAR_{chl}$ ) 和非光合植被吸收部分 ( $FPAR_{npv}$ ), 只有叶绿素吸收部分用于光合作用。因此, VPM模型的表达如下形式

$$GPP = \varepsilon_g \cdot FPAR_{chl} \cdot PAR, \quad (3)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \cdot T_{scalar} \cdot W_{scalar} \cdot P_{scalar}, \quad (4)$$

$$NPP = s \cdot GPP, \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon_g$  为光能利用率 (g/MJ);  $PAR$  为光合有效辐射 ( $MJ/m^2$ );  $FPAR_{chl}$  为植被光合作用吸收的光合有效辐射比;  $\varepsilon_0$  值表示为最大光能利用率 (g/MJ);  $s$  为呼吸消耗与GPP的比例系数;  $T_{scalar}$ 、 $W_{scalar}$  和  $P_{scalar}$  分别为温度、水分和作物物候对最大光能利用率的调节系数。

在VPM模型中,  $PAR$  由MODIS数据产品计算得到。

$FPAR_{chl}$  被近似的用增强型植被指数EVI来表达

$$FPAR_{chl} = a \cdot EVI, \quad (6)$$

式中,  $a$  为经验系数, 一般取值为1<sup>[10-11]</sup>。

$T_{scalar}$  表达温度对作物光合作用的影响, 采用陆地生态系统模型的算法<sup>[15]</sup>

$$T_{scalar} = \frac{(T - T_{min})(T - T_{max})}{(T - T_{min}) \cdot (T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2}, \quad (7)$$

式中,  $T_{min}$ 、 $T_{max}$  和  $T_{opt}$  分别为农作物进行光合作用时的最低、最高和最适温度 ( $^{\circ}C$ )<sup>[16]</sup>。当空气温度小于光合作用最低温度时,  $T_{scalar}$  设置为0。

$W_{scalar}$  表达了水分因素对农作物光合作用的影响。模型中, 使用对水分敏感的陆地水分指数 (LSWI) 进行计算。水分因素的计算公式如下

$$W_{scalar} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}}, \quad (8)$$

式中,  $LSWI_{max}$  为每个栅格像元内农作物生长季的最大LSWI。

$P_{scalar}$  表示植被叶龄对作物冠层尺度上光合作用的影响。 $P_{scalar}$  的计算主要取决于叶的寿命, 对于经历出牙、舒展、枯萎和凋落的植被, 分两个阶段计算, 叶出现到也充分舒展阶段计算公式如下

$$P_{scalar} = \frac{1 + LSWI}{2}, \quad (9)$$

叶片完全舒展后的  $P_{scalar}$  设置为1。

VPM模型输入数据的步长周期为8 d, 首先计算8 d周期内的NPP, 然后年NPP为计算的全年8 d NPP数据的累加之和。其中, 输入参数中:  $PAR$  光合有效辐射为8 d的累加和, 温度为8 d的均值。

## 2.2 趋势分析

荆州农田NPP的变化趋势采用Sen趋势分析方

法<sup>[17]</sup>, 并用Mann-Kendall统计检验方法对NPP变化趋势进行显著性检验。Sen趋势分析方法的优势在于不要求数据具有一定的分布形态, 避免时间序列数据缺失的影响, 同时可以剔除异常值对时间序列分析的干扰。计算公式如下

$$Sen_{slope} = median\left(\frac{NPP_j - NPP_i}{j - i}\right), \forall j > i, \quad (10)$$

式中,  $Sen_{slope}$  为NPP变化趋势;  $i, j$  为时间序列数;  $NPP_i$  和  $NPP_j$  分别为第  $i, j$  时间的NPP的值。当  $Sen_{slope} > 0$  表明NPP呈上升趋势; 当  $Sen_{slope} < 0$  表明NPP呈下降趋势。

非参数统计检验Mann-Kendall方法对时间序列数据正态性不要求, 适合非线性趋势检验。计算公式如下

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{v}}, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{v}}, & s < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$s = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sign}(NPP_j - NPP_i), \quad (12)$$

$$\text{sign}(NPP_j - NPP_i) = \begin{cases} 1, & NPP_j - NPP_i > 0 \\ 0, & NPP_j - NPP_i = 0 \\ -1, & NPP_j - NPP_i < 0 \end{cases}, \quad (13)$$

$$v = n(n-1)(2n+5)/18, \quad (14)$$

式中,  $NPP_i$  和  $NPP_j$  分别为第  $i$  年和第  $j$  年的NPP的值;  $n$  为时间序列的长度;  $\text{sign}$  为符号函数;  $s$  为检验统计量;  $v$  为方差;  $Z$  为正态分布的统计量。在给置信度  $\alpha$  水平下, 当  $|Z| > u_{1-\alpha/2}$  时, 表示时间序列NPP值在  $\alpha$  水平下具有显著性。

## 3 时空格局

### 3.1 时间变化特征

荆州市NPP年均值, 2000—2004年呈增加趋势, 2004—2006年出现下降趋势, 2006—2009年中除2007年有所回升外持续下降, 2009—2015年呈增加趋势(图2)。农田NPP年均值变化范围是715.5~879.08 gC/( $m^2 \cdot a$ ), 平均值为786.2 gC/( $m^2 \cdot a$ ), 最大值是2004年, 最小值是2009年; 其中水田、旱地与农田的年际变化趋势一致, 且2000—2008年水田NPP年均值略高于旱地NPP年均值, 2009—2016年旱地NPP年均值略高于水田NPP年均值。

### 3.2 空间分布特征

2000—2015年荆州市各县(市、区)NPP年均值如图

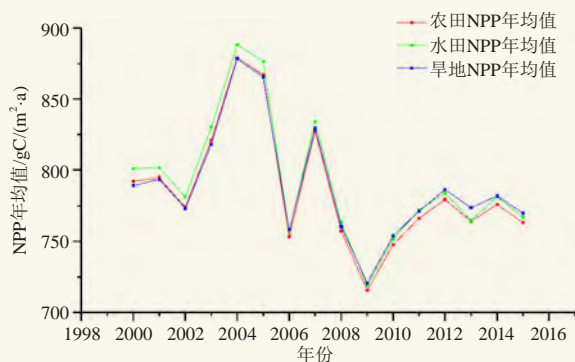


图2 2000—2015年荆州农田年NPP均值变化趋势  
Fig. 2 Variations of annual NPP in Jingzhou farmland during the period from 2000 to 2015

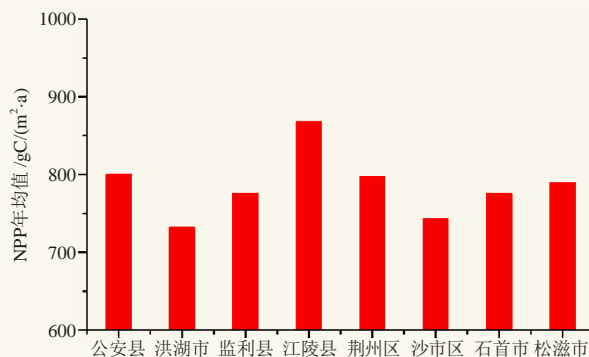


图3 2000—2015年荆州市各县市区NPP年均值  
Fig. 3 Averaged annual NPP for each county or district in the Jingzhou City during the period from 2000 to 2015

3所示,江陵县NPP年均值最大,为867.7 gC/(m<sup>2</sup>·a);其次为公安县799.8 gC/(m<sup>2</sup>·a);沙市区和洪湖市的NPP年均值最小,分别为742.8和731.7 gC/(m<sup>2</sup>·a)。

2000—2015年荆州市各县(市、区)每年的NPP值如图4所示。荆州市各县(市、区)同一年份不同地区和同一地区不同年份NPP值均存在不同的差异,说明荆州市农田NPP存在时空异质性。

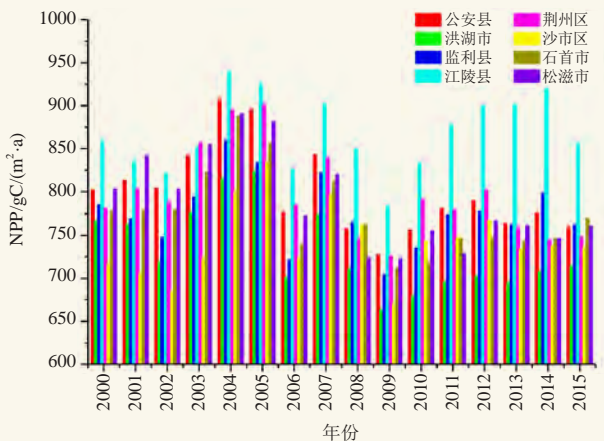


图4 2000—2015年荆州市各县(市、区)NPP分布  
Fig. 4 Variations of annual NPP for each county or district in the Jingzhou City during the period from 2000 to 2015

### 3.3 空间趋势特征

为监测荆州市农田NPP变化趋势,计算了2000—2015年农田NPP的Sen趋势度,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5)。结果表明,荆州市农田NPP有64.32%为无显著变化区域,显著上升和显著下降区域分别为3.82%和31.86%;2000—2015年农田NPP呈显著上升的区域主要分布在江陵县、沙市区、监利县以及零星分布在洪湖市和松滋市,农田NPP呈显著下降的区域主要分布在荆州市西南部的松

滋市、公安县和石首市,东北部的洪湖市,以及西北部的荆州区。

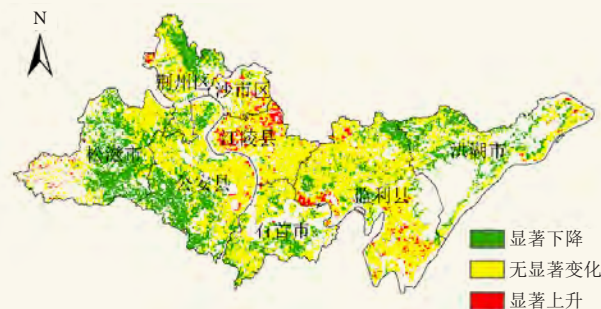


图5 2000—2015年荆州市农田NPP变化趋势与显著性  
Fig. 5 Map of change trend and significance of NPP in Jingzhou farmland during the period from 2000 to 2015

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

基于MODIS数据和光能利用率模型估算的NPP数据,辅以气象和土地利用数据,利用趋势分析和统计分析方法,对2000—2015年荆州市农田NPP的时间变化趋势、空间分布特征和空间趋势特征进行分析。有以下结论:

1) 时间趋势上,荆州市NPP年均值2000—2004年呈增加趋势,2004—2006年出现下降趋势,2006—2009年(除2007年有所回升外)持续下降,2009—2015年呈增加趋势。

2) 空间分布上,2000—2015年荆州市农田NPP存在空间和时空异质性。NPP年均最大值为江陵县,最小的地区是沙市区和洪湖市。

3) 空间趋势性上,荆州市农田NPP有64.32%为无显著变化,显著上升和显著下降区域分别为3.82%和31.86%;农田NPP呈显著上升的区域主要分布在江陵县、沙市区、监利县以及零星分布在洪湖市和松滋

市, 农田NPP呈显著下降的区域主要分布在荆州市西南部的松滋市、公安县和石首市, 东北部的洪湖市, 以及西北部的荆州区。

## 4.2 讨论

农田NPP时空分布与变化特征是由多因素共同作用而形成的, 包括气候因素、土壤、地形以及人类活动因素。气候因素上, 荆州市NPP主要受太阳辐射、气温和降水的影响。荆州地处南方, 日照充足, 农作物光合有效辐射较强, 对NPP的累积有很大的促进作用, 适宜的温度和降水对NPP也具有促进作用, 而气温的升高有时候会超过作物适宜的生长温度, 尤其南方夏季容易出现高温和多雨天气, 对植物生长和NPP的累加具有抑制作用。荆州市土壤质地主要以水稻土和潮土两种为主, 水稻土和潮土中的粉沙土和黏土含量较高, 保肥能力很好, 有机质含量高, 因此对于NPP的增加具有重要的作用。地形对农田NPP具有重要的影响。荆州市由于地形条件属于“涝渍相随, 旱涝并存”, 对农业生态环境造成影响, 比如洪湖市地势较低, 容易涝渍, 因此涝渍对于NPP有一定的影响。人类活动也是农田NPP变化的最重要的因素。

### 参考文献

- [1] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用. 地理学报, 2007, (2): 171-180.
- [2] 袁甲, 沈非, 王甜甜, 等. 安徽省农田净初级生产力时空变化特征及影响因素——基于MOD17A3的研究. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2016, (6): 568-574.
- [3] 王宗明, 国志兴, 宋开山, 等. 2000—2005年三江平原土地利用/覆被变化对植被净初级生产力的影响研究. 自然资源学报, 2009, 24(1): 136-146.
- [4] 赵晶晶, 刘良云, 徐自为, 等. 华北平原冬小麦总初级生产力的遥感监测. 农业工程学报, 2011, 27(s1): 346-351.
- [5] Yan H, Fu Y, Xiao X, et al. Modeling gross primary productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO<sub>2</sub>, eddy flux tower data. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 391-400.
- [6] Zheng W, Xiao X, Yan X. Modeling gross primary production of maize cropland and degraded grassland in northeastern China. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(9): 1160-1167.
- [7] Doughty R, Xiao X, Wu X, et al. Responses of gross primary production of grasslands and croplands under drought, pluvial, and irrigation conditions during 2010–2016, Oklahoma, USA. Agricultural Water Management, 2018, 204: 47-59.
- [8] 许倍慎. 江汉平原土地利用景观格局演变及生态安全评价. 武汉: 华中师范大学博士学位论文, 2012.
- [9] 湖北省统计局, 国家统计局湖北调查总队. 湖北统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [10] Xiao X, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. Remote sensing of environment, 2004, 89(4): 519-534.
- [11] Xiao X, Zhang Q, Braswell B, et al. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2): 256-270.
- [12] Xiao X, Zhang Q, Hollinger D, et al. Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data. Ecological Applications, 2005, 15(3): 954-969.
- [13] Xiao X, Zhang Q, Saleska S, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1): 105-122.
- [14] 牛忠恩, 闫慧敏, 黄玫, 等. 基于MODIS-OLI遥感数据融合技术的农田生产力估算. 自然资源学报, 2016, 31(5): 875-885.
- [15] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et al. Potential Net Primary Productivity in South America: Application of a Global Model. Ecological Applications, 1991, 1(4): 399-429.
- [16] 陈静清, 闫慧敏, 王绍强, 等. 中国陆地生态系统总初级生产力VPM遥感模型估算. 第四纪研究, 2014, 34(4): 732-742.
- [17] 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.

(上接95页)

在着多种藻类和其他污染, 具有不同的光谱特征, 需利用高光谱波段数据进一步区分; 2) 蓝藻的卫星遥感与地面光谱仪测量得到的光谱特征需要进一步拟合分析; 3) 水质数据应用和实地测量验证需要进一步完善。

### 参考文献

- [1] 杨柳燕, 肖琳. 湖泊蓝藻水华暴发、危害与控制. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] Hoge F E, Swift R N. Airborne simultaneous spectroscopic detection of laser-induced water Raman backscatter and fluorescence from chlorophyll a and other naturally occurring pigments. Applied Optics, 1981, 20: 3197-205.
- [3] Hoge F E, Swift R N. Photosynthetic accessory pigments: Evidence for the influence of phycoerythrin on the submarine light field. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(1): 19-35.
- [4] C.T Wezernak, Tanis F.J, C.A. Baiza Trophic state analysis of inland lakes. Remote Sensing of Environment, 1976(5): 147-165.
- [5] 疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系. 遥感学报, 2000, 4(1): 41-45.
- [6] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法. 湖泊科学, 2008, 20(2): 145-152.
- [7] 徐京萍, 张柏等. 基于MODIS数据的大湖蓝藻水体识别模式. 湖泊科学, 2008, 20(2): 191-195
- [8] Morel A, Prieur L. Analysis of variation in ocean color. Limnology Oceanography, 1997, 22: 709-722
- [9] 王嘉楠, 叶勤, 林怡. 不同大气校正方法对中小湖泊蓝藻遥感动态监测的影响. 遥感技术与应用, 2013, 28(1): 157-164.
- [10] 林怡, 潘琛, 陈映鹰, 等. 基于遥感影像光谱分析的蓝藻水华识别方法. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 1247-1252.
- [11] Liu H Q, Huete A R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. IEEE Tans Geosei Remote Sens, 1995, 33: 457-465.

# 利川市旅游气候适宜性的评价和比较

王凯<sup>1</sup> 高媛<sup>1</sup> 刘敏<sup>1</sup> 潘汉标<sup>2</sup> 夏智宏<sup>3,4</sup> 靳艳秋<sup>1</sup> 王芳芳<sup>1</sup>

(1 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2 利川市气象局, 恩施 445400; 3 荆州市气象局, 荆州 434020;

4 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025)

**摘要:** 基于中国15座主要旅游城市1960—2016年的气象资料, 采用以温湿指数、风寒指数和度假气候指数为基础的综合气候舒适度指标, 计算了气候舒适度指数, 界定了舒适期, 并对其分布规律进行了分析。结果表明: 1) 利川市舒适期为4—10月, 多年年均综合舒适日数为153 d, 占全年总天数的42%, 近60年, 舒适日数呈显著增多趋势, 不适日数呈减少趋势; 2) 综合舒适期以25°N为界, 以北随纬度降低而增加, 以南反之, 综合舒适日数随纬度降低呈现减少趋势; 3) 综合舒适期随海拔高度的增加, 有推迟的趋势, 综合舒适日数以2500 m为界, 之下随海拔高度的增加而增加, 之上明显减少; 4) 30°N附近综合舒适期基本在4—10月, 综合舒适日数基本保持在150 d左右。

**关键词:** 利川市, 生态旅游气候, 气候舒适度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.017

## Evaluation and Comparison on Climate Suitability for Tourism in Lichuan City

Wang Kai<sup>1</sup>, Gao Yuan<sup>1</sup>, Liu Min<sup>1</sup>, Pan Hanbiao<sup>2</sup>, Xia Zhihong<sup>3,4</sup>, Jin Yanqiu<sup>1</sup>, Wang Fangfang<sup>1</sup>

(1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074 2 Lichuan Meteorological Bureau, Enshi 445400

3 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020 4 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology

in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jianghan Plain, Jingzhou 434025)

**Abstract:** Based on the meteorological data of 15 major tourist cities in China for 1960—2016, the comprehensive climate comfort index was calculated based on the temperature humidity index (THI), wind-cold index (WCI) and holiday climate index (HCI). The comfort index was calculated, and the comfort period was defined, and its distribution law was analyzed, then, based on the remote sensing and environmental data in Lichuan for recent 5 years, the air quality rate and remote sensing ecological index (RSEI) were calculated, and the ecoenvironmental quality was analyzed. The results indicate that: 1) The comfort period in Lichuan city is between April and October. The number of comprehensive comfort days are 153 days, accounting for 42% of the total days per year. The comfort days has increased significantly during the last 60 years, and the discomfort days sre decreasing. 2) in recent 5 years, the air and water environment in Lichuan has been excellent, and the ecological environment quality has been maintained steadily and steadily. 3) Compared with the main tourist cities, the regional meteorological disasters and the ecoenvironmental quality analysis show that the climate suitability is superior for Lichuan ecotourism. 4) The latitude boundary of above mentioned comprehensive comfort period is 25°N, and decreases with latitude in north. The comfortable days decreases with latitude. 5) The comprehensive comfort period has a tendency to postpone with increase of altitude, the altitude boundary of the comfort days is 2500 meters, and increases with the increase of altitude below 2500 meters, and obviously reduced with altitude above 2500 meters. 6) The comprehensive comfort period around 30°N is basically 4—10 months, and the comfortable days are about 150 days.

**Keywords:** Lichuan City, ecotourism climate, climate comfort

### 0 引言

旅游资源主要分为自然风光和人文景观两类, 其中自然风光旅游资源与气候资源密切相关<sup>[1]</sup>, 二者的结合即为旅游气候资源。在自然环境中, 气象(气候)条件是休闲旅游康养活动的基本条件之一, 它影

响着上述活动的进行。城市开展旅游气候指标定量评估, 对政府部门进行旅游资源开发以及游客出行选择都有十分重要的指导意义。对于旅游气候适宜性定量评价, 代表性的有Terjung<sup>[2]</sup>提出的舒适指数(CI)和风效指数(WEI)、Oliver<sup>[3]</sup>提出的温湿指数(THI)和风寒指数(WCI)、Tang<sup>[4]</sup>提出的度假气候指数(HCI)等。国内学者在引用上述方法进行定量评价的基础上, 尝试建立适用于我国的旅游气候舒适度评价方法, 并对一些旅游地进行分析评价<sup>[5-10]</sup>。随着经

收稿日期: 2018年6月7日; 修回日期: 2018年7月17日

第一作者: 王凯(1980—), Email: 68461180@qq.com

资助信息: 2018年中国气象局气候变化专项(CCSF201821)

济的发展及对生活环境质量要求的提高、气候适宜性评价研究的深入,结合多种舒适度指数特点、运用模型开展旅游气候舒适度综合评价的方式逐步形成<sup>[7-9]</sup>。近些年,湖北省旅游业积极布局“大旅游”发展战略,大力推进鄂西生态文化旅游圈建设。利川市作为其核心板块,在旅游气候资源、生态环境等方面区位优势突出。一些学者以区域为研究对象,对湖北省重点旅游地区进行了旅游气候舒适度评价及气候资源区划等相关研究工作<sup>[11-14]</sup>,但针对城市的研究较少且综合分析不够。

本文综合了温湿指数、风寒指数、度假气候指数三个指数,对主要旅游城市多年平均的旅游气候舒适度进行了分析评价,评价了利川城市环境质量和生态环境。

## 1 数据来源及方法

### 1.1 数据来源

气象数据源自湖北省信息保障中心制作的1960—2016年整编资料,观测序列长度57年,气象站点包括利川、重庆、丽江等15站。气象要素为逐日逐时气温、雨量、风速、相对湿度、气压等平均值,天气现象为逐日雷暴、大风及冰雹统计值。观测数据均经过质量控制。

各要素、舒适度指数及综合舒适/不适日数的统计平均指多年平均,即1960—2016年间年、季、月的算术平均值;常年平均为1981—2010年间年、季、月的算术平均值。

### 1.2 计算方法

本文选取温湿指数(THI)<sup>[5]</sup>、风寒指数(WCI)<sup>[5,15]</sup>和度假气候指数(HCI)<sup>[4]</sup>等3个指数,对利川市常年平均的旅游气候舒适度进行综合评价并

与全国一些热门旅游城市进行比较。以上指标在表征区域的旅游舒适度时,主要根据主客观感觉结合环境气象因素制定,但有所差异。THI主要反映人体与周围环境的热量交换;WCI反映人体对低温和风的一种感觉程度;HCI是目前较全面、客观的旅游适宜评价方法

#### 1) 温湿指数(THI)

$$I_{TH} = (1.8T + 32) - 0.55(1 - R_H) \times (1.8T - 26), \quad (1)$$

式中,  $T$ 为气温(°C),  $R_H$ 为相对湿度(小数表示)。

#### 2) 风寒指数(WCI)

$$I_{WC} = (33 - T) \times (10\sqrt{V} + 10.45 - V), \quad (2)$$

式中,  $T$ 为气温(°C),  $V$ 为风速(m/s)。

#### 3) 度假气候指数(HCI)

$$I_{HC} = 4T_C + 2A + (3R + V), \quad (3)$$

$$T_E = T_{MAX} - 0.55(1 - R_H) \times (T_{MAX} - 14.4), \quad (4)$$

式中,  $T_E$ 为人体有效温度(°C);  $T_{MAX}$ 为日最高气温(°C);  $R_H$ 为相对湿度(小数表示);  $T_C$ 为热舒适因子,通过日最高气温和日平均相对湿度根据式(4)获得的有效温度( $T_E$ )来表征;  $A$ 为审美因子,以云量的多寡来表征;  $R$ 为物理因子,以降水量的多少来表征;  $V$ 为物理因子,以风速的大小来表征。

度假气候指数(HCI)评分标准详见文献[9]。

考虑到温湿指数、风寒指数和度假气候指数不同的影响,同时需统一舒适期的划分标准,我们对各指数按照分级标准自高至低赋予相应的值并求和,和值表征综合舒适度。根据表1和表2,分为三档,规定不舒适为各指标等级在不适期内,取三者最大值;舒适为任一指标须达到最佳舒适期,取三者最小值;介于不舒适与舒适之间的为一般。划分标准为 $S \geq 3$ 时为舒适,  $-1 \leq S < 3$ 时为一般,  $S < -1$ 时为不舒适,据此统计综合舒适日数和不适日数。

表1 气候舒适度指数分级标准  
Table 1 Classification standard of climate comfort index<sup>[4-5,15]</sup>

等级	温湿指数(THI)		风寒指数(WCI)		度假气候指数(HCI)	
	指数数值范围	人体感觉程度	指数数值范围	人体感觉程度	指数数值范围	人体感觉程度
1	0<40	极冷,极不舒服	<400	舒适	90~100	理想状况
2	40~45	寒冷,不舒服	400~650	凉	80~89	特别适宜
3	45~55	偏冷,较不舒服	650~800	很凉	70~79	很适宜
4	55~60	清凉,舒适	800~1000	冷	60~69	适宜
5	60~65	凉,非常舒适	1000~1200	很冷	50~59	可以接受
6	65~70	暖,舒适	1200~1400	极度寒冷	40~49	一般
7	70~75	偏热,较舒适	1400~2000	有冻伤危险	30~39	不适宜
8	75~80	闷热,不舒适			20~29	很不适宜
9	0>80	极其闷热,极不舒服			10~19	特别不适宜
舒适期	4~6级(5级最佳)		1级		1~3级(1~2级最佳)	
不适期	1~2级、8~9级		3~7级		7~9级	

表2 气候舒适度综合分级标准

Table 2 Comprehensive classification standard of climate comfort

THI		WCI		HCI		旅游舒适性评价	
等级	赋值	等级	赋值	等级	赋值	指数总和 (S)	舒适程度
1	-1	1	-3	1	-4	S ≥ 3	舒适
2	-0	2	-2	2	-3		
3	-1	3	-1	3	-2		
4	-2	4	-0	4	-1	-1 ≤ S < 3	一般
5	-3	5	-1	5	-0		
6	-2	6	-2	6	-1		
7	-1	7	-3	7	-2	S < -1	不舒适
8	-0			8	-3		
9	-1			9	-4		

## 2 利川市旅游气候适宜性分析

### 2.1 主要对比旅游城市筛选

本文依据中国城市的旅游职能相关研究结果<sup>[16]</sup>, 在近40个专业化或综合型旅游城市中从城市地理位置、规模、旅游资源、旅游吸引力等方面进行影响力评价, 采用权重法按评分标准求得综合得分, 最终选取排名靠前的城市作为参比对象。

城市地理位置选用纬度、海拔为指标, 城市规模选用人口密度为指标, 旅游资源选用资源大类总数(出自《旅游资源分类、调查与评价》(GBT/18972-2003))为指标, 旅游吸引力选用搜索引擎搜索结果作为指标。国内主要旅游城市旅游影响力综合评价结

果显示(表3), 考虑排名靠前且利川市周边影响力较强的旅游城市, 最终选取重庆、丽江、桂林、三亚、杭州、张家界、西安、九寨沟、成都、上海、拉萨、洛阳、黄山、六盘水等14座城市作为本文的参比对象。

### 2.2 旅游气候舒适度

#### 2.2.1 舒适期变化特征

表4列出了各旅游城市综合舒适日数。各旅游城市多年月均综合舒适日数大多在1~29 d, 舒适期基本在4—10月, 期间各月月均综合舒适日数占当月总日数达50%以上。各旅游城市多年年均综合舒适日数为100~226 d, 其中200 d以上1座、150 d以上6座。利川综合舒适期在4—10月, 其中5—9月月均综合舒适日数在20 d以上, 占当月总天数的64.2%~86.3%, 平均为76%。利川多年年均综合舒适日数为153 d, 占全年总天数的42.0%, 在丽江市、六盘水市、九寨沟市之后, 位列第四。利川连续5个月月均综合舒适日数超过20 d, 仅次于丽江市, 与九寨沟市、六盘水市相当。

各旅游城市多年月均综合不适日数小于17 d, 大多小于5 d, 不适期基本在11月—次年3月。各旅游城市多年年均综合不适日数为0~55 d, 其中10 d以上7座、20 d以上4座。利川综合不适期在冬季, 即12月—次年2月, 月均综合不适日数为8~15 d, 占当月

表3 主要旅游城市旅游影响力综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of tourism impact for major tourism cities in China

城市	纬度	海拔	人口密度	资源大类总数	百度词条总数	总体评分	综合排位	城市	纬度	海拔	人口密度	资源大类总数	百度词条总数	总体评分	综合排位
重庆	2.0	1.0	0.8	3.0	1.8	8.6	1	乐山	2.0	1.0	0.8	1.8	1.2	6.8	19
丽江	2.0	0.6	1.0	2.4	2.4	8.4	2	南京	2.0	1.0	0.2	1.8	1.8	6.8	19
桂林	2.0	1.0	1.0	2.4	1.8	8.2	3	安顺	2.0	0.8	0.8	2.4	0.6	6.6	23
三亚	1.2	1.0	0.8	2.4	2.4	7.8	4	贵阳	2.0	0.8	0.6	1.8	1.2	6.4	24
杭州	2.0	1.0	0.6	2.4	1.8	7.8	4	六盘水	2.0	0.6	0.8	2.4	0.6	6.4	24
张家界	2.0	1.0	1.0	1.8	1.8	7.6	6	宁波	2.0	1.0	0.4	1.8	1.2	6.4	24
西安	2.0	1.0	0.4	2.4	1.8	7.6	6	广州	1.6	1.0	0.2	1.8	1.8	6.4	24
九寨沟	2.0	0.8	1.0	2.4	1.2	7.4	8	苏州	2.0	1.0	0.2	1.8	1.2	6.2	28
成都	2.0	1.0	0.2	2.4	1.8	7.4	8	无锡	2.0	1.0	0.2	1.8	1.2	6.2	28
上海	2.0	1.0	0.2	1.8	2.4	7.4	8	武汉	2.0	1.0	0.2	1.8	1.2	6.2	28
拉萨	2.0	0.2	1.0	2.4	1.8	7.4	8	郑州	2.0	1.0	0.2	1.8	1.2	6.2	28
洛阳	2.0	1.0	0.8	2.4	1.2	7.4	8	青岛	1.2	1.0	0.4	1.8	1.8	6.2	28
黄山	2.0	0.6	1.0	1.8	1.8	7.2	13	舟山	2.0	1.0	0.4	1.8	0.6	5.8	33
北京	1.2	1.0	0.2	1.8	3.0	7.2	13	忻州	1.2	1.0	1.0	1.8	0.6	5.6	34
长沙	2.0	1.0	0.6	2.4	1.2	7.2	13	天津	1.2	1.0	0.2	1.8	1.2	5.4	35
池州	2.0	1.0	1.0	2.4	0.6	7.0	16	沈阳	0.8	1.0	0.6	1.8	1.2	5.4	35
南平	2.0	1.0	1.0	2.4	0.6	7.0	16	哈尔滨	0.4	1.0	1.0	1.8	1.2	5.4	35
丽水	2.0	1.0	1.0	2.4	0.6	7.0	16	本溪	0.8	1.0	1.0	1.8	0.6	5.2	38
利川	2.0	0.8	1.0	2.4	0.6	6.8	19	丹东	0.8	1.0	1.0	1.8	0.6	5.2	38
泸州	2.0	1.0	0.8	2.4	0.6	6.8	19	抚顺	0.8	1.0	1.0	1.8	0.6	5.2	38

表4 各旅游城市综合舒适日数 (单位: d)  
Table 4 Comprehensive comfort days for each tourist city (unit: d)

城市	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年合计
利川	0	1	4	13	24	26	20	22	25	14	4	0	153
重庆	1	1	6	15	20	16	10	12	19	17	6	1	124
丽江	5	9	15	21	25	26	28	27	23	22	16	9	226
桂林	5	6	11	19	17	6	4	7	17	26	20	10	148
三亚	28	23	18	7	2	1	1	1	2	9	18	27	137
杭州	2	3	8	19	24	14	4	6	19	27	15	4	145
九寨沟	0	2	7	17	25	26	23	24	25	14	8	1	172
拉萨	1	2	5	8	18	25	25	22	19	17	6	1	149
张家界	2	3	9	19	22	14	5	8	20	25	13	5	145
西安	0	2	9	19	26	21	14	17	25	19	6	1	159
黄山	0	0	0	2	9	16	26	26	15	5	1	0	100
上海	1	2	6	17	25	17	5	6	19	27	16	3	144
洛阳	0	2	6	17	23	18	9	14	22	18	7	1	137
成都	0	2	8	20	26	18	10	12	23	24	8	1	152
六盘水	3	6	11	16	21	25	29	29	21	12	7	3	183

总天数的25.2%~48.4%，平均为37.3%。利川多年年均综合不适日数为38 d，占全年总天数的10.4%，因海拔高、冬季长，利川与黄山、六盘水综合不适日数较多。

图1为1960—2016年利川综合舒适日数及不适日数逐年变化。可以看出，近60年利川综合舒适日数呈显著增多趋势 ( $P < 0.01$ )，增加速率为4.9 d/10a，最多年188 d (2015年)，最少年117 d (1981年)；利川综合不适日数呈减少趋势，减少速率为2.3 d/10a，最少年16 d (1999年)，最多年66 d (2012年)。

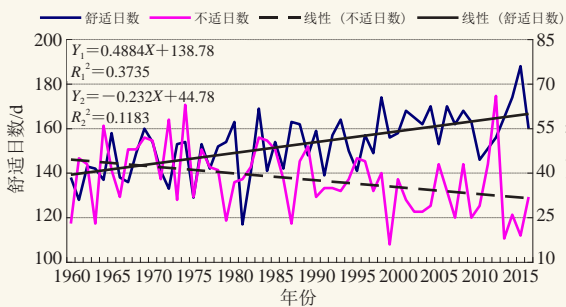


图1 1960—2016年利川综合舒适日数及不适日数逐年变化  
Fig. 1 Interannual variations and trends of comprehensive comfort and discomfort days in Lichuan City during the period from 1960 to 2016

### 2.2.2 舒适期分布规律

各城市旅游气候舒适性分布从地理纬度看，舒适期以25°N为界，以北随纬度降低而增加，以南反之。30°N附近舒适期基本在4—10月。从海拔高度看，低海拔地区 (1000 m以下) 舒适期以春、

秋季和初夏为主，部分地区延伸至冬季；中高海拔地区 (1000~2000 m) 从春季到初秋；高海拔地区 (2000 m以上) 舒适期有延长且推迟的趋势。上述规律与一些学者研究结论<sup>[5-6]</sup>较为一致。

多年年均综合舒适日数随纬度增加呈现减少趋势，特别是在30°N附近，基本保持在150 d左右；以海拔高度2500 m为界，2500 m以下舒适期整体随海拔高度的增加而增加，其中1000~2500 m增加趋势尤为显著 ( $P < 0.01$ )；2500 m以上明显减少。

## 3 结论

1) 利川市舒适期为4—10月，长达7个月，其中5—9月月均综合舒适日数为20~26 d，多年年均综合舒适日数为153 d，占全年总天数的42%，位列各旅游城市第四，连续5个月月均综合舒适日数超过20 d，与九寨沟市、六盘水市位列各旅游城市第二。

2) 从分布规律上看，综合舒适期在纬度上以25°N为界，以北随纬度降低而增加，以南反之；海拔上随高度的增加，有推迟的趋势，海拔1000 m以上更为集中。综合舒适日数随纬度增加呈现减少趋势；海拔上以2500 m为界，之下随海拔高度的增加而增加，之上明显减少。

### 参考文献

- [1] 吴兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报. 北京: 气象出版社, 2001.
- [2] Terjung W H. Physiologic climates of the conterminous: a bioclimatic classification based on man. Annals of The Association of American Geographers, 1966, 5(1): 141-179.
- [3] Oliver J E. Climate and man's environment: An Introduction to applied climatology. John Wiley & Sons Inc, 1978.
- [4] Tang M T. Comparing the "Tourism Climate Index" and "Holiday Climate Index" in major European urban destinations. University of Waterloo, 2013.
- [5] 范业正, 郭来喜. 中国海滨旅游地气候适宜性评价. 自然资源学报, 1998, 13(4): 304-311.
- [6] 刘清春, 王铮, 许世远. 中国城市旅游气候舒适性分析. 资源科学, 2007, 29(1): 133-141.
- [7] 马丽君, 孙根年. 中国热点城市旅游气候舒适度评价. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 102-108.
- [8] 马丽君, 孙根年, 李馥丽, 等. 陕西省旅游气候舒适度评价. 资源科学, 2007, 29(6): 40-44.
- [9] 胡桂萍, 李正泉, 邓霞君. 丽水市旅游气候舒适度分析. 气象科技, 2015, 43(04): 669-774.
- [10] 张莹, 马敏劲, 王式功, 等. 中国大陆九大名山风景区旅游气候舒适度评价. 气象, 2013, 39(9): 1221-1226.
- [11] 马乃孚, 杜荣, 宋正满. 神农架避暑疗养旅游综合气候资源区划初探. 湖北气象, 1997(1): 40-42.
- [12] 李明, 龚念, 王映. 湖北省旅游气候适宜度时空分布初探. 武汉交通管理干部学院学报, 1999, 1(1): 74-79.
- [13] 罗菊英, 闫永才, 李灿, 等. 恩施自治州气候资源分析及旅游适宜性区划. 长江流域资源与环境, 2014, 22(Z1): 39-44.
- [14] 刘惠. 恩施州气候变化特征及其对旅游的影响. 武汉: 中南民族大学硕士学位论文, 2011.
- [15] 熊亚丽, 周亚军, 刘燕, 等. 广州市环境气象预报系统. 广东气象, 2004(3): 23-24.
- [16] 成英文, 张辉. 基于城市职能理论的中国旅游城市判定及分类研究. 现代城市研究, 2014(2): 104-109.

# 生态画廊建设中流域水资源生态补偿机制的建立

■ 冯奇 夏智宏 肖飞\* 童雯婷

全流域的水资源保护和流域内各行政区经济发展的矛盾成为阻碍生态画廊建设的一个瓶颈问题。通过对目前我国水资源生态补偿的现状、补偿标准和途径进行分析,尝试对水资源生态补偿机制建立过程中几个主要问题提出若干建议,为生态画廊建设提供参考。

生态画廊一般涉及某个特定的河湖流域,针对该流域采取相关生态和环境管理措施,保护和恢复流域生态环境,以达到环境恢复、生态景观优良的目的。已有的案例如“汉江、漓江、清江生态画廊”等。

在具体的实施中,生态画廊建设是需要立体多维的生态空间,通过大气、流域、土壤、山体、森林等立体生态文明的建立,扩大环境容量生态空间。其中,流域水资源是生态画廊建设不可缺失的重要一环。发达国家早已开展了广泛深入的流域水资源生态补偿理论和实践研究,我国近些年也开始对流域水资源生态补偿进行理论研究和实践,但实践过程中存在着结构性政策缺位,特别是缺乏生态补偿方面的具体政策与实施指南。

## 1 流域水资源生态补偿的现状分析

### 1.1 水资源生态补偿的提出

生态补偿(Ecological Compensation)指为生物多样性补偿(Biodiversity Offset)而进行的生态服务付费,其中包括这些补偿的目的是为了提高受损地区的环境质量或者用于创建新的具有相似生态功能和环境质量的区域。水资源生态补偿是以保护水资源服务功能为目的,根据水资源生态系统服务价值、生态保护成本、发展机会成本,综合运用行政和市场手段,调整水资源生态环境保护者、受损者、受益者相关各方之间利益关系的环境经济制度。

因为水资源的生态保护往往要牺牲部分地区和人的当前利益以获取社会大范围的长远利益,若不进行补偿就无法调动水资源保护地区的积极性。目前世界各国比较通用的做法是根据在生态保护/利用(破坏)中的责任和地位,确定“谁保护,谁受益”原则(Provider Gets Principle, PGP)和“谁受益,谁补

偿”原则(Beneficiary Pays Principle, BPP),即使用者、破坏者、受益者付费,保护者得到补偿的原则。我国在新安江流域生态补偿试点区、丹江口水库水源地生态保护区、长江武汉段跨界断面区等都是按照类似原则进行生态补偿。

### 1.2 国内外流域水资源补偿典型模式

目前,在国外一些国家已初步建立了流域水资源生态服务付费的政策与制度框架,特别是充分利用了市场机制和多渠道的融资体系,形成了多种类型的生态补偿框架体系。国内一些区域也出现了类似模式的机制。

PES模式。即环境服务支付(Payments for Environmental Services, PES),主要通过生态补偿改善流域内水质和水文条件,因此补偿费主要向用水者征收。以纽约为例,该市90%饮用水是由上游特拉华河和卡茨基尔河流域提供的,20世纪80年代,发生了流域水质下降事件,如果使用设备解决这一事件,需要巨额设备资金及运营费。纽约市后来采取了10年内在上游流域投入资金改进林业和农业,从而提高水质重新达到饮用标准的方式,费用主要来源于对用水户征收的附加税和公债等,这是较早期具有典型性的PES案例。德国通过支付现金补偿为捷克建设易北河交界处的污水处理厂,从而保证了德国主水流域水质的保护。

政府补偿模式。实质是直接公共补偿,它是目前开展水资源生态补偿的主要模式,主要以国家或政府为实施和补偿的主体,通过财政转移支付、区域政策、项目支持、专项基金等“横向转移”方式,对自然原因或人为原因造成的生态损失进行的补偿方法,具有系统性和易操作性。德国是开展生态补偿比较早的国家,由政府作为唯一补偿方进行生态补偿。

我国目前采用以政府为主的横向补偿模式较多,

\* 通信作者:肖飞(1978—), Email: xiaof@whigg.ac.cn

例如福建省为闽江流域生态补偿设立专项资金，专项资金主要用于三明、南平市辖区内列入《闽江流域水环境保护规划》和年度整治计划内的项目。

市场化运作模式。即由非营利组织和营利组织通过市场交易或支付，取代政府兑现资源环境服务功能价值而开展的一种补偿模式。它是通过对生态补偿的产品进行创新，对产权关系相对明确的生态补偿类型进行补偿。主要包括公共支付、一对一交易、市场贸易、生态（环境）标记等。补偿者都是在没有任何管理动机情况下进行交易的。法国毕雷矿泉水公司为保持水质付费、澳大利亚灌溉者为流域上游造林付费等属于最典型的实践案例。我国目前也有少量的市场贸易支付行为，例如甘肃黑河流域的“水权证”等。

### 1.3 流域水资源生态补偿核算方法

国内外专家学者提出了多种水资源生态补偿的计算方法，其适用性各有不同，使用比较多的是以下几种方法：

1) 生态保护总成本法。通过可量化的指标相对客观地对区域水资源进行生态建设和保护的总成本进行测算，包括直接成本和间接成本。直接成本是指为开展生态保护和建设而直接投入的人力、物力、财力。间接成本又称机会成本，是指为保护生态环境所放弃的经济收入和丧失的发展权，由此确定区域水资源补偿的标准。这种方法充分考虑到区域水资源上游为了生态建设付出的成本，具有较强的可行性与可操作性，受到广泛的运用。但是，在计算直接成本时可能存在重复计算的情况，而间接成本因其不确定因素较多，补偿方和受益方的价值概念不尽相同，所以核算时存在较大风险。

2) 水环境质量评价法。通过对区域水资源上下游断面水质水量的检测来核算补偿标准，一种是以区域水资源上下游断面水质为标准，一种是以区域水资源上下游断面水污染物通量为标准，这两种方法都是基于遵循“谁污染，谁治理”的原则。前者是以上下游之间断面的水质为标准，若上游地区供水水质达标，则上下游之间不进行补偿；若水质高于标准水质，则下游对上游进行补偿；若水质低于标准水质，则上游对下游进行补偿。后者是根据水资源断面各种污染物浓度检测值，确定单个因子或者多个因子浓度超标的补偿金额，这种方法的补偿依据比较明晰，被我国多个省份实践，例如江苏省太湖流域的环境资源区域补偿、河南省水环境生态补偿、武汉市长江断面流域水资源补偿。但是，这种补偿机制也存在相应的问题，如果区域水资源处于上游的城市相对下游城市

经济发展落后，导致缺乏相应的赔偿能力，如果要发展经济，必然对水资源质量会有所影响，所以最后会导致补偿机制无法进行。

3) 水资源价值法。基于水资源的市场价格，根据水质的好坏来判定是受水区向水源区补偿，还是水源区向受水区补偿。这是最简单的水资源价值计算方法，仅仅通过水质和水量来判断，因其利于操作也被部分地区采用。但是这种方法仅仅考虑水资源的使用价值，并未同时考虑水资源的非使用价值，如濒危物种的存在等，而这种价值与人们是否利用该物种谋取经济利益无关。

### 1.4 区域内水资源生态补偿

以湖北省武汉市为例，2017年12月1日，武汉市市委常委审议并原则通过《长江武汉段跨界断面水质考核奖惩和生态补偿办法》，明确在长江武汉段左右岸共设置13个监测断面进行水质考核。跨界断面水质主要是以水质指标作为跨界断面水质生态补偿奖惩依据，即通过比较跨界断面水质考核与上游入境对照断面水质的综合污染指数，确定跨界断面水质改善或下降比例，实行水质“改善奖励”“下降扣缴”的生态补偿奖惩措施。目前武汉段的跨界断面流域水资源补偿仅在武汉市内开展，由政府进行统一考核、补偿，但没有建立跨地区补偿和协调机制。

## 2 我国区域水资源生态补偿存在的问题

### 2.1 区域水资源生态补偿立法现状

宪法中规定了水流的归属问题，为生态补偿提供了依据。《民法通则》以民事责任的形式对污染流域环境的行为做出规范。《水污染防治法》第7条规定“国家通过财政转移支付等方式建立健全饮用水水源保护区和水库、湖泊、江河上游地区的水生态环境补偿机制”。2013年11月，中共十八届三中全会进一步确定要实行生态补偿制度，推动地区间建立横向生态补偿制度，建立吸引社会资本投入生态环境保护的市场化机制。2016年国务院办公厅出台了《关于健全生态保护补偿机制的意见》，不断完善转移支付制度，探索建立多元化生态保护补偿机制，逐步扩大补偿范围，合理提高补偿标准。财政部、环境保护部、发展改革委、水利部2016年联合出台了《关于加快建立流域上下游横向生态保护补偿机制的指导意见》，由中央财政对跨省流域建立横向生态保护补偿给予引导支持。

### 2.2 生态补偿中的问题

首先是补偿标准不统一。水资源生态补偿的一个

核心问题是对水资源价值的补偿标准额度问题。因为水资源生态系统价值分为使用价值和非使用价值，其中非使用价值又分为遗赠价值和存在价值，它与人们是否使用这种价值谋取经济利益无关，水资源生态系统自身循环机制的复杂性决定了不同水资源系统的物质结构破缺和现状弱化程度是不等同，因此，其生态价值至今仍缺乏有效的计算方法。如何有效地评估水资源系统的生态价值从而科学准确地界定生态补偿额度成为制约生态补偿机制全面实施的一个重要因素。

其次是补偿方式单一。目前的补偿方式是政府买单和市场补偿的模式，但是这两种模式大多数都是通过中央财政转移支付、专项基金和向受益者征收补偿为主，多为“输血式”补偿。而受偿地区多为贫困或者需要发展经济地区，如果不能解决贫困和经济发展问题，补偿停止后将重新面临生态退化的危险。

### 3 建立水资源生态补偿机制的几点建议

#### 3.1 加快水资源生态补偿的法制建设

区域水资源补偿实际上是一种区域间的利益协调行为，目前使用较多的是通过经济、观念等方式来协调水资源的利益问题，但是这种协调方式具有随意性，缺乏定量。因此，进行区域水资源生态补偿法制建设，建立完善区域水资源生态补偿的法律制度和机制，能够最大限度地协调利益冲突，保护和建设水资源的生态功能。通过国家和地方立法，建立统一、协调、完善的区域水资源生态补偿制度，为跨区域水资源生态补偿实践提供法律依据。

#### 3.2 建立多元化的补偿方式

生态补偿不仅仅是对欠发达地区进行直接的经济补偿，也就是我们平时所提到的“输血式”补偿，还需要通过“造血式”补偿帮助被补偿地区改变粗放落后的生产方式，调整产业结构，提高被补偿区域的经济水平和生活水平。在整个水资源生态保护进程中我们可以把以下三种补偿方式结合起来，架构一个多元化多渠道的立体补偿模式。

1) 基本资金补偿。在初期阶段，对受偿者参与水资源生态保护期间直接的损失和花费进行补偿，保证受偿者在保护水资源的同时经济收入不至于发生显著下降。

2) 技术补偿。在资金补偿后通过对被补偿方开展技术服务、技术培训，提供技术咨询和指导，加大产业结构调整的方式，帮助被补偿者适应生态环境对产业结构的要求。

3) 生态效益补偿。通过基本补偿和技术补偿

后，受补偿地区完成了产业调整，社会经济系统逐渐进入良性循环，但是为了保证生态服务的持续供给，还需继续支付生态系统的维护和管理费用，保证生态服务系统能够良性地运转下去，生态保护成果得以维持。

此外，还需要开展政府补偿与市场补偿方式，与三阶段补偿相结合起来，加以综合运用，把单纯性的资金补偿转化为地方水资源生态保护或提升提放发展能力的项目，优化补偿效果。

#### 3.3 运用科学的生态补偿评估方法确定补偿标准

1) 多种评估方法相结合。每种生态补偿核算方法都存在一定的局限性和区域适应性，在流域上下游经济发展水平差距不大，水事纠纷比较突出的区域，适宜采用基于水质水量保护目标的核算方法，在流域上下游经济发展水平差距较大的区域，应优先选择基于生态保护成本的核算方法。

2) 引入水足迹等定量评价方法。水足迹 (Water Footprints) 是国家和地区的居民生产和服务的的水资源需求总量。水足迹是从消费角度衡量一个国家或地区对水资源的真实需求和占用情况，计算出一个区域或一个国家的水资源满足该地区人类活动、经济及生态环境的可持续发展状态可用水资源生态盈余衡量。它考虑了水资源的物质属性和社会属性，构建了水资源利用与人类生活消费结构的关系，为水资源可持续利用研究提供了一个简单、直观的研究方法。

#### 3.4 积极探索多渠道的补偿方式

1) 加大政府财政补偿力度。在生态补偿机制中，政府作为补偿工作的组织者和管理者，同时也是生态补偿的最大责任者，所以财政转移支付是生态补偿最直接的手段，也是最容易实施的手段。因此，中央和地方政府在财政转移支付中应增加对水资源生态补偿的支持力度，建立长效投入机制，继续发挥水资源生态补偿的中坚力量。

2) 配套生态补偿基金。对于需要水资源生态服务的区域征收一定比例的保证金，由于需要生态服务的区域更多地消耗和利用了水资源，理应支付更多的生态补偿费用。对需要生态服务的组织，在消耗水资源时必须得到有关机构颁发的许可证，并要实行水资源补偿押金制度，未能帮助受益者完成水资源保护的，其押金将被政府或者指定机构收缴用于资助受益方进行水资源保护。

3) 受益者支付。能够建立一条比较持久、合理的资金供给渠道，需要鼓励和引导受益者多渠道进行生态系统服务的购买，作为政府补偿机制的补充参与

到生态补偿工作中，拓宽生态补偿的途径，有效地促使生态补偿机制最优化运转。

4) 优化税收结构。有差别地征收水资源生态环境建设税，为中央和地方的生态补偿制度提供稳定和可持续的资金来源。

5) 建立生态补偿管理组织。在保持现有机构和部门不变的基础上设置专门的生态补偿管理组织，由该组织制定补偿政策、补偿标准、补偿核算、补偿征收和补偿发放等工作。该组织由相关领域的专家组成，具备对不同区域的生态补偿需求进行客观准确评估的能力，从而确定补偿标准是否合理，补偿费用如何合理分配和落实，这样能够确保补偿资金在补偿方和受益方之间合理转移支付。

在我国，流域水资源的跨区域生态补偿是个新领域，它是整个流域生态补偿的有机组成部分，对整个流域的生态画廊建设的管理体系起着重要补充，需要进一步加强对流域水资源生态补偿关键问题的科学研究，开展实践工作，通过理论和实践双重研究，积极推进水资源生态补偿机制的建立和生态画廊相关管理措施的完善。

致谢：本项目由区域开发与环境影响湖北省重点实验室开放基金(2016B001)、长江水利委员会长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016401/KY)和湖北省自然科学基金重点项目(2016CFA087)共同资助。

#### 深入阅读

Chapagain A K, Hoekstra A Y, 2007. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1):35-48.

Robinson C J, James G, Whitehead P J, 2016. Negotiating Indigenous benefits from payment for ecosystem service (PES) schemes. *Global Environment Change*, 38: 21-29.

杜耘, 2016. 保护长江生态环境, 统筹流域绿色发展. *长江流域资源与环境*, 25(2): 171-179.

卢新海, 柯善淦, 2016. 基于生态足迹模型的区域水资源生态补偿量化模型构建——以长江流域为例. *长江流域资源与环境*, 25(2): 334-341.

杨欣, 蔡银莺, 2011. 国内外农田生态补偿的方式及其选择. *中国人口·资源与环境*, 21(136 (s2)): 472-476.

赵卉卉, 张永波, 王明旭, 2014. 中国流域生态补偿标准核算方法进展研究. *环境科学与管理*, 39(1): 151-154.

(作者单位: 冯奇, 中国科学院测量与地球物理研究所, 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 湖北大学区域开发与环境影响湖北省重点实验室; 夏智宏, 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心; 肖飞, 中国科学院测量与地球物理研究所; 童雯婷, 武汉市人民检察院)

## 开展洪湖湿地保护区生态气象保障

■ 邓超 陈伟亮

洪湖湿地自然保护区管理局湿地保护科科长邓兆林, 对气象灾害对生态的破坏力感触颇深。他坦言, 洪湖湿地国家级自然保护区建成 20 余年, 对治理非法捕捞、围栏围网等均有丰富经验, 但“气象灾害的防御是最难的”。他归纳出了一条规律: 极端天气导致洪湖水位变化, 进而影响生境。而洪湖能够利用的最佳防御手段, 便是在极端天气这一环得到气象部门的准确预测, 提前调控水位, 尽可能减轻影响。

如今, 荆州市气象部门已与洪湖市政府对接, 推进洪湖湿地气象站建设。未来, 洪湖地区的气象监测有望更加精确, 预测更加精准, 气象服务也会更加精细。



(作者单位: 荆州市气象局)

# 石首麋鹿栖息地环境生态现状及其保护

■ 张怀胜 艾劲松 温华军 张玉铭 李鹏飞 杨涛 朱建强\*

2015年调查数据表明,石首麋鹿自然保护区的湿生、水生植物在多样性及生物量上均有明显减少,麋鹿采食的主要食物生物量减少近40%。滩涂旱化使部分水草和沼生牧草因原有的生态位改变而消失,导致茅草、接骨草、苍耳、菹草等劣质旱生牧草迅速蔓延,麋鹿赖以生存的天然食物链已面临严峻挑战。

石首麋鹿自然保护区1991年经湖北省人民政府批准成立,1998年国务院批准为国家级自然保护区。保护区主要保护对象为麋鹿及其生境,总体上由实验区、核心区和缓冲区构成,总面积15.67 hm<sup>2</sup>(图1)。目前,保护区仅对实验区和核心区享有自主管理权。



图1 石首麋鹿国家级自然保护区功能划分与分布图

长期以来,天鹅洲故道与长江的自然连通,使得低滩和洲滩洼地芦苇和牧草茂盛,中高滩亦有良好的林草生长,这些为麋鹿繁衍生息提供了天然生境。1993,1994和2002年,保护区先后三次从北京麋鹿生态试验中心引进麋鹿94头。迄今,麋鹿种群数量达1100头,形成了保护区核心区(430头)、江南三合垸、小河杨波坦三个亚种群,且全部实现了自然放养,恢复了麋鹿的野生习性,成为目前世界上最大的麋鹿野生种群。然而,1998年由于洪涝灾害修建沙滩子大堤,改变了天鹅洲故道与长江的天然联系。保护区成立至今,在内部环境中产生的一系列物候变化在

一定程度上使麋鹿生存环境发生了退化,并产生了一系列安全隐患,但目前尚未对此进行深入系统地研究。本文基于对麋鹿及其生活环境的长期观测,结合了环境保护部南京环境科学研究所发布的《湖北石首麋鹿国家级自然保护区综合科学考察报告(2016年)》的部分内容,对洲滩旱化、食物链改变、水安全与疫病隐患等方面分别提出了针对性建议,即主要通过水利工程手段实现保护区内部补水蓄水、使湿地空间得到拓展、用水安全得以改善,进而优化植被群落结构与食物链安全,恢复适宜麋鹿生存的生境范围。

## 1 水文气象对麋鹿及其栖息地的影响

### 1.1 四季变换与麋鹿对微域生境的选择

一年四季,随着水热条件发生变化,麋鹿会选择不同的栖息环境。夏季,当出现高温天气时,麋鹿喜欢在开阔地带的浅水滩或有积水的低洼泥塘处活动;遇到连续多日雨天时,才稍微扩大活动范围,暂时迁移到长有茂密矮草的区域觅食。冬季低温雨雪天气,麋鹿多在乔木林中觅食、休息过夜,天晴时才会出林活动,且仅在一天中阳光充足的时间段才会离开过夜地点开始迁移觅食活动(图2)。

春、秋两季,根据天气情况和食物丰富度,麋鹿会变换活动区域。晴天光照充足时,鹿群会因食物需求迁移到开阔地带觅食休息;雨天或多云天气,鹿群则会长时间停留在高草区域或乔木林中。值得一提的是,风速和风向也是影响麋鹿活动的因素之一,特别是春、秋和冬季,刮北风且风力在3级以上时,鹿群会迎风移动到被水面或乔木林阻隔的区域。

### 1.2 极端天气或水文事件对麋鹿的影响

极端天气主要体现在冬季极端冰冻雨雪天气(如2008年雪灾),因下冻雨或长时间降雪天气造成地面长青植物被冻死或被冰雪覆盖会影响麋鹿觅食和御

\* 通信作者:朱建强(1963—), Email: zyjb@sina.com

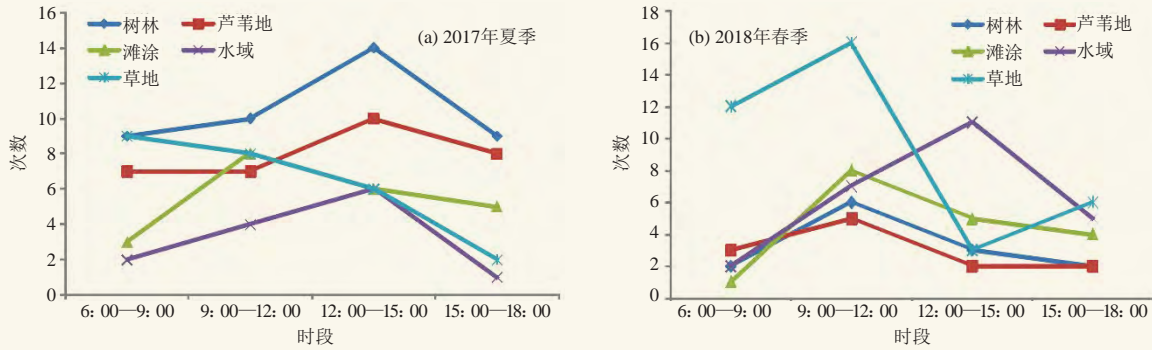


图2 石首麋鹿在白天不同时段下的生境选择

寒，一旦此类天气持续，则可能会造成一些老弱病残个体死亡，增加鹿群的死亡率。

极端水文条件主要体现在夏季长时间持续强降水天气，周边农田渍水和生活用水大量排入天鹅洲故道，造成故道涨水内涝，大面积淹没麋鹿觅食草场；同时造成保护区内一些堵塞的沟渠和泥坑因长时间积水，使浸泡的植物腐烂引起水体变质，从而对麋鹿觅食、饮水和栖息带来较大的影响，严重时可能造成麋鹿种群暴发疫病疫情等健康问题。1998年夏季强降水过程和2016年7月长江中游强降水造成的外洪内涝，都对麋鹿及其生境造成了严重影响。

## 2 麋鹿栖息地面临的主要问题

石首麋鹿国家级自然保护区的范围目前仅限于天鹅洲故道的西南部，由水域和洲滩湿地两大部分组成，划分为实验区和核心区两大功能单元。实验区169 hm<sup>2</sup>，核心区陆地678 hm<sup>2</sup>、水域472 hm<sup>2</sup>。所包含水域与天鹅洲故道相连，该区域常年为II类水质。此外，在保护区外规划了511 hm<sup>2</sup>缓冲区，实际上尚未有效管理。1998年长江洪水后修建沙滩子大堤，改变了天鹅洲故道与长江的天然联系，三峡工程汛期流量管理和天鹅洲闸人为控制汛期故道水位（32 m），使故道水位远未达到自然通江情况下汛期可达到的34.5 m以上的水平，保护区内水域面积在此20年间减少了约50%，由此引起地面高程在32 m以上的洲滩湿地开始明显退化。种子库研究表明，保护区湿地退化程度已达到中后期水平，生态系统趋于稳定。麋鹿比较喜欢的草甸泥沼湿地减少，劣质牧草滋生蔓延，这些已影响到麋鹿的生境和食物链的完整性。

### 2.1 洲滩旱化加剧，草甸泥沼湿地减少，适宜麋鹿活动的空间萎缩

近些年来保护区的麋鹿数量在增加，但另一方面适宜麋鹿活动的沼生环境却因滩涂旱化而减少，将麋鹿在交配期的活动空间挤压在芦苇荡与故道水际线之

间的狭窄地带，由此造成不同繁殖群之间的争地争水冲突和水环境恶化以及潜在的疾病感染。

### 2.2 洲滩湿生牧草生态位被旱生劣质牧草挤占，食物链面临改变

2015年调查数据表明，保护区内湿生、水生植物在多样性及生物量上均有明显减少，麋鹿采食的主要食物生物量减少近40%。滩涂旱化使部分水草和沼生牧草因原有的生态位改变而消失，导致茅草、接骨草、苍耳、葎草等劣质旱生牧草迅速蔓延，稳定的入侵植物种类已达近27种，并使具备改善区域生态巨大潜力的湿地种子库无法激活，麋鹿赖以生存的天然食物链已面临严峻挑战。另外，麋鹿出于自身营养需求，偶尔可见麋鹿捕食故道水域的鱼虾或螺类，其对于麋鹿种群健康存在未知影响。

### 2.3 周边农业用水、排水和麋鹿自身排泄带来水安全隐患

该问题表现在三个方面，一是枯水年份（季节）保护区周边泵站抽取故道水灌溉农田，加剧保护区水荒，造成麋鹿本身饮水和栖息地生态用水困难；二是丰水年份（季节）因周边农田向故道排涝造成麋鹿栖息地大量淹没，压迫麋鹿生存空间甚至危及幼崽生命，还增加了饮水不安全和疾病风险；三是麋鹿喜欢成群觅食、沿水边活动的习性，使得有限的湿生空间内排泄物相对集中，一定程度上会造成自身水环境污染和某些病菌传播。

### 2.4 应对意杨林砍伐后的替代遮蔽环境尚未营造

意杨为人工引进种植与保护区西南部的人工林，是麋鹿在冬春季节避寒、发情行为活动的常用场所。由于保护区内隶属不同经营主体的意杨林陆续到砍伐期，由此造成麋鹿遮蔽环境改变。通常，麋鹿求偶发情始于5月下旬，持续6周左右，7月中、下旬达到高潮。这期间水热同步，气温也是一年中最高的时段，良好的遮蔽环境对麋鹿避热纳凉和成功交配十分重

要。如不超前采取遮蔽应对措施,必将影响鹿群健康和正常繁殖。

## 2.5 周边放牧隐患

在保护区边界围栏地带,沿沙滩子大堤放养牛、羊、骡、马、鸡、鸭等畜禽尚未杜绝,畜禽携带的某些病毒,可能对麋鹿健康有潜在威胁。在2018年麋鹿保护区内重要病原菌及寄生虫的感染状况调查中发现,保护区内致病微生物种类较为复杂,且存在明显的季节性趋势。

## 3 面向可持续的麋鹿栖息地保护对策

### 3.1 麋鹿栖息地用水对策

通过优化现有工程水管理和建设必要的水工程,按照近、远期结合的思路解决麋鹿保护区用水问题。当前麋鹿保护区存在的主要问题是洲滩湿地缺水旱化及其诱发症,从长远来看,必须优先解决水问题。解决的途径应主要考虑以下因素:1)从长远看,需要与江豚保护区联手,从不同渠道争取项目资金,进行补水工程建设,以解决枯水年份两个保护区的用水问题和运行过程的环境净化问题。建议从故道上游的长江左岸适当位置建闸引水,通过明渠输送到天鹅洲故道,与天鹅洲闸形成一个上下可控、通过水流实现自净的湿地生境,从根本上解决麋鹿保护区和江豚保护区的用水和水环境问题。2)兼顾江豚保护区用水和天鹅洲岛农业涝渍灾害防控,从控制麋鹿保护区旱生杂草和洲滩洼地补水考虑,将汛期天鹅洲闸控制水位拟由目前的32 m调至32.5 m,并维持33 m及以上水位至少7~10 d。如此不至于天鹅洲岛农田大面积受涝(岛上农田地面高程几乎全在32.5 m以上,33.0 m时仅千字头和天鹅村少量农田受淹),又可使麋鹿保护区洲滩洼地淹水50~100 cm,从而使洲滩旱生杂草通过超强度厌氧胁迫得到治理。同时,结合汛期长江一般洪水过程,容许故道水位短期内(3~5 d)达到34.5 m及以上,以维持洲滩湿地近自然状态的水位涨落带,保护洲滩生物多样性。3)在保护区范围内,因地制宜建设有关水工程,解决湿生草地干旱退化问题。这是近期或者说目前情况下通过保护区自身努力比较容易解决的问题。根据水源不同可有三种解决途径:一是故道提水,通过明渠或涵管输送到需要水利改良的地段,该法输水线路较长,造价相对较高,还可能因施工造成沿线植被破坏;二是在需要水利改良的地段,依微地形差异分设若干个10 hm<sup>2</sup>大小的灌溉单元,在不影响堤防安全的前提下凿井抽取地下水;三是依微地形差异划分蓄水单元,地面筑小土埂,地

下设塑料薄膜或黏土阻隔带防渗,实现降雨就地拦蓄入渗,充分利用天然降水并辅之以灌溉补充实现局地地下水位抬升,形成湿生环境,达到抑制旱生杂草、促进湿生优质牧草生长的草甸湿地草地环境。

### 3.2 麋鹿栖息地湿生空间拓展对策

针对麋鹿保护区洲滩旱化加剧、草甸泥沼湿地减少、适宜麋鹿活动的空间萎缩问题,结合麋鹿保护区发展,可有以下几种选择:1)将沙滩子大堤与长江水际线之间原来纳入保护区发展的用地,通过流转确权使其正式划归保护区管理。然后,在沙滩子大堤设几处供麋鹿觅食、游憩至江边的活动通道,并在水边建立围网以防麋鹿逃逸。2)在保护区内选址建造若干洼地。为满足6—7月麋鹿交配期对小水域环境的需要,选择适当地址开挖洼地来汇集天然降水,以形成一定规模的水域环境。必要时,可在洼地附近建造轻型井,辅以井灌补水,以保证干旱少雨时段洼地有水。3)因地制宜建造零能耗运行的水塘。考虑到6—7月麋鹿交配期也是江汉平原雨水较多的时段,该时段保护区外的长江水位一般高于33 m,具有江水补给地下水的特点,如是可将保护区内地面高程在33.5~34.0 m左右的中高滩改造一部分,通过挖深1.5~2.5 m形成若干无须动力抽水灌溉的水塘,为麋鹿交配期提供适宜生境。

### 3.3 麋鹿栖息地的水环境安全对策

影响麋鹿栖息地水环境安全的主要因素是保护区周边农业面源污染由冯家潭泵站排入天鹅洲故道,另一因素是麋鹿自身排泄物直接污染水环境,这些增加了麋鹿饮水的不安全和感病风险。可采取的办法包括:1)通过工程手段解决好冯家潭泵站的排水出路,可采取大口径管道将排区涝水输送到长江,避免排水直接进入天鹅洲故道造成水质污染;2)开展冯家潭泵站集水区农业面源污染防治技术与推广,大力推行保护区周边农业清洁生产,或通过实施生态补偿鼓励周边农业转型,发展生态农业;3)在麋鹿集中活动的水域地带,建立人工辅助净化系统,同时做好消毒。

### 3.4 食物链安全对策

针对栖息地旱化引起草场退化产生的食物链危机,这里给出四种技术途径供选择:1)通过保护区补水工程建设,采取地面灌溉与地下截渗相结合的方法恢复退化草场的湿生环境,抑制旱生劣质杂草滋生,促进湿地优质牧草繁衍;2)在补水工程不能及时到位或者工程建设过渡期采取人工种植优质饲草的

办法解决优质牧草不足问题；3）对偶然情况下传播进入保护区的入侵植物加以防范，需对保护区及其周边人类活动行为严格把关；4）采取适应性措施，主动引进旱生多年生优质牧草来完善麋鹿的食物链。

### 3.5 麋鹿栖息地遮蔽物营造对策

有研究表明，麋鹿的生长发育、繁衍生息，不仅对栖息地的水域环境有要求，还对遮蔽物有一定需要。遮蔽物营造应和草场建设以及麋鹿交配期水域环境建设相结合，可采取沿保护区周边、草场周边造林绿化遮蔽，也可结合营造小水域环境开挖的土方进行筑丘来增加遮蔽。另外，芦苇荡区是天然的遮蔽场所，出于冬季防火考虑，在连片芦苇荡区，应每隔150~200 m设立30 m左右的隔离带。在春夏草木茂盛季节，隔离带又为麋鹿提供了视野较为宽阔的觅食地带。

## 4 近期麋鹿栖息地生境修复的工作重点和思路

以麋鹿保护区补水工程建设为抓手，以改善麋鹿生存环境为目标，坚持工程建设与生态建设相结合，本着先易后难、科学推进、重点突破的原则，开展栖息地保护，优先解决麋鹿交配期湿生空间不足和相应的环境问题以及草场退化问题。拟通过人工营造适度规模的洼地水塘扩大交配期活动空间，通过造林绿化生态工程增加遮蔽物，通过动力提水至宽浅草皮水道以实现洼地水体净化和循环利用。对于靠近保护区入口、毗邻故道的几片退化湿地，可抽取故道水进入近水边水塘，再通过涵管或二次抽水向保护区内毗邻湿地补水。

麋鹿保护区内部的补水工程有望对植被群落调节

起到一定帮助。保护区内水位经工程手段提高后，采用分地段筑围埂灌水的手段淹没旱生植物根部进行消除，并在可行性较高的地段进行湿地植被的人工恢复或进行牧草的人工种植，必要时需进行有计划的人工翻耕及管理，可选黑麦草、冬小麦等作为冬季食物补充。此外，目前保护区麋鹿已发展到1000多头，生境窘迫，需要通过落实原保护区土地利用规划拓展其活动空间。以上生境恢复和人工辅助手段可为维持保护区麋鹿种群数量创造条件，并进一步为麋鹿的野生放养提供帮助及参考。

致谢：本项目由湖北省环保科技项目(2017HB10)资助。

### 深入阅读

- 丁玉华, 任义军, 温华军, 等, 2014. 中国野生麋鹿种群的恢复与保护研究. 野生动物学报, 35(2): 228-233.
- 力志, 操瑜, 付文龙, 等, 2016. 天鹅洲湿地退化区土壤种子库与地面植被关系初探. 水生态学杂志, (3): 34-41.
- 彭光银, 邵晓莉, 文威, 等, 2016. 石首麋鹿保护区建设项目生态影响及保护措施. 环境科学与技术, (S1): 404-407.
- 杨道德, 李竹云, 李鹏飞, 等, 2013. 湖北石首麋鹿昼间活动时间分配. 生态学报, (5): 1397-1404.
- 杨道德, 马建章, 何振, 等, 2007. 湖北石首麋鹿国家级自然保护区麋鹿种群动态. 动物学报, (6): 947-952.
- 张佳期, 周守标, 高香琴, 等, 2017. 石首麋鹿国家级自然保护区外来入侵植物种的分析. 杂草学报, (1): 36-41.
- 张垚, 王敏, 肖志豪, 等, 2013. 基于“3S”技术的湖北石首麋鹿国家级自然保护区近25年土地利用动态变化分析. 林业调查规划, (3): 16-20.

(作者单位: 张怀胜, 朱建强: 长江大学麋鹿健康与生境研究中心, 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心; 艾劲松, 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州市气象局; 温华军, 张玉铭, 李鹏飞, 杨涛, 湖北石首麋鹿国家级自然保护区管理处)

## 荆州市气象局着力做好“水文章”

■ 邓超 陈伟亮

2018年以来, 荆州市气象局紧密结合水生态文明示范区建设的气象服务需求, 做好“水文章”, 聚焦江汉平原湖泊湿地特色品牌, 以“建立一支队伍、开发一个系统、生成一张图、发布一套产品、打造一个品牌”为目标, 强化“四个能力”建设。

一是强化气象保障基础能力建设, 打造沿江、环洪湖、覆盖湿地公园的湿地生态气象立体监测网络, 构建集约化生态气象服务平台; 二是强化生态安全气象保障决策支撑能力建设, 加强湿地生态保护与修复、气候资源开发利用、荆江流域防汛抗旱减灾

的决策气象服务; 三是强化绿色发展专业气象服务能力建设, 推进生态农业气候区划、气候品质认证、乡村生态旅游气象服务; 四是强化生态文明建设气象保障创新能力建设, 加强与部门、高校、科研院所的合作, 建立生态气象服务协同创新中心, 聘请客座研究员、建立导师制, 围绕生态农业、生态遥感、湖泊湿地保护与修复, 联合开展核心技术攻关。

(作者单位: 荆州市气象局)

# 天门市茶产业发展的气候适宜性分析和对策

■ 帅文卫 何菊 黄忠

天门市日照充足,年日照时数1648.8 h,年日照百分率37.2%,年大雾日数为23.1 d;年降水概率为32.45%,湿度大,全年的气候干燥度为0.88,春季气候干燥度为0.69,以春季气候干燥度最适宜天门市茶叶生长。针对不利于茶叶生长的灾害性天气,提出了相应的应对措施,为茶叶种植提供防灾减灾、趋利避害气象保障。

天门市位于北亚热带季风气候区,四季分明,雨量充沛,是“茶圣”陆羽的故乡。由于境内年降水变化率大,天气变化剧烈,水旱灾害时有发生,特别是洪涝灾害多、危害重,严重影响农业生产。研究茶叶生长与气候条件的关系,在生产中充分利用有利的气候条件,克服不利气象因素的影响,对于推动天门茶旅游业发展,提高茶叶产量和品质有着重要的意义。

## 1 天门市茶叶种植的气候条件

茶叶生产对气候因素的要求比较严格,合理利用气候条件进行趋利避害,使效益达到最大化。茶树喜欢生长在温暖湿润的环境,pH值4.5~6.0的酸性土壤中为最佳,并且炎热干旱和低温阴雨都会对茶树的生长产生影响,因此对气候条件的分析十分必要。

### 1.1 温度

茶叶是典型的亚热带经济作物,主要是亚热带季风气候,日照充足、雨量充沛、湿度大、云雾多,喜欢温暖湿润的气候环境,不耐高温和严寒。茶芽在日平均气温大于10℃时生长萌芽,气温稳定在10℃以上时,茶芽、叶片生长加快,并抽出新梢;15~20℃时生长较快;日最高气温达到35℃且持续几天时,生长受到抑制,叶绿素被破坏,光合作用降低甚至停止,叶片的蛋白质凝固,酶的活性丧失,茶树落叶严重,新梢会枯萎,茶叶品质受到严重的影响,日平均气温小于10℃时,茶芽停止生长,茶树进入冬眠。茶树生长的最旺盛的时期是日平均气温15~20℃,温度低,则生长慢;温度高,虽然生长快,但是芽叶容易粗老。

天门市的气温优势有利于茶叶的正常生长和提高茶叶产量和品质。1955—2016年天门市年平均气温为17.0℃,最高为18.2℃(2007年),最低为15.7℃(1984年)。最热月为7月,月平均气温为28.5℃;最冷月为1月,月平均气温为4.1℃。日平均气温≥10℃的活动积温,最多年为5930.1℃·d(2008年),最少年为4816.7℃·d(1987年)。茶树全生育期要求日平均气温≥10℃活动积温在3000℃·d以上,而以4000℃·d以上为宜,日平均气温≥10℃的持续

日数越长,则采摘的次数越多,产量就越高。天门市春季回暖较早,日平均气温稳定通过10℃的日期一般在3月23日,终日是11月17日,日平均气温≥10℃的活动积温平均在5544.3℃·d,平均持续时间为242d;日平均气温稳定通过15℃的平均初日为4月20日,终日为10月22日,日平均气温≥15℃的活动积温平均为4913.3℃·d,持续时间平均为215d。气温各项指标基本能够满足茶树生长需要。

### 1.2 降水

茶树性喜潮湿,生长期需大量且均匀的水分,休眠期需水较少。茶树生长在山坡或缓坡地上,蒸发量大,需要降水多,年降水量宜在1500mm左右,整个生长季节的降水量宜在1000mm左右,相对湿度维持在80%。生长季节若遭遇连续大雨或暴雨,则不利于茶叶生长;若连续出现月降水量不足50mm,则会有干旱影响,导致减产。

1955—2015年天门市年平均降水量为1131.0mm,降水主要集中在4—10月,占全年降水量的82.2%,平均月降水量在150mm以上,完全满足茶叶生长的需要。最大年降水量为1751.2mm(1983年),最小年降水量为737.8mm(1984年)。降水月份多集中在5—7月,高峰在7月,平均为180.1mm,12月份降水量最少,平均为26.5mm。在季节分配上,夏季降水量为466.9mm,占全年的41.3%,春季为340.7mm,占全年的30.1%,冬季降水量为117.9mm,占全年的10.4%。年平均降水日数为118.5d,降水概率为32.45%,降水日数最多的为4月,为12.3d,最少的为12月,为6.9d。

### 1.3 光照、云雾

茶叶特别喜欢漫射光和散射光,因为它们以黄、红、绿光为主,利于茶叶叶绿素和各种营养物质的合成,所以一般情况下茶树都适合生长在阴面。

天门市西北为丘陵地形,比东南平原地区相比有较多云雾,日照少,有利于形成漫射光,促进茶树的光合作用,提高茶叶的质量。在茶树生长期间,日照百分率小于45%的情况下,茶叶的品质较优。

1981—2015年天门市年平均日照时数为1648.8 h, 年平均日照百分率为37.2%, 年平均大雾日数为23.1 d, 一年中近一半时间会有降水, 因此天门市空气温暖湿润, 多阴天, 这种气候有利于光合作用有机物质的积累, 是天门市种茶的气候优势。

### 1.4 气候干燥度

茶树是喜欢湿润多雨环境的作物, 其新梢中含水量高达75%~80%, 可见水分在茶树中起到了非常重要的作用。天门市春季气候干燥度为0.69, 夏季气候干燥度为0.89, 秋季气候干燥度为1.3, 全年的气候干燥度为0.88, 以春季气候干燥度最适宜天门市茶叶生长, 所以春茶品质最高。

## 2 天门市茶叶气候适应性区划

天门市位于大洪山山前丘陵与江汉平原衔接地带, 地势西北高、东南低, 最高点在佛子山顶端, 海拔191.7 m。根据天门市茶叶种植农业气候区划图(图1), 西北部方向的拖市镇、石河镇、皂市镇、佛子山镇都为茶叶适宜生长区。而佛子山镇以在天门市独一无二的丘陵地形, 红壤土质, 微酸性土壤, 成为天门市种植茶叶的最佳区域。



图1 天门市茶叶种植农业气候区划图

2013年, 来自湖北省英山县鄂东茶叶第一镇——雷家店镇的曾万里在市林业局的大力支持下, 在佛子山镇佛子山林场租地220亩(1亩≈666.6m<sup>2</sup>), 买断土地120亩, 重新建茶叶基地, 先期种茶共320亩, 2015年, 在加紧茶园基地建设的同时, 对园区内的沟渠、道路、井进行规划建设, 茶园基地建设逐步走入正轨, 并在当年采制出了第一批天门本土新茶“陆羽毛尖”。天门市茶产业的发展雏形初步形成。

## 3 茶叶生产的不利气象因素

### 3.1 霜冻害和倒春寒

一般将-15℃、-12℃和-10℃作为茶树的

严重冻害、一般冻害和轻微冻害的指标。从天门市自1955—2016年资料来看, 历史上年极端最低气温低于-10℃仅有5次, 为1955, 1956, 1977, 1981, 1991年, 最低为1955年(-17.2℃)。可见天门市出现冻害的概率较小。

霜冻害是指早秋或晚春时节, 最低气温突然低于0℃, 而使茶树受到损害的一种灾害。天门市茶区地处江汉平原, 偶尔会出现霜冻, 但较轻微。防御霜冻的方法主要有喷水、吹风、熏烟、覆盖等。天门市初霜日为11月20日, 终霜日为3月10日, 平均无霜期为256 d。

春季冷空气气温急剧下降, 过后天气晴朗气温又迅速上升时, 茶树的芽叶边缘组织遭受破坏, 严重的整个芽叶都会枯死, 影响新梢生长发育和春茶产量。

### 3.2 高温干旱

茶叶的生长发育在最高气温≥35℃、日平均相对湿度小于60%、土壤含水量为田间持水量的35%以下时会受到限制, 如果这种不利的环境条件维持8~10 d, 茶叶就会由此受害。由于受西太平洋副热带高压控制, 天门市7—8月往往持续保持高温晴朗天气, 易长期形成高温、无雨、干燥的天气, 在这期间, 茶叶季节产量也是全年最低的时期, 而对幼龄茶树, 特别是播种当年的幼苗和移栽苗, 影响更大, 如在管理上不采取相应的措施, 常会出现焦苗和死苗现象。因此, 伏秋连旱会严重影响天门市秋茶产量和品质。

根据气象资料统计, 天门市1955—2016年间出现伏旱的年份, 62年内共有52个年份发生了伏旱, 其中小旱年20个年份, 占伏旱总年数的38%; 中旱年15个年份, 占29%; 大旱年9个年份, 占17%。伏旱持续日数大于50 d的特大旱年8个年份, 占15%。但是因为可以人工灌溉, 所以干旱对茶叶生长的实际影响远低于理论上造成的影响。

### 3.3 暴雨洪涝

天门市四季分明, 降水量随季节不同有很大差异。汛期雨量较多且集中, 占年降水量的70%左右, 6—7月往往是雨量最集中的时期, 易造成暴雨洪涝。如果茶园被淹或长久水分过多, 一是影响茶树自身的生长发育; 二是水淹过后, 各种有害物质残留于茶树体内, 导致茶叶品质下降, 三是易引起茶叶病变的发生和传播。

## 4 茶叶优质高产气象对策

### 4.1 合理密植茶树, 提高光能利用率

茶叶产量由树冠上各次采摘时新梢的数量及叶片重量组成。因此, 合理密植, 增大覆盖度、扩大采摘

面,可提高茶树对光能的利用率。一般中低海拔地带气温高,茶树生长快,封行早,茶树种植密度可相应稀些。

#### 4.2 根据气象条件,适时合理采茶

根据茶树具有早采早发、晚采晚发的特性和“早采三天是个宝,迟采三天是把草”的经验,一般春茶开采期确定在日平均气温稳定通过10℃初日7d后,至5月10日;夏茶开采期在日平均气温稳定通过20℃初日7d后,至7月10日;秋茶开采期在日平均气温升达30℃时,至9月。开采标准一般为春茶新梢在树冠上达10%~15%,夏茶达10%为宜,细嫩名茶达5%就要开采。

#### 4.3 加强茶园水利建设,增强抗灾能力

茶叶属半阴性植物,建园时必须在茶丛周围营造防护林和遮阳树,这样可保持水土、提高空气湿度、调节气温,减少直射光,增加漫射光,使茶叶保持嫩性强,从而达到优质高产的目的。

春季干旱,降水少,要有灌溉水源茶树才能生长良好,夏秋降水多,要有良好的排水系统,才能防止水土冲刷,要做到有水能蓄,缺水能灌,水多能排。

#### 4.4 加强气候型病虫害的防治

由于气候条件变化与管理的不到位等多种原因,茶园中常见的茶毛虫、茶尺蠖和假眼小绿叶蝉这三大害虫会随着雨水、风等恶劣天气迅速传播造成大量发生,给茶农和茶厂带来很大的损失,严重影响茶园产量和质量,应该及时防治。

#### 4.5 开展茶叶专项直通式气象服务

针对茶叶生长发育阶段可能会出现各种气象灾害,定期或不定期到田间地头开展一些技术咨询服务,为茶农提供灾害性天气防御技术及措施。适时开

展直通式气象服务,给茶叶生产种植提供农事指导和建议很有必要。

## 5 小结

通过以上分析可看出,在天门市发展茶叶生产的气候资源优势突出,天门市气候温和,雨量充沛,雨热同期,日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温平均在5544.3 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,平均持续时间为242d;天门市年平均降水量为1131.0mm,平均月降水量在150mm以上,完全满足茶叶生长的需要;天门市日照充足,年日照时数为1648.8h,年日照百分率为37.2%,年大雾日数为23.1d;年降水概率为32.45%,湿度大,全年的气候干燥度为0.88,春季气候干燥度为0.69,以春季气候干燥度最适宜天门市茶叶生长。

正常年份,天门市各项气象指标非常适宜茶叶的基本生长,但天门市也存在一些不利的气候条件,例如,年内降水时空分布不均,伏旱出现较多,也存在对茶树生长不利的气象灾害风险;冬春季节也存在有强冷空气入侵的可能。因此,要充分利用有利的气候条件,克服不利气象因素的影响,才能达到优质高产的目的,并要进一步推广气象服务,健全天门市的灾害防御体系,做好防灾减灾工作,确保茶农增收,繁荣地方经济。

#### 深入阅读

- 金志凤,叶建刚,杨再强,等,2014.浙江省茶叶生长的气候适宜性.应用生态学报,(4):967-973.  
李时睿,王治海,杨再强,等,2014.江南茶区茶叶生产现状和气候资源特性分析.干旱气象,(6):1007-1014.  
李倬,贺龄萱,2005.茶与气象.北京:气象出版社.  
毛祖法,梁月荣,2006.浙江茶树.北京:中国农业科学技术出版社.  
杨亚军,2005.中国茶树栽培学.上海:上海科学技术出版社.

(作者单位:湖北省天门市气象局)

## 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心成立

■ 邓超 陈伟亮

2018年4月19日,来自武汉大学、湖北大学、中国地质大学、长江大学、中科院测量与地球物理研究所的专家学者,来自洪湖湿地和石首麋鹿自然保护区的工程师,以及来自湖北省气象局、武汉区域气候中心、荆州市气象局的气象工作者齐聚荆州,江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心宣告成立。

牵头成立这样的创新中心,荆州市气象部门意在为生态文明建设提供科技支撑以及可持续发展的

动力。在受邀而来的十余家单位中,有理论研究的“大牛”,也有奋斗在生态保护一线的“老手”,还有熟悉生态服务需求的气象“老兵”。在这个创新中心,通过多方交流合作,一线需求、气象服务、理论研究可以有机融合,多方力量相互推动,打造一个良性发展的共赢局面。

(作者单位:荆州市气象局)

# 江汉平原气候变化及其对农业生态的影响与对策

■ 贺程程 周霞 杨峰 周莉莉

近55年来江汉平原年平均气温呈显著上升趋势，降水量呈现微上升趋势，降水年际间变化明显。气候变暖使江汉平原径流量增加，干旱和洪涝等灾害出现的频率进一步增加。基于对生态文明的认识，提出了污染治理、调整产业结构、推广生态农业、打造休闲农业、发挥气象作用等农业生态适应气候变化的策略。

江汉平原位于长江中游，地处湖北省中南部，是湖北省及全国的重要商品粮、棉、油生产基地和畜牧业、水产基地。其西起宜昌枝江，东迄武汉，北自荆门钟祥，南与洞庭湖平原相连，面积约4.6万 km<sup>2</sup>，主要包括荆州市的荆州区、沙市区、江陵县、公安县、监利县、石首市、洪湖市、松滋市8个（县、市）区及仙桃、潜江、天门3个省直管市，并辐射周边武汉、孝感、荆门和宜昌4个市的部分地区。江汉平原因其地跨汉江和素有“九曲回肠”之称的长江而得名，这里地势低平，河道纵横交错，湖泊星罗棋布，呈现出一幅典型的“水乡泽国”和“鱼米之乡”的景色。

然而，自20世纪50年代以来，人类对江汉平原湖泊演化的影响达到前所未有的地步，湖群资源从总体上遭受巨大破坏，大量湖泊消亡，湖区生态平衡严重失调，洪涝灾害频率增加，水污染不断加重，严重的水污染已经使相当多的地区出现水质型缺水，水资源受到严重威胁。研究近代湖泊水域变化，分析目前湖泊存在的主要问题，探讨气候变化对江汉平原生态影响及适应对策，对于江汉平原生态环境的改善恢复和可持续发展具有重要意义。

## 1 气候变化分析

利用江汉平原的荆州、天门等9个气象站1961—2015年的气温、降水等气象资料，使用线性回归法分析了江汉平原近55年的气候变化趋势。1961—2015年，该区的年平均气温在波动中呈现显著的上升趋势（图1），气候倾向率为0.275 °C/10a ( $P < 0.01$ )。该区域降水量有轻微增加趋势（图2），但程度不大，变化十分缓慢；从波动性来看，江汉平原年际间降水的波动很大，1973，1975，1977，1980，1983，1991，1998，1999，2002和2010年为大涝年，都发生了洪涝灾害。同时，江汉平原的干旱频次也逐渐提高，强度逐渐增强，特别是伏旱、秋旱发生的频率明显增多，1966，1972，1976，1978，1981，1985，1990，

1992，2001，2006，2009和2011年都遭遇了严重的干旱少雨，成为危害严重的大旱年。

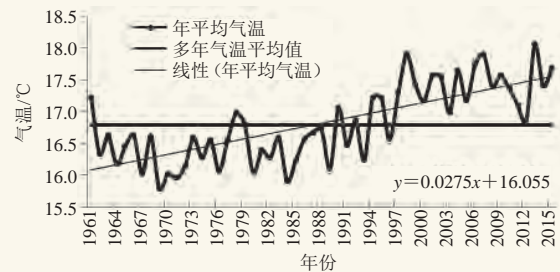


图1 江汉平原1961—2015年气温变化趋势

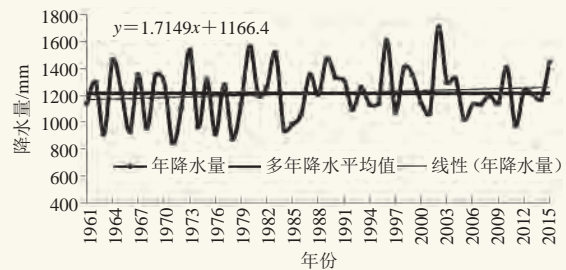


图2 江汉平原1961—2015年降水变化趋势图

## 2 气候变化对江汉平原现有水资源的影响

自古以来，江汉平原水资源丰富（图3），主要由大气降水、地下水和过往江河客水三大部分构成。年降水量为980~1300 mm，5—10月降水量占年降水量的65%~70%，雨热同季，水热配合协调，有益于农业生产潜力的提高。江汉平原年径流深320~750 mm，地表径流资源总量 $1.50 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，过境客水资源 $5.50 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，众多湖泊库塘正常年份蓄水量 $4.58 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。区内广泛分布着深厚的地下水资源，尤其是中深层承压含水层厚度大，导水性能好，单井涌水量普遍大于 $10 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^{-1})$ ，水资源极为丰富。湖泊众多，水域面积广是江汉平原农业生产的独特优势。江汉平原是全国淡水湖泊最密集的地区，拥

有6.67 km<sup>2</sup>以上的大小湖泊500多个，正常蓄水位总面积1605 km<sup>2</sup>。这些湖泊是江汉平原的主要灌溉水源之一。

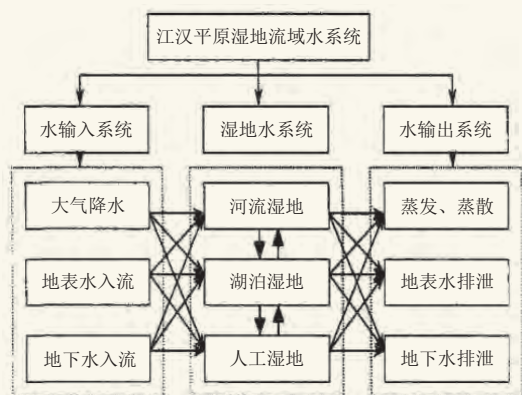


图3 江汉平原湿地水系统关系结构图

20世纪，江汉平原中部地区部分农田长期处于高水位甚至淹水的运行状态，加上“大平小不平”的微地域地貌分异特点和降水在时间分布上的不均匀性成为江汉平原76.4万 hm<sup>2</sup>涝渍地涝渍相随发生发展的外部客观原因；而盲目的湖泊围垦、调蓄能力弱、排灌系统不完善则是涝渍相随、旱涝并存的人为原因。据统计，20世纪50年代初期到80年代初期，仅长江中下游水系湖泊湿地因围垦减少面积就达1.3万 km<sup>2</sup>，占全国总湖面积的20%左右，长江原有22个较大的通江湖泊，因大量不合理开发建设而丧失了567亿 m<sup>3</sup>的蓄洪库容，约相当于3个三峡水库的实际蓄水量；其中湖北省的湖泊面积缩小68%以上，湖（库）容蓄水能力缩减56亿 m<sup>3</sup>左右，等于损失一个荆江分洪区。原长江10年一次的大洪水现变为10年四次，旱灾也达到3年一次，而且围湖造田本身抬高了江湖水位，使涝渍灾害加重，农作物的产量和质量下降。

进入21世纪，随着全球气候变暖，江汉平原得天独厚的水资源逐渐转变为水质型缺水工程和工程型缺水等状况，陆地地表水位相应下降，大量的湖区、水田因缺水变成旱田，江汉平原农业生态系统面临严峻挑战。主要原因：1) 气候变暖使江汉平原上游的汉江来水量减少；2) 气候变暖使江汉平原径流量增加，年平均蒸发量增大，干旱和洪涝等灾害出现的频率将会进一步增加；3) 生产生活中大量产生的“三废”及过度使用化肥农药排放的污水导致水体污染；4) 国家水利建设工程导致来水减少，如三峡工程枯水期蓄水发电导致长江下游地区过往江河客水减少，国家南水北调工程从汉江抽走一部分水量，使得江汉平原下游过往江河客水明显变少。

目前，江汉平原最常见的水污染是有机污染、

富营养污染、重金属污染以及这些污染共存的复合性污染。当前该地的水污染日益加重，陆地地表水位下降，地表和地下水都受到严重污染。严重的水污染已经使相当多的地区出现水质型缺水。江汉平原沿江城市江段部分断面水质超过国家规定标准，岸边污染带严重。汉江个别断面的个别项目有超标现象，天门以下至武汉河口段水质在枯水期多有超标现象。河湖淤塞，航运受阻，涝、渍、旱灾害频频加剧，天然水生生物资源日益枯竭，生物多样性下降，农田沼泽化等影响环境和生态平衡。同时，河水水温上升给一些致病微生物造成一个温床，使它们得以滋生、泛滥，引起疾病流行，严重危害人类健康。

### 3 气候变化对江汉平原农业生态的影响

20世纪90年代之前，江汉平原耕地占土地总面积的47.4%，林地占10.2%，草地占1.8%，水域占19.6%，其他占21%（图4）。特定的农业生物种群是水稻、棉花、油菜、大麦、小麦，并发展有淡水养殖业和养猪牧业。在耕作制度上实行一年三熟制或两熟制，即整个江汉平原生态系统的环境库与生物库的容量是匹配的，两者之间相互依赖、相互适应，并基本保持着相应的生态平衡。其总的特征表现为：在地跨中亚和北亚亚热带季风气候充足的光热条件下，在相对丰沛的水资源条件下，在得天独厚的土壤资源条件下，与这些环境资源优势相匹配，经自然和人为的科学筛选，构成了江汉平原最佳的农业组合，且物种繁多，优质高产，构成湖北省最好的农业区。

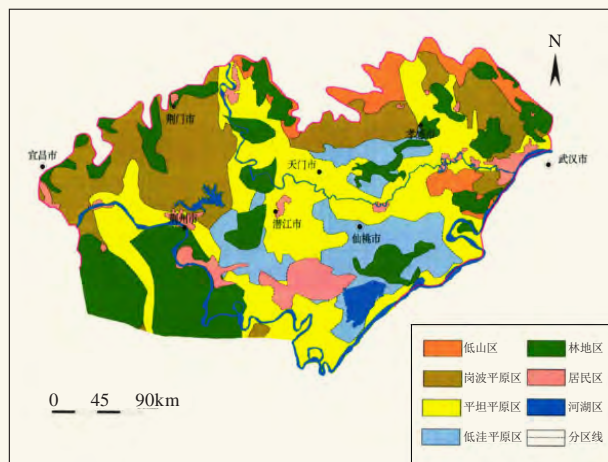


图4 江汉平原分区图

进入21世纪以来，受自然因素和人为因素的共同作用，江汉平原湖泊演变日渐加剧，农业生态环境日益恶化。因水资源减少，江汉平原土地生态系统承载力总量减少40.63 × 10<sup>4</sup> g·hm<sup>2</sup>，人均生态承载力也由1.17 g·hm<sup>2</sup>下降至0.97 g·hm<sup>2</sup>，说明江汉平原区域

范围内用于生物生产的土地面积呈下降趋势,生态承载力水平和人均生态承载力逐渐降低;同期,江汉平原南部的生态稳定指数下降较大,各网格的平均稳定指数由0.72下降至0.52;各网格的平均生态适应指数由0.56下降至0.41,中南部区域下降的范围最大。1987—2010年江汉平原区域各网格土地生态系统安全指数的平均值由1.41下降至1.27,土地生态安全状况下降明显。

气候变化主要表现在三个方面,即平均气温上升(气候变暖)、降水不均衡和极端天气气候事件。而降水不均衡和极端天气气候事件增多的主要表现就是干旱。如2003年7月23日—8月9日,江汉平原的荆州市出现了连续18天日最高气温大于32℃,连续7天日最高气温大于35℃,且2天高于38℃的连续超历史的高温天气,荆州市中稻出现了大面积的空秕率增高,部分田块空秕率高达35%,个别田块甚至绝收,影响面积超过6.67万hm<sup>2</sup>。荆州市中稻平均每公顷产量比上年减少1065kg。

当然,气候变化对江汉平原农业生态的影响也是有利有弊的。在全球气候变暖的大背景下,江汉平原的四季发生了一定的变化,如夏季延长,冬季缩短等。气候变暖使得有效积温增加,作物生长季缩短,有可能导致农业复种指数增加、晚熟品种种植增加,促进种植结构调整等。气温升高的负面影响是夏季高温日数增多,高温热害对作物带来不利影响,自然界虫卵、病菌越冬存活概率增加,来年病虫害将有可能趋重发生。气候变暖还使土壤水分蒸发量加大,热量资源增加的有利因素可能会因水资源的匮乏而得不到充分利用,作物产量波动的气候风险性增加。

#### 4 对策

绿水青山就是金山银山。江汉平原的气候变化对该地区农业环境的影响是非常明显的,必须加强研究,提出相应的对策。应对气候变化,江汉平原要重视生态文明建设,大力推动乡村振兴计划,真抓实干治理污染;要充分利用气候变化的积极方面,控制、减少消极方面,使江汉平原的农业生态环境得到持续稳定的发展。

1) 搞好污染治理。治理江汉平原土壤及地下水污染主要方法是:①在重点污染区探索建立农产品产地休耕试点,建立健全地下水环境监管体系,制定地下水污染防治应急措施;②推进农村土地整治和高标准农田建设,开展土壤有机质提升行动、化肥农药零增长行动、耕地重金属污染治理行动,稳步提升耕地质量;③重视农作物病、虫、草害的防治工作,建立

健全植保组织,形成监测防治网络,对有害生物进行综合防治,以防为主;④在中上游地区植树造林,加强干堤建设,清除河道行洪障碍,严禁围垦河、湖、洲、滩;⑤重点开展“四湖”流域综合治理,实施湖北省“一江三河”水系连通工程,连通流经江汉平原核心区域的汉江、汉北河、天门河和府澧河,优化江汉平原水资源配置格局,实现连网成片,推动江汉平原的水连起来、清起来、活起来、美起来。

2) 调整产业结构。江汉平原属副热带季风气候,具有雨量充沛、日照充足、四季分明等特点。①要充分利用该地区农业发达、物产丰富的优势,根据市场行情和效益迅速转变种植模式。例如,由于气候变暖,水资源减少,将原来的水田改为旱地,栽种一年三熟的鲜食玉米、新品种土豆,即使地下水位降低,这些旱地经济作物也不会受影响。②选择合适地域,掌握适度规模,重点突破,梯次推进,重点发展具有本地特色、竞争力强的产品,实施名牌产品战略。③优先开发特种水产、良种水禽、优质大米、良种藕、反季节蔬菜、饲料等产品,实现种养加工一条龙、贸工农一条龙、产供销一条龙、农科教一条龙。

3) 推广生态农业。①广泛应用绿色模式,生产与生态要协调。稻作区因地制宜建立“中稻—再生稻—油菜(绿肥)”“稻虾共(连)作”等绿色高效模式。②适区与适种要一致。在旱田和水旱两兼地区大力发展优质大豆间作玉米、“麦—玉—玉”一年三收青贮等模式。③不断扩大种植规模。建立现代农业技术服务平台,以推动“土地适度规模化”和“利用现代农业科技把地种好”为突破口,以集成现代农业种植技术和智慧农业为手段,以农产品品质和种植效率提升为核心,提供线上线下相结合、涵盖农业生产全过程的现代农业综合解决方案,通过全方位农业种植水平的提高,最终实现农业产业链综合价值提升和种植者效益提高的目的。

4) 打造休闲农业。休闲农业已然成为乡村旅游的新时尚。江汉平原的休闲农业要结合区域特色农业资源和水资源,在集中连片的地方发展具有观光价值的大田或水上种植养殖项目如油菜花海、荷塘观光、水产养殖观光以及蔬菜水果观光采摘等,开发垂钓、捕捞、水上运动和水生蔬菜果实采摘等项目,辅以季节性的农家餐饮。要利用交通路网较为完善的优势,在县城周边、自然景区和人文景观附近,以及车站、高速公路出口、国道省道节点、港口码头附近,发展以水产品、家禽产品和蔬菜为重点的特色农家乐、渔家乐和休闲农庄,辅以当地传统农具和生活用具等

## 《“三农”气象服务探索》评介

■ 朱玉洁 郝伊一

农业是受气象灾害影响最为敏感的行业，气象服务对于“三农”具有不可替代的作用，一个完整的气象服务能够让农民提前做好灾害规避。



气象出版社，2012年

近年来，全球气候变暖引发的农业气象灾害频率增加、强度增强，给农村群众生命财产安全带来了十分严重的威胁。农业是受气象灾害影响最为敏感的行业，农村是气象灾害防御的脆弱区，农民是受灾影响最大的弱势群体。在这种形势下，气象服务对于“三农”具有不可替代的作用，一个完整的气象服务能够让农民们提前做好灾害规避。

农业增产、农民增收、农村繁荣都离不开气象服务的支撑和保障，“三农”问题也一直是国家关注的“重中之重”，因此也进行了一系列政策扶持资金补贴。2011—2012年，国家财政专项拨款，支持中国气象局在全国开展“三农”气象服务试点，潜江市也被纳入其中。作为全国气象主管机构，中国气象局高度重视农业气象工作，在《全国气象发展“十三五”规划》中也对气象服务“三农”工作做了明确部署，指出要树立绿色协调的发展理念，加强气象与农业等相关部

门间的沟通协调与数据信息共享，加强专业化农业气象技术支撑能力建设，加强自动化农业气象观测能力建设，深化特色农业、设施农业气象服务，合理开发农业气候资源，积极参与和保障生态文明建设，实现气象可持续发展。

《“三农”气象服务探索》一书，正是在以上背景下应运而生，本书对潜江市气象局开展多年的“三农”气象服务进行了系统总结与提炼，这为基层气象机构如何做好“三农”服务工作做出了很好的示范。全书共分11章，叙述了“三农”气象服务的深厚历史背景与原动力的认识，认清了“三农”气象服务的根本任务，阐述了“三农”气象服务的切入点，对于未来承担农业气象业务的基层气象台站，如何在“三农”气象服务中制作产品开展服务，以及工作思路与方法、技术依托等进行了探讨。

具体而言，第1章，认识“三农”气象服务的背景与原动力，主要包括社会主义农业大国的国情定位、应对全球变暖以及各级政府大力支持、农业群众渴望。第2章，认清“三农”气象服务的任务，简述“三农”气象服务的目的、切入点、任务，以及如何遵循“三气象”服务轨迹。第3章，“三农”气象服

农耕文化陈列展示，培植一批立足农特产品精深加工的休闲农庄。要因地制宜发展“一镇一业”“一村一品”。针对目前休闲农业在结构布局上缺乏整体性，急需转型升级的状况，要不断提高经营服务水平。

5) 发挥气象作用。气象部门要为农业生态环境保护，打好污染防治攻坚战提供精准气象服务，为建设美丽江汉贡献气象智慧。①要提高服务生态环境保护和推进绿色发展的水平和力度，拓展水林田湖草等生态系统的气象综合观测领域。②要做好对主要生态系统灾害的实时监测和早期预警，为生态系统保护和修复提供更有针对性的气象服务。③要合理开发利用和保护气候资源，根据气候资源综合调查结果进行气

候资源评价，编制气候资源区划。

### 深入阅读

- 刘章勇, 刘百韬, 谢磊, 等, 2003. 江汉平原涝渍地域农业生态环境特征与评价指标体系. 长江流域资源与环境, 12(1): 83-87.
- 於凡, 曹颖, 2008. 全球气候变化对区域水资源影响研究进展综述. 水资源与水工程学报, 19(4): 92-97.
- 张德存, 刘光强, 全浩理, 2002. 江汉平原未来农业可持续发展可能遇到的问题及对策. 资源环境与工程, 16(1): 31-35.
- 朱俊林, 1997. 三峡工程与江汉平原农业持续发展. 生态学杂志, 16(2): 36-41.

(作者单位: 湖北省荆州市气象局,  
江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心)

务的主要服务产品。用提供准确及时的服务产品，除开展传统天气预报、灾害性天气预报预警等外，还包括主要完成的多项服务产品等。第4章，农业气象服务产品的制作。首先进行气象与相关信息的整合，这是气象信息服务产品制作的前提和依据，包括信息的搜集和信息的集成。而后进行服务产品的加工，是一项精细的工作，包括分析加工产品的方法、终极服务产品的编辑、服务产品的一般形式与内容。最后做好气象灾害的搜集及专题调查、评估，对于深入认识气象灾害的预报、预警研究有着重要意义。第5章“三农”气象服务的技术依托。要做好气象为“三农”服务就必须寻找新的技术依托，首先要充分理解上级服务产品，因地制宜精心补充订正，其次要积极引用各类专家学者，形成“三农”气象服务智库，最后要总结农业气象技术经验，创新持续发展技术储备。第6章，用二十四节气“开路”。向农民诠释二十四节气，启发农民因地制宜运用二十四节气，重点诠释二十四节气与气候、农时、农事之间的关系。第7章，介绍全年服务可供参考的农业气象指标、应防范的主要农业气象灾害。第8章，潜江市主要农业气象灾害。主要包括低温冷害、冰冻害、冰雹、龙卷风、雷暴、连阴雨、浓雾、高温灾害。第9章，农业气象服务产品与范例。采取简易四字经的方式，介绍潜江市农业气象防灾减灾月历，勾画各月节气、气候、主要作物农事特征、措施。其次简述主要作物全生育期气象服务指南（附图谱）。第10章，农业气象典型服务产品事例。着重介绍潜江市气象局在“三农”气象服务专项中，制作了针对性和可操作性强的精细服务产品，取得了显著的社会、经济效益，还随机编写了

农业气象典型服务产品5例，包括：阴雨低温跟踪调研，保障夏粮夏油安全；干旱天气对农业的影响及其应对措施；灾后粮棉生产应对措施；冷冬寡照，小麦、油菜需防阴湿病虫害；“4·24”暴雨对潜江市农作物的影响评估。第11章，编制“三农”气象服务系列丛书。潜江市气象局组织专家，编制了《“三农”气象服务系列丛书》，以克氏原螯虾养殖气象适用技术为例。主要介绍了克氏原螯虾生物学特性、生态与气象指标；潜江市全年气候变化特点；影响小龙虾的主要气象灾害；如何掌握气候特点，生态健康养殖的特点以及如何看天施肥，调节水质。而后简述了克氏原螯虾主要养殖模式，如何提高克氏原螯虾的成活率，以及克氏原螯虾常见病虫害防治，最后进行外地经验谈。

在国家推进五大发展理念和五位一体全面布局的大背景下，本书立足于一个农业大国的基本国情，符合农业气象服务的新形势，厘清了“三农”气象服务的根本任务，阐述了“三农”气象服务的切入点、应遵循的服务轨迹，为基层气象机构如何做好“三农”服务工作做出了很好的探索，这对于全国各地“三农”气象服务的有效开展都具有积极并长远的意义。

本书既深入浅出、通俗易懂，又富有知识性、科学性与实用性，不仅适合农村广大基层干部与农村群众阅读，还是适合尚未或正在开展“三农”气象服务试点工作的基层气象台站以及气象、农业院校的师生教学参考。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院，  
中国气象局发展研究中心）

# 《生态气候学：概念与应用（第二版）》评介

■ 侯美亭

生态气候学将生态学和气候学的相关领域进行交叉集成研究，有望弥合气候学和生态学两个学科之间的鸿沟，特别有助于气候学领域的研究人员理解如何在气候模式中利用植被过程数据。



气象出版社，2017年

北京师范大学延晓冬教授等翻译的《生态气候学：概念与应用（第二版）》（气象出版社，2017年出版），是一本令人印象深刻的书，原著 *Ecological Climatology: Concepts and Applications (Second Edition)* 于2008年由 Cambridge University Press 出版。该书的作者 Gordon B. Bonan 是

NCAR（美国国家大气研究中心）的高级研究员，主要研究方向为陆地生态系统与气候的交互。该书作为 Bonan 的代表作，把生态学和气候学的相关领域合并成生态气候学交叉集成研究，涵盖了生态学、气候学领域的诸多方面内容，如生态特征、植被与气候的交互作用、水与能量平衡、植物过程（如光合作用和植被冠层过程）。

本书引入了一个跨学科的框架来理解陆地生态系统和气候变化之间的相互作用，回顾了基本的气象、水文和生态概念，介绍了陆地生态系统影响气候和受气候影响的物理、化学和生物过程。特别地，这本书的关键主题是陆地生态系统（特别是森林生态系统）如何对气候产生影响。这一主题与过去人们普遍认为的“气候影响生态系统的功能和结构”形成了鲜明的对比。与第一版相比，在第二版中，作者采用的写作风格更加通俗易懂。在每一章的结尾都提供了习题，答案可以在互联网上找到。这些习题可以很好地测试读者对每一章的理解程度。

本书包括七个部分，一共30章。第一部分（第2~3章）介绍了地球系统及其组成（大气圈、水圈、冰冻圈等）、全球循环。第二部分（第4~8章）深入研究了全球物理气候学，包括对地球气候、气候变异和气候变化机制的研究。第三部分（第9~10章）

是关于土壤过程的，包括土壤物理和土壤生物地球化学。第四部分（第11~15章）介绍了水文气象学，从基础知识（比如陆地水循环和流域水文）开始，然后引出主题（地表能量通量和湍流通量）。第五部分（第16~18章）介绍了生物气象学，从叶片能量通量和叶片光合作用开始，扩展到植物冠层。第六部分（第19~24章）是关于陆生植物生态学的，包括生态学领域的许多主题：植物策略、种群和群落、生态系统结构和功能、植被动态、干扰和景观以及全球生物地理学。其中，第22章的“植被动态”，主要介绍了演替，用北半球生态系统的案例研究进行了说明。最后，第七部分（第25~30章）探讨了陆地强迫与陆地反馈，包括气候模式中的陆面过程、土地利用和土地覆盖变化等等。其中，第28章“气候-植被耦合动力学机制”和第29章“碳循环-气候反馈”基于案例研究讨论了碳储存问题和气候反馈。第七部分的最后一章讨论了与城市化有关的气候学内容。

气候领域的研究者尽管在气候模拟方面富有经验，但面对许多可利用的描述植被过程的数据时往往不知从何下手，即气候模式和植被过程之间经常有脱节。这本书的一个优点就在于它有潜力弥合气候学和生态学两个学科之间的鸿沟。此外，每个部分的简单解释将很容易被来自不同学科的学生和研究人员理解。

尽管书中也有一些小的问题，例如， $C_3$ 植物的气孔在夜间关闭（P269），这点已被近来的研究推翻。但总体上，这本书包含的广泛主题、良好的跨学科结构，使得读者可以通过阅读一个章节以学习一些关键概念成为可能。此外，还可以阅读一些案例研究，这些案例研究强调了相关的关键点。本书的读者不仅仅局限于生态学、环境科学、大气科学和地理学的本科生和研究生，通过了解植物生态学、陆地强迫和反馈（特别是气候-植被耦合动力学），气候研究人员也可以获得如何改进气候模式的知识。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）



# 进 2018 展报告 长江生态气象

<http://cmalibrary.cn/amst/201805/>

# 高被引论文选编

编辑：张萌 侯美亭

## “生态气象/生态气候”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2016—2017年

**温度对维持海藻自上而下控制作用的影响随季节而变化**——Temperature effects on seaweed-sustaining top-down control vary with season. *Oecologia*, 2016, Vol. 180, No. 3.

在全球气候变化的背景下，海水温度上升和二氧化碳浓度（海洋酸化）是影响海洋生态系统的两个最具影响力的因素。在生态气候变化研究中，跨季节多物种、跨营养水平设置的全因子试验是必不可少的，因为它们可以对直接和间接影响，以及两种主要环境压力因素对生态系统的影响的相对重要性进行更现实的估计。在底栖中观试验中，德国亥姆霍兹基尔海洋研究中心的Werner等测试了波罗的海沿岸黑尾藻群落对一年四个季节海水温度升高和二氧化碳浓度升高的响应。研究发现，虽然增加二氧化碳水平只产生了轻微的影响，但变暖对食草动物有强烈而持久的影响，其对黑尾藻群落的影响被发现与季节有关。夏末，受温度驱动的食草动物的崩塌，产生了从食草动物到基础物种的级联效应，导致了由附生植物形成的岩藻的过度生长。在秋季/冬季（附生植物生长期之外），由于气候变暖，捕食活动的增加导致岩藻生物量显著减少。因此，研究预测，未来水温的升高将通过改变自上而下的控制来影响海洋食物链过程，但食物链结构的具体后果取决于季节。

**地中海岛屿生物多样性和气候变化：过去1万年和未来**——Mediterranean island biodiversity and climate change: the last 10,000 years and the future. *Biodiversity and*

*Conservation*, 2016, Vol. 25, No. 13.

地中海岛屿是全球生物多样性的热点地区，是世界上最易受气候变化影响的地区之一。事实上，已经有越来越多的证据表明该区域生态系统中的生物存在对气候变化的响应。这些包括物候变化、物种和植物群落的海拔上升变化；尽管对于不同的分类单元，证据可能常常是截然不同的。威胁也很明显，主要是来自大多数地方性物种，而山区和沿海地区的物种可能受影响最大。气候变化下地中海岛屿的生态保护也需要考虑其他因素：处在三大洲十字路口的位置、具有共同的环境特征、在大小和地形上的巨大变化等等。气候变化与不断变化的旅游愿望和农业实践的协同作用将在中期改变岛屿景观，并为生物多样性保护提供进一步的挑战。气候变化、土地利用变化、生境破碎化和旅游业的综合影响难以预测。此外，岛屿上有限的空间（特别是生境的可用性和气候范围的限制）阻碍了物种范围的扩大。因此，未来的研究重点是改善气候预测，以提高对生态对气候变化响应的理解，吸收岛屿生物地理学的经验教训、构建空间规划的具体适应措施。

**设计生态气候变化影响评估，以反映主要气候驱动因素**——Designing ecological climate change impact assessments to reflect key climatic drivers. *Global Change Biology*, 2017, Vol. 23, No. 7.

确定生态系统的气候驱动因素是评估其对气候变化脆弱性的关键一步。物种或系统最敏感的气候维度（如平均或极端）可以指导预测

生态影响和脆弱性的方法决策。然而，将气候预测与生态模型相结合的科学工作流程很少得到明确的关注。美国地质调查局的Sofaer等回顾了全球气候模式（GCM）在不同变化维度上的表现，并比较了将GCM输出集成到生态模型中的框架。在对气候平均状态敏感的系统，根据几个普通大气环流的平均预测变化进行生态影响评估是很简单的。对极端气候敏感的生态系统可能受益于所谓的“模型空间”方法：对基于历史和未来时期模拟气候的生态预测进行比较。这种方法利用了气候模式中使用的试验框架，在这个框架中，历史气候模拟作为未来预测的控制。此外，它可以捕捉气候极端的强度和频率的预测变化，而不是假设未来的平均状况将决定未来的极端事件。鉴于最近强调气候极端事件的生态影响，本研究描述的策略将适用于跨物种和系统。研究还强调了气候模式和数据产品选择的实际考虑，强调气候变化信号的空间分辨率一般比降尺度后的气候模式输出的网格单元更粗。本综述说明了气候模式的输出是如何推导和降尺度的，从而可改善生态建模中气候数据的选择和应用。

**气候变化对中美洲小农农业和生态系统影响的区域模型**——Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Climatic Change*, 2017, Vol. 141, No. 1.

气候变化将对中美洲的农业、生态系统和农民生计产生严重影响。小农农业尤其脆弱，因为他们的生计依赖于农业和生态系统服务。迫切需要制定国家和地方适应措施，以减少这些影响，但历史气候变化的证据太少。建模工作有助于弥补这一差距。在此，美国贝蒂和戈登摩尔科学和保护国际中心的Hannah等回顾了过去十年来对中美洲农业和生态气候变化影响的模拟研究。这一综述对气候变化的预期影响提供了深刻见解，并提出了

有助于减少这些影响的政策行动建议。模拟表明,未来气候驱动的变化通常是降低了中美洲作物的适宜性。值得注意的是,作为该地区的核心经济作物,咖啡的适宜性下降。生态系统模型表明,气候驱动的变化更可能发生在低海拔和高海拔的山地森林过渡区。脆弱性模型表明,该地区许多小农农业都有一个或多个使他们处于危险之中的脆弱性因素。最初的适应策略可以由这些现有的模拟结果来指导。研究认为,对气候变化生态响应进行更稳健的模拟、改进该地区在气候模拟中的代表性、模拟气候对作物产量和疾病(尤其是咖啡叶锈病)的影响是未来研究的重点。

(以上由侯美亭选编)

### 陕西省武功县猕猴桃种植气象条件分析——《陕西农业科学》2016年第62卷第3期

武功猕猴桃是陕西省咸阳市武功县的特产。全县猕猴桃种植面积达5733.3 hm<sup>2</sup>,形成了以武功大庄现代农业示范园区为主的猕猴桃产业带,建立了多个猕猴桃种植示范基地,产业规模和生产水平逐年上升,产业效益凸现,猕猴桃产业已经成为武功县具有市场竞争优势的特色产业和农民脱贫致富的支柱产业。武功县猕猴桃种植区既有猕猴桃正常生长所需的光、温、水等气候资源条件,但又是气候条件较为敏感的地区,不利的气象条件又给猕猴桃生长发育带来重要影响。马文等分析了气象条件对猕猴桃生长发育的影响,对影响猕猴桃生产的农业气象灾害进行了分析研究,给出了武功县猕猴桃种植区不利气象条件,为趋利避害发展猕猴桃生产提供了科学依据。

### 丽水市生态气候休闲养生适宜性分析——《气象与环境科学》2016年第39卷第3期

李正泉等选取反映气候综合状况的4项气候指数和表征生态环境质

量的5项生态指标,对丽水市生态气候的休闲养生适宜性进行了分析。分析结果表明:丽水气候全年有8个月的人体舒适度气象指数BCMI等级达到“舒适”和“较舒适”级别,其中“舒适”级别有4个月;有11个月的气候适宜旅游度假(度假气候指数HCI>60),其中“很适宜”级别月份有5个,“特别适宜”级别月份有1个;丽水冬季气候风寒指数WCI值在550 kcal/(m<sup>2</sup>·h)以下,极少出现严寒天气,气候仅会对人体产生弱度冷胁迫;夏季丽水气候温湿度相对较高,尤其是7月温湿指数THI值可达80以上,城市区域的温湿胁迫较为强烈。丽水市生态环境优质,森林覆盖率为80.8%、物种丰度指数达0.96、断面水质达标率为98.9%、优良空气天数达360 d,并拥有14个国家4A级旅游景区。国内21座城市生态气候数据的对比分析显示,丽水市气候指标占优、生态指标领先,其休闲养生适宜性在国内城市中具有突出优势。

### 气象在生态文明建设中的作用研究——《环境与发展》2016年第4期

生态文明建设与气象息息相关。王云以气象事业发展为切入点,探讨了气象在生态文明建设中的作用。其指出气象在生态文明建设中的作用主要体现在公共气象服务融入生态文明建设、气象防灾减灾保障生态文明建设、环境气象服务生态文明建设、应对气候变化推进生态文明建设、气候资源开发与利用支撑生态文明建设、气象文化助力生态文明建设等方面。新状态下,只有拓展气象服务发展新的理念、完善气象防灾减灾体系建设、促进环境气象业务上新的台阶、强化应对气候变化发展战略、优化气候资源可持续利用方式、用创新机制构建气象生态文明的法制框架和宣传氛围等工作,才能实现人与自然和谐相处,开拓气象生态文明发展新路子。

### 农业物联网测控系统的开发与应用——《贵州农业科学》2016年第44卷第8期

彭志良等针对贵州省的生态气候条件和果蔬生产的实际需要,采用多种网络技术融合的农业物联网远程测控方案,开发适宜贵州果蔬生产管理的网关、数传、采集控制等ZigBee无线网络设备,开发集数据采集、设备控制、远程传输、存储管理、网络发布、视频监控等为一体的物联网测控系统,建立不同地形地貌、种植模式环境下的8个127.8 hm<sup>2</sup>果蔬物联网应用示范基地,推动果蔬生产基地的标准化建设,产生了良好的社会、经济效益。如关岭县板贵乡三家寨村火龙果物联网应用示范基地田间监测与测产,节水节肥50%,每批次单株结果增加1个,单果重增加0.07 kg,优果率达81.6%,增产78.3%;普定玫瑰种植基地节水70%左右,节肥45%;普定梨树种植基地节水节肥超过50%。

### 长白山气象为生态服务现状——《吉林农业》2016年第24期

林涛等指出,长白山生长着茂密的天然次生林、人工林和原始森林,森林覆盖率较高,森林生态系统完整,生物种类十分丰富,降水丰沛,水资源和矿产资源丰富,是吉林省乃至东北亚生态环境的重要屏障,长白山气象局开展生态林业气象服务意义重大。目前主要服务内容:森林火险气象等级预报和预警服务;人工增雨作业技术为防、扑灭森林火灾提供有力援助;为林业部门调整林业生态结构和布局、推广引进和培育优良新品种、科研试验等提供专题气象服务。2016年开始的森林机构深入开展长白山生态修复保护区气象服务,对长白山生态保护和修复有着重要的意义,同时可以带来十分显著的经济效益。

(以上由张萌选编)

## 编辑选编

编辑：张萌 侯美亭

**叶物候悖论：为什么变暖在温暖的地方更为重要**——Leaf phenology paradox: Why warming matters most where it is already warm. *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 209.

气候和生态系统特性之间的交互作用控制着物候对气候变暖和干旱的响应，而目前对这些交互作用仍然知之甚少。为了确定这些交互作用的贡献，美国杜克大学的Seyednasrollah等使用空基遥感植被指数检测了美国东南部沿气候梯度和不同生态区的叶片生长情况。通过建立一种分层状态——空间贝叶斯模型，量化了气温、干旱程度和冠层热胁迫是如何对山区到沿海平原地区的叶片展开产生影响的。研究使用了2001—2012年美国东南部59个观测点的植被生长开始期的气候数据、日植被指数和冠层表面温度数据。研究结果证实了沿不同生态区生态系统特性与气候变量之间存在很强的交互作用。研究发现，在山区，春季叶片生长开始得更快，而沿海地区森林对年际温度异常的敏感性更大。尽管所有地区对气温变暖的敏感性都在下降，但研究发现了一种生态系统的相互作用：落叶林为主的森林比落叶林较少的森林对气候变暖的敏感性更低，这很可能是由于常绿物种在整个季节中叶片持续地存在。山地森林的生长开始期更容易受到日益加剧的干旱和水分不足的影响，而沿海地区则相对具有生态弹性。随着冠层热胁迫（定义为冠层与空气的温度差异）的增加，叶片在干旱年之后生长变得缓慢，在湿润年之后生长加速。

**1587—2008年东北多年冻土区夏季地温的重建**——Reconstruction of the regional summer ground surface temperature in the permafrost region of Northeast China from 1587 to 2008.

*Climatic Change*, 2018, Vol. 148.

为了延长东北多年冻土地区的历史气温记录，沈阳农业大学的张先亮等基于兴安落叶松年轮宽度年表重构了过去4个世纪的地温（GST）数据。通过对7个相互之间存在很好相关性的标准年轮年表进行平均，产生了一个区域平均年代学数据。GST是该地区树木生长的主要限制因素。通过分析GST日数据对树木生长产生强烈影响的天数，研究发现5月30日—8月26日（夏季）的GST与站点的树木年轮年表数据呈现高度相关。1971—2008年，夏季GST与地区平均树木年轮年表的相关系数达到0.704（ $P < 0.001$ ），基于此，重建了1587—2008年的GST数据。重建后的GST解释了1971—2008年期间实际GST方差的49.4%，捕捉了4个暖期（1597—1603，1716—1723，1781—1788和1925—1929年）和3个冷期（1639—1647，1686—1711和1799—1805年）。重构后的GST与小冰期北半球温度一致，1857—2008年的升温速率与之前报道的小兴安岭温度重构相似。重构后的GST的低频变化与冻土融化深度相一致。重建的GST是本研究地区最长的GST记录，可作为冻土融化深度的参考。

**从Sentinel-2光谱波段反演冠层叶绿素含量，以估计冬小麦集约种植系统的氮吸收**——Retrieval of the canopy chlorophyll content from Sentinel-2 spectral bands to estimate nitrogen uptake in intensive winter wheat cropping systems. *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 216.

在集约化农业系统中，减少氮肥对环境的影响最常见的方法之一是调整作物需要的N输入。这一调整通常与氮素营养指数（NNI）有关，该指数基于作物冠层中最大和实际吸收的氮（分别表示为 $N_c$ 和CNC）的概念。因此，利用可自由获取的卫星图像在田间尺度上大范围精确估计 $N_c$ 和CNC是需要解决的关键问题。比利

时鲁汶大学的Delloye等研究表明，反演自Sentinel-2（S2）卫星数据的小麦CNC和冠层叶绿素含量（CCC）之间存在高度相关（ $R^2 = 0.90$ ）。CNC和CCC的反演基于人工神经网络（ANN）方法。CNC反演误差较低，分别是4和21 kg/hm<sup>2</sup>（依赖于生长阶段），这对于评估NNI非常有潜力。本研究得出了4个主要结果：冠层水平的重要性、与品种关系的独立性、对不同生长阶段的依赖、对于精准农业可能只需要使用10 m S2通道来估算N。同时，分析了3种与CNC和 $N_c$ 相关的生物物理变量的估计精度：绿色面积指数（GAI）、叶叶绿素含量和CCC。研究指出，像素的异质性影响了GAI的估计精度，红边通道在生长季节增加了GAI估计精度。

**气候变暖对北方树种光合作用的影响取决于土壤湿度**——Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture. *Nature*, 2018, in press.

气候变暖将通过热效应和改变土壤湿度两个方面来影响光合作用。这两个方面对于森林来说都非常重要，因为全球森林的大部分区域都在两种时期之间波动：低温限制了光合作用的时期和土壤水分可能会限制碳吸收的时期。美国明尼苏达大学的Reich等展示了随着北方森林的生长季节从雨季过渡到适度的干旱期，气候变暖的影响从正到负。在一项针对温带和北方森林11种共生的年轻树种为期3年的露天变暖试验中，对于处在最湿润土壤（占生长季的1/3）的温带森林，3.4℃的增温增加了光饱和净光合作用和叶片扩散导度。在所有11种植物中，叶片扩散导度以及由此导致的光饱和净光合作用在干旱期下降，而且在气温变暖试验下的植物中的下降幅度比在常温下的植物大得多。因此，对于11个物种，在土壤最干燥的时段内（占生长季的2/3），气候变暖降低了光饱和净光合作用。因此，无论是在干旱期间还是在有规律发生的、在生长季节内的适度干旱时期，

低土壤湿度都可能会降低甚至逆转气候变暖对干旱、季节性寒冷环境下光合作用的潜在益处。

(以上由侯美亭选编)

### 北极地区快速升温的驱动机制研究进展——《科学通报》2018年第63卷第26期

受全球持续暖化影响,北极地区近地表气温正在以超过全球平均两倍以上速度急剧升高,称为“北极放大”效应。北极的快速升温与地气系统的能量收支异常直接相关,学术界基于模式模拟、卫星观测等多种手段开展了大量研究工作,并提出了一系列理论和证据,尝试从能量收支的角度对“北极放大”效应的驱动机制进行解释。曹云锋等对驱动“北极放大”的各种潜在机制的理论基础进行了阐释,并回顾了各种驱动机制的研究进展。综合现有研究表明,北极的快速升温既与受北极独特的地理、大环境影响形成的多种辐射反馈机制(如海冰反照率辐射反馈机制、边界层大气逆温引起的温度梯度正反馈机制、普朗克反馈机制等)有关,也可能是由地球大气、海洋环流异常引起的极向物质与能量传输增强所致。通过对现有研究进行综合分析指出,受研究方法存在一定缺陷、高质量且时空完整的长时序辐射产品的缺乏,以及探索不同因素之间关联机制的综合性研究的缺少等影响,目前对于北极地区快速升温的关键驱动机制仍无定论,不同理论之间存在很大的分歧。进一步指出,长时序、高质量的地表与大气辐射产品研发,研究方法的进一步优化与各种气候因子变化对地气系统能量收支扰动的更准确量化,以及针对不同气候因子之间内在关联机制的综合分析,将是未来提升北极地区气候变化研究的重要方向。

### 陆地下垫面与环境气流对锋面气旋发展过程影响的理想试验——《地球物理学报》2018年第61卷第8期

地面摩擦和大尺度流场是影响

锋面气旋结构演变的重要因子,吴雪剑等使用WRF模式并采用湿物理方案,通过理想化试验,综合考虑地面摩擦、气旋式扰动相对于急流位置和大尺度流场对锋面气旋结构变化的影响。结果表明:当仅考虑单一因子时,气旋式扰动位于急流南侧和辐合流场有利于气旋形成Shapiro-Keyser(S-K)模型结构。当同时考虑地面摩擦和大尺度辐合时,气旋式扰动位于急流北侧的气旋发展整体向经典的挪威气旋模型转变;扰动位于急流南侧的气旋发展则整体呈现S-K模型结构,此时辐合流场有利于S-K模型结构出现。当同时考虑地面摩擦和大尺度辐散时,扰动处于急流北侧的气旋呈现挪威气旋模型结构;由于气旋式扰动穿越急流和辐散流场同时有利于暖锋后弯发展以及冷暖锋距离加大和锋消,扰动处于急流南侧的气旋呈现典型S-K气旋模型结构。这个结果解释了在东亚大陆地区辐散场形势下出现的S-K模型结构气旋个例。

### 气候变化背景下1981—2010年中国小麦物候变化时空分异——《中国科学(地球科学)》2018年第48卷第7期

物候是气候变化可靠有力的指示物之一,作物物候变化及其影响机制研究对于应对气候变化和指导地区农业生产有重要意义。由于缺乏长时段连续观测数据,全国尺度的作物生长季内连续多个物候期的变化,尤其是物候期变化趋势的时空分异特征报道较少。刘玉洁等基于全国4个小麦种植区内48个农业气象站1981—2010年的长序列物候观测记录,量化了小麦10个关键物候期和相应生长阶段长度的时空变化。结果表明,1981—2010年,在小麦生长季内气候显著变化背景下,小麦物候也发生了显著变化。在全国尺度,播种期、出苗期、三叶期和乳熟期平均推迟幅度分别为0.19, 0.06, 0.05和0.06 d/a;而分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期和成熟期平均提前幅度依次为0.02,

0.15, 0.21, 0.17, 0.19和0.10 d/a;营养生长阶段长度和生长季长度分别平均缩短0.23和0.29 d/a,而生殖生长阶段长度平均延长0.06 d/a。不同种植区小麦物候期及生长阶段长度的变化趋势不尽相同。小麦生长季长度对生长季内气候因子变化敏感度的空间分异特征在春、冬小麦之间表现得尤为突出。春(冬)小麦生长季长度均随着生长季内平均温度上升而缩短(延长);所有种植区小麦生长季长度均随生长季内降水和日照时数增加而延长。其中,春小麦生长季长度对降水的敏感度小于冬小麦,但对日照时数的敏感度大于冬小麦。在进行农业生产管理时应因地制宜,充分考虑小麦物候变化及其对不同气候因子变化响应的空间分异特征。

### 改进的CLDAS降水驱动对中国区域积雪模拟的影响评估——《气象》2018年第44卷第8期

积雪因其特定的属性在气候变化和水文循环中扮演着重要角色,在大气和陆面之间起到了调节能量和水交换的显著作用,而陆面驱动数据的质量直接决定着模式对积雪的模拟效果。师春香等采用CLDAS(CMA Land Data Assimilation System)和改进后的降水驱动(CLDAS Prcp)分别驱动Noah3.6陆面模式对积雪变量进行模拟,并对中国主要的积雪区东北区域、新疆区域、青藏高原区域的积雪覆盖率、雪深、雪水当量的模拟效果进行了评估。结果表明,CLDAS Prcp改善了原有驱动在冬季由于低估降水所造成的模拟积雪量偏少的情况;东北区域模拟结果与观测的时间变率最为一致,积雪覆盖率、雪深、雪水当量的相关系数分别为0.42, 0.78, 0.93;而雪水当量的改进效果最明显,均方根误差和偏差分别减小了54.8%和83.1%,相关系数提高了0.47;同时,CLDAS Prcp不仅能反映积雪变量的年际变率,而且能够较准确地反映出强度较大的突发降雪事件。

(以上由张萌选编)

## 《《涓流细雨》》 编辑：贾朋群

“Nordhaus was in a position early on to think about climate change from a human-welfare and well-being perspective. Without him, there wouldn't be such a subject of climate economics.”

“Nordhaus是早期从人类福祉的角度思考气候变化的学者，没有他也不会有气候经济学这样的学科。”

——2018年诺贝尔经济学奖由两位美国经济学者William Nordhaus和Paul Romer分享，以表彰他们将气候变化和技术改变融入宏观经济学之中，后者研究经济学作为一个整体的行为，而在讨论气候变化对社会经济的影响时，整体视角是最佳的路径。针对本次获奖者，德国波茨坦气候影响研究所主任Ottmar Edenhofer如此评论来自耶鲁大学、创建了气候变化经济学的获奖者之一Nordhaus的学术思想和影响。

“As a first step to demonstrating how this type of satellite measurements could be used, we chose nine sites in all – sites in the US, Europe, Africa and Australia. We took four satellite missions that observe soil moisture and we were able to measure the amount of water applied for irrigation between two consecutive soil-moisture measurements from space.”

“第一步要展示这类卫星的观测如何被利用，我们选择位于美国、欧洲、非洲和澳大利亚的总计9个地点。我们利用4种可观测土壤湿度卫星，从空间测得两次连续土壤湿度观测之间灌溉的水供给量。”

——世界上约70%的淡水资源被用于农业灌溉，这也是人类“干扰”全球水循环最主要的方式。意大利学者Luca Brocca领导的团队致力于用卫星探测数据解释农业灌溉用水的细节，他对这项即将发表的研究成果进行了如上表述。

“As glaciers thin around the world, they are modifying their landscapes dramatically. In the case of Taan Fjord, the result was a massive tsunami. The tsunami was triggered by a massive landslide in October 2015 that occurred above a glacier that had retreated dramatically in the late 20th century. We need to better understand the risk posed by these steep slopes in a changing climate. Our results call attention to an indirect effect of climate change that is increasing the frequency and magnitude of natural hazards near glaciated mountains.”

“当全球冰川萎缩时，会大幅度改变其特征。对Taan Fjord冰川而言，带来的结果就是巨大海啸的发生。海啸因2015年10月发生在20世纪后期严重退缩的冰川之上的大规模滑坡触发，我们需要更好地认识气候变化中这些陡坡造成的风险。我们的结果提示要关注气候变化的间接影响，即冰川山区附近自然灾害的频率和量级的增加。”

——气候变化给冰川地区带来的变化无疑是最大的。2015年阿拉斯加发生浪高达200 m的海啸，是有记载以来的最大记录。这次海啸因冰川融化引发，美国华盛顿大学地球科学助理教授Dan Shugar及其团队针对冰川消融带来的灾害风险展开研究并发表了研究结果。

“Clouds play a major role in the Earth's climate by

transporting heat and moisture, reflecting and absorbing the sun's rays, trapping infrared heat rays and producing precipitation. But they can be as small as a few hundred meters, much tinier than a standard climate model grid resolution of 50 to 100 kilometers, so simulating them appropriately takes an enormous amount of computer power and time. But a lack of supercomputer power, or the wrong type, means that this is still a long way off. Meanwhile, the field has to cope with huge margins of error on issues related to changes in future rainfall and how cloud changes will amplify or counteract global warming from greenhouse gas emissions.”

“云通过传输热量和水汽，反射和吸收太阳辐射，吸收红外热辐射和产生降水，在地球气候中起重要作用。但是云可以小到几百米，较标准的气候模式50~100 km的网格分辨率小很多，所有模拟云需要消耗大量的计算资源和时间。然而，缺乏超级计算能力或计算方式不妥意味着还有很长的路要走。与此同时，这一领域含有与未来降水以及云变化如何放大或抵消温室气体排放导致变暖等相关问题的巨大误差。”

——美国和德国学者面对气候变化模式中云模拟的难题，试图探索机器深度学习是否能够带来一种有效、客观和数据驱动的其他方案，能够快速应用于气候预测。该方法基于模仿人类思考和学习技能的算法，试图解决气候模式次网格问题。研究成果已经在PNAS发表，论文第二作者、助理教授Michael Pritchard对这些工作的意义，表达了上述看法。

“These contracts represent another step toward bringing commercial sector innovation to NOAA's mission of delivering life-saving weather forecasts and warnings. By collaboratively testing commercial sector capabilities and new business models, we continue to optimize the impact of our observations and reduce costs for taxpayers.”

“这些合同代表将商业领域创新纳入NOAA挽救生命天气预警使命的又一个步骤。通过合作验证商业圈的能力及新的商业模式，我们继续优化观测的作用和减轻纳税人的负担。”

——NOAA宣布继续投入840万美元购买3家私人卫星数据商的卫星无线电掩星数据。这3家中标机构（获得资助经费）分别是Spire Global（142.5万美元）、PlanetIQ（350万美元）和GeoOptics（344万美元）。据悉，这是该机构第二次资助私人卫星数据提供商，2016年NOAA曾经分别向Spire Global（37万美元）和GeoOptics（69.5万美元）提供了总计超过100万美元的私人商业卫星天气数据合同。在美国终止与中国台湾合作开展第二阶段无线电掩星气象数据项目后，今年NOAA显然加强了这一商业天气数据购买示范项目的投入力度，该局的卫星和信息局官员Karen St. Germain针对本次购买合同表示了上述看法。

““We determined that in the first eight days post-landfall, 30 percent of Harvey's stormwater was captured or stored on land -- most as standing water that sits on the surface. Around 60 percent was lost or drained into the ocean and Galveston Bay over the first few days after the storm, and the remaining 10 percent was lost via evapotranspiration, or a combination of evaporation and plant transpiration,” said first author Chris Milliner of NASA's Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, California.”

“我们确定，在登陆后的前8天，“哈维”飓风导致降水中有30%被捕获或储存在陆地上——最主要的是以地面上的积

水形式。在风暴过后的最初几天,大约有60%的水流失或排入海洋和加尔维斯顿湾,剩下的10%因蒸发蒸腾作用或者是蒸发和植物蒸腾作用的结合而消失。”

——2017年“哈维”飓风引发的得克萨斯州东南部降水,过程雨量达到1.5 m,成为美国创记录的最湿飓风。那么这些降水在飓风登陆后流向哪里了?美国NASA学者基于GPS技术在最新的研究里回答了这个问题,该论文的第一作者,来自JPL的Chris Milliner描述了这次飓风降水的去处。

“ESA’s SMOS mission can give us really interesting new information for operational storm forecasting, which we hope to use along with our traditional sources of data. SMOS measurements can help us keep track of the structure of a dangerous storm. Combining SMOS data with that from its US counterpart SMAP mission, will give us more timely information which is essential for monitoring major storms.”

善变的美国总统 Donald Trump 针对气候变化的表态,根据媒体报到,似乎发生了某种改变,以下是其接受记者 (Lesley Stahl) 采访时最开始的几句对话:

Lesley Stahl: Do you still think that climate change is a hoax?  
(你还认为气候变化是骗局吗?)

Donald Trump: I think something’s happening. Something’s changing and it’ll change back again. I don’t think it’s a hoax, I think there’s probably a difference. But I don’t know that it’s manmade. I will say this. I don’t wanna give trillions and trillions of dollars. I don’t wanna lose millions and millions of jobs. I don’t wanna be put at a disadvantage.

(我想是发生了什么。有时有改变但最后还要变回来。我不认为它是骗局,我想有可能有差别。但是我不知道它是人为造成的,我只能这么说。我不想投入大量金钱。我不想失去大量工作岗位。我不想处于不利地位。)

Lesley Stahl: I wish you could go to Greenland, watch these huge chunks of ice just falling into the ocean, raising the sea levels.  
(我希望你能去格陵兰,看看巨大冰块掉进海里,让海面抬升。)

“ESA的SMOS卫星确实能够提供用于风暴预报的新信息,这些新数据我们将和传统数据源结合利用。SMOS观测能帮助我们跟踪危险风暴的结构。将SMOS与美国类似的SMAP卫星结合起来,能提供监测风暴更及时的核心信息。”

——2018年飓风和台风分别在世界各地造成灾害。在对这些灾情进行预测和监测过程中,欧洲空间局 (ESA) 发射的SMOS卫星 (Soil Moisture and Ocean Salinity, 土壤湿度和海洋盐分卫星) 发挥着独特作用。SMOS主要通过L波段微波传感器获得亮温图像,获得地表辐射,从而得到土壤湿度和海洋盐分信息,该图像具有穿透云和雨层的能力。强烈风暴能干扰这些信息的获取,但反过来也提供了风暴本身的信息 (如风速等)。美国海军研究实验室的Buck Sampson介绍了该卫星针对风暴预报的用途。

Donald Trump: And you don’t know whether or not that would have happened with or without man. You don’t know.  
(可你不知道有人类和没有人类时这些是否会发生,你不知道。)

Lesley Stahl: Well, your scientists, your scientists--  
(好,你的科学家,你的科学家。。。。。。)

President Donald Trump: No, we have--  
(不知道,我们有科学家。。。。。。)

Lesley Stahl: At NOAA and NASA--  
(在NOAA和NASA。。。。)

Donald Trump: We have scientists that disagree with that.  
(我们有科学家不同意这样的说法。)

(from back cover)

## Survey

2 Picture/ Number/ Ranking

## Feature

27 Peng Yuxiang, Liu Guoqiang, Tian Ying, Li Dequan, Che Yunfei/  
The Construction of Weather Modification Ammunition Internet  
of Things management system in Guizhou Province

## Forum

23 Luo Honglei, He Ru, Su Zhi, Zhou Shaoyi/ The Development and  
Suggestion of Climate Feasibility Demonstration in Guangxi  
105 Feng Qi, Xia Zhihong, Xiao Fei, Tong Wenting/ Discussion on the  
Establishment of Ecological Compensation Mechanism for River  
Basin Water Resources in the Construction of Ecological Gallery  
109 Zhang Huaisheng, Ai Jinsong, Wen Huajun, Zhang Yuming, Li  
Pengfei, Yang Tao, Zhu Jianqiang/ The Environmental Status and  
Protection of the Habitat of Shishou Elk

113 Shuai Wenwei, He Ju, Huang Zhong/ Analysis and Climate  
Change Adaptation Strategy of the Tea Industry in Tianmen City

116 He Chengcheng, Zhou Xia, Yang Feng, Zhou Lili/ Climate  
Change in the Jiangnan Plain and its Influence on Agroecology and  
Adaptation Strategy

## Reading

### Book Review

119 Zhu Yujie, Hao Yiyi/ Exploration of Meteorological Services  
for Farmers, Agriculture and Countryside  
120 Hou Meiting/ Ecological Climatology: Concepts and  
Applications, Second Edition

### Information

123 Selected Papers

### 《全球升温1.5°C特别报告》 2018年10月

IPCC 在这份新的评估报告的全名为《IPCC 在加强全球应对气候变化威胁、实现可持续发展和努力消除贫困的背景下，关于全球升温高于工业化前水平 1.5°C 的影响和相关全球温室气体排放路径的全球升温 1.5°C 特别报告》。报告指出，将全球变暖限制在 1.5°C 需要社会各方进行快速、深远和前所未有的变革。将全球变暖限制 1.5°C 对人类和自然生态系统有明显的益处，同时还可确保社会更加可持续和公平。



### 《到2030年，粮食和农业研究的科学突破》 2018年8月

美国科学院多个委员会合作出版的这份报告，瞄准粮食和农业这一涉及多领域的主题，在9个章节里阐述相关科学问题，尤其是在最后一章给出了到2030年战略。

### 《新科学家》 2018年8月

这本科普期刊本期封面报道瞄准了2018年夏季的“热点”，探讨了全球热浪滚滚的原因所在：被称为大西洋搅拌器的海洋环流循环出现了异常，海洋上的改变，带来大气更多极端事件发生。



### 《农业商品市场2018》 2018年9月

联合国发布的这份报告，试图研究农业贸易、气候变化与粮食安全之间的关系，给出了未来全球在气候变暖情景下农业产量增加和减少区域的分布。

## 媒体扫描 贾明群 编辑

# MEDIA SCAN

### 《温室气体移除》 2018年10月

这篇由英国皇家工程科学院和英国皇家学会联合发表的报告指出，借助温室气体移除，英国可以在2050年之前实现碳净零排放。本报告也是第一次对温室气体移除（GGR）技术的实际应用进行评估。



### 《哲学学报A》 (2018年11月)

这本在网上提前出版的期刊，本期主题为“控制人工智能：伦理、法律和技术的机会与挑战”。专辑的9篇文章围绕目前科技界最为热门的主题之一，就AI时代的技术发展、印度AI政策、数据保护、AI系统的法律地位和技术渗透的媒体生态等，给出最新研究成果。

### 《哲学学报B》 (2018年11月)

这本在网上提前出版的期刊，本期主题为“2015/2016年厄尔尼诺对热带陆地碳循环的影响：分布、机制和影响”。专辑的22篇文章就这一最强气候信号与生物圈碳循环的关系进行了全面探讨，给出了很多最新研究成果。



### 《2017年气候状况报告》 2018年8月

美国气象学会继续召集65个国家的524位学者，对2017年气候进行分析，完成了这篇地球气候的“诊断报告”。报告指出，2017年地球大气二氧化碳浓度较前一年增加了2.2 ppm，是最近80万年以来的最高值。此外，还详尽给出了全球变暖的新例证，如6个永久冻土带中的5个出现了冻土高温等。

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)  
Sponsor CMA Training Centre  
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological  
Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

### Associate Editors-in-Chief

Wang Zhiqiang  
Xiao Ziniu  
Zhai Panmao  
Luo Yunfeng  
Li Weijing  
Hu Yongyun  
Tan Zheming  
Sun Jian  
Fei Jianfang  
Zhao Licheng  
Zhang Peng  
Guan Zhaoyong  
He Jianxin  
Huang Jianping  
Liao Xiaohan  
Jia Pengqun (executive)

### Managing Editors

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

### Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

### Editorial office

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

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,  
Beijing 100081, China  
Tel: +86-10-68409927/68409933  
Email: amst@cma.gov.cn  
<http://library.cma.gov.cn/amst>  
<http://weibo.com/2115232930/profile>

Printed by  
Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973  
CN 10-1000/P  
RMB 30.00

## Main Contents

### (Special Issue: Ecological Meteorology in the Yangtze River Basin)

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

### Article

- 6 Zhao Junfang, Jiang Yueqing, Zhan Xin, Kong Xiangna/ Advances in Research of Impacts of Aerosol Pollution on Crop in China
- 11 Jiang Lingfeng/ Analysis on the Characteristics of Flood Disaster Damage in China in Recent 76 Years
- 17 Li Guoliang, Li Jun, Li Xiang/ Analysis of Characteristics of Lightning
- 36 Ai Jinsong, Sun Yuxuan, Liu Kaiwen/ Comparison of Winter Wheat Output Forecast Methods in Jingzhou
- 40 Qin Pengcheng, Xia Zhihong, Chen Weiliang/ Construction of a Comprehensive Index for Assessing Agroclimatic Patterns by Year and Application on the Jiangnan Plain
- 46 Tan Jianghong, Chen Weiliang, Wang Shanshan/ Using a Machine Learning Method for Temperature Forecast in Hubei Province
- 51 Zhang Liwen, Liang Yitong, Li Lan/ Characteristic Analysis of Flood Monitoring in Wuhan City Based on GF-1 Remote Sensing Data
- 58 Chai Zhengang, Hu Peimin, Xiong Qinxue/ The Extraction Method of Rape Oil Planting Distribution Using Per-Field Classification Based Optical and Sentinel-1 SAR Images Data
- 63 Liu Kequn, Zhou Shouhua, Huang Yongping, Tang Yang, Li Rendong/ The Impact of Land Use Change on Flood Disaster in the Honghu Lake Watershed
- 67 Deng Yanjun, Zhao Zhuoxun, Li Ling, Zhang Lunjin/ Correlation Analysis of the Air Quality and the Meteorological Elements in Jingzhou from 2014—2016
- 72 Fan Jian, You Hui, Liu Kaiwen, Gao Huadong/ Estimation Model of Leaf Area Index of Winter Wheat Based on Hyperspectral Reflectance at Different Sowing Dates
- 78 Liu Tao, Xia Zhihong, Zhu Lang/ Influence of Meteorological Factors on Temporal and Spatial Variation of Water Quality in Changhu Lake, Hubei Province
- 81 Geng Yifeng, Huang Yongping/ Temporal Change and Trend Analysis of the Four Seasons in Jingzhou During the Past 60 Years and the Countermeasures in the Crop Growth
- 85 Liang Yitong, Xia Zhihong, Wen Xiongfei, Liu Jinghui, Zhang Liwen, Deng Yanjun/ Driving Forces of Changes to Water Surface Area for Honghu Lake over 40 Years Based on Satellite Remote Sensing Data
- 91 Liu Jinghui, Wan Jun/ Monitoring Cyanobacteria Blooms in East Lake Using HJ-1 Multi-Spectral Satellite Images
- 96 Huang Duan, Chi Hong, Zhu Lang, Deng Yanjun, Xia Zhihong/ Space-Time Characteristics of Net Primary Productivity of Farmland Vegetation in Jingzhou City
- 101 Wang Kai, Gao Yuan, Liu Min, Pan Hanbiao, Xia Zhihong, Jin Yanqiu, Wang Fangfang/ Evaluation and Comparison on Climate Suitability for Tourism in Lichuan City

(continued in page 128)