

# Advances

in Meteorological Science and Technology

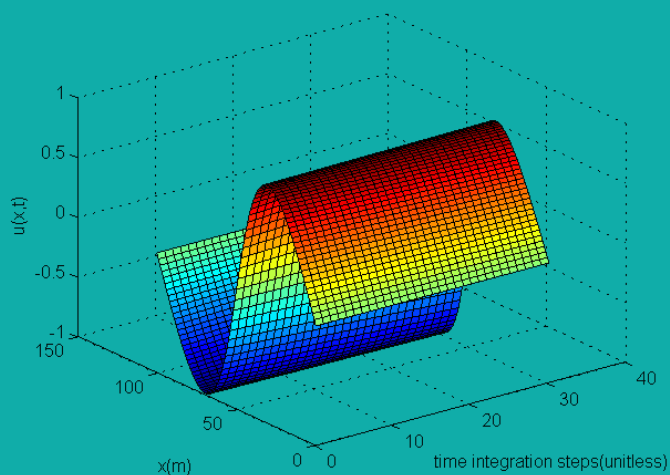
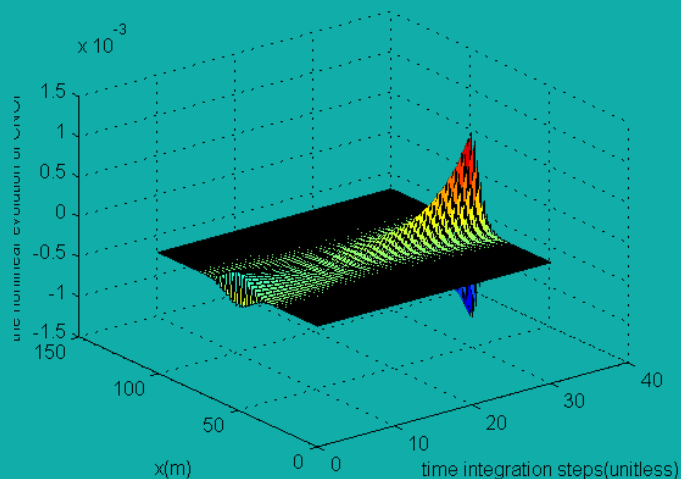
# 气象科技进展

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

## No.6

2016年12月  
第6卷 第6期



### 条件非线性最优扰动

气象科技 **进展**  
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

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

**副主编**

肖子牛 中国科学院大气物理研究所  
翟盘茂 中国气象科学研究院  
罗云峰 中国气象局  
王会军 中国科学院大气物理研究所  
李维京 国家气候中心  
胡永云 北京大学  
谈哲敏 南京大学  
费建芳 解放军理工大学  
管兆勇 南京信息工程大学  
何建新 成都信息工程大学  
黄建平 兰州大学  
廖小平 中国科学院地理科学与资源研究所  
吕世华 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所  
贾朋群 (专职) 中国气象局气象干部培训学院

**常务编委 (按音序排名)**

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

**编委 (按音序排名)**

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

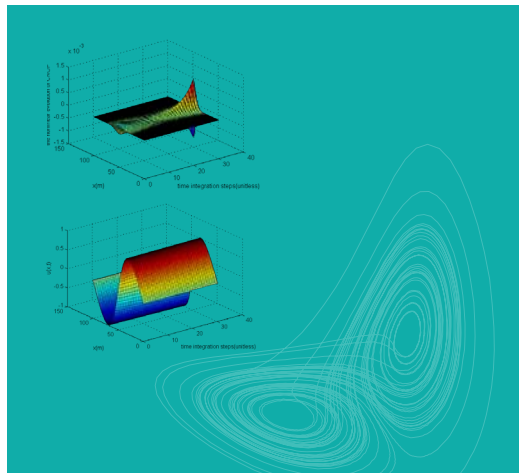
**海外编委 (按音序排名)**

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

**编辑部**

张 萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民  
地址: 北京市中关村南大街46号,  
中国气象局气象干部培训学院 100081  
电话: (010) 68409927/68409933  
邮箱: amst@cma.gov.cn  
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA  
网址: <http://cmalibrary.cn/amst>  
投稿系统: <http://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

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



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

# 目 次

第6卷 第6期 2016年12月

1 许小峰: 主编语

## 研究论文

### 封面报道

6 孙国栋, 穆穆, 段晚锁, 王强, 彭飞: 条件非线性最优扰动(CNOP): 简介与数值求解

### 研究进展

15 史军, 温康民, 穆海振, 刘校辰: 重大工程气候可行性论证进展

22 丁德平, 孔少飞, 朱彬, 张小玲, 赵德龙, 盛久江: “黑碳的农业与生活源排放对东亚气候、空气质量的影响及其气候—健康效益评估”项目研究计划简介

26 丁乃千, 陈正洪: 风电功率组合预测技术研究综述

30 郑朝霞, 周梅, 季致建, 方桃妮, 刘学华: SVM方法在霾识别和能见度预报中的应用

### 专题 气象服务

35 刘鑫, 赵鲁强, 刘娜, 惠建忠, 唐千红: 伊犁河流域春季融雪型洪水危险性评价与区划

42 倪敏莉, 韩乐琼, 赵鲁强: 全国80cm地温分布特征和基于太阳辐射的预测方法

49 宋瑛瑛, 李雁鹏, 陈正廷, 凌柏, 冯宇星, 曹宇钊: 基于消息的气象服务数据加工流水线设计与应用

## 主编语

自古以来,人们不断探索,试图揭开大自然神秘的面纱,但随着人类认知水平的不断提升,“科学”唯一确定的属性——“不确定”逐渐被认知并认可。在大气科学领域,美国著名气象学家E. N. Lorenz于1963年对大气“混沌现象”进行了系统阐述。在进行数值模式的计算中,他发现天气系统的演变结果对初始状态具有极强的敏感性,也就是我们所熟知的蝴蝶效应:“一只南美洲亚马孙河流域热带雨林中的蝴蝶,偶尔扇动几下翅膀,可以在两周以后引起美国得克萨斯州的一场龙卷风。”基于这一对混沌现象的揭示,引发了对大气可预报性的持久、广泛讨论和研究。

Lorenz在1965年又提出了线性奇异向量理论,开启了对可预报性问题的定量研究。他指出当初始扰动充分小、时间短时,可以将非线性项略去,从而消除非线性带来的困扰。但线性理论的缺陷是明显的,随着误差的很快增长,线性方程便不再适用。穆穆等提出了条件非线性最优扰动(CNOP),克服了线性奇异向量理论的局限性,该方法被用于ENSO可预报性、台风目标观测等的方面的研究。本期主打文章《条件非线性最优扰动(CNOP):简介与数值求解》(P6),介绍了条件非线性最优扰动(CNOP)的定义及其在大气和海洋等可预报性研究中的应用。

大气科学研究的最终目的是为各行各业提供有针对性的

天气服务,本期“气象服务”专栏的3篇论文和1篇论坛文章分别介绍了全国80cm地温分布特征及预测方法(P42)、伊犁河流域融雪型洪水危险性评价与区划(P35)、基于消息的气象服务数据加工流水线设计(P49),以及虚拟现实技术在气象影视节目中的应用(P59),为地下管道选址施工、气象防灾减灾,以及气象传播方式的改进提供了方法与建议。也为本刊即将推出的“进展报告2017:气象服务”进行预热。

近期于西安召开的第33届中国气象学会年会聚集了众多来自各个部门的气象从业人员,会议为彼此的科研和业务交流搭建了一个很好的平台。本刊特别组织了有关“数值模式产品应用与评估”和“互联网+与气象服务”两个分会场的评介,以期使读者能对会议讨论内容有所了解。

气象台站作为现代气象科学最早的象征和其发展演变的见证,已经成为气象文化史中物质文化的重要组成部分,是外界认识气象文化最直接的载体。本期“往事钩沉”栏目推出了全新的板块——“台站巡礼”,首期刊载的两篇文章分别聚焦于近代湖北海关气象观测站与民国时期岭南大学的菲文气象观测站。这一板块的设立,希望能够客观整理和呈现这一段历史,客观描述其对中国气象史的影响。

许小峰

## 短论

- 53 汪润民:台风自身涡旋内力与纬度关系简单定性分析

## 论坛

- 56 马晓霞:关于气象类研究生创新能力培养的实证研究——以南信大一次调查问卷结果分析为例
- 59 张媛:气象影视节目虚拟现实技术的应用现状及趋势研究

## 科学观察

- 2 读图 数字 榜单

## 特写

- 62 李婧华,王卫丹:“台风”少年——记“全国青少年科技创新大赛”获奖者汪润民

## 往事钩沉

### 台站巡礼

- 69 冯颖竹,何溪澄:民国时期岭南大学的气象观测
- 71 宋建萍,何晓,苏秀梅,刘立成:近代湖北海关气象观测档案初探——以江汉关、宜昌关、沙市关为例

## 阅读

### 书评

- 64 叶梦姝:20世纪地球物理学新时代的开创——读魏格纳《海陆的起源》

### 会评

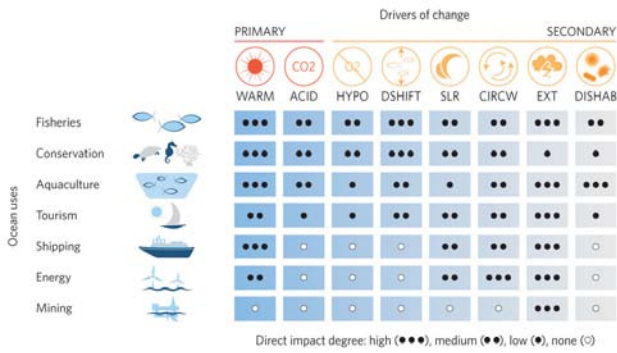
- 65 黄哲,贾朋群:数值预报:气象事业的主战场——第33届中国气象学会年会“数值模式产品应用与评估”分会场评介
- 67 王淞秋,贾朋群:“互联网+”为气象服务提供新天地——2016年气象学会年会“互联网+与气象服务”论坛评介

### 信息

- 21 王婷波:认识碳卫星
- 75 高被引论文选编
- 77 编辑选编
- 79 涓流细雨
- 封3 媒体扫描

封3

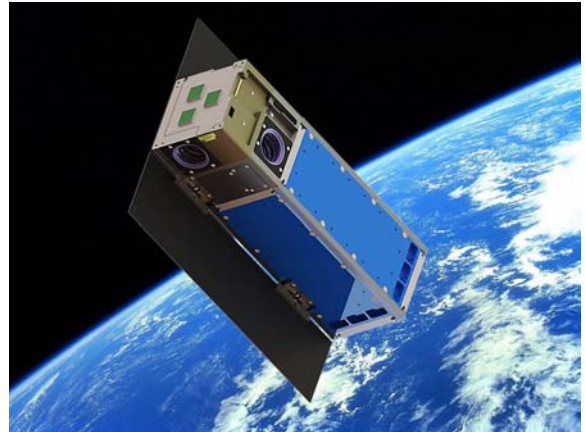




### 海洋利用：规划当先 回避风险

人类生存所需的很多资源来自海洋，然而在气候变化的背景下这种利用需要在时空坐标上进行规划和调整。欧美学者给出气象驱动对不同海洋利用的直接和间接影响，警示相关部门和人群（图中简写词：WARM（变暖）；ACID（酸化）；HYPO（低氧）；DSHIFT（分配改变）；SLR（海平面上升）；CIRCW（环流和风）；EXT（极端事件）；DISHAB（疾病和有害赤潮））。

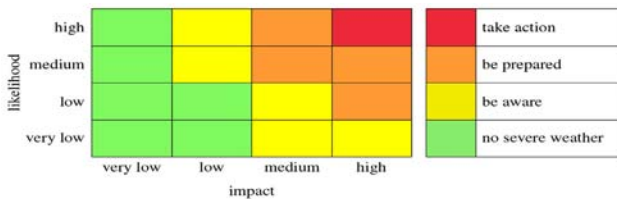
来源：Nature-Geoscience



### NSR：小卫星市场看好

北方天空研究（NSR，一家分析公司）最新发表的关于全球小卫星市场的报告称，重量在1~100kg的在轨卫星数量未来将加倍，达到每年发射375颗，在2015—2025年制造和发射这类小卫星的产值累计达70亿美元。NSR预计，到2025年小卫星将占领卫星发射的半壁江山，而在2015年仅占15%。

来源：NSR



### 贝叶斯定理用于自然灾害预警发布

英国气象局和英国大学合作者在最新一期《哲学学报A》（*Proceedings of Royal Society A*）上发表的介绍贝叶斯定理用于自然灾害预警发布的文章中，用英国气象局基于该理论在集合预报信息基础上做出预警决策作为例子进行分析。图中给出的可能影响矩阵中，“影响”（impact）是指预报的量级，“可能”（likelihood）则指在集合预报中发生的相对频数，分为小于20%（很低）、20%~40%（低）、40%~60%（中等）和大于60%（高）等几个类别。

来源：《哲学学报A》



### GOES-R升空

2016年11月19日，多次延迟发生的GOES-R卫星终于成功发射升空。经过大约2周，当GOES-R进入预定的地球静止轨道，这颗美国下一代地球静止气象卫星系列中的第一颗，将被命名为GOES-16，预计在对星载的6部探测仪器进行检测和验证后，该卫星将在一年之内开始业务运行。

来源：NOAA

数字

**12%** 美国北卡罗莱那州立大学的学者在对覆盖当地特有的树木——柳栎的研究中发现，这种树木具有类似于“城市热岛”的效应，当气温增高时，因光合作用的水缺乏其固碳的效果降低12%。

**32%** 英国学者的最新研究分析了1981—2005年总计25年的数据，指出湄公河32%的沉积物运输与热带气旋带来的降水相关，而气候模拟的预测意味着未来湄公河三角洲的稳定性可能面临危险。

**25亿吨** 航空业碳排放占全球排放量的2%，经过3年的辩论和谈判过程，2016年10月6日国际民用航空组织的191个成员国终于建立了能效和排放补偿项目标准，该项目估计覆盖了2021—2035年75%的排放增加，抵消的碳排放量达25亿吨，相当于英国6年排放量。

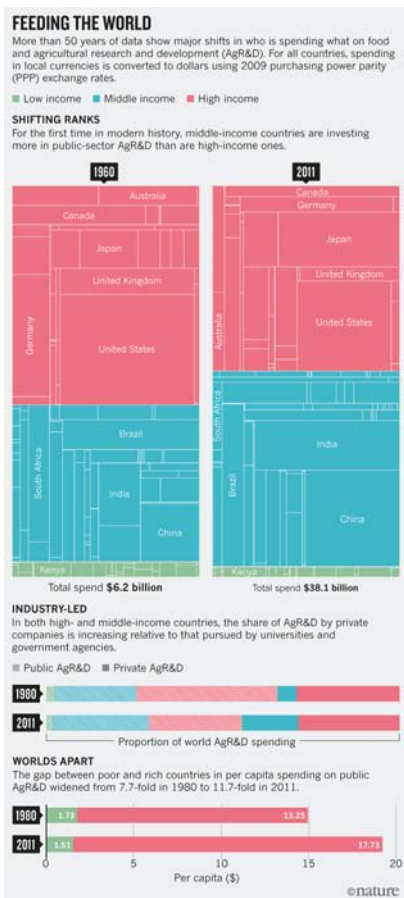
## 国际“条件非线性最优扰动”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引
1	Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications	Mu, M	Nonlinear Processes in Geophysics, 2003, 10(6)	130
2	Conditional nonlinear optimal perturbations as the optimal precursors for El Nino-Southern Oscillation events	Duan, WS	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2004, 109(D23)	72
3	The sensitivity and stability of the ocean's thermohaline circulation to finite-amplitude perturbations	Mu, M	Journal of Physical Oceanography, 2004, 34(10)	71
4	A new approach to studying ENSO predictability: Conditional nonlinear optimal perturbation	Mu, M	Chinese Science Bulletin, 2003, 48(10)	60
5	Conditional nonlinear optimal perturbations of a two-dimensional quasigeostrophic model	Mu, M	Journal of the Atmospheric Sciences, 2006, 63(6)	59
6	A Method for Identifying the Sensitive Areas in Targeted Observations for Tropical Cyclone Prediction: Conditional Nonlinear Optimal Perturbation	Mu, M	Monthly Weather Review, 2009, 137(5)	52
7	A kind of initial errors related to spring predictability barrier" for El Nino events in Zebiak-Cane model	Mu, M	Geophysical Research Letters, 2007, 34(3)	50
8	Season-dependent dynamics of nonlinear optimal error growth and El Nino-Southern Oscillation predictability in a theoretical model	Mu, M	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112(D10)	48
8	Investigating decadal variability of El Nino-Southern Oscillation asymmetry by conditional nonlinear optimal perturbation	Duan, WS	Journal of Geophysical Research-Oceans, 2006, 111(C7)	48
10	An extension of conditional nonlinear optimal perturbation approach and its applications	Mu, M	Nonlinear Processes in Geophysics, 2010, 17(2)	36

来源: SCI-E数据库

检索时间: 2016年11月24日

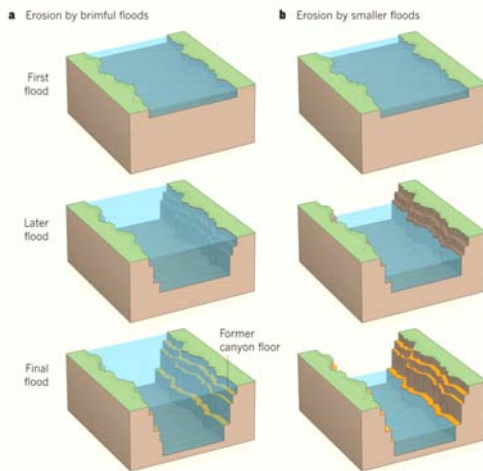
田晓阳 提供



## 全球农业研发: 50年的改变

美国学者研究了过去50年全球农业研发投入的改变, 给出全球按照富裕程度划分后投入分布情况的变化。研究还发现私人公司的投入在中高收入国家所占比例都有提高, 而贫穷和富裕国家投入之间的差距则在拉大。互动的统计结果在刊载这项成果的期刊网上供读者获取进一步信息。

来源: Nature



## 洪水侵蚀峡谷的新模型

一般认为峡谷的形成是大规模和深厚洪水持续冲刷并侵蚀所形成, 即所谓“盈满”模式, 但美国气象学会 (AMS) 最新报道的一项针对北美地区的个例研究, 给出新的较小洪水导致峡谷形成的模型。这项研究或许有助于解释火星较小洪水的作用。

来源: AMS

100年

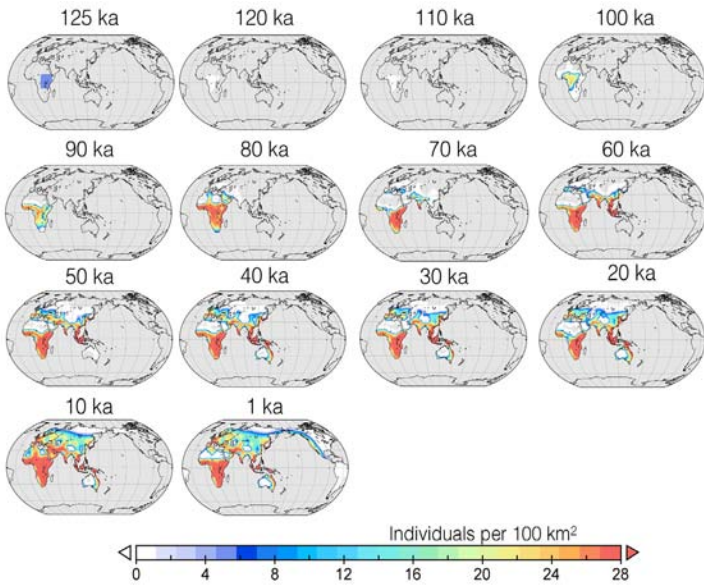
从100年前的1916年开始, 英国气象局向英国军方提供天气预报, 在整个第一次世界大战期间, 其预报范围覆盖西北欧洲地区, 气象信息还被编成电报传送。

5.7%

南京农业大学学者最近在《自然》子刊上发表的针对全球气温升高与小麦产量的研究指出, 在不考虑肥料以及适应性措施的情况下, 温度每升高1°C, 全球小麦产量平均降低5.7%。

5.7 km

2016年7月17日, 青藏高原东部一段5.7km长的冬菇冰川突然部分崩塌, 带来总计7000万m<sup>3</sup>的冰体下落。《科学》杂志的报道说, 学者尚不清楚这次崩塌的触发原因, 尽管人们知道高原东南部冰山快速退缩, 但一直认为高原西部冰川相对稳定, 只是2016年该区域降水在增加。



### 晚更新世气候主导早期人类迁移

美国夏威夷大学的学者研究了12.5万年（125ka）前开始的气候与地球人类早期迁徙之间的联系，指出晚更新世气候是早期人类迁徙的主要驱动因素。

来源: *Nature*

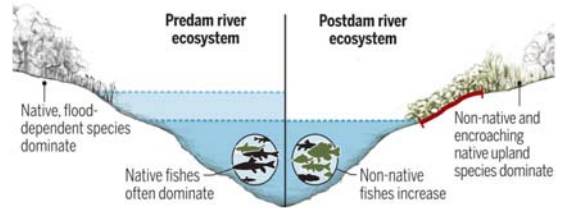


### How dams affect river ecosystems

Dams alter flow, sediment, and thermal regimes of rivers. Seasonal flow distortions (top) cause shifts in species compositions. Dammed rivers with hydropeaking (bottom) cause daily distortions that can eliminate key species from food webs. Small changes to flow releases can counteract these distortions and provide ecological benefit (see text).

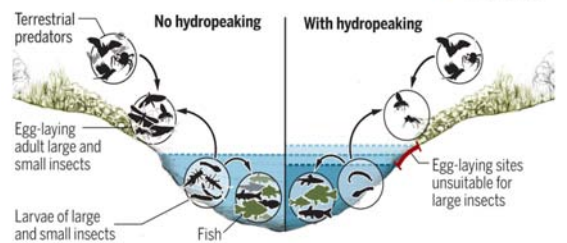
#### Free-flowing vs. dam-regulated river

■ Average predam flood ■ Average postdam flood I Lack of seasonal inundation and fish access to floodplain



#### Dammed hydropower river

■ Maximum daily flow ■ Average daily flow ■ Minimum daily flow I Fluctuating daily "intertidal zone"



### 水坝如何影响河流生态

水坝改变了河流的涨落、沉积和河势，其中季节流量畸变（上图）引起物质组成的改变。建有提供水电峰值（hydropeaking）大坝的河流（下图）引发的日畸变能消除食物网中的关键物种。而穿越水坝水流机制的小改变，就会补偿这些畸变，有助于恢复水坝河流生态。

来源: *Science*

### NASA下一代小卫星族群：更快捕捉热带气旋

NASA计划在2016年11月发射6颗面包片大小的下一代地球观测小卫星，探索创新和高效益的地球观测手段。未来名为“热带”（TROPICS）的由12颗携带微波探测器的小卫星组成的族群，将出现在距地面350英里轨道上，届时，南北纬40°之间的任何地方每半个小时都会有一颗卫星飞过，有望第一时间捕获正在生成的气旋系统。

来源: *NASA*

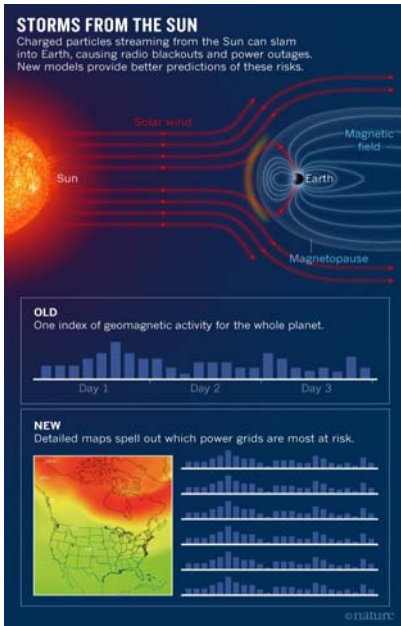
## 数字

**10%** 澳大利亚、美国和加拿大学者最新一项借助卫星资料的研究指出，过去20年全球已经丢失了10%的荒地，在亚马孙和非洲中部地区荒地丢失最为严重，而荒地是生物和生态意义上最完整和远离人类影响的景观。

**650次** 为了获得历史上更多飓风案例，弥补美国目前飓风记录始于1851年，只有不到160年历史的不足，一项研究收集了1495—1825年在加勒比海发生的650次西班牙船只的海难记录，利用其中原因不明的海难数据试图将飓风历史记录前推到15世纪。

**2021年** 联合国外层空间事物办公室日前宣布，2021年前将把“寻梦人”（Dream Chaser）宇宙飞船送入低地球轨道，目的是帮助发展中国家开展空间研究，从现在到2018年初该组织将征集负载项目。

## 中国“条件非线性最优扰动”主题被引频次最高的前10篇论文



## NOAA下一代空间天气模式: 1D走向2D

瞄准供电网络安全的NOAA下一代空间天气预报模式, 即将发布更为精细化的太阳风暴是否会对输电网络造成危害的全新图形预报产品。

来源: NOAA

排名	篇名	第一作者	来源	被引
1	条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用	穆穆	大气科学, 2007/11	46
1	A new approach to studying ENSO predictability: Conditional nonlinear optimal perturbation	Mu Mu	Chinese Science Bulletin, 2003/05	46
3	ENSO机理及其预测研究	李崇银	大气科学, 2008/07	43
4	Is Model Parameter Error Related to a Significant Spring Predictability Barrier for El Nino events? Results from a Theoretical Model	段晚锁	Advances in Atmospheric Sciences, 2010/09	28
5	集合预报初始扰动产生的一个新方法: 条件非线性最优扰动	穆穆	科学通报, 2007/06	26
6	条件非线性最优扰动及其在天气和气候可预报性研究中的应用	穆穆	科学通报, 2005/12	24
7	ENSO可预报性研究的一个新方法: 条件非线性最优扰动	穆穆	科学通报, 2003/04	23
8	条件非线性最优扰动方法在陆面过程模式参数优化中的扩展应用初探	李红祺	物理学报, 2011/01	22
8	Conditional nonlinear optimal perturbation: Applications to stability, sensitivity, and predictability	Duan Wansuo	Science in China(Series D:Earth Sciences), 2009/07	22
8	A new approach to the generation of initial perturbations for ensemble prediction: Conditional nonlinear optimal perturbation	Mu Mu	Chinese Science Bulletin, 2008/07	22

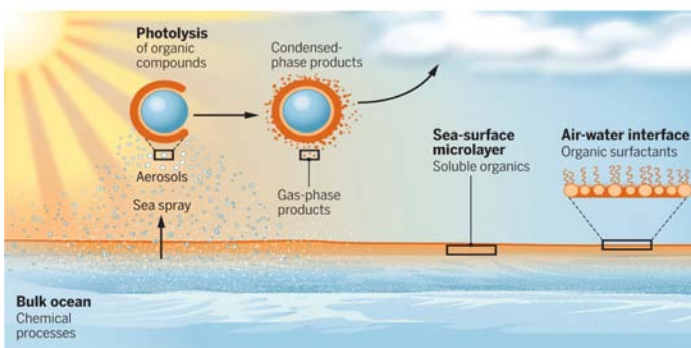
来源: CAJD数据库

检索时间: 2016年11月24日

田晓阳 提供

## Oxidation with a difference

Rosignol *et al.* report evidence for direct light-driven oxidation of an organic acid. Such oxidation processes may occur in the natural environment at water surfaces that are reached by solar radiation, generating gas-phase functionalized molecules and macromolecular condensed-phase products. These products affect aerosol formation and properties, influencing climate, air quality, and health.



## 有机酸氧化: 特别的气溶胶源

法国和加拿大学者合作开展的研究, 揭示了以前不为人知道的阳光驱动有机酸氧化过程, 该过程可以发生在阳光可到达水表面的自然环境中, 过程产生的功能分子和大分子凝固态生成物, 能够影响气溶胶的生成和特点, 从而影响气候、空气质量以及人类健康。

来源: Science

20~22<sup>个</sup>

我国主导的南海Argo区域海洋观测网已经开始建设, 首批第8个国产北斗剖面(海面至2000m水深范围)浮标布设完毕, 最终在该海域观测网将始终维持20~22个浮标正常工作, 数据通过中国气象局GTS接口实现全球共享。

22<sup>座</sup>

随着位于墨西哥的科利马火山近日被纳入卫星监测体系, 目前地球上所有22座活火山在被地面仪器监视的同时, 已经全部被地球卫星从空间监视。

42<sup>m/s</sup>

根据巨灾指数保险协议和广东省气象部门提供的台风“海马”登陆汕尾市时风速为42m/s, 已超保单约定台风事件阈值的事实, 触发了赔付条件, 按照合同约定受灾指数, 人保财险广东省分公司立即启动巨灾指数保险理赔程序, 将赔偿1000万元。

# 条件非线性最优扰动 (CNOP): 简介与数值求解

孙国栋<sup>1,4</sup> 穆穆<sup>2</sup> 段晚锁<sup>1</sup> 王强<sup>3</sup> 鹏飞<sup>1,4</sup>

(1 中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029;  
2 复旦大学大气科学研究院, 上海 200433; 3 中国科学院海洋研究所, 海洋环流与波动重点实验室, 青岛 266071;  
4 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 介绍了条件非线性最优扰动 (Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP) 的定义及其在大气和海洋等可预报性研究中的应用。根据研究对象不同, CNOP分为与初始扰动有关的CNOP (CNOP-I) 方法、与模式参数扰动有关的CNOP (CNOP-P) 方法和同时考虑初始扰动和模式参数扰动的CNOP方法。目前, CNOP-I方法已经应用于ENSO、黑潮和阻塞可预报性以及热盐环流和草原生态系统稳定性的研究。此外, CNOP-I方法也被应用于探讨台风目标观测的研究, 利用CNOP-I方法能够识别出台风预报的初值敏感区, 通过观测系统模拟试验表明在初值敏感区增加观测能够有效改进台风的预报技巧。CNOP-P方法也在ENSO和黑潮可预报性以及热盐环流和草原生态系统稳定性研究中得到了应用。为了将CNOP方法应用于更多的领域, 本文利用一个简单的Burgers方程, 介绍了如何通过建立Burgers方程的切线性模式和伴随模式, 从而利用非线性最优化算法计算获得CNOP。这一数值试验为将CNOP方法应用于更多的领域提供了借鉴。

**关键词:** 条件非线性最优扰动方法 (CNOP), 可预报性, 目标观测

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.001

## Conditional Nonlinear Optimal Perturbation: Introduction and Numerical Computation

Sun Guodong<sup>1,4</sup>, Mu Mu<sup>2</sup>, Duan Wansuo<sup>1</sup>, Wang Qiang<sup>3</sup>, Peng Fei<sup>1,4</sup>

(1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG),  
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433

3 Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** This paper introduces the definition of conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP), and the applications of the CNOP in atmosphere and ocean studies. The CNOP approach is expanded as that related to initial perturbation (CNOP-I), related to parameter perturbation (CNOP-P), and the combined both of CNOP-I and CNOP-P, according to the different perturbation types. The CNOP-I approach has been applied to the predictability studies of ENSO events, Kuroshio path anomalies, blocking, nonlinear stabilities of thermohaline circulation and grassland ecosystem. The CNOP-I has been further employed to explore the target observation of typhoon. The sensitive region could be identified by using the CNOP-I approach. The forecast skill may be improved by adding more adaptive observations in the sensitive region. The CNOP-P approach has been applied also to Kuroshio path anomalies, nonlinear stabilities of thermohaline circulation and grassland ecosystem. Here, we carried out a numerical simulation how to obtain the CNOP with the Burgers equation through building the tangent linear model and adjoint model. The result shows that the CNOP can be calculated by using the Burgers equation, the tangent linear model and the adjoint model with nonlinear optimization algorithm; It supplies a guide to a beginner to learn the CNOP and a reference for employing the CNOP to other applicable subjects.

**Keywords:** conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP), predictability, adaptive observations

### 0 引言

大气和海洋科学中的数值天气和气候可预报性研究一直是国内外研究的热点问题。很多方法已经建

立并且应用去探讨数值天气和气候的可预报性问题。Leith<sup>[1]</sup>利用蒙特卡罗技术构建大量的随机初始误差, 研究发现这些初始误差对6~10d的风场的预报技巧有较大改进。但是随机样本个数的选取是非常难以决定的, 并且选取的初始误差是随机的。近些年, 很多学者建立和应用一些方法探讨了数值天气和气候的可预报性, 例如繁殖模向量和集合卡尔曼滤波方法等<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期: 2014年10月23日; 修回日期: 2015年3月31日  
第一作者: 孙国栋 (1980—), Email: sungd@mail.iap.ac.cn  
资助信息: 国家自然科学基金 (41375111, 91437111)

其中,一些产生动力约束的初始扰动的线性方法被建立去研究数值天气和气候可预报性。例如,线性奇异向量方法和Lyapunov向量方法等。这些方法已经被应用于研究海—气耦合模式中误差发展的有关规律<sup>[4-5]</sup>。这些方法属于初始误差发展的线性理论<sup>[6]</sup>。只有在时间较短和初始误差较小的情况下,线性近似才是成立的。然而,大气和海洋科学中的物理问题通常是非线性问题。随着初始误差的时间演变,将线性误差理论应用于非线性问题的研究是不合适的。建立非线性误差理论对研究大气和海洋科学中的非线性问题是非常必要的。Mu等<sup>[7-8]</sup>为了克服线性奇异向量方法的线性局限性,提出了条件非线性最优扰动(Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP)方法。CNOP方法是线性奇异向量方法在非线性的框架下自然的扩展。CNOP方法的建立对研究大气和海洋科学的可预报性问题提供了有力的工具。

## 1 CNOP的定义

CNOP是在一定误差范围内,在预报时刻对预报结果不确定性产生最大影响的误差。根据大气和海洋科学可预报性的分类<sup>[9]</sup>,Mu等<sup>[7]</sup>建立了研究第一类可预报性问题的方法,与初始误差有关的CNOP方法,记为CNOP-I方法。根据第二类可预报性问题,Mu等<sup>[8]</sup>建立了与初始误差和模式误差都有关的CNOP方法,其中与模式误差有关的CNOP方法记为CNOP-P方法。具体地,假设一个非线性动力系统:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = F(X, \mathbf{P}), \\ X|_{t=0} = X_0, \end{cases} \quad (1)$$

式中, $X_0$ 表示状态变量 $X$ 的初始状态。 $\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 表示模式参数向量, $m$ 代表式(1)中参数的个数, $F$ 是一个非线性微分算子。在离散状态下,式(1)在 $T$ 时刻的解可以表示为:

$$X(T) = M_T(\mathbf{P})(X_0). \quad (2)$$

这里 $M_T(\mathbf{P})$ 是在固定参数向量 $\mathbf{P}$ 时的非线性传播算子,它将初始时刻的状态 $X_0$ “传播”到 $T$ 时刻的状态 $X(T)$ 。

用 $U_0$ 表示模式初值, $u_0$ 表示模式的初始误差, $p'$ 表示模式参数误差,根据式(2),模式的解可写为如下形式:

$$U(T) + u(u_0, p'; T) = M_T(\mathbf{P} + p')(U_0 + u_0), \quad (3)$$

式中, $u(u_0, p'; T)$ 度量了由联合误差 $(u_0, p')$ 导致状态变量在 $T$ 时刻偏离参考态 $U(T)$ 的大小。

假设只考虑初始误差 $u_0$ ,不考虑模式的参数误差,即 $p'=0$ ,根据式(3),我们能获得它所对应的 $T$ 时刻的解 $U(T) + u(T)$ ,即有:

$$U(T) + u(T) = M_T(\mathbf{P})(U_0 + u_0), \quad (4)$$

式中 $u(T)$ 为该初始误差的非线性发展。

假设只考虑模式参数误差 $p'$ ,不考虑模式的初始误差,即 $u_0=0$ ,那么模式的解可写为如下形式:

$$U(T) + u_p(T) = M_T(\mathbf{P} + p')(U_0), \quad (5)$$

式中 $u_p(T)$ 度量了由参数误差 $p'$ 导致状态变量在 $T$ 时刻偏离参考态 $U(T)$ 的大小。

定义如下的非线性最优化问题:

$$J(u_0^*, p^*) = \max J(u_0, p'), \quad u_0 \in C_\delta, p' \in C_\sigma, \quad (6)$$

式中, $u_0 \in C_\delta$ 表示对初始误差的约束, $p' \in C_\sigma$ 表示对参数误差的约束,并且

$$J(u_0, p') = \|M_T(\mathbf{P} + p')(U_0 + u_0) - M_T(\mathbf{P})(U_0)\|. \quad (7)$$

显然,最优化问题式(6)是一个有约束的最优化问题。对于给定的范数 $\|\cdot\|$ ,式(6)中最优化问题的解 $(u_0^*, p^*)$ 为最优的初始误差和参数误差,表示在一定误差约束条件下,在 $T$ 时刻使得目标函数 $J$ 偏离参考态程度最大。可以看到,当我们仅仅考虑初始误差或者假设参数误差 $p'=0$ ,最优化问题式(6)变为:

$$J(u_{0\delta}) = \max \|M_T(\mathbf{P})(U_0 + u_0) - M_T(\mathbf{P})(U_0)\|, \quad u_0 \in C_\delta. \quad (8)$$

并且满足式(8)的初始误差 $u_{0\delta}$ 就是CNOP-I,即为Mu等<sup>[7]</sup>定义的CNOP。如果在式(8)中用切线性模式的传播算子代替 $M_T$ ,那么满足式(8)式的初始误差就是线性奇异向量(Linear Singular Vector, LSV),因此,CNOP方法是LSV方法在非线性的框架下自然地推广。

若在式(6)中我们不考虑初始误差,即 $u_0=0$ ,可以得到:

$$J(p'_\sigma) = \max \|M_T(\mathbf{P} + p')(U_0) - M_T(\mathbf{P})(U_0)\|, \quad p' \in C_\sigma. \quad (9)$$

式中, $p'_\sigma$ 是与参数有关的条件非线性最优扰动。类似于CNOP-I,称这样的最优参数误差为CNOP-P。这样可以明确地看到式(6)中的最优联合模式是CNOP-I和CNOP-P的扩展(Mu等<sup>[8]</sup>)。

## 2 CNOP方法的应用

近些年,CNOP方法已经被应用于研究大气和海洋科学中的一些物理问题<sup>[10]</sup>。例如,Mu等<sup>[11-12]</sup>探讨了ENSO的可预报性和春季预报障碍问题(Spring Predictability Barrier, SPB)。研究结果表明CNOP型初始误差有明显的季节依赖性,在El Niño事件的不同发展阶段,CNOP型初始误差都会导致SPB。尽管LSV型初始误差的发展也有季节依赖性,但在各个季节的增长率远远小于CNOP型初始误差导致的预报误差的增长率,这体现了CNOP和LSV间的差异<sup>[13-14]</sup>。Mu等<sup>[15]</sup>在热盐环流的非线性变化方面也进行了探索。研究结果指出通过对流过程,初始误差的非线性作用

导致了非对称的响应。Jiang等<sup>[16]</sup>将CNOP方法也应用于集合预报的研究，结果表明由CNOP方法生成的集合样本对中期集合预报的技巧高于由线性奇异向量方法。近些年，有一些学者将CNOP方法应用于台风目标观测的研究中。Mu等<sup>[17]</sup>研究结果表明用CNOP方法确定的敏感区进行目标观测对台风预报的改善程度大于用LSV确定的敏感区<sup>[18]</sup>。Terwiss-cha van Scheltinga等<sup>[19]</sup>用CNOP方法研究了正压模式中双环流的非线性变化，结果表明当雷诺数达到一定数值后，双环流的非对称且线性稳定的状态将变为非线性不稳定性的。上述研究属于第一类可预报性研究范畴。为了研究第二类可预报性问题，Duan等<sup>[20]</sup>用CNOP-P方法研究了ENSO事件的SPB现象。CNOP-P方法也在陆地生态系统变化研究中进行了应用。Sun等<sup>[21-23]</sup>将温度和降水视为外强迫型参数，应用CNOP-P方法研究了温度和降水变化情况下，中国区域陆地生态系统变化的对外强迫最大响应。结果表明在干旱和半干旱区域以及南方区域，陆地生态系统的响应较为明显。

上述研究只是针对单独考虑初始扰动或者模式参数扰动。近些年，一些研究同时考虑初始扰动和参数扰动。Wang等<sup>[24]</sup>用CNOP方法考察了模式参数误差对黑潮路径变异的影响，结果表明，尽管初始误差导致的黑潮路径变异的预报误差大于模式误差导致的预报误差，但是模式误差对黑潮路径变异的影响不容忽视。Yu等<sup>[25]</sup>利用Zebiak-Cane模式分析了初始误差和模式误差在导致显著春季预报障碍中所扮演的角色。数值结果表明在导致显著春季预报障碍中，初始误差比模式误差更重要。Sun等<sup>[26]</sup>利用CNOP方法研究了草原生态系统的稳定性，结果表明在不同强度人类活动情况下，对草原生态系统模拟不确定性影响最大（即发生突变）的气候变化类型是不相同的。这意味着气候变化的模态对于草原生态系统的维持或退化是非常重要的，同时告诉我们应该合理地利用草原生态系统。上述这些研究说明了CNOP方法在大气和海洋科学的非线性问题的研究中是一个有效的工具。

### 3 CNOP的数值求解

计算CNOP是一个求解有约束条件的非线性最优化问题的过程。如何计算这个非线性最优化问题是应用CNOP方法研究大气和海洋科学的非线性物理问题的关键之处。我们以计算CNOP-I这个非线性最优化问题为例，计算CNOP-P与其是类似的。计算CNOP-I就是利用合适的最优化算法求解式（8）。事实上，已有很多较为成熟的最优化算法能够求解公式（8）。序列二次规划（Sequential Quadratic Programming,

SQP, Barclay等<sup>[27]</sup>）算法、谱投影梯度（Spectral Projected Gradient, SPG, Birgin等<sup>[28]</sup>）算法和Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno（L-BFGS, Liu等<sup>[29]</sup>）方法等都是求解有约束的非线性最优化问题的最优化算法。如果能够将目标函数、目标函数关于优化变量的梯度和约束条件准确地输入到非线性最优化算法中，就可以通过计算得到CNOP-I。

目标函数、目标函数关于优化变量的梯度和约束条件需要使用者定义并且输入到非线性最优化程序中（图1）。首先，物理问题的约束条件可以较为容易地在约束优化算法中建立。有些约束优化算法也需要约束条件关于优化变量的梯度，例如SQP算法。这也可以较为容易地建立。其次，在优化算法中，需给出正确的目标函数值。式（7）中算子 $M_T$ 代表一个非线性模式从初始时刻到预报时刻 $T$ 的传播算子。为了得到目标函数，需要将非线性模式向前积分的信息输入到优化算法中。即优化算法程序需要调用两次模式的数值积分程序：一次是参考态（或基本态） $M_T(\mathbf{P})(U_0)$ ，此时并未考虑初始误差；一次是考虑初始误差时的非线性积分 $M_T(\mathbf{P})(U_0+u_0)$ 。将这两次非线性积分的结果输入到优化算法程序中，从而获得目标函数。最后，目标函数关于优化变量的梯度是应用约束优化算法计算CNOP中非常重要的信息，它也是能否找到最优值的关键。定义法是求梯度最基本的方法。这种方法对理论模型是非常有效的。然而对于大气和海洋科学中的海-气耦合模式，由于该模式包含了较为复杂的动力框架和物理过程，用定义法求梯度的计算量非常大。对于大气和海洋科学中的数值模式，获得目标函数梯度的另一种技术是伴随技术。在这里，我们不介绍伴随技术。利用向前积分模式、其切线性模式和伴随模式，可以获得目标函数关于优化变量的梯度，

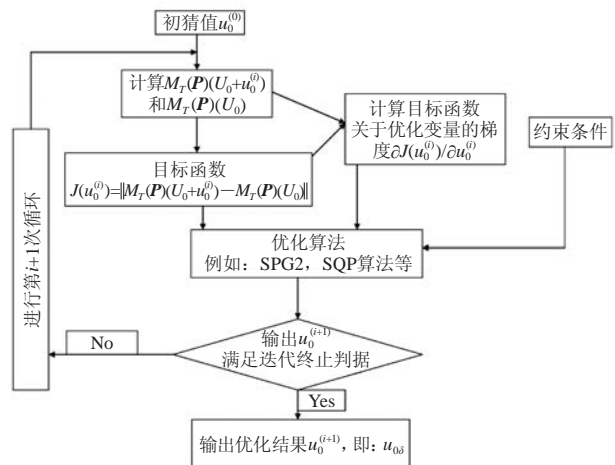


图1 计算CNOP的流程图

Fig. 1 The flow chart to calculate CNOP

将梯度信息输入到约束优化算法中，即优化算法程序中需要调用向前积分模式、其切线性模式和伴随模式三个程序。至此，上述三个信息输入到约束优化算法中并且给出初始猜测值，算法就能正常运行并最终得到CNOP-I。

为了详细地介绍如何数值计算得到CNOP-I，在这一部分中我们利用Burgers方程计算CNOP-I，目标函数定义如下： $J(u_0) = \|M(U_0 + u_0) - M(U_0)\|^2$ ，其中， $U_0$ 表示和基态相对应的初始条件， $u_0$ 表示在初始状态 $U_0$ 上叠加的初始扰动， $M$ 是非线性传播算子。约束条件是： $\|u_0\| \leq \delta = 8 \times 10^{-4}$ 。

1) Burgers方程

Burgers方程如下所示：

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = \gamma \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, & (x, t) \in [0, L; 0, T] \\ U(0, t) = U(L, t) = 0, & t \in (0, T] \\ U(x, 0) = U_0 = \sin(2\pi x / L), & x \in [0, L] \end{cases}, \quad (10)$$

它描述了状态变量 $U$ 随时间的变化。在这里， $\gamma=0.005\text{m}^2/\text{s}$ ， $L=100\text{m}$ ， $T=30\text{s}$ 。我们使用中心有限差分方法对式(10)进行离散化，得到了Burgers方程的数值积分模式，空间步长和时间步长分别是 $\Delta x=1.0\text{m}$ （空间格点总数目 $n_x=101$ ）、 $\Delta t=1.0\text{s}$ 。然后在此基础上，写出方程的切线性模式和伴随模式（为了求目标函数关于优化变量的梯度）。使用Fortran进行编程，在附录中我们给出了各模式的程序<sup>[30]</sup>。

2) 切线性模式、伴随模式以及梯度计算检验

在积分伴随模式求目标函数关于优化变量的梯度之前，一般要对切线性模式、伴随模式以及所得的梯度进行检验，从而保证实际应用中所得的结果与理论分析相符合。下面将分别给出这三部分的检验结果。需要说明的是：以下数值结果都是在变量和参数取双精度的情况下得到的；各部分中扰动 $u_0$ 的取值都是 $u_0(i) = \Delta \times i \times 0.01 \times (-1)^i$  ( $i=1, \dots, n_x-2$ )。 $\Delta$ 表示优化问题中的约束半径。

① 切线性模式程序检验结果

根据切线性模式的定义，对所建立的切线性模式程序是否正确可以采用以下公式进行检验：

$$R = \frac{\|M(U_0 + \alpha u_0) - M(U_0)\|}{\|L(U_0) \alpha u_0\|} = 1 + O(\alpha), \quad (11)$$

式中， $M$ 表示非线性模式， $L$ 表示 $M$ 的切线性模式， $\|\cdot\|$ 表示取欧氏范数， $u_0$ 是 $U_0$ 的扰动， $0 < \alpha < 1$ 。某一基态下，切线性模式程序检验结果如表1所示。由此可知，当 $\alpha$ 趋于0时， $R$ 一致的逼近于1。这说明切线性模式的程序非常准确。

表1 切线性模式的检验结果

Table 1 The results of the tangent linear model

$\alpha$	$R$
$10^{-1}$	0.992588549645061
$10^{-2}$	0.992588204511775
$10^{-3}$	0.992588169999147
$10^{-4}$	0.992588166547890
$10^{-5}$	0.992588166202765
$10^{-6}$	0.992588166168252
$10^{-7}$	0.992588166164801
$10^{-8}$	0.992588166164455
$10^{-9}$	0.992588166164422
$10^{-10}$	0.992588166164417
$10^{-11}$	0.992588166164417
$10^{-12}$	0.992588166164416
$10^{-13}$	0.992588166164417
$10^{-14}$	0.992588166164417
$10^{-15}$	0.992588166164417
$10^{-16}$	0.992588166164417
$10^{-17}$	0.992588166164417
$10^{-18}$	0.992588166164417

② 伴随模式程序检验结果

根据伴随算子的定义，伴随模式程序的检验公式如下：

$$\langle Lu_0, Lu_0 \rangle = \langle L^* Lu_0, u_0 \rangle, \quad (12)$$

式中， $L$ 表示切线性模式， $L^*$ 表示伴随模式， $u_0$ 代表扰动。

依照式(12)，以 $u_0$ 为初值，积分切线性模式，将结果和其自身作内积，记作Valtln。然后以 $Lu_0$ 为初值，积分伴随模式，将结果和 $u_0$ 作内积，记作Valadj。最后在机器精度的标准下，检验Valtln=Valadj是否成立。某一基态下，伴随模式检验结果如表2所示。

表2 伴随模式的检验结果

Table 2 The results of the adjoint model

$\text{Valtln} = \langle M\delta x, M\delta x \rangle$	$2.869746195370057 \times 10^{-4}$
$\text{Valadj} = \langle M^* M\delta x, \delta x \rangle$	$2.869746195370054 \times 10^{-4}$

由表2可知，Valtln和Valadj相等的有效数字达到15位，非常接近机器精度（16位有效数字），这说明从切线性模式程序出发建立的伴随模式程序是准确的。

③ 梯度计算检验结果

根据定义，梯度计算的检验公式如下：

$$R = \frac{J(u_0 + \alpha \frac{\nabla J}{\|\nabla J\|}) - J(u_0)}{\alpha \|\nabla J\|} = 1 + O(\alpha), \quad (13)$$

式中， $J(u_0)$ 是目标函数， $\nabla J$ 是由伴随程序计算的 $J$ 在扰动 $u_0$ 处的梯度， $\|\cdot\|$ 表示取欧氏范数， $0 < \alpha < 1$ 。梯度的检验结果如表3所示。由表可知，当 $\alpha$ 趋于0时， $R$ 在1附近呈现抛物型结构，这说明伴随模式可用于求解优化问题中代价函数的梯度。

表3 梯度计算的检验结果  
Table 3 The results of gradients

$\alpha$	$R$
$10^{-1}$	-10.1175
$10^{-2}$	-0.1117
$10^{-3}$	0.8888
$10^{-4}$	0.9889
$10^{-5}$	0.9989
$10^{-6}$	0.9999
$10^{-7}$	1.0000
$10^{-8}$	1.0000
$10^{-9}$	1.0000
$10^{-10}$	1.0000
$10^{-11}$	1.0000
$10^{-12}$	1.0000
$10^{-13}$	1.0000
$10^{-14}$	1.0005
$10^{-15}$	1.0000
$10^{-16}$	1.0196
$10^{-17}$	0.9979
$10^{-18}$	0.8677

### 3) 计算结果

图2是当Burgers方程中初始条件为 $U_0$ 时, 状态变量 $U$ 随时间的发展, 也是我们求解CNOP时的基态, 也可以称其为参考态, 即式(7)中 $M_T(\mathbf{P})(U_0)$ 。

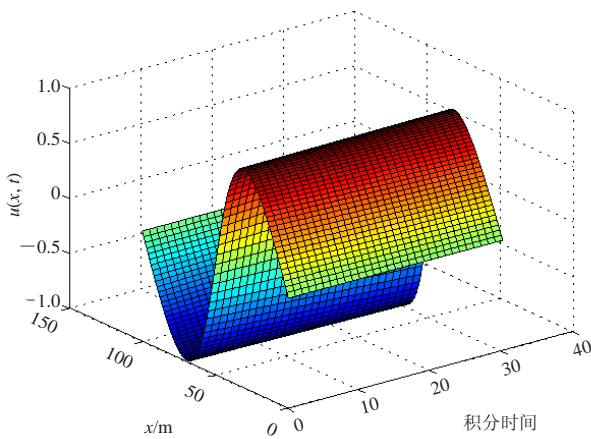


图2 初始条件为 $U_0$ 时状态变量 $U$ 的非线性发展  
Fig. 2 The nonlinear evolution of the state variable  $U$  when the initial condition is  $U_0$

在求解目标函数 $J(u_0)$ 最小值和最小值点(CNOP)时, 我们使用的优化算法是SPG2, 该算法需要使用目标函数的梯度信息。下面分别使用定义法和伴随方法获取目标函数的梯度, 进而求得CNOP, 并且比较两种方法得到的CNOP有何差异。

如图3所示, 两种方法所得到的CNOP空间分布极其相似。图4是两个CNOP差异的空间分布。由上可知, 基于伴随方法得到的CNOP和基于定义方法得

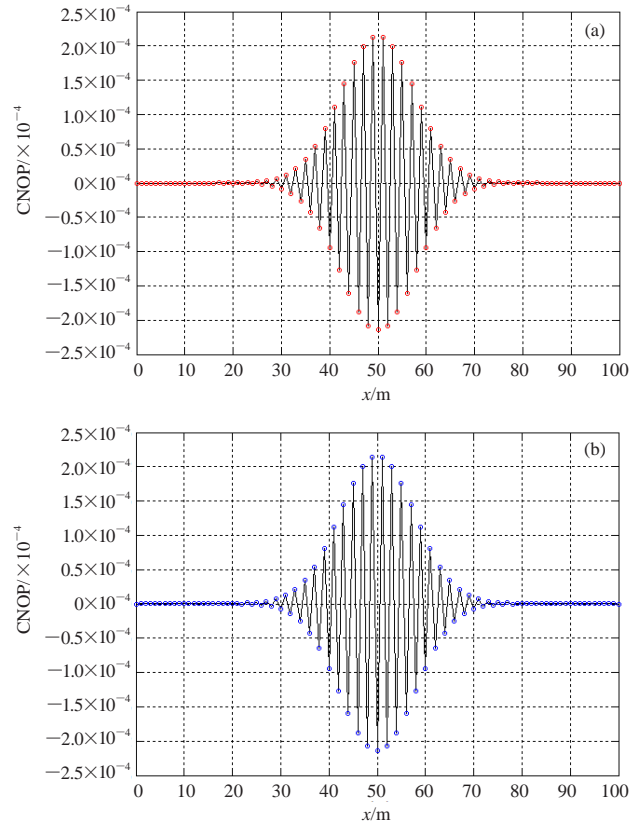


图3 CNOP的空间分布  
(a) 基于伴随方法; (b) 基于定义方法  
Fig. 3 The spatial distribution of CNOP  
(a) The adjoint method; (b) The definition method

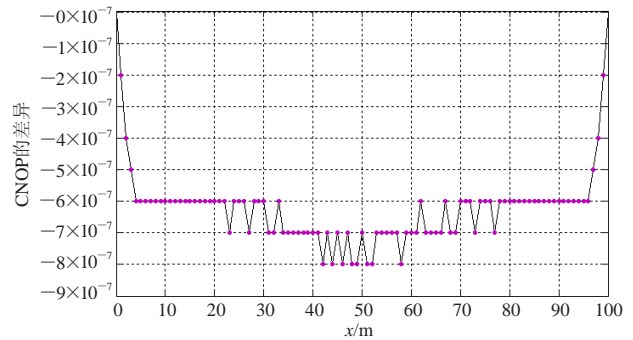


图4 基于伴随方法和定义方法计算得到的CNOP的差异  
Fig. 4 The difference of CNOP obtained by the adjoint method and the definition method

到的CNOP几乎是一样的, 而且两者随时间的发展也几乎一样, 如图5所示。综上可知, 两种方法得到的CNOP几乎一样。然而基于伴随求CNOP的方法所使用的CPU时间远远小于基于定义求CNOP的方法所使用的CPU时间(图5)。因而, 基于伴随求CNOP的方法准确而且效率高。图6给出了CNOP非线性发展的时空分布。由此看到在时刻 $T$ , CNOP类型初始扰动有最大非线性发展。

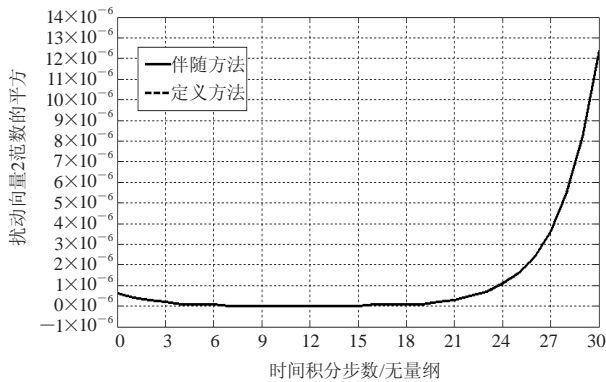


图5 基于伴随方法和定义方法的CNOP的非线性发展  
Fig. 5 The nonlinear evolution of CNOP obtained by the adjoint method and the definition method

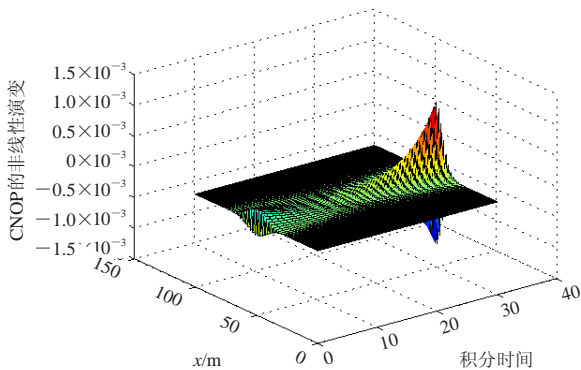


图6 CNOP非线性演变的时空分布特征  
Fig. 6 The spatial and temporal difference of the nonlinear evolution of CNOP

#### 4 结论和讨论

天气和气候的可预报性问题是目前科学研究的热点问题之一。传统的LSV方法在研究天气和气候的可预报性问题上具有局限性，因为此方法是假设天气和气候事件的演变过程是线性的。为了扩展LSV方法的局限性，Mu等<sup>[7-8]</sup>建立了CNOP方法。本文不仅介绍了CNOP的定义和拓展CNOP等定义，并且详细地介绍了CNOP方法在ENSO、黑潮和阻塞可预报性，以及热盐环流和草原生态系统稳定性研究中的应用。

特别地，为了让更多的学者能够应用CNOP方法并将其应用于更多的研究领域，本文利用一个理论的Burgers方程，详细地介绍了如何建立此方法的积分模式、切线性模式和伴随模式<sup>[30]</sup>，通过介绍计算CNOP的流程图，尝试让学者了解如何利用非线性最优算法计算CNOP。本文只是介绍了与初始扰动有关的CNOP的计算，如果计算CNOP-P，可以参考Mu等<sup>[8]</sup>的研究。从本文的介绍可以看出，计算CNOP需要积分模式对应的切线性模式和伴随模式。然而，目前有些

海-气耦合模式缺乏相应的切线性模式和伴随模式。为了能使CNOP方法得到更广泛的应用，一些学者<sup>[31-32]</sup>利用集合投影方法近似计算梯度信息，从而避免了需要积分模式对应的切线性模式和伴随模式而获得梯度信息。这为CNOP方法的应用提供了一种可行的途径。

#### 参考文献

- [1] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecast. *Mon Wea Rev*, 1974, 102: 409-418.
- [2] Houtekamer P L, Lefavre L, Derome J, et al. A system simulation approach to ensemble prediction. *Mon Wea Rev*, 1996, 124: 1225-1242.
- [3] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP: the breeding method. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 3297-3318.
- [4] Buizza R, Palmer T. Potential forecast skill of ensemble prediction, and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 99-119.
- [5] Hamill T M, Snyder C, Morss R E. A comparison of probabilistic forecasts from bred, singular-vector, and perturbed observation ensembles. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 1835-1851.
- [6] Garcia-Moya J A, Callado A, Escriba P, et al. Predictability of short-range forecasting: a multimodel approach. *Tellus A*, 2011, 63: 550-563.
- [7] Mu M, Duan W S, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 2003, 10: 493-501.
- [8] Mu M, Duan W S, Wang Q, et al. An extension of conditional nonlinear optimal perturbation approach and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 2010, 17: 21-220. doi:10.5194/npg-17-211-2010.
- [9] Mu M, Duan W S, Wang J C. The predictability problems in numerical weather and climate prediction. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19(2): 191-204.
- [10] 穆穆, 段晚锁. 2013. 条件非线性最优扰动在可预报性问题研究中的应用. *大气科学*, 37(2): 281-296. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12319.
- [11] Mu M, Duan W S, Wang B. Season-dependent dynamics of nonlinear optimal error growth and El Niño-Southern Oscillation predictability in a theoretical model. *J Geophys Res*, 2007, 112, D10113. doi:10.1029/2005JD006981.
- [12] Mu M, Xu H, Duan W S. A kind of initial errors related to "spring predictability barrier" for El Niño events in Zebiak-Cane model. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L03709. doi:10.1029/2006GL027412.
- [13] Duan W S, Xu H, Mu M. Decisive role of nonlinear temperature advection in El Niño- and La Niña- amplitude asymmetry. *J Geophys Res*, 2008, 113, C01014. doi:10.1029/2006JC003974.
- [14] Mu M, Duan W S, Wang J F. Nonlinear optimization problems in atmospheric and oceanic sciences. *East-west J Math, Thailand*, 2002, (S): 155-164.
- [15] Mu M, Sun L, Dijkstra H A. The sensitivity and stability of the ocean's thermohaline circulation to finite amplitude perturbations. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 2305-2315.
- [16] Jiang Z N, Mu M. A comparisons study of the methods of conditional nonlinear optimal perturbations and singular vectors in ensemble prediction. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26(3): 465-470. doi: 10.1007/s00376-009-0465-6.
- [17] Mu M, Zhou F F, Wang H L. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction: conditional nonlinear optimal perturbation. *Mon Wea Rev*, 2009, 137: 1623-1639.
- [18] Qin X, Mu M. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2011, 138: 185-197.
- [19] Terwisscha van S A D, Dijkstra H A. Conditional nonlinear optimal perturbations of the double-gyre ocean circulation. *Nonlin Processes Geophys*, 2008, 15: 727-734. doi:10.5194/

- npg-15-727-2008.
- [20] Duan W S, Zhang R. Is model parameter error related to a significant spring predictability barrier for El Nino events? Results from a theoretical model. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(5): 1003-1013.
- [21] Sun G D, Mu M. Responses of soil carbon variation to climate variability in China using the LPJ model. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 110:143-153. doi:10.1007/s00704-012-0619-9.
- [22] Sun G D, Mu M. Understanding variations and seasonal characteristics of net primary production under two types of climate change scenarios in China using the LPJ model. *Climatic Change*, 2013, 120:755-769. doi: 10.1007/s10584-013-0833-1.
- [23] Sun G D, Mu M. The analyses of the net primary production due to regional and seasonal temperature differences in eastern China using the LPJ model. *Ecological Modelling*, 2014, 289: 66-76. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.06.021.
- [24] Wang Q, Mu M, Dijkstra H A. Application of the conditional nonlinear optimal perturbation method to the predictability study of the Kuroshio large meander. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29(1): 118-134. doi: 10.1007/s00376-011-0199-0.
- [25] Yu Y S, Mu M, Duan W S. Does Model Parameter Error Cause a Significant “Spring Predictability Barrier” for El Niño Events in the Zebiak-Cane Model? *J Climate*, 2012, 25: 1263-1277. doi: http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI4022.1
- [26] Sun G D, Mu M. Inducing unstable grassland equilibrium states due to nonlinear optimal patterns of initial and parameter perturbations: theoretical models. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29(1): 79-90. doi: 10.1007/s00376-011-0226-1.
- [27] Barclay A, Gill P E, Rosen J B. SQP methods and their application to numerical optimal control. Numerical Analysis Report 97-3, Department of Mathematics, University of California, San Diego, La Jolla, CA, 1997.
- [28] Birgin E G, Martinez J M, Raydan M. Nonmonotone spectral projected gradient methods on convex sets. *SIAM J Optimization*, 2000, 10(4): 1196-1211.
- [29] Liu D C, Nocedal J. On the limited memory BFGS method for large scale minimization. *Math Prog*, 1989, 45: 503-528.
- [30] Kalnay E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation, and Predictability. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [31] Wang B, Tan X W. Conditional nonlinear optimal perturbations: adjoint-free calculation method and preliminary test. *Mon Wea Rev*, 2010, 138: 1043-1049
- [32] Chen L, Duan W S, Xu H. A SVD-based ensemble projection algorithm for calculating conditional nonlinear optimal perturbation. *Sci China: Earth Sci*, 2014, 58: 385-394. doi: 10.1007/s11430-014-4991-4.

```

integer i,j

common /com_param/ c0,c1

gamma=0.005d0

dx=0.01d0
dt=0.001d0
c0=dt/dx
c1=gamma*dt/(dx**2)

!set the initial conditions:
do i=1,nx
  u(i,1)=ui(i)
end do

!set the boundary conditions:
do j=1,n
  u(1,j)=0.
  u(nx,j)=0.
end do

!integrate the model numerically:-----use central
finite difference method on spatial and temporal directions

do i=2,nx-1
  u(i,2)=u(i,1)-0.25*c0*(u(i+1,1)*u(i+1,1)-u(i-1,1)*u(i-1,1))+c1*(u(i+1,1)+u(i-1,1)-2*u(i,1))
end do

do j=3,n
  do i=2,nx-1
    u(i,j)=u(i,j-2)-0.5*c0*(u(i+1,j-1)*u(i+1,j-1)-u(i-1,j-1)*u(i-1,j-1))+2*c1*(u(i+1,j-1)+u(i-1,j-1)-2*u(i,j-1))
  end do
end do

!save the nonlinear solutions to the basic fields:
do j=1,n
  do i=1,nx
    ub(i,j)=u(i,j)
  
```

## 附录1 Burgers方程的数值积分模式、切线性模式和伴随模式

### 1) 数值积分模式

```

SUBROUTINE BURGER(nx,n,ui,ub,u)
implicit none
integer nx !number of grid points
integer n !number of time steps
double precision ub(nx,n) !basic states(u)
double precision u(nx,n) !model solutions
double precision ui(nx) !initial conditions
double precision dx !space increment
double precision dt !time increment
double precision gamma ! diffusion coefficient
double precision c0,c1

```

```

end do
end do
return

```

```

END SUBROUTINE

```

## 2) 切线性模式

```

SUBROUTINE BURGER_TLM(nx,n,ui,ub,u)

```

```

implicit none
integer nx,n
double precision ub(nx,n) !basic state
double precision u(nx,n) !TLM solutions
double precision ui(nx) !initial conditions
common /com_param/ c0,c1
double precision c0,c1
integer i,j

```

```

! set the initial conditions

```

```

do i=1,nx
  u(i,1)=ui(i)
end do

```

```

! set the boundary conditions:

```

```

do j=1,n
  u(1,j)=0.
  u(nx,j)=0.
end do

```

```

! integer the model numerically:

```

```

do i=2,nx-1
  u(i,2)=u(i,1)-0.5*c0*(ub(i+1,1)*u(i+1,1)-ub(i-1,1)*u(i-1,1))+c1*(u(i+1,1)+u(i-1,1)-2*u(i,1))
end do

```

```

do j=3,n
  do i=2,nx-1
    u(i,j)=u(i,j-2)-c0*(ub(i+1,j-1)*u(i+1,j-1)-ub(i-1,j-1)*u(i-1,j-1))+2*c1*(u(i+1,j-1)+u(i-1,j-1)-2*u(i,j-1))
  end do
enddo

```

```

! set the final value of u in ui

```

```

do i=1,nx

```

```

  ui(i)=u(i,n)
end do

```

```

return
END SUBROUTINE

```

## 3) 伴随模式

```

SUBROUTINE BURGER_ADJ(nx,n,ui,ub,u)

```

```

implicit none
integer nx,n
double precision ub(nx,n) !basic states
double precision u(nx,n) !modle solutions
double precision ui(nx) !initial conditions
double precision dt !time increment
double precision dx !space increment
double precision c0,c1
integer i,j

```

```

common /com_param/ c0,c1

```

```

!initialize adjoint variables:

```

```

do j=1,n
  do i=1,nx
    u(i,j)=0.
  end do
end do

```

```

!set the final conditions:

```

```

do i=1,nx
  u(i,n)=ui(i)
  ui(i)=0.
end do

```

```

do j=n,3,-1
  do i=nx-1,2,-1
    u(i,j-2)=u(i,j-2)+u(i,j)
    u(i-1,j-1)=u(i-1,j-1)+(2*c1+c0*ub(i-1,j-1))*u(i,j)
    u(i,j-1)=u(i,j-1)-4*c1*u(i,j)
    u(i+1,j-1)=u(i+1,j-1)+(2*c1-c0*ub(i+1,j-1))*u(i,j)
  end do
  u(i,j)=0
end do

```

```

end do

do i=nx-1,2,-1
  u(i-1,1)=u(i-1,1)+(c1+0.5*c0*ub(i-1,1))*u(i,2)
  u(i,1)=u(i,1)+(1-2*c1)*u(i,2)
  u(i+1,1)=u(i+1,1)+(c1-0.5*c0*ub(i+1,1))*u(i,2)
  u(i,2)=0
end do

!set the boundary conditions:

do i=1,n
  u(1,i)=0.0
  u(nx,i)=0.0
end do

!set the final value of u in ui:----Gradient
do i=1,nx
  ui(i)=ui(i)+u(i,1)
end do

return
END SUBROUTINE

```

## 附录2 谱投影梯度 (SPG2) 算法简介

谱投影梯度 (Spectral Projected Gradient Method, SPG2) 是一种非单调梯度投影算法, 用于解决大规模的、可行域是凸集的优化问题 (Birgin 等)<sup>[A1]</sup>。这种优化问题具有如下形式:

$$\min f(x), x \in \Omega,$$

式中,  $\Omega$  是  $R^n$  中的闭凸集, 而且目标函数  $f$  在包含  $\Omega$  的开集上具有连续偏导数。

需要说明的是, 对于任意的  $x_0 \in R^n$ , 定义  $P_\Omega(x_0)$  是与给定范数  $\|\cdot\|$  有关的在闭凸集  $\Omega$  上的投影。  $g(x)$  表示目标函数的梯度, 即  $g(x) = \nabla f(x)$ 。该算法以任意的  $x_0 \in R^n$  开始。整数  $m$  表示算法中存储的目标函数值的

最大个数;  $\alpha_{\min}$  是一个小参数, 并且大于 0;  $\alpha_{\max}$  是一个大参数,  $\alpha_{\max} > \alpha_{\min}$ ;  $\gamma \in (0,1)$ , 代表一个足够小的参数; 参数  $\sigma_1, \sigma_2$  满足:  $0 < \sigma_1 < \sigma_2 < 1$ ;  $\langle \cdot \rangle$  表示内积。

SPG2 算法具体如下:

**Step0** (算法初始化) 将迭代次数  $k$  设为 0。如果选取的初值  $x_0 \notin \Omega$ , 那么将其替换为  $P(x_0)$ 。任意选取  $\alpha_0 \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ 。

**Step1** 计算谱投影梯度  $d_k = P(x_k - \alpha_k g(x_k)) - x_k$ 。检验算法终止准则是否满足。如果满足, 算法结束,  $x_k$  即为最小值点; 否则执行 Step2。

**Step2 Linear Search**, 确定搜索步长  $\lambda_k$ , 使得  $f(x_{k+1} = x_k + \lambda_k d_k) < f_{\max}$ 。

**Step2.1** 令  $\lambda = 1$ ,  $x_+ = x_k + d_k$ , 计算  $\delta = \langle g(x_k), d_k \rangle$ ,  $f_{\max} = \max_{0 \leq j \leq \min(k, m-1)} f(x_{k-j})$  和  $f(x_+)$ 。

**Step2.2** 检验是否成立  $f(x_+) \leq f_{\max} + \gamma \lambda \delta$ 。如果成立, 那么  $\lambda_k = \lambda$ , 执行 Step3 否则执行 Step2.3。

**Step2.3** 计算  $\lambda_{temp} = -\frac{1}{2} \lambda^2 \delta / (f(x_+) - f(x_k) - \lambda \delta)$ 。如果  $\lambda_{temp}$  满足  $\sigma_1 \leq \lambda_{temp} \leq \sigma_2 \lambda$ , 令  $\lambda = \lambda_{temp}$ , 否则  $\lambda = \lambda/2$ 。计算  $x_+ = x_k + \lambda d_k$ 。执行 Step2.2。

**Step3** (用于确定  $\alpha_k$ ) 令  $x_{k+1} = x_k + \lambda_k d_k$ 。计算  $s_k = x_{k+1} - x_k$ ,  $y_k = g(x_{k+1}) - g(x_k)$  和  $\beta_k = \langle s_k, y_k \rangle$ 。如果  $\beta_k \leq 0$ ,  $\alpha_{k+1} = \alpha_{\max}$ , 否则

$$\alpha_{k+1} = \min \{ \alpha_{\max}, \max(\alpha_{\min}, \langle s_k, s_k \rangle / \beta_k) \}。$$

**Step4** 迭代次数  $k = k + 1$ 。进行 Step1。

在 SPG2 优化算法中, 收敛准则是:

$\|P(x_k - g(x_k) - x_k)\|_\infty \leq \varepsilon_1$  或者  $\|P(x_k - g(x_k) - x_k)\|_2 \leq \varepsilon_2$ , 其中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  都是很小的数。如果收敛准则满足, 则算法终止。此外, 如果迭代次数  $k$  超过了给定的最大迭代次数  $\text{maxit}$ , 或者目标函数值的计算次数超过了给定的最大计算次数  $\text{maxfun}$ , 则算法同样会终止。此外, 需要注意的是这个算法中目标函数值和目标函数的梯度需要由使用者给出。

### 参考文献

[A1] Birgin E G, Martinez J M, Raydan M. SPG: software for convex-constrained optimization. ACM Trans Math Softw, 2001, 27(3): 340-349.

# 重大工程气候可行性论证进展

史军<sup>1</sup> 温康民<sup>1,2</sup> 穆海振<sup>1</sup> 刘校辰<sup>1</sup>

(1 上海市气候中心, 上海 200030; 2 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 论述了重大工程开展气候可行性论证的必要性及意义, 分析了当前我国重大工程气候可行性论证在技术、业务和服务方面的进展及存在的问题和解决问题的思路措施, 指出了重大工程气候可行性论证关键技术, 包括对极端天气气候事件变化的未来预估、对工程与环境间相互影响的数值模拟、对多源立体气候环境信息的综合探测、对灾害影响和致灾风险的动态评估, 以及对区域代表性气象参数的实时更新, 以期为我国重大工程项目气候可行性论证提供借鉴。

**关键词:** 重大工程, 气候可行性论证, 气候变化, 业务与服务, 进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.002

## Progress of Demonstrating Feasibility of Major Projects upon Climate

Shi Jun<sup>1</sup>, Wen Kangmin<sup>1,2</sup>, Mu Haizhen<sup>1</sup>, Liu Xiaochen<sup>1</sup>

(1 Shanghai Climate Centre, Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030 2 China University of Geosciences, School of Environmental Studies, Wuhan 430074)

**Abstract:** This paper discusses the necessity and significance of demonstrating feasibility of major project upon climate, analyzes the progresses and current problems; suggests some ideas and measures to solve these problems in technology, business and service for major projects in China; points out the key technologies, which include the project feasibility on the future extreme weather and climate events, the numerical simulation of the interaction between the major projects and surrounding environment, the comprehensive detection of multi-source and three-dimensional climate information, the dynamic assessment of disaster influence process and risk, the improvement of regional representative and real-time update of meteorological parameters. It offers future references for demonstrating feasibility of major projects upon climate in China.

**Keywords:** major projects, feasibility upon climate, climate change, business and services, progress

### 0 引言

气候可行性论证是指在重大工程项目实施之前, 从气候学的角度出发, 对与气候条件密切相关的规划和建设项目进行气候适宜性、风险性以及可能对局地气候产生影响的分析、评估活动<sup>[1]</sup>。其目的是合理开发利用气候资源, 避免或者减轻项目实施后可能受气象灾害、气候变化的影响, 或者可能对局地气候产生的影响。

气候可行性论证是应用气候学最重要的社会效益体现<sup>[2]</sup>。近年来, 我国学者在气候可行性论证的相关方面开展了较为深入的研究, 如黄世成等<sup>[3]</sup>探讨了大

型工程区气候要素极值计算方法和有效的空间插值计算方案, 初步建立了基于空间信息分析方法的工程气候可行性论证和系统流程; 房小怡等<sup>[2]</sup>阐述了我国低碳城市规划现状和主要内容, 探讨了在技术层面如何将气候可行性论证和城市低碳规划结合起来, 从而为低碳城市规划提供技术支撑和思路建议; 吴静等<sup>[4]</sup>指出大型工程项目在进行气候论证时要考虑建设过程对工程所在地雾-霾的影响, 将雾-霾作为局地气候变化的一个新指标, 突出了气候可行性论证更加注重工程项目对局地气候的影响; 张喜广等<sup>[5]</sup>探讨了气候可行性论证和气象灾害风险评估之间的关系, 为我国气候可行性论证和气象灾害防御立法研究提供基础法律理论支撑。

有鉴于此, 本文基于国内外已有的研究成果, 对重大工程气候可行性论证在技术和业务、服务方面的进展, 尤其是近年来的最新工作开展系统性的总结, 对存在的问题和解决问题的思路措施进行论述, 并对

收稿日期: 2015年11月9日; 修回日期: 2016年3月25日

第一作者: 史军 (1975—), Email: shij@climate.sh.cn

资助信息: 中国清洁发展机制基金赠款项目(2012043, 1212117); 国家自然科学基金(41401661, 41571044); 中国气象局气候变化专项(CCSF201503)

未来重大工程气候可行性论证的研究方向及关键技术方法进行展望, 以期气候可行性论证业务服务提供借鉴。

## 1 气候可行性论证的必要性和重要意义

### 1.1 开展气候可行性论证的必要性

气候可行性论证是重大工程的科学设计、安全运行和成本估算的需要。在一定时期内, 人类技术和经济的发展是有限的, 人类不可能抵御所有的自然灾害, 只能根据当前的技术经济能力与社会的需求, 综合考虑开发项目或建设工程本身抵御自然灾害的能力和灾害发生后救灾与恢复两者之间的成本平衡。大型工程、区域规划或开发项目等均是在预先确定的安全系数下开展规划、设计和建设, 与工程安全紧密联系的工程气象设计参数往往在很大程度上影响着工程投资成本, 甚至有可能成为工程建设的颠覆性因素。随着我国国民经济的飞速发展, 大型建设工程项目呈现出更高、更长、更宏大、更密集的发展特点, 其对环境尤其是极端气候事件也更加敏感, 灾害性气象因子已成为影响工程的安全性设计、运营效益和投资成本的关键因子<sup>[6]</sup>。气候可行性论证是在预先设定的安全系数情况下为工程项目算好经济账、保证社会重大建设工程顺利实施的基础性工作。

气候可行性论证是开发和保护气候资源、评估气候环境影响的需要。气候可行性论证在合理开发和保护气候资源、评估重大工程对局地或区域气候环境影响等方面发挥着重要的作用<sup>[7]</sup>, 它是城乡规划、大气污染防治、风能、太阳能资源的合理开发利用等重大工程不可或缺的环节。科学的气候可行性论证可以减轻区域环境污染和资源、能源短缺的压力, 避免风能、太阳能等高成本设备的规划布局失误所造成的严重浪费。如北京城市“摊大饼”式扩张模式<sup>[8]</sup>、京津冀地区雾-霾频发<sup>[9]</sup>都是这方面的典型案例。综合考虑气象和气候条件特点, 合理开发利用气候资源, 定量评估规划和建设项目功能布局对当地及周边环境的影响, 可以改善区域热环境和风环境, 减少空气污染, 并避免或者减轻项目实施中可能遇到的气候风险问题, 以及重大突发的自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件, 从而实现区域环境状况的改善和居民生活质量的提高<sup>[10]</sup>。

气候可行性论证是应对气候变化、防灾减灾和前瞻性规划决策的需要。在全球气候变化的大背景下, 高温、暴雨洪涝和台风等极端性气候事件发生概率和强度都在增加, 沿海海平面也呈波动上升趋势, 加之近年来我国实施的快速工业化、城市化和下垫面

格局变化进程, 使得气象防灾减灾、适应气候变化以及应对极端天气气候事件都面临新的挑战, 如北京“7·21”特大暴雨<sup>[11]</sup>、2013年盛夏我国中东部强高温<sup>[12]</sup>等。气候变化通过对重大工程的设施本身、重要辅助设备以及工程所依托的环境的影响, 影响工程的安全性、稳定性、可靠性、耐久性, 以及运行效率和经济效益<sup>[13]</sup>。因此, 需要对大范围的气候变化及其未来影响, 包括城市生命线工程、高速铁路工程、重大水利水电工程、沿海港口码头工程和跨江(海)大桥工程等进行多方面深入的论证, 评估其对未来气候变化和气象灾害的敏感性及存在的风险, 从而为政府及规划、建设部门提供科学的、前瞻性决策和措施建议。

### 1.2 气候可行性论证的重要意义

对重大工程项目进行气候可行性论证, 一方面是可以增强工程建设和运营过程中抵御自然灾害的能力, 实现工程投资成本的经济化与效益的最大化; 另一方面, 可以充分适应和利用当地气候资源, 规避气候变化风险, 减缓重大工程对局地气候环境的不利影响, 从而服务于当地经济社会建设和居民生活。因此, 开展气候可行性论证工作对于合理控制建设成本、积极应对气候变化、避免和减轻气象灾害造成损失, 以及提供风险管理决策依据等都具有重要的意义和实用价值。

## 2 气候可行性论证工作取得的进展

### 2.1 业务服务进展

目前, 我国气候可行性论证广泛应用于能源(包括风能、太阳能、核电、火电、电网建设规划、输电工程等)、建筑(包括高耸、大跨度、复杂体型结构等)、交通设施(包括公路、铁路、桥梁、码头、机场建设和运营等)、化工(包括石化炼油、LNG等)、城镇规划(包括城市排水、城市环境、城市灾害)、农产品引进和旅游等领域。据统计, 2005—2010年, 我国气象部门共开展了988项气候可行性论证工作, 主要集中在风能太阳能电站选址、交通设施、核电、城乡规划和火电空冷等领域<sup>[2]</sup>, 其中, 风电场、太阳能电站选址占总数的38%; 核电占11%; 政府行业规划、城乡规划、交通设施和其他各占9%, 火电空冷占8%, 大型水利工程和输变电线路类所占份额较小。

随着我国气候可行性论证的发展, 我国各地区对于气候可行性论证技术各有侧重<sup>[2]</sup>, 如吉林和辽宁在风电场和太阳能电站选址方面比较擅长, 北京在城乡规划领域、广东在核电和风电选址领域、浙江和湖北在大型交通设施领域各有优势。中国气象局先后对三

峡工程、青藏铁路和南水北调等重大工程开展了开工前的气候可行性论证,并在建设过程中还持续进行气象保障服务<sup>[7]</sup>。这些论证成果为规划的编制和建设项目立项的论证提供了更加科学准确的结论,也为有效防御气象灾害和科学应对气候变化提供了基础性保障。

## 2.2 内容方法进展

不同的重大工程项目,气候可行性论证的内容和方法侧重点不同,但一般都包括工程区气候背景分析、主要气象灾害<sup>[14]</sup>、工程气象参数计算<sup>[15]</sup>和短期气象监测与气候影响预测分析等内容<sup>[16, 17]</sup>。对于输变电路工程,需要考虑电线覆冰以及最大风速推算、大风灾害调查评估;对于风能资源开发利用,需要进行风资源评估并考虑对当地气候的影响;核电站建设项目则需要考虑龙卷的情况;城市规划要考虑降水、风向对大气污染和城市下水管道的影响等问题。

工程气候可行性论证方法,包括通过分析各气候要素的平均值获得其平均状态;通过计算相对变率和绝对变率获得气候因素的稳定性;通过使用皮尔森-III型分布、极值 I 分布等模型推算气候极值,获得气候要素的极端情况;通过计算空气污染指数、大气混合层厚度、大气状况稳定度等分析重大工程的污染气象条件;通过采用差值线性内插法、比值线性内插法和全概率法等,对参考气象站与临时气象观测站同期观测资料,进行超短资料序列的订正延长等。

## 2.3 标准规范进展

伴随气候可行性论证工作的广泛开展,一些涉及重大工程设计参数和气候参数计算方法的行业标准或规范也得以发布实施,如《核电厂厂址选择的极端气象事件(不包括热带气旋)》(HAF 0112—1991)<sup>[18]</sup>、《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004)<sup>[19]</sup>、《重大建设项目气候可行性论证技术规范》(DB45/T 445—2007)<sup>[20]</sup>、《高速公路交通气象条件等级》(QX/T 111—2010)<sup>[21]</sup>、《太阳能资源评估方法》(QX/T 89—2008)<sup>[22]</sup>、《露天建筑施工现场不利气象条件与安全防范》(QX/T 154—2012)<sup>[23]</sup>、《风电场风速预报准确率评判方法》(QX/T 243—2014)<sup>[24]</sup>、《太阳能光伏发电功率短期预报方法》(QX/T 244—2014)<sup>[25]</sup>、《分散式风力发电风能资源评估技术导则》(QX/T 308—2015)<sup>[26]</sup>、《城市总体规划气候可行性论证技术规范》(QX/T 242—2014)<sup>[27]</sup>、《大型活动气象服务指南工作流程》(QX/T 274—2015)<sup>[28]</sup>、《供暖气象等级》(QX/T 255—2015)<sup>[29]</sup>等。

中国气象局也先后组织专家编写并印发了《核电项目气候可行性论证技术指南》<sup>[30]</sup>、《城市总体规划气候可行性论证技术导则》<sup>[31]</sup>、《桥梁建设抗风设计气候可行性论证技术指南(第一版)》<sup>[32]</sup>、《城市通风廊道规划技术指南(第一版)》<sup>[33]</sup>和《工程项目采暖通风和空气调节气象参数分析技术指南(第一版)》<sup>[34]</sup>等气候可行性论证技术指南。各地气候可行性论证社会化管理也取得长足进展,如黑龙江、山西、广西、西藏、贵州、江苏、内蒙古、四川、吉林等地出台气候资源开发利用和保护相关条例与办法,辽宁、吉林、广东、海南、江西、安徽将气候可行性论证纳入行政许可与非行政许可,并开始履行政府职能,多个地市也印发了加强气候可行性论证的通知或出台气候可行性论证管理办法<sup>[35]</sup>。

## 3 存在的问题及解决问题的思路措施

### 3.1 存在的问题

我国气候可行性论证工作虽然取得了很大的进展,但还存在一些较为突出的问题。一是对气候可行性论证工作的普法宣传力度不够,导致社会上各行业没有充分认识到气候可行性论证工作的重要性,尚无具有约束力的法律法规对大型建设工程项目的气候可行性论证工作进行强制规范,许多重大工程项目也不进行气候可行性论证。二是气候可行性论证技术标准体系不完善<sup>[6]</sup>,目前有关论证方法和内容的基础研究还很欠缺,没有形成针对不同部门、行业的气候影响评价专用数据库和客观化、量化评价指标体系以及关键技术方法,也没有建立起专业化、自动化的业务流程、服务系统。三是气候可行性论证仅仅局限于规划设计阶段,很少开展项目施工运营阶段的后评估,对工程预期目标、指标是否达到,设计的气候参数是否合理有效等都缺乏明确的评估和反馈,也缺少对项目运营中出现的问题给出改进建议以及为未来新项目的决策提出建议这一环节。四是气候可行性论证工作服务领域局限、发展速度有限,对国家战略、区域规划服务的实时性不够,服务于区域农(牧)业结构调整和重大区域性经济开发建设等项目的可行性论证较少,业务人员的专业知识、实践经验及团队建设也不足,影响到业务服务的水平。

### 3.2 解决问题的思路措施

针对我国气候可行性论证存在的上述问题,提出以下对策及措施建议。一是加强宣传,提高认识,推进法律规范建设。利用各种媒体和宣传途径,提高社会认知度。广泛、深入地向全社会特别是工程项目的审批以及主管部门,包括发展改革、规划、建设、交

通和电力等宣传气候可行性论证的重要性和必要性，努力推进法律法规及规章制度建设，实现对应该开展气候可行性论证而实际上未开展论证的规划、建设项目不予审批、核准或备案，积极探索气候可行性论证的运行管理机制。同时，加强对普通公众的知识科普宣传，提高公众的认可和参与度，为顺利开展气候可行性论证工作打下良好的社会基础<sup>[7,36]</sup>。二是完善指标，创新方法，构建专业服务系统。建立和完善气候变化以及极端天气气候事件对农业、工业、交通、水资源、建筑及旅游等各个行业的影响评价专用数据库，加强气候可行性论证指标的定量化和评价技术方法的客观化、量化、动态化和精细化，集成相应的业务流程和服务系统。另一方面，加强多源、长序列气候资料的行业应用实践和论证技术方法研究，对一些成熟的方法和好的经验及时规范化和标准化，生成气候可行性论证技术标准体系和论证指南，以适应不同行业气候可行性论证的需要<sup>[36]</sup>。三是跟踪项目，总结经验，落实气候可行性论证后评估。对已经完成的重大工程，采用宏观和微观相结合、定量和定性相结合的前后对比或有无对比方法，系统、客观地分析气候可行性论证的效益、作用和影响，总结成功的经验和失败的教训。及时了解工程实施运营中的新变化、新情况，对于设计建设中没有考虑到的气候问题，给出有针对性的措施建议，并通过及时有效的信息反馈，为未来新项目的决策和提高气候可行性论证水平提出建议，同时也为宏观决策和管理政策的实施提供科学依据。四是拓展领域，建设团队，提升业务服务水平。围绕国家经济发展和结构调整，包括“一带一路”、京津冀协同发展、长江经济带以及低碳城市、新型城镇化等，积极对与气候条件密切相关的规划和建设项目开展气候可行性论证，融入区域气候承载力、极端天气气候事件风险评估、产业布局选址、城镇规划设计和农业结构调整等各个方面<sup>[37]</sup>。加强专业协作和团队建设，吸纳具有扎实、系统的专业知识和丰富的实践经验的人才，提高从业人员的业务能力和技术服务水平，为多领域、跨行业的气候可行性论证提供支撑。

## 4 重大工程气候可行性论证关键技术

### 4.1 极端天气气候事件变化的未来预估

2005年美国气象学会公报中提到，对大多数国家而言，在大气科学领域中对国民经济贡献最大的是气候资料与气候信息的应用。随着科学技术的进步以及社会经济的发展，应用气候学逐渐进入黄金时代<sup>[38]</sup>。气候可行性论证在合理开发、利用和保护气候资源，

维护城市资源环境安全方面发挥着重要作用，体现了可持续发展的内涵<sup>[39]</sup>。未来20~100年，我国气候变化仍将持续，高温热浪、极端干旱、暴雨洪涝和霾等高影响天气气候事件的发生频次、强度、区域、持续时间等均出现显著变化<sup>[40]</sup>。相对于气候平均态，极端气候事件的变化会对社会经济、生命财产和自然生态系统等造成更大的影响<sup>[41, 42]</sup>。据世界气象组织报告<sup>[43]</sup>，在21世纪最初10年，全球有超过37万人死于空前的极端天气和气候事件的影响。

和预估气候平均态一样，预估温室气体排放增加所引起的极端气候事件变化的主要手段还是数值气候模式。通过引入最新的IPCC第五次评估报告中全球气候模式集（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5）资料，并在气候资料的多种降尺度（downscaling）方法和多模式集合（MME）预估方法的支持下，提高模式的分辨率和预估准确率，特别是水平分辨率的提高，生成区域气候变化预估数据集和未来极端天气气候事件变化预估数据集，并从气候平均态变化、极端天气气候事件的频数和强度变化，以及气象气候灾害变化等方面综合研究气候变化对重大工程的影响，根据气候变化趋势分析和未来气候预估等，为重大工程的设计运营、城市规划布局等提供必要的采暖、制冷、抗风、排水、防潮参数和技术支持。

### 4.2 工程与环境间相互影响的数值模拟

统计和概率计算技术、点式论证方法是目前气候可行性论证中采用最多的技术和指导规范。所谓点式论证方法就是直接将某点的数据或计算参数应用到大片区域上，而不管下垫面的复杂情况，这对复杂地形中重大工程项目的投资成本和经济效益估算来说，是十分粗放的。而将工程气象参数从点评估发展为场评估的重要途径就是高分辨率数值模拟技术。高分辨率数值模拟技术为复杂地形的风场和风能资源评估提供了可靠的技术方法<sup>[44]</sup>，如MM5中尺度数值模拟、CALMET降尺度模式或BDM三维准静力模式等技术已应用在风能资源评估或选址过程中。利用WRF中尺度数值模式模拟超强台风对跨海大桥或者海上风机所产生的影响，以之为跨海大桥建设或者海上风电场选址提出符合抗风要求的设计标准。

利用中尺度或微观尺度的数值模式，进行微观大气边界层以及大气成分模拟，以预测重大工程对相关气候背景条件的影响。在城市规划的气候可行性论证中，数值模拟趋向于完善中尺度数值模式，增加城市冠层以及城市人为热源等城市特征。通过采用多尺度数值模式系统开展城市尺度、小区尺度或单体尺度的

数值模拟,从而得到气温、湿度、风场等气象环境效应的定量分析结果,满足城市选址、城市功能区、建筑设计和建筑形式等的需求。

#### 4.3 多源立体气候环境信息的综合探测

随着气象现代化程度和环境监测技术水平的提高,立体多源观测数据,诸如地面、雷达、探空、卫星遥感等将在气候可行性论证中得到广泛应用,建立针对性和适用性较强的工程气象探测体系,确定重大工程专用基础气象数据筛选指标,针对重大工程气象风险评估进行数据筛选<sup>[6]</sup>,生成各类重大工程气候可行性论证适用的气象灾害事件数据库成为必然。根据各地灾害性天气和气候的特点,建立与本地相适宜的、先进的、长期的工程气象专业探测网并发展近地边界层精细探测技术,如超声波测量、激光雷达技术等是目前大气探测最主要的发展方向。针对一个城市甚至一个规划区进行加密观测及高分辨率遥感卫星资料的应用,并将城市用地类型同气候要素信息结合起来进行空间单元的热环境和通风环境分析将成为趋势。

与台站资料相比,遥感探测得到的信息具有空间分布均匀、区域代表性强等优点。如李晓萌等<sup>[45]</sup>利用2000和2010年极端高温发生时MODIS卫星的地表温度(LST)数据,结合DMSP/OLS夜间灯光数据,分别提取地表温度场信息以及城市化信息,并通过等温线分析、剖面分析、差值变化分析和栅格计算等方法,分析了北京市近10年来极端高温期地表温度的时空变化特征及其对城市化的响应。Nastos等<sup>[46]</sup>综合利用TRMM卫星降水资料和高分辨率格点降水资料,采用百分位阈值、绝对阈值和持续期三种指标,开展了地中海地区极端降水空间格局研究。应用WRF/UCM模式,并引入遥感提取的精细化下垫面信息,模拟北京<sup>[47]</sup>、南京<sup>[48]</sup>和广州<sup>[49]</sup>等城市下垫面改变对极端高温和强降水过程特征的影响,也取得很好的效果。一些研究也利用双轴跟踪、单轴跟踪的总辐射、直接辐射、散射辐射及反射辐射等多种太阳能辐射仪器,结合静止、极轨等多源卫星产品资料,采用辐射传输理论开展了太阳能资源反演和评估<sup>[2]</sup>。

#### 4.4 灾害综合影响过程与动态风险评估

重大工程投资大,施工建设和运营周期长,加之各种气象灾害存在着不确定性和随机性,气象灾害可能影响到工程的建设和运营。需要在极值理论和多种水文气象分布函数(如极值I型、皮尔森-III型等)支持下,开展各种致灾因子(高温、低温、暴雨、大风、积雪等)极值分析,构建不同重现期灾害要素频

数和强度的统计特征参数<sup>[50]</sup>,并借助于同类工程项目的灾害影响过程或灾情统计资料,通过类比推演法,构建不同强度致灾因子对所论证的重大工程规划设计的影响过程和等级损失关系曲线,编制损失标准和影响评估模型。同时,鉴于自然灾害的发生、发展都有其自身特点和复杂的气候、环境和人为活动背景,不同类别的自然灾害之间又存在着多方面的广泛联系。因此,灾害影响评估不仅要关注单项灾害,还应重大工程区域范围内多项灾害开展综合评估,尤其是基于灾害链的多灾种综合影响评估<sup>[51, 52]</sup>,不断提高灾害评估模型方法的精度和可信度。

灾害被认为是地球表层的孕灾环境、致灾因子和承灾体综合作用的产物,存在着大量不确定性和模糊性<sup>[51]</sup>。模型的应用使得定量描述自然灾害风险成为可能。通过对多种致灾因子和承灾体的单独分析和综合影响过程分析,建立重大工程区域内多灾种综合影响评估方法模型和承灾体易损性的评估模型与方法,绘制区域综合灾害风险图<sup>[52]</sup>,进一步利用统计、模拟及耦合等技术手段,开展灾害致灾因子动态和承灾体动态分析,并结合致灾过程的动态模拟和各种仿真技术,从情景分析的角度开展重大工程灾害动态风险评估<sup>[53]</sup>。借助于遥感、地理信息系统等空间信息技术,将基于栅格点的风险评估与基于行政单元的评估相结合,使气象灾害的致灾因子预报信息与地面背景数据有效地匹配,实现风险评估结果的精细化,提高灾害预警预报的实时性和可操作性<sup>[51]</sup>。

#### 4.5 气象参数的区域代表性和实时更新

在工程规划或设计中,需要根据工程区域内国家气象站30年甚至50年以上的历史气象资料计算工程气象参数,所以气象站观测数据能否代表该地区平均气候状况是影响工程设计参数的重要因素。改革开放以来,很多气象站的环境遭到破坏,观测数据失去了区域代表性,加之近年来各地迁站现象比较普遍,这必然会造成当地历史气象资料的不连续。因此,这些气象数据在使用之前,必须进行均一化检验<sup>[54]</sup>,检查数据的完整性和对工程区域气候环境的代表性。

在常规的气象评估方法中,由于工程区与邻近气象站地形地貌和观测环境的差异,评估结论与实际情况可能会有较大差异。为了获得较高分辨率的要素空间分布结果,便于研究较小空间尺度工程区气候要素特征,可对气象要素的趋势面进行空间分析。空间统计分析和空间趋势分析法很好地考虑了影响气象要素分布的地理、地形和下垫面环境等条件,评估结果更能代表真实地形下的客观情况,因此具有相对较高的

可信度<sup>[39]</sup>。基于空间分析的气候可行性论证方法,可有效补充当前气候环境评价中采用的简单气候统计方法,满足了工程规划、设计和运营等气象防灾减灾的需要。

此外,我国工程建设参照的技术规范中有关工程气象参数的内容目前多是依据20世纪80、90年代以前的气象数据来确定的,比较陈旧,与当前已经变化了的气候以及人为城市化影响的下垫面环境有显著偏差。所以,需要进一步在现有相关规范规定的气象灾害参数分析评估的基础上,根据最新的气象探测资料来计算工程设计参数,并评估其安全性,研究更为科学的气象灾害参数分析方案和计算方法,改进或研发气象灾害参数分析评估相关软件,如重大工程抗风参数计算软件以及其他一些风险评估计算软件<sup>[6]</sup>。

## 5 结论与讨论

气候可行性论证对合理控制建设成本、积极应对气候变化、避免和减轻建设项目对周边环境的影响,以及抵御气象灾害造成的损失都具有重要的意义。近年来,我国气候可行性论证已经在能源、交通和建筑等多个领域广泛开展,并在一些领域取得了应用价值较高的特色成果。气候可行性论证技术体系得到进一步完善,一些重大工程的设计参数标准和技术方法及气候可行性论证技术指南不断推出。

然而,我国气候可行性论证还存在着普法宣传力度不够,强制规范缺失,技术标准体系不完善,关键技术方法和业务流程、服务系统不健全,气候可行性论证缺少后评估环节以及服务领域有限,业务人员及团队建设不足等问题,需要在宣传认识,法律规范建设、指标方法完善和创新、业务服务系统构建、气候可行性论证后评估,以及服务领域拓展和团队建设、业务服务水平提高等方面加强发展。

准确可靠的气候可行性论证结果,需要气象观测和数值模拟及评估指标等基础技术的支持。建立具有较强针对性的工程气象环境信息综合探测体系,完善工程气象参数的区域代表性并实现参数的实时更新,是科学开展重大工程气候可行性论证的基础和保障。加强对极端天气气候事件变化的未来预估,深入模拟和分析重大工程与气候环境之间的相互影响,开展灾害综合影响过程与动态风险评估,是重大工程气候可行性论证的必要途径。

随着我国国民经济的飞速发展,重大工程项目呈现出更高、更长、更宏大、更密集的发展特征,重大工程的设计和施工运营对大气环境特别是气候变化和气象灾害的变化更为敏感。我国气候可行性论证项目

的规模和领域必将进一步扩大,技术水平和业务能力也会得到逐步提升,气候可行性论证在合理开发、利用和保护气候资源、维护区域生态环境安全、实现社会经济的可持续发展中将发挥越来越重要的作用。

## 参考文献

- [1] 气候可行性论证管理办法(中国气象局令第18号). 中华人民共和国国务院公报,2009,(20): 46-48.
- [2] 房小怡,郭文利,马京津,等. 低碳城市规划与气候可行性论证. 气象科技进展,2014,4(5): 42-47.
- [3] 黄世成,程婷,陈兵,等. 大型工程气候可行性论证中的空间分析方法与应用. 气象与环境学报,2012,28(4): 90-95.
- [4] 吴静,姚猛. 大型工程项目的气候可行性论证方法. 北京农业,2014(12): 164.
- [5] 张喜广,王海,王硕. 气候可行性论证和气象灾害风险评估关系浅析. 现代经济信息,2014,(15): 57-61.
- [6] 董永春. 重大工程气候可行性论证能做什么. 中国气象报,2011-04-14(3).
- [7] 伍毓柏,周显信. 我国气候可行性论证的现状、问题与对策. 闽江学刊,2012,(5): 51-56.
- [8] 欧志斌. 破解北京城市建设“摊大饼”困局. 国土资源导刊,2014,(4): 66-67.
- [9] 钱萌. 京津冀地区雾霾及影响因素研究. 资源节约与环保,2014,(8): 116.
- [10] 王晓云,汪光焘,房小怡,等. 新时期下城市规划建设中环境理念的科学实施——奥运场馆规划方案大气环境效应研究. 规划师,2005,21(10): 84-87.
- [11] 王元丰. 北京暴雨当浇醒对气候变化的漠视. 学习时报,2012-09-03(7).
- [12] Sun Ying, Zhang Xuebin, Zwiers F W, et al. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. Nature Climate Change, 2014, 4(12): 1082-1085.
- [13] 陈鲜艳,梅梅,丁一汇,等. 气候变化对我国若干重大影响. 气候变化研究进展,2015,11(5): 337-342.
- [14] 郭青,吴文婷. 气候可行性论证研究. 现代农业科技,2011,(22): 41-42.
- [15] 苏志,李秀存,周绍毅. 重大建设工程项目气候可行性论证方法研究. 气象研究与应用,2009,30(1): 37-39.
- [16] 苏志,黄梅丽. 气候论证的内容和技术方法探讨. 广西气象,2005,26(3): 17-19.
- [17] 李强,周绍毅. 气候可行性论证工作浅析. 广西气象,2005,26(2): 29-31.
- [18] 国家核安全局. 核电厂厂址选择的极端气象事件(不包括热带气旋)(HAF 0112—1991). 国家核安全局,1991.
- [19] 中华人民共和国交通部. 公路桥梁抗风设计规范(JTG/T D60-01—2004). 北京: 中国标准出版社,2004.
- [20] 广西壮族自治区质量技术监督局. 重大建设项目气候可行性论证技术规范(DB45/T 445—2007). 广西壮族自治区质量技术监督局,2007.
- [21] 中国气象局. 高速公路交通气象条件等级(QX/T 111—2010). 北京: 气象出版社,2010.
- [22] 中国气象局. 太阳能资源评估方法(QX/T 89—2008). 北京: 气象出版社,2008.
- [23] 中国气象局. 露天建筑施工现场不利气象条件与安全防范(QX/T 154—2012). 北京: 气象出版社,2012.
- [24] 中国气象局. 风电场风速预报准确率评判方法(QX/T 243—2014). 北京: 气象出版社,2014.
- [25] 中国气象局. 太阳能光伏发电功率短期预报方法(QX/T 244—2014). 北京: 中国标准出版社,2014.
- [26] 中国气象局. 分散式风力发电风能资源评估技术导则(QX/T 308—2015). 北京: 气象出版社,2016.
- [27] 中国气象局. 城市总体规划气候可行性论证技术规范(QX/T 242—2014). 北京: 中国标准出版社,2014.
- [28] 中国气象局. 大型活动气象服务指南 工作流程(QX/T 274—2015). 北京: 气象出版社,2015.

- [29] 中国气象局. 供暖气象等级(QX/T 255—2015). 北京: 气象出版社, 2015.
- [30] 编写组. 核电项目气候可行性论证技术指南. 《气候可行性论证技术指南》编写组, 2011.
- [31] 房小怡, 郭文利, 杜吴鹏, 等. 城市总体规划气候可行性论证技术导则. 中国气象局, 2011.
- [32] 编写组. 桥梁建设抗风设计气候可行性论证技术指南(第1版). 《气候可行性论证技术指南》编写组, 2011.
- [33] 编写组. 城市通风廊道规划技术指南(第1版). 中国气象局预报与网络司, 2015, 1-15.
- [34] 编写组. 工程项目采暖通风和空气调节气象参数分析技术指南(第1版). 中国气象局预报与网络司, 2015.
- [35] 顾建峰. 气候可行性论证技术论文集. 北京: 气象出版社, 2014.
- [36] 蒋运志, 彭振林. 关于气候可行性论证工作的思考. 安徽农业科学, 2012, 40(32): 15816-15817, 15855.
- [37] 孙英杰, 李宇飞, 李芬, 等. 气象部门在打造农村宜居环境中的作用分析. 天津农业科学, 2014, 20(11): 109-113.
- [38] 曾晓梅. 美国应用气候学研究与应用现状. 气象科技合作动态, 2006(1): 26-28.
- [39] 刘祥梅, 郭志华, 肖文发, 等. 基于GIS的三峡库区生态环境综合评价II. 气候评价. 自然资源学报, 2007, 22(4): 613-622.
- [40] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation//IPCC. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2012.
- [41] Easterling D R, J L Evans, P Ya Groisman, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 417-425.
- [42] Wang Q, Fan X, Qin Z, et al. Change trends of temperature and precipitation in the Loess Plateau Region of China, 1961–2010. Global and Planetary Change, 2012, 92-93: 138-147.
- [43] World Meteorological Organization. The Global Climate 2001–2010: a decade of climate extremes. WMO–No.1103. Geneva: World Meteorological Organization, 2013.
- [44] 宋丽莉. 我国气候可行性论证的作用与实践. 闽江学刊, 2013, (3): 31-34.
- [45] 李晓萌, 孙永华, 孟丹, 等. 近10年北京极端高温天气条件下的地表温度变化及其对城市化的响应. 生态学报, 2013, 33(20): 6694-6703.
- [46] Nastos P T, Kapsomenakis J, Douvis KC. Analysis of precipitation extremes based on satellite and high-resolution gridded data set over Mediterranean basin. Atmospheric Research, 2013, 131(2): 46-59.
- [47] 郑祚芳, 王在文, 高华. 北京地区夏季极端降水变化特征及城市化的影响. 气象, 2013, 39(12): 1635-1641.
- [48] Yang T, Hao X, Shao Q, et al. Multi-model ensemble projections in temperature and precipitation extremes of the Tibetan Plateau in the 21st century. Global and Planetary Change, 2012, 80/81(1): 1-13.
- [49] 蒙伟光, 张艳霞, 李江南, 等. WRF/UCM在广州高温天气及城市热岛模拟研究中的应用. 热带气象学报, 2010, 26(3): 273-282.
- [50] 史军, 徐家良, 谈建国, 等. 上海地区不同重现期的风速估算研究. 地理科学, 2015, 35(9): 1191-1197.
- [51] 叶金玉, 林广发, 张明锋. 自然灾害风险评估研究进展. 防灾科技学院学报, 2010, 12(3): 20-25.
- [52] 巫丽芸, 何东进, 洪伟, 等. 自然灾害风险评估与灾害易损性研究进展. 灾害学, 2014, 29(4): 129-135.
- [53] 庞西磊, 黄崇福, 张英菊. 自然灾害动态风险评估的一种基本模式. 灾害学, 2016, 31(1): 1-6.
- [54] 严中伟, 王君, 李珍, 等. 基于均一化观测序列评估城市化的气候效应. 气象科技进展, 2014, 4(3): 41-48.



## 认识碳卫星

■ 王婷波

2002年, 欧空局发射的Envisat卫星携带了可以测量二氧化碳的光谱仪, 开启了碳卫星时代。2009年1月, 日本发射了一颗温室气体观测卫星Gosat, 是世界上第一颗用于测量二氧化碳和甲烷两种主要的温室气体浓度的卫星。2014年7月, 美国国家航空航天局(NASA)发射了轨道碳监测2号卫星OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2), 是第一颗专门监测二氧化碳的卫星, 它精确地记录下了地球表面的二氧化碳排放及吸收数据。这不仅可以帮助科学家更好地理解人类活动对气候变化所产生的影响, 更好地表征大气中CO<sub>2</sub>的变化, 进而更准确地预测全球气候变化, 同时, 也将为今后评测签署过碳减排的国家提供数据依据。

中国自主研发的首颗用于监测全球大气二氧化碳含量的科学实验卫星(碳卫星)计划于2016年底发

射, 它以二氧化碳遥感监测为切入点, 建立高光谱卫星地面数据处理与验证系统, 形成对全球的二氧化碳浓度监测能力, 监测精度优于4ppm, 已达到国际先进水平。

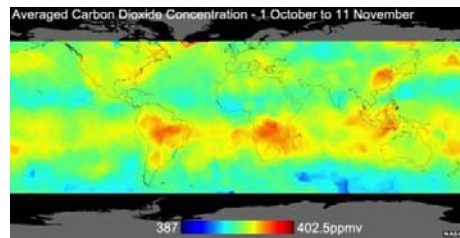


图 首张全球CO<sub>2</sub>地图  
(2014年10月1日—11月11日的碳排放数据图, 来源: NASA)

(作者单位: 中国气象局干部培训学院)

# “黑碳的农业与生活源排放对东亚气候、 空气质量的影响及其气候—健康效益评估” 项目研究计划简介

丁德平<sup>1</sup> 孔少飞<sup>2</sup> 朱彬<sup>3</sup> 张小玲<sup>4, 5</sup> 赵德龙<sup>1</sup> 盛久江<sup>1</sup>

(1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089; 2 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;

3 南京信息工程大学, 南京 210044; 4 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 5 成都信息工程大学, 成都 620225)

**摘要:** 介绍了2016年国家重点研发计划“全球变化及应对”方向中“黑碳的农业与生活源排放对东亚气候、空气质量的影响及其气候—健康效益评估”项目的科学背景、研究设想和实施方案等内容。

**关键词:** 黑碳, 飞机观测, 排放源, 气候—健康效益

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.003

## The Impact of Black Carbon From Agricultural and Anthropogenic Sources on Climate and Air Quality over East Asia, and the Assessment of It's Effects on Health

Ding Deping<sup>1</sup>, Kong Shaofei<sup>2</sup>, Zhu Bin<sup>3</sup>, Zhang Xiaoling<sup>4,5</sup>, Zhao Delong<sup>1</sup>, Sheng Jiujiang<sup>1</sup>

(1 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089 2 China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074

3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 4 Environmental Meteorology Forecast

Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089 5 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 620225)

**Abstract:** This article introduces the scientific background, research ideas and plans of “The impact of black carbon (BC) on climate and air quality over East Asia from agricultural and anthropogenic sources (AAS), and the assessment of its health effects”, the 2016 Key Program of Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, which belongs to the Specific Project of “Global change and response”.

**Keywords:** black carbon, aircraft observations, emission sources, environmental, climate impact, health effect

### 0 引言

黑碳(BC)气溶胶对全球气候变化、区域空气质量和人体健康的影响已经成为当前大气科学研究的一个热点领域。黑碳的辐射强迫仅次于二氧化碳; 其在中国重污染事件发生、发展过程中会抑制大气边界层的扩散, 从而加重污染; 在细颗粒物的化学成分中, BC对于心血管健康的影响最为显著。农业和生活源燃料燃烧是黑碳的最重要排放源, 尤其是在发展中国家, 是空气污染严重和人群暴露健康风险较高的地区。黑碳作为当前影响全球变暖的重要短寿命气候强迫因子, 对

其制定减排措施, 对缓解全球变暖意义重大。

首先, 黑碳排放清单是黑碳气候、环境和健康效应模拟的基础, 至今已有全球、区域、国家和城市尺度的多个黑碳排放清单, 关注的农业和生活源包括农作物残留燃烧、农业机械、民用燃煤、民用生物质燃料等类。在农业和生活源黑碳排放清单构建中, 更多的源类需要予以考虑, 排放因子也需要基于统一的方法(稀释通道采样)进行建立和更新。如餐饮油烟, 烟花爆竹燃放, 烧烤活动, 寺庙焚香、祭祀活动, 烤烟生产, 香烟烟雾, 熏烤腊肉, 天然气、煤气、沼气燃烧, 青藏高原和草原地区牛粪燃烧等特色农业和生活源黑碳排放因子实测缺乏, 在中国很多未见报道。高原地区低压低氧和高寒地区冬季低温环境的燃烧黑碳排放也需要予以考虑。黑碳排放过程中粒径分布、吸收系数、混合状态等也日益引起重视, 测试方法也由滤膜采样向不同燃烧阶

收稿日期: 2016年10月11日

第一作者: 丁德平, Email: zytdp@vip.sina.com

资助信息: 国家重点研发计划(2016YFA0602001); 北京市青年自然科学基金(8164057)

段黑碳浓度的实时在线监测转变。

## 1 国内外研究进展

近年来随着监测手段的发展,国外已有研究基于飞机平台和单颗粒黑碳光度计(SP2)获得黑碳的垂直分布、混合状态、粒径分布和光学特征等<sup>[1]</sup>,但是我国对黑碳的大量观测研究基本上完全限于地面,高分辨率稳定的空中垂直观测研究尤其缺少。

另外,目前对于源排放黑碳老化特性的研究主要集中在机动车尾气以及生物质燃烧方面,重点关注黑碳的粒径分布、混合状态及其气候效应研究;对于排放清单的构建所用排放因子大多为发达国家测试结果<sup>[2-3]</sup>,在广大发展中国家实测仍显不足。Peng等<sup>[4]</sup>首次发现并定量了在不同城市环境条件下黑碳性质变化的时间尺度,如在较为污染的北京,黑碳只需要2~3小时性质即发生变化。本研究将针对现有清单,将关注的农业和生活源类扩大到13类,很多具有中国和区域特色;同时充分考虑不同大气环境条件下燃料燃烧特性及老化特性不同导致的黑碳排放特征不同,基于稀释通道采样系统,实测13类源黑碳排放因子;结合人口、土地利用类型、遥感影响解译等多种手段,建立排放清单,并对其进行空间分配。

现在针对黑碳的环境与气候效应在观测和数值模拟方面开展了大量的研究<sup>[5-7]</sup>,观测上主要关注黑碳的时空分布、混合状态、光学性质及其对辐射、温度的影响;数值模拟上,主要讨论BC的直接和间接效应对能见度、边界层、天气的影响以及与季风等气候尺度特征的相互作用。本研究基于黑碳立体观测及其辐射特性的深入认识,揭示不同地区和行业黑碳对空气质量和气候因子变化的定量贡献;阐明东亚季风背景下黑碳对季风进程从候、旬、月、季节到年际多尺度变化的影响。

对于黑碳健康效应评估,现今国内外研究主要采用时间序列方法和流行病学方法研究黑碳的暴露阈值与人体健康的关系,并且表明黑碳的毒性可能比细颗粒物的毒性更强,但结果仍存在很大的不确定性<sup>[8]</sup>;同时开展了黑碳的气候效应及其对经济、社会、环境的影响。本课题将比较系统地研究在东亚高浓度排放背景下黑碳与人群的暴露-反应关系,特别是黑碳、细颗粒物污染以及极端气象条件对健康影响的协同效应,建立定量评估方法,提出最优减排策略。

## 2 项目的研究目标和内容

本项目的研究目标为:1)获得典型农业及生活源主导环境中黑碳气溶胶粒径分布、混合状态、光学性质的时空分布和垂直廓线;2)通过实测建立农业和生活源黑碳排放因子数据库,建立2013年具有月变化特征的全球农业和生活源黑碳排放清单( $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ )和中国 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 黑碳排放清单;3)模拟全球各区

域黑碳浓度及其来源,阐明黑碳的直接、半直接、间接效应和冰雪反照效应对东亚季风的多尺度影响机制,揭示重点地区黑碳与气象要素的反馈关系以及黑碳对空气质量的作用机制;4)定量讨论黑碳减排的气候-健康等的费效关系,提出合理、可持续的减排策略。

主要研究内容:1)高时空分辨率的全球农业与生活源黑碳排放清单构建和评估。排放因子实测:将农业和生活源扩大到农业秸秆露天燃烧和烤烟生产,生活源扩大到室内民用燃料(蜂窝煤、块煤、生物质燃料、天然气和液化石油气、青藏高原地区牛粪)、烹调油烟、烟花爆竹燃放、路边烧烤、典型时段和区域特色生活源(如湖北、湖南、四川、广东、河南等地腊肉制作,寺庙焚香和祭祀)等。针对不同区域不同类型农业与生活源燃料,设计不同燃料类型和炉型的组合,采用室内模拟燃烧和稀释通道采样技术,对各种组合排放出的烟气进行稀释后采样,获得有代表性的排放因子;针对烹调油烟、烟花爆竹燃放、路边烧烤和特色生活源,搭建燃烧室,在实验室模拟不同类型食用油煎炸炒等过程,采用稀释通道,对其排放因子进行实测。同时选择高原和平原、北方和南方典型农村地区开展外场实测,基于碳平衡方法等获得不同海拔高度和不同温度条件下各类燃烧源黑碳排放因子。全球黑碳源排放清单构建和评估:搜集整理有季节变化特性的源活动水平数据,结合实测排放因子,基于“自下而上”方法,建立2013年分季节的高空间分辨率的全球农业及生活源黑碳气溶胶排放清单,采用蒙特卡罗模拟,对排放清单的不确定性进行分析。结合典型农村点位黑碳在线、离线观测数据和数值模拟,对排放清单的准确性进行评估。2)不同大气环境条件下典型源排放黑碳老化识别。基于室内模拟燃烧和稀释通道,结合烟雾箱模拟实验,设置不同气象条件(温度、湿度、光强)和气态污染物浓度( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ ),对不同源排放黑碳进入到不同大气环境后的粒径、混合状态、包裹层厚度、吸收系数等进行观测,识别其参与的非均相反应机制,及其对光学性质的影响。3)农业及生活源主导环境中黑碳气溶胶综合立体观测及老化机制。采用空中国王350ER型飞机观测平台等飞机航测手段(飞行高度高度为10000m以下),搭载SP2、气溶胶质谱、气体、辐射仪等设备,对典型城市和乡村区域(以华北区域为重点)黑碳理化、光学及混合状态等参数的尺度分布和垂直分布进行综合观测。地面观测采用SP2、气体和气溶胶质谱等化学成分在线监测仪器,对华北某农村点位黑碳进行连续1年的观测,分析黑碳浓度的日、月、季节变化特征,及混合状态、包裹状态等参数,探讨及老化机制。采用滤膜采样,在华北、华东、华

中、东北、西北、西南等典型城市和乡村同步进行一年分季节观测，获得我国典型城市和乡村地区碳气溶胶时空分布数据。采用探空气球和无人机，搭载AE-51便携式黑碳监测仪，对华北、华东、华中等地大气边界层内黑碳气溶胶浓度进行垂直探空观测，获得边界层内黑碳气溶胶浓度的垂直分布特征。结合综合立体观测数据，分析黑碳气溶胶与气态污染物、气象因子等的相互关系，探讨可能的老化非均相和光化学反应机制。4) 黑碳对气候、环境影响的模拟及机制研究。结合典型区域黑碳气溶胶理化特性（含光学）、混合状态等数据，建立更加真实的非球形黑碳模型，利用数值模拟得到更加精确的黑碳及其老化后的光学特性。基于综合立体观测结果，结合气象资料，综合分析灰霾天气形成过程中黑碳气溶胶三维空间分布与天气条件关系。基于WRF-Chem污染物与气象要素反馈机制，模拟研究黑碳与气象要素的反馈影响，探讨黑碳对空气污染加剧的影响机制。利用WRF-Chem数值模型，构建多个黑碳气溶胶排放情景，研究不同区域、不同污染源排放黑碳颗粒物对大气环境、能见度的影响；同时探索不同情景下黑碳气溶胶对灰霾形成过程和机理的影响。利用地球系统模式CESM，对比分析全球黑碳高值区（东亚和南亚）农业及生活源黑碳的直接、半直接和间接效应，以及冰雪反照效应。研究亚洲季风背景下，黑碳对东亚季风从次季节（候、旬、月）、季节、年际至年代际的多尺度影响机制。5) 黑碳减排策略及气候—健康效益评估。针对农业与生活源，设定其减排措施包括清洁燃料取代居民做饭用煤、型煤取代原煤、清洁燃料取代秸秆和居民做饭薪柴、高效节能炉具推广、农业机械安装柴油微粒滤清器等5种措施，考虑不同的实施强度，设定低力度减排、中力度减排和高力度减排三种减排情景，更新不同减排情景下的黑碳排放清单，估算减排的成本。以典型城市为例，建立定量评估黑碳对居民健康影响的方法；获得黑碳与居民健康效应之间的一些定量关系；利用经济学方法结合获得的暴露-响应关系，估算黑碳的健康和经济损失；建立黑碳等污染物健康效应预测和评估平台。基于此，估算黑碳减排的收益。基于上述成本收益分析，提出农业与生活源黑碳减排的最佳策略。

### 3 预期成果和社会效益

通过本项目的实施，预期可以解决黑碳排放及其气候环境健康效益模拟相关的几个关键问题，包括农业和生活源黑碳排放因子缺乏，尤其是发展中国家，且排放因子没有基于统一的测试方法，不同燃烧环境下如高原地区低压低氧和高寒地区冬季低温环境的燃烧黑碳排放与平原地区和热带、亚热带地区的差异未见分析，以及跟黑碳气候环境效应相关的粒径分布、

吸收系数、混合状态等参数在源排放测试中较少被提及；黑碳排放后对气候和环境效应评估中亟须黑碳在大气环境中老化后的混合状态、光学性质等参数；同时缺少中国等高浓度排放地区长时间序列监测和垂直廓线数据，以及黑碳气溶胶的区域和行业来源及其在次季节尺度上的气候效应；缺乏黑碳的长时间序列和高浓度环境下黑碳的人体暴露实验及健康效应以及大气环境浓度与人体暴露浓度的误差校正系数和不同地区和人群的黑碳剂量响应关系，气象条件（低温、高湿、剧烈温差变化）和黑碳对心肺疾病人群的影响的交互作用和协同效应尚不清楚。

上述科学问题的解决，可为我国科学家识别黑碳的高浓度排放特征，及其在高浓度排放条件下的老化机制、气候、健康效应，提升我国科学家在黑碳领域的话语权。同时本项目所获得的第一手中国地区黑碳气溶胶源排放因子、时空分布、垂直分布，将为更新黑碳排放清单，识别黑碳老化机制，评估其气候和环境健康效应提供可靠的数据支撑和方法支持，相关研究结果也可直接为国家气候和环境外交谈判提供科学依据。同时黑碳的减排对于缓解当前我国严峻的大气污染形势和降低人群健康暴露风险也将起到重要的作用。

同时农业与生活源黑碳的减排意味着大量一次污染物如SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs、有毒有害组分（重金属、多环芳烃）等多种污染物的同时减排，可有效降低农业与农村环境中各种污染物的排放，进而减少各种有毒有害组分在生态系统中各部分的沉降，对于农业生态系统中土壤环境、水体环境等的改善也将起到积极的推动作用。

## 4 创新性

1) 中国农业和生活源主导环境中黑碳气溶胶的时空分布和垂直分布特征

首次在我国开展黑碳综合立体监测平台，获得我国黑碳的时空分布和垂直。采用最新型黑碳观测仪器SP2、光学性质观测仪器（光声黑碳仪PSAP、浊度计）、气溶胶质谱（AMS）、气态污染物观测仪器（SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、O<sub>3</sub>、CO）、沉降缸等，基于飞机航测、系留飞艇探空观测和典型区域地面观测，首次系统研究中国典型区域黑碳气溶胶的空间分布、垂直分布、长时间序列时间变化，获得不同区域不同时间和不同空间的黑碳气溶胶质量浓度、粒径分布、混合状态、吸收系数、单次反照率等，获得典型区域黑碳的干湿沉降速率，为黑碳健康和气候效应评估和验证提供直接的监测数据。

2) 黑碳农业与生活源类完善和不同源黑碳排放因子、物理、光学性质实测

现有黑碳排放清单涵盖的源类只包括农作物残留燃烧、农业机械、民用燃煤、民用生物质燃料等几

类,很多生活源如天然气、煤气和沼气燃烧,餐饮油烟,烟花爆竹燃放,烧烤过程,寺庙焚香、祭祀活动,烤烟生产、香烟烟雾、熏烤腊肉,青藏高原和草原地区牛粪燃烧等特色生活源黑碳排放因子缺乏,相应的清单在中国未见报道,在全球范围内的排放因子实测也很少见。现有黑碳排放因子实测很多未考虑稀释采样和区域燃烧环境的差异,如高原地区低压低氧和高寒地区冬季低温的环境下的测试。源排放黑碳的物理和光学性质较少被关注,如吸收系数、粒径分布、混合状态等。

### 3) 黑碳农业与生活源类排放清单插值方法改进

现有黑碳排放清单在空间插值过程中均采用人口数据,其前提是人均能耗一致,这与实际情况不一致,尤其是面积较大的国家(如美国、中国)等。为此本项目课题2基于5m空间分辨率遥感影像获得中国平房的空间分布,提取出平房面积,并通过典型区域实地调研,获取平房面积、户数和能源消耗量的信息,建立平房面积、农村人口数量和能源消耗的相关关系。以纠正后的农村人口—能源消耗和平房面积—能源消耗为插值依据,对排放清单进行网格化处理,比较两种插值方法的差异。

### 4) 区分地域和行业来源的黑碳大气环境效应和气候效应

由于污染物从其源到受体在大气中要经历复杂的物理化学变化,其产生的环境和气候效应与其浓度之间的关系具有高度的非线性,因而以往空气质量模式和气候模式研究中采用的特定源关闭法或扰动法并不能很好地区分某地污染的区域来源和行业来源,也不能区分特定源的复杂气候效应。本研究拟将自主开发的黑碳区域来源和行业来源的在线源追踪功能引入区域空气质量模式WRF-Chem和CESM 大气模块CAM-Chem中,揭示不同地区和行业黑碳对空气质量和气候因子变化的定量贡献和比例;以黑碳减排的环境—气候—健康综合效益为目标,为黑碳从全球到区域、从农业到生活源减排策略提供科学支持。以往气溶胶气候效应的研究多关注其对季风季节变化和年际变化的影响,对黑碳等气溶胶的候、旬、月的次季节尺度的变化研究较少。由于黑碳寿命较短(1周左右)且吸收效应很强,本研究拟阐明东亚季风背景下黑碳对季风精细进程从候、旬、月、季节到年际多尺度变化的影响,以及黑碳与东亚季风的相互作用机制。

### 5) 基于长时间序列监测数据, 量化评估黑碳和气象因子对人体健康影响的协同效应

当前黑碳健康效应的研究处于起步阶段,很多研究基于大气环境中黑碳气溶胶浓度分析其与总死亡率和心血管疾病死亡率的关系。即便如此,大气中

黑碳长时间序列监测数据缺乏,暴露数据监测更鲜见报道,且黑碳与人体健康的剂量响应关系缺乏。目前国内黑碳与居民健康效应关系的工作开展得较少,缺少量化评估黑碳对居民健康影响的研究。本项目选择中国黑碳排放高浓度区域,选择典型社区环境,采用个体采样器,实时跟踪人群的日常行为模式,获得其黑碳真实暴露浓度,建立黑碳大气环境浓度和真实暴露浓度的关系曲线;借助于数值模式技术,能够试验不同减排方案和气候情景下的黑碳造成的人体健康损失程度,为人体健康经济损失评估提供可靠的暴露数据;开展不同减排方案和气候情景下研究气象条件(热浪、寒潮)的改变对人体健康的影响,研究黑碳与气象要素的协同效应。

## 5 总结

当前对黑碳排放—老化—传输—暴露及其对应的气候、环境和健康效应研究仍存在很多不足,缺乏黑碳长时间序列监测数据和垂直分布廓线、燃烧源黑碳排放因子的实测、各种源排放黑碳粒径分布、混合状态、光学性质等的直接观测;清单构建过程中空间插值方法单一;各种大气环境中黑碳的真实混合状态,黑碳健康风险评价中的剂量—响应关系等缺失,限制了高分辨率和低不确定性排放清单构建、黑碳浓度空间分布、黑碳气候环境和健康风险的模拟和评价,进而制约黑碳减排策略制定。这些观测、模拟和验证工作在发展中国家尤其缺少。

### 参考文献

- [1] Schwarz J P, Gao R S, Fahey D W, et al. Single particle measurements of mid-latitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere. *J Geophys Res Atmos*, 2006, 111: D16207.
- [2] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J Geophys Res: Atmos*, 2013, 118(11), 5380-5552, doi: 10.1002/jgrd.50171.
- [3] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geosci*, 2008, 1: 221-227.
- [4] Peng J, Hu M, Guo S, et al. Markedly enhanced absorption and direct radiative forcing of black carbon under polluted urban environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(16).
- [5] Wang R, Tao S, Balkanski Y, et al. Exposure to ambient black carbon derived from a unique inventory and high-resolution model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(7):2459-2463.
- [6] Liu S, Aiken A C, Gorkowski K, et al. Enhanced light absorption by mixed source black and brown carbon particles in UK winter. *Nature Communications*, 2015, 6, doi:10.1038/ncomms9435.
- [7] Ding A J, Huang X, Nie W, et al. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China. *Geophys Res Lett*, 2016, 43(6):2873-2879.
- [8] Huang W, Zhu T, Pan X, et al. Air pollution and autonomic and vascular dysfunction in patients with cardiovascular disease: interactions of systemic inflammation, overweight, and gender. *Amer J Epidemiology*, 2012, 176(2):117-126.

# 风电功率组合预测技术研究综述

丁乃千<sup>1,2</sup> 陈正洪<sup>3</sup>

(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 恩施州气象局, 恩施 445000; 3 湖北省气象服务中心, 武汉 430074)

**摘要:** 20世纪80年代, 风电功率预测技术的研究工作就已经开始, 随着研究的深入, 预测方法越来越多, 预测精度也不断提高。而在全球风电产业迅猛发展的今天, 以单一方法为主的早期预测系统, 逐渐不能满足现代行业的需求, 组合预测作为一种全新的预测技术慢慢出现于各国研究人员的工作中。通过国内外大量的实际应用, 我们发现把多种预测方法进行加权组合, 预测精度相比单一的预测方法有了明显提高, 为未来的风电功率预测技术指明了发展方向。

**关键词:** 风电功率, 单一预测, 加权组合, 组合预测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.004

## Review of the Combination Prediction for Wind Power

Ding Naiqian<sup>1,2</sup>, Chen Zhenghong<sup>3</sup>

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 Enshi Meteorological Bureau, Enshi 445000 3 Hubei Meteorological Service Centre, Wuhan 430074)

**Abstract:** The study of wind power prediction technology has already begun in 1980's. More and more forecasting methods were invented, and the accuracy was continuously improved. In the rapid development of global wind power industry nowadays, the early prediction system based on a single method could not meet the needs of modern industry, the combination forecast is a new way that slowly appeared in the researches over the world. Through a large number of practical application at home and abroad, we find that the accuracy of combination method has improved dramatically comparing to a single method, and point out the direction of the development in the wind power prediction technology.

**Keyword:** wind power, single forecast, weighted combination, combined forecast

### 0 引言

预测学最早是Jakob Bernoulli (1654—1705年)创立的, 起初是为了减少人类生活各个方面由于不确定性导致错误决策所产生的风险<sup>①</sup>。随着科学的发展, 从20世纪50年代开始, 预测学逐渐成为了一门独立的学科, 被广泛地应用于各个部门和行业, 同时, 随着理论不断地结合实践, 也由最初的经验型向分析技术型过渡, 学科发展逐渐成熟。

人们用多种方法对同一个预测对象进行预测, 通过比较后, 往往会选择预测效果最好的那种方法。但每种预测方法所包含的信息与参数都是不一样的, 出发的角度也不一样, 当我们舍弃其中一种方法的时候, 必然会失去一部分有用的信息, 所以才有了1969年Bates和Granger两人的组合预测理论<sup>[1]</sup>。此方法一经提出, 就受到了国际学术界的重视, 人们开始了对其大量的研究与实践工作。

在组合预测这门学科发展较为成熟的大背景下, 风电功率预测技术也得到了充分的发展。在以丹麦为代表的部分欧洲国家, 数值天气预报模型的集合、数学方法模型的组合及混合模型都取得了非常好的成果, 尤其是在数值预报方面, 研发了专门用于风电场的小尺度数值集合预报模型, 大大提升了在不同风电场风的预报准确率。而在我国, 组合预报才刚刚起步, 且主要集中于数学方法的组合研究工作, 暂时还没有开展数值集合预报的工作。

### 1 研究意义

随着风电产业的发展, 国外的预测技术已经达到了一个非常成熟的阶段, 而国内虽然才起步不久, 但是发展的速度比较快, 有些已经达到了国际先进水平。

然而, 无论是国内还是国外同样面临的一个问题, 就是目前的风功率预报水平已经逐渐不能满足风电发展的需要<sup>[2-7]</sup>: 1) 在电网调度方面, 系统的旋转备用容量依然很多, 大大地增加了电网调度的难度

收稿日期: 2014年8月8日; 修回日期: 2014年11月4日  
第一作者: 丁乃千(1987—), Email: 1179716703@qq.com

① 百度百科. 预测学. <http://baike.baidu.com/view/140693.htm?fr=aladdin>.

和成本。2) 发电企业本身的压力越来越大, 他们的风电要参与市场竞争, 风电自身的不可控性大大降低了其竞争力, 同时还要受到行业管理层的经济惩罚。3) 对风机本身来说, 能合理有效地进行定期维护与检修, 能大大提高发电量和发电系数。4) 我国风资源分布极不均匀, 主要以集中分布的风电场为主, 对于风资源丰富的地区来说, 庞大的电容量上网更需要精确的预测, 而风资源相对匮乏的地区, 为了使少的资源利用率最大化, 也需要精确的预测。

同时还有一个最根本的问题, 目前所有已知的单一风电功率预测方法的精度已经几乎达到了最高水平, 提升的空间非常小。所以, 只有另辟蹊径, 才能达到一个更高的水平。

## 2 组合预测方法分类与简介

1) 根据组合成员不同可以分为物理组合、统计组合和物理-统计组合<sup>[8]</sup>。

物理组合方法的核心也就是数值天气预报(NWP), 随着数值天气预报技术的发展, 集合数值预报逐渐取代了单一的数值预报, 准确率在原有的基础上也得到了很大提高。最后将数值预报的结果进行人工订正后, 带入含有折损系数的风电功率曲线中或实际风电功率曲线中, 就能得到准确率相应较高的风电功率的预报值。

统计组合方法是利用两种或者多种线性或非线性的统计算法进行有目的的加权组合, 能够有效避免各自系统过程中所存在的一部分误差, 较为全面地综合各种方法的优点, 最终也可以提高风电功率预报的准确性。

所谓物理-统计组合, 是指结合物理预测方法和数学统计预测方法的组合法, 它能有效利用混合预测模型, 提高预测精度, 特别是对长时效的预测效果有了明显改善, 比传统的单一预测要更先进, 适用性更好。

2) 根据组合预测与各单一预测方法之间的函数关系可分为线性组合预测和非线性组合预测<sup>[9]</sup>。

所谓线性组合预测法, 是指把 $M$ 个单项预测方法预测出来的值 $f_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M$ ), 用一个线性的函数 $\Phi(f_1, f_2, \dots, f_M)$ 进行组合, 得到最终的预测值 $f$ , 它包括等权平均组合法、协方差优选组合法和回归组合法等。

下面介绍常用的两种线性组合方法:

### ①等权平均法

$$f = \sum_{i=1}^M \omega_i f_i, \quad (1)$$

式中:  $\omega_i$ 为第 $i$ 个单项预测方法的加权系数,  $i=1, 2, \dots, M$ ;  $\sum_{i=1}^M \omega_i = 1, \omega_i \geq 0$ 。其中,  $\omega_i = 1/M; i=1, \dots, M$ , 则该线性组合预测方法为等权平均方法。该方法是权系数全部相等的预测方法。

### ②协方差最优法

假设每个单项的预测误差方差为 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \dots, \sigma_{MM}$ , 组合预测误差的方差为:

$$\text{Var}(e) = \sum_{i=1}^M \omega_i^2 \sigma_{ii}, \quad (2)$$

在 $\sum_{i=1}^M \omega_i = 1$ 的条件下, 对 $\text{Var}(e)$ 引入拉格朗日乘子求极小值, 把求得各变量的值带入原方程, 即求得最优方程。

所谓非线性组合预测法, 是指把 $M$ 个单项预测方法预测出来的值 $f_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M$ ), 用一个非线性的函数 $\Phi(f_1, f_2, \dots, f_M)$ 进行组合, 得到最终的预测值 $f$ , 常见的几种非线性组合预测方法有:

### ①加权几何平均法

$$f = \prod_{i=1}^M f_i^{\omega_i}. \quad (3)$$

### ②加权调和平均法

$$f = \left[ \sum_{i=1}^M \frac{\omega_i}{f_i} \right]^{-1}. \quad (4)$$

除了上述传统的非线性组合预测方法外, 还有神经网络组合法, 它能够以任意精度逼近任意的非线性函数, 对各单项预测方法进行非线性组合。并且, 各方法的权重系数, 还可以根据不断的学习训练来进行调整, 使得预报准确率一直保持在很高的水平。

3) 根据组合预测加权系数计算方法的不同可分为最优组合预测方法和非最优组合预测方法<sup>[10]</sup>。

所谓最优组合预测方法是指根据某种准则的构造函数, 在一定的约束条件下求得目标函数的最大值或者最小值, 从而求得组合预测方法加权系数。协方差最优法就是比较常用的最优组合法之一。

而非最优组合预测方法则是指根据预测学的基本原理, 以最简单的方式来确定组合预测的加权系数的一种方法, 该方法实际操作简便, 但准确率不高。

4) 根据组合预测的加权系数是否随时间变化可分为不变权组合预测方法和可变权组合预测方法<sup>[11]</sup>。

不变权组合预测法是通过最优化规划模型或者其他方法计算出各个单项预测方法在组合预测中的加权系数, 让系数不变来进行预测, 最简单的就是等权平均法。

可变权组合预测法是指各单项预测方法的加权系

数是随着时间发生变化的，常见于神经网络组合预测方法，它的准确率往往要高于不变加权组合预测方法。

组合预测在预测时效上主要针对短期预测。

### 3 检验与应用

#### 3.1 预测检验

##### 3.1.1 数值预报集合

1996年，国家气象中心在超级计算机的基础上建立了最早的全球中期集合数值预报，但由于时间和空间分辨率太低，所以没有普及。随后，我国科学家又开发出了自己的数值预报系统（GRAPES），在此基础上研发中尺度集合预报系统。现阶段的风电功率预测所采用的数值预报都是单一的本地化之后的中小尺度天气预报模式，基本上没有针对风电场专门的集合数值预报，而这将成为日后重点突破的对象<sup>[12]</sup>。

相对国内，国外的数值预报研究开展得要早很多，而集合预报的研究也非常成熟，已经由最初的全球中期集合预报延伸到有限区域短期天气预报及月、季、年短期气候预测等方面，同时，在中小尺度极端天气预报方面也开展了结合数值预报的应用研究。正是在这种强大的技术支撑下，Nielsen等<sup>[13]</sup>通过利用欧洲中尺度天气预报中心（ECMWF）的风速集合预报，再把风速转换成风电功率，并对集合预报进行分位数分析，然后校正分位数，最终得出一条最合适的概率预测曲线，跟实际功率曲线比较接近，效果比单一成员要好得多。Lange等<sup>[14]</sup>在介绍德国风电预报进展的时候，提出了通过利用调整参数后的NWP1、NWP2、NWP3和这三种NWP的组合，将输出的数据代入预测模型所得到的风电功率均方根误差（RMSE）分别为组合<NWP1<NWP2<NWP3，充分说明了组合预报的明显优势。Giebel等<sup>[15-16]</sup>提到了如今计算机技术能力非常强大，不能只通过提高分辨率来降低错误率，可以通过处理周期的方式来减少其他出错率，通过使用集合预报，即使它是在同样的模式下不同参数化的数值预报集合结果，也能够最大程度的减小误差。其中他们正在使用的DMI-HIRLAM和DWD-Lokal模式，都是依赖于ECMWF和NCEP两大中心的集合预报，并且通过应用于丹麦各大风电场来不断进行检验与改进。

##### 3.1.2 数学模型组合

胡婷等<sup>[17]</sup>用三种单项预测方法及两种组合预测方法对我国内蒙古某风电场风功率进行了预测对比检验，结果显示三种单项预测方法的均方根误差及误差百分比分别为RBF神经网络模型（53.8467和0.0348）

<LS-SVM模型（67.2820和0.0404）<ARIMA时间序列模型（112.4989和0.0687），而利用两种线性组合预测的加权系数确定方法：最小方差法和最优非负可变加权系数，得到组合预测模型I和组合预测模型II的均方根误差和误差百分比都要小于这三个单项预测模型，且分别为组合预测模型II（23.7530和0.0144）<组合预测模型I（46.6040和0.0269），说明了组合预测准确率要高于单一预测的准确率。张国强等<sup>[18]</sup>也通过利用三种单一预测方法及一种组合预测方法对某风电场进行了预测对比检验，结果显示神经网络在一个星期中每天的预测绝对平均误差明显小于时间序列和灰色预测，而以最小方差法确定加权系数的组合预测的绝对平均误差比三种单一方法的小，也说明了组合预测的准确率要优于单一预测的准确率。刘永前等<sup>[19]</sup>同样用两种单一预测方法及一种组合预测方法进行了对比实验，得出以均方根误差最小确定加权系数的组合预报误差为12%，小于持续法（12.9%）和RBF神经网络法（15.9%），同样得出组合预测准确率要比单一预测高的结论。

#### 3.2 实际应用

##### 3.2.1 国外开发与应用情况

早在2003年丹麦国家实验室就研发出了Zephyr产品<sup>[20]</sup>，它是一款将Prediktor和WPPT模型相结合的风电功率预测系统，它集中了两种模型的优点，其中0~9h的预测采用了基于历史数据的统计预测模型，36~48h则是采用了基于数值天气预报的物理预测模型。

美国的AWS True Wind公司的eWind风电功率预报系统<sup>[21]</sup>，同样是一款组合了北美模式NAM、美国全球预报系统GFS模式、加拿大GEM模式及美国快速更新模式RUC等四种模式的输出结果进行集合作为数值天气预报模式，在统计模型上，也集合了逐步多元线性回归（SMLR）、人工神经网络（ANN）、支持向量回归（SVR）、模糊逻辑聚类（FLC）和主成分分析（PCA）等多种统计模型，使其产生一个集成的预测结果。

而最具有代表性的就是由欧盟资助的，于2002年10月开始为期四年的ANEMOS项目<sup>[22]</sup>，一共7个国家23个机构参加的一个全球性项目。它的目的是开发适用于陆地和海上风电场短期功率预测的方法和工具，它将物理和统计两种预测模型结合到一起，是一种优于之前任何一种单一预测模型的系统。

##### 3.2.2 国内开发与应用情况

由中国电力科学院源研究所和东润环能科技有限

公司联合开发的WPFS Ver1.0系统<sup>①</sup>，是一款以物理模型、统计模型及物理统计混合模型为基础的，针对不同风电场采用不同模型，适应性得到了广泛的应用验证，预报准确率高，服务效果好。

中科伏瑞研发的风电功率预测系统FR3000F<sup>②</sup>，它采用基于中尺度数值天气预报的物理方法和统计方法相结合的预测方法，根据不同资料 and 不同预报时间尺度，对每一种算法的预测结果选取适当的权重进行加权平均从而得到最终的预测值，有效提高了模型的适应能力和预测精度。

上海交通大学与法国兆方美迪联合研发的风电功率预报系统<sup>③</sup>，该系统对未来72h的短期预测采用了基于人工神经网络的统计方法模型、基于解析法和计算流体力学（CFD）的数学物理模型以及统计和物理方法混合模型。

湖北省气象服务中心与风脉可再生能源技术开发有限责任公司联合研发的“象脉风电功率预测预报系统”（WPPS）<sup>[23]</sup>，目前已经升级到2.0版本，该版本是在原来1.0版本基础上，将部分方法集成，最终得到一个集成预报结果。该系统已投入到风电场的业务运行中，运行正常，服务效果有了明显改善。

#### 4 小结与展望

风电功率预测技术已从之前传统单一的方法发展为更为先进的组合的方法，并在实际业务运行中取得了非常好的成效，适应了当下飞速发展的风电产业。

目前，国内外对组合预报方法的研究集中在对数值天气预报的集合和各方法间的组合上。其中，数值天气预报采用的是多模式的集合预报，加入了本地化因子，增加了同化后的非常规资料，大大提高了数值天气预报的准确率；而在方法间的组合上，主要通过设定目标函数的方法，寻找最合适的加权系数，把各个方法之间用线性或非线性的关系式组合到一起，得到新的预报模型。

紧紧抓住风电功率预测是行业的核心竞争力这一关键点，针对我国在风电功率预测上的薄弱环节，大力发展专门的针对不同风电场、不同下垫面及环境的数值天气的集合预报。同时，在组合权系数的研究方法上，除了研究更多的组合方式外，还要在不断的

试验中确定最合适的加权系数。只有组合预报技术越成熟越先进，才能在未来的世界风电领域中占据一席之地。

#### 参考文献

- [1] Bates J M, Granger C W J. The combination of forecasts. *Operational Research Society*, 1969, 20(4): 451-468.
- [2] 韩爽. 风电场功率短期预测方法研究. 北京: 华北电力大学能源与动力工程学院, 2008.
- [3] 叶晨. 风电功率组合预测研究. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2011.
- [4] 王建东, 汪宁渤, 何世恩, 等. 国际风电预测预报机制初探及对中国的启示. *电力建设*: 2010, 31(9): 10-13.
- [5] 舒进, 张保会, 李鹏, 等. 变速恒频风电机组运行控制. *电力系统自动化*, 2008, 32(16): 89-93.
- [6] Rohrig K, Lange B. Improvement of the power system reliability by prediction of wind power generation. *Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, June 24-28, 2007. IEEE*: 1-8.
- [7] 杨秀媛, 梁贵书. 风力发电的发展及其市场前景. *电网技术*, 2003, 27(7): 78-79.
- [8] 白永祥, 房大中, 侯佑华, 等. 内蒙古电网区域风电功率预测系统. *电网技术*, 2010, 34(10): 157-162.
- [9] 杨江平. 基于神经网络组合预测的风电场风速及风电功率短期预测. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 2012.
- [10] 周传世, 刘永清. 变权重组合预测模型的研究. *预测*, 1995(4): 47-48.
- [11] 毛开翼. 关于组合预测中的权重确定及应用. 成都: 成都理工大学信息管理学院, 2007.
- [12] 李泽春, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 1-15.
- [13] Nielsen H A, Madsen H, Nielsen T S, et al. Wind power ensemble forecasting. // *Proceedings of the 2004 Global Windpower Conference and Exhibition, Chicago, 2004*.
- [14] Lange B, Rohrig K, Ernst B, et al. Wind power prediction in Germany-Recent advances and future challenges. *Poster at European Wind Energy Conference, Athens, 2006*.
- [15] Giebel G, Brownsword R, Kariniotakis G, et al. The State of the Art in Short-term Prediction of Wind Power: A Literature Overview. *ANEMOS Report*, 2011.
- [16] Giebel G, Badger J, Louka P, et al. Description of NWP, Mesoscale and CFD models. *ANEMOS Report*, 2006.
- [17] 胡婷, 刘观起, 邵龙, 等. 风电场发电功率组合预测方法研究. *电工电气*, 2013 (5): 23-27.
- [18] 张国强, 张伯明. 基于组合预测的风电场风速及风电机组功率预测. *电力系统自动化*, 2009, 33(18): 92-95.
- [19] 刘永前, 韩爽, 杨勇平, 等. 提前三小时风电机组出力组合预报研究. *太阳能学报*, 2007, 28(8): 839-843.
- [20] Giebel G, Landberg L, Nielsen T S, et al. The zephyr-project: The next generation prediction system. // *Proceedings of Wind Power for the 21st Century, Kassel, Germany, 2002*.
- [21] 王丽伟. 风电场风速及发电功率预测的经济效益研究. 北京: 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 2010.
- [22] Kariniotakis G, Halliday J, Marti I, et al. Next Generation Short-term Forecasting of Wind Power Overview of the ANEMOS Project. // *European Wind Energy Conference, Athens, 2006*.
- [23] 许沛华, 陈正洪, 谷春. 风电功率预测预报系统的设计与开发. *水电能源科学*, 30(3): 160-162.

① 东润环能. 风电功率预测系统. <http://www.docin.com/p-244591706.html>.

② 北京中科伏瑞电气技术有限公司. 2010. FR3000F风电功率预测系统技术说明.

③ 兆方美迪. 2010. 兆方美迪风电功率预报系统 (PPT).

# SVM方法在霾识别和能见度预报中的应用

郑朝霞 周梅 季致建 方桃妮 刘学华

(金华市气象局, 金华 321000)

**摘要:** 选用2013—2014年地面自动站资料、探空气象资料以及大气污染物浓度的数据, 采用支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 方法分别建立金华SVM霾识别预报模型和14时能见度SVM回归预报模型来进行实证研究。通过预报结果检验发现: 1) 金华地区SVM霾识别预报模型的TS评分均在0.65以上, 且8个最优模型判断完全错误的天数只有3d, 占2.7%, 表明模型分类结果较好, 可在实际业务预报中推广应用; 2) 金华地区14时能见度SVM回归预报模型得到的预报值集中在6~16km, 预报值较为集中, 而实况值波动较大, 即模型对极值预报能力较弱, 表明模型对中度霾和重度霾天气预报的指导意义不大。

**关键字:** SVM方法, 霾识别预报, 14时能见度预报

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.005

## Application of SVM Method to Identification of Haze and Prediction of Visibility

Zheng Zhaoxia, Zhou Mei, Ji Zhijian, Fang Taoni, Liu Xuehua

(Jinhua Meteorological Bureau, Jinhua 321000)

**Abstract:** Based on the data in 2013-2014 at automatic weather station, radiosonde and the concentrations of air pollutants, the identification models of haze and the prediction models of visibility at 1400 BT were respectively carried out by using the Support Vector Machine (SVM) at Jinhua Meteorological Bureau. The results show that: 1) The identification models of haze may be used in the actual business forecast, because the satisfied TS scores were all over 0.65, except for that only three days were judged completely wrong by eight optimal models; 2) The prediction of the visibility forecast models for haze-day at 1400 BT in Jinhua were concentrated in 6-16km, which is much small than the actual range, however. That means the models have little capability to forecast the extreme values, so have a little guidance to distinguish the moderate and severe haze.

**Keywords:** SVM method, the identification of haze, visibility forecast at 1400 (BT)

### 0 引言

近年来, 霾是民众关注的热点问题之一且其在我国的出现频率越来越高, 特别是长三角和京津冀等工业化发达的城市尤为突出。金华地处金衢盆地东段, 为浙中丘陵盆地地区, 地形南北高、中部低, 呈马鞍形, 位于长三角经济发达地区的下游, 污染源较多, 加上特殊的地形有利于由北向南移动的污染物堆积滞留, 有利于霾的形成。金华的气候特点为除连阴雨时期、梅雨汛期和台风汛期等三个时段降水较为丰沛外, 其他时间 (尤其是每年10月至次年2月) 降水常年较少, 霾的影响较为严重。霾与人民的身体健康息息相关, 影响较为严重, 故霾的形成机理、变化和预测预报方法是目前气象和环境部门研究的重点。在业

务中, 霾常用的预报方法主要有经验预报法、统计预报法和数值预报法, 其中经验预报和统计预报法需要结合有利于霾形成的气象条件和变化规律等, 但考虑到影响霾形成的因素较多、影响因子复杂, 且其与雾形成的气象条件相类似等特点, 目前尚未得到较好的研究结果。而数值预报方法则是先要了解当地污染物浓度和变化规律, 再计算能见度。但由于影响污染物浓度变化的因素较多, 变化规律较难掌握, 加上计算量较大, 这项方法在实际业务应用中开展较为缓慢。本文采用一种对预报因子与预报对象是否线性相关无明显的依赖关系, 且对因子的数量没有明显的限制的<sup>[1-2]</sup>, 并基于统计学习理论发展而来的方法, 即支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 方法对霾的识别和能见度预报进行了较为系统的研究。

统计学习理论是一种专门解决有限样本学习问题的理论, SVM方法就是在这一理论上发展演化而来的。陈永义等<sup>[1]</sup>和冯汉中等<sup>[2]</sup>指出, SVM方法的

收稿日期: 2015年6月23日; 修回日期: 2016年3月14日  
第一作者: 郑朝霞 (1987—), Email: zzx19870310@163.com  
资助信息: 金华市气象局青年项目 (2014QN01)

最终决策函数只由少数的支持向量所决定, 计算的复杂性大大降低, 而且根本不需要知道自变量和因变量之间的显式表达式, 对研究预报对象与预报因子间关系不明确的情况十分有利。目前, SVM方法在气象预测预报领域, 如暴雨预报<sup>[3]</sup>、温度预报<sup>[4-5]</sup>、大雾预报<sup>[6]</sup>、天空云量预报<sup>[7-8]</sup>等方面已经取得了一些进展。本文以金华国家基准气候站(简称金华站, 下同)为例, 将SVM分类和回归方法应用到霾识别和14时(北京时间, 下同)能见度预报中。

## 1 SVM霾识别预报模型

### 1.1 确定预报对象

随着气象观测业务现代化的发展, 自2014年1月1日起金华站能见度观测改为自动观测, 同时, 国家气象中心对霾判识标准进行了相应修订, 即当降水量 $<0\text{mm}$ 、风速 $<4\text{m/s}$ 、能见度 $<7500\text{m}$ 、相对湿度 $<80\%$ 时, 判识为霾, 且规定霾日的确定应以台站的自动观测记录为准。故本文霾日的确定均以金华站地面观测上传的长Z文件的记录为准, 若天气现象栏中出现霾记录则确定当日为霾日, 记为“1”; 否则记为“-1”, 即无霾日。

### 1.2 构建预报因子

选取2013年1月至2014年12月地面、探空和污染物浓度资料, 共71个预报因子构建模型, 具体包括: 1) 金华站逐日08、14和20时的温度、气压、相对湿度、露点和风速5类地面资料; 2) 衢州站<sup>①</sup>的1000、925、850、700和500hPa各层的位势高度(其中1000 hPa位势高度由于缺测太多故剔除), 温度、露点和风速等探空资料; 3) 逐日08、14和20时的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 6类大气污染物浓度<sup>②</sup>。

### 1.3 选取建模方式

CMSVM2.0系统中分类问题的模型择优标准有三种<sup>③</sup>, 本文选用适合正样本发生频率较小且相对较严格的标准——正样本TS评分。用此标准分别选取8种核函数的最优模型, 并进行试验对比。

### 1.4 建立识别预报模型

剔除缺测样本后, 模型的有效样本均为726个, 由于样本长度有限, 且试验样本的数据不参与建模过程, 故可用试验样本代替检验样本。将样本资料按时间顺序分为两个部分: 1) 训练样本, 约占85%, 共617个; 2) 试验和检验样本, 约占15%, 共109个。

## 1.5 模型结果和分析

采用逐步筛选方法确定最优模型参数, 得到SVM霾识别预报最优模型, 结果如下:

通过表1的分析得到: 1) 8类核函数最优模型的正样本分类TS评分均在0.65以上, 最大为0.68, 分类正确率均大于73.39%, 最大为77.06%, 分类结果较为满意; 2) 除线性核函数外, 其余核函数空报次数少于漏报, 但8类核函数最优模型的预报结果总体相近, 故需要对最优模型分类情况和错误的样本进行逐个比对和交叉分析。

表1 SVM霾识别最优模型和分类结果

Table 1 The optimal models and test results of the identification models by using the SVM method

核函数	c	glud	漏(空)报	正确率/%	成功率/%	TS评分	正样本的TS评分
线性	160	—	12(16)	74.31	78.67	0.68	0.43
多项式	50	2	18(9)	75.23	85.48	0.66	0.55
径向基	50	1.7	18(11)	73.39	82.81	0.65	1.0
对称三角形	50	0.3	18(7)	77.06	88.33	0.68	1.0
柯西	50	1.3	16(11)	75.23	83.33	0.67	1.0
拉普拉斯	50	0.35	18(7)	77.06	88.33	0.68	1.0
双曲正割	990	0.2	17(8)	77.06	87.10	0.68	0.85
平方正弦	900	0.25	19(8)	75.23	86.67	0.66	0.82

通过对8类核函数最优模型的分类结果逐个比对、交叉分析以及对分类错误样本的分析(图1)知: 1) 检验样本共有109个, 其中有44个样本分类完全正确, 38个样本有大于等于5个最优模型分类正确, 24个样本有小于等于4个最优模型分类正确, 只有3个样本分类完全错误; 2) 65个分类错误样本中, 除3个完全分类错误的样本外, 最优模型对其余样本的判断错误结果只有一种, 未出现既有空报又有漏报的样本, 减少了分歧, 增强了实际业务中预报员通过结合当日实况和气象条件的主观分析进行正确预报的把握。

通过对8个最优模型都错误归类的3个样本(2014年10月13日、11月11日和27日)的分析可知: 三天均为霾日和无霾日转折天气, 主客观预报难度都相应增加。其中, 10月12日有霾, 属轻度污染; 随着冷空气南下, 13日金华处地面锋区, 风力增大, 有利于污染物的扩散, 转为无霾; 14日受地面冷高控制, 层结稳定, 且没有输入性污染物, 仍无霾。11月10日冷空气南下补充, 输入性污染物增多, 但8—10日金华

① 金华站不是探空站, 故选用距离较近的探空站——衢州站(58633)资料代替。

② 金华站未设环境质量监测点, 环保部门在金华市本级共设4个监测站点, 其中焦岩背景站2013年8月开始投入使用, 故文中大气污染物浓度数据用金华监测站(29.10°N, 119.68°E)、十五中(29.08°N, 119.65°E)和四中(29.11°N, 119.65°E)三个监测站点的平均值代替。

③ 中国气象局气象干部培训学院《SVM2.0用户使用手册》和陈永义, 冯汉中, 王泳等的《SVM讲义》。

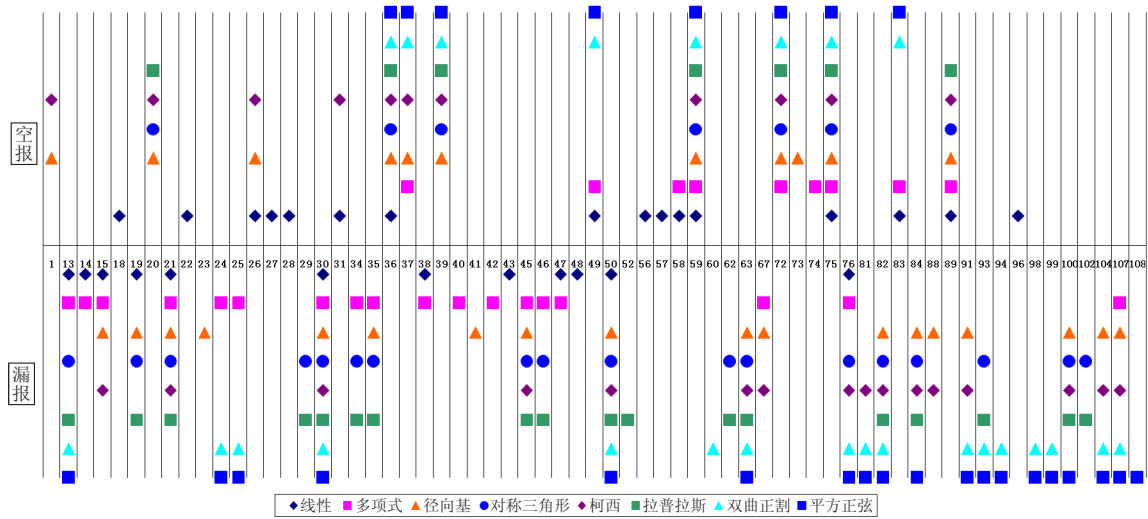


图1 8个最优模型中分类错误样本分布  
Fig.1 The error classification samples of the eight optimal models

站及周边地区都有弱降水，无霾；11日冷空气继续渗透，弱降水发生前或发生时对颗粒物的洗涤作用较好<sup>[9-10]</sup>，能见度短暂增大，无霾；12日冷空气主体南下，输入性污染物持续的增加，转为霾日；26日夜里高空有下滑槽东移影响，27日低层有弱切变东移，金华站周边有弱降水，无霾；28日受弱冷空气影响，输入性污染物增加，转为有霾。综上所述可以看出，前期弱降水对空气中颗粒物或污染物有一定的洗涤作用，而强降水又可以使能见度显著减低<sup>[9-10]</sup>，说明降水天气现象可以影响能见度的变化，进而影响霾的判别，增加了霾天气识别的难度，尤其是有霾和无霾转折性天气预报的难度。

从这三个例子也可以看出，由于金华特殊的地形和地理位置影响，冷空气对金华站霾的形成是一把双刃剑：一方面受冷空气影响，风力将会增大，将有利于污染物的扩散，有利于霾的消散，如2014年10月13日；另一方面由于冷空气路径一般为自北向南，因而冷空气会携带上游地区的污染物南下，受益地效应的影响，有利于输入性污染物在金华的堆积，加重污染，如2014年11月27日。

## 2 14时能见度SVM回归预报模型

业务中，霾预报的重点和最终目的是为了做霾的强度预报，依据霾的强度发布相应级别的预警信号等，而根据国家气候中心对霾等级的划分标准可以看出，大气能见度是其判断的主要依据。其中，当能见度大于2000m且小于3000m定义为中度霾，当能见度小于2000m时定义为重度霾。下文中将利用SVM回归

预报方法建立14时能见度预报模型。

### 2.1 确定预报对象和预报因子

预报对象为2013年1月1日—2014年12月31日14时能见度，预报因子同SVM霾识别预报模型。

### 2.2 选取建模方式

SVM回归模型的择优标准选用均方根，分别得到8种核函数的最优模型，并进行对比。

### 2.3 建立回归预报模型

剔除缺测样本后，模型的有效样本均为726个，样本分类同SVM霾识别预报模型。

### 2.4 模型结果和分析

采用逐步筛选的方法确定最优模型参数，得到SVM回归预报最优模型，结果如表2和图2所示。

表2 能见度预报最优模型和预报结果  
Table 2 The optimal models and forecast results of the prediction models of visibility

核函数	c	guld	w	绝对差	均方差	准确率 (≤3km)	准确率 (≤2km)
线性	10	-	0.5	3.99	5.00	43%	35%
多项式	10	1	0.5	3.99	5.00	43%	35%
径向基	10	0.05	1.5	3.84	4.66	45%	33%
对称三角形	10	0.05	0.1	3.97	4.84	44%	33%
柯西	10	0.05	1.5	3.84	4.66	45%	33%
拉普拉斯	10	0.1	0.05	3.97	4.84	44%	33%
双曲正割	10	0.5	0.45	3.81	4.67	46%	31%
平方正弦	10	0.9	0.45	3.81	4.65	45%	35%

通过分析表2可知：8个核函数的最优模型对14时能见度预报值和预报效果较为接近，其中绝对差

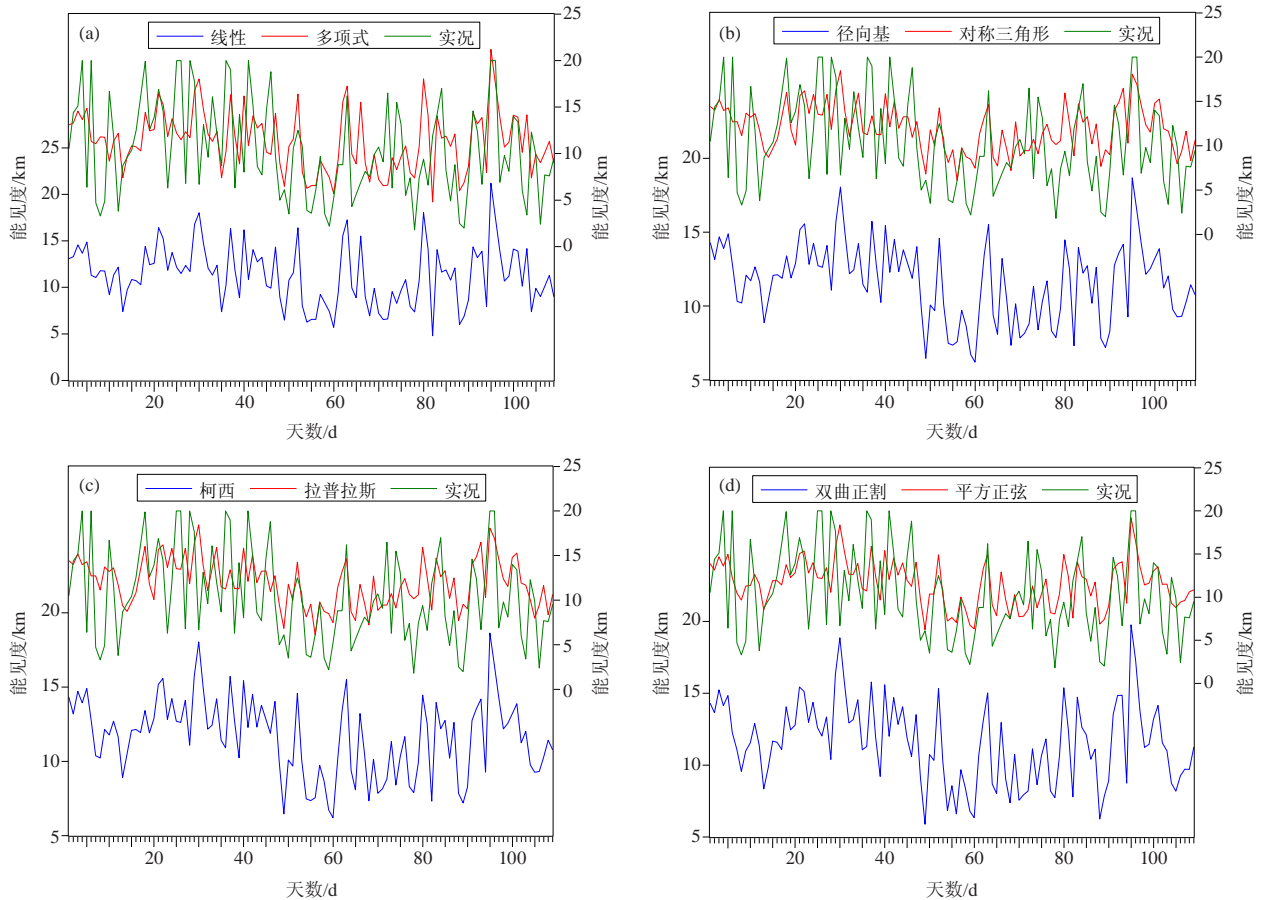


图2 14时能见度实况值和8个最优模型14时能见度预报值分布

(a)线性函数、多项式函数预报值；(b)径向基、对称三角形预报值；(c)柯西函数、拉普拉斯函数预报值；(d)双曲正割函数、平方正弦函数预报值

Fig.2 The visibility at 1400 of the real and the forecast of the eight optimal models

(a) The forecast of linear and polynomial; (b) The forecast of the radial basis function and symmetrical triangle function; (c) The forecast of the Cauchy function and Laplace function; (d) The forecast of Hyperbolic secant function and square sine function

为3.81~3.99，均方差为4.65~5.00，误差小于2km的预报准确率为31%~35%，小于3km的准确率为43%~46%。

通过预报值和真实值对比（图2）可知：14时能见度实际值波动较大，而8个最优模型的预报值均集中在6~16km，且波动较为平缓，说明SVM回归预报模型对14时能见度极值预报效果较差，尤其是对能见度小于6km的样本预报准确率几乎为0，即对重度霾和中度霾天气的指导意义不大。

应用SVM回归方法建立14时能见度预报模型的预报结果不是很理想，究其原因分为客观和主观两方面。从客观上看，一方面由于探空站设置的局限性，用衢州站探空信息代替，大大增加了模型的误差；另一方面由于只有近两年的大气污染物浓度数据资料，样本长度较短，使得模型构建时样本包含的信息不

够全面，并且检验样本以冬季为主，而训练集中冬季样本较少，这就引起建立的模型不足以预报检验样本。主观方面的原因在于影响能见度的因素众多且十分复杂，众多研究表明气温、空气湿度、地面风速和24h内变压等气象因素以及太阳辐射、紫外辐射和大气成分等环境因素都与能见度有很好的相关性。而且晴天、阴天或雨天等不同类型天气下能见度与污染物之间的相互作用也不同。从长期角度出发来看，能见度变化趋势与当地人为排放污染物浓度密切相关，化工厂等污染物排放较为严重企业的建立、拆除，以及污染物处理设备的更新等都将影响当地能见度的变化。然而，本文在建立模型时，仅考虑了气压、相对湿度、风速、探空和6类大气污染物，对当日太阳辐射、紫外辐射和天气类型未分析，尤其是未考虑雨水对空气中颗粒物的沉降冲刷作用，所选因子过于局

限,不够全面。另一部分的误差可能是由于引入了影响能见度相关性不大的因素引起的,如引入了700和500hPa两层的探空资料,资料距离地面较高,而污染物平流扩散的主要层次在200~500m<sup>[11]</sup>。故在实际业务中,需要在不断增加样本长度、样本的多样性和综合性的同时,引入更多相关性较好的或删除相关性不大的预报因子,不断完善模型。

### 3 结论和讨论

主要结论如下:

(1) 利用SVM分类方法建立的霾识别模型正样本分类TS评分均在0.65以上,最大为0.68,且109个样本中,3个样本的预报分类完全错误,占2.7%,分类预报结果基本达到业务应用水平。

(2) 应用SVM回归方法建立的霾日14时能见度预报模型中,8类最优模型的预报效果和预报值较为接近,误差小于3km的准确率仅为43%~46%,尤其是对极值预报能力较弱,对霾强度的预报指导意义不大。

(3) 冷空气对金华霾的形成和变化具有双重作用,一是随着冷空气南下,风力有所增大,有利于污染物扩散,可以缓解霾污染;二是由于冷空气南下携带大量的北方污染物,尤其是持续性补充的冷空气,加上盆地效应,使得污染物不断往金华输送并在此堆积,将会加重污染。

(4) 弱降水发生前或发生时可以对空气中颗粒物有一定的洗涤作用,使大气水平能见度增大,缓解霾污染。但由于降水本身强度较弱,对空气的洗涤作用不明显,弱降水停止后反而可使大气中气溶胶粒子膨胀,能见度降低,加剧霾的形成。

通过对本文的分析可以发现,冷空气、降水对金华霾的形成和变化具有双重作用,既可以缓解霾污染,也会加重污染,如降水强度、冷空气本身强度

以及冷空气带来降水的强度等的不同,对霾形成的作用完全不同。并且由于环流形势的每日变化,在地面要素或污染条件相近的条件下,霾是否出现也不尽相同。稳定的天气系统配置,如500hPa环流呈纬向型、锋区偏北、冷空气活动偏弱、南支系统不活跃,或地面形势场稳定、多均压场控制等都有利于霾形成或持续。

综上所述,在建立模型时,不仅要引入因子的相关性进行讨论,而且要更注重对其物理意义的分析。在今后的研究中,可以增加一些数值预报中预报效果较好、较稳定且对霾形成有明确影响的要素,增加预报因子从而改善预报效果。同时,在大量个例积累的基础上,可以尝试根据每个因子的影响程度不同来设置权重,或可在实际业务中明确判定阈值。

致谢:感谢中国气象局气象干部培训学院SVM应用研究小组提供CMSVM2.0应用软件。

### 参考文献

- [1] 陈永义,俞小鼎,高学浩,等.处理非线性分类和回归问题的一种新方法(I)——支持向量机方法简介.应用气象学报,2004,15(3):345-354.
- [2] 冯汉中,陈永义.处理非线性分类和回归问题的一种新方法(II)——支持向量机方法在天气预报中的应用.应用气象学报,2004,15(3):355-365.
- [3] 韦惠红,李才媛,邓红,等.SVM方法在武汉区域夏季暴雨预报业务中的应用.气象科技,2009,37(2):145-148.
- [4] 陈晓燕,赵玉金,孙文英,等.支持向量机方法作温度预报试验.贵州气象,2006,30(1):31-33.
- [5] 常军,李祯,朱业玉,等.基于支持向量机(SVM)方法的冬季温度预测.气象科技,2005,33(s1):100-104.
- [6] 贺皓,罗慧.基于支持向量机模式识别的大雾预报方法.气象科技,2009,37(2):149-151.
- [7] 胡邦辉,刘丹军,王学忠,等.最小二乘支持向量机在云量预报中的应用.气象科学,2011,31(2):187-193.
- [8] 熊秋芬,胡江林,陈永义.天空云量预报及支持向量机和神经网络方法比较研究.热带气象学报,2007,23(3):255-260.
- [9] 刘西川,高大长,刘磊,等.降水现象对大气消光系数和能见度的影响.应用气象学报,2010,21(4):433-441.
- [10] 赵胡笳,马雁军,赵明,等.沈阳两次降水过程能见度变化特征.气象与环境学报,2014,30(2):60-66.
- [11] 俞剑蔚,孙燕,张备,等.江苏沿江一次重霾天气成因分析.气象科学,2009,29(5):664-669.

# 伊犁河流域春季融雪型洪水危险性评价与区划

刘鑫<sup>1</sup> 赵鲁强<sup>1</sup> 刘娜<sup>2</sup> 惠建忠<sup>1</sup> 唐千红<sup>1</sup>

(1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2 国家气象信息中心, 北京 100081)

**摘要:** 将春季融雪型洪水发生最为频繁的伊犁河流域作为研究区, 选取高程、坡度、地形起伏度、与水系距离、土地利用/覆被、冬季积雪深度作为春季融雪型洪水的影响因子, 利用GIS技术和信息量模型定量计算了春季融雪型洪水的危险性, 并基于总信息量最终将研究区域划分为极高度、高度、中度、低度和极低度等5个等级危险区。研究表明: 春季融雪型洪水灾害主要沿河谷地带发生, 并且与冬季积雪深度、农田等分布相一致, 灾害点与危险性区划具有很好的空间相关性, 运用信息量模型开展春季融雪型洪水危险性区划具有较好的科学客观性和业务应用价值, 可为该区内的春季融雪型洪水精细化预报提供有力的技术支撑, 可为防灾减灾决策服务提供参考依据。

**关键词:** 春季融雪型洪水, 危险性评价, 信息量模型, 伊犁河流域

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.006

## Risk Evaluation of the Spring Snowmelt Flood in Ili River Basin and It's Mapping

Liu Xin<sup>1</sup>, Zhao Luqiang<sup>1</sup>, Liu Na<sup>2</sup>, Hui Jianzhong<sup>1</sup>, Tang Qianhong<sup>1</sup>

(1 Public Service Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081)

**Abstract:** This paper evaluates the risk of the spring snowmelt flooding, which is often occurred in the Ili River Basin, based on GIS technology, information quantity model and impact factors including elevation, topographic relief degree, slope, distance from the river system, land use/cover types and winter snow depth. According to the final comprehensive information quantity, the spring snowmelt flooding hazard may be divided into five grades: very high, high, moderate, low and very low. Results show that the spring snowmelt floods concentrated mainly along the zonal river valley in the Ili River Basin, and are consistent with the distribution of winter snow-belt and farmland. The site number of spring snowmelt flooding hazards is positively correlated with the hazard grades. It is shown that the method based on the information quantity, and the mapping of spring snowmelt flood hazard zones is objective and has a better business value. The study may provide a technical support for a fine forecast of the spring snowmelt flood, and a valid basis to prevent from the spring snowmelt flood.

**Keywords:** spring snowmelt floods, risk evaluation, information quantity model, Ili River Basin

### 0 引言

20世纪80年代以来, 在全球气候变暖的大背景下, 雪线上升, 积雪消融加快, 我国春季融雪型洪水的发生频次明显增加且强度加大, 其中新疆融雪型洪水最为显著<sup>[1-2]</sup>。新疆融雪型洪水的发生不仅严重威胁到了当地的公路、铁路、水库、灌溉渠道等交通、水利设施, 危及到了人民的生命财产安全, 更较大地制约了当地的社会经济发展<sup>[3]</sup>。例如, 2010年春季新疆北部地区发生融雪型洪水40多次, 造成15.55万人受灾, 直接经济损失约3亿元<sup>①</sup>。并且, 随着经济的快速

发展及人类活动加剧, 融雪型洪水带来的社会灾害损失也与日俱增。而伊犁河流域是新疆春季融雪型洪水发生最为频繁的地区, 据统计, 2000—2013年, 伊犁河流域的春季融雪型洪水占新疆该灾害总数的40%, 因此, 开展该地区的春季融雪型洪水危险性评价与区划研究尤为迫切和必要。

春季融雪型洪水危险性包含了孕灾环境、致灾因子等多重因素的影响, 春季融雪型洪水危险性评价需对这多种影响因素进行考虑<sup>[4-7]</sup>。春季融雪型洪水危险性区划是在已有融雪型洪水的形成机理研究基础上, 选择融雪型洪水形成的主要影响因子, 进而利用一定的方法进行未来潜在融雪型洪水的发生概率估算,

收稿日期: 2016年9月17日; 修回日期: 2016年10月25日  
第一作者: 刘鑫(1983—), Email: queerjisheng@163.com  
资助信息: 中国气象局公共气象服务中心业务服务专项基金项目(M2014008)

① 中国新闻网: 新疆今年发生洪灾40多次损失近3亿元。[2010-05-05]. <http://www.chinanews.com/gn/news/2010/05-05/2263366.shtml>.

并完成融雪型洪水危险性预测分区。目前在洪涝灾害危险性评价方面，常用的方法有主成分分析、回归分析、层次分析、人工神经网络和信息扩散理论等<sup>[5, 8-9]</sup>，由于应用条件苛刻或专家打分主观性比较强等原因，不易于操作，而广泛应用于地质灾害危险性评价中的信息量模型法<sup>[10-11]</sup>，易于实现且评价结果客观性较高，将初次应用于春季融雪型洪水危险性评价与区划研究。本文将结合伊犁河流域春季融雪型洪水发生的空间分布特征，选出高程、地形起伏度、坡度、水系距离、土地利用/覆被及冬季积雪深度等6个融雪型洪水影响因子，运用信息量模型法和GIS技术对研究区的春季融雪型洪水危险性开展定量评价，为伊犁河流域的春季融雪型洪水精细化预报提供技术支撑，为春季融雪型洪水的重点防治提供科学参考依据。

## 1 研究区概况

伊犁河流域位于新疆天山最西部，地理位置在42°50′—44°10′N，80°30′—83°10′E，面积约5.6万km<sup>2</sup>，海拔531~6038m。全地区地貌的基本特征为三山夹两谷，东、南、北三面高山环绕，地势东高西低，东窄西宽，河流由特克斯河、巩乃斯河和喀什河三大支流组成，干流全长1236km，在中国境内长约442km<sup>[12]</sup>。伊犁河流域是新疆主要粮油和畜牧业基地，畜牧总头数为全疆第一，占全疆15%以上，耕地面积占全疆的12%，农作物的总产量占15%，是新疆重要的绿洲农业区（图1）<sup>[13]</sup>。

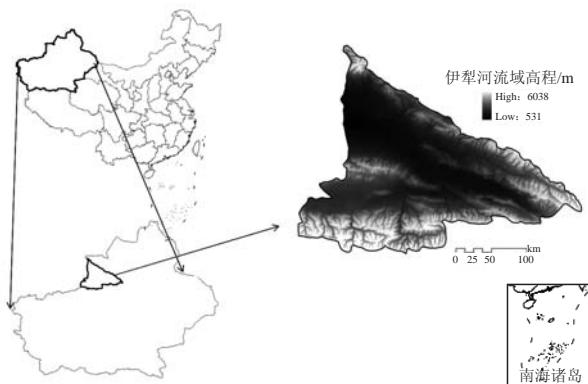


图1 研究区位置示意图  
Fig. 1 The location of research area

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

本文研究资料主要包括伊犁河流域2000—2013年春季（3—5月）融雪型洪水灾情资料、90m的数字高程资料、1:100万的水系分布图、1km的土地利用图和1981—2013年2月下旬的积雪深度资料。

### 2.2 资料处理方法

首先，在总结借鉴国内外相关学者的春季融雪型洪水成因和灾害影响研究成果基础上，结合研究区内春季融雪型洪水实际情况筛选影响因子。

其次，基于灾情资料和GIS技术，提取灾情对应的各影响因子数值。通过分析主要影响因子与春季融雪型洪水空间位置的关系，将各主要影响因子划分为多个特征等级。

最后，基于信息量模型和GIS技术，统计各主要影响因子每个特征等级的危险度信息量，综合得到研究区春季融雪型洪水各重要影响因子的危险度信息量，进而运用加权综合法计算得到研究区的危险度信息量分布；利用自然断点法，将总信息量重新划分特征等级，最终得到精细化的春季融雪型洪水危险性区划图。

## 3 伊犁河流域春季融雪型洪水危险性评估与区划

### 3.1 春季融雪型洪水影响因子的提取与分析

春季融雪型洪水是流域水文地理环境、流域积雪、下垫面以及热力条件等因子综合影响的结果<sup>[14-17]</sup>，在春季融雪型洪水危险性区划中，合理把握融雪型洪水发生的主要影响因子非常重要。另外，通过分析主要影响因子与春季融雪型洪水空间位置的关系，可揭示春季融雪型洪水的分布规律，找出各影响因子对春季融雪型洪水发生过程的贡献大小。本次研究中春季融雪型洪水影响因子的选取是在借鉴国内外相关学者的研究成果基础上，并结合研究区内春季融雪型洪水实际情况筛选，确定高程、地形起伏度、坡度、水系距离、土地利用/覆被、冬季积雪深度等6个融雪型洪水影响因子（图2）。

#### 3.1.1 高程因子

高程是描述地形地貌的定量指标<sup>[18]</sup>，与山区气温和积雪深度有密切关系<sup>[14, 16]</sup>，因而是春季融雪型洪水危险性的重要评价因子。利用美国NASA的3弧秒（约90m分辨率）的新疆数字高程图，处理生成覆盖伊犁河流域的1km×1km栅格数据，如图2a所示。从研究区的高程图可见，区内海拔较高，主要为山区。从融雪型洪水与高程关系（图3）来看，融雪型洪水主要发生在533~1300m高程范围内，占区内总灾害点的70.2%。

#### 3.1.2 地形起伏度因子

地势起伏度是某一确定面积内最高和最低点的高差，是描述地貌形态的定量指标<sup>[18-19]</sup>。较小的地形起伏度可使得一定范围内的积雪几乎同步开始消融，中、低山区能够同时来水，从而缩短春季融雪洪水的

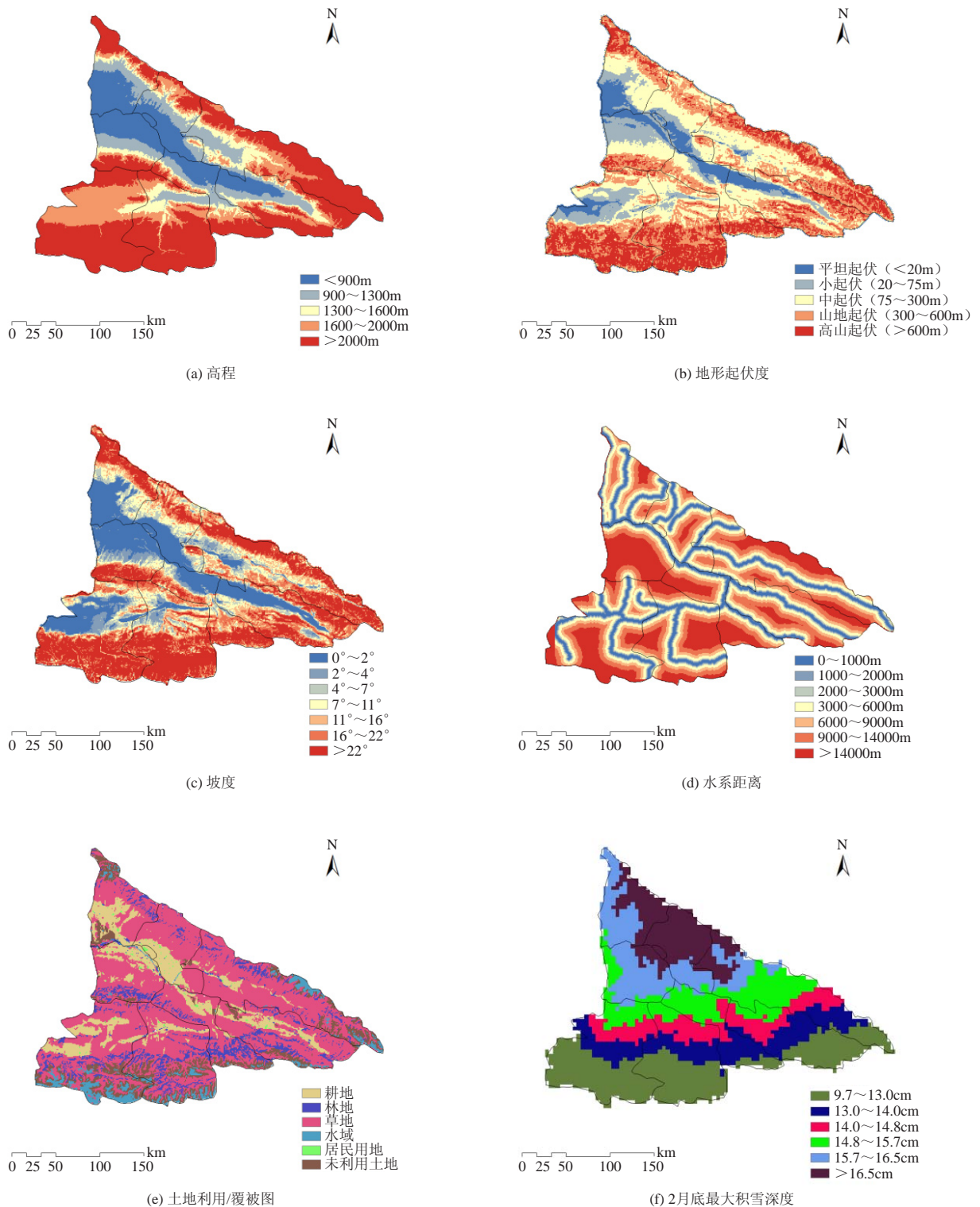


图2 伊犁河流域春季融雪型洪水评价因子

Fig.2 Hazard evaluation factors of spring snowmelt-flood in the Ili River Basin

过程、增加洪峰流量<sup>[15]</sup>。它也是重要的春季融雪型洪水评价因子。基于数字高程和ARCGIS空间分析计算得到1km地形起伏度栅格数据，如图2b所示。据地貌

制图时的分类标准<sup>[18]</sup>，研究区内平坦起伏（0~20m）地区面积占总面积的8.78%，小起伏（20~75m）地区面积占总面积的12.25%，中起伏（75~300m）地

区面积占总面积的28.55%，山地起伏（300~600m）占总面积的29.37%，高山起伏（>600m）占总面积的21.05%。该结果显示（图4），研究区地形大多为中

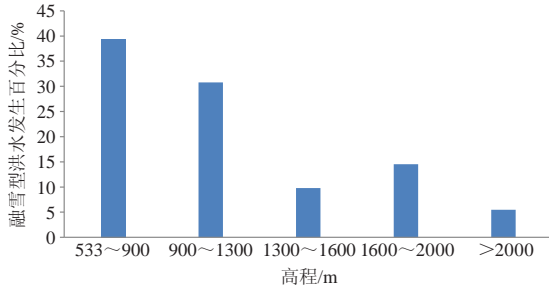


图3 春季融雪型洪水与高程关系  
Fig.3 Relation between spring snowmelt-flood and elevation

起伏、山地起伏和高山起伏；区内春季融雪型洪水灾害点主要分布在小起伏、中起伏地区，约占总灾害点的75.5%。

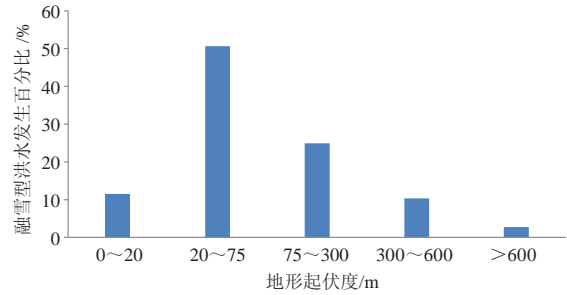


图4 春季融雪型洪水与地形起伏度关系  
Fig.3 Relation between spring snowmelt-flood and topographic relief degree

### 3.1.3 坡度因子

坡度是高度变化的最大值比率，反映陡缓程度<sup>[20]</sup>。从理论角度，坡度越大，水流动速度越快。高程、地形起伏度和坡度在春季融雪型洪水危险性评价中能够起到互相补充的作用，这三个因子均与春季融雪型洪水具有良好的相关性，高程越低、地形变化越小，洪水、山洪灾害越容易发生<sup>[4, 8]</sup>。使用ARCGIS软件生成伊犁河流域的1km坡度栅格数据，如图2c所示。从研究区的坡度图来看，区内坡度较陡峭，坡度分布在0°~78.9°，从融雪型洪水与坡度分布关系图（图5）来看，融雪型洪水主要发生在0°~4°，该区域内的融雪型洪水占区内总灾害点的71.7%。

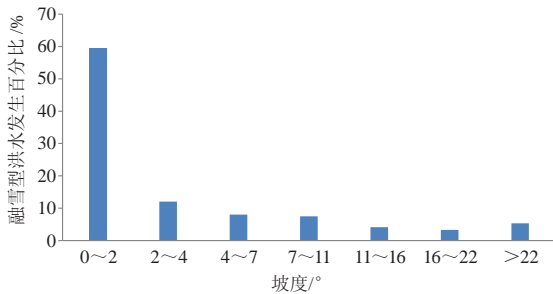


图5 春季融雪型洪水与坡度关系  
Fig.5 Relation between spring snowmelt-flood and slope

### 3.1.4 水系距离因子

水系分布反映了积雪融水的流动方向，河流或山洪沟的水流流量迅速上涨，易发生融雪型洪水。因而，一般河流附近发生融雪型洪水的可能性较大<sup>[4, 8]</sup>。根据河流分布图，利用ARCGIS软件生成水系因子图。如图2d所示，通过对研究区的融雪型洪水宏观分析发现，区内融雪型洪水沿着河谷呈条带状分布。利用ARCGIS的空间分析工具，做水系的缓冲区，

分析融雪型洪水在距河流不同的区域内分布特征，图6为河流不同缓冲宽度内的融雪型洪水发生百分比，融雪型洪水的发生有两个密集区，0~1000m和3000~6000m。这是由于融雪型洪水有两种类型，即中小河流洪水和山洪，这两个区域分别代表这两种融雪型洪水形式发生的密集区域。另外，距离河流9000m范围内的融雪型洪水占区内总灾害点的84%，距离河流越远，融雪型洪水发生呈现出逐渐减少的趋势。

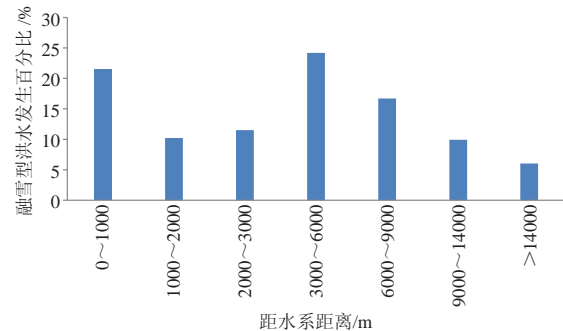


图6 春季融雪型洪水与水系分布关系  
Fig.6 Relation between spring snowmelt-flood and river system distribution

### 3.1.5 土地利用/覆被因子

土地利用/覆被是影响积雪融水产流、汇流的重要下垫面条件，一方面坡面植被有利于减缓坡面水流的流动速度和下渗速度，另一方面人类活动对于土地资源的不合理开发利用，破坏了原有的地理水文环境，成为了融雪型洪水活动加剧的成因之一<sup>[14-15, 21]</sup>。原始数据是中国科学院资源环境科学数据中心1km网格土地利用数据，如图2e所示，土地利用类型共有6种，分别是居民用地、耕地、林地、草地、水域和未利用土地。从融雪型洪水与坡度分布关系（图7）来看，

融雪型洪水主要分布在耕地、草地和居民用地，分别占区内灾害点总数的53.8%，28.6%和12.9%。

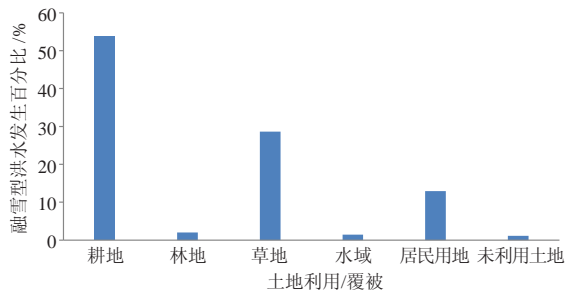


图7 春季融雪型洪水与土地利用/覆被关系

Fig.7 Relation between spring snowmelt-flood and land use/cover types

### 3.1.6 冬季积雪深度因子

入春前的积雪深度给春季融雪型洪水的发生提供了物质量<sup>[14-17, 22]</sup>，2月底积雪厚是产生春季融雪型洪水的重要条件。计算研究区内气象站点1980—2010年气候平均2月底最大积雪深度，利用cokring方法插值到整个伊犁河流域，如图2f所示。从研究区的冬季积雪深度来看，区内2月底积雪深度较厚，积雪深度分布在9.7~17.7cm，从融雪型洪水与冬季积雪深度分布关系（图8）来看，融雪型洪水发生概率整体随着积雪深度增加而增大。当积雪深度大于13.0cm，该区域内的融雪型洪水占区内总灾害点的94.4%。

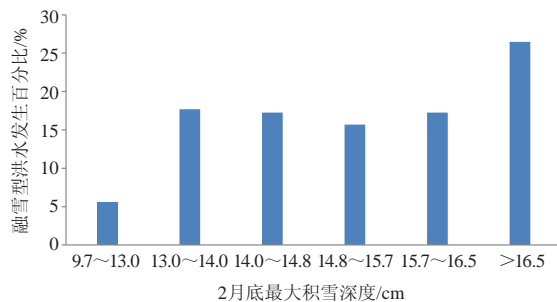


图8 春季融雪型洪水与冬季积雪深度关系

Fig.8 Relation between spring snowmelt-flood and winter snow-depth

## 3.2 春季融雪型洪水危险性评价和区划

### 3.2.1 信息量模型原理

信息量模型是一种统计分析预测方法，是把各个影响因子对灾害发生提供的信息量值进行叠加所得的总信息量值作为评价定量指标的一种评价方法<sup>[23]</sup>。如，融雪型洪水受多种因素影响，各种因素所起作用的大小是不同的，利用信息量模型可定量计算融雪型洪水各影响因子对灾害发生的信息量（贡献），将这些信息量相叠加得到的总信息量值将作为危险性评价

的定量指标。

各影响因子对融雪型洪水发生所提供的信息量值根据公式（1）计算：

$$P(X_i) = \ln \frac{R_i / R}{S_i / S} \quad (1)$$

式中， $P(X_i)$ 是影响因子 $X_i$ 的信息量值； $S$ 是研究区面积； $R$ 是研究区内已发生融雪型洪水的面积； $S_i$ 是研究区内含有影响因子 $X_i$ 的面积； $R_i$ 是影响因子 $X_i$ 分布区域内已发生融雪型洪水的面积。

单个评价单元内的总信息量值根据公式（2）计算：

$$P = \sum_i^n P(X_i) = \sum_i^n \ln \frac{R_i / R}{S_i / S} \quad (2)$$

式中， $P$ 为评价单元总的信息量值； $n$ 为影响因子数；其他参数同上。

将总信息量值作为单元网格内影响融雪型洪水形成的综合评价指标，值越大说明融雪型洪水发生的可能性就越大，根据计算得到的各个单元网格的总信息量值进行融雪型洪水危险性的等级划分<sup>[10-11]</sup>。

### 3.2.2 信息量模型计算与危险性分区

在信息量模型计算中，评价单元的选取，直接影响到春季融雪型洪水危险性评价结果。由于影响春季融雪型洪水的各种因子，如水系、地形、土地利用、入春前积雪深度等是空间分布不均的，因此，选取评价单元，应尽可能考虑每一单元内部的条件最大均一性和单元之间的差异性<sup>[24]</sup>。本研究根据实际数据图层精度，选取1km×1km作为评价单元。

前面已提取和分析了研究区内春季融雪型洪水的6个影响因子（高程、地形起伏度、坡度、水系距离、土地利用/覆被、积雪深度），各影响因子已利用ARCGIS转化为1km×1km的栅格数据并根据公式（1）计算各影响因子对春季融雪型洪水发生的信息量，具体见表1。

将信息量分别赋给各因子不同类别的属性表中，生成单因子信息量图，通过公式（2）计算总信息量分布，最后利用统计学中的自然断点法将总信息量重新划分特征类别，即划分为极高度、高度、中度、低度、极低度危险等5个等级，得到研究区的伊犁河流域融雪型洪水危险性评价分级，如图9所示。

### 3.2.3 评价结果分析

通过对研究区内的融雪型洪水危险性分区进行统计分析得出，区内融雪型洪水危险性较高（表2），高度和极高度危险区的面积是17231km<sup>2</sup>，占研究区面积的32.98%，极高度危险区内分布有灾害点44个，占区内灾害点总数的64.71%，高度危险区分布有灾害点15个，占灾害点总数的22.06%，中等以下危险区域分

表1 春季融雪型洪水各评价因子的信息量

Table 1 The information value of various evaluation factors on spring snowmelt-flood

影响因子	分类	信息量	影响因子	分类	信息量
高程	<900m	0.933	水系距离	0~1000m	0.728
	900~1300m	0.875		1000~2000m	0.552
	1300~1600m	0.054		2000~3000m	0.559
	1600~2000m	-0.241		3000~6000m	0.305
	>2000m	-2.083		6000~9000m	0.052
				9000~14000m	-0.711
地形起伏度	平坦起伏 (0~20m)	0.259	>14000m	-1.350	土地利用/覆被
	小起伏 (20~75m)	1.419	耕地	1.327	
	中起伏 (75~300m)	-0.137	林地	-1.572	
	山地起伏 (300~600m)	-1.042	草地	-0.755	
	高山起伏 (>600m)	-2.041	水域	-1.165	
		居民用地	3.127		
坡度	0° ~2°	1.140	未利用土地	-2.154	2月底最大积雪深度
	2° ~4°	0.729	9.7~13.0cm	-1.551	
	4° ~7°	0.082	13.0~14.0cm	0.122	
	7° ~11°	-0.361	14.0~14.8cm	0.405	
	11° ~16°	-0.963	14.8~15.7cm	-0.010	
	16° ~22°	-1.499	15.7~16.5cm	0.088	
	>22°	-1.769	>16.5cm	0.588	

布灾害点总数较少。由此可见，融雪型洪水灾害点的分布与危险性分区具有很好的相关关系，本次危险性

区划能客观反映区内融雪型洪水危险性的分布情况，区划结果比较好。

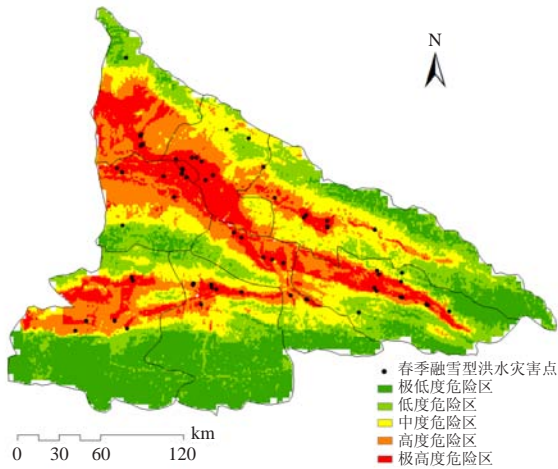


图9 伊犁河流域春季融雪型洪水危险性区划

Fig.9 The map of spring snowmelt flooding hazard levels in the Ili River Basin

表2 各危险性等级区春季融雪型洪水灾害点的数目分布

Table 2 The number of spring snowmelt flooding disaster sites in zones with different hazard levels

危险性等级	面积/km <sup>2</sup>	占研究区面积比例/%	灾害点个数	占灾害点总数比例/%
极高度危险	7341	14.05	44	64.71
高度危险	9890	18.93	15	22.06
中度危险	10732	20.54	5	7.35
低度危险	10909	20.88	4	5.88
极低度危险	13370	25.59	0	0

研究区内融雪型洪水极高度和高度危险区的面积分别是7341和9890km<sup>2</sup>，占研究区总面积的14.05%和18.93%，研究发现，极高度和高度危险区呈现集中分布的特点，这两类危险区主要沿河流分布在河谷地区，这两个地区的水系密集，高程低，地势平缓，有利于积雪融水的迅速汇集，另外冬季积雪深度大，为春季融雪型洪水的发生提供了丰富的物质储备；从土地利用分类来看，极高度和高度危险区主要分布在耕地和居民用地，人类活动影响大，加大了融雪型洪水的危险性。融雪型洪水中度危险区主要沿高度危险区外围分布，面积10732km<sup>2</sup>，占研究区总面积的20.54%，分布有灾害点5个，该区域高程增大，距河流的距离增大，危险性减小；另外下垫面主要为草地，人类活动影响小，灾害发生的概率减少。融雪型洪水极低度和低度危险区主要分布在山区，面积24279km<sup>2</sup>，占研究区总面积的46.47%，极低度危险区为高海拔山区，区内人类活动少，植被为高山草地、林地和未利用土地，低度危险区主要是森林和草地覆盖，发生灾害概率低。

另外，据2014—2015年中国气象局灾情直报系统信息汇总，2014年春季伊犁河流域发生了2次融雪型洪水灾害事件：2014年3月13日，新源县大部分地区出现气温持续性回升，山区向阳坡积雪大面积迅速融

化,导致肖尔布拉克镇洪土拜村牧民定居点发生融雪性洪水灾害;2014年3月16—17日,气温急剧升高,积雪迅速融化,造成尼勒克县木斯乡等多个乡镇相继发生融雪型洪水灾害。对比伊犁河流域春季融雪型洪水危险性区划可知,2014年春季融雪型洪水灾害发生区均位于极高度危险区和高度危险区。该区位于山区南部,海拔较低且地形起伏小,有利于山区向阳坡的融化积雪在该区域的快速汇集,形成融雪型洪水灾害,与灾情实际形成情况一致。由此可见,该春季融雪型洪水危险性区划具有较好的业务应用价值。

#### 4 结论与讨论

1) 研究结果表明,春季融雪型洪水灾害主要沿河谷地带发生,并且与冬季积雪深度、农田等分布相一致。研究区地形复杂,从高程上来看,融雪型洪水主要发生在533~1300m高程范围内,占区内总灾害点的70.2%。从地形起伏度来看,融雪型洪水灾害主要分布在小起伏、中起伏地区,占区内总灾害点的75.5%。从坡度来看,融雪型洪水主要发生在 $0^{\circ}\sim 4^{\circ}$ ,该区域内的融雪型洪水占区内总灾害点的71.7%。融雪型洪水主要在距离河流一定范围内密集发生,融雪型洪水的发生有两个密集区(0~1000m和3000~6000m),分别代表这两种融雪型洪水形式发生的密集区域,另外,距离河流9000m范围内的融雪型洪水占区内总灾害点的84%,距离河流越远,融雪型洪水发生呈现出逐渐减小的趋势。根据融雪型洪水在不同土地利用类型的统计数据来看,融雪型洪水主要分布在耕地、草地、居民用地这3种土地类型中。从冬季积雪深度来看,融雪型洪水发生概率随着积雪深度增加而增大,当积雪深度大于13.0cm,该区域内的融雪型洪水占区内总灾害点的94.4%。

2) 基于GIS的信息量模型方法应用简单方便,能快速提取融雪型洪水影响因子数据,计算出每个栅格单元内各影响因子对融雪型洪水的贡献,很好地综合了GIS空间分析和信息量计算的优点,且评价结果科学客观。本次评价选取高程、地形起伏度、坡度、水系、土地利用/覆被、冬季积雪作为融雪型洪水危险性评价的影响因子,运用信息量模型开展春季融雪型洪水危险性评价,将研究区划分为极高度、高度、中度、低度和极低度等5级危险区,通过对危险区和融雪型洪水灾害点的相关性进行分析,得出危险性区划能较好地总结反映实际融雪型洪水灾害调查结果,因此基于GIS的信息量模型方法开展的区划能够客观反映区内融雪型洪水危险性,为研究区的融雪型洪水精细化预报提供理论参考和技术支撑,也为融雪型洪水

的防治提供依据。

3) 本文的伊犁河流域春季融雪型洪水危险性评价与区划结果目前已应用于中国气象局公共气象服务中心的专业气象预报服务,在2014—2015年春季融雪型洪水气象预报服务中显示了较好的预报服务效果,具有较好的业务应用价值。如果能获得我国其他地区详细的春季融雪型洪水灾情资料,基于信息量模型可开展相关危险性评价与区划,该研究结果可为全国的春季融雪型洪水气象预警和灾害防治工作提供有力的技术支撑和参考。

致谢:新疆气象服务中心杨静高级工程师为本研究提供了2000—2013年伊犁河流域春季融雪型洪水灾情资料,特此感谢。

#### 参考文献

- [1] 徐夔慧,毛炜峰,陆帼英.新疆气象灾害近期变化和防灾减灾工作综合评述.沙漠与绿洲气象,2008,2(1): 50-54.
- [2] 徐夔慧,陆帼英.21世纪前期新疆旱灾灾害防灾减灾对策研究.沙漠与绿洲气象,2007,1(5): 54-58.
- [3] 张俊兰.2011年4月下旬托什干河融雪洪水的气象成因.沙漠与绿洲气象,2012,6(4): 1-6.
- [4] 唐川,朱静.基于GIS的山洪灾害风险区划.地理学报,2005,60(1): 87-94.
- [5] 黄大鹏,刘闯,彭顺凤.洪灾风险评价与区划研究进展.地理科学进展,2007,26(4): 11-22.
- [6] 孙欣,林孝松,何锦峰,等.基于GIS的山区危险性评价与分区.河北北方学院学报(自然科学版),2014,30(3): 44-49.
- [7] 张克中,顾丽华,万奎,等.德清县气象灾害风险区划技术方法研究及其应用.第26届中国气象学会年会论文集,2009: 146-154.
- [8] 李林涛,徐宗学,庞博,等.中国洪灾风险区划研究.水利学报,2012,43(1): 22-30.
- [9] 张杰.基于改进灰色关联模型的洪灾危险性分析与评价——以渭河下游秦岭北麓山区为例.西安理工大学,2014.
- [10] 朱良峰,吴信才,殷坤龙,等.基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究.地球科学与环境学报,2004,26(3): 52-56.
- [11] 周志华,林维芳,徐标.基于GIS与信息量模型的沟谷密度与滑坡发育关系的研究.中国矿业,2012,21(1): 119-121, 124.
- [12] 张军民.伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究.干旱气象,2006,24(2): 1-4.
- [13] 王宏伟,张小雷,乔木,等.基于GIS的伊犁流域生态环境质量评价与动态分析.干旱区地理,2008,31(2): 215-221.
- [14] 俞永旺,徐冰,白东明,等.天山北坡雀尔沟河春季融雪洪水的成因分析.干旱区研究,1995,12(3): 15-20.
- [15] 仇家琪,颜新.天山北坡中段春季融雪洪水及其灾害成因研究.干旱区地理,1994,17(3): 35-42.
- [16] 仇家琪,徐俊荣,陈亚宁,等.天山北坡春季雪洪形成的气候因子分析.干旱区地理,1995,18(1): 43-50.
- [17] 闫彦,刘志辉,叶朝霞.新疆北疆地区融雪洪水灾害预警模型的建立与验证.干旱区地理,2009,32(4): 552-557.
- [18] 程维明,周成虎,柴慧霞,等.中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析.地球信息科学学报,2009,11(6): 725-736.
- [19] 李琼.基于遥感与地理信息系统的兰州幅1:100万数字地貌制图方法研究.兰州大学,2006.
- [20] 郑著彬,任静丽.DEM地形分析在山区地质灾害研究中的应用——以云南省漾濞县为例.云南地理环境研究,2010,22(2): 19-22.
- [21] 陆智,刘志辉,闫彦.新疆融雪洪水特征分析及防洪措施研究.水土保持研究,2007,14(6): 216-218.
- [22] 吴素芬,刘志辉,邱建华.北疆地区融雪洪水及其前期气候积雪特征分析.水文,2006,26(6): 84-87.
- [23] 黄润秋,许向宁,唐川,等.地质环境评价与地质灾害管理.北京:科学出版社,2008: 151-179.
- [24] 毛正君.宁夏彭阳县地质灾害危险性评价研究.长安大学,2009.

# 全国80cm地温分布特征和基于太阳辐射的预测方法

倪敏莉<sup>1</sup> 韩乐琼<sup>2</sup> 赵鲁强<sup>1</sup>

(1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2 象辑知源科技有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 利用2001—2010年全国80cm层的逐日平均地温资料, 分析了全国地温的时空分布规律; 同时结合太阳辐射资料, 分析太阳辐射和地温的相关性; 将太阳辐射作为预报因子, 构建地温预报模型。结果表明, 各海拔高度的地温呈现相同的季节变化, 在夏季达到波峰, 春季降到波谷, 并且多年演变趋势呈现上升趋势; 经30日滑动平均处理后太阳辐射与滞后60日的地温相关性较好, 以此构建的地温预报模型能够较好地预报出地温的周期波动性, 并且预报准确率较高。

**关键词:** 80cm地温、太阳辐射、预报模型、滑动平均

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.007

## Distribution Features of Earth Temperature at 80 cm in China and Prediction Method Based on the Factor of Solar Radiation

Ni Minli<sup>1</sup>, Han Leqiong<sup>2</sup>, Zhao Luqiang<sup>1</sup>

(1 Public Meteorological Service Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 MLOG Group Inc, Beijing 100081)

**Abstract:** Temporal and spatial distribution of earth temperature in China was analyzed based on the daily mean earth temperature at 80cm for 2001-2010. Meanwhile, the correlation of earth temperature with solar radiation was analyzed; the earth temperature prediction model was constructed by taking solar radiation as the predictor. The results show that earth temperature presents similarly seasonal variation in various depths, and reaches a ridge in summer then dropped to trough in the next spring. The long-term evolution demonstrated a rising tendency. We found that the correlation of the 60-day lagged earth temperature to the solar radiation become better after a 30-day moving average on each of the two series. Then, we constructed a prediction model to forecast the periodic fluctuation of the earth temperature, and got a higher accuracy. Thus this model may be applied in the future.

**Keyword:** 80 cm earth temperature, solar radiation, prediction model, moving average

### 0 引言

构成地球气候系统运作的重要机制是陆—气相互作用。在陆—气相互作用中, 土壤温度和湿度对上层大气的变化有着重要的影响。同时, 土壤温度不仅与上层大气有着交互作用, 还影响着种子的萌发、根系的发育等土壤内的生物过程。近年来, 随着气候变暖现象的加剧, 研究者们多将重心放在研究我国气温和降水等要素的分布及其变化, 通过统计及构建物理

模型, 运用模式预测等多种方法提高了预报准确率。但对影响大气环流的地温研究却较少, 部分研究表明, 地温的变化受太阳辐射平衡及土壤热量平衡的共同影响, 在不同经纬度和不同季节以及土壤组成不同的地区有着明显的差别。

我国地温站点分布相对气温观测站来说相对较少, 部分地区近10年才开展地温观测, 且在2000年前, 大部分站点只观测了浅层(0~20cm)地温。1980年以前, 全国浅层地温站点不足1000个, 且多集中分布于东北、山西等煤产地。1980年后, 我国逐渐发展深层地温研究, 部分气象站点开始增加深层地温的观测。2000年后, 除了西藏、新疆等偏远地区, 全国各地都有了代表性的地温站点。

收稿日期: 2016年6月8日; 修回日期: 2016年11月11日  
第一作者: 倪敏莉(1983—), Email: chilliren@136.com  
通信作者: 赵鲁强(1965—), Email: zhaolq@cma.gov.cn  
资助信息: 中国气象局公共气象服务中心业务服务专项基金(M2014020)

杜军等<sup>[1]</sup>研究了近45年拉萨地区地温变化趋势,发现拉萨浅层(40cm)和深层(80cm)地温均呈极为显著的升高趋势,提出了通过邻近站线性回归方法、差值法或平均值法进行填补,使其趋势完整,从而更好地进行分析。陈成国等<sup>[2]</sup>对1961—2010年德州市地面及各深层地温的变化趋势进行了研究,结果表明地面温度及各深层地温均有增温趋势,明显增温主要出现在冬季,而夏季多为降温。王忠伟等<sup>[3]</sup>则通过均值法和线性倾向估计法分析了新疆输油管道沿线160cm地温与气温的变化关系,结果表现出输油管道沿线的160cm地温呈北低南高的态势,也得到了地温随年代际上升的趋势。李帅等<sup>[4]</sup>分析了黑龙江省春季浅层地温、气温变化特征,并利用该省逐日气温、20cm地温资料建立春季浅层地温预报模型。陈鹏狮等<sup>[5]</sup>利用辽宁省近50年的0和5cm地温及平均气温资料,分析了0cm地温和气温,地—气温差的季节、年际和年代际变化特征,并建立了春播期5cm地温预测模型。上述研究均为针对某省范围的地温研究。吕红玉等<sup>[6]</sup>通过分析1981—2010年黑龙江佳木斯气象站40~320cm的月平均地温资料,研究了三江平原的地温变化规律期气候突变等特征,定量给出地温升幅为0.496~0.574℃;其中,夏季升幅最大,月平均地温呈波形变化,振幅随深度增加而减小。强玉柱等<sup>[7]</sup>分析了天水市近50年浅层地温变化及对气候变化的影响特征,得出浅层各季节及年平均地温均显著升高,5和20cm平均地温对气候变暖更敏感的结论。高振荣等<sup>[8]</sup>对河西走廊地区深层地温的研究表明:近31年来河西走廊地区80、160、320cm深层地温均呈显著的波动上升趋势,存在3年波动周期,随着深度的增加,气温与地温的相关性略有降低。阿布都克日木·阿巴司等<sup>[9]</sup>对新疆喀什市的深层地温进行了研究,表明近30年来,喀什市各深层地温的年均值呈明显的阶段性特征,80和160cm深层地温年均值在1985和2009年发生了突变,3.2m深层地温年均值在1985和2008年发生了突变。高学芹等<sup>[10]</sup>利用潍坊市1980—2014年80~320cm地温资料研究潍坊深层地温对气候变化的响应,结果表明随着深度的增加,气温与各层地温的相关性略有降低,这是深层地温变化存在滞后性所致,降水量对各深层地温影响不大。这些研究都说明了不同季节、不同地域深层地温对气候变化的响应程度是不同的。此外,赵红岩等<sup>[11]</sup>研究了夏季西太平洋副热带高压位置与地温变化的关系,副热带高压脊线的位置与中国深层地温的关系非常明显,在100°—115°E、30°—45°N地区呈现高相关性。上述研

究都支持地温随年代际增暖,并且与气温及其他环流因子关系明显<sup>[12-13]</sup>。

基于之前的研究多数集中于局部地区,没有对全国的地温分布进行过研究,本文试图通过对全国测站观测到的2001—2010年逐日80cm处的地温进行分析,得到其季节变化、年际变化及年代际变化的趋势。并根据其与太阳辐射的关系构建地温预报模型,从而预报逐日的地温。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料选取

本文选取的资料来自于中国气象局国家气象信息中心提供的全国地温80cm层的站点资料及全国站点的太阳辐射资料。之所以选用80cm的地温资料,主要是因为2001—2010年有观测的地温站点中80cm地温比160cm的站点多82个,且该层地温站点不缺测天数在2920天(即8年)以上的站点也比160cm的更多。因此,80cm层的资料相对于160cm层的地温更全,受深层地热影响相对较少,同时又受地面气象要素的影响较多,气象因子对它的影响较大,更方便找到预报因子。

### 1.2 数据处理

本文选取2001年1月1日—2010年12月31日逐日地温数据,统计发现,全国80cm地温不缺测天数在2555天(即7年)以上的地温站点总共有729个,但部分站点并不是从2001年就开始观测或者观测没有持续到2010年。对站点数据的起始和结束年份进行统计后,剔除掉观测长度不足10年的站点,剩下112个站点的地温资料。在这剩下的站点资料中,仍然存在较为明显的缺测情况,因此,根据缺测情况的不同进行了填补:对于连续缺测在10天以内的,以前后10天的滑动平均来填补;连续缺测在10天至1个月以内的,以前10天和后10天未缺测值的斜率平均值做填补。

### 1.3 预报模型

一元回归模型主要用2001—2009年的地温值作为拟合时段,与预报因子计算相关系数,从而构建一元回归预报模型。

$$y=ax+b \quad (1)$$

式中, $y$ 是地温预报值, $a$ 是预报系数, $b$ 是回归参数。用最后一年的预报因子 $x$ 代入该公式中计算2010年的地温预报值,并对预报结果做评测。

## 2 地温分布特征

进行地温资料填补后,根据112个站点海拔高度( $h$ )的不同将其分成7组。对于 $h \leq 100\text{m}$ 以下的站

点,在华北、江南、华南地区分别选取2个站点;对于 $100 < h \leq 500\text{m}$ 、 $500 < h \leq 1000\text{m}$ 、 $1000 < h \leq 1500\text{m}$ 及 $h > 1500\text{m}$ 的站点中分别选取2个站点,最终得到14个代表站点,详见表1。

表1 14个代表站点

Table 1 Information from 14 representative stations

站名	海拔高度/m	纬度/ $^{\circ}\text{N}$	经度/ $^{\circ}\text{E}$
赤峰	569	42.3	118.9
张家口	725	40.8	114.9
唐山	24	39.7	118.1
保定	18	38.8	115.5
那曲	4508	31.5	92.1
拉萨	3651	29.7	91.1
思茅	1302	22.8	101
蒙自	1305	23.4	103.4
平江	105	28.7	113.6
郴州	187	25.8	113.0
徐州	42	34.3	117.2
景德镇	62	29.3	117.2
广州	43	23.2	113.3
汕头	7	23.4	116.7

根据14个代表站点的地温随时间演变(图1,因篇幅限制仅展示其中6个站点)分析发现,尽管地理位置不同、海拔高度不同,但是地温变化表现出相同的波动性:年际变化呈现明显的振荡;季节变化则表现出夏季最高,在夏中到达波峰,随后开始下降,到冬末初春达到一年的最低值,随后开始上升;趋势线表现出地温的年代际变化趋势是增长的,不同的海拔高度,增长趋势不同。高海拔的地区增长趋势相对明显。

### 3 地温预报模型

太阳辐射是地气系统的主要热源,地球的热力平衡关系受太阳辐射的影响。近年来,一些研究<sup>[14]</sup>指出太阳辐射是影响气象要素变化的重要因素,通过分析气温和太阳辐射的分布特征,指出太阳辐射和气温呈现之后一年的正相关;申彦波等<sup>[15]</sup>在研究中也指出太阳辐射对地温有着显著的影响。在本研究中,对全国2000年1月1日—2009年12月31日的太阳辐射资料进行了整理,根据辐射资料完整性,结合地温资料的缺失情况,最终确定了56个站点(图2)的地温及辐射资料可用,文中构建地温预报模型的地温站也是基于该

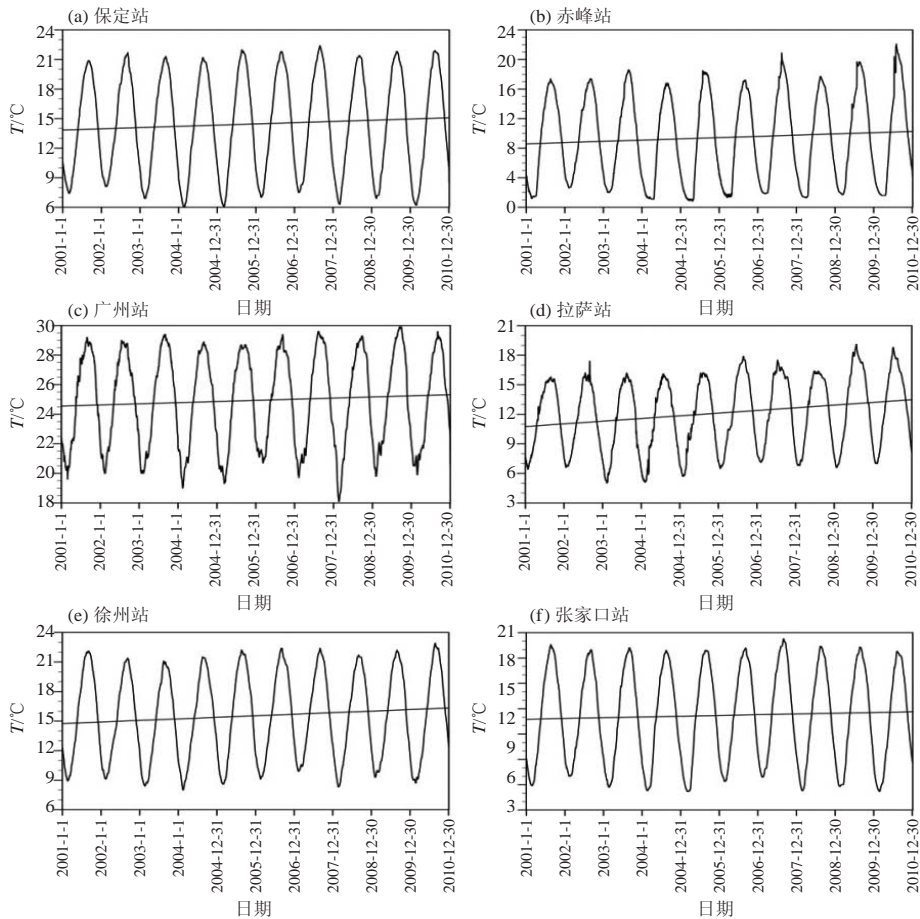


图1 2001—2010年6个站点的日平均地温变化趋势

Fig.1 Daily mean earth temperature variations from 2001 to 2010 at six stations

56个站点来完成。

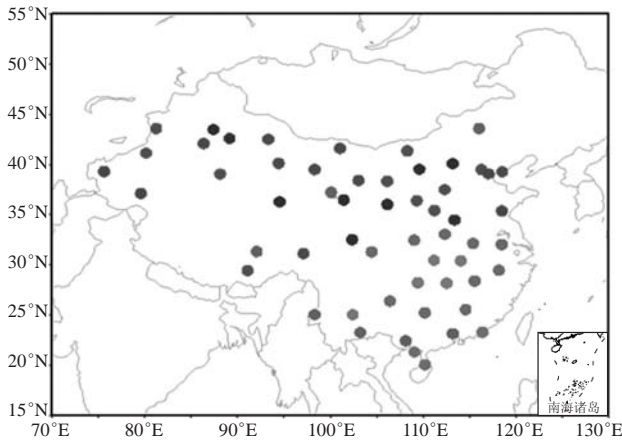


图2 56个站点分布图

Fig.2 Locations of the 56 stations

最终选定的56个地温站点，除了西藏、东北以及福建沿海外，全国大部都有分布，其中四川南部和云南北部分布较少，长江中下游及华中等地区分布较密集。除了地形地貌、人口及经济因素导致深层地温观测站点分布不均匀外，辐射站点分布较为稀疏也对站

点的最终选择有较大影响。对于东北地区，站点本身建站时间较短且缺测相对严重，同时由于气候原因，冬季气温偏低，对地下管道的铺设和维修等业务有较大影响，因此该处地温的预报在实际工作中使用较少。基于上述理由，最终没有挑选东北地区的站点。但随着后期地温和辐射站点的增加，在业务运行中，可以着重对东北、西藏等站点分布稀疏的地区进行地温预测研究，从而推动地温分布全国研究的进展。

对这56个地温站点同期的地温资料和辐射资料进行对比研究（图3，仅显示4个站点）发现，虽然辐射波动相比地温波动明显较多、日变化也较大，但是二者的年际变化表现出相似的特征。对单个站点的地温及其辐射资料（图4）进行对比，发现地温和辐射都有明显的1年波动周期。地温在每年的夏中达到波峰，而辐射则在春季出现波峰。

基于地温和辐射二者变化的关系，对辐射资料作30日滑动平均，并计算它与地温的相关系数（图5），发现辐射对滞后60日的地温影响最强烈，二者达到波峰波谷的时间几乎是完全对应的。基于此，对太阳辐射做30天滑动平均，并且取在时间上比地温提

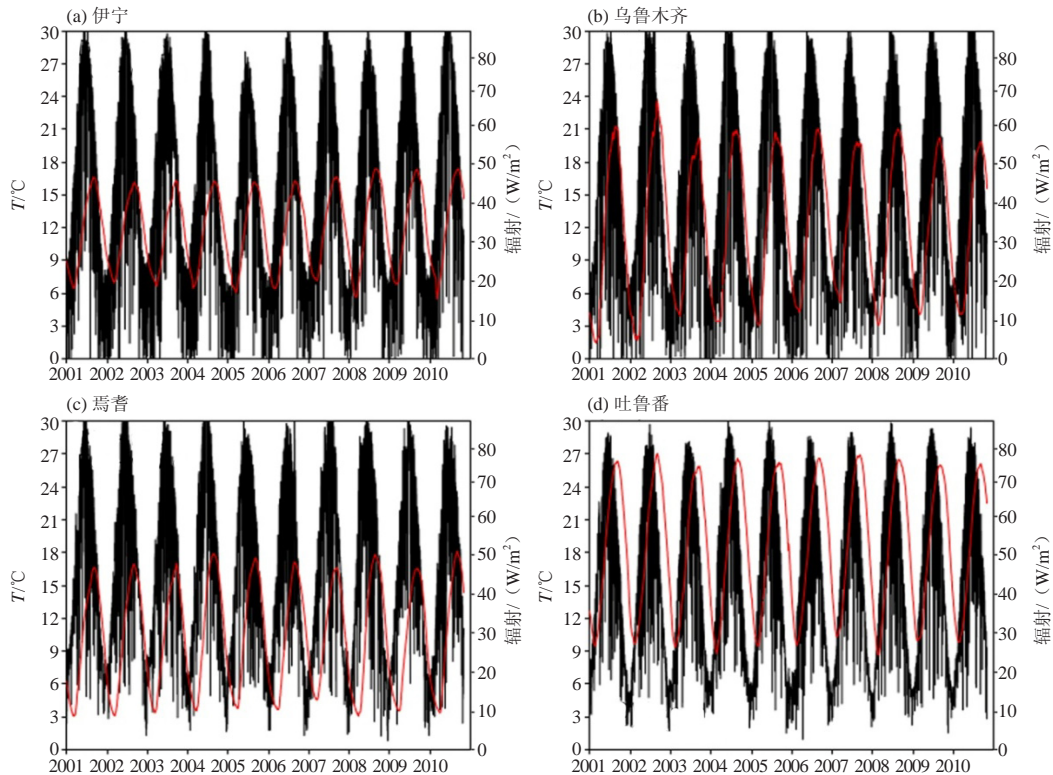


图3 4个站点逐日辐射和逐日地温变化趋势（红色实线表示逐日地温；黑色实线表示逐日辐射）

(a) 伊宁；(b) 乌鲁木齐；(c) 焉耆；(d) 吐鲁番

Fig.3 Variations of daily earth temperature and solar radiation during the period from 2001 to 2010 at four stations (Red solid lines denote daily earth temperature; Black solid lines denote daily solar radiation)

(a) Yining; (b) Urumqi; (c) Yanqi; (d) Turpan

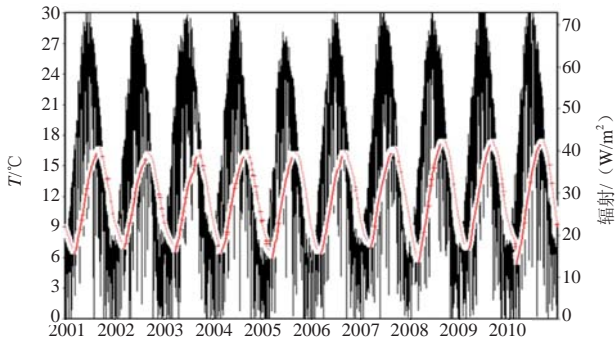


图4 伊宁站的逐日地温和逐日辐射变化趋势  
(红色实线表示逐日地温; 黑色实线表示逐日辐射)

Fig.4 Variations of daily earth temperature and solar radiation in 2001–2010 at Yining (Red solid lines denote daily earth temperature; Black solid lines denote daily solar radiation)

前两月的辐射资料作为预报因子。

考虑到地温演变呈现波动性, 经过上述处理后, 辐射值和地温的波动周期相同但振幅不同。为此提出一个新的一元回归预报方法(图6): 将地温和辐射

值自身的趋势线作为分割, 分为A、B(上下)两个位相。以辐射的A位相作为地温A位相的预报因子, 以辐射B位相作为地温B位相的预报因子, 分别构建两个预报方程, 公式(1)是常规的一元回归方程, 公式(2)是计算一元回归方程截距的方程。公式(3)和(4)是本文构建的两个一元回归方程的截距, 通过两个截距分别构建了两个预报方程。此后, 对两个方程做条件判断: 当二者的值均小于(大于)地温趋势线时, 预报值y值取二者中相对较大(较小)的那个; 当一个大于趋势值, 一个小于趋势值时, y值等于二者的平均值。

$$b = \frac{\sum y}{n} - a \times \left( \frac{\sum x}{n} \right) \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{\sum y_A}{n} - a \times \left( \frac{\sum y_A}{n} \right) \quad (3)$$

$$b_2 = \frac{\sum y_B}{n} - a \times \left( \frac{\sum y_B}{n} \right) \quad (4)$$

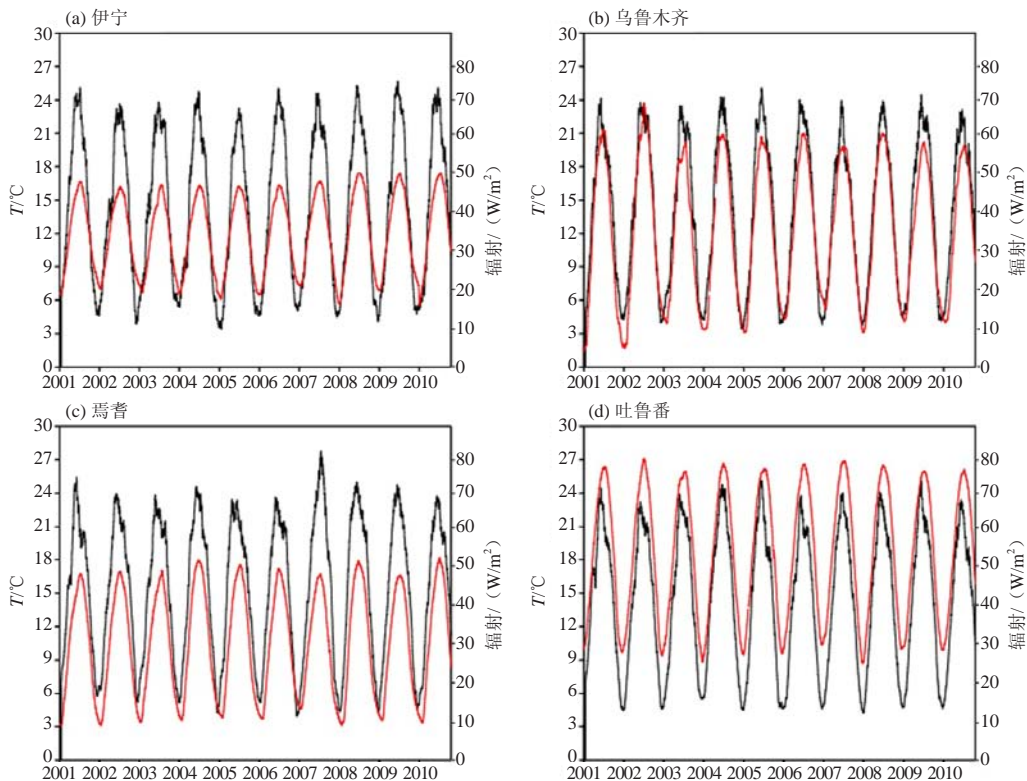


图5 30日滑动平均的逐日辐射以及滞后60日的逐日地温变化趋势(红色实线表示滞后60日的逐日地温, 黑色实线表示30日滑动平均的逐日辐射)

(a) 伊宁; (b) 乌鲁木齐; (c) 焉耆; (d) 吐鲁番

Fig.5 Variations of the 60-day lagged daily earth temperature and solar radiation in 30 days moving average for 2001–2010 at four stations (Red solid lines denote the 60-day lagged daily earth temperature; Black solid lines denote daily solar radiation in 30 days moving average)

(a) Yining; (b) Urumqi; (c) Yanqi; (d) Turpan

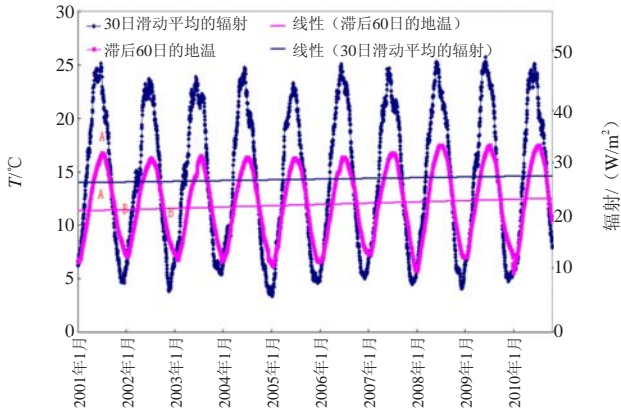


图6 滞后60日的逐日地温值和30日滑动平均的辐射值的线性趋势 (粉色实线代表逐日地温, 以其本身的粉色趋势线作为分割, 可分为A、B两部分; 蓝色实线代表逐日辐射, 以其本身的蓝色趋势线作为分割, 也可分为A、B两部分)

Fig.6 Linear trend of the 60-day lagged daily earth temperature and solar radiation in 30 days moving average for 2001–2010 (Pink solid lines denote daily earth temperature, divided into part A and part B; Blue solid lines denote daily solar radiation, divided into part A and part B)

以此公式预报的地温值和实况地温比较 (图7), 可以看到2001—2009年的拟合阶段拟合值 (黑色) 和实况值 (红色) 非常接近, 能很好拟合出波峰和波谷的位置, 并且二者相差较小。同时, 2010年地温的预报值 (黑色) 和实况值 (红色) 非常接近, 完整体现了地温的季节波动。构建的地温预报模型很好地预报了地温的变化情况。并且二者的变化呈现同步性, 预报的地温能较好地表现出实况地温的季节变化和年际增长。

利用2010年的资料, 给出该方程预报的地温和实况的相关系数 (图8), 可以看出二者的相关性较高, 56个站点均通过了0.01的显著性检验。绝大多数站点的相关系数在0.7以上, 56个站点的平均相关系数为0.87。有两个站点的预报相对较差有可能是因为当地的辐射缺测值较多造成的。另外, 对56个站点的预报和实况的均方根误差进行计算得到56个站点的平均的均方根误差为3.2。

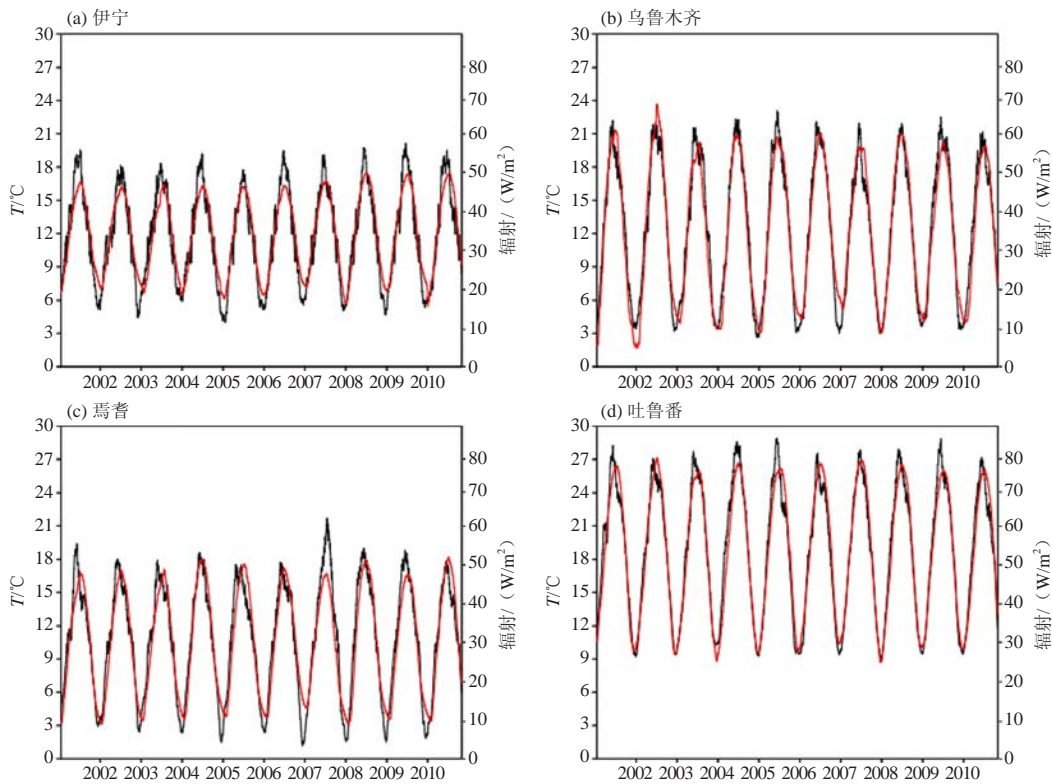


图7 4个站点日平均地温拟合及预报值与实况的对比 (红色实线表示地温实况值, 黑色实线在2001—2009年表示地温拟合值, 在2010年表示地温预报值)

(a) 伊宁; (b) 乌鲁木齐; (c) 焉耆; (d) 吐鲁番

Fig.7 Comparisons of fitting, forecast value and the observed value for daily earth temperature for 2001–2010 (Red solid lines denote observed value; Black solid lines denote fitting value in 2001–2009 and forecast value for 2010)

(a) Yining; (b) Urumqi; (c) Yanqi; (d) Turpan

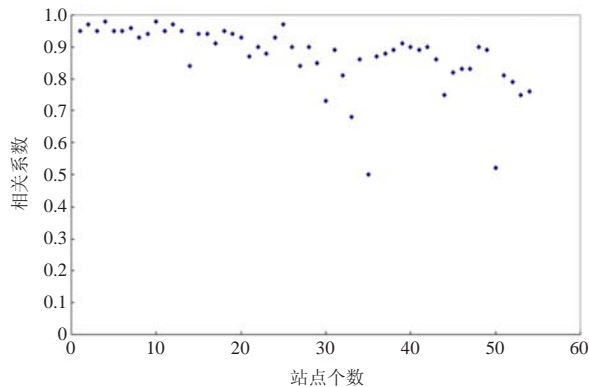


图8 56个站点的预报值和实况值的相关系数  
Fig.8 The correlations between forecast values and observed values for various number of 56 stations

#### 4 结论与讨论

1) 不同海拔高度的地温均呈现波动上升趋势, 并表现出一致的季节性波动, 夏季达到波峰, 初春降到波谷。

2) 太阳辐射的逐日波动虽然比地温明显很多, 但表现出相似的季节性波动, 春季辐射达到波峰, 冬季降到波谷。在对其做了30日滑动平均后, 其波形和滞后60日的地温波形有较高的一致性, 并表现出相似的年际变化。

3) 根据太阳辐射和滞后60日的地温较高的相关系数, 通过本文定义的新回归预报方程, 构建出地温预报方程。通过上述对该方程地温预报的评测结果可以看出, 该模型能较好地预报出地温的逐日变化和季节变化趋势。可用于后期的业务工作, 该预报方程能提前一个月给出下月的地温预报, 在地温业务预报中有较好的应用性。

4) 地温的预报可根据辐射值通过一定的预报方程得到, 但是辐射值的缺失会影响预报结果的准确性。因此在日常生活中, 辐射的观测非常重要, 辐射观测值越精确, 地温预报结果越好。

虽然由辐射构建的地温预报方程有较好的效果, 但是基于辐射数据的观测站点不全, 部分站点无法构建预报方程。目前国内已有基于卫星数据对历史辐射数据的反演, 可以考虑对该类反演数据进行评估, 再用来对地温进行预报。此外, 因为辐射数据受云量等影响较大, 也可以采用各台站每日4次的云观测数据来进行地温的预报。

地温的影响因素很多, 除了辐射因子, 地下水、土壤含水量与地温之间也有一定的联系, 地下水位对地温的影响存在临界值, 当地下水埋深超过临界值

时, 地下水就对地温不再具有影响作用<sup>[16]</sup>。

浅层地温资料可以用作强震和旱涝形式分析。地壳运动将部分动能转化为热能, 地温升高, 随即出现旱象, 地壳运动进一步加剧而导致爆发式能量释放——地震, 久旱后遂大涝, 从而形成热—旱—震—涝的模式。由于热与震、旱涝相关性的不确定, 仅能从几年热态变化趋势给出未来2~5年震、旱、涝的基本形势估计<sup>[17]</sup>。

另外, 研究地温的逐日变化和月、季、年长度的预测, 对地下管道架设, 深层煤矿、油气分布研究及温泉探测等方面有重要的指导意义。其历史的变化特征及对逐日地温的预测, 在地下管道选址、施工及管道维护等方面有较重要的作用。后期在地温预测开展为业务化后, 可为各大燃气公司提供相应的咨询和预警。另外, 随着深层地温的观测站点逐渐增加, 可对局部地热异常场展开类似的地温研究, 并给出局地地热异常的预测及预警, 从而指导热田等的勘探开发工作, 该部分工作需要在地热异常进行更深入的研究。

#### 参考文献

- [1] 杜军, 李春, 廖健, 等. 拉萨近45年浅层地温的变化特征. 干旱区地理, 2007, 30(6): 826-831.
- [2] 陈成国, 石慧兰, 王桂兰, 等. 1961—2010年德州市地温变化特征. 气象与环境学报, 2012, 28(1): 86-89.
- [3] 王忠伟, 张新军, 杨静. 新疆输油气管道160cm地温气候特征分析. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(2): 39-42.
- [4] 李帅, 王萍, 陈莉, 等. 黑龙江省春季浅层(0~20cm)地温变化特征及预报. 冰川冻土, 2014, 36(1): 55-62.
- [5] 陈鹏狮, 张玉书, 冯锐, 等. 50年来辽宁省地温变化规律及播种期地温预报研究. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 163-167.
- [6] 吕红玉, 张林媛, 张宏茹, 等. 1981—2010年三江平原40~320cm深地温变化特征. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1347-1352.
- [7] 强玉柱, 蒲金涌, 刘扬, 等. 天水市近50年浅层地温变化特征分析. 中国农学通报, 2013, 29(35): 317-322.
- [8] 高振荣, 李红英, 曹淑超, 等. 近31a河西走廊地区深层地温变化及突变分析. 干旱区地理, 2013, 36(6): 1006-1011.
- [9] 阿布都克日木·阿巴司, 麦合布热提·买买提依明, 努尔帕提曼·买买提热依木, 等. 新疆喀什市深层地温的变化特征分析. 中国农业气象, 2014, 35(3): 237-242.
- [10] 高学芹, 袁静. 1980—2014年潍坊市深层地温对气候变化的响应. 中国农学通报, 2015, 31(28): 201-206.
- [11] 赵红岩, 杨瑜峰, 张久林, 等. 夏季西太平洋副高位置与中国地温场的关系. 高原气象, 2007, 26(5): 1119-1122.
- [12] 彭楚明, 何有海, 关翠华, 等. 南海夏季风爆发与海温和大气对流的低频变化. 高原气象, 1999, 18(4): 603-612.
- [13] 赵勇, 何冬燕, 秦贺. 乌鲁木齐地温特征及其与降水的关系. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(2): 13-17.
- [14] 季国良, 吕兰芝. 格尔木太阳辐射与气温的多年变化. 高原气象, 1997, 16(1): 30-35.
- [15] 申彦波, 王标. 近50年中国东南地区地面太阳辐射变化对气温变化的影响. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1457-1465.
- [16] 傅志敏, 周志芳, 李明武. 基于地下水埋深效益的地温突变判据. 江苏大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 441-445.
- [17] 张治兆. 浅层地温变化与强震、旱涝的关系. 中国减灾, 1992, 2(8): 38-39.

# 基于消息的气象服务数据加工流水线设计与应用

宋瑛瑛 李雁鹏 陈正廷 凌柏 冯宇星 曹宇钊

(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

**摘要:** 梳理了公共气象服务业务的数据流程, 提出了一种基于消息的气象服务数据加工流水线技术, 用于提高气象数据服务的时效性与数据资源更新的一致性。着重介绍了消息中间件、流水线架构设计、交互文件标准等技术问题。结合分钟级降水预报数据实例, 初步展示了消息驱动数据流应用在气象服务数据支撑系统中的优势。

**关键词:** 气象数据, 消息中间件, 交互文件标准, 系统设计

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.008

## Design and Application of Message-Driven Data Processing Flow in Meteorological Service

Song Yingying, Li Yanpeng, Chen Zhengting, Ling Bai, Feng Yuxing, Cao Yuzhao

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

**Abstract:** Based on the analysis of public meteorological service data flow, this paper proposes a message-driven data processing technology in the meteorological service to improve the timeliness of meteorological data services and the uniformity of data resources. The key technologies, such as message middleware, system architecture, interactive file standard, are introduced here. An example of PM-MQPF data is described in detail to express the advantages of data flow, which was driven by messages in meteorological data services system.

**Keyword:** meteorological data, message-oriented middleware, interactive file standard, system design

### 0 引言

气象服务是人类生产生活的基础条件, 它不仅与公众生活密切相关, 同时也直接影响政府决策、国民生产以及社会发展。随着信息网络的不断发展, 各行各业对气象服务的要求越来越趋于精细化, 随之而来, 分门别类的气象服务产品层出不穷。为满足各类应用需求, 数据信息交互单元也逐渐变得庞杂。当前, 在中国气象局信息化建设的大背景下, 公共气象服务信息化建设的需求越来越紧迫, 集中表现在从分散向集约化发展, 提供统一的气象数据服务。因此, 本文梳理了国家级公共气象服务业务的数据流, 分析了现存问题, 提出了基于消息的气象服务数据加工流水线技术, 旨在提高气象数据流的时效性和鲁棒性, 从而更好地支撑气象服务业务的快速发展。

### 1 消息中间件

随着气象业务的跨越式发展, 当前中国气象局

公共气象服务中心应用的气象服务数据系统存在数据处理流程交叉、运行效率低、业务耦合性强等问题。本文提出利用消息驱动业务流程, 解决上述问题。具体而言, 利用消息中间件高效可靠的传递机制进行平台无关的数据交换, 基于数据通信进行分布式系统的集成。发送者将消息发送到消息服务器, 消息服务器将消息存放在若干队列中, 在满足触发条件后再将消息转发给接收者。消息传输模型分为点对点模型(PTP)和发布/订阅模型(pub/sub), 发布/订阅模型具有异步、松耦合、多对多通信等特点。发布者广播发送消息给中间代理, 订阅者只需去代理中接收自己感兴趣的消息, 发布者并不知道究竟是哪个订阅者接收到了自己发布的消息。

目前, 市面上常见的发布/订阅模型消息中间件有: Kafka、ActiveMQ、OpenJMS和RabbitMQ等。国内各气象部门在应用消息中间件传递数据方面做了很多研究, 例如: 应用ActiveMQ技术缩短了预警信号发布时耗<sup>[1]</sup>, 基于RabbitMQ消息中间件和元数据技术实现了多种气象观测资料的采集、传输、入库和备份的统一处理<sup>[2]</sup>。通过业务调研, 本文以Kafka消息中间件为核心, 在集约资源的基础上, 兼顾性能, 设计了基

收稿日期: 2016年9月21日; 修回日期: 2016年11月25日

第一作者: 宋瑛瑛(1983—), Email: syy0822@126.com

资助信息: 中国气象局公共气象服务中心业务基金项目(K2016006)

于消息的气象服务数据加工流水线，用以提高数据流动效率，实现数据内容统一。

## 2 气象数据流

气象数据流具有多来源、高并发及更新快等特点。针对这些特性，以往的气象数据处理过程，多采用多进程并发技术<sup>[3]</sup>，基于web服务<sup>[4]</sup>，实现气象数据实时共享；近年来，多采用消息驱动机制处理气象数据<sup>[1-2,5]</sup>，以期提升传输效率。

### 2.1 数据流分析

公共气象服务中心的气象数据服务主要包括专业气象和公众气象两大部分。其中，专业气象为预警信息发布、自然灾害决策等提供数据服务；而公众气象为常规天气预报制作提供数据支撑，主要服务对象有中国气象频道、中国天气网、中国天气通APP等媒体和天气服务软件。在现有气象数据服务系统中，存在以下不足之处：1) 两大业务存在数据源重叠交叉，数据重复采集、多次加工，数据样本多重复制，在极端条件下，会出现气象服务产品数据内容不一致的情

况。2) 关联任务执行时存在任务堆积、耗时长等问题。在部分业务执行时间不确定的条件下，为了保障业务数据的完整性，需延长定制计划任务时间范围，这就增加了后续处理环节的等待时间，造成延迟。3) 对超出定制时间范围的数据无法实现自动处理，只能通过手动执行应急处理，无法做到全自动无人值守。4) 数据读写操作频繁，增加服务器的并发负载，造成资源浪费。可见，定时计划任务是拖延数据流动的重要一环，而消息即来即走、分布式并发等特性正可以解决这些问题。

### 2.2 消息驱动数据流水线

基于消息驱动的数据流，将流动过程分解成主题，通过发布/订阅模式，即时发布主题至消息总线，计算集群监听消息，即时处理主题，缩短了数据流动时间。这种分布式、高并发、无延迟的集约型数据流为下游气象产品制作业务提供即时的数据支撑。如图1所示。

1) 业务数据流解耦。根据业务逻辑关系，将数

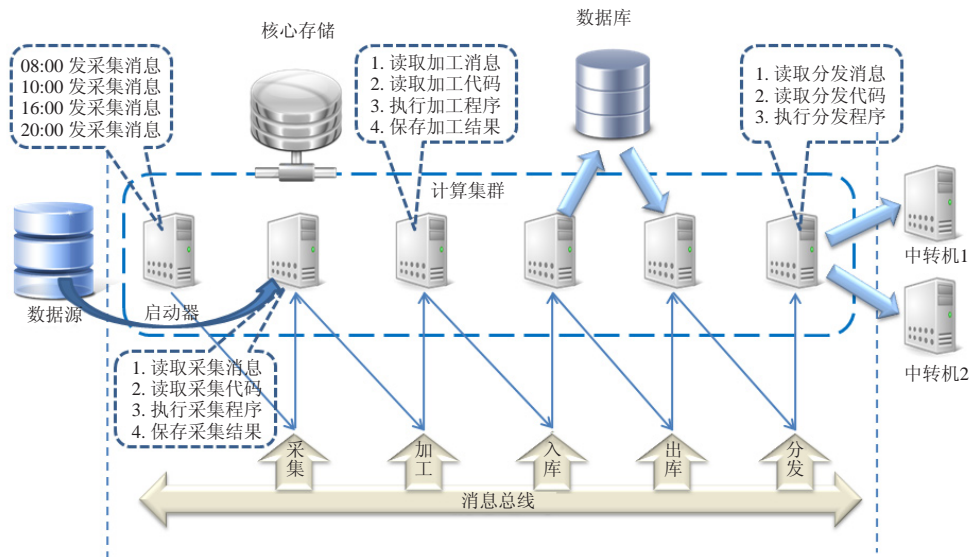


图1 数据流水线  
Fig. 1 Data flow

据流分解为多个独立执行单元，即消息。同时为每个消息建立主题 (topic)，例如数据读取主题、数据处理主题、数据发布主题等。消息主题不具有业务意义，仅作为消息总线上的标识使用。

2) 数据即时加工处理。生产者 (producer) 发布主题至消息总线，消费者 (consumer) 随时监听消息总线上已订阅的主题，一旦发现触发消息，立即执行。本文中的消费者由多台物理机或虚拟机组成基于SSH协议的计算集群实现，集群中的每个节点是无状

态的，可并行消费多个主题。

3) 数据流分发。处理完成的数据按需分发至下游业务系统。

### 2.3 两种数据流程特性比较

消息驱动数据流摒弃了定时计划任务模式，采用了发布/订阅消息模式，不断地从消息总线上监听消息，一旦接收到消息即刻触发执行主题任务。由计算集群采用分布式计算完成任务的并发操作，改变了传统数据流集中控制、顺序执行任务的处理过程，极大

地提高了数据处理效率。目前,气象消息总线的主要应用是业务集成和数据共享。从业务集成方面看,可以有效解耦气象数据流处理过程,提高信息交互能力和功能复用水平。从数据共享方面看,消息总线为数据的及时更新和一致性提供了可靠保障。两种数据流程特性比较如表1所示。

表1 两种数据流特性对比

Table 1 Comparisons between two kinds of data flow

类型	传统数据流	新数据流
系统架构	紧耦合	松耦合
交互模式	计划任务	发布/订阅消息
逻辑处理	集中控制	分布式并行
数据内容	不一致	一致
时间	有延迟	无延迟
资源	重复浪费	统一管理

### 3 系统设计与应用

#### 3.1 系统架构

为了更好地集成现有业务数据流处理过程,基于消息的气象服务数据加工流水线设计采用三层架构实现,分为数据层、消息中间层和业务层(图2)。

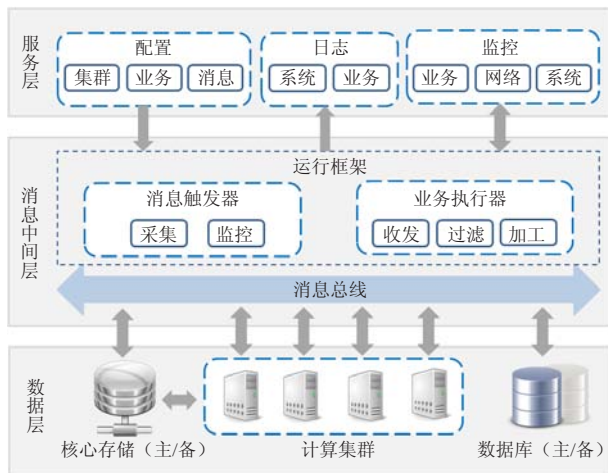


图2 系统架构

Fig. 2 System architecture

数据层是气象服务数据加工流水线的基础。数据文件存储在大型分布式物理设备中,计算集群是数据流各环节的真正执行者,将存储和计算隔离开,实现了数据与计算的解耦。

消息中间层在本架构中具有承上启下的作用,在Kafka消息总线的基础上实现业务运行框架。将一条业务数据流处理过程分解为启动和执行两部分,启动模块是处理过程的起点,是消息总线上的第一条消息,执行模块监听到该消息后分步骤并行处理业务程序代码,将结果消息发送至总线。本文将启动和执行

模块封装为消息触发器和业务执行器。

根据应用需求,本文设计了两种消息触发器:

1) 采集数据:根据业务配置开始时间和间隔,轮询向上游数据提出采集要求,采集完成后即刻发出指令,启动本次业务数据流处理过程;2) 监控数据:根据业务配置目录和文件(可多个),监控数据状态,完整到达后即刻向消息总线发出消息,触发执行下一环节消息主题。

业务执行器由消息收发、消息过滤和业务程序执行代码组成:1) 消息收发:计算集群各节点监听订阅的主题消息,处理完成后,向消息总线发送本环节消息结果;2) 消息过滤:过滤重复消息,防止反复触发造成消息异常堆积;3) 业务程序执行代码:分解数据流处理过程,封装业务单元程序执行代码,由计算集群并行处理。

服务层是气象服务数据加工流水线的窗口。配置服务为运行框架提供集群、业务和消息等参数配置;日志服务记录业务运行状态;监控服务为运维提供了可视化用户界面。

#### 3.2 关键技术

为解决数据处理时效性问题,本文设计了一种基于Kafka消息总线的业务运行框架,实现了气象服务数据即时处理;为解决业务层与运行框架间的数据交互问题,制定了规范性xml消息配置,提供了统一的参数标准。

##### 3.2.1 基于Kafka的消息驱动

Kafka包括生产者、消费者和代理者三个部分。生产者生产的消息被放在主题中,一个主题可以设置多个分区,推送消息给代理者,等待消费者接收;消费者在想要订阅消息时,向代理者发出请求,告知其主题和分区值,主动拉取消息(图3)。数据流经过解耦,运行在消息总线上,经多个计算集群即时执行处理,迅速将加工数据分发出去。



图3 消息发布/订阅简图

Fig. 3 Message publish/subscribe

以Java代码为例,介绍消息的生产者和消费者。

1) 创建生产者

// 创建生产者属性参数

```
Properties dps = new Properties();
```

//指定代理服务器

```
dps.put("metadata.broker.list",kafkahosts.toString());
```

//用该属性参数创建生产者

```

Producer<String, String> producer = new Producer
<String, String>(new ProducerConfig(MsgController.dps));
//生产者广播发送topic/link消息至消息总线
producer.send(new KeyedMessage<String,
String>(topic, new Date().getTime() + "", next-link-id));
2) 创建消费者
// 创建消费者属性参数
Properties cps = new Properties();
//指定消费组
cps.put("group.id", group);
//消费者zookeeper 配置
cps.put("zookeeper.connect", zookeeperhosts.
toString());
//用消费者属性参数创建消费者
ConsumerConnector consumer = kafka.consumer.
Consumer.createJavaConsumerConnector(new
ConsumerConfig(cps));

```

### 3.2.2 消息配置格式

xml文件提供统一的方法来描述结构化数据，通常作为异构系统间数据交换的格式<sup>[6]</sup>。参数配置采用xml文件描述，一个业务对应配置一个xml文件，设计xml文件命名规则为业务种类（2位数字）+业务序列（5位数字）.xml，例如：1010001.xml。

消息配置内容由三部分组成：

1) service: 业务基本信息。name: 业务名称；type分两类：采集（collection）和监控（notify），与消息触发器类型对应。

2) type描述：分为采集和监控标签，为消息触发器提供所需参数信息。①采集标签：description: 描述采集业务详情；start-time: 开始时间；period: 时间间隔。②监控标签：description: 描述监控业务详情；path: 要监控的文件目录；files: 监控的数据源文件。

3) link: 主题参数。id: 标识主题单元号，由业务种类（2位数字）+业务序列（5位数字）+环节号（3位数字）共10位数字组成；description: 描述该环节主要操作内容；order: 描述主题执行命令代码；next-link: 指定下一topic/link对。

### 3.3 业务应用

实时天气预报是网站和移动终端用户的重点选择气象服务，具有广泛的用户群体和极大的需求。本节以雷达分钟级降水系统（PM-MQPF）数据为例，阐述业务数据流实际应用。分钟级降水数据来源于214

部雷达站逐6分钟实时观测产生的基数据，经过计算处理，形成临近降水预报服务产品。在现有读取基数据、前处理、主处理、拼图4个处理程序基础上，通过Kafka消息驱动机制进一步将这四部分分解剥离，形成独立单元流水线作业模式，通过单元返回值触发后续单元主题。将在整个数据计算加工过程中耗时较长的前处理部分，运用计算集群并行处理，以提高计算效率。

1) 分解PM-MQPF数据处理过程。封装为基数据、前处理、主处理和拼图四个部分，为每部分增加返回值。

2) 配置PM-MQPF数据消息参数。为监控指定目录和文件，为业务环节分配主题，T1（前处理），T2（主处理），T3（拼图）。

3) 消息总线监听文件，有文件到达即发送消息。

4) 计算集群监听消息，即时处理主题。T1分布式并行对每个数据文件进行前处理；T2统计每6分钟前处理完成的情况，处理量完成80%以后发送消息启动主处理，主处理完成之后再发送消息；触发T3加工生成拼图，完成后通知下游环节进行产品分发。

PM-MQPF分钟级降水数据流水线采用消息机制和计算集群，分解封装处理单元，降低了各处单元的耦合度，提高了系统运行效率。因此，气象信息总线的应用不仅降低了系统开发和运行成本，也提高了业务应用的实时性，同时为后续拓展应用服务提供了空间。

## 4 结束语

基于消息的气象服务数据加工流水线降低了业务耦合度，优化了气象数据流程，为进一步实现气象数据实时同步、提高数据流时效性奠定了必要基础。当前，系统在功能、性能和稳定性方面都有优异的表现，不但能够满足下游各气象业务的实际需求，同时为业务拓展提供了空间。在后续的研究计划中，计算集群的高并发、负载均衡等问题将被进一步探索。

### 参考文献

- [1] 钱峰, 胡亚旦, 黄旋旋. 基于“消息中间件”技术的气象信息总线. 气象科技, 2016, 44(2): 217-222.
- [2] 韩笑, 王力, 王吉滨, 等. 一种地市级气象数据库的设计与应用. 气象科技, 2015, 43(6): 1053-1059.
- [3] 胡英楣, 沈文海, 宋之光. 多进程并发在国内气象通信系统的应用. 应用气象学报, 2007, 18(6): 877-884.
- [4] 王甫棣, 林润生, 胡英楣. 基于Web服务的气象数据服务. 计算机工程, 2009, 35(8): 280-282.
- [5] 王力, 韩笑, 刘培宁, 等. 基于MQ的气象数据采集与监控系统设计. 气象科技, 2015, 43(3): 451-457.
- [6] 曹卫. XML技术在气象信息发布系统中的应用. 福建电脑, 2009, 25(4): 110-111.

# 台风自身涡旋内力与纬度关系简单定性分析

汪润民

(中国人民大学附属中学, 北京 100080)

**摘要:** 准确预报台风路径, 对减轻台风危害十分重要。从中学生角度, 对台风涡旋南北两端质点科氏力偏差形成的内力进行简单定性分析, 并建立简化函数模型, 初步探讨与台风路径预测相关的台风涡旋内力“量化模型”新途径。

**关键词:** 台风, 科氏力, 内力

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.009

## A Simple Qualitative Analysis of Relationship Between Typhoon Internal Force and Latitude

Wang Runmin

(The High School Affiliated to Renmin University of China, Beijing 100080)

**Abstract:** Accurate forecast of tropical cyclone (TC) track is very important to mitigate the disaster. This study investigates the internal force variation induced by the differences of Coriolis force between the northern and southern ends of a TC when it moves northward, and proposes suggestions for building a function model of internal force for a TC.

**Keywords:** typhoon, coriolis force, internal force

### 1 引言

台风严重影响着人类活动, 研究表明, “台风在海上移动, 会掀起巨浪, 狂风暴雨接踵而来, 对航行的船只可造成严重的威胁。当台风登陆时, 狂风暴雨会给人们的生命财产造成巨大的损失, 尤其对农业、城市和建筑影响更大。<sup>[1]</sup>”如2009年登陆的“莫拉克”台风, 使福建、浙江、江西、安徽和江苏5省1351.6万人受灾, 因灾死亡9人、失踪3人, 直接经济损失114.5亿元。另外, 莫拉克造成我国台湾地区116人死亡, 累计农林渔牧损失共100亿元新台币<sup>①</sup>。而随着我国沿海经济的日益增长, 台风的灾害和威胁更为严重。

可见, 全面掌握台风演变机理、准确预报台风路径, 对减轻台风对人类生命和财产危害具有十分重要的意义。20世纪70年代初, 我国就开始进行台风路径统计预报的研究。四十多年来, 台风路径预报的准确度稳步上升, 2012年我国的台风24h路径误差由原来的110km降到九十多千米。然而, 异常台风的路径预报仍十分困难。因此, 深化台风路径变化成因的研究, 改进预测模型将有助于进一步提高台风路径的预

报水平。

研究表明, 台风移动的方向和速度, 取决于外力和内力两种动力效应的综合结果<sup>[2]</sup>。外力主要指环境条件的影响, 主要是由周围大型气压场分布决定的, 比如副热带高压、西风带系统和热带系统等。而台风范围内空气质点所受科氏力的积分和即为台风内力。一般来说, 外力作用比较明显, 但一些台风, 如2006年8月4—10日的0607号台风, 其实际路径与“内力”效应轨迹颇为相似。可见, 在预报台风路径时, 不仅要考虑外力作用, 还要考虑内力作用。特别是在“弱环境”下, 台风内力对台风移动过程包括方向和速度有着重要作用<sup>[3]</sup>。而台风内力的形成与科氏力有着密切关系。

台风路径预测内力模型仍然是一个很有研究与应用价值的问题, 因此本文研究主要关注内力的影响, 在一定条件假设下通过考虑台风南北两端质点的科氏力偏差来分析台风内力中的科氏力, 期望有助于对北移台风涡旋内力的“量化模型”问题有新的认知。

### 2 简单定性分析

破坏力如此巨大的台风, 其运动与科氏力有极其重要的关系。科氏力也称地转偏向力, 即由于地球

收稿日期: 2015年6月18日; 修回日期: 2016年1月17日  
第一作者: 汪润民(1997—), Email: 223571310@qq.com

<sup>①</sup> 2009年莫拉克台风历程回顾及受灾情况总结. <http://www.tianqi.com/news/12981.html>。

不停地自转，使水平运动物体的运动方向发生偏转的力<sup>[2]</sup>。其偏转规律：在北半球向右偏，在南半球向左偏，赤道上无偏转。早在19世纪，人们就发现昼夜奔腾不息的江河，并不是严格顺流而下的。北半球大陆孕育的江河在流入大海过程中，河水会向右偏转，于是右侧河岸遭到水流、波浪的长年冲刷，较左侧的河岸变形严重，这便见证了地转偏向力的存在<sup>[3]</sup>。

科氏力大小与纬度有关，台风南北质点的科氏力偏差就形成了影响内力的因素。本文将运用科氏力相关数学公式分析台风南北两端科氏力偏差的内力影响因子，建立涡旋南北质点科氏力偏差形成的内力大小可量化函数模型，并将不同纬度、不同台风涡旋半径、不同风速条件等因素，带入数据进行“量化”分析。

### 2.1 假设条件

假设台风为对称的气旋性涡旋，南北两侧的切向和径向风速相等，仅考虑低层流入层情况，且随高度不变。图1表示北半球台风北移过程。图中A点为台风的南侧（纬度为 $\Phi_1$ ），B点为台风的北侧（纬度为 $\Phi_2$ ）， $\Delta\Phi$ 是台风半径所跨越的纬度大小， $\Phi_2 = \Phi_1 + 2\Delta\Phi$ 。

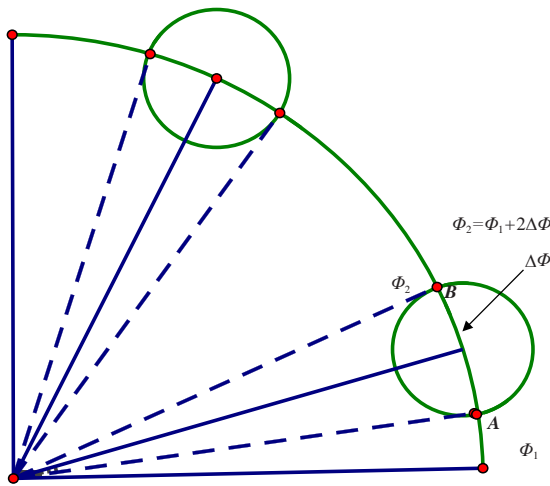


图1 台风与纬度关系示意

Fig. 1 The relationship between typhoon and latitude

根据地转参数公式“ $f=2\Omega\sin\Phi$ ”<sup>[3]</sup>（ $f$ 为科氏参数， $\Omega$ 为地球自转角速度， $\Phi$ 是纬度），在北半球纬度越高、科氏力越大，因此台风北侧的科氏力高于南侧，并且根据三角函数图像性质，同一半径台风北移过程中科氏力差值也是不同的。

根据科氏力公式 $\mathbf{F}=2m\mathbf{V}\Omega\sin\Phi$ （ $\mathbf{V}$ 为流体速度，分解为径向风与切向风， $m$ 质点取1），得到科氏力计算公式 $\mathbf{F}=f\mathbf{V}$ ，做南北差进一步得到内力 $\Delta\mathbf{F}=\Delta f\mathbf{V}$ ，

根据假定，风速 $V$ 南北相同，所以求出 $\Delta f$ 表达式尤为重要。

内力的分解如图2所示。台风可分为径向风和切向风两部分，左图是切向风分量造成的科氏力差，因为北半球科氏力向右偏，高纬的力大于低纬，因此形成向北的合力。同理，右图是径向风分量造成的科氏力差，向西的科氏力大于向东，形成向西的合力，两个合力合成指向西北方向的台风内力。

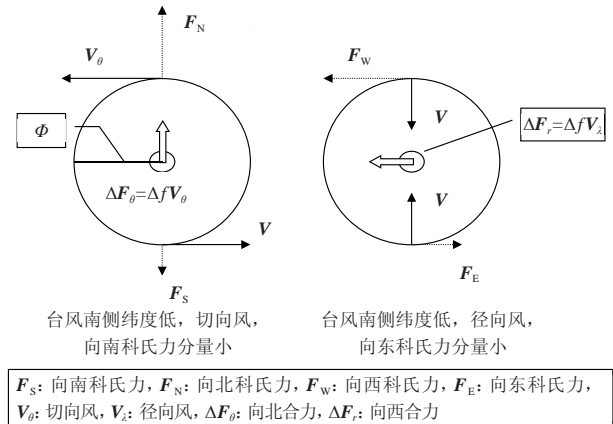


图2 内力的分解

Fig. 2 The decomposition of the internal force

### 2.2 科氏参数差 $\Delta f$ 推导

计算 $\Delta f$ 过程如下：

$\Delta f = f_2 - f_1 = 2\Omega\sin\Phi_2 - 2\Omega\sin\Phi_1 = 2\Omega(\sin\Phi_2 - \sin\Phi_1)$ ，因为三角函数公式 $\sin A - \sin B = 2\sin[(A-B)/2]\cos[(A+B)/2]$ ，所以原式 $= 2\Omega\{2\sin[(\Phi_2 - \Phi_1)/2]\cos[(\Phi_2 + \Phi_1)/2]\}$ ，代入 $\Phi_2 = \Phi_1 + 2\Delta\Phi$ ，化简得出以下计算公式： $\Delta f = 4\Omega\cos(\Phi_1 + \Delta\Phi)\sin\Delta\Phi$ 。

### 2.3 科氏参数差 $\Delta f$ 影响因子

根据科氏参数差 $\Delta f$ 的推导，发现函数里影响台风内力的因子是台风所处纬度 $\Phi$ 和台风半径所跨纬度 $\Delta\Phi$ ，也就是说不同半径台风在不同纬度的内力是不一样的，只要根据台风所处纬度和半径就能求出其科氏参数差 $\Delta f$ 。

### 2.4 合成内力

根据 $\Delta f$ 推导结果，乘以风速便得出向北和向西合力的表达式。

$$\Delta F_\theta = \Delta f V_\theta = 4\Omega\cos(\Phi_1 + \Delta\Phi)\sin\Delta\Phi V_\theta,$$

$$\Delta F_r = \Delta f V_r = 4\Omega\cos(\Phi_1 + \Delta\Phi)\sin\Delta\Phi V_r,$$

$\Delta f_\theta$ 和 $\Delta f_r$ 是向北和向西的垂直矢量，将它们合成求得台风内力 $\Delta\mathbf{F}$ 模的大小。以下是推导过程：

$$|\Delta\mathbf{F}| = |\Delta f\mathbf{V}| = \sqrt{(\Delta f V_\theta)^2 + (\Delta f V_r)^2} = \Delta f \sqrt{(V_\theta)^2 + (V_r)^2}.$$

总结以上过程，

$$|\Delta F| = |\Delta fV| = \Delta f \sqrt{(V_\theta)^2 + (V_r)^2}$$

$$= 4\Omega \sin \Delta\Phi \cos(\Phi_1 + \Delta\Phi) \sqrt{(V_\theta)^2 + (V_r)^2}$$

运用上述推导, 可根据 $\Delta f$ 和风速求得台风内力。

内力除了大小, 还有方向。内力的合成如图3, 把这几个向量平移成为一个直角三角形, 并把 $\tan A$ 的值求出 ( $A$ 为内力与纬度夹角):

$$\tan A = \frac{\Delta F_\theta}{\Delta F_r} = \frac{\Delta f V_\theta}{\Delta f V_r} = \frac{V_\theta}{V_r}$$

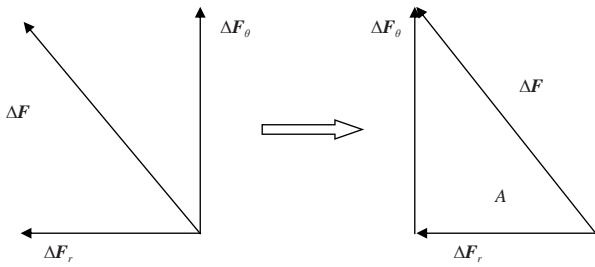


图3 内力合成示意图

Fig. 3 The internal force synthesis

根据结果可发现影响内力方向的因素有径向风和切向风。当切向风很大时,  $\tan A$ 值大, 内力方向偏北; 径向风大时, 内力方向偏西。

### 3 函数图表计算分析

根据上述表达式推导结果,

$$\Delta F = 4\Omega \sin \Delta\Phi \cos(\Phi_1 + \Delta\Phi) \sqrt{(V_\theta)^2 + (V_r)^2}$$

为了进一步认识函数量化规律性, 我带入了一些量计算并绘制了不同影响因素图表进行分析。以下是对函数变量取值范围的分析。

首先, 是 $\Delta\Phi$ 的值 (半径所跨纬度), 运用弧长公式 $L = n\pi r / 180^\circ$  ( $L$ 为台风半径在地球表面跨过

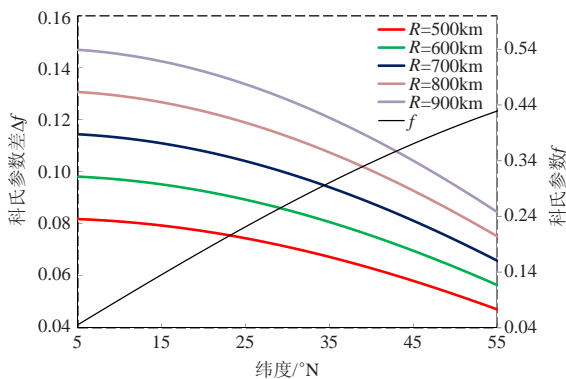


图4 半径500~900km台风科氏力和科氏参数差随纬度变化  
Fig. 4 The Coriolis force and Coriolis parameter changing with latitude in a 500~900 km radius typhoon

的弧长长度,  $r$ 为地球平均半径6371.393km) 可计算半径所跨纬度 $n$ , 即 $\Delta\Phi$ 。台风直径取值大小一般在600~1000km<sup>[4]</sup>, 半径则是300~600km。

其次,  $\Phi_1$  (台风南部所处纬度) 的取值, 台风发生最多的地带是 $5^\circ \sim 20^\circ N$ <sup>[4]</sup>, 有个别台风会发生在较高纬度, 甚至超过 $50^\circ$ 。为此, 计算时纬度 $\Phi_1$ 取值按照 $5^\circ \sim 55^\circ$ 取值。

计算 $\sin \Delta\Phi$ 和 $\cos(\Phi_1 + \Delta\Phi)$ 的值后, 又计算并绘制了不同半径台风随着纬度增加的科氏参数差值图像 (图4)。

图4表明, 纬度增大, 科氏参数值随着三角函数曲线增加, 但科氏参数差随纬度增加而减小, 且变化越来越明显; 纬度一定时, 涡旋半径越大参数差就越大。

依据参数差计算结果, 选取了半径500km的台风并带入了一些风速值进行向北 (图5) 和向西 (图6) 的合力的计算, 并将两个分量合成为内力并绘制图像, 其中径向风按照切向风的经验倍数1/3取值 (不同强度台风风速取自“中国台风网”)。

图7显示, 不同风速下向北向西合力均随着纬度增加而减少, 且变化幅度越来越大; 一定纬度下, 风速越强, 合力也就越大。切向风合力明显大于径向风合力。

根据对应的台风内力曲线, 可发现随着纬度升高, 内力减小, 变化越明显; 一定纬度下, 风速越大, 内力就越大。

### 4 结论与展望

基于气象及数学知识, 在理想的假设条件下, 推导出台风涡旋南北端科氏力偏差形成的台风内力函数简化函数模型, 并得到以下结论:

1) 由台风南北端科氏力偏差函数导出了内力偏

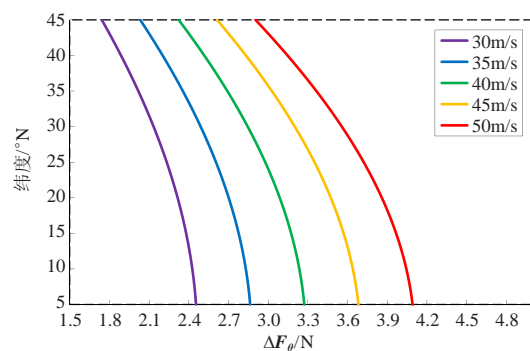


图5 半径500km台风不同切向风速内力分量随纬度变化  
Fig. 5 The different radial wind speed changing with latitude in a 500 km radius typhoon

(下转63页)

# 关于气象类研究生创新能力培养的实证研究

## ——以南信大一次调查问卷结果分析为例

■ 马晓霞

目前国内尚缺乏对气象学科研究生培养状况的专门研究。以气象类硕士研究生为专门研究对象，主要围绕入学动机、课程设计、导师与研究生关系、科研团队等四个方面进行调研，旨在发现研究生培养共性问题的同时，试图发现气象类研究生培养的个性化问题并提出相关对策建议，以期对气象行业高校研究生创新能力培养提供参考。

我国目前的研究生培养尽管取得一定的成绩，但总体培养水平同国外一些发达国家同学科相比仍有较大差距。国内外对研究生创新能力相关研究较多且普遍采用定性理论分析，以个人观点陈述和经验总结为主，以定量分析为基础的实证研究较少，而专门针对气象类研究生创新能力培养的研究尚属空白。为深入了解和掌握我国气象类研究生创新能力培养现状，本文选取了研究生培养规模居国内前列，以气象学科建校，培养层次完备，大气科学一级学科于2012年列教育部学科评估第一的南京信息工程大学（以下简称“南信大”）为主要调研对象。运用实证研究的方法，对该校大气科学一级学科下的气象学、大气物理与大气环境等九个二级硕士学位点的研究生进行调研，探究影响研究生创新能力培养的相关因素并提出对策建议，以期对加强行业特色高校学科建设、促进气象行业人才队伍建设提供参考。

### 一、气象类研究生创新能力培养的实证调研

本次调研范围涉及南信大大气科学一级学科下的气象学、气候系统与全球变化、气候资源开发与利用、应用气象学、城市气象学、大气物理与大气环境、大气遥感与大气探测、雷电科学与技术、3S集成与气象应用等九个二级硕士学位点，以二、三年级研究生为主要调研对象，共发放调查问卷400份，回收有效问卷365份，有效问卷回收率为91.3%。问卷共设计题目33道，其中选择性题目32道，开放性题目1道，主要围绕入学动机、课程设计、导师与研究生关系、科研团队等四个部分进行设计。调研发现气象类研究生在创新能力培养方面虽已取得显著成效，但仍有需要改进的空间，应引起培养各方的关注与思考。具体结果如下。

### 1 关于研究生入学动机的调研

随着研究生规模的扩大，研究生生源素质本身存在差异，且入学目标不尽相同。对研究生入学动机的调研结果显示，55%的学生认为“对学术感兴趣希望继续深造”，12%的学生选择“暂时回避本科就业压力”，28%的学生认为“该专业就业前景好”，还有5%的学生选择“满足家长期望”。部分学生学习动机的非学术性，易导致创新意识淡薄，将直接影响到研究生创新能力的内在动机和培养效果。

### 2 研究生课程设计分析

本部分调研主要设计了关于公共课与专业课程的课程设置比重、专业课程设置的合理性、课程学习在整个研究生阶段的时间安排及研究生教学内容的创新性等问题。调研发现，研究生对课程的预期与实际效果有一定差距。76%的学生认为研究生课程学习“重要”，19%的学生认为“一般”，5%的学生认为“不重要”。就“你认为目前的研究生课程学习后最大的收获”的调研结果发现，78%的学生认为课程学习阶段培养了扎实的理论基础的同时，能紧跟学科前沿，收益颇多；12%的学生认为课程学习仅掌握基本理论，与本科教学区别不大；10%的学生认为仅停留在应付考试、修满学分，实际收获不大。

学生对研究生课程设置的满意度不尽相同。大多数学生认为目前的课程安排较为合理，对授课效果和内容较为满意，仍有小部分学生认为公共课与专业课设置中公共课比重较大，专业课授课内容学科前沿性不足，交叉学科内容涉及较少，授课方式较为传统，不利于激发学生的学习兴趣。另外，通过访谈调研也反映出部分学生对研究生课程学习本身的认识不够，存在“走过场、凑学分”的被动学习心态。

### 3 导师与研究生相互关系调研

本部分调研的问题设计主要围绕研究生选择导师的标准、研究生与导师的交流时间、导师的具体指导形式、导师对研究生创新能力培养的重视程度等。调研发现,一是在导师的选择标准方面,绝大部分学生关注导师的学术水平和治学态度,并对导师指导效果的预期较高,但有小部分学生有功利主义倾向,调研结果同有关学生的入学动机的调研较为相符;二是大多数导师对学生的创新能力较为重视,但仍有部分导师对学生创新能力的重视程度有待加强;三是大多数导师能保证足够的交流时间,但也存在部分导师疏于同学生沟通的现象。另外,导师与学生的沟通方式主要以面谈或团队讨论为主,且学生的满意度相对较高。

### 4 研究生独立科研能力的调研

本部分调研围绕研究生是否独立主持课题、是否从事过创新能力相关的科研实践活动、研究生课题的参与程度、研究生研究选题中导师的参与程度、研究生对选题本身的兴趣度等进行问题设计。调研发现,研究生承担或深度参与研究课题的能力和条件有待进一步改善和提升。目前85%的研究生有参与课题的经历,但仍有15%的研究生没有独立主持课题或参与经历,科研训练平台仍有提升的空间。对有参与课题经历学生的相关调研发现,一部分研究生主要承担资料收集或计算分析工作,课题参与的深度有待进一步加强。另外,大部分研究生论文的选题受导师或导师课题的影响较大,且研究生对选题也表现出较为浓厚的兴趣。

### 5 研究生科研团队参与情况的相关调研

本部分调研主要围绕研究生的研究团队成员、是否参与导师外的其他导师团队、团队交流的满意度等问题进行问卷设计。调研结果显示,70%的研究生的科研团队成员是导师和同门,25%的研究生除导师外还参与同专业方向其他导师的团队,还有5%的研究生没有团队概念。说明目前研究生阶段的培养主要还是以单一导师制为主,学生参与学术研究主要以导师及以导师为核心的同门组成的科研团队为主,缺乏大团队意识和跨导师间的科研交流与合作,研究生参与其他科研团队意识和氛围有待加强。

## 二、影响气象类研究生创新能力培养的主要因素

研究生创新能力培养是一个历久弥新的话题,也是当前我国高层次人才培养最为关注的问题,如何切实提高我国研究生培养质量,培育更多的高级专业人才、产出更多创新性的科研成果、服务于更为广泛

的现代化建设领域是社会各界广为关注的问题。从本次调研发现,气象类研究生的创新能力培养也存在目前国内研究生培养中的共性问题,主要表现在课程设置、创新型导师队伍建设、学科文化积淀与培育及学生本身热爱科学、乐于求知的内在学习动机的激发等方面。但就气象类研究生培养的角度而言,通过国内外的对比研究发现,影响我国气象类研究生创新能力的培养的关键因素主要在如下两个方面。

### 1 研究生培养模式的趋同性较为普遍

根据研究生培养的特点,研究生培养模式由培养目标与理念、培养过程、培养主体、运行方式、运行机制等要素组成。各类要素在培养目标与理念的牵引下,进行各种组合并运转,从而构成一组相对稳定的、动态的、开放的研究生培养模式。而目前的研究培养理念以宏观的国家教育思想为主,培养主体主要以研究生导师和管理机构为主,入学方式主要是统一考试或推免的形式,培养过程大多是从课程要求、论文工作、思想政治表现几个方面进行,有校内培养、校内外联合培养等方式,考核方式以学位论文和发表科研论文为主要标准,整个培养系统高校间、不同学科间的趋同化现象较为普遍,根据不同高校办学定位、学科特色、行业需求变化而与时俱进地制订个性化的研究生培养模式还有所欠缺。

### 2 研究生培养机制的灵活性和科学性有待进一步提升

研究生培养机制包含招生制度、管理制度、导师体制、质量评价体制等各个方面,其本质应体现以人为本、以知识为本的根本宗旨。目前的研究生招生主要以统一招考为主,少量的推免选拔也以课程成绩为主要依据。导师的选聘也以导师的显性成果数量和级别为主要依据,学生的质量考核主要以课程成绩和发表论文数量为主要参考依据,学生科研潜能的考核没有专门的体现。学生培养主要以单一导师制为主,科研成果的期刊级别和署名单位均有严格的规定,对科研成果本身的质量和对学生科研潜能的考量的重视程度较弱。

以美国的研究生教育为例,不是所有大学均需参加严格的入学考试,部分高校仅需专家的推荐即可;不同类型研究生的毕业要求截然不同,学术型与专业型研究生注意遵循学生自身的研究潜能和个人意愿,研究生的每一个学习过程无不强调研究生强烈的内驱力而非单纯的就业谋生。中美研究生教育“严进宽出”与“宽进严出”的区别应该是两国研究生培养最为显著的区别。国外视体现个性化培养和创造潜能激

发为高层次教育的根本宗旨，与我们目前的大规模、同质化、低产出的人才培养现状的对比，值得我国高等教育的深刻反思。

### 三、气象类研究生创新能力培养相关对策建议

#### 1 注重特色学科文化建设

学科文化是大学文化生发的源泉。大学文化是集各学科文化和大学本身文化理念的相互融合的大文化生态，其样态是大学内各学科领地上学术部落显现的学术风景，以及各学术部落之间相互交往联系的情况。这种联系包括学科之间的交往、学术边界跨越、竞争过程发生的冲突以及在冲突过程中各要素的吸收融合与扬弃。学科文化包含学科物质文化、学科制度文化、学科精神文化和学科行为文化四个维度。一个学科是否已发展成熟，最重要的标志是看它是否形成了有别于其他群体的学科文化。学科文化建设虽然已引起学界和教育界的普遍关注，但不同学科文化间的隐性特征与显性特征的融合需随着学科本身的发展和高等教育环境的改善而逐步成长。因此，探究影响研究生创新能力培养的深层原因，厘清学科文化与研究生创新能力培养二者的内在联系是切实提高我国研究生培养质量的关键。具体应从制度建设、管理方式、培养理念、学术规范各环节渗透特色学科文化内涵，真正发挥一个学科、一所大学的文化传承功能。

目前南信大一方面加强气象特色学科文化传承和培育，在人才培养思路、路径方面推陈出新，围绕应用型、精英型和国际型“三个导向”分类人才培养目标，创新人才培养模式，不断完善行业特色人才培养机制。学校专门成立以新中国气象事业的奠基人、中国第一所高等气象院校的创始人涂长望先生命名的“长望学院”，着力培养精英型气象人才。另一方面加快推进气象科研、人才培养的国际化步伐。学校依托大气科学、环境科学等特色优势学科，联合耶鲁大学、佛罗里达州立大学、夏威夷大学等多所国际名校组建了全国首批获准立项建设的三个国际合作联合实验室之一的“气候与环境变化国际合作联合实验室”。同时积极组织并承办各类气象国际会议、专家交流会，与海内外气象领军人才展开广泛的合作，以开放、共赢的姿态融入气象事业，形成了特有的气象学科文化。

#### 2 探索科学、灵活的研究生培养机制

一是招生考试制度改革。充分利用目前的高（高校）—高（高中）对接计划，从高中就开始选拔热爱气象行业、有志于气象行业的优秀学子；推免工作不局限于课程成绩的排名，更为注重学术成就和学术精神的考核；专家推荐也成为选拔的途径之一；加大入学复试成绩的比重。二是改革培养制度。首先对研究生进行分类培养、分类考核，严格落实淘汰机制；其次，根据不同的研究方向制订个性化培养计划，校内培养、校校培养、校所培养同步进行；再次，专业方向的课程设置应与行业紧密联系，力求同步性和前瞻性。同时，要改革导师指导制度，打破导师的职称、资历限制，以指导态度、学术能力为主要选择标准，扩大导师的选择范围，增强团队意识，加强导师团队的协同创新能力培养。三是改革考核评价方式。针对不同类型的学生制订不同的考核方案；考核主体除导师、学校外引入行业评价，注重用人单位的反馈信息的搜集和采纳；考核过程可以更加灵活，考核内容侧重学生的科研成果的实用性和理论价值。

南信大也在逐步的改革和尝试。以南信大大气科学学院为例，该院自2011年起根据专业组建若干指导委员会，对研究生的开题、中期考核、预答辩、答辩进行严格把关。同时紧密对接行业，引入行业的业务骨干和相关企业研究人员联合培养研究生。目前南信大与中国科学院大气物理研究所、国家气象中心等八家单位共建“气候与气象灾害协同创新中心”，该平台将是研究生培养的重要基地，对研究生创新能力的培养和提高将发挥重大作用。

致谢：本文由中国气象局2013年度气象软科学研究计划项目（sk20120153）和2012年度江苏省高校哲学社会科学研究基金项目（2012SJD880031）共同资助。

#### 深入阅读

高山. 2012. 大学学科文化冲突融合与创新研究. 现代大学教育, (5): 72-76.

秦发兰, 胡承孝. 2014. 目标导向的研究生培养模式研究. 学位与研究生教育, (1): 50-54.

（作者单位：南京信息工程大学）

# 气象影视节目虚拟现实技术的应用现状及趋势研究

■ 张媛

虚拟现实技术，是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统，它利用计算机生成一种模拟环境，可以通过一种多源信息融合的交互式的三维动态视景和实体行为的系统仿真使用户沉浸到该环境中。

21世纪的媒体环境已经进入技术高速发展的时代，每一次的技术革新都对信息传播的方式产生巨大的影响。以电视天气预报节目为主体的气象影视经过多年的发展，已形成一定的特点和优势，但它面临着日益激烈的竞争和资源的限制，同样也面临着每一次技术革新的挑战 and 机遇。2016年是虚拟现实（Virtual Reality, VR）技术爆发的一年，近几年媒体环境中涌现了许多关于虚拟现实的新闻与报道，虚拟现实的相关技术已有大幅度的进步，一般大众也对它所带来的影响和冲击有着强烈的兴趣。气象影视节目也致力于寻找气象与VR的共振点，开启划时代的创新。

## 一、虚拟现实技术概述

虚拟现实技术，简称VR技术，是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统，它利用计算机生成一种模拟环境，可以通过一种多源信息融合的交互式的三维动态视景和实体行为的系统仿真使用户沉浸到该环境中。美国科学家G. Burdea和Philippe Coiffet在1993年世界电子年会上发表了一篇题为《虚拟现实系统与应用》（Virtual reality system and applications）的文章，该文提出一个“虚拟现实技术的三角形”，它表示虚拟现实技术具有3个突出特征：沉浸性、交互性和想象性。

### 1 沉浸性

虚拟现实技术的主要特征就是让用户觉得自己是计算机系统所创建的虚拟世界的一部分，使用户由被动的观察者变成主动的参与者，沉浸于虚拟世界之中，参与虚拟世界的各种活动。比较理想的虚拟世界可以达到使用户难以分辨真假的程度，甚至超越真实，实现比现实更逼真的效果。在虚拟现实系统提供的虚拟环境中，体验者确实有了“看得见、听得到、摸得着、闻得出”的真实感受。它是虚拟现实技术特

点的核心。

### 2 交互性

在虚拟现实系统中，体验者可以用日常生活中的方式与虚拟场景中的人或物进行各种交流，产生真实的互动体会。虚拟现实系统强调人与虚拟世界之间要以自然的方式进行，如人的走动、头的转动、手的移动等，通过这些，用户与虚拟世界交互，并且借助于虚拟系统中特殊的硬件设备（如数据手套，力反馈设备等），以自然的方式，与虚拟世界进行交互，实时产生与在真实世界中一样的感知。例如，用户可以用手直接抓取虚拟世界中的物体，这时手有触摸感，并可以感觉物体的重量，能区分所拿的东西，并且场景中被抓的物体也立刻随着手的运动而移动。

### 3 想象性

想象性指虚拟的环境是人想象出来的，同时这种想象体现出设计者相应的思想，因而可以用来实现一定的目标。用户能在虚拟的环境中获取新的知识和经验，形成感性或理性的认识，从而产生新的思想和行动，有效提高思考和行动能力。例如当你在设计一座大楼之前，绘制建筑设计图纸，无法形象地展示出建筑物更多的信息，而现在可以采用虚拟现实系统来进行设计与仿真，非常形象直观。

## 二、虚拟现实技术在气象领域的应用

鉴于虚拟现实技术的特点和热度，气象领域也开始关注到了这项新兴技术，一些相关的尝试和应用已经开始出现。

### 1 虚拟现实技术在天气应用程序上的尝试

最早基于智能手机的虚拟现实在天气领域的应用，是Gear VR应用程序体验发布的一个应用程序，名为“天气查看器”（Weather Viewer，图1）。



图1 Weather Viewer 用户可在VR环境中查看天气预报

从图1可以看到，这个简单的应用程序提供了用户需要的关于时间、天气等相关数据，用户可以在虚拟现实环境中查看天气预报，获取实时信息和天气模拟。该应用程序还有一个特别的功能，用户可以上下滑动Gear VR的触摸屏设备来转换不同的天气类型，让用户体验不同的天气环境。

## 2 虚拟现实概念在天气预报装置中的应用

Tempescope是一个应用了虚拟现实理念的高科技盒子，看上去就像是一个透明的玻璃柱子，里面有水，上下都有天气模拟装置，只需要将之接入互联网，它就能自动获取天气预报信息，并通过可视的方式展现出来。比如，预报明天要下雨，那么用户就会看到玻璃柱中水珠不断地从上方滴落，淅淅沥沥（图2）。Tempescope能够再现有阳光的晴天、多云、下雨甚至是雷雨天气等各种天气的逼真特效，它需要与手机或者其他智能设备中的天气预报相关联，在获取了天气信息后会逼真地将相关场景表现出来，比如通过盒顶的存水与超声波的组合魔幻地制造云朵与雨滴，或者用顶部的LED灯来制造阳光。



图2 Tempescope天气预报装置应用VR概念模拟天气情景

## 三、虚拟现实技术在气象影视节目中的应用现状

虚拟现实技术的优势不仅仅体现在天气应用程序或者装置上，在气象影视节目中，虚拟现实技术也和气象服务本身擦出了新鲜的火花。

### 1 虚拟现实技术在国外气象灾害中的应用

虚拟现实技术在国外气象影视领域的应用已见端

倪，不仅仅是气象部门，大学、安全中心等相关机构都开始尝试运用虚拟现实技术，尤其是在气象灾害模拟方面。阿拉巴马高级公共安全中心目前就正在研制虚拟现实龙卷风模拟器，这个模拟器将模拟龙卷风突发时的场景，并会在场景中加入龙卷风音效，让用户感受到尽量真实的龙卷风环境。电视主播也可以通过使用这个虚拟现实龙卷风模拟器，向观众演示在经历龙卷风时应该如何应对。在不久的将来这种类型的技术可能会用到智能手机上，帮助大家暴风雨来临之前做好充分的准备。

而AccuWeather公司也为一些突发天气新闻推出了沉浸式360度视频，这是天气预报中非常独特的一种类型。交互式的新闻内容令其浏览量暴增，这种以360度视频进行天气新闻播报的形式令人们能够更加直观地看到天气情况，拉近了人们与天气预报新闻的距离，因而更加受人欢迎。

### 2 虚拟现实技术在国内气象影视节目中的应用

中国气象局公共气象服务中心的一些气象影视节目也尝试了虚拟技术。如2015年举办的全国气象影视业务竞赛，气象影视中心节目部制作的《旅游天气》就利用了虚拟现实技术，模拟旅行线路上特色旅游景观及当时的天气环境，展示了精细化的旅途天气服务能力。

另外CCTV 2《第一印象》节目有关台风“苏迪罗”的报道，也借用了虚拟现实技术的理念，如模拟降雨及积水环境，介绍科普暴雨的定义，并模拟演示了遭遇雷电等强对流天气时的防御方法。虚拟现实技术在影视节目中的应用尝试，让气象影视节目展现出了新鲜感和趣味性，也让气象服务信息的接收率大大提高，让观众对气象信息更加“听得懂、记得住”（图3）。



图3 CCTV 2《第一印象》台风“苏迪罗”VR模拟降雨影响

另外，2016年，中国气象频道在直播台风“尼伯特”的影响时，也利用虚拟现实技术在全媒体演播室中完成了对“尼伯特”台风的报道，这是中国气象频道首次利用虚拟技术进行直播。气压层的三维模型，使单一的画面和信息变得更加立体，主持人在虚拟台

风环境中从多维度来介绍台风消息,使原本很难理解的抽象表达,变得更加直观。

### 3 虚拟现实技术在气象影视节目中的应用现状分析

虚拟现实技术作为一门新兴技术,虽然在气象影视节目以及气象其他领域都已经开始尝试应用,但案例还很少,尤其是在日常的气象影视节目制作中还未开始应用,这主要和虚拟现实技术的发展现状有密切关系,虚拟现实技术的沉浸性和交互性都需要进一步改进与完善,目前在现实中应用的局限性较大。

#### (1) 虚拟现实技术应用成本高、周期长

虚拟环境首先要解决的问题是三维建模,生成精确三维模型的过程相对比较困难,周期较长,大部分模型仍需要高水平的专业人士进行人工绘制,不仅延长了制作的周期,也使得费用成本急剧攀升。另外虚拟现实软件普遍存在语言专业性较强、通用性较差及易用性差等问题。同时,由于硬件设备的诸多局限性,使得软件开发费用高昂,并且软件所能实现的效果受到时间和空间的影响较大。而国内气象影视节目仍以日播型的天气预报节目为主体,因此虚拟现实技术很难在气象影视节目中大范围推广应用。

#### (2) 虚拟现实硬件普及度不高

虚拟现实的头显设备在2016年出货量预计达到48万台,同比增长476%,行业将迎来爆发增长。但摆在VR设备普及化面前的几道障碍,可能需要更长的时间来进行清除。因为VR设备定价过高,而且普遍存在使用不方便、效果不佳等情况,另外VR设备对搭配的硬件设备要求很高,这对家庭用户来说也是一笔较高的费用,所以虚拟现实在个体观众的普及度上还较低。而对于传统气象影视节目来说,应用虚拟现实技术的受众面目前仍然只能是小规模人群。

## 四、虚拟现实技术在气象影视节目中的应用趋势分析

随着虚拟现实技术以及硬件设备的进一步发展和成熟,它在现实中应用的局限性会逐渐减小,而它在气象领域的应用也将会越来越广泛。

### 1 场景式生活气象服务

生活气象服务穿插在百姓日常生活的方方面面,随着生活水平的提高,人们在不同生活场景中对气象服务提出了个性化、专业化和定制化的需求,同时用户对气象预报的精准度和跨行业应用提出了更高要求。气象影视节目可以利用虚拟现实技术模拟户外出行的各个场景,并嵌入最新的预报数据,让受众仿佛置身于即将进入的生活场景,给予他们仿真的天气体验和感受。还可以通过互动,在场景中提供针对不同

人群的天气出行提示,将天气数据转化为直观体验,使图文式的日常影视气象服务向场景体验式的气象服务转变。

### 2 分类式专业气象服务

由于大众对天气预报的需求越来越细化,气象服务也逐步进入精细化、分众化市场,比如户外运动爱好者在从事跑步、登山、骑行等不同的运动时,对天气关注的维度也是不同的,虚拟现实技术可以将类型化的户外活动或者旅游场景模拟呈现,并让观众在模拟的场景环境中,分享不同时段、不同状况下的精细化专业气象服务产品,让面对具体受众的专业气象服务变得更具象化,更有温度感。

### 3 极端天气体验

天气资讯是气象影视节目内容中很重要的一部分,尤其是极端天气发生时,天气本身就是资讯,也因此变得尤为受公众关注。如今的极端天气资讯包含大量的天气实况数据和历史天气统计数据,将这些数据转化为观众对极端天气的体验,就需要虚拟现实技术。利用虚拟现实技术模拟极端天气发生时的真实状况,可以让受众从通过新闻画面接受天气资讯信息,变成直接进入极端天气的现场、感受极端天气。38℃的高温、300mm的降雨等,都不再会是概念模糊的数字,而是极度炎热和倾盆大雨的沉浸式体验。

### 4 防灾减灾科普

在气象影视防灾减灾科普的传播方面,虚拟现实技术中沉浸性、想象性以及交互性等特性都可以运用得淋漓尽致。利用虚拟现实技术模拟气象灾害现场,以及设置灾害发生的关键环节,可以使受众通过虚拟现实技术的硬件设备,如手柄或头戴设备等,在气象灾害虚拟环境中,通过行为动作的交互,自主应对气象灾害,并可在虚拟气象灾害环境中得到正确应对各类气象灾害的正确指导。体验气象灾害发生时的巨大破坏力并亲身应对,是气象影视利用虚拟现实技术给予普通受众的一次气象灾害应急演练,这是传统影视技术无法达到的传播效果,也将让气象影视防灾减灾科普迈入一个崭新的世界。

#### 深入阅读

- 胡小强. 虚拟现实技术基础与应用. 北京邮电大学出版社, 2009.  
 蒋庆全. 国外VR技术发展综述. 飞航导弹, 2002(1): 27-34.  
 梅中义. 虚拟现实(VR)技术及应用前景. 航空工业技术, 1996(3): 3-6.  
 巫影. 虚拟现实技术综述. 计算机与数字工程, 2002, 3(3): 41-44.  
 约翰·布里格斯. 虚拟现实(VR)技术. 现代技能开发, 1997(8): 41.

(作者单位: 中国气象局公共气象服务中心)

# “台风”少年

## ——记“全国青少年科技创新大赛”获奖者汪润民

李婧华 王卫丹

### 赛事信息:

全国青少年科技创新大赛是由中国科协、教育部等多家机构共同主办的一项全国性的青少年科技竞赛活动。大赛具有广泛的活动基础，从基层学校到全国大赛，每年约有1000万名青少年参加不同层次的活动，经过选拔挑选出500多名青少年科技爱好者、200名科技辅导员相聚一起进行竞赛、展示和交流。全国青少年科技创新大赛还与国际上许多青少年科技竞赛活动建立了联系，每年都从大赛中选拔出优秀的科学研究项目参加国际科学与工程大奖赛(ISEF)、欧盟青少年科学家竞赛等国际青少年科技竞赛活动。更多信息请访问：<http://castic.xiaoxiaotong.org/index.aspx>

《气象科技进展》(以下简称《进展》): 请先介绍一下你自己。

我叫汪润民，是人大附中高二的学生。我很爱运动，平时经常跑步。我对历史比较感兴趣，还参加了学校的历史大学先修。我对心理学也很感兴趣，学校里有心理咨询室。心理老师说去他那里的目的是“让自己更了解自己”，其作用就是“让自己看见自己的后脑勺”。当我考试不好或者郁闷的时候，我会到那里去。我还体验过催眠，挺神奇的。通过与心理老师的交流，他们觉得我是一个很有自省能力的人。

《进展》: 你是如何接触到气象学的? 如何产生这次竞赛的思想火花?

我是一名文科生，高一就开始学习地理，很早就接触到其中有关气象学的概念。我平时也会关注一些与气象相关的新闻，比如台风经常袭击东南沿海的报道。这样结合起来，会产生一些疑惑。于是就查阅了相关资

### 【编者语】

2015年8月，在中国香港举行的第30届全国青少年科技创新大赛上，来自人大附中的汪润民同学，凭借“台风涡旋北移过程科氏力偏差和内力函数模型建立与分析”研究，获得高中“地球与空间科学”组一等奖(获奖课题论文详见P53页)。一位文科少年是如何对台风产生兴趣的? 一位中学生该怎样克服科研中遇到的种种困难? 带着疑问，本刊特约编辑对汪润民及其2位指导老师进行了专访。

料，了解了我国抗击台风的历史。还整理汇编成一篇文章，题目是《我国抗击台风历史溯源》。我在地理课上学习过地转偏向力，课上讲过地转偏向力的形成，于是我就考虑这个力会不会对台风的移动路径也产生影响，由此逐渐确定了选题方向。

《进展》: 在准备过程中遇到了哪些意想不到的困难呢?

研究之初，我看了有关气象和台风方面的专业书籍之后，感觉太难了，甚至一度有想放弃的想法。指导老师给了我鼓励，认为我对物理知识掌握得特别快。我自己研究公式推导，有时一天都弄不出什么头绪。刚开始的研究想法是做成台风路径预测，把我研究的这个内力加进去，模拟一个台风路径，但是这个项目太简单也过于理想化。另外，在论文的撰写过程中，如何对内容进行完善，同时要展示得更丰富，刚开始都很困难。另外，我完全没有科技论

文的写作经验，刚开始我写的论文更像是科普读物，所以最初的文章直接被指导老师全盘否定。我又按照科研论文的写作要求重新写了一遍。整个暑假，我把论文修改了十几二十遍。

《进展》: 谈谈参加全国创新大赛的心得?

比赛全程共7天，比赛的第一天布展。有两天是公众答疑，就是公众来参观，并向其介绍成果，这部分不会影响成绩。第三天是专家答辩，共有8个专家来审地球与空间科学的项目，每人有10分钟时间介绍自己的课题，之后专家会问一些问题。有位专家看到我的课题说，我关注你很久了，你的研究绝对是错的。我向他解释，我的研究是在理想情况下的简化情形。大赛期间还举行了科技创新讲座，邀请了院士专家分享他们的人生经历。其中有一位专家提到，不创新就会落后，以此来激励他自己追逐科学梦。

指导教师李英(中国气象科学研究院):

一开始听说一个高中生对台风感兴趣，想要做一点台风研究，非常吃惊! 因为台风研究需要深厚动力学基础，一般硕士或博士阶段才开始。中学阶段所学的三角函数以及物体受力分析等相关知识点，可以对台风做一些简单的受力分析，来了解台风的运动原理。但对于汪同学，台风还是很陌生的，需要通过阅读大量的文献来了解台风的运动。这对课业繁忙、即将高考的学生不是件容易的事。另外，科研还涉及不少计算和做图，也都比较耗费时间。但他最终克服困难坚持下来了。总的来说，这项研究涉及到物理、数学、地理等知识的综合运用，没有一点恒心和毅力很难完成。他的研究对认识台风的运动规律也有参考价值，并且荣获“全国青少年科技创新大赛”一等奖，这也是对他执着追求精神的嘉奖。

整个研究和写论文的过程,对逻辑思维有一定的训练。论文完成后,我感觉将这些逻辑思维应用到学习中,思路会更加清晰。通过研究台风,也使我对地理这门课有了更多的了解。另外,在整个研究过程中,从画图到使用各种软件,对我有很大的帮助,使我知道科技论文该如何撰写,也了解了一个课题从选题到结题的整个过程,这对以后的科研有很大帮助。

### 《进展》:未来的学习和研究方向是什么?

目前我还没有想好,我认为研究一个课题需要特别浓厚的兴趣。尽管

指导教师范克科(人大附中):

青少年科技俱乐部是在“为明日的杰出科学家创造机遇”的指导思想下,通过科学实践活动,将爱好科学的学生引导到科学的道路上。这不仅是一个开阔视野的机会,同时也通过科学考察,让学生们能够进行真刀真枪的科研训练。科研实践的训练一方面对学生的科研兴趣是个培养,另外每一件事的成功,都会经历很多次的碰壁,这对学生们做人、做事也是一种磨炼。他们这一代人碰到困难就容易绕着走,在科研上找不到成就感就不做了。像汪润民这样坚持到最后很不容易,因为课外的科研实践要占很多时间,在自己感兴趣的方面敢于投入时间,体现了一种对兴趣爱好的持续力。

我是文科生,但我现在对台风、心理学、哲学和历史都有一定的兴趣。我在参加北京市青少年科技创新大赛的时候,“天宫一号”总工程师欧阳自远院士在他的讲座中提到“我们要学习全

人类的知识”。所以,我觉得以后不管研究哪个方面都要博览群书,学习更多的知识,不要把文、理刻意地割裂开。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

(上接55页)

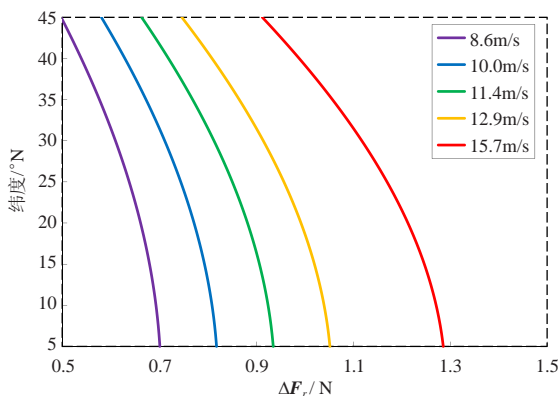


图6 半径500km台风不同径向风速内力分量随纬度变化  
Fig. 6 The different tangential wind speed changing with latitude in a 500 km radius typhoon

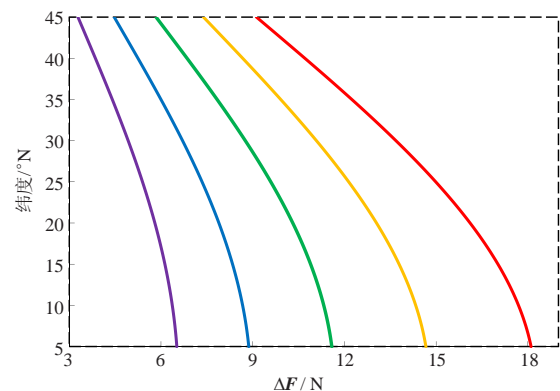


图7 半径500km台风不同风速下内力随纬度变化  
Fig. 7 The internal force changing with latitude at different wind speed in a 500 km radius typhoon

差简化函数模型,在此基础上可进一步导出整个台风内力随纬度、半径与风速变化三影响因素的“量化”模型。

2) 通过导出的科氏参数差函数计算分析,表明台风内力随纬度增大而变小,纬度一定时,台风半径越大参数差就越大。

3) 台风内力大小与台风所在纬度,台风半径所跨纬度以及径向风速、切向风速有关。方向由切向风速和径向风速之比决定。

影响台风路径有多种因子,本文是在诸多假设条件下,仅就台风自身涡旋内力与纬度关系所作的简单定性分析,关注台风南北两个端点受地转偏向力影响所形成的内力而建立台风内力简化函数模型。未来研究中,可进一步考虑多影响因素,关注台风风场在水

平和垂直方向变化,运用气象及数学方法,求整个台风范围内空气质点所受科氏力的总和,以获取整个台风内力的数值。

致谢:感谢中国气象科学研究院李英研究员、中国气象局气象干部培训学院王邦中副院长、王寅钧博士对本文构思、写作和计算方法等的悉心指导;感谢徐祥德院士对本文的研究思路给予很有学术价值的启示;感谢中国人民大学附属中学范克科等老师的热情帮助。

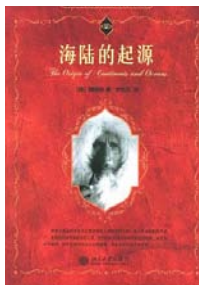
### 参考文献

- [1] 史春伟. 自然界的大气与天气. 合肥: 安徽师范大学出版社, 2012.
- [2] 王民. 地理必修第1册. 北京: 中国地图出版社, 2007.
- [3] 徐祥德, 李泽椿, 柳崇健, 等. 地球大气中的涡旋. 北京: 科学普及出版社, 2012.
- [4] 于系民. 气象万千·台风. 北京: 气象出版社, 2007.

# 20世纪地球物理学新时代的开创

## ——读魏格纳《海陆的起源》

■ 叶梦姝



北京大学出版社，2006年

“珊瑚仅见于水温超过20℃的海洋中，蚯蚓不可能在冻土中生活，但能利用水温的两栖类，或者是淡水鱼类，以及自身能产生体温的哺乳类，就可能在寒冷的气候下生存。判断在什么气候下有什么动植物和动植物化石的事例多得不能一一列举。”

曾经在科学界引起轩然大波的“大陆漂移理论”，随着时间的推移，如今似乎已经成为了中学课本中确定无疑的常识。这个理论实在是太过显而易见了，大西洋两岸海岸线的相似性肉眼可见，因此容易让人忽视了这个理论提出之时，为寻找充足证据所做出的辛苦努力。事实上，德国地质学家、气象学家魏格纳并不是这个理论的提出者，也非相关争论的终结者。魏格纳和他的著作《海陆的起源》之所以能够名垂科学史，是因为他汇总了19世纪以来包括地质学、地理学、气象学、海洋学和古生物学在内的所有研究进展，为20世纪的地球物理学呈现了一幅丰富又壮丽的研究图景。

### 一、是圣经中的洪水冲开了大陆吗？

早在1596年，尼德兰地理学家奥特利乌斯就在刚刚绘制出的世界地图上发现了大西洋两岸南美洲和非洲海岸线的相似性。1620年培根



魏格纳大胆假设：中生代初期，现在地球上的所有大陆和岛屿是连接在一起的一个庞大的联合古陆，周围是泛大洋，从中生代开始，这个泛大陆逐渐分离、漂移、旋转，到达了现代的位置。

也发现了这一现象，并认为这不太可能是一个偶然的巧合。到了1801年，洪堡等人进一步发现，大西洋两岸的海岸线吻合的地方其岩石种类都很相似。19世纪中期，意大利学者斯奈德·佩里格里尼根据欧洲和北美洲的煤层中植物化石的雷同，绘制出了石炭纪的古地理图，表明在煤层形成时期，欧洲和北美洲连接为统一的大陆。20世纪初期，美国的泰勒和贝克在研究世界山脉的分布时，几乎得出了大陆漂移的结论。但以上学者的发现，或停留在定性描述的阶段，或把这种现象当成是《圣经》中大洪水冲开了两边陆地的证据，地球海陆的演化并没有被当成一个独立的问题来进行研究。

### 二、神秘的气候带变化

魏格纳开始其关于海陆起源的研究其实出于偶然。25岁时，他获得了柏林洪堡大学天文学博士学位，并以气象学作为自己的研究方向，27岁时他被马堡大学授予了气象学教职，成为了一名深受学生欢迎的年轻教师，他编写的《大气热力学》教科书是当时德国大学通用的气象学教材。出于偶然，魏格纳读到了一篇奥地利学者E.休斯写于1885年的文章，其中提到了被大西洋和印度洋分割的几个大陆，存在一些相同的动植物化石和相似的地层沉积序列。作为一位气象学学者，魏格纳敏锐地发现这篇文章中列举的一些反映古气候信息的沉积物的分布位置与现代全球气候带分布模式不符（图1）。海洋和陆地曾

发生过怎样的变化？大陆曾经是以怎样的方式联系在一起的呢？这个问题从此萦绕在他的脑海中，他开始了阅读、探险之路。

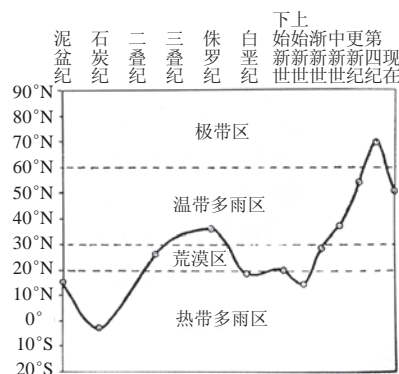


图1 地球历史上中欧的纬度变化

### 三、追溯星球的历史

地球物理学是一个非常古老的知识领域，然而20世纪之前，学者们依然无法完全抛弃来自古代的神话和猜想，困惑于局地的经验和定性的观察，无论是海洋、陆地还是大气，几乎都没有系统的科学理论能够对基本现象进行解释。随着资本主义的全球生产与两次科技革命，人们对这个赖以生存的星球有了前所未有的了解，对地球的认识在19世纪中发生了巨变，地球不再是宇宙的中心、由上帝创造的生而完美的家园，而是一个经过几十亿年的蛮荒演变形成的普通行星，地球的一切——陆地、海洋、大气以及生灵万物——都是在上亿年的时间尺度上演化而来的。

### 四、寻找大陆漂移的证据

基于以上认识，魏格纳大胆假

(下转66页)

## 数值预报：气象事业的主战场

——第33届中国气象学会年会“数值模式产品应用与评估”分会场评介

■ 黄哲 贾朋群

2016年11月2—4日，第33届中国气象学会年会在陕西西安举办。本届年会主题是“加强学科融合，助力气象事业发展”，年会共设立22个分会会场和3个专题学术活动，15个学科委员会根据学科特点分别组织了交叉学科交流，与会代表在会议主会场和分会会场，完成了近2000场次的口头报告或墙报交流，高密度的气象科技交流活动在今年秋末，再一次在中原古城被诠释。

在大会报告结束后，数值模式产品应用与评估分会场（S8分会会场）率先于11月2日下午和3日上午进行了两个场次的学术交流。来自国家气象中心、中国气象局数值预报中心、中国人民解放军空军气象中心、中国科学院大气物理研究所、中国科学技术大学等多家单位的科研人员参加了分会场的交流活动。

从学科发展史来看，数值天气预报（NWP）是气象科学较新的领域。从20世纪50年代科研人员利用计算机进行NWP研究取得成功，随后陆续在各国气象预报中心投入业务化运行，至今还不到一个甲子。然而，目前NWP对于整个气象科学和气象预报业务的发展已经起到举足轻重的作用。一方面，NWP已经成为连接动力气象乃至地球系统等基础研究的前沿领域；另一方面，NWP作为提高气象业务预报能力的主要工具，成为决定气象服务能力和服务水平高低的关键要素。因此，NWP日渐成为各国气象事业发展的主战场，并受到广泛关注。本届气象年会，S8分会会场共收录论文98篇，其中29篇做口头报告，另外多篇文章以墙报方式交流，其内容涉及全球中期模式、区域中尺度模式、集合预报系统的预报性能及



一方面，NWP已经成为连接动力气象乃至地球系统等基础研究的前沿领域；另一方面，NWP作为提高气象业务预报能力的主要工具，成为决定气象服务能力和服务水平高低的关键要素。

产品应用评估等目前NWP领域最前沿的科学问题。可以说，S8分会会场的交流活动基本显示了我国当前NWP研究，特别是业务预报应用方面的发展情况。

从交流内容上看，与会学者大多围绕我国自主研发，并于2004年投入业务化运行的全球/区域同化预报系统（GRAPES）展开。学者们或者讨论其存在的问题和改进方法，或者提出应用该系统进行特别预报时遇到的具体问题和解决方案。如来自中科院大气物理研究所的学者就GRAPES全球模式对台风登陆前72h的路径预报能力和提升问题做特邀报告，报告指出，预报误差主要来源于GRAPES全球模式的模式误差，而初始误差也有一定的贡献，其中模式误差主要来源于具有周期性的模式倾向误差（图1），而初始误差则主要来

源于初始台风的强度误差。此外，“地基GPS/PWV资料在GRAPES区域模式中的应用”、“循环分析方法在GRAPES-TYM中的初步应用”、“人工订正位涡改进模式预报技术”、“广东风廓线雷达资料对华南区域模式预报的影响”等报告，也引发了参会人员的热烈讨论。

从选题来源上看，虽然与会学者的着眼点主要在于国内NWP，但同时也表现出较好的国际视野：无论是模式性能还是NWP产品，很多研究都与国际领先的预报中心，特别是欧洲中期数值预报中心（ECMWF）的模式、方法和数据进行对比，为NWP理论研究和国内业务改进提供了有意义的参考。此外，来自中国气象局气象干部培训学院的教师还以欧洲31国气象合作组织（EUMETNET）开发的培训项

周期性的模式误差对预报误差的影响有多大？

订正模式误差，校正预报结果：

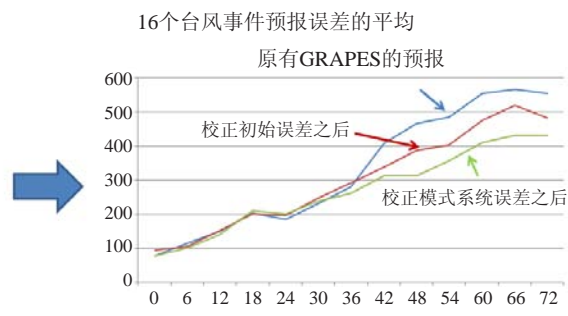


图1 周期性模式倾向误差是GRAPES全球模式台风预报模式误差的主要来源，校正模式误差比校正初始误差对台风36h及其以后的预报技巧的改善作用更为明显（来源：中国科学院大气物理研究所 周非凡 提供）

目EUMETCAL为例，向与会人员介绍了欧美NWP应用培训进展情况和国内气象部门NWP教育培训情况（图2）。正如主持人——中国气象



图2 Eumetcal第十届国际交流工作坊海报：预报员在数值预报时代的危机和挑战——天气预报技术进步、预报员角色转变、社会及相关行业需求的变化、气象及水文模式变革、未来业务人员的胜任力和岗位技能等（来源：中国气象局气象干部培训学院 叶梦姝 提供）

学会数值预报委员会主任委员、中国气象局数值预报中心副主任沈学顺——所说，NWP教育培训并非是有可无而是非常重要的，NWP及其产品的相关教育培训在各国都受到普遍重视。在有效应用数值预报时代新挑战方面，教育培训将发挥更为重要的作用。

从选题上看，S8分会场报告大多针对某个具体问题展开，而这些问题大多来自业务预报实践。如果把NWP作为现代气象科学的一种研究和预报业务范式，随着信息技术和人类社会的发展，它必将面临更深层次的挑战。因此，除了预报业务的具体技术问题之外，对NWP学科原理性的思考、预报服务方式的变革等基本问题的深入讨论，对于NWP作为一个独立学科长远发展是至关重要的。

从参加学术交流活动的年轻学者年龄上看，30~40岁的年轻学者是主力军。在交流讨论环节，不少专家学者对年轻的报告人是否进行了更

多试验或深入研究大多很感兴趣，如提问中很多问题围绕作者是否采用了更完整的数据库进行平行试验或验证从而克服一些局限，是否采用其他模拟系统进行类似的试验等展开。然而，遗憾的是从报告人与其他学者的现场互动情况看，回答大多是有想法但还没有类似工作开展。这表明，目前国内NWP年轻学者虽然创新能力较强，但在结合自身研究，把握国内和世界同领域的发展态势、借助先进研究成果阐述自己研究的意义和作用的能力方面，尚有提升的空间。相信通过本次分会场的学术活动，会增强这批年轻NWP学者了解前沿，全面把握所做研究的能力，以及他们的学术交流能力，为NWP学科和业务发展发挥更大的作用。总体看来，为期两天的S8分会场学术交流成果颇丰，这样的交流为参会人员后续开展更深入的NWP研究和业务工作起到了极大的推进作用。

（作者机构：中国气象局气象干部培训学院）

（上接64页）

设：中生代初期，现在地球上的所有大陆和岛屿是连接在一起的一个庞大的联合古陆，周围是泛大洋，从中生代开始，这个泛大陆逐渐分离、漂移、旋转，到达了现代的位置，这就是《海陆的起源》一书的核心思想。为了证实这一假设，魏格纳首次从“地球物理学”的视角出发，综合了地质学、气候学、航海学和古生物学等各学科的研究成果。他从H.波托尼关于煤形成于热带沼泽的理论出发，从煤的分布推断出了赤道多雨带的移位，从岩盐和石膏的沉积层可以反映出干燥地带的移位，又从柯本关于气候与植被分布的研究中推断了沉积层中的古气候，提供了多个角度的证明。正如他的密友、天文学家冯特所说，魏格纳并不是天赋异禀的神童，对于数学、物理学等的研究并没有什么过人的天赋，但是他善于

充分利用已有的知识，把每一件事情正确地组合起来，依照严谨的逻辑判断能力，得到最终的结论。

### 五、魏格纳的遗憾与遗产

“大陆漂移理论”远非完美无缺。例如魏格纳认为，大陆是由较轻的刚性硅铝质组成，它漂浮在较重的黏性硅镁层上，并认为是地球旋转的离心力使得大陆发生离极漂移。现在看来，这位大气热动力学教师的“大陆动力学”学说是错误的，这也是大陆漂移理论遭到了固定论者强烈反对的原因之一。20世纪60年代后，由于海洋科学和地球物理学的进展，大陆漂移理论才得以在新的动力学框架下复活。

18—19世纪，地球物理学只是物理学中一个不起眼的领域，20世纪初，这个古老的领域突然大放异彩：1914年古登堡发现了地幔与地核的分界面，1915年魏格纳提出

大陆漂移理论，1919年挪威气象学家J.皮叶克尼斯提出了锋面气旋理论，从不同的视角开创了20世纪地球物理学的新时代。随后，固体地球物理学、地球动力学、地震学、大地测量学、地热学、地磁学、水文学、海洋学、大气科学、地核构造学和勘探学等各个领域逐渐独立出来，自成体系，成果斐然。21世纪，随着科学研究的不断深入，地球物理学各领域的专家又重新意识到了陆地、海洋和大气是一个有机的整体：热带海洋是大气中重要的水汽和能量来源，地形地貌及植被的分布和气候有着极大的关联，广袤的海底深藏着众多地质学上的重大发现。此时重温魏格纳100年前的视野和角度，使我们有理由期待，未来地球物理学大家庭更多的合作，必将迎来更惊喜的科学发现。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

## “互联网+”为气象服务提供新天地

——2016年气象学会年会“互联网+与气象服务”论坛评介

■ 王淦秋 贾朋群

2016年气象学会年会S13分会场以“互联网+与气象服务”为主题，将气象服务这一气象行业的主旨和根本，与当前最热的“互联网+”捆绑在了一起。与本次年会其他分会场不同的是，论坛的4位特约报告人均来自气象部门外，足见论坛策划人的良苦用心，希望让圈子内的气象人尽快“洗脑”以适应新的服务环境，用最新潮的理念、最先进的手段，做最好的气象服务。报告人分别就媒体融合和大数据发展的前沿，娓娓道来。

来自中国传媒大学的教授带来了媒体人的全新视角，为我们打开了一扇了解媒体的窗户。他指出在媒体融合的时代，众媒体已经开始寻求转型升级，通过发展融合新闻和数据新闻，改进传统媒体的传播技巧，借力社交媒体来放大传统媒体的影响力。“融合新闻”和“数据新闻”等对气象行业来说十分新鲜的词汇和概念，引起了参会者们浓厚的兴趣。报告者也进一步解释道，数据新闻是传统媒体在大数据和全媒体时代的发展契机，它是将多种媒介新闻传播活动整合在一起，采用多媒体多渠道的方式进行传播，这无疑会有更好的传播效果。报告人提到，目前移动端用户大幅增长，多数官媒已完成了两微一端（微博、微信、客户端）的布局，媒体移动端的“江湖”之争已经开始。气象媒体能否赶上这波东风，在“江湖”中崭露头角，为气象服务信息传播开启新时代的大门，十分令我们期待。

而来自阿里巴巴的报告人，则向我们展示了业界人士对“互联网+气象”的理解——引入互联网更



当气象信息成为市场上不可或缺的信息要素的时候，气象人和气象部门提高主预报渠道的能力，以及寻找更多服务领域从而放大气象信息的价值，是我们最该关注的着力点。

精确的数据、技术和思维，融合补充气象行业传统数据、增强气象大数据处理能力、建设气象众创自生长生态系统。她还特意在报告中介绍了气象要素的重要性和如何利用气象信息价值的思路，从业界角度诠释“互联网+气象”将会带来什么。在阿里巴巴人看来，“互联网+气象”理念的灵魂，不过是气象数据、技术（数据处理）+思维，因此建设气象众创的自生长生态系统或许是关键，同时“云计算”提供了服务支撑，数据成为这一生态环境下的生产要素。为了讲透这个对于参会者并不是很好消化的概念，报告人用“降温”与“火锅节”、“饿了么”遇见恶劣天气的外卖对策和“滴滴”调整恶劣天气区域业务等事例，做了“指点江山”式的进一步解释，让人豁然开朗的同时，也进一步证明了大众的吃穿住行都和气象“扯”上了关系。

当在场听众为气象的作用激动不已时，报告人话锋一转，以气

象精细化预报服务能力提升和为数据付费为铺垫，提出了“数据黑匣子”的理念。气象数据虽然珍贵，但其价值的最大化，还是需要在大数据意义下与更多行业数据结合在一起才能做到。因此当不同来源的基础数据涉及保密等问题时，容易让多平台数据的融合发生障碍。解决办法之一就是使用“黑匣子”创造一个更加友好的数据生态（图1）。在“黑匣子”里，通过多方授权提供数据产品支撑某种综合服务，用户只用产品而“无视”产品背后的数据源细节。这种各方数据的社会和经济效益最大化的解决方案，或许是我们现在和未来关注的方向。

中国天气网当家人的报告则让我们看到了“互联网+气象”的实践与探索，而天气网浏览量的风云变化（图2），更是展示了一幅气象与网络服务端的对话历程。报告人同样提到了移动渠道的崛起对传统网站的影响。但通过重新定义品牌属性，中国天气网从提升预报服务能

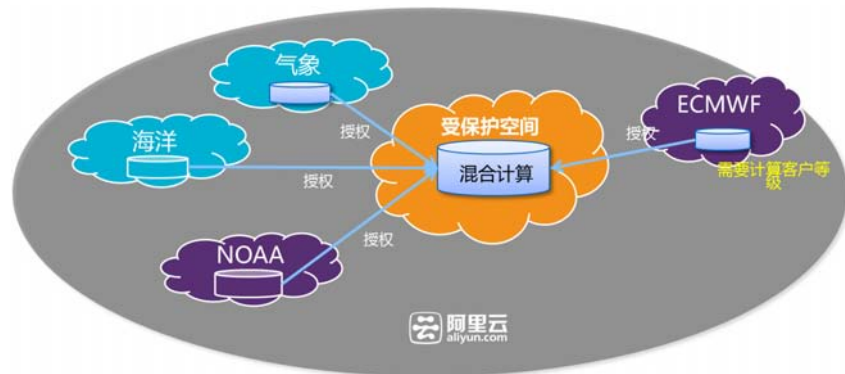


图1 “黑匣子”模式下提供气象服务

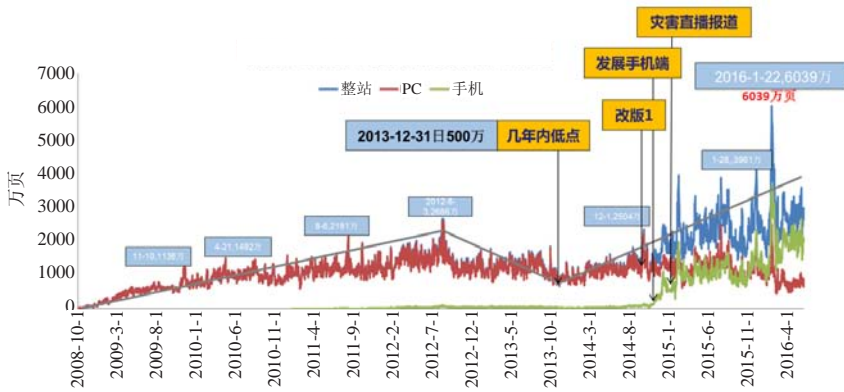


图2 中国天气网站建设以来浏览量变化

力、确立媒体行业权威地位、改善用户体验三方面突围，品牌化发展成效显著。目前互联网发展已经进入全新时代，大数据已经是现在和未来发展趋势，未来的增长点或许会聚焦于资源整合方式及能力，而风险则更多的来自于行业外。笔者认为，这对气象媒体来说既是机遇也是挑战，机遇来自于能否抓住资源整合的机会站稳脚跟，挑战则来自于自身能力是否可以经得起市场的考验。

论坛上参会者讨论热烈，一些“热词”在发言中被一一描述。例如，“智慧气象”中的“智慧”，被从事大数据研究的发言人解读为“用平台产品”提供服务，将与气象服务相关的复杂处理留给后台专家和业务系统，这样服务对象面对

“前台”就只需要几次“点击”。还有“智慧气象”中的另一隐含关键词“融合”，在“智慧咸阳”中通过技术融合、业务融合和数据融合实现“各种+气象”（图3）的“智慧气象”，从而达到提供智慧化服务的目的。

本次论坛上还有多篇报告围绕交通气象展开。面对交通这样的气象服务行业大户，来自省级气象部门报告者的思考主要聚焦于面对交通用户的气象服务如何利用最有效的媒体发布方式，以及一些气象服务产品的两难：一方面缺乏专门化的产品，另一方面一些产品还没有应用于交通服务。报告人期待借助论坛平台的交流，获得启发和帮助。

实际上，笔者认为包括交通气象服务在内的气象服务，还是需

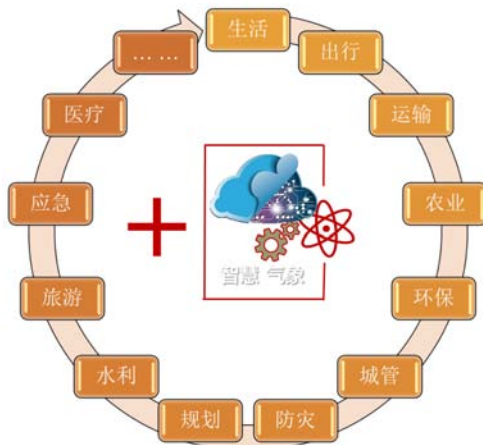


图3 “各种+气象”是开拓气象智慧服务的新说法

要开发者更多的智慧和开放思维参与其中。例如，面对气象部门常规预报产品与司机真实感受之间的差异，美国气象服务公司借助交通大数据中汽车雨刷器的频率，重新定义对道路交通影响的雨强，并借此发布预报服务；而欧美等国在很多气象服务中则完整利用了气象预报信息，特别是利用集合预报中的预报不确定性指标，为用户提供预报结果的风险信息，从而让决策更加客观、有效。

此外，和本次论坛特约报告人均来自气象部门外形成对照的是，论坛提交论文和注册者中（按照本次年会的官方报名统计），除1位报名者来自民航部门外，其余均来自气象部门。这样的论坛参与者结构，与目前及未来更多更大企业参与气象服务的趋势不符。论坛中报告人的一些担忧，例如气象部门服务产品的点击率往往落后于企业，似乎也需要换一个视角来看待。气象部门新媒体的制作宣传固然很重要，但或许未来向更多企业提供气象基础信息，支持企业发挥其个性和优势提供气象相关的综合服务更为关键。或许美国目前气象信息出口的正反“二八”甚至“一九”率分布的事实能带来一些启发：即日常气象信息来自国家气象部门仅占两成甚至一成，商业气象提供另外的八成至九成；但是当出现飓风和龙卷等激烈天气时，国家气象部门出口信息则反过来占八成或九成。这样的分布，一方面诠释了国家气象部门在核心气象服务方面具有不可替代的地位；另一方面，当气象信息成为市场上不可或缺的信息要素的时候，气象人和气象部门提高主预报渠道的能力，以及寻找更多服务领域从而放大气象信息的价值，才是我们最该关注的着力点。

（作者单位：王淞秋：中国气象局发展研究中心；  
贾朋群：中国气象局气象干部培训学院）

# 民国时期岭南大学的气象观测

■ 冯颖竹 何溪澄

现在的中山大学是在1952年院系调整中，由原中山大学与原岭南大学的文理科合并而成，现中山大学主校区为原岭南大学旧址康乐园。

岭南大学前身为格致书院，1888年由美国基督教会创办，校址位于广州市六二三路。

1903年学校在海珠区康乐村购得土地，建立岭南学堂。1912年民国成立后改名为岭南学校；1918年改名为岭南大学；1927年学校收归中国人自办，更名为私立岭南大学。抗日战争期间学校迁到香港、韶关等地，抗战胜利后复迁广州。

许多回顾岭南大学历史的专著和论文都提及康乐园内曾长期开展过气象观测。然而，这些文献对气象观测的时间、地点和内容都缺少较详细的记载，当时的气象观测场地如今也都改变了用途。本文试图通过对一些文献和老照片（拍摄于1912—1938年）的综合分析，还原民国时期岭南大学的气象观测活动。

## 一、气象观测站创建时间与名称

关于岭南大学内的气象观测站建设的时间，徐天舒对广东省档案馆和中山大学校史资料室保存的历史资料的研究显示，岭南大学在1917年获得美国John R. Freeman先生赠送的气象仪器。吴增祥在《中国近代气象台》一书指出“1918年，岭南大学成立农学院，学院附设气象观测所”。美国气象学术期刊*Monthly Weather Review*上也有一篇文章指出“广州岭南大学校园内的气象观测站建于1918年”。上述文献表明，由于学校农业研究试验迫切需要气象资料，岭南大学于1918年在校园内建立了气象观测站。

关于观测站的名称，吴增祥指出，为纪念Freeman先生捐助气象设备，气象站命名为Freeman Meteorological Observatory。但中文名称则不统一，在不同的文献中有不同的称法：《南大工程》1933年发表的论文中称为“非文氏气象观测台”，岭南大学同学会编写的《钟荣光先生传》一书中称为“菲文气象台”，吴增祥先生书中称为“裴文气象台”，维基百科介绍岭南大学的条文中称为“斐文气候观察所”。本文为统一起见，参考现在的气象台站命名方法，将其称为“菲文气象观测站”。

## 二、气象观测的内容与频次

气象观测场（图1、图2）位于岭南大学校园中轴线的东侧，距离珠江不远，当时周边还有不少农田。一个边



气象观测场位于岭南大学校园中轴线的东侧。一个边长9m的方形草棚内设有气温自记仪、气压自记仪、湿度自记仪和土壤温度自记仪等设备。

长9m的方形草棚内设有气温自记仪、气压自记仪、湿度自记仪和土壤温度自记仪等设备，可24小时不间断记录温度、气压、湿度的变化，草棚内还有气温表、最高最低温度表和湿度表，用于每天定时的温度和湿度观测。草棚的功能类似于现在的百叶箱，既能防止太阳光直射和雨水侵袭，又能保持设备处于通风的环境。草棚的南侧还有一块用细竹竿围成的小观测区，区内设有蒸发皿、雨量计和地温表，地温表放置竹筒中插入60cm深处。



图1 岭南大学校园，右上角的草棚是气象观测场



图2 菲文气象观测场

风和日照的测量设备不在观测场内，鉴于两者对观测环境要求高，设备周边不能有障碍物，在当时条件下将其安装在马丁堂（现中山大学人类学系大楼）楼顶。

马丁堂（图3）竣工于1906年，是校园内最早的建筑，也是中国最早的砖石钢筋混凝土混合结构建筑，初时称作东院，后为了纪念为建校捐款最多的美国辛辛那提实业家亨利·马丁（Henry Martin）先生，改名为马丁

堂。从图3中可以看出，马丁堂是具有英式风格的三层建筑，早期屋顶有6个3m高的通气烟囱伸出，中间靠右的一个烟囱上竖起一根铁杆，铁杆的上部伸出横臂，安装了三杯风速仪，铁杆的顶端是一个风袋。楼顶还安放了日照仪，具体位置在图中看不出来。风向按照8个方位进行人工观测，风速仪和日照仪转接到马丁堂内的物理实验室，在室内获取器测数据。物理实验室内还安放了气压表，可直接读取气压值。在马丁堂楼顶最外侧的2个通气烟囱上各竖立了一根避雷针，高度高于风杆，既保护了大楼，也保护了楼顶的气象观测设备。



图3 校园内的马丁堂，测风设备安放在楼顶

马丁堂屋顶6个通气烟囱在1965年马丁楼翻修时被拆除，测风设备也不见了，但楼顶的两根避雷针现在依然保留着。

气象观测当时每天都进行，节假日也不中断。观测的频次是气压、气温、地温、雨量、风向和天气现象每日三次，分别在07时、13时和18时；最高最低温度和蒸发则是每日18时记录一次。观测记录每月整理后公开印发。

菲文气象观测站的观测资料主要用于当时的农业科研和工程设计。受当时条件的限制，岭南大学没有开展过天气预报，广州市天气预报业务始于1935年成立的广州市气象台。

### 三、岭南大学的水文观测与测时报时

岭南大学除了拥有菲文气象观测站的气象仪器以外，还有其他与之相关的水文观测和测时报时设备。当时岭南大学北临珠江，北校门外数十米处就是康乐码头（1952年改名为中大码头），码头的栈桥上竖立着一块简易的木牌，上书“私立岭南大学”6个隶体字。码头的一侧建有自动验潮站，用来测量潮水的涨退（图4的最右端）。据文献记载，该验潮站由当时的广东河工管理局安装，最大可测水位高度是5m，观测到的数据不仅用于校园内的建筑物设计和防御水灾，也用于广州市的水利工程建设和城市规划。20世纪70年代，水文部门在中大北校门外重建了中大水文站（图5），作为珠江广州段前航道水

位的指标站，由广东省水文局广州水文分局管理。



图4 20世纪30年代康乐码头旁的验潮站



图5 现在中大码头旁的水文站

此外，校园格兰堂（Grand Hall）的门前，曾经建有一个小日晷，可利用立竿在太阳照射下影子的方位测得时间（图6）。格兰堂于1915年动工，1916年6月落成，当时是大学的行政办公大楼，由于楼顶设有报时大钟，故也称该楼为大钟楼。格兰堂原为三层，20世纪60年代加建了一层，并拆除了正门的两个小立亭。在日晷基座的正面有一个图标，图标下刻有“1914”字样，表明日晷可能建于1914年。这个小日晷是岭南大学附属中学一个毕业班的学生送给岭南大学的礼物。小日晷安放在行政楼正门前醒目的位置，与楼顶的大钟遥相呼应。



图6 校园内的格兰堂及门前的小日晷  
(a) 格兰堂全景；(b) 局部放大的小日晷

(下转74页)

# 近代湖北海关气象观测档案初探 ——以江汉关、宜昌关、沙市关为例

■ 宋建萍 何晓 苏秀梅 刘立成

我国自古以来就设置有海关这一机构，只是不同时期的名称和职能不尽相同<sup>①</sup>。对于海关的起源时间，有各种不同的观点，如殷商说、西周说、春秋说、战国说、西汉说、唐朝说、清朝说等，至今尚无统一的定论。中国的海关按照不同的划分方法有不同的形式，按照社会形态划分可分为原始社会海关、封建社会海关、半封建半殖民社会海关和社会主义海关；而按时间划分则可分为古代海关、近代海关和现代海关三种。

中国海关形式从古代海关向近代海关的转变是从鸦片战争后开始的，外国列强逐渐掌握了中国的海关行政权和关税自主权。英国人罗伯特·赫德（Robert Hart）曾担任中国海关总税务司达半个世纪（1861—1911年），在这期间，他不仅包揽了海务、邮政、航道、港务和检疫等事务，还组织中国海关参加外国博览会和办理商标注册，并且不断扩大海关权力。在赫德担任海关总税务司期间还创建了较为完善的海关气象观测系统。

自古以来我国史书中就有对气候的相关记载，而今人对古代气候资料也有所研究。例如竺可桢先生在研究气候时，根据其性质的不同，将中国的气候变迁史划分为考古时期、物候时期、方志时期以及仪器观测时期四个时期。对于仪器观测气象记载，海关的气象观测是不可忽视的重要环节。究其原因，作为中国近代最早建立的气象观测站体系，海关气象观测站的特点是观测站点多、年代长，在气象观测中数据来源可靠、持续时间长且可进行量化分析。但目前专门对海关气象观测进行研究的成果较少，仅有竺可桢、程纯枢、王鹏飞和吴增祥等学者在其研究中有所涉及，海关气象观测未获得学界应有的重视。

## 一、近代湖北主要海关的历史

清初，东南沿海实行严厉的闭关锁国政策。1864年，开放江南云台山、宁波、厦门和黄埔四口岸，在限制贸易规模、品种的前提下，允许私人海外贸易。同



作为中国近代最早建立的气象观测站体系，海关气象观测站的特点是观测站点多、年代长，在气象观测中数据来源可靠、持续时间长且可进行量化分析。

年，增设了闽海关。1865年，分别在广州、宁波和云台山三地设立了粤海关、浙海关和江海关。至此，“海关”这一名称才正式在史料记载中出现，此时，中国沿海口岸贸易管理机构的历史也正式进入了以“海关”命名的时代。之后，因发生了“洪仁辉事件”<sup>②</sup>，清政府为避免事端扩大决定关闭浙、闽、江三海关，只保留广州一处对外贸易口岸。相比较而言，湖北海关的设置要稍晚一些，鸦片战争之后才出现，实际上是与长江以及江上商贸活动联系在一起。

湖北因地处长江中下游，具有水上交通优势，交通贸易较繁盛；这里设有江汉关、宜昌关、沙市关等。随着海关气象观测站的设立，测得并记录下来的气象情报资料对近代中国天气预报的发展以及对航运气象服务的运作提供了借鉴和指导，如长江汛期和干旱带来水位下降等对商贸活动造成的影响。这些保存下来的相对完整的海关气象观测记录档案为人们了解和研究近代中国气象的情况和气候的变化趋势提供了史料支撑。

### 1 江汉关

1861年，清政府在英国政府的施压下，根据签订的中英《天津条约》第10款，将九江、汉口和镇江辟为对外贸易口岸，并分设海关。1862年1月1日，清政府总理衙门批准在汉口设立江汉关（图1），即湖北省内第一个成立的海关，距今已有154年的历史。

江汉关署直到1863年才设立，因建立在湖北省夏口县汉口河街（今湖北省武汉市汉口），故以“新关”得名，又因其位于长江北岸，因此又被称为“北关”、“新北关”或“江汉北关”。江汉关署的主要职责除了管理进出口运输事宜，包括运输工具、货物、旅客行李

① 如西周设关管理入籍事物，秦置“关都尉”主管关务，汉在边关设“关市”，隋设“缘边交市监”与西域各国交通外贸，唐设“互市监”和“市舶使”，两宋有“榷场”管理和“市舶司”制度，元设“大都宣课提举司”，明实施进出口许可“勘合制度”，清设户部直属机构海关。

② 乾隆二十二年（1757年），清政府明令宣布撤销宁波、漳州和云台山三海关的贸易，夷船“只许在广东收油贸易”。洪仁辉（J·Flint）是东印度公司第一个充当汉文翻译的英国人，他受东印度公司派遣曾先后于1755、1756和1759年三次率船到浙江贸易，最后一次竟直抵天津呈递“御状”。所谓的洪仁辉事件也就是指这三次英船赴浙贸易与北上告御状的事件。



图1 江汉关旧址

物品以及征收关税外，还具有管理邮政、气象、航道、港口事务和检疫等海关业务的职能。1876年9月，中英《烟台条约》签订，条约规定安庆、武穴、沙市等6处准许外国轮船停泊，上下客货。江汉关具有管理这6处港口的稽查事务的职能。值得注意的是，航运的繁忙带来了贸易的兴盛。江汉关的关册有记载：1862年全年各国轮船到汉总数达1462艘，此关的货物吞吐量有29万余吨，到了1892年，到汉轮船数已达万艘以上。江汉关气象观测点位置变迁如表1。

表1 江汉关观测点位置 (114°17'E, 30°35'N) 变迁表

时间	观测场海拔高度 (m)	地址
1869年11月—1895年12月	—	—
1896年1月—1923年1月	36	汉口沿江大道民生路口江汉关旧址
1923年1月—1924年7月	36	汉口沿江大道一码头（今长江航务管理局大楼）
1924年8月—1938年	36	汉口沿江大道武汉关
1938年—1941年11月	—	汉口青岛路口原汇丰银行大楼
1946年4月—1951年8月	36	汉口沿江大道武汉关

## 2 宜昌关

宜昌地处鄂渝湘三省交界处，上控巴蜀、下引荆襄，有“三峡门户”、“川鄂咽喉”之称。光绪二年（1876年），中英《烟台条约》签订，根据“通商事务”第一条规定，宜昌等四地开辟为通商口岸。第二年，即1876年，湖北巡抚翁同龢派荆宜施道孙家谷，会同英国领事馆京华陀办理宜昌开埠事宜。宜昌关署自1876年4月1日成立，之后，便开始办理关口的进出口贸易业务。宜昌关（图2）是中国内地距海最远的海关，作为近代湖北第二个对外开放的商埠，其同时也是西方势力侵入中国内地的重要通道。

① 清末民初，称原有税关为旧关或常关，称海关为新关或洋关。

② 后移泽口，也称驛关。

1995年，宜昌市档案局组织编撰了《宜昌海关史略》，在《宜昌海关简志（1877—1949）》等宜昌海关档案编研资料的基础上，进一步介绍了“宜昌关”从建关至闭关期间的历史，有利于对当时宜昌海关的税种、税率、进出口贸易等情况的了解和研究。宜昌关气象观测点位置如表2。



图2 宜昌关旧址

表2 宜昌关气象观测点位置 (116°16'E, 30°42'N) 变迁表

时间	观测场海拔高度 (m)	地址
1882年7月—1897年	—	—
1898年—1914年	58	—
1914年—1933年3月	—	—
1933年3月—1938年4月	51.8	宜昌市沿江大道海关旧址（今市政府所在地）

## 3 沙市关

据中英《烟台条约》的规定，沙市在光绪二年（1876年）被迫辟为通商口岸，从此大量的外国船舶在此停泊。光绪二十一年（1895年），由于清政府在甲午战争中的失败，被迫与日本签订了不平等的《马关条约》，条约规定增开沙市、苏州府、重庆府、杭州府作为新通商口岸。光绪二十二年（1896年）1月1日沙市正式对外开埠通商，同年10月1日，沙市海关（图3）正式开关并开始征收关税，由宜昌关兼管。为支付第二次鸦片战争失败后的巨额赔款，清政府多次大借外债并以各地海关税、常关<sup>①</sup>税和盐税为担保。从光绪二十八年（1902年）起，沙市海关相继接管了沙市周边50里（25km）范围内的常关。而到1928年后，沙市海关又接管了柳关、南平、关藕池和调关等关口<sup>②</sup>，成为长江中上游仅次于重庆的大海关。



图3 沙市关旧址

## 二、近代湖北海关气象观测的渊源

关于海关的职能，从经济学角度上来看，一般可分为贸易政策职能（如关税保护、海关贸易保障等），贸易管理职能（海关监管、海关缉私等）和财政职能（征税、退税、补贴等）三个方面，其中的财政职能和贸易管理职能是最基本、最核心的海关职能。而在赫德担任海关总税务司期间创建的较为完善的海关气象观测系统，实质上也是围绕这两大基本职能展开服务。

气候环境不是一成不变的，气候环境是在不断变化发展的。气候的变化不仅对政治、经济、文化发展产生加速或者减缓的影响，还可以和政治、经济、文化等条件一起制约社会的发展。海上气象观测和船舶航行安全息息相关。为了确保航船航行安全和贸易畅通，海关部门需及时掌握气象观测资料。随着帝国主义侵华势力进一步扩张，海关的气象监测数据主要为列强航海、军事等需求服务。据记载，为方便外国商船、舰队的安全出行，上海“海关总署”要求各个相关海关严格观测并记录气象情况，还要及时上报监测数据；避免突发性、灾害性天气对外国商船、舰队的损害，这些气象观测资料还要向海军司令部和外国各大公司报送。湖北的海关气象事业正是在这一时期萌芽并发展起来的。

同治八年十月（1869年11月），时任清政府海关总税务司的赫德从外国商船航运安全需要出发，颁发了总税务司通札第28号（The No.28 Circular Issued），详述了气象观测的重要性，决定在海关设置气象站。通札指出：海关主要设置在沿江和沿海地区，其特点是分布面积大、辐射范围广，不仅监管海上气象及相关事务，而且还涉及附近陆地气象及事务的管理。在如此广阔的地域开展气象观测，使得气象观测的结果更具普遍性，使用性更加广泛而且较为科学可靠。通札中还强调建立一个观象台，这样便可以将各处的气象观测站相互联系起来，处于同一机制的管理之下。

通札的颁布，促使各地海关开始陆续设立测候所，并开展小规模的气象观测，其观测的内容包括气压、气温、湿度和降水等。自此，海关气象观测工作逐渐起步

并被列为海关五项基本业务之一。随着对气象观测情报需求的不断增强，海关当局相继在沿海沿江重要通商口岸、边关商埠、岛屿等地建立气象观测站达七十多处，其中有记载连续观测30年以上的达46处，汉口与宜昌海关气象观测站均在此之列。

江汉关是我国最早进行气象观测的海关之一，1869年11月1日开始小规模气象观测，并对观测结果进行记录<sup>①</sup>。但最早期的观测记录由于战乱等原因不幸遗失，现存最早、保存最完整的观测报告始于1880年3月。1881年5月，英、美等国在汉口海关筹备建成了汉口测候所，同年11月开始气象观测。汉口海关气象观测所利用外国进口测量仪器在原有气压、气温、降水和湿度等观测项目的基础上，新增了对24小时风向、风力，阴蔽处日最高、最低气温，纪要（天气现象）以及长江中午水位及24小时水位涨落的观测项目。这是湖北省境内最早使用气象仪器进行的观天测候，也是武汉近现代气象观测史的开端。不过，当时海关测候所还不具备预报天气的能力。

清光绪三十一年（1905年），日本在日俄战争中获胜，将俄国在中国的部分统治权掌握到自己手中，其侵华势力深入中国内陆。同年，日本在汉口海军俱乐部里建起气象测候所。1907年，日本海军气象测候所开始对观测范围内气温、降雨量等进行完整记录，并留存下完整的观测记录资料。1937年，抗日战争爆发，海关气象测候所因战乱遭受破坏，1937—1941年的海关气象记录出现了空缺。2007年，在武汉市气象局等部门发起的“寻找行动”中，在日本气象厅档案馆找回了武汉1939年1月—1941年5月、1941年7月—1943年11月的气象观测记录。宜昌海关现存气象观测的记录最早开始于1882年7月。而这一时期，汉口关和宜昌关的气象观测人员均是由英、法、美、俄、日、德、意等外国人担任，直到1913年以后，才逐渐吸收中国人参加。

## 三、近代湖北海关气象观测的内容及报送机制

湖北省现藏的江汉关、沙市关、宜昌关的档案资料，包含各地海关的贸易税收，走私稽查，港务、航务、气象记录、报告、通商条约、关产契约等重要内容。其中丰富的气象观测记录是研究近代湖北气象观测内容及报送机制的重要资料。

1880年以前，汉口海关于每日09时和15时（北京时，下同）观测2次气象情况。观测内容主要包括长江中午的水位及其24小时涨落情况、24小时的风向及风力、气压、每日最高及最低气温、降水时的降水量和降水时数等内容。之后，观测的内容、时间与次数都曾几经变动。1886年之后，汉口关和宜昌关的气象观测的时间与次数逐渐趋于统一。1903年1月开始，气象观测定

<sup>①</sup> 江汉关外勤人员手册1869—1880。

为每日的03、06、09、12、15、18、22、24时为观测时刻，每日观测8次。气象观测的内容也基本固定下来，包括气压、干球和湿球的温度、最高和最低气温、风向及风力、天气现象和降水量、云状及云量等。但这一时期气象观测的制度仍然不够完善。1905年《气象工作须知》的颁布，才使得气象观测工作制度变得较为系统。1932年，所有测站都用同一类型的新式仪器观测，湖北海关气象观测制度才真正统一、系统起来。当时“海关总署”要求各海关观测所每月的观测记录须在下月初送达，且记录务必规范。因此，当时海关对天气现象的观测、记录相对严谨，对天气现象的记载较为详细。

1882年为配合上海徐家汇天文台着手试做简易天气预报的需要，汉口、宜昌观测站需要按时向其拍发电报，报送气象观测的内容。直至1897年，江汉关仍每日拍发两次记载有关气象观测内容的电报送达上海徐家汇天文台，而这些气象资料最后会被转送到香港天文台。1916年，建立的北平“中央观象台”也开始从事天气预报工作；此时，“海关总署”要求江汉关在拍发气象电报时，同时也要向北平“中央观象台”和“农商部”观测所各发一份。而到了1933年，“海关总署”又提出还要报送给青岛观象台、“济南建设”厅测候所、南京气象台、航空站以及上海海岸电台等处，并且准予免费传递。从气象观测内容的报送机构不断扩大可以看出此时对气象观测的重视，而且还体现了这一时期人们已经开始重视各气象观测站点之间的联系，为之后气象观测网体系的形成奠定了基础。1937年底，由于抗日战争的原因，“航空委员会（空军）”第一测候所从南京向西迁，曾在汉口王家墩机场驻足过数月之久。为此“财政部”曾电令“江汉关税务司”，让其抄收各关06、09、14、18时气象加密报告，并要求每次在1小时内收齐，这些收录的气

象资料被送至“航空委员会”第一测候所备用。

海关气象站除做好气象观测内容的记载和向上级机关呈报观测记录以及向有关方面报送气象观测之外，还在《中国海关册》中记录每年的气候情况，其记载内容涉及水旱灾害对农作物收成的影响。1922年，“扬子江水道讨论委员会”成立，此后，汉口关和宜昌关气象站每年的降水量观测资料开始经上海徐家汇天文台向水利部门报送。

海关税务司每年要向上级写出综合报告，每10年还要提供《十年报告》，其中包括气候分析。1891年春季，宜昌遭遇到罕见旱灾。时任宜昌海关税务司李若德（Edwin Ludlou）据其见闻，于1891年12月向海关总税务司赫德递交宜昌海关《十年报告》，报告中提到，“宜昌夏天的温度也很高”、“农民们担心他们的稻谷颗粒无收”、“不至于热得睡不着”。而在冬天的时候，“偶尔下雪”、“周围高山上积雪数日不化”、“但宜昌从不积雪”、“江面上经常有雾”、“风向几乎都是逆水”、“这对于当年的那些帆船而言就是天赐的幸运”。将这些报告结合观测资料进行分析，我们就能对当时、当地的气候状况有比较完整的把握。

（作者单位：宋建萍、刘立成，湖北省气象局；何晓、苏秀梅，华中师范大学历史文化学院）

#### 深入阅读

- 白雪燕. 2008. 中国海关概论. 北京: 中国海关出版社.  
陈诗启. 2002. 中国近代海关史. 北京: 人民出版社.  
程明道. 2012. 气候变化与社会发展. 北京: 社会科学文献出版社.  
熊金武. 2011. 近代中国海关制度变迁的结构和解释——基于制度职能定位与制度安排变迁的视角. 贵州社会科学, (8): 47.  
竺可桢. 1973. 中国近五千年气候变迁的初步研究. 考古学报, (1): 16.

（上接70页）

#### 四、对菲文气象观测站的评价

由于菲文气象观测站的观测种类较齐全，受到当时国内外科学界的关注。美国教授称赞“观测站的设备非常齐全，观测员们认真且称职”。岭南大学校长1919年4月向校董事会做的报告中，写到“校园里有一个装备较齐全的气象站，学生和来访者可以看得见，气象站观测环境使得观测数据可靠，这是一件有意义的工作”。对菲文气象观测站及相关仪器设备的作用，岭南大学老校友评述：“岭南大学之菲文气象台，有数十年之记录。凡雨量、气候、水文等资料，均对农业及工程建设研究有非常之帮助。”

1937年7月抗日战争全面爆发后，岭南大学停止了气象观测。虽然菲文气象观测站早已成为历史，但其观测得到的雨量、气温、水文等资料保存了下来。Monthly

Weather Review上有1919和1920年的气象资料及相关统计分析，1920—1937年的逐日基本气象观测资料刊印在当时岭南大学发行的气象报告上，另在岭南大学工学院主编的《南大工程》1933年创刊号上，刊登了1923—1932年逐月平均日蒸发量、日照时数、土壤温度等气象统计数据，这些历史数据为华南气候变化研究提供了不可多得的参考资料。

（作者单位：冯颖竹，仲恺农业工程学院；何溪澄，广州市气象局）

#### 深入阅读

- Hubbard G D. 1922. Meteorological notes on Canton, China. Mon Wea Rev, 50(4): 190-191.  
高贵梨. 1933. 广州近十年来之气象观测. 南大工程, 1(1): 26-37.  
吴增祥. 2007. 中国近代气象台站. 北京: 气象出版社.

# 高被引论文选编

## “条件非线性最优扰动”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2014—2015年

**ENSO事件的最优前兆和El Niño预测中 fastest growth initial errors 之间的相似性**——Similarities between optimal precursors for ENSO events and optimally growing initial errors in El Niño predictions. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, Vol. 115, No. 3-4.

穆穆等利用Zebiak-Cane模型，使用基于条件非线性最优扰动（CNOP）的一种方法，探讨了触发El Niño/南方涛动（ENSO）事件的最优前兆（OPR）和El Niño预测不确定性中的最快增长初始误差（OGE）之间的关系。计算的El Niño事件的OPR包括赤道中东太平洋的海表温度异常（SSTA）偶极子，加上整个赤道太平洋的温跃层深度的正异常。基于由OPR触发的El Niño事件，计算了导致最大预测误差的OGE。研究发现，OPR和OGE在中东太平洋上的SSTA偶极子模态的位置和空间结构以及赤道太平洋相对均匀的温跃层深度异常方面具有很大的相似性。相似性可能由与Bjerknes正反馈相同的机制引起。这表明，如果在有限覆盖范围内向目标观测部署附加观测仪器，则应优先部署在赤道中东太平洋，这里已被确定为ENSO预测的敏感区，能更好地探测ENSO的早期信号事件并减少初始误差，从而提高预报技能。

**改善高影响海洋—大气环境事件预报初始化的目标观测**——Target observations for improving initialization of high-impact ocean-atmospheric environmental events forecasting. *National Science Review*, 2015, Vol. 2, No. 2.

穆穆等对目标观测的近期研究进展进行了综述，强调了准确的

初始条件在预测高影响海洋大气环境事件中的重要性，如El Niño/南方涛动（ENSO）、印度洋偶极子（IOD）、热带气旋（TC）和黑潮大弯曲（KLM）。由于实地观测代价不菲，而且观测密度也不足以完全覆盖发生这些事件的广阔空间，因此有必要发展一些方法，以指导设计有效的观测策略。其中，CNOP方法已被证明在确定ENSO、IOD、TC和KLM预测的目标观测的敏感区域时非常有用。目前需要开展进一步的研究，以了解这些事件在气候变化影响下的可预测性，并探讨实施目标观测的实地计划的可能性。

**利用LPJ模型分析区域和季节性温度差异影响下的中国东部地区净初级生产力**——The analyses of the net primary production due to regional and seasonal temperature differences in eastern China using the LPJ model. *Ecological Modelling*, 2014, Vol. 289.

孙国栋等使用与参数（CNOP-P）有关的CNOP方法给出的一种温度变化情景（称为CNOP-P型温度变化情景），以及其他两种温度变化情景，结合LPJ动态全球植被模型（LPJ DGVM），估计了中国东部地区南北样带上的净初级生产力（NPP）的变化。CNOP-P型温度变化情景有两个特征。首先，它考虑了南北样带上的区域和季节温度差异。不过，由于观测的约束，该情景的温度变化特征与观测数据相似。其次，该情景考虑了温度变化对模拟NPP造成的最大可能影响，讨论了模拟NPP响应于南北样带温度变化的最大不确定性。研究表明，在CNOP-P型温度变化情景下，华北的NPP减

少了1.84%，东北和华南分别增加了4.09%和18.99%。CNOP-P型温度变化情景导致的华北、东北和华南地区的NPP变化与其他两种类型的温度变化情景不同。CNOP-P型温度变化情景对NPP的影响要强于其他两种类型的温度变化情景。季节分析表明，三种类型的温度变化情景下，NPP变化之间的差异主要源于春季、夏季和秋季。上述结果表明，区域和季节性温度变化在估算NPP的不确定性方面起着关键作用，CNOP-P方法能够提供能够反映区域和季节性温度变化的可能的温度变化情景。

**使用基于3-D海洋环流模式及其伴生模式的CNOP方法在南海进行适应性观测**——Adaptive observation in the South China Sea using CNOP approach based on a 3-D ocean circulation model and its adjoint model. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2014, Vol. 119, No. 12.

中科院南海海洋研究所的Li等研究了适应性（或目标）观测对改善中国南海（SCS）海洋中期（30d）预报技巧的影响。与南海西部边界流（SCSWBC）相关的区域被选作为适应性观测的目标。CNOP方法被应用于三维海洋模式及其伴生模式，以确定敏感区域。结果表明，CNOP方法确定的敏感区域的初始误差对目标区域海洋状态的预测有重要影响。因此，通过适应性观测减少这些初始误差，可以对目标区域的海洋状态生成更好的30d预测。本研究表明，实施适应性观测是提高SCS海洋模式预报技巧的一种有效的、节约成本的方式。

**适应性观测能改善热带气旋强度预报吗**——Can Adaptive Observations Improve Tropical Cyclone Intensity Forecasts? *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, Vol. 31, No. 2.

为了研究适应性观测是否可以改善热带气旋（TC）强度预报，中科院大气物理研究所的Qin等使用MM5中尺度模式及其3DVAR同化系

统,根据CNOP敏感性对2010年来自北太平洋西部的20个TC实例进行了观测系统模拟实验(OSSE)。新的强度指数被定义为以相应的预测TC中心位置为中心的分配的方格内的网格点数量的总和,其满足与海平面气压(SLP)、近地表水平风速以及累积对流降水相关联的约束。该指数越高,TC的强度越高。然后,估计了CNOP敏感性对强度预测的影响。OSSE结果显示,20个TC实例中有15个有改善,预测误差的减少在0.12%~8.59%,远低于轨迹预测。因此,CNOP敏感性对TC强度预测在总体上(但仅在一定程度上)具有积极影响。研究认为,诸如使用耦合模式或对TC涡旋进行更好的初始化等因素,对于精确的TC强度预测更为重要。

#### 数值模式延伸期可预报分量提取及预报技术研究——《中国科学(地球科学)》2014年第44卷第2期

王启光等针对延伸期尺度的可预报分量,借鉴了CNOP相关算法,形成了在数值模式中提取可预报分量的实用方法和预报技术。从模式预报误差增长的角度将模式变量分为可预报分量和不可预报的混沌分量,将可预报分量定义为在预报时段内误差增长较慢的分量。基于现有的国家气候中心月动力延伸预报业务模式,建立了针对可预报分量的数值模式。同时结合历史资料有用信息,对数值模式的可预报分量,在历史资料的可预报分量中寻找相似场,降低了相似判断过程中变量的维数,进一步对可预报分量的预报误差进行订正。对混沌分量利用历史资料,通过集合预报方法得出其期望值和方差。数值试验结果表明,该方法能有效提高10~30天延伸期数值模式大气环流场的预报技巧,具有良好的业务应用前景。

#### 基于CNOP方法的台风目标观测中三种敏感区确定方案的比较研究——《大气科学》2014年第38卷第2期

在目标观测中,敏感区的确定

是个关键性的问题。周非凡等详细研究了如何用条件非线性最优扰动(CNOP)方法确定敏感区。提出了三种确定敏感区的方案:水平投影方案、单点能量投影方案以及垂直积分能量方案。比较了三种方案确定的敏感区的差异,分析了它们所阐释的物理意义,讨论了它们的优缺点,并通过理想回报试验考查了不同方案确定的敏感区的有效性。对6个台风个例的应用结果显示,单点能量投影方案与垂直积分能量方案下识别的敏感区较为相似,二者与水平投影方案确定的敏感区则有较大的区别。两种能量方案确定的敏感区更多地反映了环境场对台风的影响,而水平投影方案则反映了台风自身对流不对称性结构对台风发展变化的影响。理想回报试验结果表明,由两种能量方案确定的敏感区对预报误差能量的减小程度以及路径预报的改善程度都要大于水平投影方案确定的敏感区的效果,且垂直积分能量方案确定的敏感区的有效性最高。而在强度预报方面,三种方案对预报效果的改善程度相当。因此,总的说在台风目标观测研究中,利用CNOP方法确定敏感区时,垂直积分能量方案是较佳的方案。

#### 基于奇异值分解的计算条件非线性最优扰动的集合投影算法——A SVD-based ensemble projection algorithm for calculating the conditional nonlinear optimal perturbation. *Science China (Earth Sciences)*, 2015, Vol. 58, No. 3. 中文版发表于《中国科学(地球科学)》2015年第45卷第3期

条件非线性最优扰动(CNOP)是线性奇异向量(LSV)在非线性的拓展,它代表了在一定物理约束条件下且在预报时刻导致最大预报误差的一类初始误差。CNOP类型的初始误差在天气和气候的可预报性研究中具有重要作用。在求解复杂数值模式的CNOP中,一般通过数值计算目标函数关于初始扰动的梯度,并沿着梯度下降方向在相空间搜索极值点而得到CNOP。计算梯度常用的一个

方法是利用伴随模式得到梯度,然而发展一个复杂模式的伴随模式是困难且非常繁琐的,大大限制了CNOP方法在复杂数值模式中的广泛应用。陈磊等在前人工作的基础上,提出了一种基于奇异值分解(SVD)的集合投影算法。该算法避免了集合投影算法中采用的局地化步骤,从而克服了局地化半径的经验性选择带来的不确定性。将该算法应用于中等复杂程度的ENSO预报模式中计算CNOP。结果表明,用新集合投影算法得到的CNOP能够有效地逼近用伴随算法得到的CNOP,抓住了CNOP的主要空间特征。因此,文章提出的基于SVD的集合投影算法是计算CNOP的一种有效近似算法。

#### Zebiak-Cane模式中参数误差对ENSO春季预报障碍的影响——Role of Parameter Errors in the Spring Predictability Barrier for ENSO Events in the Zebiak-Cane Model, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, Vol. 31, No. 3.

中科院海洋研究所的Yu等研究了Zebiak-Cane(ZC)模式中初始误差和参数误差对春季预报障碍(SPB)的影响。过去的研究表明,在ZC模式中初始误差对SPB的贡献比参数误差要多。尽管参数误差本身是贡献较小的项,但也许有一种可能,即两种类型的误差之间产生非线性相互作用,从而导致比初始误差单独引起的更大的预报误差。在此种情况下,参数误差不能被忽视。文中计算了这两类误差的最优组合(即条件非线性最优扰动(CNOP)误差)用以探讨其是否可能导致更显著的SPB现象。使用CNOP方法,计算CNOP误差和CNOP-I误差(最优误差仅考虑初始误差),之后对误差增长的3个方面进行比较:1)季节性误差增长的趋势;2)海表温度异常的预报误差;3)误差增长的形态。结果均显示CNOP误差不会导致更显著的SPB现象。这一结果表明,El Niño春季预报水平可以仅通过降低模式的初始误差来提升。

## 编辑选编

**土壤湿度和气候变化在2010年俄罗斯西部热浪事件中的角色——Role of soil moisture versus recent climate change for the 2010 heat wave in western Russia.** *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, No. 6.

2010年,俄罗斯西部严重的热浪事件被发现受到了人为气候变化的影响。此外,土壤水分—温度反馈也被认为对异常高的温度的累积具有重要影响。瑞士苏黎世联邦理工学院的Hauser等应用概率事件归因框架和分析集合模拟量化了两个因素的相对作用,区分了气候变化和2010年土壤水分条件对年度最高气温的影响。2010年干旱的土壤条件使俄罗斯西部严重热浪的风险增加了6倍,而气候变化使热浪风险大约增加了3倍。气候变化和2010年的土壤水分条件产生的综合影响使得热浪风险合计增加了13倍。研究认为,导致2010年干旱土壤条件的内部气候变率是形成极端热浪的基础。

**利用水稳定同位素阐述土壤—植物—大气界面的水文过程——Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation atmosphere interface with water stable isotopes.** *Reviews of Geophysics*, 2016, Vol. 54, No. 3.

水稳定同位素( $^{18}\text{O}$ 和 $^2\text{H}$ )是用来跟踪土壤水分传输的理想示踪剂。由于过去二十年的技术发展,土壤水稳定同位素数据变得更容易收集。因此,同位素方法在土壤中的应用正在快速增长。利用土壤水分稳定同位素的研究通常具有多学科性质,因为必须要考虑在包气带发生的各种过程的相互作用。德国弗莱堡大学的Sprengrer等对改变土壤水分稳定同位素组成的水文过程和利用孔隙水稳定同位素的研究进行了综述。所讨论的过程包括来源于

降水的水输入,蒸发、蒸腾形式的水输出,以及特定的流动和传输过程。由于地下水和溪流中的同位素信号与植被和土壤中的同位素信号存在差异,近来的研究提出了一种假设,定义为“植被和溪流经过不同的水汇(pool)回到水圈”,而这会影响到全球水文通量的划分。基于文献综述和其他数据、建模结果的支持,本研究对该假设提出了不同的看法。对于两个不同的土壤水汇,其中一个汇富集重同位素并且被植被使用,另一个汇不经历同位素分馏而成为补给源,而渗流过程中水与新进入的雨水会继续混合。如此,最初同位素富集在表土中的水随着渗透深度的增加而失去了分馏信号,导致了地下水中未分馏的同位素信号。

**植物水分胁迫的参数决定了陆—气耦合强度——Plant water-stress parameterization determines the strength of land-atmosphere coupling.** *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, Vol. 217.

在使用陆面模式(LSM)研究干旱发生期间大气和植被之间的关系时,LSM通常都会用一个基本参数来描述植物对水胁迫的响应。荷兰瓦赫宁根大学的Combe等指出,不同LSM中该参数的不同会导致陆面和大气边界层(ABL)之间的耦合强度(如碳和水交换的幅度)存在显著差异。他们使用一个数值模式,将典型低矮植被的白天地表通量与对流性ABL动态过程进行耦合,以系统地分析植被对水胁迫的一系列响应。研究发现,在干土壤条件下,随土壤水分含量的增加,植被对水分胁迫响应从敏感到不敏感的改变,对陆—气耦合有相同的影响。同敏感植被相比,不敏感的植被可以使气孔保持开放(以便蒸腾),这使大气变冷,限制了ABL的增长。在干旱开始发展的阶段,土壤水分的可利用性尚可,不敏感

的植被响应首先会继续蒸腾(最大可达4.6mm/d),以阻止大气变热。相比,更为敏感的植被响应会减少蒸腾(减少可达1mm/d),以防止土壤水分的消耗。但是当土壤水分下降到接近萎蔫点时,不敏感的植被会突然关闭气孔,导致陆—气耦合向以感热交换为主导的机制转换。研究进一步发现,对于不论敏感还是不敏感的植被响应,土壤水分的逐渐消耗对大气变暖的贡献都可高达6K,光合作用减少达89%, $\text{CO}_2$ 富集达30ppm,但是对于不敏感的植被而言,所有这些影响都来得明显要迟。

**源自CMIP5模型输出的欧洲生长季的持续时间和有效积温的未来变化——Projections for the duration and degree days of the thermal growing season in Europe derived from CMIP5 model output.** *International Journal of Climatology*, 2016, Vol. 36, No. 8.

全球变暖导致了生长季的延长。基于在RCP4.5和RCP8.5情景下的22~23个CMIP5全球模式的模拟输出,芬兰气象局的Ruosteenoja等使用两个阈值温度5°C和10°C,对21世纪末欧洲生长季的长度和累积有效积温(GDD)进行了预测。为了确定生长季的起始、终止和GDD,研究使用了两种方法:先前开发的傅里叶方法(适用于长期平均)和新的温度偏差积分法(适用于年际变化)。根据21世纪后期RCP8.5模拟的多模式平均值,对于欧洲大部分地区,生长季延长1.5~2个月,>5°C的GDD增加60%~100%。对RCP4.5的响应,类似于RCP8.5,但在延长或增加幅度上更小。对不确定性方差的分解表明,未来近期内,内部变率的贡献是明显的,但到21世纪末,模式间差异占据主导。研究还发现,在未来几十年,GDD低于过去(1971—2000年)的年份将变得非常罕见。

### 基于航拍数据的南极维多利亚地企鹅源温室气体排放量估算——《科学通报》2016年第61卷第30期

海洋动物是南极气候变化的“生物指示剂”，其排泄物中丰富的碳（C）和氮（N）等营养物质为土壤中温室气体的产生与排放提供了有利条件，企鹅作为一种重要的海洋动物，其聚居区成为甲烷（CH<sub>4</sub>）和氧化亚氮（N<sub>2</sub>O）等温室气体排放的潜在“热点”区域。然而，受企鹅数量遥感资料的限制，区域尺度上企鹅源温室气体排放总量尚缺乏精确估算。贺红等以南极维多利亚地难言岛企鹅聚集区为研究对象，基于0.1m分辨率航拍照片发展了面向像元的RGB颜色模型法（pixel-oriented RGB color model）识别企鹅数量，通过企鹅粪便CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量、企鹅排便量等数据建立了企鹅源温室气体估算模型。结果显示，航拍照片中企鹅像元在RGB彩色空间模型中的R值（17<sup>104</sup>）与其他背景像元（>110）存在显著差异，该差异可以作为将企鹅与背景像元有效分离的理论依据；南极维多利亚地难言岛企鹅总数为19150只，企鹅源CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放总量分别约为275和2.99 kg。

### 中国2050：气候情景与胡焕庸线的稳定性——《中国科学（地球科学）》2016年第46卷第11期

王铮等基于NCAR/PSU的Reg CM4.0，取A1B情景对中国未来气候变化作了模拟估计，结合1981—2000年数据和中国未来时期（2041—2060年）的温度、降水模拟值，计算获得了中国相应时期及未来时期的蒸发量模拟值，并且计算了中国的农业生产潜力，得到了中国各地区可能达到的期望农业产量。通过比较1981—2000年和未来（21世纪中叶）时期农业生产潜力的变化，发现届时秦岭淮河一线仍然是中国农业生产潜力变化的重要分界线，淮河以南地区农业生产潜力呈下降态势，而淮河以北地区农业生产潜力呈上升趋势，未来农

业生产潜力的南北差距将有明显的缩小，对中国东部地区而言未来以秦岭淮河作为中国水稻和小麦的地理分界线可能会北推到黄河一线。更为重要的是，中国传统上农业生产潜力分界线——胡焕庸线对中国农业的锁定正在被突破。突破主要在云南省北部地区和川西地区，农业生产潜力明显提高，秦岭淮河以北的黄淮海平原地区的农业生产潜力也有了提高。农业生产潜力降低最大的区域集中在长三角地区、浙江、福建、贵州等南方省份。胡焕庸线以东秦岭淮河线以北的东北、华北、关中地区，以及秦岭淮河线以南、四川盆地地区的农业生产潜力上升幅度最为明显。此外，研究了气候变化下农业生产潜力的变化对中国人口分布的冲击，发现由于气候变化导致农业生产潜力提高的原因，胡焕庸线以西省区的人口占比将增长1.03%。气候变化虽在一定程度上可以缓解中国东西部人口分布不均衡的现象，但并没有从根本上破坏胡焕庸线的人口分布规律。

### 广东野外雷电综合观测试验十年进展——《气象学报》2016年第74卷第5期

雷电野外科学试验是认识雷电发生、发展物理过程及其致灾机理的重要途径，也是开展真实雷电电磁环境下雷电防护技术测试的重要方式。自2006年开始，中国气象科学研究院和广东省气象局在广州野外雷电试验基地，持续合作开展了雷电野外综合观测试验。张义军等介绍了在人工触发闪电和自然闪电物理过程及其雷电防护技术测试试验等方面取得的若干研究结果。10年期间共成功触发闪电94次，回击电流峰值最大值为42kA，平均值为16kA；分析给出了自然闪电预击穿过程电场变化脉冲特征类型和差异；观测发现高建筑物上行连接先导可达几百米甚至超过1km，其发展速度可达10<sup>6</sup>m/s量级，下行先导与上行连接先导的连接呈多样性；雷电防护技术测试试验表明人工触

发闪电近距离电磁场耦合在架空线路上的感应电压达到千伏量级，多回击、长连续电流和地电位抬升是造成浪涌保护器（SPD）损害的主要因素；闪电定位系统探测性能的评估结果显示粤港澳闪电定位系统的闪电和回击的探测效率分别为96%和89%，定位误差算术平均值为532m，回击电流强度的估算值约为真实值的0.63倍。

### 全球变暖趋缓研究进展——《大气科学》2016年第40卷第6期

近十几年来，全球年平均表面温度上升趋势显示出停滞状态，即全球变暖趋缓，这引起了国际社会的广泛关注，同时也引发了对全球变暖的质疑，各国气候学家正努力就全球变暖趋缓的事实、原因及其可能影响展开研究。苏京志等综述了目前国内外对全球变暖趋缓的研究结果。多数科学家认可近十几年来全球变暖停滞的事实，并认为太阳活动处于低位相、大气气溶胶（自然和人为）增加以及海洋吸收热量是变暖停滞的可能影响因子，其中海洋（尤其是700m以下的深海）对热量的储存可能是变暖停滞的关键。国际耦合模式比较计划第5阶段中的模式并未精确地描述各种有利降温影响因子的近期位相演变，因而其模拟的近期增暖趋势较观测偏强。由此推断，变暖停滞主要是自然因素造成的，并且预测变暖趋缓将在近几年或几十年内结束（依赖于太平洋年代际振荡的位相转变），未来气温将仍主要受到温室气体增加的影响而表现出明显的上升趋势。因此，目前的全球变暖趋缓不大可能改变到21世纪末全球大幅度变暖带来的风险。文章展望未来研究热点包括：精确估算全球气温和海洋热含量的变率及其不确定性，海洋年代际信号（太平洋以及大西洋的年代际振荡）的转型机制，存储在深海的热量将在何时返回海洋表面及其对区域气候的潜在影响。

## 《《 涓流细雨 》》

“This is the first time we will get short-term forecasts of what the changes at the surface of the Earth will be. We can tell a power-grid customer not only that it will be a bad day, but give them some heads-up on what exactly they will be facing.”

“这是我们即将第一次给出地球表面将要发生什么变化的短期预报。我们不仅能够告知电力网客户坏天气，还能准确警告他们将面对什么。”

——美国NOAA借助其最新研制的更为复杂的下一代空间天气预报模式，准备将空间天气预报从1D提升到2D，即给出太阳风暴风险等级的分布。空间天气预报中心首席预报员Bob Rutledge如上解释了新预报产品对供电网安全的意义所在。

“The Met Office had meteorological observers stationed at the front from 1915, providing critical meteorological information which impacted not only allied operations and also warning of conditions which would enable the enemy to launch gas attacks themselves. The operational forecasts proved to be highly important and after what was one of the only allied advances during the battle of Passchendaele one of the senior allied commanders sent a telegraph to Meteor R. E. to thank them for their accurate forecasts which had proven of great assistance in planning the operation.”

“自1915年开始，英国气象局在前线派驻气象观测员提供关键气象信息，这些信息不仅和气象业务联系在一起，还可以在敌方可能发生毒气攻击的天气条件时做出警报。业务预报被证明非常重要，在唯一的联合攻击战役中的巴雪戴尔战役后，联合指挥官致电气象预报人员，感谢他们提供的准确预报，在战役计划阶段帮助极大。”

——从1916年10月24日开始，英国气象局开始不间断地向英军方提供气象预报。近日，英国气象局隆重纪念其为军方提供气象预报信息100周年。英国气象局档案保管员Catherine Ross回忆起该局在第一次世界大战期间为英国军队服务时的情景。

“Barriers to zero emissions don't come from science: they are economic, social and political. The new IPCC focus will be to help to overcome these barriers through scientific analysis.”

“零排放的障碍并非来自科学，这些障碍源自经济、社会和政治。新的IPCC评估报告的要点就是要通过科学分析帮助克服这些障碍。”

——2016年8月，“跨越IPCC工作组气候风险和可持续的解决方案综合研究：汲取AR5经验教训支持AR6”学术会议在斯德哥尔摩举行，这次会议吹响了IPCC在2014年完成AR5评估后新一轮评估开始的号角。IPCC主席Hoesung Lee在会议开幕式上针对新评估做出了上述表述。

“Julia, and her predecessors in the role, have all been such passionate ambassadors of the world-leading science we do here at the Met Office. I'm thrilled to have the opportunity to follow in their footsteps and maintain this great tradition. I am looking forward to nurturing the scientific excellence in Met Office Science and

integrating that excellence into the UK's broader world-leading weather and climate science to develop services for the maximum benefit to society.”

“朱莉娅和她的前任们都成为了我们在气象局所从事的世界领先科学工作的热情的大使。我很激动有这个机会追寻他们的足迹，并延续这一恢宏传统。我期待呵护气象局卓越的科学事业并融合成为英国更广泛的福祉，让社会最大化受益于天气和气候科学。”

——英国气象局任命Stephen Belcher教授为该局新的首席科学家，原首席科学家Dame Julia Slingo退休。作为首席科学家，Stephen将与该局科学局长Andy Brown合作，领导和管理研发工作。Stephen在上任之际做了上述表达。

“Every year, wildfires affect nature, people, their homes and businesses. While the progress of a fire itself is hard to predict, this new service from SAP, leveraging satellite data from ESA, allows us to accurately calculate costs and risks related to wildfires and even gain insights into the future probability of wildfires.”

“每年野火都在影响环境、人类生活、居住地和商业。虽然野火过程本身的预测很难，但SAP的新服务借助了ESA的卫星数据，让我们可以准确计算与野火相关的成本和风险，甚至启发我们认识未来野火发生的可能性。”

——2016年11月，一家国际软件公司SAP与欧空局合作，推出地球观测分析服务。该服务借助SAP的Hana平台以云服务的形式提供。两家机构从年初开始合作，致力于将分析平台与ESA的地球观测数据，特别是哥白尼项目的数据结合起来，形成新的商业服务产品。慕尼黑再保险公司地理空间解决方案部门负责人Andreas Siebert用上述话语评价了这项合作研究会带来什么。

“The entire scientific community is mourning the sudden and untimely loss of this great leader who has been unexpectedly removed from the forefront of the scientific issues that matter most to the future well-being of society, Ralph Cicerone was a model for all of us of not only doing what counts, but doing it with honesty, integrity, and deep passion.”

“整个科学界都在为这位伟大学术领头人的突然和过早离世而悲伤，他意外离开，留下的科学问题前沿事关未来社会福祉，Ralph Cicerone是我们大家的楷模，从事科学工作不是就事论事，而是要像他那样将正直、诚恳和深深的热情投入其中。”

——美国科学院（NAS）2016年11月5日宣布，美国大气化学家、NAS前院长Ralph J. Cicerone不幸去世，享年73岁。NAS称Cicerone是科学领袖和世界知名的大气化学和气候变化权威。Cicerone曾在2005—2006年任NAS院长，他的继任者Marcia McNutt谈到Cicerone时，用上述语言表达了对亡者的无限悲痛和尊敬。

“Today, we can't see what's happening under the rain, we can measure the wind outside of the storm cell with present systems. But there's a gap in our knowledge of cyclone processes in the critical eyewall region of the storm — a gap that will be filled by the CYGNSS data. The models try to predict what is happening

under the rain, but they are much less accurate without continuous experimental validation...”

“今天，我们还无法看到雨区下方发生了什么，我们现在的系统能够观测风暴单体外围风场。但是，针对风暴关键的眼壁区域气旋过程的认识有缺欠——这样的缺欠将被CYGNSS资料填补。模式可以预报云区下方发生了什么，但是如果没有连续的试验验证，准确性会很低……”

——NASA将布设其第一个地球科学小卫星星座系统——气旋全球导航系统（The Cyclone Global Navigation Satellite System, CYGNSS）。针对该系统的意义，美国密歇根大学气候和空间科学系的Chris Ruf教授给出了上述评价。据悉，CYGNSS中的小卫星将持续对地球热带飓风带纬度区域海洋表面风场进行监测，每颗卫星每秒钟可以捕获4次风观测，这样星座的8颗卫星每秒钟可以获得32个风速记录。CYGNSS也是NASA地球冒险项目第一个通过竞争立项的地球轨道观测完整项目，立志于低成本、快速开发和科学驱动认识地球当前状态及其复杂的动力系统，确保对未来变化预测的持续改进。

“More than ever, federal support of research and education into the Earth system is critical to the nation. We are on the verge of a new era of prediction, based on understanding how the entire Earth system works. This will have a direct positive impact on lives and livelihoods. The United States should be the unambiguous leader in predicting weather, water, climate, and related systems. Transforming this knowledge into action will allow our nation and the world to effectively respond and adapt to changing environmental conditions.”

“联邦对地球系统研究和教育的支持比以往任何时候都来得关键，基于对整个地球系统机制的认识，我们将迎来预报新时代。这将给我们的生活带来正面影响。美国应该义无反顾成为预报天气、气候和相关系统的领导者。将这样的思想付诸行动，会让我们的国家和世界有效地应对和适应变化中的环境条件。”

——美国大选结果出来后，作为美国110个非盈利学院和大学联盟成员的UCAR，发表了针对下一代政府和国会的白皮书，强调预报地球系统的价值所在。UCAR主席Antonio J. Busalacchi更是全面表达了白皮书的应景意义所在，以及美国应该作为地球系统预报领导者的观点。

2016年11月19日，NOAA宣布其下一代地球静止轨道气象卫星GOES-R发射成功，多位相关部门官员发表了看法。

**Kathryn Sullivan:** “The next generation of weather satellites is finally here. GOES-R is one of the most sophisticated Earth-observing platforms ever devised. GOES-R’s instruments will be capable of scanning the planet five times faster and with four times more resolution than any other satellite in our fleet. With these new instruments and powerful new capabilities, GOES-R will strengthen NOAA’s ability to issue life-saving forecasts and warnings and make the United States an even stronger, more resilient Weather-Ready Nation.”

**Louis W. Uccellini:** “We are ready to receive and process GOES-R data into our forecasts as soon as it is available. Forecasters will not only have sharper, more detailed views of evolving weather systems, they will have more data—better data—ingested into our weather models to help us predict the weather tomorrow, this weekend and next week. This is a major advancement for weather forecasting.”

**Craig Fugate:** “GOES-R will significantly improve the ability of emergency managers across America to prepare for, and respond to, weather-related disasters. Better situational awareness will result in better outcomes -- from where to best position resources ahead of a storm to delivering more targeted information to local officials to decide if an evacuation is necessary.”

**Stephen Volz:** “We’ve crossed an historic performance threshold with GOES-R. NOAA is now operating the most sophisticated technology ever flown in space to help forecast weather on Earth.”

**Sandra Smalley:** “NOAA and NASA have partnered for decades on successful environmental satellite missions. Today’s launch continues that partnership and provides the basis for future collaboration in developing advanced weather satellites.”

**NOAA局长Kathryn Sullivan:** “下一代天气卫星终于升空。GOES-R是目前最复杂的地球观测平台之一。GOES-R上的仪器将让扫描地球的速度提高5倍，而且较我们已有卫星的分辨率提高4倍。这些新仪器和强大的新能力，将让GOES-R强化NOAA保护生命的预警能力，让美国成为更强大、更具弹性的天气有序国家。”

**NWS局长Louis W. Uccellini:** “我们准备就绪，尽快接收和将GOES-R资料融入我们的预报中。预报员不仅能够更加清晰和详尽地看到天气系统的演变，他们还得到更多，而且更好的资料嵌入我们的天气模式，帮助我们预报明天、这个周末和下周的天气。这是天气预报的巨大进步。”

**FEMA（联邦应急管理局）局长Craig Fugate:** “GOES-R将极大改进整个美国应急管理的能力，对天气相关的灾害做出准备和应对。更好的形势感知将带来更好的结果——从风暴来临前最佳资源集散地点的确定到向当地官员发布目标性更强的支持做出是否需要疏散决策的信息。”

**NOAA信息卫星局局长Stephen Volz:** “GOES-R将跨越性能的历史极限。NOAA现在在空间领域展现的最复杂技术，帮助预报地球天气。”

**NASA联合部委卫星部主任Sandra Smalley:** “NOAA和NASA数十年作为伙伴成功实施环境卫星使命。今天的发射持续了这种合作，并为未来合作开发先进天气卫星打下了基础。”

——GOES-R是美国下一代地球静止气象卫星系列中的第一颗，成功发射意义巨大，各方官员兴奋之情溢于言表也属正常。据悉，该系列卫星包含的4颗卫星，业务化前分别为GOES系列的R，S，T和U星，将支持NOAA一直到2036年的气象业务。

## 《自然》

2016年9月29日

本期封面报道配合联合国在厄瓜多尔召开的第三届人类生存大会上宣布的新城市议程，瞄准了城市，特别是中小城市面对包括自然灾害在内的脆弱性问题。中小城市的发展速度已经超过超大城市，但中小城市基础设施简陋、管理不到位和防灾薄弱等都导致其面对极端自然灾害时的脆弱性。本期主题相关的4篇文章就城市问题进行了全面分析。



## 《EJ 2020行动议程》 2016年10月

美国环境保护局（EPA）发表的这份报告，是该局2016—2020年环境正义（EJ）战略计划。该战略基于2014年战略和数十年来EPA环境正义实践制定，目的是确保美国每个社区都有干净空气、水和土地。战略确定了3个总体目标和8个优先领域。

## 《2016研究前沿》

2016年10月

10月31日，中国科学院文献情报中心等机构发布的这份报告，就该年度研究报告揭示了近年来科学领域中突出的热点前沿和新兴前沿，这也是连续第三年发布此项报告。报告仍以文献计量学中的共被引分析方法为基础，从2009—2015年间的12188个研究前沿，遴选出了180个主要的研究前沿，其中包括100个热点前沿和80个新兴前沿。在地球科学领域，全球变暖趋缓（hiatus现象）和基于GEOTRACES等计划开展的北大西洋和南大洋痕量元素组成研究分别被列为10项热点研究前沿和值得关注的8项热点研究前沿。



## 《北极地区发展报告 (2015)》 2016年11月

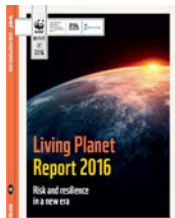
该报告是我国第一项主要由高校研究团队承担完成的对于北极事务发展动态进行年度跟踪研究的学术成果，系教育部哲学社会科学发展报告培育项目“北极地区发展报告”系列的阶段性成果，每年一卷，连续出版。今年是第二次出版。本报告分3部分。总论以主要国家的北极战略与政策发展为主要内容。之后论述北极航道法律政策的发展及其对中国的意义，最后是以北极治理中的新问题、新挑战为主要内容，重点论述北极海洋保护区的建设等问题。

## 媒体扫描

## MEDIA SCAN

## 《地球生态2016报告》 2016年10月27日

这份由世界自然基金会发布的系列报告，每次都会用数字警示世界对地球生态环境的伤害，如本报告指出，1970—2012年哺乳类动物、鸟类、两栖动物、鱼类和其他脊椎动物的野生种群数量下降了58%，而淡水人口减少了81%更是最严重的警告。



## 《牢不可破：建立贫穷 面对自然灾害的弹性》 2016年11月

世界银行的这份最新报告，试图阐述极端天气和极端贫穷之间的联系，指出前者的影响较之前的认识要更具毁灭性：每年造成消费损失5200亿美元，将2600万人拖入贫穷。

## 《2016排放差距报告》 2016年11月3日

联合国环境规划署在《巴黎协定》生效前发表的这个报告称，世界必须紧急采取行动，在2030年的预测排放量基础上再减排25%。报告认为，即使巴黎承诺得以兑现，本世纪全球温度仍处于升高2.9~3.4℃的趋势中，2030年的排放量预计将比把全球温度升幅控制在2℃以内所需的水平高出120~140亿吨。



## 《天文学》 2016年11月

这份世界上最畅销的天文学期刊之一，本期封面报告关注了宇宙射线，相关文章关注了宇宙射线代表的围绕人类的粒子能量流，给日常生活带来了什么样的影响。

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)  
Sponsor CMA Training Centre  
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological  
Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

### Associate Editors

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

### Managing Editors

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

### Editors

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

### Overseas Editors

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

### Editorial office

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

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

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

<http://library.cma.gov.cn/amst>

<http://weibo.com/2115232930/profile>

### Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

## Main Contents

### 1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief Article

6 Sun Guodong, Mu Mu, Duan Wansuo, Wang Qiang,  
Peng Fei/ Conditional Nonlinear Optimal Perturbation:  
Introduction and Numerical Computation

15 Shi Jun, Wen Kangmin, Mu Haizhen, Liu Xiaochen/ Progress  
of Demonstrating Feasibility of Major Projects upon Climate

22 Ding Deping, Kong ShaoFei, Zhubin, Zhang Xiaoling, Zhao  
Delong, Sheng Jiujiang/ The Impact of Black Carbon From  
Agricultural and Anthropogenic Sources on Climate and Air  
Quality over East Asia, and the Assessment of It's Effects on  
Health

26 Ding Naiqian, Chen Zhenghong/ Review of the Combination  
Prediction for Wind Power

30 Zheng Zhaoxia, Zhou Mei, Ji Zhijian, Fang Taoni, Liu  
Xuehua/ Application of SVM Method to Identification of  
Haze and Prediction of Visibility

35 Liu Xin, Zhao Luqiang, Liu Na, Hui Jianzhong, Tang  
Qianhong/ Risk Evaluation of the Spring Snowmelt Flood  
in Ili River Basin and It's Mapping

42 Ni Minli, Han Leqiong, Zhao Luqiang/ Distribution  
Features of Earth Temperature at 80 cm in China and  
Prediction Method Based on the Factor of Solar Radiation

49 Song Yingying, Li Yanpeng, Chen Zhengting, Ling Bai, Feng  
Yuxing, Cao Yuzhao/ Design and Application of Message-  
Driven Data Processing Flow in Meteorological Service

53 Wang Runmin/ A Simple Qualitative Analysis of Relationship  
Between Typhoon Internal Force and Latitude

### Forum

56 Ma Xiaoxia / Empirical Study on Cultivating the Innovation  
Ability of Graduate Students Majoring in Meteorology

59 Zhang Yuan/ Research of the Status and Trends of  
the Virtual Reality Technology Applied in the  
Meteorological Television Program

### Survey

2 Picture/ Number/ Ranking

### Reading

#### Information

77 Selected Papers

### History

#### Station

69 Feng Yingzhu, He Xicheng/ Meteorological Observation of  
Lingnan University During the Period of the Republic of China

71 Song Jianping, He Xiao, Su Xiumei, Liu Licheng/A  
Preliminary Reaserch of Modern Meteorological Archives  
of Customs in HuBei Province: Case Studies of the Customs  
in Jiangnan , Shashi and Yichang