

# Advances

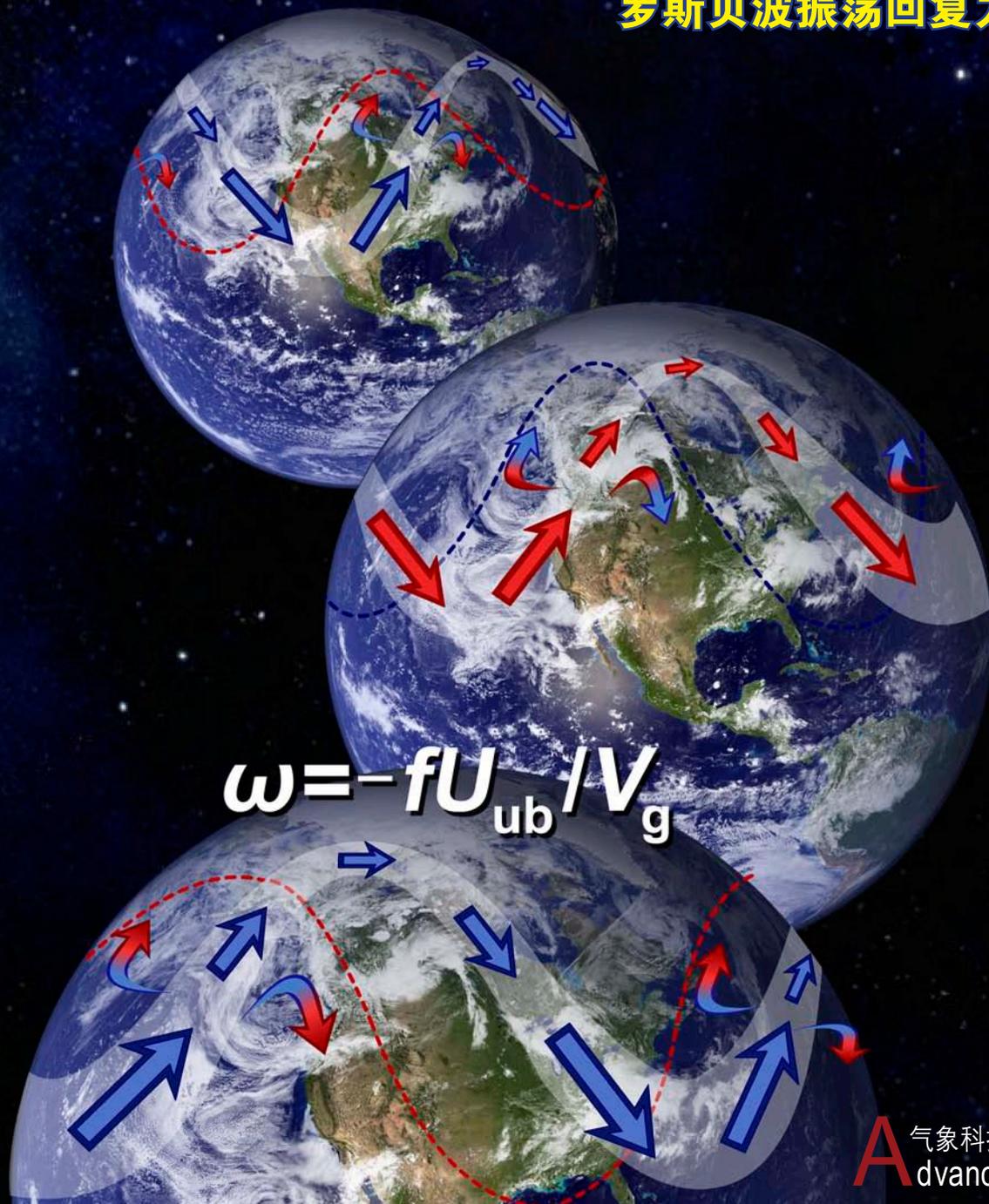
in Meteorological Science and Technology

# 气象科技进展

## No.5

2013年10月  
第3卷 第5期

### 罗斯贝波振荡回复力机理



气象科技 **进展**  
Advances in Met S&T

ISSN 2095-1973



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 中国气象局气象干部培训学院  
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  
周定文 成都信息工程学院  
黄建平 兰州大学  
廖小罕 国家遥感中心  
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	何 清
胡 欣	胡玉蓉	胡跃文	姜 彤	雷小途
李 慧	李集明	李良福	李耀辉	李跃清
梁旭东	刘晶森	刘黎平	刘 实	卢乃锰
陆日宇	罗 兵	罗亚丽	马 力	马舒庆
马耀明	毛恒青	彭莹辉	浦一芬	石广玉
宋 燕	汤 绪	田 红	万齐林	王 斌
王东海	王建林	王晓云	王延青	王迎春
王 元	王在志	王自发	温 敏	文洪涛
吴立广	谢志辉	闫冠华	杨昭明	姚学祥
伊 兰	翟武全	张 华	张立祥	张小玲
张跃堂	赵广忠	周凌晔	周显信	朱定真
朱小祥	祝燕德	邹立尧		

**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	杨 崧	张大林	张广俊	邹晓蕾

**编辑部** 张 萌 侯美亭 胡 英 李婧华  
陈忠美

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://library.cma.gov.cn/amst>

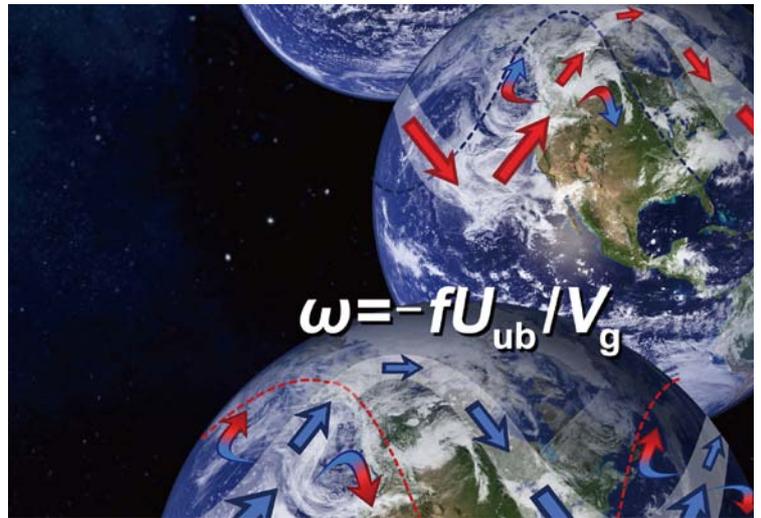
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>

印刷: 北京铭成印刷有限公司

国际标准刊号: ISSN 2095-1973

国内统一刊号: CN 10-1000/P

定价: 30元



本刊已被教育阅读网、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3卷 第5期 2013年10月

### 研究论文

#### 封面报道

#### 6 蔡鸣, 虞越越: 从牛顿力学认识罗斯贝波的振荡机理及其回复力

蔡鸣和黄渤华近期对罗斯贝波形成机制提出了一个全新的物理解释: 对地转流而言, 科氏参数纬向变化与地形坡度一样, 起着机械障碍作用, 可使沿上坡(下坡)方向的地转流产生质量辐合(辐散)……

#### 研究进展

#### 12 胡永红等: 基于干旱/半干旱区协同观测网络的GLASS下行短波辐射产品精度验证及影响因素评估

#### 19 孙健等: 我国气象预警信息覆盖率的初步分析

#### 24 宋巧云等: 风廓线雷达在北京市气象局的业务应用

#### 29 杨妍辰等: WOFOST作物模型机理及使用介绍

#### 36 李娇等: 浅谈极端气温事件研究中阈值确定方法

#### 41 朱智慧等: 光流法对2011年“梅花”台风期间500hPa高度场预报的检验释用

#### 短论

#### 48 林纾等: 150天韵律方法月内过程预测系统简介及应用检验

#### 52 郑东旗等: 福州市百余气温资料处理及变化特征分析

## 主编语

1939年,罗斯贝教授在《海洋研究杂志》上发表了《纬向环流强度变化与大气半永久活动中心位移之间的关系》一文,从理论上推出了在高空天气图上控制和影响大气环流变化的大气长波,在此前后,他与同事还发表了一系列相关文章,创立了大气长波理论,构建了世界气象发展史上的一个重要里程碑。长波理论不仅解释了中高纬度西风带上波动的移动和发展规律,也为日后数值天气预报的发展奠定了理论基础。如果说20世纪初皮耶克尼斯将气象预报问题归结为物理初值问题,从而创立了现代气象科学,大气长波理论的发展则是沿着这一方向完成了关键性、开拓性的构架,成为大气科学发展进程中最重要的经典理论,并巩固了气象学作为物理学应用学科的重要地位。

长波理论拓展了一线预报员进行天气诊断分析时的视野,且早期数值预报发展阶段,正是依据大气长波理论提出的 $\beta$ 平面近似,大大简化了天气预报物理方程组。今天,罗斯贝波动理论的应用早已超出大气和海洋等地球流体的范畴,被广泛应用于太阳大气、磁流体和普通流体的研究中。

在对罗斯贝波的研究中,依然存在一些未解的问题有待人们去探究,比如罗斯贝波是否像其他波一样依靠回复力振荡和传播,如果是,那么它的回复力是什么。2013年年初,美国佛罗里达州立大学蔡鸣教授在国内多次学术报告上根据自己的研究解释了这一问题,他从牛顿力学出发,重新诠释了罗斯贝波的振动和传播机理,为传统地球旋转地转位涡动力学和经典牛顿力学搭建了一座桥梁。本刊特别邀请他及合作者在报告的基础上完成了《从牛顿力学认识罗斯贝波的振荡机理及回复力》一文,作为本期的封面报道,介绍给中国

读者(P6),我们也希望借此能引起读者更多的思考和探讨,文章的题目也提醒我们,在深入探索研究大气科学规律的同时,不要忘却加深对经典理论的理解和认识。

本期其他文章涉及了GLASS下行短波辐射产品(P12),风廓线雷达(P24),WOFOST作物模型(P29),光流法(P41)以及150天韵律方法(P48)等多种模型、产品和观测、预报方法,以及在不同业务上的应用和效果检验。对气象信息化(P56)及气象立法(P63)等方面的讨论,也在本期“论坛”栏目中呈现。

IPCC第五次评估报告(AR5)第一工作组报告,即气候变化科学基础已于2013年9月出炉,而在AR5周期主要报告面世前,由第一二工作组合作,早在2012年就发表的《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》,首次将气候科学和社会经济科学相结合,具有重要参考意义。对该报告的文献计量分析(P67),开启了本刊针对AR5系列成果的解读和报道。

时值丑纪范院士80华诞,丑先生长期从事数值天气预报的基础理论和方法及其有关的大气和海洋动力学的教学和研究,是我国和国际上大气科学领域内有影响的专攻大气理论研究并做出重要贡献的学者之一。本期“往事钩沉”栏目刊载了丑先生的学生郜吉东撰写的文章(P76),回顾了丑先生有关数值预报资料同化问题的学术思想,文章介绍的一些具体细节,不仅情真意切地描述了先生对学生的指导、帮助、关心和影响,也诠释了我国气象科技发展进程中两代人共同协作、探索、攻关的奋斗历程。

许小峰



## P6

### 封面报道:从牛顿力学认识罗斯贝波的振荡机理及其回复力

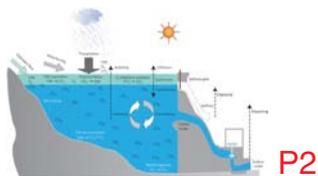
封面图:罗斯贝波振荡回复力机理

## 论坛

- 56 沈文海:对气象信息化的理解和再认识
- 63 杨惜春等:我国气象灾害风险评估立法环境与需求

## 科学观察

- 2 读图 数字 榜单



## 特写

- 67 郑秋红等:IPCC SREX报告中来自专门机构的引文分析
- 70 张萌等:“罗斯贝波”主题文献计量分析

## 信息

- 11 第八次全国动力气象学术会议在大同召开
- 23 教育部大气科学类专业教学指导委员会在南京成立
- 55 会议信息
- 72 文摘(中文文献)
- 74 文摘(英文文献)
- 封3 媒体扫描



## 往事钩沉

## 人物

- 76 郜吉东:丑纪范先生关于资料同化的学术思想探讨和回忆  
——写在丑先生80华诞之际

读图



首届中国刊博会：《气象学报》收获殊荣

日前在武汉开幕的首届中国期刊交易博览会上，公布了国家新闻出版广电总局组织评选出的2013年“百强报刊”，《气象学报》上榜荣获殊荣，取得“百强科技期刊”称号。创刊于1925年的《气象学报》在这次博览会上亮相，多位曾担任期刊主编的学者很好地注解了《气象学报》，并介绍了其起到学术引领作用的气象事业的发展足迹。

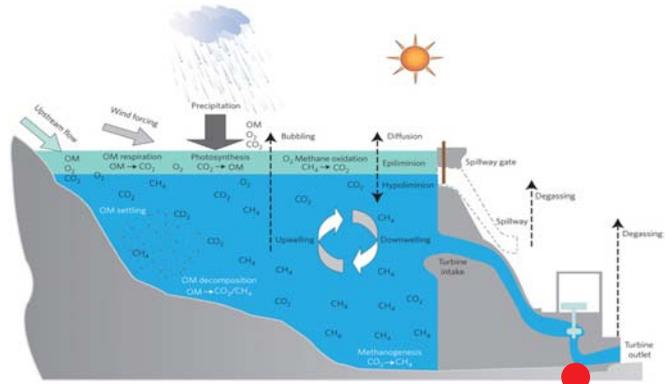
来源：本刊



气候变化的趋势：需要卫星遥感观测说话

清华大学学者和国内外的合作者最近对卫星在认识气候系统中的作用进行了梳理和评述，文章特别关注卫星遥感得到的一些发现，以及尚未被气候模式或常规观测所探知的事实，并因此给确定气候变化趋势带来挑战。图中示意性给出了针对地球气候系统的遥感观测手段，这项研究成果已经在Nature Climate Change在线发表。

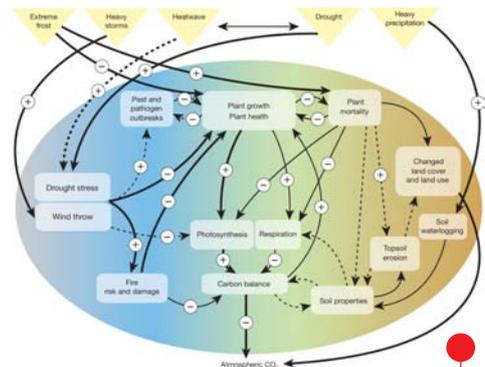
来源：Nature Climate Change



水电站区排放全景图

中科院广州地球化学所的最新研究揭示了典型的用于水力发电的深水水库CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>排放的主要生物、化学和物理过程。降水和上游水带来的CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>和有机物(OM)进入水库，水库中发生的各种过程受到流域水文过程和水库调度的重要影响，特别是水库中因上升流(冷的深层水移动到表面混合层)以及风场变化驱动的沉降(表面水向深层运动)引发的混合，与库区的排放联系密切。

来源：Nature Climate Change



极端气候事件的后果

德国和奥地利等国科学家进行的一项有关极端气候事件与全球碳循环的研究，揭示了极端气候事件带来的方方面面的后果。图中给出了极端气候事件发生后，激发出来的各种过程和反馈，其中极端气候事件包括干旱和热浪、强风暴、强降水和严重霜害等(图上部黄色三角区)，它们的影响可能是直接的(实线箭头，更粗的箭头表示影响的程度更严重)。

来源：Nature

数字

3%

卫星业联合会(SIA)发表的年报显示，截止到2012年年底，全球有超过1000颗业务卫星，50个以上国家至少拥有1颗业务卫星，气象业务卫星占3%。

200万

美元 美国一家基金会日前宣布，将提供200万美元奖励海洋酸性观测竞赛的优胜者，奖金的一半用于奖励最准确的观测，另一半则奖励性价比最高的传感器制造者。

第1颗

越南最近拥有了自己的第一颗遥感卫星——VNREDSat-1 (Vietnam Natural Resources, Environment and Disaster Monitoring Satellite, 越南国家资源环境和灾害监测卫星)。

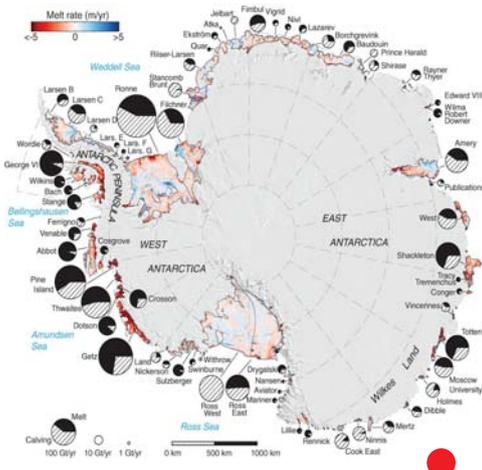
榜单

国际“罗斯贝波”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?	Wang, B	Journal of Climate, 2000, 13(9)	513
2	Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures	Trenberth, KE	Journal of Geophysical Research-Oceans, 1998, 103(C7)	497
3	2 paradigms of baroclinic-wave life-cycle behavior	Thorncroft, CD	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1993, 119(509)	381
4	The singular-vector structure of the atmospheric global circulation	Buizza, R	Journal of the Atmospheric Sciences, 1995, 52(9)	378
5	A numerical investigation of dynamics, thermodynamics and mixed-layer processes in the Indian-Ocean	Mccreary, JP	Progress in Oceanography, 1993, 31(3)	314
6	Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis	Davis, CA	Monthly Weather Review, 1991, 119(8)	307
7	Monsoons and the dynamics of deserts	Rodwell, MJ	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122(534)	305
8	Rossby-wave propagation on a realistic longitudinally varying flow	Hoskins, BJ	Journal of the Atmospheric Sciences, 1993, 50(12)	270
9	Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific-east Asian monsoons	Wang, B	Journal of Climate, 2001, 14(20)	268
10	Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability	Xie, SP	Journal of Climate, 2002, 15(8)	262

来源: SCIE数据库, 检索时间: 2013年9月21日

张萌 提供

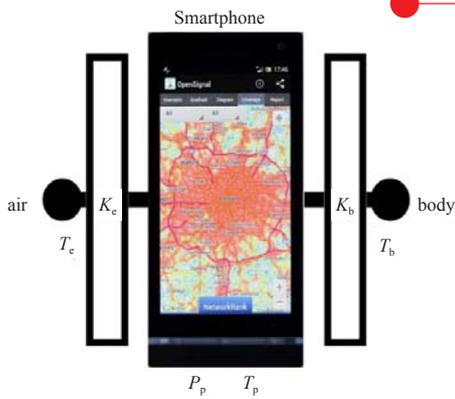


南极冰架: 大范围消融

美国加州大学等机构的学者利用卫星资料对南极冰架状况进行了研究, 发现南极冰架出现了大范围的融化。图中给出南极冰架的底冰融化率(图中彩色区域, 从 $<-5\text{m/yr}$ (冻结)到 $>+5\text{m/yr}$ (融化))。细黑线为2007和2008年冰架范围, 每个圆形图面积的大小对应每个冰架冰体流失质量(单位 $\text{Gt/yr}$ ), 而圆图浅色和深色部分分别表示冰体流失的冰山断裂和底冰融化部分。

来源: Science

用智能手机测温度



智能手机的热传导模式(左)以及全球手机电池温度读数图(右)。左图中智能手机的电池温度( $T_p$ )可以通过Android应用获取, 而 $T_p$ 受到环境温度( $T_c$ )和体温( $T_b$ )的影响, 这种影响还要考虑手机和环境( $K_c$ )和手机与身体( $K_b$ )之间的隔绝情况。 $P_p$ 是手机每单位时间产生的热能。右图中给出2012年4月25日—2013年4月22日全球电池温度读数的地点(蓝点), 红色圈表示估算出气温的8座城市。这项实验研究的结果发表在美国地球物理学会的GRL杂志上。

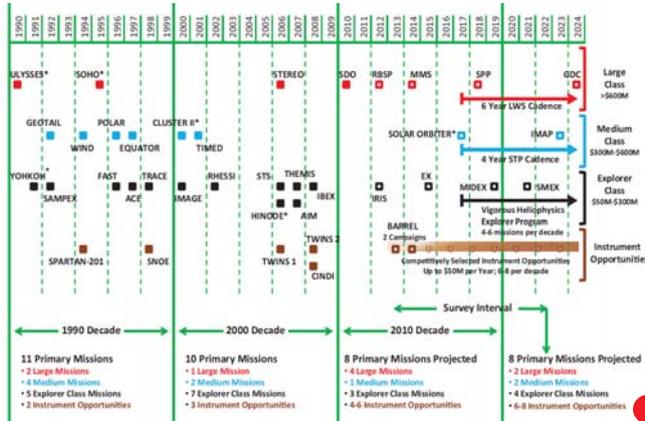
来源: GRL

**第6** 2013年北半球高纬地区经历异常寒冷的夏季后, 9月13日北极海冰达到面积最小值, 为 $510\text{万 km}^2$ , 为历史记录上的第6低值年。

**2%** 日本研究人员最新研究表明, 地球自转速度发生2%的变化, 磁场强度的变化会达到20%~30%, 这说明地球磁场会受到气候变化的长期影响, 因为冰盖不断减少会改变地球自转速度。

**15** 层 日前成功升空的“风云三号”C星, 作为风云系列首颗业务卫星, 具有更好的观测大气“层析能力”, 将0~30km大气层的解析能力从4层提高到了15层。

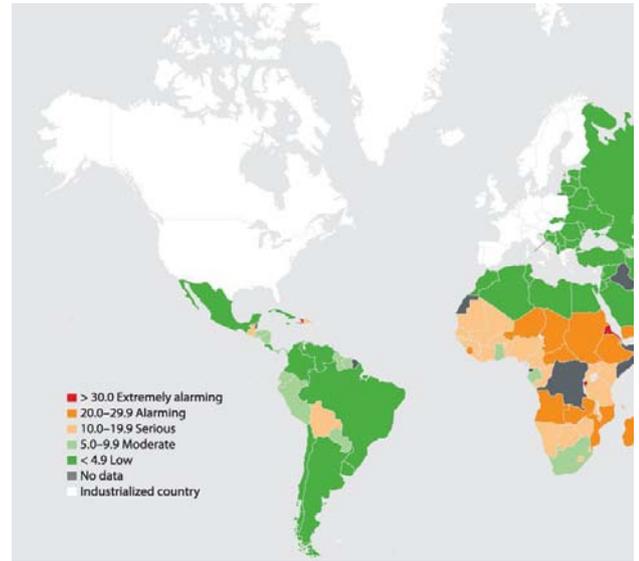
**7** mm 来自NCAR的研究指出, 2010年初到2011年末, 澳大利亚创纪录的降水让每年大约升高3mm的全球海平面下降了7mm。



### NASA太阳物理研究：寻求大型项目与中小型项目平衡

图中给出1990年以来以及到2024年NASA太阳物理项目（包括项目的级别）的实现和设计情况。2010年代大型项目趋多的情况被试图调整到大型项目与中小项目平衡的状态。

来源：NASA



### 气候变化与粮食安全

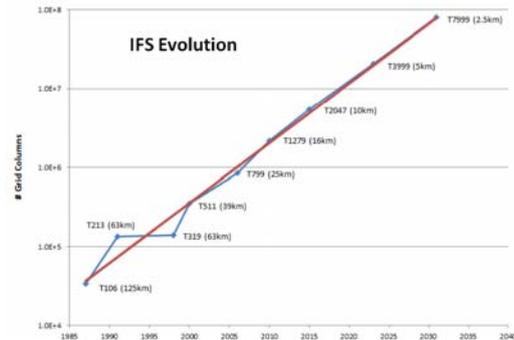
英国和法国学者在一项研究中，借用2012年全球饥饿指数通过计算不同国家营养不良人口比例、5岁以下给出了全球非工业化的120个国家的粮食安全情况。



### 第九届“中亚干旱半干旱地区气候变化研讨会”召开

第九届“中亚干旱半干旱地区气候变化研讨会”日前在乌鲁木齐举行。8位来自蒙古、吉尔吉斯斯坦和乌兹别克斯坦等国气象水文部门的专家及中国学者共49人参加了会议。该系列会议由中蒙双方轮流举办，本次会议研讨的重点放在了干旱观测和监测技术、干旱影响及风险评估、干旱预测预警技术及干旱防御技术和政策等主题，会议还回顾了东亚及国际上有关干旱监测和减灾活动的进展，特别关注了有中亚地区独特性的有关干旱监测预警方法及干旱管理和政策的机遇与挑战。

来源：本刊



### EC: 2030年前后业务预报模式分辨率达到2.5km

最近召开的欧洲中期天气预报中心（EC）年会上，来自EC的学者就该中心最主要的预报系统IFS（Integrated Forecast System，综合预报系统）的发展进行了回顾，指出，按照模式自20世纪80年代中期以来的发展趋势来看，在2030年前后，IFS的分辨率将达2.5km，模式系统的网格点数量也将接近1亿个。

来源：EC

数字

**53.7 km**

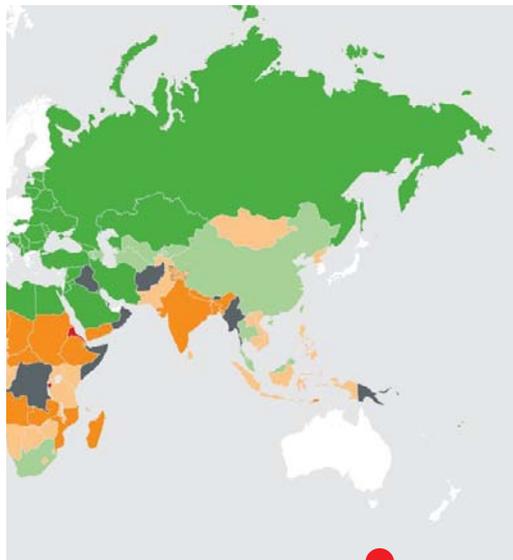
最近，日本宇宙航空研究所新开发的直径为60m的“BS13-08”无人气球，升空达到53.7km的高度，创造了气球升空高度最高纪录。

**136个**

美英法学者最近调查了全球最大的136个沿海城市面临的洪涝风险后指出，每年花费500亿美元可显著加强这些城市的防洪能力，投入远低于可能带来的1万亿美元损失。

**15%**

芬兰学者针对北极海冰的研究表明，海冰因为变黑，其反射太阳辐射的能力较30年前下降了15%，使得每年形成的新海冰变薄，颜色也更深。



饿指数分析了气候变化与粮食安全的关系。儿童体重不足比例以及死亡率等指标，量化

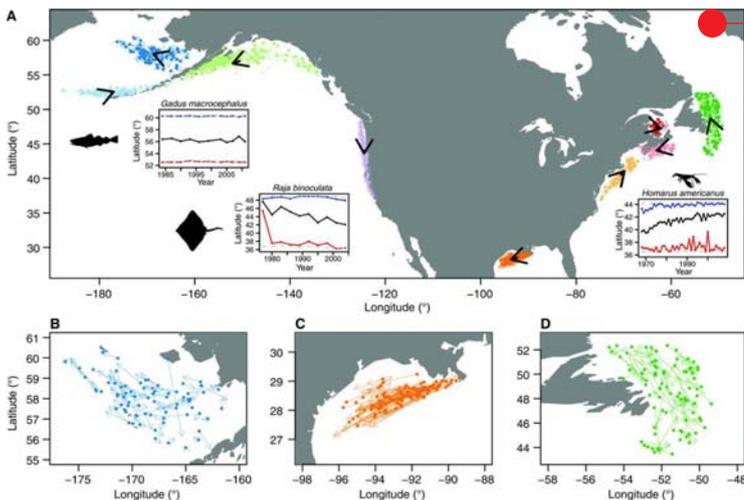
来源: Science

### 中国“罗斯贝波”主题被引频次最高的前15篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	热带气旋强度变化研究进展	端义宏	气象学报, 2005/05	116
2	台风暴雨的研究进展	李江南	热带气象学报, 2003/S1	110
3	青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——III. 青藏高原隆起对气候变化的影响	潘保田	兰州大学学报, 1996/01	100
4	再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳	陶诗言	应用气象学报, 2006/05	93
5	2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析	陶诗言	气候与环境研究, 2008/04	92
6	太平洋年代际振荡的研究进展	杨修群	大气科学, 2004/06	90
7	台风螺旋雨带——涡旋Rossby波	余志豪	气象学报, 2002/04	81
8	大气季节内振荡对印度洋—西太平洋地区热带低压/气旋生成的影响	祝从文	气象学报, 2004/01	66
9	El Niño事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I. 资料诊断和理论分析	张人禾	大气科学, 1998/04	64
10	夏季青藏高原加热和北半球环流年际变化的相关分析	刘新	气象学报, 2002/03	57
11	我国青藏高原气候动力学研究的近期进展	吴国雄	第四纪研究, 2004/01	54
12	1999及2000年夏季华北严重干旱的物理成因分析	卫捷	大气科学, 2004/01	47
13	大气中的非线性椭圆余弦波和孤立波	刘式达	中国科学 (B辑), 1982/04	45
14	大气非线性波动方程的解	刘式达	气象学报, 1982/03	44
15	亚洲季风与ENSO循环的相互作用	黄荣辉	气候与环境研究 1996/01	43

来源: CNKI中国学术期刊总库, 检索时间: 2013年9月22日

李婧华 提供



### 海洋生物迁徙的气候变化痕迹

美国新泽西州罗格斯大学的学者通过分析1968—2011年间的海岸调查数据发现, 过去的40年北美海岸的海洋物种, 大多数会沿着更冷的水域移动, 不过这并不意味着是朝着极地方向。他们发现沿着加州海岸的这种“气候速度”是指向南方, 而墨西哥湾沿岸的物种一直向南移动, 到达更深处和更冷的海域。研究表明超过70%的物种栖息地的纬度和深度发生了变化。图中给出海洋生物类群分布的迁徙: 图A向量给出每个类群(彩色)迁徙的纬度和经度改变以及每个区域的平均迁徙(黑色), 嵌入图则给出不同海域平均(黑)、最大(蓝)和最小(红)探测纬度, 灰色虚线给出了调查的纬度范围。图B, C和D还给出3个海区具体情况。

来源: Science

**10**年 全球气象界熟知的GOES-12卫星, 近日被宣布进入退役期。这颗2001年7月升空的卫星, 服务时间超过了10年, 已经长于在轨负荷2年和实际业务5年的设计生命周期。

**178**部

截止到2013年9月, 全国各地《气象法》配套性法规达到178部, 其中地方政府规章100部, 地方性法规78部。

**50**%

最近Science杂志上刊载的美国加州大学学者的研究表明, 如果气候变化的趋势保持下去, 到2050年, 全球的群体冲突发生率将增加50%, 人际冲突也会显著增加。

# 从牛顿力学认识罗斯贝波的振荡机理及其回复力

蔡鸣<sup>1</sup> 虞越越<sup>2</sup>

(1 佛罗里达州立大学地球海洋大气系, 美国; 2 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)

**摘要:** 蔡鸣和黄渤华<sup>[1]</sup>近期对罗斯贝波形成机制提出了一个全新的物理解释: 对地转流而言, 科氏参数纬向变化与地形坡度一样, 起着机械障碍作用, 可使沿上坡(下坡)方向的地转流产生质量辐合(辐散)。由于不能继续沿等压线上(下)坡流动, 部分由机械障碍所引起的质量辐合(辐散)会导致上坡区(下坡区)气压升高(降低), 剩余部分则改道穿越等压线, 转为非平衡流。由机械障碍激发的非平衡流又会受到科氏力作用。当科氏力将非平衡流转向与等压线平行时, 作用在被转向气流的科氏力已与原上坡区(下坡区)的气压升高(降低)后所产生的气压梯度力平衡, 于是科氏力不再继续起转向功能, 也就是说科氏力的转向功能仅发挥了一半, 便与气压变化的水平梯度平衡了。由非平衡流变为与等压线平行气流, 从而形成新的上坡(下坡)地转流, 完成一轮完整振荡。这种振荡包含了“障碍物”所激发的质量辐合/辐散及因其而改道穿越等压线的非平衡流, 以及半周期科氏转向, 故称为“机械-科氏振荡”, 其回复力为“障碍物激发的半周期科氏力”。经历一个完整振荡循环后, 在北(南)半球面朝上(下)坡方向, 与新气压场平衡的新地转上下坡流型将出现在原地转上下坡流型的左侧。而科氏参数引起的“ $\beta$ -障碍”在南北半球均沿各自的极地方向抬升, 因此该振荡激发的波型, 即罗斯贝波, 总是向西传播。

**关键词:** 罗斯贝波, 科氏力, 地转平衡, 非平衡流

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.001

## On the Oscillation Mechanism and Restoring Force for Rossby Waves

Cai Ming<sup>1</sup>, Yu Yueyue<sup>2</sup>

(1 Department of Earth, Ocean and Atmospheric Science, Florida State University, USA

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

**Abstract:** The recent work of Cai and Huang<sup>[1]</sup> presents an entirely new view on the physical origin of Rossby waves: the presence of the latitudinal variation of the Coriolis parameter and/or a sloped bottom terrain serves as a mechanical barrier that causes a mass convergence (divergence) when a geostrophic flow crosses it uphill (downhill). Part of the mass convergence (divergence) causes pressure rising (falling) along the uphill (downhill) pathway while the remaining part is detoured as an unbalanced flow that crosses isobars. This mechanically excited unbalanced flow is subject to a “half-cycle” Coriolis force that only turns it to the direction parallel to isobars without continuing to turn it further back to its opposite direction because of the balance nature of the flow parallel to isobars. Such oscillation, involving a barrier-induced mass convergence, a mechanical deflection, and a half-cycle Coriolis deflection, is referred to as a mechanical-Coriolis oscillation with a “barrier-induced half-cycle Coriolis force” as its restoring force. Through a complete cycle of the mechanical-Coriolis oscillation, a new pattern of the geostrophic flow, which is in balance with a new pressure pattern, emerges to the left of the existing flow when facing the uphill (downhill) direction of the barrier in the Northern (Southern) Hemisphere. Due to the latitudinal variation of the Coriolis parameter, the  $\beta$ -barrier is always sloped towards the pole in both hemispheres, responsible for the westward propagation of Rossby waves.

**Keywords:** Rossby waves, Coriolis Force, geostrophic balance, unbalanced geostrophic flow

### 1 引言

大气长波, 也称行星波, 首先由罗斯贝<sup>[2]</sup>从理论

上研究其性质, 建立了大气长波理论, 因而也称为罗斯贝波。随后我国学者叶笃正<sup>[3]</sup>提出大气长波频散理论, 延续和发展了大气长波理论。罗斯贝波的发现和大气长波理论的建立、发展, 对大尺度天气气候动力学研究具有重要意义, 为现代海洋、大气动力学研究提供了理论基础<sup>[3-7]</sup>。早在1937年, Bjerknes<sup>[8]</sup>提出猜

收稿日期: 2013年3月28日; 修回日期: 2013年6月28日

第一作者: 蔡鸣, Email: mcai@fsu.edu

资助信息: 国家重点基础研究发展计划(2010CB951600)

想：科氏参数随纬度变化所引起的辐合/辐散可改变质量场分布，从而产生西传罗斯贝波。但是，Rossby认为行星涡度随纬度的变化（即 $\beta$ 效应）才是产生西传罗斯贝波的最根本原因，并且用无辐散正压模式第一次推导出了罗斯贝波解<sup>[2]</sup>。罗斯贝波在无辐散情况下的存在似乎可以证明Bjerknes所猜想的机制<sup>[8]</sup>，即质量的辐合辐散，并非产生罗斯贝波的必要条件。Rossby<sup>[9]</sup>进一步指出，决定（罗斯贝波）运动的静止或发展的是涡度分布，而（散度所引起的）气压场重新分布占次要地位。故经典罗斯贝波振荡机制主要基于准地转位涡守恒定理来解释。罗斯贝波的频散关系可由准地转位涡守恒方程直接求得，无须考虑非地转流及其所引起的辐合/辐散效应，因为非地转流对罗斯贝波的净作用已经隐含于准地转位涡（QGPV）动力过程中。

但是，在对罗斯贝波的教学和学习中，仍存在下述问题亟待解答：（1）在罗斯贝波传播过程中，被气旋/反气旋环流包围的流体质量是如何被“搬进搬出”，从而维持气旋/反气旋环流与质量场之间的地转平衡，并随着罗斯贝波的传播在空间上一起移动的。

（2）除罗斯贝波外的任何一种波动，均由流体质点围绕其平衡位置振动而产生，而质点的振动离不开驱动力，即回复力。以重力波为例，其回复力是重力引起的浮力或水平气压梯度力。但是对罗斯贝波而言，地转平衡本身意味着净力为零，那么罗斯贝波有无伴随着流体质点的振动。如果有，其回复力又是什么。

（3）大部分波动均可双向传播，为什么罗斯贝波仅单向传播，即环境位涡梯度总是指向其传播方向的右侧（另外，在大气和海洋里，Kelvin波也具有单向传播的特质。在北半球，边界总是位于Kelvin波传向的右侧，在南半球，边界则位于传向的左侧，此外Kelvin波也沿着赤道向东传播）。

最近，蔡鸣和黄渤华<sup>[1]</sup>从经典牛顿力学出发，重新诠释了罗斯贝波的振荡和传播机理。该研究赋予了罗斯贝波一个全新的物理解释，为传统地球旋转准地转位涡动力学和经典牛顿力学搭建了一座桥梁。该研究表明，罗斯贝波的形成与两个因素有关：其一为地球旋转；其二为地转气流运动方向上的某些几何约束，比如旋转率/方向变化、运行通道的变窄/变宽以及变浅/变深。正是由于几何约束的障碍作用，地转平衡流将产生辐散辐合，从而使得部分气流被强迫改变初始方向，由平行等压线方向改为穿越等压线运动，产生非平衡流。而这种非平衡流又在科氏力作用下转向，在另一处逐渐达到地转平衡，重建的平衡流

又将遇到同样的几何约束，周而复始，形成罗斯贝波。本文首先基于文献[1]，阐述如何证明地形罗斯贝波是由于地形障碍通过改变流场、质量场/气压场而激发的，然后证明科氏参数的经向变化相当于地形障碍，可称之为 $\beta$ -障碍。最后考查 $\beta$ -障碍激发罗斯贝波振荡的机制及其回复力的形式。所有讨论将先从最简单的一维无辐散出发，再推广到二维有辐散模式。

## 2 地形障碍激发罗斯贝波的振荡机制

首先从最简单的含地形的一维无辐散正压模式出发。地形对于通过它的流体是一道天然的物理障碍。低地形区域，流体较厚，高地形区域，流体较薄。因此即使流体以相同速度穿越地形，流体爬坡时会产生质量辐合，下坡时会产生质量辐散，从而导致部分流体改向为沿地形等高线流而非穿越地形继续上下坡。同理，当地转流爬坡（下坡）时，质量将出现辐合（辐散），部分流体改道为平行于地形流动（图1）。根据地转定义，对于上/下坡地转流而言，等压线平行于地转流。那么沿地形等高线流将穿越等压线，此流即为非平衡的非地转流动。在无辐散模式中，沿地转流运动方向的质量辐合（辐散），须全部被垂直于等压线方向上非平衡、非地转流动的质量辐散（辐合）所抵消，故非平衡、非地转流动强度在无辐散模式中

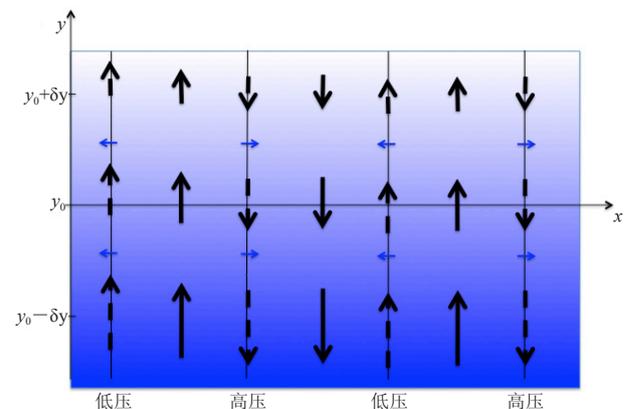


图1 机械—科氏振荡以及（一维无辐散）地形罗斯贝波（ $f_0 > 0, \beta = 0, \delta y > 0$ ）示意图

（阴影的颜色梯度表示因底部地形高度向北（ $y$ 轴）增加而导致的水深向北变浅， $H = H_0 - \epsilon y$ （ $\epsilon > 0$ ）。黑色粗实线为气压极值的等压线，表示气压场分布。黑色实线箭头为地转流输送的质量通量。对于相同地转流速，深水区地转流质量通量大，浅水区地转流质量通小。蓝色箭头为沿地形方向（ $x$ 轴）非平衡流输送的质量通量，该流是由地形激发地转流质量通量的辐合/辐散、引起机械转向形成的。黑色虚线箭头为由于作用于非平衡流的科氏力（即非平衡流的科氏转向）引起的沿地形坡度方向的地转流质量通量倾向，其分布表明位于北半球（ $f_0 > 0$ ），面向地形上坡方向，地转流型向左传播。在南半球，面向地形下坡方向，地转流型向左传播）

达到可能范围的最大值。文献[1]中将这种障碍物引起辐合辐散使得部分地转流改道变为与等压线垂直的过程，称为“机械转向”。紧接着，垂直于等压线的非平衡流动受到科氏力作用，转为与等压线平行，当科氏力将非平衡流转向与等压线平行时，作用在被转向流体流动的科氏力已与气压梯度力平衡。在无辐散模式中，等压线等同于流函数。也就是说，在无辐散模式中，地转平衡是瞬时建立起来的，故若流动平行于流函数，则必然已成为地转流。达到平衡后，科氏力不再继续起转向功能。这种由于科氏力的作用使得非平衡流回复为平行于等压线的地转平衡流过程，称为“科氏转向”。“机械转向”和“科氏转向”共同组成一个完整的振荡循环，称此循环为“机械—科氏振荡”。鉴于质量辐合是由障碍物的机械阻碍引起，而科氏力仅在“机械—科氏振荡”循环的一半时间内没有完全被气压梯度力平衡，起着回复力作用，使非平衡流转向成为新的平衡，故称该回复力为“障碍物激发的半周期科氏力”。完成一个完整的振荡后，与气压场平衡的新地转上/下坡流动与原上/下坡地转流具有相同空间型，但位置与原上/下坡地转流不同：在北半球（南半球）面朝上（下）坡方向，新地转上下坡流动是位于原上/下坡地转流左侧，也就是说波动向左传播（图1）。

### 3 β-障碍激发罗斯贝波的振荡机制

由于科氏参数随纬度的变化，对同样的气压梯度而言，低纬度的局地平衡地转流要快于高纬度的地转流。这样，即使没有地形（或者说，流体深度不随纬度变化），地转流在低纬度的质量输送要大于高纬度。因此，流向高纬度的地转流会导致质量辐合，而流向低纬度的地转流则导致质量辐散（图2）。从而，对于局地平衡地转流而言，科氏参数随纬度的变化，等价于沿极地方向抬升的地形障碍，故不妨形象地称其为β-障碍。β-障碍的经向梯度可以从由于科氏参数随纬度变化所导致的地转流散度推出。在β-平面浅水模式中，局地地转平衡流为：

$$u_{\text{local\_balanced}} = -\frac{g}{f_0 + \beta y} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (1)$$

$$v_{\text{local\_balanced}} = \frac{g}{f_0 + \beta y} \frac{\partial h}{\partial x}$$

其散度为  $-\frac{\beta g}{(f_0 + \beta y)^2} \frac{\partial h}{\partial x} \approx -\frac{\beta}{f_0} v_g$ 。这里， $v_g = \frac{g}{f_0} \frac{\partial h}{\partial x}$  是由  $f_0$ （平均科氏参数）定义的经向地转流。不难推出，当同样的经向地转流  $v_g$  流过经向地形  $H = H_0 - \epsilon y$  时（ $H$  表示流体实际深度， $H_0$  是平均深度， $\epsilon$  代表经向

地形坡度， $\epsilon > 0$  代表流体深度随纬度变浅），其引起的散度（也就是单位深度的质量散度）可表示为  $-\frac{\epsilon}{H} v_g \approx -\frac{\epsilon}{H_0} v_g$ 。因此，对于用  $f_0$  定义的地转流而言（即准地转近似），β-障碍等价于沿极地方向抬升的地形障碍，其单位深度的经向坡度为  $\beta/f_0$ 。

先从最简单的一维β-平面无辐散无地形正压模式出发，地转流仅沿南北方向流动。当地转流穿越纬度时，如同穿越沿极地方向抬升的地形障碍，在上坡（下坡）区，质量将出现辐合（辐散），导致部分流体流动方向改向为东西方向（图2）。改向为东西方向流动的流体穿越等压线，也就是非平衡的非地转流动。紧接着，穿越等压线的非平衡流动受到科氏力作用，转为与等压线平行。这就完成了一轮由β-障碍引起的“机械转向”和科氏力对非平衡流的“科氏转向”，即一个完整的由β-障碍引起的“机械—科氏”振荡（图2）。又由于在南北半球β-障碍都是沿极地方向抬升的，具有相同空间型的南北向新地转流型总是在原南北向地转流型的西侧，也就是说β-障碍引起的波动在南北半球均为向西传播。

至此已证实Bjerknes<sup>[8]</sup>的猜想：即罗斯贝波确实可以说是由地转流穿越β-障碍或地形障碍引起的质量辐合辐散激发的。β-障碍或地形障碍引起的质量辐合

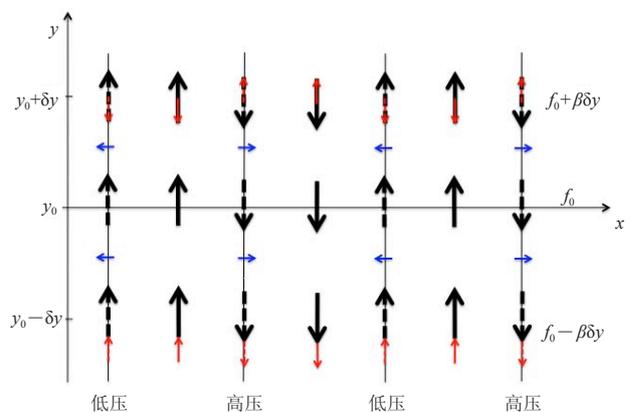


图2 机械—科氏振荡以及（一维无辐散）β-平面罗斯贝波（ $f_0 > 0, \beta = 0, \delta y > 0$ ）示意图

（ $y$ 轴为β-障碍的上坡方向（若  $f_0 > 0$ ，向北；若  $f_0 < 0$ ，向南）， $x$ 轴平行于β-障碍。黑色实线为气压极值的等位相线。黑色实线箭头为地转流，红色实线箭头为非地转平衡流，总平衡流即为二者之和。蓝色箭头表示非平衡非地转流，其形成是由于β-障碍导致辐散/辐合引起的机械转向。虚线黑色箭头为半周期科氏力作用在非平衡非地转流所导致的地转流倾向，虚线红色箭头为相应的非地转平衡流倾向。地转流倾向的分布显示，在北半球，面向β-障碍的上坡方向（北），地转流型向左（即向西）传播。在南半球，面向β-障碍的下坡方向（北），地转流型向左（即向西）传播）

辐散实质上是总平衡流沿等压线方向对质量进行输送造成的,其引起的非平衡流是对质量在穿越等压线方向重新分配的过程,使得被气旋/反气旋环流所包围的流体质量得以被“搬进搬出”。在无辐散模式中,由于障碍物激发的沿等压线方向的全部质量辐散(辐合)须被穿越等压线的非平衡流的辐合(辐散)所抵消,使得机械转向产生的非平衡流能够达到尽可能强,从而通过科氏力能迅速转变为地转流,故振荡频率快。而在有辐散模式中,只有一部分由障碍物激发的质量辐合(辐散)被非平衡流的辐散(辐合)抵消,因而非平衡流较弱,建立新的地转流型时间较长,振荡频率较慢。同时二者未抵消的散度部分留在原处,成为新高低压中心,形成与新的地转流型平衡的气压梯度。在二维模式中,还须考虑流体穿越障碍物的方向。假设流动方向与障碍坡度方向夹角为 $\alpha$ ,那么 $\alpha$ 越大,穿越障碍的流体越少,即参与机械-科氏振荡的部分越少,因而机械-科氏振荡也会较慢。

#### 4 基于振荡机制原理求解罗斯贝波频散关系

文献[3]在明确罗斯贝波的具体振荡机制及其回复力之后,又从其振荡机制原理出发推导求解罗斯贝波频散关系及其相关变量的“机制求解方法”。该方法主要遵循以下三个物理定律和原则:(1)质量能量守恒定律;(2)牛顿第二定律;(3)地球旋转特性。“机制求解”方法着眼于气块,因此其解具有局地性,不一定为标准振荡的解形式。由偏微分方程求得的平面波解,只是机制求解的一个特例。

根据文献[1],机械-科氏振荡的频率等于平均科氏参数和非平衡非地转流速乘积再除以地转流速。所以,对于相同地转流速而言,非平衡非地转流速越大,机械-科氏振荡的频率也越快,反之越慢。以 $\beta$ -障碍和经向地形 $H=H_0-\varepsilon y$ 为例。二者总(单位深度)坡度为 $(\beta/f_0+\varepsilon/H_0)$ 。根据文献[1]的“机制求解”方法(详见[1]),其机械-科氏振荡的频率为:

$$\omega = \frac{-\beta_{\text{effective}}}{(\partial h / \partial x) / h} \quad (2)$$

其中,  $\beta_{\text{effective}} = (\beta + f_0 \varepsilon / H_0) \cos^2 \lambda \cos^2 \alpha$ 。

这里, $\alpha$ 代表地转流与障碍梯度的夹角, $\lambda$ 为非平衡非地转流运动方向与水平面的夹角。当 $\alpha=0$ ,地转流沿障碍梯度方向,即一维的情况。当 $\lambda=0$ ,非平衡非地转流运动方向沿水平面方向。前面讨论的一维无辐散正压模式相当于 $\alpha$ 和 $\lambda$ 同时等于零的情况,此时 $\beta_{\text{effective}}$ 最大,等于单位深度坡度和科氏参数的乘积,因而,机械-科氏振荡频率最快。这是因为,当 $\alpha=0$ 时,地转流沿障碍梯度方向流动,其受到的阻碍作用

最强,障碍导致的机械转向也最强,随后的科氏转向也最快,从而导致机械-科氏振荡频率最快。当 $\alpha$ 接近 $90^\circ$ 时,地转流以极小角度穿越障碍,障碍物对流体阻碍作用很弱,其所激发的非平衡非地转流也很弱,导致机械-科氏振荡的频率几乎为零。当 $\lambda=0$ 时,地转流穿越障碍物所引起的沿等压线方向的质量辐散(辐合)全部需要被穿越等压线的非平衡流的辐合(辐散)所抵消。所以在无辐散模式中,机械转向最强,而且随后的科氏转向也最快,其产生的机械-科氏振荡最快(相同 $\alpha$ 而言)。这也说明在无辐散模式中,虽然总的流体运动所带来的质量输送散度为零,但非平衡非地转流运动所产生的质量输送辐散/辐合却为最大。而 $\lambda \neq 0$ 的情况则相当于有辐散正压(及斜压)模式。因为需要建立新的高低压中心,障碍物激发的质量辐合辐散不能全部被非平衡流沿穿越等压线方向带走。留在原地的部分,用来建立新的高低压中心。剩余的才被非平衡流沿穿越等压线带走,再被科氏转向成为新平衡流。所以,尽管总流体运动产生的质量输送有辐散,由非平衡非地转流运动所带来的穿越等压线质量输送辐散/辐合却要比 $\lambda=0$ 时弱(对于相同 $\alpha$ ),对应的机械-科氏振荡也较慢。由 $\sin^2 \lambda / \cos^2 \lambda$ 正比于罗斯贝波波长与罗斯贝变形半径之比的平方可知,空间尺度越大, $\lambda$ 越接近 $90^\circ$ 。因此对于空间尺度更大的扰动,更多的质量辐合辐散需要被用来建立新气压场,因而仅有较少部分由障碍物激发的质量辐合辐散须被非平衡流沿穿越等压线带走,因此大尺度扰动对应的机械-科氏振荡较慢。当 $\lambda$ 趋近 $90^\circ$ 时,总流体运动所带来的质量输送辐散/辐合趋近最大,几乎等于地转流穿越障碍物所引起的沿等压线方向全部的质量辐散辐合。被辐散辐合的质量并没有穿越等压线,几乎全部留在原地,用于建立新气压场。非平衡非地转流运动最弱,其所带来的质量输送辐散/辐合几乎为零,对应的机械-科氏振荡最慢(对于相同 $\alpha$ )。反之,当空间尺度小时(但仍满足准地转近视), $\lambda$ 很小。此时,仅需要一小部分地转流穿越障碍物所引起的质量辐散/辐合留在原地,便可建立起新的气压场。故非平衡非地转流运动所带来的质量输送辐散/辐合会很强,都用来补充地转流穿越障碍物所引起的沿等压线方向的质量辐合/辐散。于是虽然由障碍物激发的质量辐合辐散大部分都被非平衡流沿穿越等压线带走,总流体运动所带来的质量输送辐散/辐合却越弱。由于沿穿越等压线的非平衡流较强,相对应的机械-科氏振荡较快一些。由上所述,还可以得出,无辐散模式中的“无辐散”并非地转运动的“准无辐散”的

趋近值。地转运动的“准无辐散”是指穿越等压线的质量辐合辐散很小；而无辐散模式的“无辐散”是指净质量辐合辐散为零，但穿越等压线的质量辐合辐散反而很强，其大小等于地转流穿越障碍物所引起的全部质量辐散辐合。换句话说，准无辐散所趋近是无辐散是没有穿越等压线的非平衡流的无辐散。地转流穿越障碍物所引起的沿等压线方向的质量辐散辐合只要没有穿越等压线，就是留在了原地（等压线内），也就没有真正的散度。这一条件，仅有非平衡流为零才能满足。无辐散模式中的“无辐散”恰恰是非平衡流最强，其穿越等压线的散度最大，没有任何地转流穿越障碍物所引起的质量辐散辐合留在了原地。准确地说，在无辐散模式中，由于流函数取代了等压线，气压或质量已失去了它的原意，质量的堆积或流失都是瞬间完成的。所以，尽管无辐散模式所对应的实际情况是穿越等压（流函数）线最大散度最大，它所代表的有旋气流对应的还是准无（穿越等压线）辐散的地转流。以上讨论也解释了为什么准无辐散模式中超长波传播速度比短波慢得多，但在无辐散模式中，超长波传播速度却比短波快得多。正因为地转模式是准无辐散（并非无辐散），其对超长波的传播预报要比无辐散模式精确得多。

若以平面波解（详见[1]）的角度分析，振荡频率表达式变为：

$$\omega = \left( -\frac{\beta + \varepsilon f_0 / H_0}{k} \right) \frac{k^2}{k^2 + l^2} \frac{k^2 + l^2}{k^2 + l^2 + f_0^2 / gH} \quad (3)$$

$$= -\frac{(\beta + \varepsilon f_0 / H_0)k}{k^2 + l^2 + f_0^2 / gH}$$

(3) 式最右边振荡频率的最终表达式与求解偏微分方程方法一致。但基于振荡机制原理求解方法，可以清楚地解释二维QGSW平面罗斯贝波频散关系的物理含义。括号项是一维无辐散正压模式（等压线平行于障碍坡度方向）中的机械—科氏振荡频率，即给定障碍坡度和 $k$ 条件下的最快频率，称其为基础频率。单双下划线项均表示对基础频率的削弱作用。单下划线项，等于 $\cos^2\alpha$ ，表示地转流斜穿越障碍时对基础频率的减慢。若地转流平行于障碍，没有穿越障碍的气流，那么机械—科氏振荡也就不复存在。双下划线项，等于 $\cos^2\lambda$ ，表示非平衡流强度的减弱对基础频率的削弱。因为在有自由表面模式中，需要一部分质量辐合辐散留在沿地转流路径通道以便重建新的质量场，剩余的部分才用来转为非平衡流，导致进一步减慢振荡频率。地转流路径越宽，重建气压场需要的质量越多，因此激发的非平衡非地转流就越弱，振荡就越慢。

## 5 罗斯贝波的独特性

罗斯贝波与自然界大部分其他波相比，具有显著的独特性。如表1所示，其他波大多具有双向回复力，质点在力极值状态（不平衡，速度为零）和速度极值状态（平衡，作用力为零）之间振荡。而罗斯贝波则不同，科氏力在使质点回到平衡点的过程中只改变非平衡流的方向，不改变其速度。一旦达到平衡，原本在非平衡方向上的动量全部转为平衡方向，非平衡方向上不存在动量惯性，因此不再受到回复力的作用，这与其他波动截然不同。此外，罗斯贝波质点离开平衡点的方式也十分独特。平衡流是由于遇到物理障碍发生机械转向而变为非平衡流，而不是由于自身的惯性。简而言之，罗斯贝波的振荡过程包括两部分：几何约束不断激发非平衡流和单向科氏力回复平衡流。文献[1]把这种振荡叫作“机械—科氏振荡”，这种回复力叫作“障碍激发的半周期科氏力”，从而表征罗斯贝波在激发和回复过程中的两个特性：机械激发和单向回复力。

## 6 讨论与小结

用障碍物激发的机械—科氏振荡机制对罗斯贝波的解释与从QGPV守恒角度的经典解释实有异曲同工之妙。从地转位涡来看，其重点在于 $\beta$ -效应/地形激发的净质量散度所带来的涡度源汇项。地转流穿越障碍物时的质量输送，等同于涡度输送；质量输送的辐散辐合等同于涡度源汇。总平衡流的辐合产生的单位深度涡源，等于区域平均的科氏参数与 $\beta$ -效应/地形激发的单位深度质量辐合 $f_0(\beta / f_0 + \varepsilon / H_0)H_0v / H_0 = (\beta + f_0\varepsilon / H_0)v$ 。因此障碍物激发的质量辐合导致的单位深度涡源，相当于行星涡度和地形位涡的平流。在无辐散正压模式中，地转位涡等同于涡度；而在有辐散QG模式中，涡源通常改变位涡，而不是只改变涡度。因此，即使是同样的行星涡度平流，在考虑辐散条件下，罗斯贝波相速变慢。波长越长，扰动厚度在扰动位涡中所占的比例越大，（相对）涡度所占的比例越小，因而即使是同样的行星涡度平流，用来改变涡度的部分所占比例越

表1 罗斯贝波与流体中其他波动平衡破坏、平衡回复机制的比较

	流体中其他波动	罗斯贝波
平衡破坏机制	朝着不平衡方向动量惯性（有两个不平衡方向：向左或向右）	平衡流遇到某种几何约束（旋转速率/方向的变化、变浅/变深，变宽/变窄），从而激发非平衡流（也有两个不平衡方向：向左或向右）
平衡回复机制	双向回复力虽然能将振荡带回平衡点，但同时加速了朝反方向动量。这导致了朝反方向动量惯性，从而双向传播	单向的科氏力通过将非平衡流转为平衡流，将振荡带回平衡位置，因此在平衡点不存在往非平衡方向流动的动量，从而单向传播

小。这样，罗斯贝波振荡频率就越慢。这和作者从质量传输的辐散辐合角度所得出的结论一致。综上，两个观点看似截然不同，但实质相同，经典长波理论着眼涡度，遵循涡度守恒观点，本文着眼散度，遵循质量守恒观点。而准地转近似的本质恰恰保证了质量再分布与涡度再分布的一致性。

#### 参考文献

- [1] Cai M, Huang B. A New Look at the Physics of Rossby Waves: A Mechanical-Coriolis Oscillation. *J Atmos Sci*, 2013, 70: 306-316 DOI:10.1175/JAS-D-12-094.1.
- [2] Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J Mar Res*, 1939, 2: 38-55.
- [3] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. *J Meteor*, 1949, 6: 1-16.
- [4] Gill A E. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. New York: Academic Press, 1982: 662.
- [5] Holton J R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*(4th ed). New York: Academic Press, 2004: 535.
- [6] Mak M. *Atmospheric Dynamics*. Cambridge: Cambridge Press, 2011: 486.
- [7] Pedlosky J. *Geophysical Fluid Dynamics*(2nd ed). New York: Springer-Verlag, 1987: 710.
- [8] Bjerknes J. Die Theorie der aussertropischen Zyklonenbildung. *Meteor Z*, 1937, 54: 462-466.
- [9] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1940, 66 (Suppl): 68-87.

## 第八次全国动力气象学术会议在大同召开

### ■ 本刊编辑部

由中国气象学会动力气象学委员会、中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心等单位联合主办的“第八次全国动力气象学术会议”于2013年7月17—19日在山西省大同市召开。每四年举办一次的全中国动力气象学术会议依托中国气象学会动力气象学委员会的强大阵容，已连续32年成功举办，成为气象领域最有影响力的会议之一。

本次会议特邀黄荣辉院士、李崇银院士等专家做大会特邀报告，他们分别就东亚夏季风在20世纪90年代末年代际变化的内动力成因、气候动力学研究中的几点基本问题等方面做了精彩报告。两位华裔科学家——中山大学杨崧教授及夏威夷大学王斌教授，关于亚洲季风预测和西北太平洋副热带高压的可预测性

的报告更是引来讨论的热潮。随后，来自中国科学院、北京大学、南京大学、兰州大学、南京信息工程大学、解放军理工大学和中国气象局等20多个科研、教学、业务单位的百余名专家和研究生就动力气象学的基本理论、气候动力学、季风动力学、中小尺度动力学、陆气相互作用与边界层动力学等方面进行了广泛而深入的交流和讨论。年轻学者和老一辈科学家们切磋探讨、互通有无，为此次会议注入了活力。

经与陈文主任委员的友好协商，本刊也借此次会议向与会学者介绍了《气象科技进展》的特色与宗旨，并与动力气象委员会合作，广泛征集动力气象领域稿件，积极筹备动力气象专栏，以期为进一步促进我国动力气象学及大气科学的发展贡献力量。



图 黄荣辉、李崇银、杨崧和王斌（左一右）做特邀报告

（摄影：武亮，中国科学院大气物理研究所）

# 基于干旱/半干旱区协同观测网络的GLASS下行短波辐射产品精度验证及影响因素评估

胡永红<sup>1</sup> 白林燕<sup>1</sup> 王鹤松<sup>2</sup> 米晓楠<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院数字地球重点实验室, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3 地球科学与测绘工程学院, 中国矿业大学, 北京 100083)

**摘要:** 下行短波辐射 (Downward Shortwave Radiation, DSR) 是地表接收太阳辐射的重要组成部分, 是地表能量平衡和地气相互作用的重要驱动因素, 同时DSR的变化影响着天气过程与气候变化。遥感手段获取的DSR产品已成为陆面过程与气候变化研究的重要驱动参数, 对DSR数据的验证与评估能为相关研究提供必要的精度与可靠性信息, 同时反馈于相关数据产品的改进工作。使用干旱/半干旱区协同观测网络为研究评估数据源, 对新一代DSR产品 (Global Land Surface Parameters-Downward Shortwave Radiation, GLASS-DSR) 进行验证评估, 发现在中国北方干旱/半干旱区该数据与观测具有较好的一致性, 整体相对误差小于4%, RMSE小于 $140\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在不同站点评估效果有一定程度差异, 均一下垫面具有较好效果。研究也发现卫星观测辐射的精度受到时空尺度的影响, 卫星获取DSR存在明显的观测特征尺度。

**关键词:** 下行短波辐射, 干旱/半干旱区, 辐射收支

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.002

## Validation for Downward Shortwave Radiation of GLASS Product by the Coordinated Enhanced Observation

Hu Yonghong<sup>1</sup>, Bai Linyan<sup>1</sup>, Wang Hesong<sup>2</sup>, Mi Xiaonan<sup>1,3</sup>

(1 Key Laboratory of Digital Earth, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094 2 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 3 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

**Abstract:** As a driving force of the surface energy balance and the land-atmosphere interaction, downward shortwave radiation (DSR) is an important component solar radiation received in the land surface, which has already affected weather processes and climate change. Currently, DSR obtained by means of remote sensing products has become key parameters for land surface processes and climate change research, and validation for DSR datasets will provide necessary or reliability information of DSR datasets by errors evaluation, further improving next-generation DSR datasets. In this study, surface shortwave albedo of each station were derived from field measurements of the Coordinated Enhanced Observation Network to assess the new generation DSR product of Global Land Surface Parameters-Downward Shortwave Radiation, GLASS-DSR and evaluate its reliability. Good agreements were found between the field measurement and satellite results with overall relative errors fewer than 4% and RMSE fewer than  $140\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . It is heterogeneous among different observation sites, and better agreements were homogeneously achieved. The characteristic scale was also found for monitoring downward shortwave radiation variation, which is an important factor in influencing the accuracy of derived DSR.

**Keywords:** downward shortwave radiation, arid/semi-arid area, radiation budget

### 1 引言

太阳辐射是大气运动的重要能量来源, 是地表温

度和地表热通量的直接驱动因素。在大气层顶辐射收支保持着近似平衡, 而在地球系统内辐射传输过程非常复杂, 由卫星观测得到的年均辐射收支表明近50%的太阳辐射能量为地表所吸收, 这部分能量用于加热地表, 并通过感热通量、潜热通量和土壤热通量等与地表和大气进行能量交换, 进而影响地表能量平衡和陆面过程变化, 为近地层大气运动提供动力, 同时地

收稿日期: 2013年3月1日; 修回日期: 2013年4月27日  
第一作者: 胡永红(1979—), Email: yonghonghu@ceode.ac.cn  
资助信息: 中科院战略性先导科技专项 (XDA05090203);  
国家重点基础研究发展计划 (2009CB723904);  
干旱气象科学研究基金项目 (IAM201212)

表辐射收支是否平衡也与区域蒸散状况及水文过程有着密切关系<sup>[1-4]</sup>。

下行短波辐射 (Downward Shortwave Radiation, DSR) 是太阳辐射的主要组成部分, 目前研究者多采用台站与卫星观测两种手段对其进行量化<sup>[1, 5]</sup>, 其中卫星观测以大尺度连续空间观测优势得到了广泛应用。对地静止卫星已能够提供常规辐射观测业务<sup>[6]</sup>, 进而为流域蒸散和干旱研究服务<sup>[7]</sup>, 模型与高分辨率卫星影像结合, 能进一步提供小流域的辐射收支和蒸散状况<sup>[8-11]</sup>。然而, 由于辐射产品来自多种不同的观测系统, 存在研究目的与应用领域的差异, 这些辐射产品对于下行短波的量化也各有不同<sup>[3]</sup>, 尤其是作为陆面过程模式的重要驱动数据, DSR的时空分辨率在区域与流域尺度的应用仍存在一定问题<sup>[12]</sup>。因此, 对DSR的订正和评估有助于量化辐射产品的合理性与可靠性, 帮助研究者更好地开展相关科研工作。

新一代卫星辐射产品 (GLASS-DSR) 综合了多种卫星平台, 可生产高时空分辨率均一化DSR数据。本研究拟使用干旱区/半干旱区协同观测网络, 对GLASS-DSR产品进行验证与评估, 提供相应辐射产品的精度评估与验证信息, 为GLASS辐射数据产品的下一步改进及其在相关研究领域的应用提供基础信息。

## 2 数据与方法

鉴于数据源获取的限制, 本研究使用北方协同观测站网作为地面验证数据, 以开展GLASS-DSR的评估工作。因此, 本研究DSR的评估结果主要适用于干旱/半干旱区域的精度分析。

### 2.1 GLASS-DSR 产品

GLASS-DSR产品由北京师范大学全球变化研究院数据中心提供, 该数据由国内多家单位协作完成。

本研究使用了GLASS-DSR研究组提供的最终版数据。该数据空间分辨率为5km, 时间分辨率为3h, 其使用多个静止卫星 (GOES、FY、MSG和MTSAT) 和极轨卫星 (MODIS) 影像作为融合数据源。下行辐射数据采用查找表法进行产品反演, 首先利用MODTRAN大气辐射传输模型建立大气顶层辐亮度与地表DSR的关系, 建立不同卫星天顶辐亮度和地表DSR关系的查找表, 进而通过卫星观测数据估算地表DSR, 然后得到不同卫星平台的地表下行辐射进行融合, 即为本研究使用的GLASS地表DSR数据<sup>[13]</sup>。

### 2.2 中国干旱/半干旱区协同观测系统

中国干旱/半干旱区协同观测系统设立的目的是为了获得干旱/半干旱区的关键生态过程与气象参数, 认识该区域陆气相互作用特征, 为提高该区域的模式参数化水平和理解该区域生态环境演变规律服务。该观测系统涵盖了北方部分常规观测站及国家和地方建成的研究型观测站, 观测内容涵盖了近地层气象梯度、地—气能量和物质交换、地表生态和大气成分等内容。从2008年开始, 协同观测已进行了近4年的业务化运作, 每年定期开展系统的仪器维护、标定, 并进行相应的数据整编、处理等工作, 保证了所有观测台站在统一的观测标准下进行, 保证所获数据的可比性。由于部分台站存在缺测现象, 本研究选取使用了观测较为完整的站点 (表1) 数据, 主要使用其气象观测信息作为验证数据源, 协同观测的数据产品经过了数据处理人员的系统订正、去野点和滤波等处理工作, 保证了较好的数据质量。

### 2.3 验证方法

DSR主要受到太阳入射角度和大气状态影响, 而下垫面的影响较小, 通常辐射具有一定尺度的空间代表性。因此, 本研究在验证评估GLASS-DSR时, 直

表1 本研究使用的中国干旱/半干旱区协同观测系统台站信息

台站名称	海拔 (m)	冠层高度 (m)	平均降水量 (mm)	下垫面类型
阿柔	3033	2	396	亚高山草甸
盈科	1519	1	382	农田 (玉米)
临泽	1384	1	376	农田 (玉米)
玛曲	3423	2	599	亚高山草甸
沙坡头	1227	2	261	草原化荒漠
榆中	1965	2	382	典型草原
庆阳	1095	2	414	农田 (小麦)
东苏	970	2	287	荒漠化草原
锦州	22	1	463	农田 (玉米)
密云	350	25	584	落叶阔叶林
馆陶	42	15	536	农田 (小麦)

接采取台站与对应分析区域进行直接对比验证，具体如下：

(1) GLASS卫星影像处理：根据已有站点观测，对GLASS-DSR数据进行准确的空间定位。为了保证所得辐射结果的稳定性，提取台站对应区域 $3 \times 3$ 像元的辐射平均值作为验证值，然后对所有卫星影像进行批处理，生成卫星DSR的时间序列；由于目前协同观测数据只提供了2008和2009年的观测数据，而2008年处于协同运行的初期，可能存在一定的仪器观测不稳定因素，因此选择2009年作为GLASS数据的评估时段。

(2) 观测数据收集整理：收集2008和2009年协同台站气象观测数据，并从CNR四分量辐射计观测得到的辐射参数中选取DSR信息作为验证数据源。协同观测提供的数据信息为30min平均观测数据。

(3) 时序差异处理：对比GLASS-DSR与台站观测时间序列，发现两者在产品给出的时间频率方面存在一定差异，观测提供的是半小时平均数据，而卫星数据提供的是1h瞬时产品。为了将卫星数据产品与观测数据进行较好匹配，将台站数据平均到1h的时间尺度上进行分析，这样一方面使得观测与卫星数据时段理论上更为接近，另外避免了由于部分观测点偏差过大引起的误差。

(4) 时空尺度影响分析：为了探讨影响辐射的时空因素，本研究选择多种不同的空间尺度（像元： $1 \times 1, 2 \times 2, \dots, 10 \times 10$ ）评估不同尺度下辐射的变化特征，并结合下垫面状况说明是否存在较好的空间尺度；另外，对于辐射观测结果受到研究时段影响较大的特征，选择中午太阳高度角最大时刻作为评估时段，减小由于太阳入射角度偏差过大而引起的误差，探讨辐射的时间特征的可能影响。

## 2.4 验证指标选取

以台站观测作为真值评估卫星观测结果的偏差时，使用两种不同的评估指标分析卫星数据的整体精度与离散程度，分别为：

均方根误差（RMSE）：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (DSR_{si} - \overline{DSR_s})^2}$$

其中， $n$ 为卫星观测序列长度， $DSR_{si}$ 为第 $i$ 个卫星观测DSR值， $\overline{DSR_s}$ 为序列均值。

相对误差（RE）：

$$RE = \frac{DSR_s - DSR_f}{DSR_f}$$

其中， $DSR_s$ 为卫星观测DSR值， $DSR_f$ 为台站观测DSR值。

## 3 结果与讨论

为了获得对GLASS辐射数据精度比较完整的认识，本研究采用多种不同的时空分析尺度进行精度评估与验证研究。首先，以所有的待分析卫星与地表观测数据为对象，评估GLASS数据的总体精度；其次，选择不同的台站周边空间尺度和不同的观测时刻，分析短波下行辐射的变化特征，探讨影响产品评估的内因因素。

### 3.1 GLASS-DSR 总体精度验证

图1为2009年GLASS-DSR的验证评估散点图。从图上可以发现，2009年GLASS-DSR产品与台站观测具有很好的相关性，大部分站点 $R^2$ 达到了0.8以上。线性拟合的斜率也普遍达到了0.8左右，该结果表明GLASS数据产品与台站观测值非常接近，但整体评估稍低于台站观测。这可能与卫星提取下行短波方式有关，首先，卫星使用了瞬时观测数据，而台站为连续观测的平均；其次，卫星反演的DSR产品仍包含了一定程度的大气效应影响。

进一步将2009年7—9月的卫星与观测数据进行整合，分别计算GLASS-DSR产品的整体均方根误差和相对偏差，得到GLASS数据在不同观测台站的评估结果（表2）。结果表明，GLASS产品整体精度较好，相对误差基本在10%以内；个别站点（东苏）与新增的庆阳站点超过10%；密云站验证效果最好，相对误差约2%，且RMSE约为 $121 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。对于所有站点进行统计发现，产品总体相对偏差约为4%，与目前国际上经过同化的辐射数据集的评估结果较一致<sup>[14]</sup>。

### 3.2 空间尺度差异对卫星 DSR 观测的影响

通常认为空间尺度对于DSR的影响较小，但是小区域的地形变化可能导致一定辐射反演误差，辐射观测是否在空间尺度上存在一个最优阈值，以及空间观测是否对最终的辐射观测结果产生影响，仍是分析辐射产品精度时一个必须考虑的问题。本研究为了对这个问题进行剖析，选择了相对偏差较小的两个站点（密云站和阿柔站）进行分析，并考虑到两种不同下垫面之间的对比。这里设计的空间尺度变化为5~70km，也即是从 $1 \times 1$ 像元到 $14 \times 14$ 像元（图2）。可以看出，台站周边地形具有明显的起伏变化。

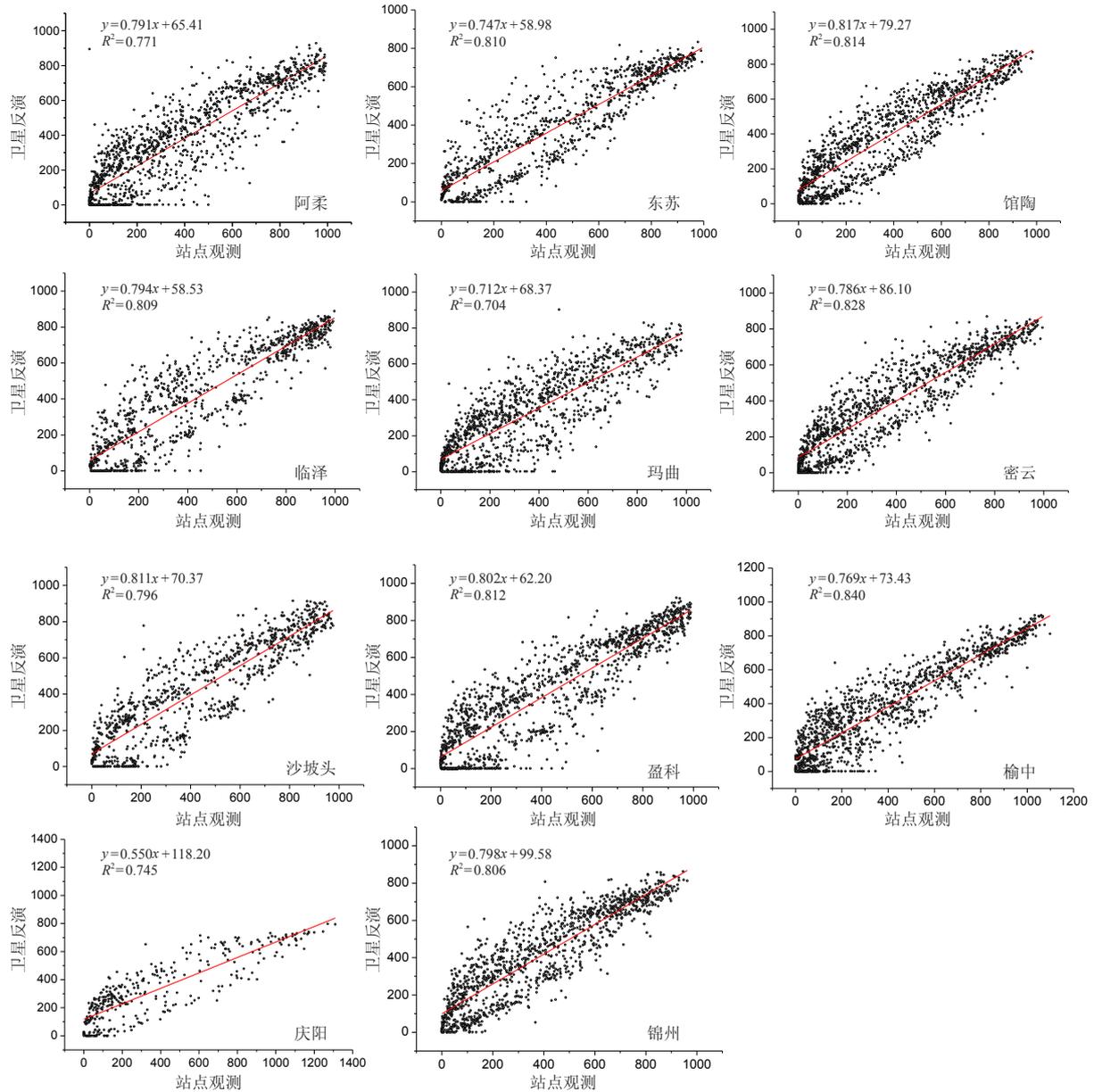


图1 DSR在协同观测台站的验证散点图 (单位:  $W \cdot m^{-2}$ )

表2 2009年GLASS-DSR产品验证结果

台站	RMSE ( $W \cdot m^{-2}$ )	RE (%)
阿柔	142.41	-2.7
盈科	139.33	-4.8
东苏	141.72	-11.9
密云	121.06	1.8
沙坡头	136.57	-2.4
榆中	130.12	-4.3
锦州	117.01	5.5
临泽	122.78	-6.8
玛曲	146.04	-9.6
馆陶	134.86	3.2
庆阳	197.85	-12
整体评估结果	139.07	-4

图3为利用GLASS-DSR得到的2009年第199日 (Julian日) 上午11:30密云站和阿柔站的DSR空间尺度效应的分析结果。可以看出, 随着空间尺度的增加, DSR降低, 空间尺度在20~25km之间时DSR的变化趋于稳定, 降低幅度约达到 $15 W \cdot m^{-2}$ 。对空间尺度变换过程中的偏差分析结果 (图3b) 也可以看到, 标准偏差随着空间尺度的增加而增加, 当空间尺度超过20km时, 由空间尺度变化导致的偏差趋于稳定。由上分析可见, DSR变化存在较为明显的空间依赖性, 具有观测特征尺度, 在20km以内其变化可能会受到

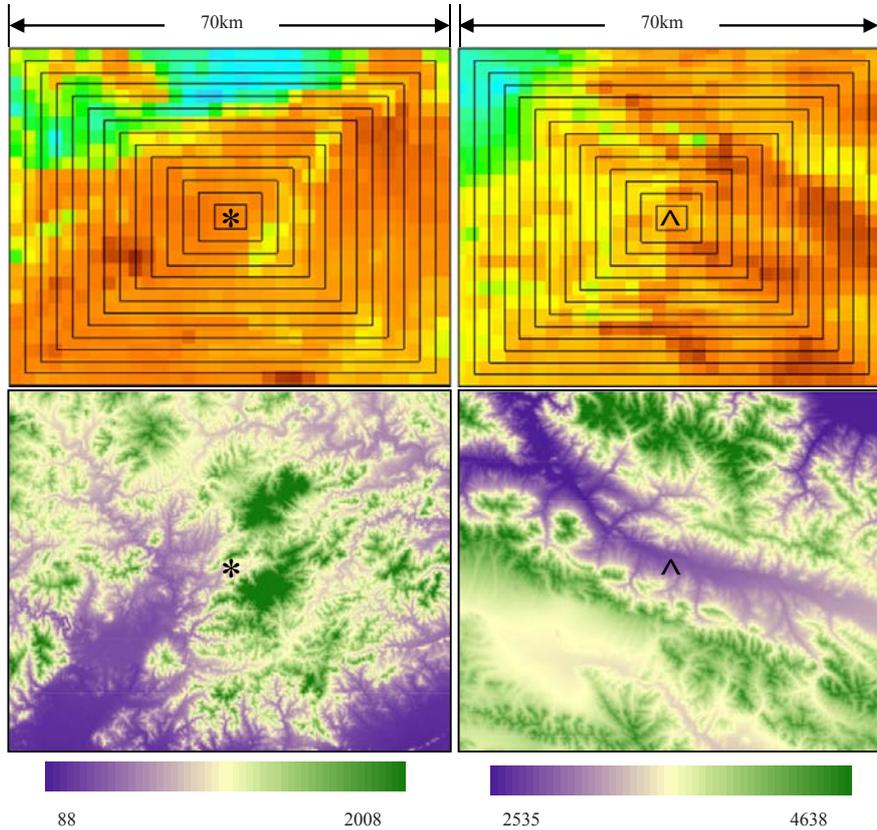


图2 密云站（左侧）与阿柔站（右侧）周边不同空间尺度的下行短波辐射（上方，暖色调代表DSR增加）与DEM（下方，单位：m）变化对比  
DSR初始网格大小为5km×5km，然后以5km为单位递加至70km×70km  
（图中，\*代表密云站所在位置，^代表阿柔站所在位置）

小尺度某些因素的影响，如地形变化或大气消减等（图2），而在20~25km之间开始趋于稳定，区域平均观测值这个时候可能主要受太阳入射角度等因素影响。随着空间尺度的进一步扩大（25~70km），区域DSR仍保持稳定，这进一步说明DSR更倾向于是一种宏观的地表特征参量，主要与太阳地球之间的距离变化、太阳入射角度以及观测点的纬度等因素有关<sup>[9]</sup>。在近正午时刻，空间尺度效应影响程度较小，约为观

测值的2%。但是从部分辐射数据集偏差评估的范围（<5%）来看，空间尺度应是精度评估与验证中需考虑的影响因素之一。

### 3.3 DSR的时间变化差异影响

DSR变化的主要影响因素是太阳入射角度，即与辐射观测的不同时刻有关。为了进一步认识GLASS-DSR在不同时间段可能受到的影响，分别提取密云站和阿柔站2009年7—9月不同UTC时间点（00:30和

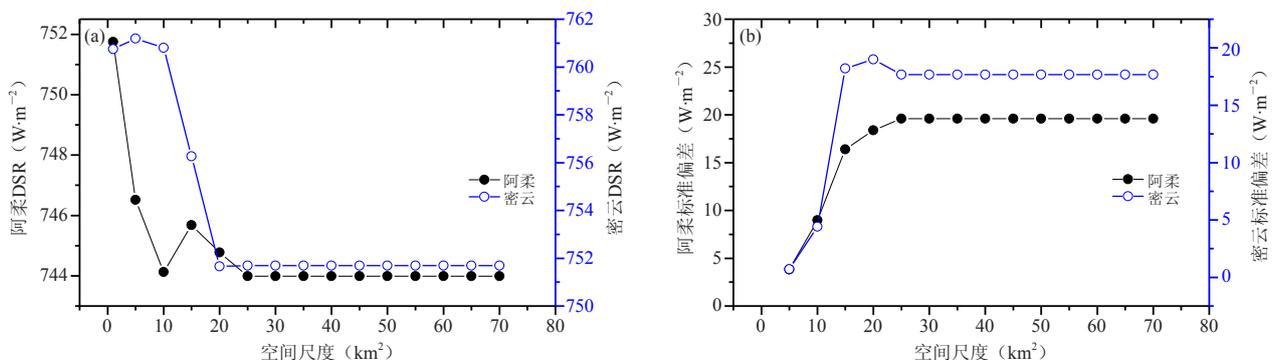


图3 空间尺度变化与DSR之间的关系：（a）DSR随空间尺度增加的变化，（b）对应空间尺度变化过程的标准偏差

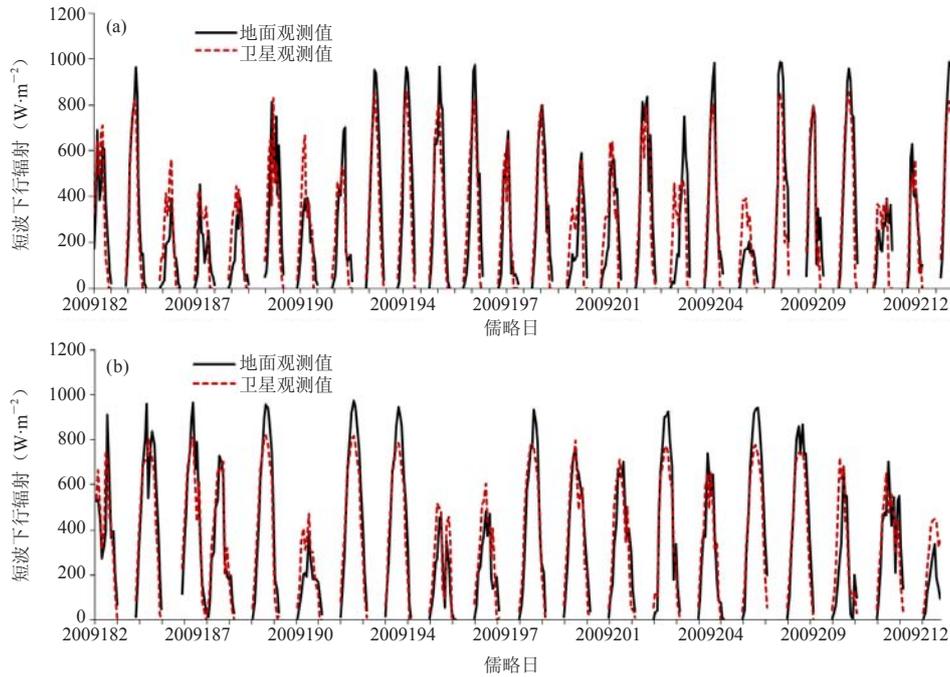


图4 2009年7-9月间密云站 (a) 与阿柔站 (b) DSR地表观测与卫星观测序列的对比

04:30) 数据进行了对比分析。图4为密云站和阿柔站卫星观测序列与台站观测序列的对比,可以看出卫星观测序列与台站观测序列具有较好的同步性,两者均能体现辐射的日变化特征。台站观测在高值区(约在正午时刻)与卫星观测具有较好的一致性,极少数观测点的差

异表明可能存在天气因素的影响,如台站观测受到云遮盖,而卫星观测区域较大,使得这种影响变小。

为了进一步认识辐射变化的不同时刻影响,分别提取00:30和04:30(UTC时间)的数据进行累计经验分布函数(Empirical CDF)分析(图5),以认识不

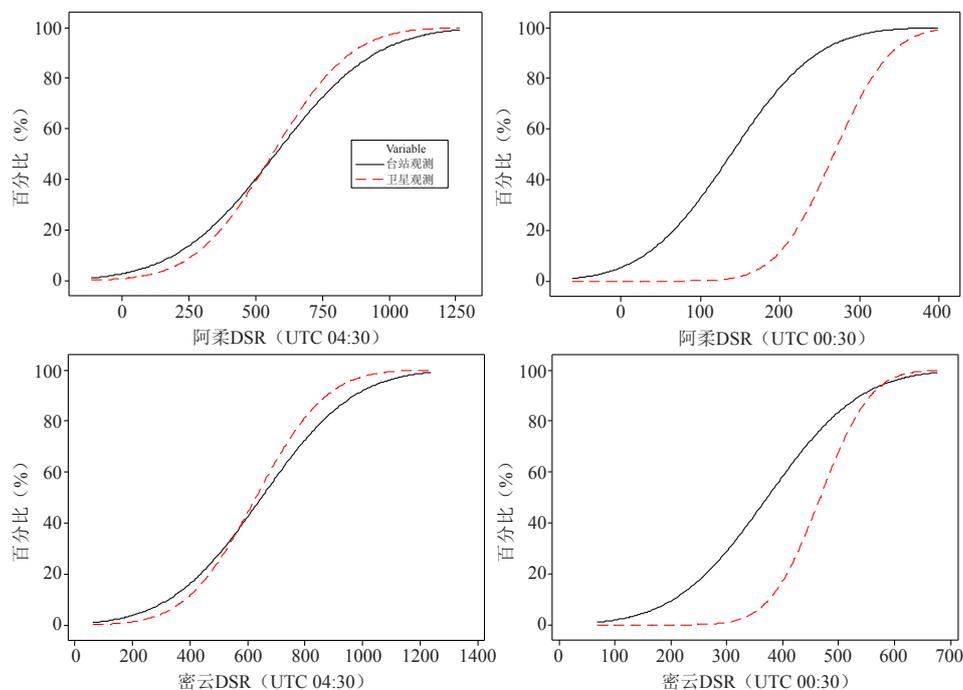


图5 密云站与阿柔站在不同时段DSR变化的累计经验分布函数(CDF)分析

同时刻、不同观测手段间的差异。阿柔站与密云站的分析结果表明,在04:30时刻,即当地时正午接近太阳直射的时候,卫星观测得到的DSR与台站观测具有非常一致的分布,也即说明正午时刻卫星观测受到其他因素的影响最小,是评估相对理想状态下卫星反演DSR的较好时段;而在00:30时刻,即刚刚日出不久,太阳高度角较低,此时卫星反演得到的DSR分布与台站有较大差异,卫星观测结果整体低于台站观测,这与此时太阳入射辐射在大气中经过的路径最长,受到的影响因素最多有关。

## 5 结论

本研究利用中国干旱/半干旱区协同观测网络提供的台站观测数据,对2009年7—9月GLASS-DSR数据在中国北方地区进行了精度验证以及相应辐射观测影响因素评估。结果表明,GLASS-DSR数据具有较好的精度,多个台站的评估统计结果表明其整体偏差小于4%,超过了部分国际综合同化辐射资料的评估精度。同时也必须注意到,卫星反演DSR应注意时空尺度的影响,通常随着空间尺度的变大,卫星观测得到的DSR变化逐步趋于稳定,大尺度的DSR与日地距离及太阳入射角度等宏观参数有关,而局地DSR观测可能存在较优观测尺度;从产品精度验证的角度而言,太阳近似直射的正午时刻为辐射验证较为理想的时段。

本研究使用的协同观测台站大部分位于中国干旱/半干旱区,植被下垫面多为草地等,未能利用更广泛的观测数据,如中国南方地区或人类影响较多的下垫面区域,因此评估结果具有一定程度的局限性,有待下一步工作改进。

### 参考文献

- [1] Bisht G, Venturini V, Islam S, et al. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97: 52-67.
- [2] Niemela S, Raisanen P, Savijarvi H. Comparison of surface radiative flux parameterizations - Part II. Shortwave radiation. *Atmospheric Research*, 2001, 58: 141-154.
- [3] Trenberth K E, Fasullo J T, Kiehl J. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90: 311-323.
- [4] Yang K, Pinker R T, Ma Y, et al. Evaluation of satellite estimates of downward shortwave radiation over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2008, 113, D17204, doi:10.1029/2007JD009736.
- [5] Becker R, Behrens K. Quality assessment of heterogeneous surface radiation network data. *Adv Sci Res*, 2012, 8: 93-97.
- [6] Paech S J, Mecikalski J R, Sumner D M, et al. A Calibrated, High-Resolution GOES Satellite Solar Insolation Product for a Climatology of Florida Evapotranspiration1. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45: 1328-1342.
- [7] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 2. Surface moisture climatology. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, 112, D11112, doi:10.1029/2006JD007507.
- [8] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A multiscale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 343-363.
- [9] Bastiaanssen W, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) - 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 1998, 213: 198-212.
- [10] Chen L, Yan G, Wang T, et al. Estimation of surface shortwave radiation components under all sky conditions: Modeling and sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 457-469.
- [11] Norman J M, Anderson M C, Kustas W P, et al. Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions. *Water Resources Research*, 2003, 39, 1221, doi:10.1029/2002WR001775.
- [12] 潘小多, 李新, 钞振华. 区域尺度近地表气候要素驱动数据研制的研究综述. *地球科学进展*, 2010, 25: 1314-1324.
- [13] 张晓通, 周公器, 吴浩然, 等. GLASS下行短波辐射产品使用手册\_V1.1. 北京师范大学全球变化数据处理与分析中心, 2012. <http://glass-product.bnu.edu.cn/wendangziliao/suanfawendang/61.html>
- [14] Troy T J, Fwood E. Comparison and evaluation of gridded radiation products across northern Eurasia. *Environmental Research Letters*, 2009, 4, 045008.

# 我国气象预警信息覆盖率的初步分析

孙健 姚秀萍 王丽娟 申贵仓

(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

**摘要:** 提高气象灾害预警信息发布覆盖面, 是加强气象灾害防灾减灾工作的关键。经专项评估表明, 2012年上半年我国气象预警信息覆盖率达到历史高值约为77%, 其中手机短信是气象灾害预警信息发布的最主要途径, 覆盖率为61.75%; 电视其次, 覆盖率为15.58%; 网络和其他途径的覆盖率分别为13.59%和3.00%。我国气象预警信息覆盖率呈上升趋势, 手机和网络正成为预警信息最为主要的发布手段。因此, 要充分发挥信息产业新技术在气象预警信息传播中的作用, 使公众接收气象灾害预警信息的时间缩短, 使得气象预警信息传播量和信息传播范围得到进一步扩展。

**关键字:** 气象预警, 覆盖率

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.003

## A Preliminary Analysis on the Coverage of Weather Warning in China

Sun Jian, Yao Xiuping, Wang Lijuan, Shen Guicang

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

**Abstract:** A high coverage of weather warning is the key to improve the ability of weather disaster prevention and mitigation. The special assessment shows that the coverage of weather warning has reached an all-time high: 77 percent in the first half of 2012; In all mass mediums, mobile phone messages take the first place, by which the coverage has accounted for 61.75 percent; Television takes the second place, by which the coverage has accounted for 15.58 percent; Internet and the rest ways have respectively reached 13.59 percent and 3 percent. With the coverage of weather warning increasing, mobile phones and network are becoming the most important mediums for communication. The introduction of the information technology to weather warning dissemination will shorten the warning-receiving time for the public, widen the range and increase the amount of information dissemination.

**Keywords:** weather warning, coverage

### 1 引言

在全球气候变化背景下, 极端天气气候事件频发, 人民生命财产和经济社会发展面临的气象灾害风险越来越大, 各级党委政府和社会各界对气象防灾减灾工作提出了更高要求。提高气象预警信息发布的覆盖面是防灾减灾的关键环节, 是防御和减轻灾害损失的重要基础。《关于加强气象灾害监测预警及信息发布工作的意见》中, 明确提出了“十二五”末我国气象灾害预警公众覆盖率将达到90%以上。因此, 定量评价气象灾害预警信息覆盖率, 将有助于分析气象预警信息发布需求, 完善气象预警发布机制, 同时也将

为开展均等、优质、高效的气象防灾减灾工作提供科学依据。

覆盖率的概念已广泛应用于林业、电信、教育和社会保障等领域, 近年来, 随着强化气象防灾减灾工作的要求, 气象行业专家开始对气象预警信息覆盖率的测算进行探讨。姜爱军、吉莉等<sup>[1-3]</sup>利用抽样调查方式得出江苏省、重庆市北碚区、沙澧河流域等地的预报服务覆盖率约为95%; 罗艳等<sup>[4]</sup>采用问卷调查的方法对江苏省农村气象灾害预警信息接收情况进行了研究; 中国气象局和国家统计局对2009年全国公众的抽样调查显示, 2009年全国平均气象灾害预警覆盖率为82.3%<sup>[5]</sup>, 部分省市先后公布了区域气象预警信息覆盖率。中国气象局发展研究中心计算得出目前气象预警信息覆盖率为71%<sup>[6]</sup>。

我国针对区域乃至全国的气象灾害预警信息覆盖率测算虽已取得了初步成果, 但是研究尚处于探索阶段, 存在测算结果差异大、数值明显偏高, 全国覆盖

收稿日期: 2012年9月20日; 修回日期: 2013年1月18日  
 第一作者: 孙健(1960—), Email: sunjian@cma.gov.cn  
 资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106037);  
 国家软科学(2011GXQ4B026); 气象软科学研究项目[2012]第033号

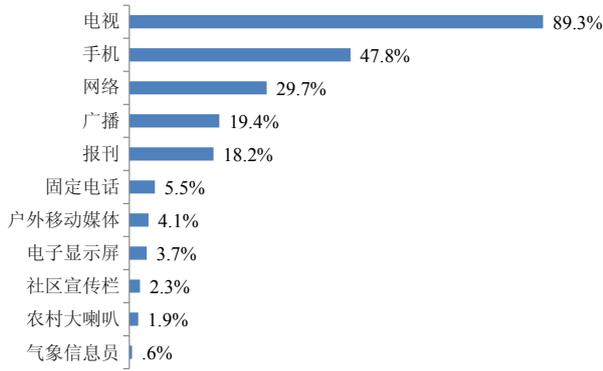


图1 全国公众获取气象信息渠道分布图

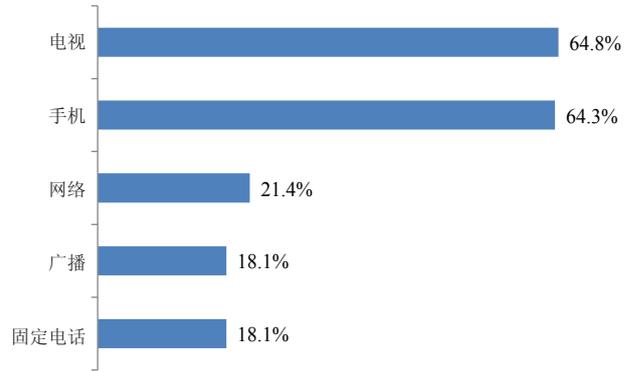


图2 公众希望接收气象预警信息的渠道

率测算方法研究少，缺乏权威、统一的算法等问题。因此，本文将围绕在目前气象预警信息发布的技术水平下，全国气象预警信息发布能力的现状如何、气象灾害预警信息发布覆盖率究竟达到多少等热点问题进行研究，试图通过客观计算的方法，分析并解答以上问题。

## 2 研究数据

中央电视台联播天气预报节目的收视率来源于央视索福瑞媒介研究有限公司及华风气象影视信息集团统计数据；省级电视频道气象节目的收视率来源于《气象现代化指标研究》<sup>[6]</sup>，按10%计算；手机短信和彩信接收用户数来源于《关于气象灾害预警信息发布能力及机制建设的调研报告》<sup>[7]</sup>和《全国通信业发展统计公报》<sup>[8,9]</sup>；中国天气网（含插件合作）用户数来源于中国天气网统计数据；其他途径传播的气象预警信息覆盖率来源于《气象现代化指标研究》，按3%计算<sup>[6]</sup>。2007年人口基数来源于第五次人口普查数据（2000年）<sup>[10]</sup>，为12.95亿；2011年和2012年全国总人口基数依据第六次人口普查数据（2010年）计算<sup>[11]</sup>，2010年全国人口13.39亿，以2000—2010年全国人口年平均增长率0.57%<sup>[11]</sup>作为2011年和2012年人口增长率，则2011和2012年全国人口基数分别为13.47亿和13.54亿。

## 3 研究方法

### 3.1 气象预警信息覆盖率定义

气象预警信息覆盖率是指气象预警信息通过电

视、网络、手机等传播媒介以及预警发布机制再传播等手段送达用户的水平。在具体的计算中，气象预警信息预警覆盖率采用预警信息覆盖到人的比例来度量。

### 3.2 气象预警信息覆盖率组成因子

根据2010年全国公众气象服务满意度调查结果可知<sup>[12]</sup>，电视、网络 and 手机是气象预警信息传播的三大手段（图1），与此相比，广播、电话和报纸等渠道的使用率相对较低。从公众希望获取气象预警信息的渠道分布来看<sup>[13]</sup>，电视、手机和网络仍是三个主要方式（图2）。因此，本文将气象预警信息传播手段分为四类，分别是电视、手机和网络及其他（包括广播电台、气象信息员等）。气象预警信息覆盖率由4个覆盖率因子组成，分别是电视发布气象预警信息覆盖率、手机发布预警信息覆盖率、网络发布预警信息覆盖率和其他手段发布预警信息覆盖率。具体见表1。

### 3.3 气象预警信息覆盖率计算方法

气象预警信息发布手段包括电视、手机、网络和其他。根据最新统计，目前全国手机用户共计约10.8亿<sup>[12]</sup>，占全国总人口数的近80%，已经成为气象预警信息发布的最主要手段之一。因此，本文在计算气象预警信息覆盖率时，把手机发布气象预警信息覆盖率作为核心，考虑到部分手机接收用户同时还使用电视、网络和其他方式接收气象预警信息，在计算中要扣除手机发布预警信息覆盖率与电视、网络发布预警

表1 气象预警信息覆盖率组成因子及其含义

组成因子	因子含义	
气象 预警 信息 覆盖 率	电视发布气象预警信息覆盖率	中央电视台联播天气预报节目发布预警信息覆盖率 各省电视频道气象节目发布预警信息覆盖率
	手机发布气象预警信息覆盖率	手机短信和彩信发布预警信息覆盖率
	网络发布气象预警信息覆盖率	中国天气网（含插件）发布预警信息覆盖率
	其他手段发布气象预警信息覆盖率	广播电台、海洋气象广播电台、气象热线、121声讯、农村高音喇叭、 气象信息服务站、气象信息员等发布预警信息覆盖率

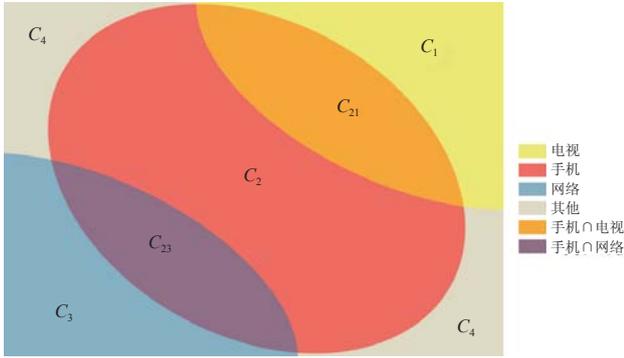


图3 气象预警信息覆盖率计算示意图（整个矩形表示全国气象预警信息覆盖率C）

信息覆盖率的重复部分。由于其他手段所占份额相对较少，故忽略手机与其他因子的重复部分。

气象预警信息覆盖率计算的示意图见图3，气象预警信息覆盖率（单位：%）的计算公式见公式（1），

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 - C_{21} - C_{23} \quad (1)$$

式中，C为全国气象预警信息覆盖率； $C_1$ 为电视发布气象预警信息覆盖率，包括中央电视台联播天气预报节目发布预警信息覆盖率和各省电视频道气象类节目发布预警信息覆盖率两部分； $C_2$ 为手机发布气象预警信息覆盖率； $C_3$ 为网络发布气象预警信息覆盖率； $C_4$ 为其他手段发布预警信息覆盖率； $C_{21}$ 为手机发布预警信息覆盖率与电视发布气象预警信息覆盖率的重复计算部分； $C_{23}$ 为手机发布预警信息覆盖率与网络发布气象预警信息覆盖率的重复计算部分。

### 3.3.1 电视发布气象预警信息覆盖率 ( $C_1$ )

以气象节目收视率来表示。自2007年，气象和广电两部门联合建立了气象灾害预警信息发布通道后，每逢灾害性天气发生时，电视台或气象电视节目中都会对气象灾害预警信息进行及时播发。考虑到数据的可得性和可靠性，本文将选取气象节目收视率来近似计算电视发布气象预警信息覆盖率。中央电视台联播天气预报节目发布预警信息覆盖率按照CCTV1和CCTV新闻频道联播天气预报节目的收视率计算；各

省电视频道气象类节目发布预警信息覆盖率按照省级电视频道气象节目的收视率计算。

### 3.3.2 手机发布气象预警信息覆盖率 ( $C_2$ )

以手机信息接收人数占全国总人口比重计算。计算中用到的手机信息接收人数按照手机短信和彩信接收用户数计算。具体方法如下：根据《关于气象灾害预警信息发布能力及机制建设的调研报告》<sup>[7]</sup>可知，2012年全国手机用户为10.8亿，全国31个省市中预警信息全网发布的省份有24个，故实际接收人数大约为  $10.8 \text{亿} \times (24/31) = 8.361 \text{亿}$ 。

### 3.3.3 网络发布气象预警信息覆盖率 ( $C_3$ )

以网络日均用户数占全国总人口比重表示；网络日均用户数采用中国天气网（含插件合作）用户数计算。需要说明的是，中国天气网能够第一时间权威发布气象预警信息，因此本文认为中国天气网的用户均能通过网络获得气象预警信息，这就意味着网络发布气象预警信息的覆盖人数可用中国天气网日均用户数表示。以2012年上半年为例，中国天气网日均用户数约为1.8404亿。

### 3.3.4 其他手段发布预警信息覆盖率 ( $C_4$ )

以通过广播电台、海洋气象广播电台、气象热线、121声讯、农村高音喇叭、气象信息服务站和气象信息员等手段发布预警信息的覆盖率计算。经中国气象局发展研究中心统计，约为3%<sup>[6]</sup>。

### 3.3.5 手机和电视发布预警信息覆盖率重复部分 ( $C_{21}$ )

主要考虑部分电视观众拥有手机，亦可通过短信接收气象预警信息，为避免重复计算，需扣除。手机和电视重复计算的接收人数=使用电视接收的人数×同时使用手机和电视接收的样本数占使用电视接收样本数的比例（简称“手机和电视重复比例”）。手机和电视重复比例的计算方法：参考2010年全国公众气象服务满意度调查数据<sup>[7]</sup>，使用电视接收的样本数为46191人，同时使用手机和电视接收的样本数为21362人，故手机和电视重复比例为  $21362/46191=46.25\%$ 。

表2 气象预警信息覆盖率统计表

评价指标	2007年		2011年		2012年		
	接收人数 (亿)	覆盖率 (%)	接收人数 (亿)	覆盖率 (%)	接收人数 (亿)	覆盖率 (%)	
电视 ( $C_1$ )	中央台天气预报节目	1.288	9.91	0.795	5.90	0.756	5.58
	各省电视频道气象节目	1.339	10.00	1.347	10.00	1.354	10.00
手机 ( $C_2$ )	手机短信和彩信	0.970	7.46	4.931*	36.60	8.361	61.75
网络 ( $C_3$ )	中国天气网	0	0	0.400	2.97	1.840	13.59
其他 ( $C_4$ )	广播电台等	0.389	3.00	0.404	3.00	0.406	3.00
扣除 ( $C_{21}$ )	手机与电视覆盖率重复部分	—	—	0.985	7.31	0.965	7.13
扣除 ( $C_{23}$ )	手机与网络覆盖率重复部分	—	0	—	0	1.327	9.80
气象预警信息覆盖率 (C)		—	30.37	—	51.16	—	76.99

注：\*为参考2011年全国通信业发展统计公报：全国手机用户为9.862亿，约一半用户进行短信定制或接收部分省份全网发布的信息，即4.931亿。

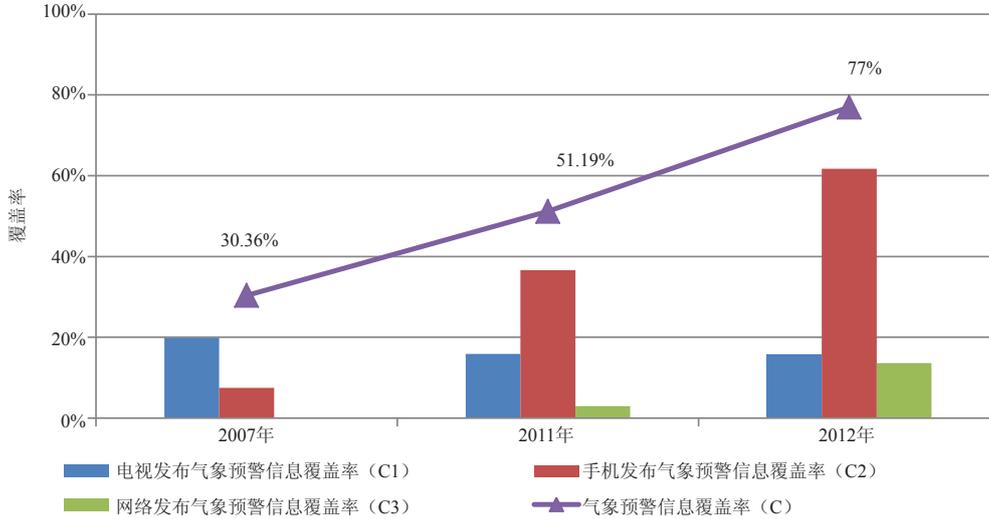


图4 2007、2011和2012年气象预警信息覆盖率变化图

### 3.3.6 手机和网络发布预警信息覆盖率重复部分 (C<sub>23</sub>)

主要考虑因中国天气网大部分用户有手机，亦可通过短信接收气象预警信息，为避免重复计算，需扣除。以2012年为例，参考中国互联网络发展状况统计报告（2012）<sup>[14]</sup>，全国网民为5.38亿，其中手机网民3.88亿，故只使用电脑上网的中国天气网用户为  $1.8404 \times (3.88/5.38) = 1.327$  亿。

## 4 研究结果

根据气象预警信息覆盖率计算公式（1）和评价指标的计算方法，本文对2007、2011和2012年气象预警信息覆盖率进行计算，评价结果见表2和图4。由表2和图4可知，近年来，我国气象预警信息的覆盖率有逐年上升的势头，特别是2012年上半年我国气象预警信息覆盖率达到历史高值，约为77%，其中手机是气象预警信息发布的最主要途径，覆盖率为61.75%，电视其次，覆盖率为15.58%，网络和其他途径的覆盖率分别为13.59%和3.00%。值得注意的是，手机逐渐成为提升气象预警信息覆盖率的主要手段。

## 5 建议与讨论

### 5.1 建议

本文针对全国气象预警信息覆盖率问题，从气象预警发布手段和发布能力的现状出发，提出了一种客观计算方法，通过收集权威、可信的统计数据，测算出2007、2011和2012年上半年全国气象预警信息覆盖率的现状值。本文的相关研究结论对于提高气象预警传播效率、扩大传播范围具有一定的参考价值。

（1）在现有技术水平下，手机对于提升气象预警信息覆盖率作用明显，建议充分发挥手机微博、彩

信和天气通等快捷、及时的信息传播方式在预警信息发布中的作用，既可以缩短公众接收气象预警信息的时间，又在一定程度上缓解手机短信发送依赖发送速率的问题，使得气象预警信息传播量和传播范围得到进一步扩大。

（2）电视仍是气象预警信息发布的基础手段，特别是“最后一公里”地区的居民接收气象预警信息的首选方式仍是电视。目前，气象节目的收视率已处于较为稳定的水平，因此，建议充分利用广播电视人口综合覆盖率高特点，开发电视终端发布气象预警信息的新技术和新方式。

（3）建议密切关注信息技术的发展趋势，加强通信业和信息产业新技术在气象预警信息发布中的应用，使信息被动接收变为主动推送，提高预警信息发布的有效性。

### 5.2 讨论

全国气象预警信息覆盖率是当前一个热点问题，文献中常用的抽样调查和问卷调查方法存在调查周期长、成本较高、调查数据质量受调查规范程度的影响大等问题，本文则探索一种方便、快速的统计数据算法，对于覆盖率评价具有借鉴作用。但是，本研究也存在以下局限：（1）部分数据不易获得，计算结果易受数据来源的影响，存在不确定性；（2）手机发布气象预警信息覆盖率采用了全网发布省份的理论数字，可能会造成计算值比实际值偏高。

气象预警信息发布的有效性直接影响气象防灾减灾效益，今后研究中应研发更为合理、科学的预警信息发布能力评价指标，引入气象预警信息接收率，细化覆盖率评价指标，挖掘权威数据，比对多种方法的

计算结果, 为提高气象预警信息发布有效性提供参考依据。

致谢: 在气象预警信息覆盖率的计算中, 华风气象影视信息集团、中国气象局发展研究中心、中国气象局减灾与公共服务司、中国天气网提供了宝贵的统计数据; 惠建忠、裴顺强提供了背景材料及数据, 并协助与相关单位的沟通协调; 吕明辉对覆盖率计算提出中肯建议, 在此致以诚挚谢意。

#### 参考文献

- [1] 姜爱军, 屠其璞, 陈广昌, 等. 气象预报服务效益评估方法研究——以暴雨预报服务为例. 气象科学, 2008, 28(4): 435-439.
- [2] 吉莉, 苟思, 李光兵, 等. 灾害性气象预警服务效益评估的研究. 安徽农业科技, 2011, 39(23): 14200-14201.
- [3] 王颖, 程锦霞, 白红霞, 等. 沙澧河流域防汛气象预报服务效益评估方法. 气象与环境科学, 2009, 32(4): 44-46.
- [4] 罗艳. 江苏省公众和农业气象服务效益研究. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [5] 蒋琪, 杨翼. 气象灾害预警覆盖率达85%, 短信或成发布重要手段. (2011-07-20). <http://env.people.com.cn/GB/15201768.html>.
- [6] 中国气象局发展研究中心. 气象现代化指标研究. 北京: 中国气象局发展研究中心, 2012.
- [7] 中国气象局减灾与服务司. 关于气象灾害预警信息发布能力及机制建设的调研报告. 北京: 中国气象局减灾与服务司, 2012.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部. 2007年全国通信业发展统计公报. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2008.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 2011年全国通信业发展统计公报. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2012.
- [10] 国家统计局. 第五次全国人口普查数据. 北京: 国家统计局, 2000.
- [11] 国家统计局. 第六次全国人口普查数据. 北京: 国家统计局, 2010.
- [12] 中国气象局公共气象服务中心. 2010年全国公众气象服务满意度评价报告. 北京: 中国气象局公共气象服务中心, 2010.
- [13] 中国气象局公共气象服务中心. 2012年全国公众气象服务满意度评价报告. 北京: 中国气象局公共气象服务中心, 2012.
- [14] 中国互联网络信息中心. 中国互联网络发展状况统计报告. 北京: 中国互联网络信息中心, 2012.

## 教育部大气科学类专业教学指导委员会在南京成立

■ 刘琛劼

2013年9月24日, “教育部高等学校大气科学类专业教学指导委员会成立暨第一次工作研讨会”在南京大学召开。中国气象局共有7人入选本届大气科学类专业教学指导委员会, 中国气象局党组副书记、副局长许小峰研究员被聘为副主任委员。研讨会上, 许小峰做了题为“气象部门人才队伍建设现状与需求”的特邀报告, 就气象部门人才现状、稀缺人才领域、专业建设意见等方面进行了阐述。

据介绍, 目前我国开设大气科学本科专业的高校共有14所, 即北京大学、浙江大学、南京大学、南京信息工程大学、成都信息工程学院、解放军理工大学、云南大学、兰州大学、广东海洋大学、中国海洋大学、中国农业大学、沈阳农业大学、中山大学和中国科技大学。另外, 清华大学将于2015年开始招收大气科学本科专业学生。目前在校本科生 8428人, 研究生1687人。高校拥有大气科学专业的全职教师约 610



(照片由南京大学提供)

人, 其中教授180人, 副教授207人, 讲师223人。

研讨会上, 以下几个问题得到了各位代表的高度关注: 一、目前大气科学类专业二级学科设置数量偏少; 二、通识教育与行业需求的衔接; 三、部分高校对于教育改革及对外交流的优秀示范; 四、专业教材出版量过少, 教师编写教材积极性较低。

(作者单位: 中国气象局人才交流中心)

# 风廓线雷达在北京市气象局的业务应用

宋巧云 孙成云 梁丰 王令 杨立民

(北京市气象局, 北京 100089)

**摘要:** 简要总结了近年来风廓线雷达探测资料在北京市气象局的业务应用情况。风廓线雷达为实时监测、分析天气系统尤其是中小尺度天气系统的发生、发展提供了可能。其资料直接或二次开发后应用到天气监测、个例分析中, 有利于加强预报员对中小尺度天气系统物理机制的进一步认识和理解, 提高短时临近预报水平。风廓线雷达和微波辐射计配合使用, 可以构建特种探空, 用于补充常规探空时空分辨率的不足。该文目的旨在为风廓线雷达的业务应用提供更好的参考和借鉴。

**关键词:** 风廓线雷达, 北京, 天气预报, 业务应用

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.004

## The Business Application of Wind Profiler Radar in Beijing Meteorological Bureau

Song Qiaoyun, Sun Chengyun, Liang Feng, Wang Ling, Yang Limin

(Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089)

**Abstract:** The paper briefly summarized the business application of wind profile radar data in Beijing Meteorological Bureau in recent years. Wind profiler radar provides the possibility for real-time monitoring and analyzing the occurrence and development of weather especially the medium and small scale systems. It is helpful to have a better understanding of medium and small scale weather system physical mechanism for the weatherman so as to improve the nowcasting forecast level, if the direct or processing data of wind profile radar is applied to weather monitoring and any case study. Wind profiler radar and microwave radiometer, used in conjunction, can build special soundings to make up a deficiency in time and space resolution of conventional soundings. This paper aims at providing a better reference to wind profile radar applications.

**Keywords:** wind profiler radar, Beijing, weather forecast, business application

### 1 引言

北京是全国建设风廓线雷达最早的省市之一。为满足奥运会等重大活动气象保障服务工作的需要, 2003年北京市气象局开始布设风廓线雷达, 截至2012年共有4部(图1), 分别位于延庆(探测高度8~12km)、海淀(探测高度3km)、南郊观象台(探测高度12~16km)和上甸子(探测高度6~8km)。其中延庆、海淀和南郊观象台为国产设备(中国航天科工集团二院23所研制), 均为每6min获得一组廓线资料; 上甸子风廓线雷达为进口设备(Visala公司研制), 每30min获得一组廓线资料。另外, 北京市气象局还有一部用于科研的AIRDA3000型车载边界层风廓线雷达, 可用于实时连续测量从地面50m至高空3500m范围内的水平风和垂直风廓线以及

多普勒谱宽和光学湍流廓线。

风廓线雷达资料所具有的高时间、空间(垂直方向)分辨率特征, 对于研究、捕捉中小尺度天气系统, 分析其物理结构、机制等方面具有十分重要的作用。通过近几年的业务应用, 风廓线雷达资料已逐渐成为北京市气象局预报员严密监测天气、做好短时临近预报及天气个例总结中必不可少的观测资料之一。

本文目的旨在系统性归纳和总结北京市气象局基于风廓线雷达资料近年来所开展的相关业务研究和应用情况, 以为风廓线雷达的业务应用提供更好的参考和借鉴。

### 2 风廓线雷达在北京市气象局的业务应用情况

#### 2.1 用于天气系统物理结构的精细分析

##### 2.1.1 单部风廓线产品的直接业务应用

风廓线雷达产品业务应用中最多的是风廓线雷达水平风廓线资料, 通过对天气尺度及中小尺度天气

收稿日期: 2012年12月4日; 修回日期: 2013年7月4日  
第一作者: 宋巧云(1980—), Email:song-qiaoyun@163.com  
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306076)

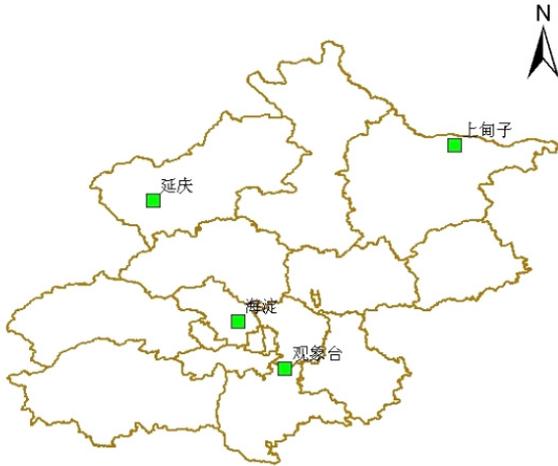


图1 北京市气象局现有风廓线雷达布局图

系统的风场结构、发生发展动力机制进行不断总结分析,提炼概念模型、经验指标,加强预报员对天气系统的认识和理解,为天气监测、预报提供帮助。

(1) 为天气过程及环境场的精细分析提供了可行性

大气水平风场垂直廓线资料可以方便、直观地用于分析大气冷暖平流、风的垂直切变以及冷暖空气交汇的空间结构等;可以直接应用于灾害性天气的监测和天气过程总结,已成为近年来北京市气象局用于天气个例分析中必不可少的资料之一<sup>[1-10]</sup>。根据风速随高度的变化可以直观地反映大气风场垂直切变是否有利于对流的发展;风向随高度的顺转或逆转可结合热成风原理实时监测单站上空冷暖平流作用情况,进而判断大气稳定度变化。王令等<sup>[11]</sup>详细剖析了两次降水过程发生前后风廓线雷达资料的风场特征,揭示了两次暴雨过程中,大气环境背景场的物理特征及所起的作用。虽然都为暴雨过程,但2009年7月13日天气过程发生前,整层为深厚的偏南暖湿气流,冷空气从3~6km高度插入,与低层的暖湿气流形成上层干冷、下层暖湿的垂直分布特征,促使对流发展,随着冷空气的向下扩展,降水趋于结束;而2008年8月14日降水过程是冷空气从低层楔入,暖湿气流被迫抬升,导致对流发展。

(2) 为中小尺度系统发生发展的物理机理分析提供了可能

基于风廓线资料发现低层偏东风与北京部分降水天气的密切关系,并提出概念模型。郭虎等<sup>[12,13]</sup>通过分析2006年7月9日和31日两次香山局地大暴雨期间海淀、南郊观象台风廓线水平分布特征,发现低层风场在北京西部地形作用下产生近地面辐合,从而诱生边界层中尺度动力扰动的形成,基于此提出了基本概念模型(图2):北京西郊山体平均高度600~800m。

300~600m的东南和偏东向气流在山脉的阻挡下产生较强辐合和空气堆积。600~900m东南和偏东风逐渐减小,山脉阻挡下的空气辐合和堆积也在这一层次随高度减小。根据空气质量连续性补偿原理,山前空气辐合堆积不均匀的垂直分布,将产生空气沿山体强迫抬升之后向后卷扬的作用。后卷高度应为偏东风分量最小的近地面层顶(800~900m)。这一高度也是近地面东南风与边界层偏南和西南风交换层。边界层的偏西风对近地面层顶空气的后卷产生加强作用。即空气质量沿山体在山前近地面中低层辐合,在近地面层顶辐散。在此作用下近地面小扰动在山前沿着山体形成。赵玮等<sup>[14]</sup>通过分析2006年7月31日暴雨过程也发现,暴雨发生前1h内,偏东风从1500~1800m层迅速向上扩展至3000m附近,建立了深厚的偏东风层,有利于降水的发生。

为了分析偏东风加大及其上传与强降水之间的关系,吴庆梅等<sup>[15,16]</sup>利用风廓线雷达资料普查了2006年夏季北京8次局地暴雨过程,发现6次过程伴有不同程度的偏东风,针对2006年6月27日和7月24日两次典型降水天气过程进行详细分析,发现低层东南风明显加大上传时,对流天气发展强烈,局地暴雨开始;东南风层次降低,厚度变薄时,降水逐渐减小。东南风的存在、发展与消亡过程,基本和局地暴雨的生命史相对应;东南风的大小、厚度与雨量存在一定的相关关系。此外,6次过程有5次降水中心在海淀和石景山区,即北京西部山前地区及城区。尽管降水前南郊观象台和海淀上空东南风差别不大,但海淀站降水量较南郊站明显偏多,这也证实了偏东风下,北京西部山前局地环流存在的可能。为了详细分析低层偏东风与降水的关系,吴庆梅将2010年7月9日降水过程海淀风廓线观测到的3000m以下的偏东风分成0~1000,1000~2000m和2000~3000m三层,对比当日海淀站小时降水量和不同层次偏东风之间的关系,发现降水出现后,最低层(0~1000m)的偏东风首先迅速增大,1h后1000~2000m层的东南风伴随着小时雨量的

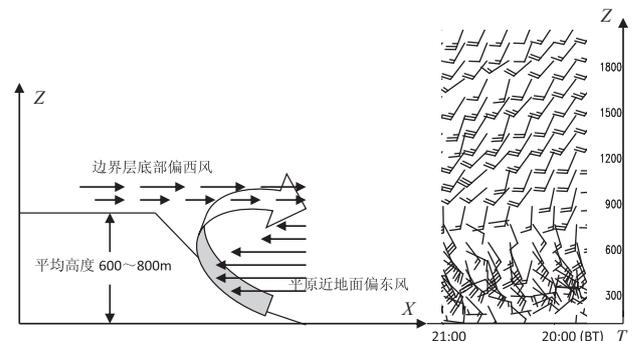


图2 大暴雨落区附近近地面垂直风廓线分布地形作用概念图<sup>[12]</sup>

增大开始突增；再之后，2000~3000m高度上的东风也开始增大，与此同时海淀站的小时雨强达到过程最强（图3）。

以上个例基于风廓线雷达资料，精细地分析了暴雨发生前低层风场的物理量结构特征，发现暴雨发生前，存在低层偏东风向上扩展并与暴雨生命史相对应，北京西部山前存在由偏东风引起的垂直环流造成北京西南部降水量容易偏大这一特征。通过风廓线雷达不仅发现低层偏东风上传，还发现存在高空急流或大风速区下传的现象。

基于风廓线资料发现存在高空急流或大风速区下传现象。廖晓农<sup>[17]</sup>以2000—2007年出现的41个雷暴大风日为研究对象，使用6min一次风廓线雷达资料，分析了雷暴大风日对流层风场情况，发现一些雷暴大风的发生与高空大风速区下传有关；在雷暴大风出现前，高空环境风突增，大数值等风速线连续下落，在雷暴大风产生时到达地面（图4）。有效使用风廓线雷达的观测资料，将有利于提高雷暴大风的临近预报和预警水平。同时也发现不少个例在雷暴大风出现时风廓线仪并没有观测到大风速区向下传的现象。廖晓农分析其原因可能有两个：一是雷暴大风的产生与高空水平动量下传没有直接联系；二是有些雷暴大风持续时间短，基本只有几分钟，而风廓线仪观测的时间分辨率为6min，雷暴大风发生在两次观测之间，没有捕捉到。另外，本文作者通过总结其他省市一些基于风廓线雷达资料所做的强对流暴雨两个例研究发现，强降水发生前，经常伴随高空西南急流的下传现象<sup>[18]</sup>。

基于风廓线资料精细分析雾霾天气边界层风场特征。风廓线雷达资料为边界层风场空间结构的精细化分析提供了可能。刘建忠、李宏宇、何晖等<sup>[19-22]</sup>分

别详细分析了2007年10月25—28日，12月26—28日北京大雾期间边界层风场及垂直速度场的时空分布特征，指出大雾期间边界层气流上升和下降的速度均在±0~6m/s之间，没有较大的上升和下沉气流，边界层内湍流和乱流明显，为人工消雾提供了理论依据，探讨了人工消雾的可能性。这些精细的数据及反映出的大气结构如果在没有风廓线雷达的时代是观测不到的。

### （3）有1h及以上的预报提前量

结合风廓线雷达资料30多个天气个例的分析，凝练有预报意义的不同物理特征，普遍发现风廓线雷达资料有1h以上的预报提前量。通过归纳总结北京地区5类常见天气型的低层风演变概念模型，吴庆梅在2010年预报员专项“风廓线资料在局地暴雨中的应用分析”项目中通过对2006—2009年期间共27个典型局地暴雨过程进行分析，指出利用风廓线雷达观测到的低层风场变化对北京局地暴雨有较好的指示意义，除冷涡后部天气型局地暴雨有1h左右预报提前量外，其余4类天气型有2~6h的预报预警时效。廖晓农借助2008年预报员专项项目“北京奥运会几次高影响天气过程总结分析”分析了2008年3次降雨过程，指出：风廓线雷达资料在预测对流云移动方向时具有一定的使用价值，使用风廓线资料预测对流云移动，将有可能具有1h左右的预报时效。郭金兰使用观象台风廓线雷达产品对2008年6月13日雷暴天气进行分析发现高空下沉气流及其向下的延伸能很好地预示降水的发生，在该个例中有2h的提前量。翟亮<sup>[23]</sup>通过分析2008年8月10—11日降水个例发生前后高低空西南急流与强降水的关系，发现850~750hPa上出现短暂西南急流后约2h，海淀出现强降水，如果以低空急流为指

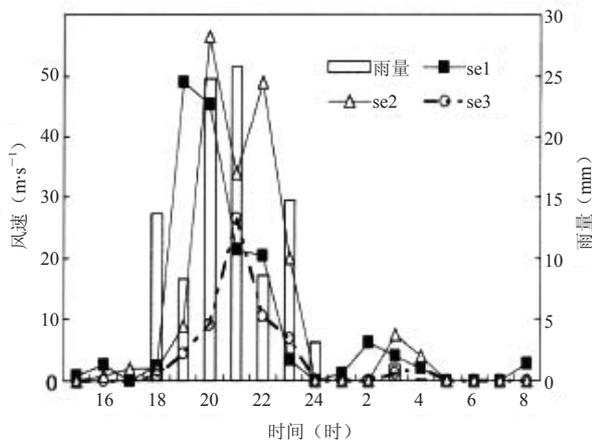


图3 2010年7月9日海淀站雨量与低层东南风时序图<sup>[15]</sup>  
(其中se1, se2, se3分别表示: 0~1000, 1000~2000和2000~3000m层的东南风)

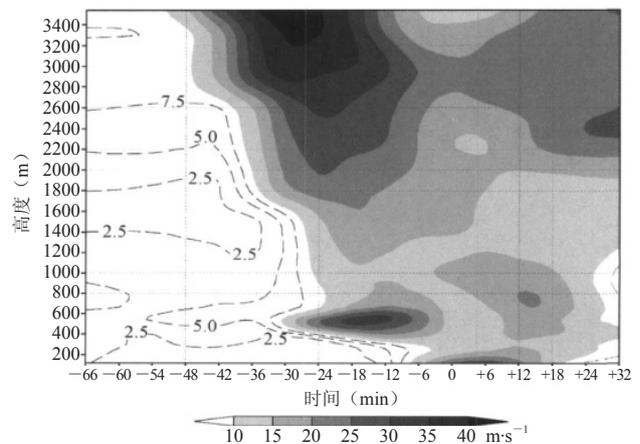


图4 雷暴大风日地面强阵风出现前后对流层中下层风速演变<sup>[17]</sup>  
(雷暴大风出现时间记为0, 该时间前后分别用正值和负值表示)

标, 风廓线雷达将有2h的预报提前量。

综上所述, 无论是对天气尺度系统风场空间结构的系统性分析, 还是对强天气发生前后中小尺度系统风场物理特征的精细刻画; 无论是高空大风速区的下传, 还是低层偏东风扰动的向上扩展, 对天气过程动力结构的不断认识和了解都离不开像风廓线雷达这样能提供高时空分辨率要素场资料的观测设备。

### 2.1.2 组网风廓线资料的二次开发及业务应用

单部风廓线雷达反演出来的直接产品如大气风场的垂直分布, 对中小尺度天气系统物理结构的认识起着非常重要的作用。根据单站风廓线雷达资料还可计算温度平流<sup>[24]</sup>、静力稳定度等物理量, 由冷暖平流的垂直分布可判断系统在本地的发展趋势。但单部风廓线雷达的观测产品只能从一个点的垂直风场结构反映具有四维特征的天气系统物理结构的演变特征, 显然是不够的。3部及以上的风廓线雷达可以组成一个小型区域观测网, 通过组网资料利用三角法或有限元等方法可以计算一个区域内的涡度、散度、垂直速度、风暴相对螺旋度等, 这些物理量对判断中小尺度天气系统的发生、发展有重要意义。杨波等<sup>[25]</sup>提出利用多部风廓线雷达组网资料计算天气系统的各种物理量场并对强对流等天气系统的发生发展进行分析研究, 结果表明利用组网风廓线资料可导出一些反映天气系统发生发展特征的关键物理量如温度平流、螺旋度等, 不仅可以提高资料的利用效率, 还可以帮助预报员更早地发现天气系统的变化情况, 提高预报时效。

### 2.2 用于构建特种探空

如果能利用风廓线雷达及微波辐射计等高分辨率观测资料构建出可应用于业务或订正后可应用于业务的特种探空资料, 将是一件十分有意义的事情。利用北京南郊观象台2007和2008年5—9月的风廓线雷达资料, 结合本站同时间段微波辐射计资料, 魏东等<sup>[26, 27]</sup>尝试了构建特种探空资料的可能性, 并与常规探空就资料可用性等方面进行比较和探讨, 发现构建的特种探空的各个要素的变化趋势与常规探空基本保持一致, 可以用来定性使用, 能极大弥补常规探空时间分辨率上的不足。在定量使用时, 不同要素的表现有所不同, 温度和水平风定量使用价值较高, 常规探空的一致性较好、误差小。露点温度定量使用时与常规探空相比误差较大, 需要订正。利用构建的特种探空资料进行二次开发, 计算常用的用来表征天气系统特征的各种物理量, 发现与相对湿度有关的物理量如CAPE值等与常规探空计算得到的相比, 有较大误差; 而仅含温度、风要素的物理量如垂直温度梯度等与常规探

空得到的相比, 绝对误差很小, 具有较高的定量使用价值。出现上述现象的原因可能是由于微波辐射计探测得到的相对湿度与探空相对湿度相差较大所致。将特种探空、常规探空尝试用于冰雹、雷暴大风、短时暴雨的个例分析中, 发现基于两种探空得到的各种热动力物理参量在天气过程发生前后的表现基本一致。但特种探空物理参量由于具有高时间分辨率优势, 能更清晰刻画出天气过程发生、发展、消亡的变化趋势, 在强天气发生前3~6h, 差别更加明显, 具有较强的短时临近预报意义。

### 2.3 用于数值预报同化

风廓线雷达资料除了在常规天气预报有重要使用价值外, 也可以用于数值天气预报。国外机构(如ECMWF和NCEP)已经实现了风廓线雷达资料在模式中的业务同化, 结果表明该数据的同化应用对模式预报性能的提高有正面影响。2007年北京市气象局的科研人员对海淀风廓线资料进行了部分个例的同化分析和数值预报试验, 试验结果显示, 风廓线雷达资料的同化分析对数值预报结果有影响, 但以中性为主。风廓线雷达资料要想对模式性能有正贡献, 需要有很高的数据质量。目前, 北京市气象局数值预报系统“北京快速更新循环数值预报系统”(BJ-RUC)中还未同化风廓线雷达资料。

另外, 边界层高度在天气、气候及空气污染数值预报模式中起着非常重要的作用<sup>[28, 29]</sup>。常规探空虽然可以直接得到边界层高度, 但时空分辨率较低, 代表性较差。Seibert等<sup>[30]</sup>研究表明, 风廓线雷达探测资料是最好的, 能得到边界层高度的数据。曹晓彦等<sup>[31]</sup>通过北京车载风廓线雷达数据中的折射结构指数 $C_n^2$ 变化, 得到比较可靠的边界层高度, 发现北京市区夏季边界层高度可高达1800~1900m, 市区要略微高于郊区等。

## 3 风廓线雷达的资料可用性和一致性有待提高

定量使用风廓线雷达前首先需要对资料质量进行分析和质量控制, 但目前国内这方面的工作相对较少。在近几年应用中发现风廓线资料存在的一些问题, 如有降水出现时, 受雨滴下降末速度的影响, 风廓线雷达不能直接得到大气的真实风在垂直方向上随时间的演变; 风廓线雷达资料易受地面回波、飞鸟等因素的影响, 应用中有待从资料处理技术上加以完善和改进。此外, 由于北京海淀站、延庆站、上甸子三站的风廓线仪器型号各不一样, 导致资料获取时间和空间垂直分辨率差别较大, 北京市气象局曾租用3部

国产Airda公司车载风廓线雷达,对上述3个站点的仪器进行了为期一周的对比观测,发现3站风廓线仪和Airda车载风廓线仪数据的一致性较差,用已建站点的风廓线资料计算得出的垂直风比车载试验风廓线雷达得到的垂直风小。

鉴于目前国产风廓线雷达的性能和反演风已可以达到使用要求,考虑建设成本、后期维修保障的便利性,建议在今后风廓线雷达布网建设中使用国产仪器设备,并且在同一区域布网时尽量选用相同型号的设备,提高资料的一致性和可用性。且风廓线雷达建设应尽量和微波辐射计在同一地点,以得到完整的、具有时空一致性的风、湿资料,更好地为各种灾害性天气的机理分析提供便捷。

#### 4 小结

(1) 本文简要总结了近年来风廓线雷达探测资料在北京市气象局的业务应用情况。没有高时空分辨率的探测资料就来谈论对中小尺度天气系统物理结构的分析和认识无疑是巧妇难为无米之炊。风廓线雷达为实时监测、分析天气系统尤其是中小尺度天气系统的发生、发展物理空间特征提供了可能,有利于加强预报员对中小尺度天气系统物理机制的进一步认识和理解,提高短时临近预报水平;基于风廓线雷达资料开展的雾等天气过程的精细分析为人工影响雾技术的探讨提供了基础。但目前的各种分析大部分基于单部风廓线雷达资料,随着风廓线站网布局的不断完善,通过组网资料(3部及以上)利用有限元等方法计算区域内的涡度、散度、风暴相对螺旋度及其廓线等,对认识强天气发生发展的物理机制有重要意义。

(2) 风廓线雷达和微波辐射计配合使用,可以构建特种探空,用于弥补常规探空时空分辨率的不足。通过风廓线雷达资料可获得边界层高度,对空气质量数值预报模式有着重要作用。风廓线雷达组网资料用于数值模式资料同化中,改进模式效果,这在欧美及日本已开始业务运行。

#### 参考文献

- [1] 冯涛,李迅.利用风廓线雷达资料分析一次强降水过程.中国气象学会2007年年会气象综合探测技术分会场论文集,2007:110-114.
- [2] 郑祚芳,刘红燕,张秀丽.局地强对流天气分析中非常规探测资料应用.气象科技,2009,37(2):243-247.
- [3] 翟亮,王令,刘文军.两次降雪天气过程预报中边界层风廓线雷达资料的应用.气象科技,2012,40(5):783-788.
- [4] 苏德斌,焦热光,吕达仁.一次带有雷电现象的冬季暴雪中尺度探测分析.气象,2012,38(2):204-209.
- [5] 李津,王华.北京城区一次大到暴雨的预报难点分析.气象,2006,32(2):92-97.
- [6] 丁青兰.多种探测资料在一次强对流天气分析中的应用.第28届中国气象学会年会:S7城市气象精细预报与服务,2011.
- [7] 段丽,张琳娜,等.2009年深秋北京大雪过程的成因分析.气象,2011,30(11):1343-1351.
- [8] 丁青兰,王令,卞素芬.北京局地降水中地形和边界层辐合线的作用.气象科技,2009,37(2):152-155.
- [9] 孙继松,杨波.地形与城市环流共同作用下的 $\beta$ 中尺度暴雨.大气科学,2008,32(6):1352-1364.
- [10] 杨波,孙继松,魏东.北京奥运会开幕式期间的中尺度天气系统研究.应用气象学报,2010,21(2):164-169.
- [11] 王令,王国荣,孙秀忠,等.应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水.气象,2012,38(3):281-290.
- [12] 郭虎,段丽,卞素芬,等.利用加密探测产品对“06731”北京奥体中心局地暴雨结构特征的精细分析.热带气象学报,2008,24(3):219-226.
- [13] 郭虎,段丽,杨波,等.0679香山局地大暴雨的中小尺度天气分析.应用气象学报,2008,19(3):265-274.
- [14] 赵玮,王建捷.北京2006年夏季接连两场暴雨的观测对比分析.气象,2008,34(8):3-14.
- [15] 吴庆梅,郭虎.东南风气流对夏季北京局地暴雨的影响.广东气象,2009,31(6):19-22.
- [16] 吴庆梅,杨波.北京地形和热岛效应对一次中尺度暴雨的作用.气象,2012,38(2):174-181.
- [17] 廖晓农.北京雷暴大风日环境特征分析.气候与环境研究,2009,14(1):54-62.
- [18] 宋巧云,孙成云,梁丰.风廓线雷达资料在灾害性天气预报中的应用综述.2012年全国重大天气过程总结和预报技术交流文集,2012.
- [19] 刘建忠,张蕾,杨道侠.雾日期间边界层特性分析.干旱气象,2010,28(1):41-48.
- [20] 李宏宇,胡朝霞,魏香.雨雾、雪雾共生天气气象要素分析.大气科学,2010,34(4):843-849.
- [21] 何晖,郭学良,刘建忠,等.北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究.大气科学,2009,33(6):1174-1183.
- [22] 吴庆梅,张胜军.一次雾霾天气过程的污染影响因子分析.气象与环境科学,2010,33(1):13-16.
- [23] 翟亮.北京奥运期间一次暴雨过程风廓线资料特征.气象,2008,34(专刊):26-31.
- [24] 翟亮,王国荣,王令,等.风廓线雷达在一次雷暴大风天气过程中的特征分析.第26届中国气象学会年会第三届气象综合探测技术研讨会分会场论文集,2009:423-427.
- [25] 杨波,魏东.二次开发风廓线探测资料及其在天气预报中的应用.气象科技,2010,38(4):413-417.
- [26] 魏东,孙继松,雷蕾,等.用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析.气候与环境研究,2011,16(6):697-705.
- [27] 魏东,孙继松,雷蕾,等.三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析.气象,2011,37(4):412-422.
- [28] Stull R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Springer,1988.
- [29] Beyrich F, Weill A. Some aspects of determining the stable boundary layer depth from Sodar data. Bound-Layer Meteorol, 1993, 63, 97-116.
- [30] Seibert P, Beyrich F, et al. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. Atmospheric Environment, 2000, 34: 1001-1027.
- [31] 曹晓彦,李炬,张京江,等.由风廓线数据分析北京地区夏季边界层高度的特征.2007年中国气象学会年会论文集,2007.

# WOFOST作物模型机理及使用介绍

杨妍辰<sup>1</sup> 王建林<sup>2</sup> 宋迎波<sup>2</sup>

(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** WOFOST (World Food Studies) 模型是荷兰 Wageningen 农业大学和世界粮食研究中心 (CWFS) 共同开发研制, 模拟特定土壤和气候条件下一年生作物生长的动态解释性模型。模型着重强调定量土地评价、区域产量预报、风险分析和年际间产量变化及气候变化影响的量化应用。模型以同化作用、呼吸作用、蒸腾作用和干物质分配等作物生理生态过程为模拟基础, 主要包括潜在生长条件、水分限制条件和养分限制条件下作物生长的模拟。详细介绍了 WOFOST 模型的发展、应用范围、理论基础以及使用操作等, 便于更多的人快速了解、掌握和使用模型, 进一步促进作物模型在我国的发展和业务服务应用水平。

**关键词:** WOFOST 模型, 模型发展, 模型结构, 理论基础, 模型使用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.005

## Introduction of WOFOST Crop Growth Simulation Model Mechanism and Its Use

Yang Yanchen<sup>1</sup>, Wang Jianlin<sup>2</sup>, Song Yingbo<sup>2</sup>

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 National Meteorology Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** The WOFOST (World Food Studies) model is developed by Wageningen Agricultural University and the Center for World Food Studies. It is a dynamic explanation model that simulates the annual crop growth with the specific soil and climatic conditions. The model emphasizes the application of land quantitative evaluation, regional yield forecast, risk analysis, the annual yield changes and quantization of the effects of climate change. The simulation of model is based on the crop physiological and ecological process, including assimilation, respiration, transpiration and dry matter distribution. WOFOST model consists of three levels of the crop growth simulation, the potential growth conditions, water-limited and nutrient-limited conditions. This paper introduces the development and application of WOFOST model, its theoretical basis and operation and so on, to facilitate more people to quickly understand, grasp and use the model, and further promote the development of crop models in our country and raise the application level of service.

**Keywords:** WOFOST model, model development, model structure, theoretical foundation, model using

农业系统是一个非常复杂, 包含生物、非生物因素及其相互作用的系统。由于大量相互作用的存在, 确定整个农业系统的响应机制十分困难。近30年来, 作物生长模型迅速发展, 作为一个系统的分析方法, 对于理解作物与气候、土壤因素之间的相互作用起到了很大帮助。

作物生长模型从系统科学的观点出发, 以土壤—植被—大气系统的物质平衡、能量守恒和物质能量转换原理为基础, 以光、温、水、土壤等条件为环境驱动变量, 对作物与环境条件之间的关系以及作物

的生理生态过程进行定量描述, 动态模拟作物的生长发育过程, 并解释作物与大气、土壤等因素之间的相互关系, 是一种面向作物生长发育过程、机理性很强的数值模拟模型。作物生长模型作为一种分析工具, 在区域和全球尺度上的环境、资源、可持续发展以及气候变化影响、作物生长监测、产量预测、农业生产决策管理等方面发挥了重要作用, 为农业资源的管理利用、农业最大收益的获取提供了科学依据。

美国、澳大利亚、荷兰等国在20世纪七八十年代即开始了作物模型的研究, 建立起玉米、小麦、棉花等作物生长模型, 并逐步应用于农业生产管理、作物产量预测以及全球气候变化对农业生产影响的评估<sup>[1]</sup>。我国在20世纪90年代初引入作物生长模拟技术, 在气候变化影响评估、作物栽培模拟优化决策和农业

收稿日期: 2012年12月8日; 修回日期: 2013年1月6日  
 第一作者: 杨妍辰(1988—), Email: yang\_yanchen@126.com  
 资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106021, GYHY201306076)

气象服务等方面积极推广应用,取得了许多有意义的成果<sup>[2]</sup>。

近年来WOFOST模型逐渐受到广大学者的关注。该模型为荷兰Wageningen的de Wit学派开发的系列作物模型之一,引入我国后许多学者对这一模型进行了研究,并应用于当地农业生产,对我国农业气象服务起到了十分重要的作用。但是,该模型在我国的应用,仍然停留在研究和试用阶段,尚未真正应用于农业气象服务。为了推动作物模型尽快应用于业务服务,提升农业气象业务服务水平,本文拟详细介绍WOFOST模型的发展、应用范围、理论基础和使用操作,使更多的人快速了解、掌握和使用模型,进一步促进作物模型在我国的发展和业务服务应用水平。

## 1 模型结构与发展

WOFOST模型是荷兰Wageningen农业大学和世界粮食研究中心(CWFS)共同开发研制,模拟特定的土壤和气候条件下一年生作物生长的动态解释性模型<sup>[3]</sup>。模型的开发旨在探索提高发展中国家农业生产

力,着重强调在定量土地评价、区域产量预报、风险分析和年际间产量变化及气候变化影响等研究方面的应用。

WOFOST模型以一天为步长对作物生长发育进行模拟,其模拟基础为作物的生理生态过程,主要包括同化作用、呼吸作用、蒸腾作用、干物质的分配等。模型可以模拟潜在生长条件、水分限制和养分限制三种水平下的作物生长。潜在生长条件是指保证营养元素和水分最佳供应,作物产量仅由辐射、温度和作物特性决定;水分限制生产条件,即假设营养元素的供给仍然是最佳的,但需考虑土壤有效水分对蒸发和作物产量的影响;养分限制条件即考虑N、P、K三种元素对作物产量的影响。模型的结构如图1所示。

WOFOST模型最初是CWFS(世界粮食研究中心)和Wageningen农业大学在世界粮食安全和生产研究的基础上建立的,后成为Wageningen模型家族中的一员。1988年后,由SC-DLO(the DLO Winand Staring Centre)与AB-DLO(the DLO-Center for Agrobiological Research and Soil Fertility)、WAU-

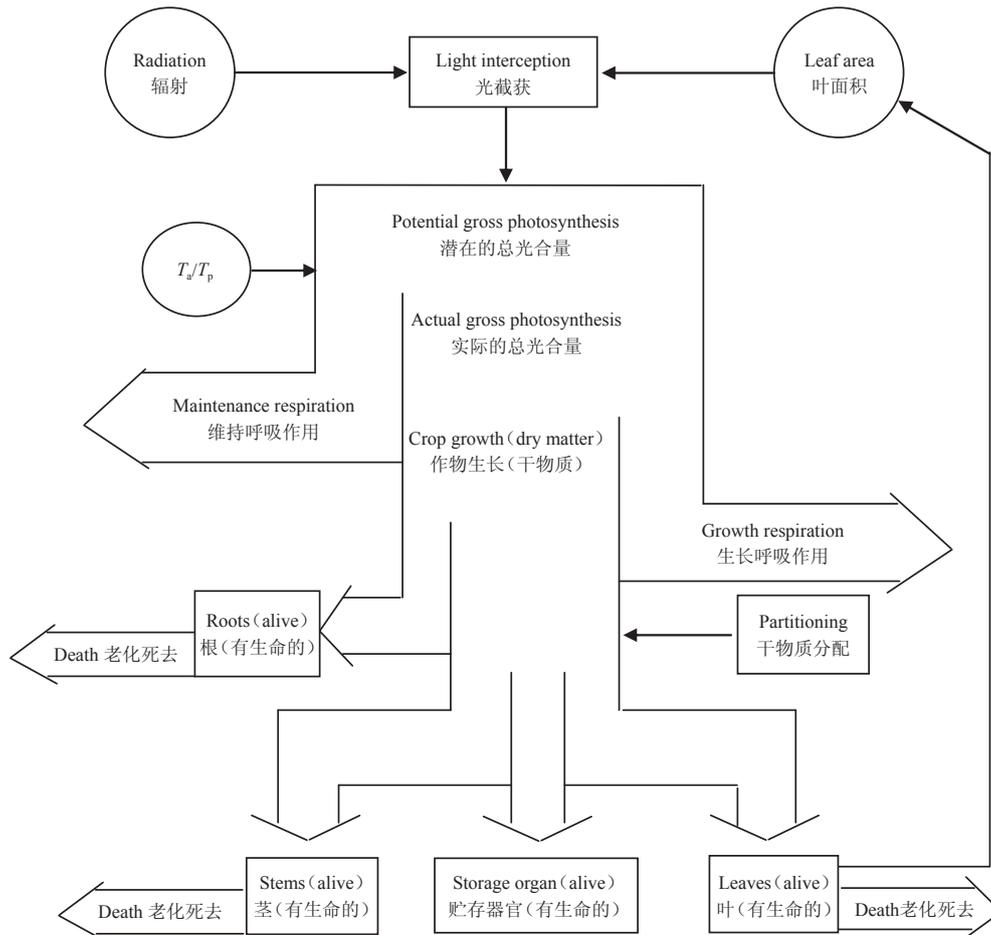


图1 作物生长过程 ( $T_a$ 和 $T_p$ 分别为实际、潜在呼吸作用速率)

TPE (Wageningen Agricultural University, Department of Theoretical Production Ecology) 合作继续发展。最初的WOFOST模型由Wolf等在1986年进行整理编写, 接下来的WOFOST3.0版和4.0版分别由Rappoldt和Van Diepen等整理编写, 而6.0版的记录文件是由Supit等在1994年给出的, 技术说明书则由Hijmans等进行编写<sup>[4]</sup>。

1994年, WOFOST 6.0已得到了长足的发展, 被用于模拟全欧洲一年生作物的产量, 并被合并到CGMS (Crop Growth Monitoring System) 中。为了更好地满足多种需要, 1997年WOFOST6.0在系统网络的基础上得到了进一步的完善, 产生了WOFOST7.1; 2012年又进一步修改得到了7.15版本, 使模型可以对出苗前水分平衡进行模拟, 相应地更新了WOFOST控制中心, 将模拟的时间项单独建立了界面。

## 2 模型的应用

从WOFOST模型诞生至今, 许多方面的研究和应用都取得了显著的成果。CWFS将WOFOST3.1应用在布基纳法索、加纳和肯尼亚, 研究施肥量对粮食作物增产的影响。结果表明, 这三个国家在不进行额外灌溉的条件下, 随着施肥量的增加, 粮食产量有显著提高。1989年, WOFOST在布基纳法索的AGRISK工程中被用来进行产量风险研究<sup>[5]</sup>, 目的在于了解土壤类型、作物品种、播种日期、降雨以及播种地块位置与作物干旱风险之间的关系, 以便更好地指导农民进行生产决策。WOFOST4.1作为产量评估的工具被运用到赞比亚粮食安全的早期警报系统中<sup>[6-8]</sup>, 并且曾用于秘鲁安第斯山脉地区灌溉和水分保持的评价<sup>[6]</sup>。WOFOST5.3被用于评价欧共体主要粮食作物的区域生产潜力<sup>[9, 10]</sup>。在MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing) 工程中, 欧洲联合研究中心把WOFOST6.0作为产量预测的模型<sup>[11-13]</sup>。模型的使用者们也曾把模型运用于森林和草地评估, 并且通过更多的子模块代替土壤水模型。

在我国, 宋艳玲等<sup>[14]</sup>利用WOFOST作物模型研究了干旱对我国冬小麦产量的影响, 发现我国北方地区冬小麦生育期内的降水与产量并没有显著相关关系, 但春季降水则与产量显著相关, 揭示了我国北方春季降水量对冬小麦产量影响的重要性。陈振林等<sup>[15]</sup>利用WOFOST模型模拟了低温、干旱对玉米产量的综合影响, 结果表明, 低温、干旱以及低温和干旱并发都会使玉米的产量下降, 而且低温和干旱并发要比单一灾害发生时的影响更大。高永刚等<sup>[16]</sup>利用WOFOST模型对黑龙江省四大作物产量进行了趋势产量处理, 效果

理想、可行, 克服了只用一组参数在复杂气候区域进行作物产量模拟的局限性。谢文霞等<sup>[17]</sup>应用WOFOST模型对浙江水稻潜在生长进行了模拟和验证, 结果显示, 模型可以较好地分析浙江水稻的生长过程和产量潜力。杜春英等<sup>[18]</sup>基于WOFOST模型对黑龙江省水稻产量动态预报的研究, 实现了WOFOST模型在黑龙江省水稻生长模拟中的动态化应用。综上所述, WOFOST模型具有广阔的应用前景, 是提升我国现代农业气象业务服务的主要科技支撑之一。

## 3 WOFOST模型理论基础

### 3.1 同化作用和呼吸作用

作物的同化速率由公式 (1) 计算:

$$A_L = A_m \left( 1 - e^{-\frac{\varepsilon I_{al}}{A_m}} \right) \quad (1)$$

其中,  $A_L$  (单位:  $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2}(\text{leaf}) \cdot \text{s}^{-1}$ ) 为总同化速率,  $A_m$  (单位:  $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2}(\text{leaf}) \cdot \text{s}^{-1}$ ) 为最大总同化速率,  $\varepsilon$  (单位:  $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{J}^{-1}$ ) 是单叶原始光能利用率,  $\varepsilon$ 和 $A_m$ 与温度有关,  $A_m$ 由作物的特性决定,  $I_{al}$ 为叶层L吸收的辐射, 由公式 (2) 求得:

$$I_{al} = \frac{dI_L}{dL} = k \cdot (1 - \rho) \cdot I_0 \cdot e^{-k \cdot L} \quad (2)$$

其中,  $k$ 为消光系数, 是辐射特性、太阳高度角、叶片角度分布和单叶漫散系数的函数;  $\rho$ 为反射系数, 是太阳高度角、叶片角度分布和叶片反射、传导性能的函数;  $L$ 为叶面积指数;  $I_0$ 为晴天冠层顶部辐射, 由公式 (3) 求得:

$$I_0 = I \cdot \sin \beta \quad (3)$$

其中,  $I$ 为太阳常数,  $\beta$ 为太阳与地球表面之间角度。

### 3.2 作物生育期

作物各器官的生长由其本身特性所决定, 而各生育期发展的速率则受到温度和光周期的影响。在WOFOST模型中, 作物生育期由无量纲的状态变量——发育阶段 ( $DVS$ , 即Development Stage) 表示, 可由公式 (4) 计算。对于大多数一年生作物, 作物出苗时 $DVS=0$ , 花期 $DVS=1$ , 成熟 $DVS=2$ 。为计算温度对发育阶段的影响, 在模型中引入积温的概念。每日有效温度 ( $T_e$ ) 是日平均温度 ( $T$ ) 和基础温度 ( $T_{base}$ , 作物在该温度下停止生长) 的差值, 即 $T_e = (T - T_{base})$ 。  $T_e$ 是非负的, 在最大有效温度 ( $T_{max,e}$ ) 之上时,  $T_e$ 恒定不变。在 $T_{max,e}$ 和 $T_{base}$ 之间, 积温的每日增量是由线性插值得到。

$$DVS = \frac{\int T_e}{T_{req}} \quad (4)$$

其中 $T_c$ 为积温,  $T_{req}$ 为作物发育进入到下一阶段所需要的积温。

在WOFOST模型中, 光周期影响因子 ( $F_{pr}$ ) 由公式 (5) 计算得到:

$$F_{pr} = \frac{P - P_c}{P_0 - P_c}, 0 \leq F_{pr} \leq 1 \quad (5)$$

其中,  $P_0$ 为最佳光周期,  $P_c$ 为临界光周期。

一些作物的发育速率也受到光周期的影响, 其发育阶段 $DVS$ 由公式 (6) 计算:

$$DVS = F_{pr} \frac{\int T_c}{T_{req}} \quad (6)$$

随着作物的不断进化, 现代作物比较早时期作物生长时受到光周期的影响大大降低, 在模拟中通常不再考虑光周期的影响。

### 3.3 蒸腾作用

作物通过关闭气孔对水分胁迫做出反应, 气孔关闭导致作物与大气之间 $O_2$ 和 $CO_2$ 交换减少, 同时 $CO_2$ 的同化速率也降低, 这一影响由公式 (7) 计算:

$$A = \frac{T_a}{T_p} \cdot A_p \quad (7)$$

其中,  $A$ 为同化速率,  $A_p$ 为潜在同化速率,  $T_a$ 为实际蒸腾速率,  $T_p$ 为潜在蒸腾速率。

WOFOST中潜在蒸腾通过Penman公式进行计算。不同作物间可以用一个校正系数进行计算, 大多数作物使用系数为1, 节水作物为0.8, 而蓄水作物为1.2。实际作物蒸腾等于潜在蒸散乘以光截获、水分胁迫以及一般作物的校正因子。由于Penman计算蒸散的方法主要是针对低矮作物(如草)而建立的, 在模拟玉米等高度较高作物时常常低估了实际蒸散, 因此一

般作物的校正因子(变量 $CFET$ )取值为1.0, 有时可能会增加到1.15。

### 3.4 土壤水分平衡

WOFOST中土壤水分子模块有3个。第一种, 潜在生产条件下, 土壤持续湿润, 作物水分需求被量化为作物蒸腾和被冠层遮蔽下土壤表面蒸发的水量。第二种, 水分限制生产条件下, 土壤中的水分可以自由流动, 并且这类土壤地下水位很深以至于对根区土壤水分含量不产生影响。第三种也是在水分限制生产条件下, 水分平衡受根区浅层地下水的影响, 这一子模块类似于第二种情况, 不同的是土壤持水力是由地下水位的深度决定的, 且存在毛管上升水, 根区水分含量不随深度变化。

模型中土壤被分为3个部分: 实际根区( $RD_{act}$ ), 实际根区以下到地下水位部分, 以及地下水位之下到距地表土层1000cm的部分。最大根深为 $RD_m$ , 地下水位深度为 $Z$ 。当地下水进入根区, 根区又细分为水分饱和区域和非饱和区域。对水通量的计算包括降水( $R$ ), 地表储存水( $SS$ ), 地表径流( $SR$ ), 地表蒸散( $E$ ), 作物蒸腾( $T$ ), 由根区渗透到更深土层的水分( $PC$ ), 以及上升到根区的毛管上升水( $CR$ ), 具体如图2所示。

水分的有效性首先由土壤物理特性所决定, 其次是水分平衡。生长阶段根区的水分平衡等于来自降水和灌溉的水分供应, 以及由于作物蒸腾、土壤蒸发和渗透到深层土层造成的水分减少之间的差异。

### 3.5 养分

模型中只考虑N、P、K元素。养分限制产量是采用QUENFTS (Quantitative Evaluation of the Fertility of

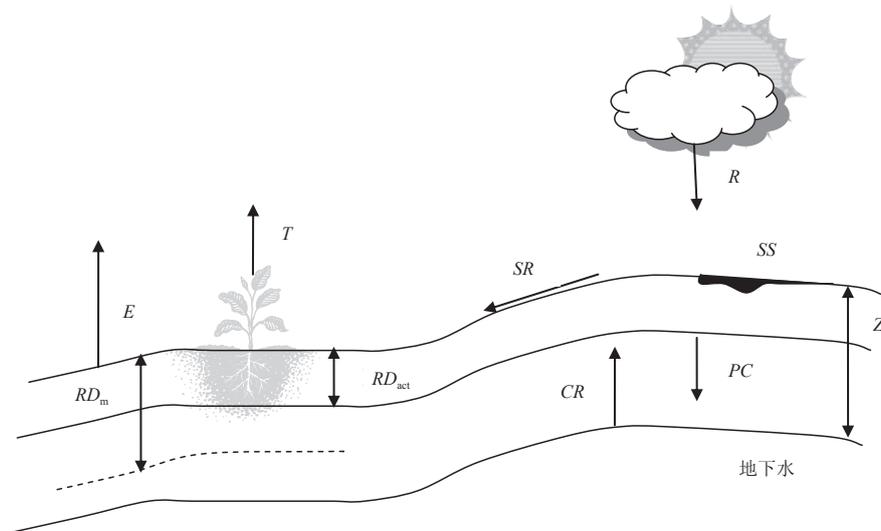


图2 土壤水分平衡的组分示意图

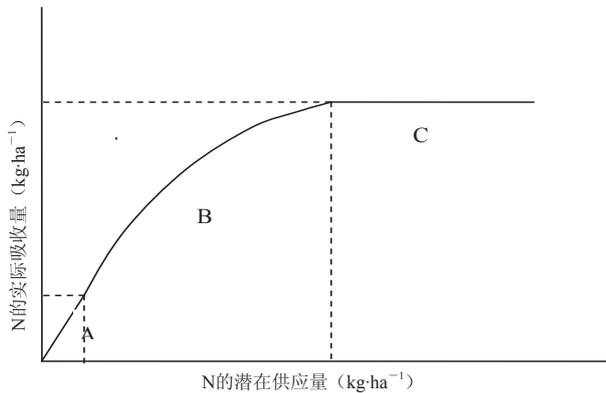


图3 第二种养分影响下N的实际吸收与潜在供应量之间的关系

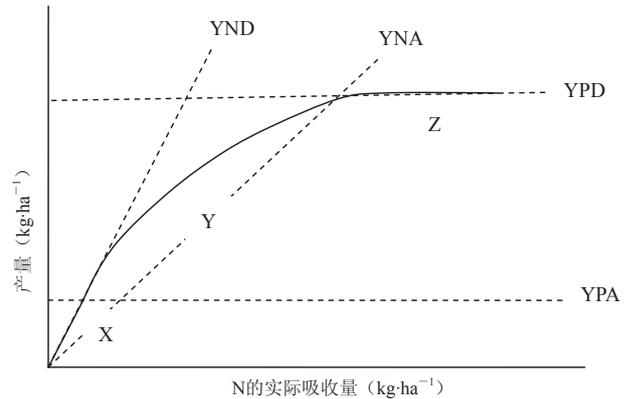


图4 P供应影响下作物产量与N实际吸收量之间的关系

Tropical Soils) 模型进行计算<sup>[3]</sup>。同时, WOFOST模型中包含了生物固氮, 作物参数 $NFIX$ 决定了总的氮供应中来自生物固氮的部分, 通常 $NFIX$ 被确定为一个常数。

三种元素其中任一种元素的实际吸收量由该元素和其他两种元素的供给量共同决定。在P定量的情况下, N的吸收情况如图3所示。可以看出, 在A段N的潜在含量相对于P来说非常低。因此, N的实际吸收量等于N的潜在含量。在C段N的潜在含量相对于P来说已经非常高, 随着N潜在含量的增加, N的实际吸收量保持不变。而在B段, 随着N含量的增加, 作物吸收的N也在不断增加, N的吸收量与N的供应量之比由1降低至0。

在营养元素的实际吸收量确定以后, 对产量的影响如图4(以P和N为例)所示。可以看出, 在X段, P元素达到最大的供给水平, 生长不受P元素的限制; N元素达到最大的吸收水平, 限制产量。在Y段, N和P均限制作物的产量。在Z段, N达到最大的供给水平, 只有P限制作物的生长。

## 4 模型使用

对于模型的数据输入、结果输出和文件格式要求皆以WOFOST7.1版本为例进行解释。更新的版本WOFOST7.15只是在输入数据的界面有所不同, 其余均与7.1版本相同。

### 4.1 数据输入

WOFOST模型的输入数据由常规选项、作物、气象、土壤、养分和再运行几个部分组成。其中气象文件中的内容只能在WOFOST控制中心(WCC)外进行编辑。

#### 4.1.1 常规数据 (General data)

常规数据主要是模拟水平的选择, 包括潜在作物

生长模拟 (Simulation of potential crop growth)、潜在作物生长模拟和水分限制作物生长模拟 (Simulation of water-limited crop growth) 以及潜在、水分限制和养分限制作物生长模拟 (Calculation of nutrient-limited crop growth) 3个选项。

在常规数据选项中还有一项十分重要, 即结果输出的间隔日期 (Output interval), 这主要是针对模拟的详细输出结果 (Detailed output) 所显示的内容而设定的。如果用户提供的输出间隔日期超过作物整个生育期, 则模拟将只显示出苗、开花和成熟3个时期的模拟结果。

#### 4.1.2 作物数据 (Crop data)

作物界面主要包括两部分: 一是可选作物 (Available crops), 用于选择模拟的作物品种; 二是开始日期 (Start Day) 和结束日期 (End Day)。

在WOFOST模型中, 日期是根据一年中某日的序列数来确定的。例如, 1月1日为模拟日期的第1天, 12月31日为第365天 (闰年为第366天)。作物生长所持续的时间不能短于1天, 也不能超过366天。

#### 4.1.3 气象数据 (Weather data)

气象数据界面主要包括气象数据格式 (Weather format)、可利用站点 (Available stations) 和降雨数据选项 (Rainfall data options) 3部分。

#### 4.1.4 土壤数据 (Soil data)

在土壤界面中可以选择土壤的类型以及设定有关的土壤水文特性。

#### 4.1.5 养分数据 (Nutrient data)

养分界面可以设定土壤的养分状况。

## 4.2 结果输出

模型输出的结果有两类, 一类是详细结果 (Result detailed...), 另一类是汇总结果 (Result summary...)

详细结果是针对单独一个气象年模拟结果的输出，而汇总结果是对所模拟的多年结果的输出。详细结果窗口包括“Potential”、“Water-limited”、“Water balance”3部分结果；汇总结果所包括的模拟结果分别是“Potential”、“Water-limited”、“Summary”。另外，汇总结果还有多个年份模拟的平均结果输出。

模型所模拟的结果可以利用“Graph”图表显示，但模型所生成的图表不能直接导出。

### 4.3 输入文件

模型输入文件主要包括作物文件、土壤文件、气象文件、运行文件等。对文件中某一参数的修改，可以通过写字板或记事本等程序打开该文件进行编写，然后保存。重新启动WOFOST模型即可得到更改过的文件，在新的模拟过程中该参数的值将会按修改过的值参与到模拟中。

#### 4.3.1 作物文件 (Crop files)

用户模拟的任意一种作物都需要向WOFOST提供包含特定参数的作物文件，这些文件存储在...\WCC\CROPD\。文件的编写需符合特定的要求，建议用户在需要编写新的作物文件时，以模型原有某品种作物文件进行修改，而不要完全重新编写文件，因为文件中含有大量参数，很容易在编写中出错。

作物文件的开头部分主要记录了该品种作物的名称、地理位置、模拟开始的时间、作物数据的来源、气象数据类型和该作物文件的名称等。接下来文件的内容即为作物文件所包含的变量及其所对应的值。

#### 4.3.2 土壤文件 (Soil files)

土壤文件的主要信息是土壤物理特性，其中包括土壤水分保持、渗透系数、土壤可用参数。而土壤化学特性的默认值在站点文件 (site file) 中给出。土壤文件储存于...\WCC\SOILD，其语法要求与作物文件相同。

#### 4.3.3 气象文件 (Weather files)

气象文件主要包括辐射（或日照时数）、气温、降水、蒸压和风速。模型中包含WOFOST-format和CABO-format两类气象文件。

WOFOST-format包括两种类型，一是长期的月平均值 (WOFOST-climate) 气象数据，另一种是时间序列的月平均值 (WOFOST-weather) 气象数据。文件开始的三行所包含的参数与注释用于WCC辨认气象站点以及介绍该站点的特征。气象文件储存于...\WCC\METEO\CLIMD。

CABO-format是每日气象数据，每个文件都包含一个气象站点一年的气象数据。该文件储存于...\WCC\

METEO\CABOWE。文件名称包括国家的名称或缩写以及站点的序号。文件扩展名的3个数字代表年份，例如NL3.987表示Netherlands, station 3 (De Kooy), year1987。WOFOST每日气象数据来源于荷兰3个站点：Wageningen、Swifterbant和De Kooy。模型对文件的格式要求十分严格，建议用户在需要编写新的气象文件时，严格按照模型原有某气象文件格式进行编写。

每日气象数据往往是不完整的，缺失的数据可以通过线性插值的方法自动估算。但降雨数据缺失时直接设定为0。

#### 4.3.4 降水文件 (Rainfall files)

降水文件包含每日降水数据，降水数据必须与一个完整气象站点的数据结合使用。文件储存于...\WCC\METEO\CLIMD。通常在模拟中如果选择CABO-format气象文件则不单独选用降水文件，而是使用气象文件中所含的降水数据。

#### 4.3.5 运行文件 (Run files)

运行文件包括与气象、作物时间有关数据文件 (the timer file (WCCTI.TIM))、土壤化学特性默认数据值文件 (the site file (WCCSI.SIT))、再运行文件 (the rerun file (WCCRR.RER)) 和包含基本信息的运行选项文件 (the run option file (WCC.WCC))。这些文件储存于...\WCC\RUNIO。文件的编写要求与作物文件、土壤文件相似。

### 4.4 输出文件 (Output files)

模拟的结果储存在输出文件中，主要有以下4种文件类型：

——\*.OUT detailed output of simulation 模拟的详细结果

——\*.PPS summary output for potential growth 潜在生长的汇总结果

——\*.WPS summary output for water limited growth 水分限制生长的汇总结果

——\*.SUM summary output 汇总结果

详细结果文件 (\*.OUT) 包含潜在生长、水分限制生长、水分平衡和养分需求4部分结果。

汇总结果文件 (\*.PPS和\*.WPS) 中，每一行结果代表每一个生长期。文件\*.SUM提供了\*.PPS和\*.WPS文件的摘要，文件中给出了某一地区参数的长期平均值。\*.SUM文件只在WOFOST模拟超过两个气象年时生成。

## 5 结语

我国是人口大国，农业现代化水平还不够高，

气候变化引起的极端天气气候灾害频繁发生,对农业生产及其可持续发展造成了严重影响。因此及时、准确地掌握作物生长动态,科学动态地预测作物产量变化,对指导农业科学管理、因势利导趋利避害、确保国家粮食安全具有重大意义。

WOFOST模型是国际上较为先进的农业气象应用模型,它在作物产量风险分析、产量变化预测、农业生产决策管理等领域都具有十分突出的技术优势。只要深入地了解模型的结构、机理和使用操作,结合我国农业生产实际,通过持续不断的本地化研究,模型一定能够成为我国农业气象业务服务的重要支撑技术。

### 参考文献

- [1] 杨霏云,高学浩,钟琦,等.作物模型、遥感和地理信息系统在国内外农业气象服务中的应用进展及启示.气象科技进展,2012,2(3):34-38.
- [2] 王石立,马玉平.作物生长模拟模型在我国农业气象业务中的应用研究进展及思考.气象,2008,34(6):3-10.
- [3] Boogaard H L, van Diepen C A, Roetter R P, et al. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. DLO Wageningen: Winand Staring Centre, 1998.
- [4] 谢文霞,王光火,张奇春.WOFOST模型的发展及应用.土壤通报,2006,37(1):154-158.
- [5] Mellaart E A R. Toepassing van gewasgroei-simulatiemodellen voor risico-studies in sahellanden (The application of crop-growth simulation models for risk-studies in Sahelian countries). In: Huijbers C, Lingsma S P, Oudkerk J C (Eds.) Informatica toepassingen in de agrarische sector, voordrachten VIAS-Symposium 1989.
- [6] Berkhout J A A, Huygen J, Azzali S, et al. MARS definition study. Results of the preparatory phase. Main report. Report 17. SC-DLO, Wageningen, The Netherlands, 1988.
- [7] Huygen J. Simulation studies on the limitations to maize production. Report 7. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, 1990.
- [8] Wolf J, Berkhout J A A, Diepen C A, et al. A study on the limitations to maize production in Zambia using simulation models and a geographic information system In: Bouma J, Brecht A K (Eds.). Land qualities in space and time, proceedings of a symposium organized by the International society of soil science (ISSS), Wageningen, the Netherlands, 22-26 August 1988. Pudoc, Wageningen.
- [9] Koning G H J de, Janssen H, van Keulen H. Input and output coefficients of various cropping and livestock systems in the European Communities, Working Documents W 62. The Hague: Netherlands Scientific Council for Government Policy, 1992.
- [10] Lanen H A J van, Diepen C A van, Reinds G J, et al. Physical land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects with in the EUROPE communities. Agricultural Systems, 1992, 39: 307-328.
- [11] Vossen P. Early crop yield assessment of the E.U countries: the system implemented by the Joint Research Center. EUR Publication of the Office for Official Publications of the E. C. Luxembourg, 1995.
- [12] Vossen P, Rijks D. Early crop yield assessment of the E.U countries: the system implemented by the Joint Research Center. EUR16318 EN of the Office for the office for Official Publications of the E. C. Luxembourg, 1995.
- [13] Diepen C A. van, Wal T van der. Crop growth monitoring and yield forecasting at regional and national scale. In: Dallemand J F, Vossen P (Eds). Agrometeorological models: Theory and applications. Publication EUR 16008 FR of the Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, 1995.
- [14] 宋艳玲,董文杰.1961—2000年干旱对我国冬小麦产量的影响.自然灾害学报,2006,15(6):235-240.
- [15] 陈振林,张建平,王春乙.应用WOFOST模型模拟低温与干旱对玉米产量的综合影响.中国农业气象,2007,28(4):440-442.
- [16] 高永刚,王育光,殷世平,等.世界粮食研究模型在黑龙江省作物产量预报中的应用.中国农业气象,2006,27(1):27-30.
- [17] 谢文霞,严力蛟,王光火.运用WOFOST模型对浙江水稻潜在生长过程的模拟与验证.中国水稻科学,2006,20(3):319-323.
- [18] 杜春英,李秀芬,王晨轶,等.基于WOFOST模型的黑龙省水稻产量动态预报研究.安徽农业科学,2011,39(24):15093-15095,15122.

# 浅谈极端气温事件研究中阈值确定方法

李娇<sup>1, 2</sup> 任国玉<sup>2</sup> 战云健<sup>2, 3</sup>

(1 辽宁省铁岭市气象局, 铁岭 112000; 2 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081;

3 中国气象科学研究院, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** 比较了极端气温事件研究中, 绝对阈值和相对阈值指数的适用范围。归纳总结了近年来国内外在陆地极端气温事件研究中, 相对阈值百分位选取、修订以及资料和计算方法的异同, 评价了不同计算方法的优缺点和适用范围, 讨论了参考期选取的影响。综合已有研究结论发现, 采用不同的相对阈值计算方法检测出的极端气温事件长期趋势以及变异性特征差异极小。为了增强极端气温事件趋势变化分析的统计意义, 以及对不同研究和不同区域分析结果进行比较, 在资料选择和处理、阈值计算方法、气候基准期的确定等方面还需要进一步完善和规范。

**关键词:** 极端气温事件, 绝对阈值, 相对阈值, 计算方法, 气候参考期

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.006

## Discussion on Threshold Determination in Defining Extreme Temperature Indices

Li Jiao<sup>1, 2</sup>, Ren Guoyu<sup>2</sup>, Zhan Yunjian<sup>2, 3</sup>

(1 Tieling Meteorological Service, Liaoning Province, Tieling 112000 2 Laboratory for Climate Studies, China

Meteorological Administration, Beijing 100081 3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** In this paper, the application scope of fixed threshold and percentile threshold index is compared during extreme temperature events. Also, the determination of percentile thresholds for defining extreme temperature indices in studies of long-term change of extreme temperature events is briefly summarized, and the differences of data and calculation methods used in different studies are compared. The effect of reference-period selection on percentile threshold values and the results of analyses are discussed. It is clear from the overview that both advantages and disadvantages exist for different methods of percentile threshold determination. It is found that the long-term trends of extreme temperature events detected are almost the same when different methods of calculation are used. In order to enhance the significance of the statistical analysis of extreme events, trends and to compare the analyses among different studies and different regions, however, it is necessary to further improve the methods of data selection, data processing, threshold calculation methods and the usage of climate baseline period. It is advisable to consistently use the uniform methods for determining percentile thresholds.

**Keywords:** extreme temperature events, fixed threshold, percentile threshold, methods of calculation, climate baseline period

### 1 引言

气候变化伴随着极端天气、气候事件频率和强度的变化。了解全球和区域极端气候事件长期变化规律, 是当前气候变化监测、检测和预估研究的重要方面, 对于气候变化影响和适应性评价也有帮助。

极端气温事件是极端天气与气候事件中的一类, 其定义方法有很多<sup>[1-3]</sup>。目前国际上主要采用极端气温

指数来研究极端气温事件。由于各国、各地区极端指数定义不一, 研究方法不同, 气候变化检测、监测和指数专家小组选取了16个极端气温指数(14个常用指数见表1), 用于区域或全球极端气温事件变化的分析。这些极端气温指数是基于简单的数学统计, 除去反映季节或年内最大、最小值的极值指数外, 都是采用阈值指标来度量的。超过阈值的值被认为是极值, 该事件称为极端事件。阈值又分为绝对阈值和相对阈值。

本文比较了绝对阈值和相对阈值指数的适用范围, 重点讨论相对阈值的确定方法。不同研究者对相对阈值的选择、修订、样本选取、样本容量和计算方法不尽相同, 导致计算的阈值有所差别; 同时参考期

收稿日期: 2012年6月20日; 修回日期: 2013年5月15日

第一作者: 李娇(1986—), Email: lijiaostu@163.com

通信作者: 任国玉, Email: guoyoo@cma.gov.cn

资助信息: 国家科技支撑计划(2007BAC29B02); 公益性(气象)行业科研专项(201206024)

表1 常用的极端气温指数

序号	代码	名称	定义	单位
1	FD0	霜冻日数	日最低气温 (TN) <0℃的全部日数	d
2	SU25	夏季日数	日最高气温 (TX) >25℃的全部日数	d
3	ID0	结冰日数	日最高气温 (TX) <0℃的全部日数	d
4	TR20	炎热夜数	日最低气温 (TN) >20℃的全部日数	d
5	TXx	月极端最高气温	每月内日最高气温的最大值	℃
6	TNx	月最低气温极大值	每月内日最低气温的最大值	℃
7	TXn	月最高气温极小值	每月内日最高气温的最小值	℃
8	TNn	月极端最低气温	每月内日最低气温的最小值	℃
9	TN10p	冷夜日数	日最低气温 (TN) <10%分位值的日数	d
10	TX10p	冷昼日数	日最高气温 (TX) <10%分位值的日数	d
11	TN90p	暖夜日数	日最低气温 (TN) >90%分位值的日数	d
12	TX90p	暖昼日数	日最高气温 (TX) >90%分位值的日数	d
13	WSDI	热日持续指数	每年至少连续6天日最高气温 (TX) >90%分位值的日数	d
14	CSDI	冷日持续指数	每年至少连续6天日最低气温 (TX) <10%分位值的日数	d

的选择不同也提出了相对阈值的代表性问题。本文主要针对这些问题进行简要总结与讨论。

## 2 绝对阈值指数

绝对阈值指数是选取某个影响人类或生物的界限气象要素值来定义的指数。例如：将日最高气温高于35℃的日数作为高温日数（事件），将日最低气温低于0℃的日数作为霜冻日数（事件）。绝对阈值指数定义的极端事件较为直观，计算简单。绝对阈值气温指数由于基于固定值，在全球各地的适用性有所差别，在估算线性趋势时要慎重。Zhou等<sup>[4]</sup>在中国大陆绝对气温指数趋势变化分析时做如下处理，认为在研究时段的2/3年份未出现某项极端事件记录，则估算该站该指数的线性趋势是不可信的。绝对阈值指数适用于空间变率较小的地区，当研究区域气候差异较大时，通常采用相对阈值指数来表征。

## 3 相对阈值指数

### 3.1 相对阈值的定义方法

相对阈值指数是相对于当地气候态的百分位临界值定义的，即从概率分布角度统计的小概率事件。这种定义方法考虑了不同地区气候的差异性，避免了极端气温事件绝对强度随区域不同，难以用同一标准做比较的问题<sup>[5]</sup>。百分位阈值是相对阈值的代表，它是基于气候重现期的思想<sup>[6]</sup>。重现期反映了小概率事件平均发生的时间间隔或年数，重现期越长表明发生概率越小，类似事件越是稀有。具体的重现期计算与选取的百分位数值和样本容量有关。目前相对阈值的应用较为广泛。

例如：冷（暖）日和冷（暖）夜指数是根据当地日最高、最低气温分布中最冷和最暖的某一分位数值，估计出一年或年内特定时段内极端气温事件发生

的频次。将某站参考气候期内同日的最高气温资料按升序排列，得到该日第 $x$ （ $100-x$ ）个百分位值，这样依次得到366个值，将其作为逐日的极端高温事件的上（下）阈值。当某日最高气温大于等于（小于等于）此阈值时，认为该日发生了暖（冷）昼事件。暖（冷）夜事件则以逐日最低气温为研究对象，定义同上。

具体百分位数的选择取决于业务和研究需要。一般来说，气候变化研究中的极值不宜取的太极端，典型重现期不能太长，这样可以确保每一年都检测出足够数量的极端事件，使得气候变化分析更具统计意义。一般极端气温事件的百分位数值多取为90%（10%）或95%（5%），也有人分别取99%和1%<sup>[7, 8]</sup>，将此概率所对应的气温临界值定义为极端气温事件的阈值。

### 3.2 相对阈值的修订

为了去除逐日阈值曲线中包含的天气尺度扰动，得到光滑的逐日阈值曲线，需对其进行低通滤波处理。黄丹青等<sup>[9]</sup>认为滤去8d以下波动的逐日阈值修订方法，能够更合理地检测极端气温事件；张雷等<sup>[10]</sup>参考前人工作，将气温百分位阈值采用5日滑动平均处理，使得逐日阈值更加连续。不同的研究对极端气温阈值的修订方法不同，也有研究未对逐日阈值进行滤波。总体来说，这对检测出的极端事件的频率及趋势变化影响很小。

## 4 相对阈值研究中存在的问题

### 4.1 资料问题

对极端气温事件的研究主要采用逐日最高、最低气温观测资料。例如，有研究以日最高（低）气温第95（5）百分位定义的阈值，用来检测特定季节高温热浪和寒潮事件<sup>[11]</sup>。也有研究<sup>[9, 12]</sup>以日平均气温资料

来选取百分位阈值,分析相对高、低温事件。按照极端事件的统计学定义,第一种样本的概率分布双尾侧分别对应日间和夜间的相对暖、冷事件;日平均气温反映逐日气温的平均状态,以日平均气温为研究对象可以检测出全天平均状态下的暖、冷事件。因为最低和最高气温在很多台站呈现出非对称性趋势,利用两种资料检测出的极端气温事件频次趋势变化可能有所差别。实际研究中,究竟采用哪种资料作为样本,要依照研究目的和资料可获得性等进行选择。

黄丹青等<sup>[9]</sup>以日平均气温资料为研究对象,确定了以90% (10%)为标准的日、旬、月和季四种不同时间尺度的极端高(低)温事件阈值。将相对阈值的定义方法分别应用于逐日、逐旬、逐月和逐季尺度,这样一年中分别得到365, 36, 12和4个阈值。不同时间尺度的阈值随时间的分布形势基本一致,但研究时段内逐日超过高阈值日数的时间分布具有不同特点。超过日尺度高阈值的日数分布均匀,为3~5d;超过旬尺度高阈值的日数在0~14d;而基于月阈值和季阈值得到的日数取值范围更广。因此,基于逐日时长的资料(样本)选取方式检测极端气温事件更为合理。

但是,逐日气温阈值的定义表明,这种方法可供使用的样本量有限,只有30个。为了增加概率分布参数估计的稳定性,Folland等<sup>[13]</sup>提出增加额外的数据来扩充样本量的思想。增加的数据要相对独立,并能够准确代表该日的概率分布特征。Jones等<sup>[14]</sup>完善了这种做法,采用某日及前后间隔各5d的5个数据作为样本(5SD)。最近国外的研究中多是采用连续5d的资料,即以某日为中心,补充前后2d的资料(5CD)。这样在标准气候期中,有5×30个样本来反映当日的气候分布。国内研究多未详细说明是否增加以及如何扩充样本量。

## 4.2 计算方法不同

百分位阈值的主要计算方法有三种:(1)针对不同气候要素采用不同分布型的边缘值来确定阈值;

(2)采用经验公式计算某个百分位值作为极端事件的阈值;(3)累积频率法(CDF)。第一种参数化方法,计算较为复杂,同时参数估计和选取的概率分布类型会增加阈值的不确定性。第二种经验公式方法计算简单,不受错误值干扰,但是当数据结构不服从正态分布时,用经验公式法求得的阈值同样具有不确定性。第三种累积频率法同样不需要了解气象要素的具体统计模型,但是,当确定的组数较少时,求算阈值的精确性较差。

不同分布型的边缘值方法。该方法要考虑气象

要素的概率分布特征,然而不同的气象要素概率分布函数有所不同。在实际确定某一分布时,通常用极大似然方法根据均值 $\mu$ 、方差 $2\sigma$ 和变化系数来确定。但参数估计和选取的概率分布类型会增加阈值的不确定性。气温要素的概率分布一般都服从正态分布,但大多数情况下,并非严格正态。特别是台站气温的月(年)平均值,在一定程度上近似为正态或偏度很小的铃型分布。总体来说,月平均气温、平均最高和最低气温等,是否基本符合正态分布,常因地区、季节而略有差异<sup>[6]</sup>。

Folland等<sup>[13]</sup>提出计算百分位阈值的三个步骤。首先计算逐日的30年气候平均值,然后逐日去除30年的均值(即计算距平值)以消除年际变化;最后对逐日的距平值选择一个合适的概率分布函数进行拟合来计算某个百分位的阈值。

Jones等<sup>[14]</sup>进一步给出了估算阈值的详细步骤,介绍了逐日基准气候值的算法。例如1月1日的平均气温是30年基准气候期内1月1日气温的平均;在非闰年2月29日的值由2月28日和3月1日平均算出。由于这366个值不能产生一个光滑的日平均温度的年际序列,需要进行平滑。文中采用11点的二项式滤波,滤去8.8d以下的天气变化。同样以距平值拟合气象要素的概率分布函数,来求算百分位值。

经验排序公式法。经验排序公式法根据顺序统计量的累积概率与数据排序后的位置建立相关联系,估计百分位值。经验公式方法计算简单,不受错误值干扰,近年来广泛用于极端事件百分位阈值的估计。

方法1:设某个气温变量有 $n$ 个值,将这 $n$ 个记录按升序排列,得到 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,则百分位值为<sup>[15]</sup>:

$$x_0 = (1-a)x_j + ax_{j+1} \quad (1)$$

式中: $j=[p(n+1)]$ , $a=p(n+1)-j$ 。 $j$ 为气温记录按大小升序排列后的序号; $p$ 为百分位值对应的概率;方括号表示数值取整; $n$ 为序列样本容量。

方法2:如果某个气温变量有 $n$ 个值,将这 $n$ 个记录按升序排列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,某个值小于或等于序号为 $m$ 对应的事件出现概率为<sup>[16]</sup>:

$$p = (m - 0.31)/(n + 0.38) \quad (2)$$

式中: $m$ 为 $x_m$ 的序号, $n$ 为某个气温变量记录的个数。如果有30个值,那么第95个百分位值为排序后的 $x_{29}$  ( $p=94.4$ )和 $x_{30}$  ( $p=97.7$ )的线性插值。

需要注意的是:只有当分析的数据服从或近似服从正态分布时,这两个经验公式才能得到较准确的结果<sup>[17]</sup>。但对于不同地区和不同季节的气温序列,正态分布存在不同程度的偏态性质,因此采用以上两个公

式确定的百分位值会有一定偏差。周云等<sup>[17]</sup>以偏态分布下的累积概率分布函数,通过理论推导和数值模拟建立新的经验百分位值估计公式,丰富了非正态分布条件下经验公式的选择。Folland等<sup>[18]</sup>则列举了满足其他分布(潜在正态分布、Gamma分布和指数分布)的经验公式。

累积频率法(CDF)。李庆祥等<sup>[19, 20]</sup>和黄丹青等<sup>[9, 21-23]</sup>根据气温要素的实际样本频率分布作为实际概率分布的近似,确定样本频率分布的组数,求得变量的频率分布后,利用累积频率分布确定百分位阈值。例如将第90百分位与按分组后各组的累积频率值相比较,落入某两组的累积频率值时,采用线性插值求取第90百分位值。

该方法不需要了解气象要素的具体统计模型,因此避免了任何分布假设。但是,当确定的组数较少时,求算阈值的精确度较差。李庆祥<sup>[19]</sup>认为根据最高气温的实际样本频率分布作为实际概率分布的近似,在极端高温阈值的选择上较前两种经验公式效果要好。

不同方法计算的阈值具有一定差别,因而检测出的极端气温事件的日数也有差别,但对极端气温事件频率和强度的趋势变化影响很小。Zhang等<sup>[24]</sup>采用经验公式和高斯分布函数分别获得百分位阈值方法,计算得到的极端气温日数比率(大于阈值日数与总日数的比值)差别很小。Bonsal等<sup>[16]</sup>认为采用经验公式(方法2)和Gamma分布函数检测出的极端气温事件频率长期趋势以及年际变率几乎相同。

### 4.3 参考期选择

由于各个国家、各个台站建站时间不同,为了更好地比较不同站点、不同研究时段的极端气温事件,国外文献多以世界气象组织规定的某一30年基准气候期作为气候参照时段,在基准气候期内确定阈值作为极端气温事件的标准,来评估极端气温事件频率和强度相对于该时期的变化程度。在基准气候期选择的阈值具有相对稳定性和可比性,因此可以沿用到未来一段时间,不同站点间也可以进行比较。也有文献在整个研究时段选取阈值<sup>[13, 25, 26]</sup>,用以研究整个时段内的极端气温事件的总体变化情况。近几年,国内研究多在基准气候期内选取阈值<sup>[27-30]</sup>来分析极端气温事件的变化。

以整个研究时段作为参考期,选取气温相对阈值的一个主要问题是,计算获得的台站极端气温指数的气候平均值和平均重现期相同<sup>[8, 12]</sup>。例如,文献[12]给出的各个代表站极端低温指数T10%和极端高温指

数T90%的40年平均值是相同的,都为36d,平均重现期都为10d(表2)。因为对于某一天,40年中日平均气温低于T10%阈值的天数都是4d,全年按照365个日历日计算,极端低温日数共有1460d,40a平均每年36.5d。在这种情况下,进行区域之间极端气温事件的气候学比较就很困难。

表2 各代表站极端低温、高温日数的多年(1961—2000年)平均值

代表站名	乌鲁木齐	沈阳	兰州	成都	南京	福州
T10%/d	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)
T90%/d	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)

注:此表据文献[12]改制,括号内为平均重现期

在基准参考期计算相对阈值的方法也存在问题。Zhang等<sup>[24]</sup>采用蒙特卡罗模拟试验发现:基准气候期内确定的极端气温百分位阈值指标,由于抽样的不确定性,阈值在基准气候期前后存在非均一性,当许多站点求算平均时,这种非均一性更加明显。因此估计的极端事件频数在趋势分析时会产生错误结论。Zhang等<sup>[24]</sup>对该问题进行了处理,bootstrapping方法的提出和应用减少或消除了有关极端气温指数趋势估计中的可能偏差。

对于参考期的选择, Jones等<sup>[14]</sup>认为:当两个时期的平均气温相差不大时,选择不同的参考期对极端气温事件的检测结果不是很敏感。他们分别采用1931—1960年和1961—1990年作为参考期,得到的极端冷、暖事件日数相差不大,因为这两个时段的平均气温几乎没有差异。他指出,如果极端气温事件阈值在一个变化的参考期内确定,则可能会得到有所不同的结论。

气候状态的改变影响极端事件概率的情况有3种可能情况:气候要素均值发生变化,气候要素变率(标准差)发生变化,变率和均值同时变化。气候状态的不同变化对极端事件的影响是不同的。有研究表明<sup>[31]</sup>,平均值的很小变化会导致极端事件频率发生很大变化;标准差变化对极端事件频率的影响要大于均值变化的影响。参考期的选择一般对极端气温阈值本身和极端气温事件的气候学特征分析有影响,然而在全球气候变暖的背景下,随着气候参考期(目前为1981—2010年)不断调整,参考期的选择对于极端气温事件的长期趋势变化的影响还有待于进一步研究。

## 5 结论与讨论

本文归纳总结了近年来国内外在陆地极端气温事件研究中,绝对阈值和相对阈值指数的适用范围。重点评述了相对(百分位)阈值选取、修订以及样本和

计算方法的异同,评价了不同计算方法的优缺点和适用范围,讨论了参考期选取对分析结果的影响。

已有研究对相对阈值选择、修订、样本选取、样本容量和计算方法不尽相同,导致计算的极端气温事件阈值有所差别,检测出逐年的和各个年代极端气温事件的频数也略有不同,但总体来说,不同计算方法一般只对阈值本身和极端气温事件年际、年代际变化分析结果具有影响,而对于极端气温事件长期趋势研究结果几乎没有影响。对极端气温事件气候变化分析结果影响比较大的主要是资料选取和处理方法,需要今后给予足够重视。不同的参考期选取对于极端气温事件的长期趋势变化的影响还有待于进一步研究。

但是,为了增强极端气温事件趋势变化分析的统计意义,同时为了增加不同研究和不同区域分析结果之间的可比性,在极端气温事件阈值定义、计算方法和气候基准期选择等方面,确实需要进一步完善和规范。

#### 参考文献

- [1] 马柱国,符凉斌,任小波,等.中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系.地理学报,2003,58(增刊):11-20.
- [2] Andrew F, David E, Bryan W. Climate variability and the frequency of extreme temperature events for nine sites across Canada: implications for power usage. Journal of Climate, 1999, 12(7): 2490-2502.
- [3] 章大全,钱忠华.利用中值检测方法研究近50年中国极端气温变化趋势.物理学报,2008,57(7):4634-4640.
- [4] Zhou Y Q, Ren G Y. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008. Climate Research, 2011, 50: 125-139.
- [5] 封国林,侯威,支蓉,等.极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究.北京:科学出版社,2012:3-6.
- [6] 丁裕国,江志红.极端气候研究方法导论.北京:气象出版社,2009:79-80,54-55.
- [7] Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R, et al. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region. International Journal of Climatology, 2005, 25: 1301-1330.
- [8] Klein Tank A M G, Können G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. Journal of Climate, 2003, 16: 3665-3680.
- [9] 黄丹青,钱永甫.我国极端温度事件的定义和趋势分析.中山大学学报,2008,47(3):112-116.
- [10] 张雷,任国玉,刘江,等.城市化对北京气象站极端值气温指数趋势变化的影响.地球物理学报,2011,54(5):1150-1159.
- [11] 潘晓华,翟盘茂.气温极端值的选取与分析.气象,2002,28(10):28-31.
- [12] 刘学华,季致建,吴洪宝,等.中国近40年极端气温和降水的分布特征及年代际差异.热带气象学报,2006,22(6):618-624.
- [13] Folland C, Miller C, Bader D, et al. Workshop on indices and indicators for climate extremes, Asheville, NC, USA, 3-6 June 1997. Breakout Group C: Temperature indices for climate extremes. Climatic Change, 1999, 42: 31-43.
- [14] Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. The use of indices to identify changes in climatic extremes. Climatic Change, 1999, 42: 131-149.
- [15] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research, 2002, 19: 193-212.
- [16] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. Journal of Climate, 2001, 14: 1959-1976.
- [17] 周云,侯威,钱忠华,等.基于偏态分布的百分位估计公式的建立.物理学报,2011,60(8):089201-1-089201-9.
- [18] Folland C, Anderson C. Estimating changing extremes using empirical ranking methods. Journal of Climate, 2002, 15: 2954-2960.
- [19] 李庆祥,黄嘉佑.对我国极端高温事件阈值的探讨.应用气象学报,2011,22(2):138-144.
- [20] 李庆祥,黄嘉佑.北京极端低温事件的长期变化趋势.高原气象,2012,31(4):1145-1150.
- [21] 黄丹青,钱永甫.极端温度事件区域性的分析方法及其结果.南京大学学报,2009,45(6):715-723.
- [22] Huang D Q, Qian Y F, Zhu J. Trends of temperature extremes in China and their relationship with global temperature anomalies. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(4): 937-946.
- [23] 黄丹青,钱永甫. Community Climate Model 3模拟夏季极端降水的初步分析.南京大学学报,2007,43(3):238-248.
- [24] Zhang X, Gabriele H, Francis W Z, et al. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. Journal of Climate, 2005, 18: 1641-1651.
- [25] 游庆龙,康世昌,李潮流,等.三江源地区1961—2005年气温极端事件变化.长江流域资源与环境,2008,17(2):232-236.
- [26] 张宁,孙照渤,曾刚.1955—2005年中国极端气温的变化.南京气象学院学报,2008,31(1):123-128.
- [27] 翟盘茂,潘晓华.中国北方近50年温度和降水极端事件变化.地理学报,2003,58(增刊):001-010.
- [28] 周雅清,任国玉.中国大陆1956—2008年极端气温事件变化特征分析.气候与环境研究,2010,15(4):405-417.
- [29] 任王玉,任国玉.1960—2008年江西省极端降水变化趋势.气候与环境研究,2010,15(4):462-469.
- [30] 杨金虎,江志红,王鹏祥,等.西北地区东部夏季极端降水量非均匀性特征.应用气象学报,2008,19(1):111-115.
- [31] 丁裕国,申红艳,江志红,等.气候概率分布理论及其应用新进展.气象科技,2009,37(3):257-262.

# 光流法对2011年“梅花”台风期间500hPa 高度场预报的检验释用

朱智慧 黄宁立 浦佳伟  
(上海海洋气象台, 上海 201306)

**摘要:** 利用光流技术, 对2011年台风“梅花”期间ECMWF(简称EC)和T639两个数值天气预报模式的500hPa高度场预报进行了检验和释用。结果发现, EC的24、48和72h预报具有稳定的误差。EC的24h预报强度误差比观测低2~9gpm, 角度误差在180°和240°之间(极坐标系), 也就是西到西南向; EC的48h预报强度误差比观测低8~18gpm, 角度误差同样在180°和240°之间。EC的72h预报强度误差比观测低-25~26gpm, 角度误差在170°和290°之间。作为比较, T639的预报强度和预报角度误差则没有那么稳定。对预报位移误差而言, EC和T639的预报误差都比较稳定。利用基于光流技术的数值预报释用方法, 将24h的预报误差用来订正48h的预报, 结果表明, 订正预报场比预报场本身更近似于观测场。

**关键词:** 光流技术, 台风“梅花”, 检验释用, 位势高度

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.007

## Verification and Application for 500hPa Height Forecasts During the Period of Typhoon MUIFA(1109) Using the Optical Flow Technique

Zhu Zhihui, Huang Ningli, Pu Jiawei  
(Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201306)

**Abstract:** Using the optical flow technique, 500hPa height forecasts of two numerical weather prediction (NWP) models ECMWF (EC for short) and T639 during the period of Typhoon MUIFA(1109) are verified and interpreted. The results show that EC has stable errors in 24h, 48h and 72h forecasts. Its 24h forecast intensities are 2-9gpm lower than observations, and angular errors are between 180° and 240°, which are between west and southwest. Its 48h forecast intensities are 8-18gpm lower than observations, and angular errors are also between 180° and 240°. Its 72h forecast intensities are mainly -25 to 26gpm lower than observations, and angular errors are mainly between 170° and 290°. By contrast, the intensity and angular errors of T639 are not so stable. As for displacement errors, the performances of EC and T639 are both stable. The similar disparities between observation fields and 24h, 48h and 72h forecast fields of the two models also show that EC has better forecasting performances than T639. Finally, an application technique is used to correct the 48h forecast fields according to the 24h forecasts errors. The results show that when the distortion errors of 24h forecasts obtained from the optical flow field are used to correct the 48h forecasts, the correction fields are more similar to the observation fields than the forecast fields themselves.

**Keywords:** optical flow technique, MUIFA, verification and application, geopotential height

### 1 引言

光流是计算机视觉领域中的重要概念, 最早由生物学家Gibson于1950年提出, 在图像处理领域, 光流技术已经被很好地研究<sup>[1-6]</sup>。在空间中, 运动用运动场描述, 二维平面上的一张图像, 由三维空间投影而来,

上面的每一个点都有相应的强度值, 而物体的运动则是通过图像序列中强度的变化来描述的, 空间中的运动场转移到图像上就表现为光流场。光流的研究就是利用图像序列中的像素强度数据的时域变化和相关性来确定各自像素位置的“运动”, 即研究图像灰度在时间上的变化与景象中物体结构及其运动的关系, 它是一种二维瞬时速度场, 携带了大量的三维运动信息和几何结构信息。通过对光流场进行分析, 可以实现对目标的检测和跟踪。目前, 光流场除了应用于图像分割、目标识别和追踪、运动估计等传统的计算机视

收稿日期: 2013年4月16日; 修回日期: 2013年7月29日  
第一作者: 朱智慧(1984—), Email: zzh830830@163.com  
资助信息: 上海市气象局面上项目(MS201211); 中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2013-023)

觉领域外，还被应用于军事、医学、交通、天文等多个领域。

在气象领域，韩雷等<sup>[7]</sup>将光流法应用于强对流天气临近预报，结果表明对变化较快的强对流降水天气过程，光流法具有明显的预报优势。数值天气预报模式产生的预报要素空间场在某一层上是二维的格点场，站点观测数据通过插值也可以处理为二维的格点场，因此，应用于图像处理领域的光流技术同样可以用来进行数值模式检验。通过求解预报场和观测场之间的映射函数，可以得到反映两个场吻合程度的光流场，光流场提供了数值模式预报误差方面非常有用的信息<sup>[8]</sup>。Marzban等<sup>[9]</sup>利用光流技术检验了华盛顿中尺度集合预报系统的海平面气压预报，结果表明，通过将光流场分解为强度误差、角度误差和位移误差3种，可以很好地评估模式的预报偏差，另外，利用光流技术检验此中尺度集合预报系统418d长时间序列的海平面气压24h预报，可以定量评估模式的预报性能，研究表明，此中尺度模式在亚热带地区有明显的强度偏差，特别是在南加州地区，研究还发现陆地上一个50km的系统性偏差，这可能是由粗分辨率模式的地形处理造成的。

在2011年第9号超强台风“梅花”的路径预报中，全球各大机构的数值模式都出现了较大的偏差，例如中央气象台先后预报“梅花”将在上海到江苏沿海一带、山东半岛东部沿海及辽东半岛南部沿海登陆，但“梅花”3次都是与中国大陆擦肩而过，在相距80~200km的近海北上。由于数值模式的初始场、参数化等因素的影响，目前数值模式结果还存在一定的偏差和不足。如果一个模式的预报误差相对比较稳定，那么它的预报结果就有较高的参考价值，有效分析和利用这些误差也是提高预报能力的一个重要手段。因此，本文利用光流技术分析了“梅花”期间EC和T639的预报误差，并利用这些误差进行了数值预报的释用，在一定程度上改进了预报结果。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

本文所使用的资料为：

(1) 中国气象局MICAPS系统下发的EC和T639的500hPa位势高度24，48和72h预报场和对应时次的分析场，时间为2011年8月1日20时至8月8日20时。其中EC资料空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 经纬距，T639资料为 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬距。

(2) 中央气象台“梅花”定位报文资料，时间为2011年8月1日20时至8月8日20时。

### 2.2 LK方法计算光流场

光流场的计算方法主要有Horn-Schunck方法<sup>[10]</sup>和LK方法<sup>[11]</sup>。本文使用了LK方法。

考虑一个图像上的像素点 $(x, y)$ ，在 $t$ 时刻的强度为 $I(x, y)$ ，经过一段时间 $dt$ ，该点在图像平面上的位置移动到了 $(x+dx, y+dy, t+dt)$ 。假定它的强度总是不变的，则：

$$I(x, y, t) \approx I(x+dx, y+dy, t+dt) \quad (1)$$

对数值模式检验而言，用 $I_0$ 和 $I_f$ 代表同一时次( $dt=0$ )的气象要素 $I$ 的观测场和预报场，则方程变为：

$$I_0(x, y) \approx I_f(x+dx, y+dy) \quad (2)$$

当场强不假设为常数时，Marzban等<sup>[9]</sup>将LK方程改进为：

$$I_0(x, y) \approx I_f(x+dx, y+dy) + A(x, y) \quad (3)$$

其中， $A(x, y)$ 代表预报场相对观测场的强度误差。将上式进行泰勒展开：

$$I_0(x, y) \approx A(x, y) + I_f(x, y) + \frac{\partial I_f}{\partial x} dx + \frac{\partial I_f}{\partial y} dy + \frac{\partial^2 I_f}{\partial x^2} dx^2 + \frac{\partial^2 I_f}{\partial y^2} dy^2 + \frac{\partial^2 I_f}{\partial x \partial y} dx dy + \dots \quad (4)$$

省略其中二阶及以上的偏导数项，则方程变为：

$$I_0(x, y) \approx A(x, y) + I_f(x, y) + \frac{\partial I_f}{\partial x} dx + \frac{\partial I_f}{\partial y} dy \quad (5)$$

令 $u=dx$ ， $v=dy$ ，则上式可写为：

$$I_x u + I_y v + A = dI \quad (6)$$

即：

$$\begin{bmatrix} I_x & I_y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ A \end{bmatrix} = dI \quad (7)$$

其中， $I_x$ 和 $I_y$ 分别代表 $I_f$ 在 $x$ 和 $y$ 方向的梯度， $dI=I_0-I_f$ 代表观测场与预报场的差值。需要求解的参数为 $u, v, A$ 。 $(u, v)$ 称为光流，每个格点上 $(u, v)$ 所构成的矢量场就是光流场。

假设在一个有 $n$ 个点的小窗口内光流是一致的，则：

$$\begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} & 1 \\ I_{x2} & I_{y2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{xn} & I_{yn} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dI_1 \\ dI_2 \\ \vdots \\ dI_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{令 } M = \begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} & 1 \\ I_{x2} & I_{y2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{xn} & I_{yn} & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} dI_1 \\ dI_2 \\ \vdots \\ dI_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

则  $MU=b$  (10)

$$U = (M^T M)^{-1} M^T b \quad (11)$$

$U$ 即为需要求解的 $u, v, A$ 所组成的向量。将 $u, v$ 转化为极坐标系表示:

$$\begin{aligned} u &= r \cos \theta \\ v &= r \sin \theta \end{aligned} \quad (12)$$

其中的极径 $r$ 和角度 $\theta$ 就分别代表位移误差和角度误差。这样,对某一气象要素 $I$ ,利用光流法就求得了数值模式预报场相对于观测场的3种误差场:强度误差场、位移误差场和角度误差场。

数值预报不可避免的存在预报误差,通过光流技术的检验,可将预报误差分解为强度误差、位移误差和角度误差3种误差并进行量化,如果24h的预报误差被用来订正48h的预报,将对48h的预报起到一定的订正作用,因此本文提出了一种利用光流检验技术进行预报订正的释用方法:

$$I'_{48}(x, y) = A_{24}(x, y) + I_{f48}(x, y) + \frac{\partial I_{f24}}{\partial x} dx_{24} + \frac{\partial I_{f24}}{\partial y} dy_{24} \quad (13)$$

式中,  $I'_{48}(x, y)$ 代表48h预报场的订正场,  $A_{24}(x, y)$ 代表24h预报场的强度误差,  $I_{f48}(x, y)$ 代表48h预报场,  $dx_{24}, dy_{24}$ 分别代表24h预报在 $x, y$ 方向的位移误差。

### 2.3 相似高度计算方法

相似高度<sup>[12]</sup>综合考虑了形相似和值相似,是比较两个样本相似程度的比较有效的方法,因此可以用来检验数值模式预报场和实况观测场的相似程度。其计算方法如下:

$$C_{ij} = \frac{1}{2}(S_{ij} + D_{ij}) \quad (14)$$

其中,

$$S_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |X_{ijk} - E_{ij}|$$

$$D_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |X_{ijk}|$$

$$X_{ijk} = X_{ik} - X_{jk}$$

$$E_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M X_{ijk}$$

式中,  $i, j$ 分别为两个样本序号,  $X$ 表示因子数值,  $M$ 为样本个数,  $C_{ij}$ 越小,表示 $i, j$ 两个样本越相似。

### 3 光流法应用示例

作为应用光流法进行数值预报检验的示例,本文首先利用圆的方程(式15)进行模拟,构造了两个 $201 \times 101$ 格点数的二维空间场。

$$I_{o(i,j)} = x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2, \quad (15)$$

$$I_{f(i,j)} = (x_{i,j} + a)^2 + (y_{i,j} + b)^2 \quad (16)$$

其中,  $x \in [-20, 20], y \in [-10, 10], a = 2 + (i-1) \times 0.02,$

$b = 2 + (j-1) \times 0.01$ 。 $I_o$ 代表观测场,  $I_f$ 代表预报场,由于 $x \in [-20, 20], y \in [-10, 10]$ ,在强度误差方面,越靠近 $x$ 和 $y$ 数值集合的两端,  $I_f$ 相对于 $I_o$ 的误差越大。 $I_o$ 和 $I_f$ 结构相似,只是 $I_f$ 相对 $I_o$ 发生偏移,并且偏移的距离随 $i, j$ 的增大逐渐增大。对偏移角度而言,因为在 $x$ 和 $y$ 方向的偏移距离分别为 $a$ 和 $b$ ,偏移的角度可以用下式求得:

$$\theta = k\pi + \arctg \frac{b}{a} \quad (k = 0, 1, 2) \quad (17)$$

其中,  $a \in [2, 6], b \in [2, 3]$ ,因此 $\frac{b}{a} \in [\frac{1}{3}, \frac{3}{2}]$ ,  $I_f$ 相对于 $I_o$ 都是向左下方偏移,这样偏移角度 $\theta \in [180 + \arctg(\frac{1}{3}), 180 + \arctg(\frac{3}{2})]$ ,数值在200~270之间。

图1是观测场(蓝色曲线)和预报场(红色曲线)的模拟结果,分别给出了观测场和预报场之间的光流检验场(箭头场)以及利用光流法计算的强度、位移和角度3种误差场,同时也给出了这3种误差场的误差统计直方图。从图1a可以看到,利用光流技术很好地表现了预报场相对于观测场的预报误差。从图1b和1e看到,正如所预期的那样,强度误差在整个场的中部较小,而在其他部分则逐渐增大,误差统计显示所有强度误差均为正偏差(即预报比观测偏强),并且数值主要分布在20~50之间。从图1c和1f看到,位移误差随着 $i, j$ 的增加在逐步增大,最大的值出现在场的右上部,误差统计显示预报场相对于观测场,偏移数值主要分布在2~8之间。图1d和1g也准确表现了预报场相对于观测场的偏移方向,数值在200~270之间,即偏向西南向。

### 4 EC和T639模式一次24h预报的光流检验对比分析

利用2.2节介绍的光流场计算方法,将EC和T639模式的500hPa位势高度预报场和对应时次的观测场代入公式中,就可以求得某一时次数值预报的光流检验场、强度误差场、位移误差场和角度误差场。从图2和图3中可以看到,对8月3日20时的预报而言,在强度误差方面,EC对台风“梅花”的强度预报略偏强,对西太平洋副热带高压和西风槽的预报则略偏弱, T639对台风“梅花”和西风槽的预报都偏强,对西太平洋副热带高压的预报同样偏弱。在位移误差方面,EC对台风“梅花”的预报位移误差为0.5~1个经纬距,对西太平洋副热带高压和西风槽的预报位移误差比较小,在0.5个经纬距左右,而T639对台风“梅花”的预报位移误差在1个经纬度左右,对西太平洋副热带高压和西风槽的预报则存在比较大的误差,基本在1~2个经纬距。在角度预报误差方面,EC对台风“梅花”的预报偏西,对西太平洋副热带高压的预报以偏西到西南为主,对西风槽的预报以偏西为主, T639

对台风“梅花”的预报误差也主要是偏西，对西太平洋副热带高压的预报则主要是偏西，对西风槽的预报在槽前主要是偏西南，而在槽附近及槽后则主要是偏北。从强度、位移、角度3个预报误差场的误差统计直方图可以看到，EC的强度误差值（单位：dagpm）主要集中在-0.5~0.5之间，范围较小，而T639的强度误差集中在-2~2之间，范围较大。EC的位移误差值主要集中在0~2之间，且以0~1之间的值居多；T639的位移误差集中在0~3之间，同样以0~1之间的值居多。EC的角度误差值以150°~240°之间的值居多，即预报偏西到西南向；T639的角度误差主要分布在150°~270°以及0°~30°和330°~360°之间，即角度误差以偏西到西南向和偏北为主。

## 5 “梅花”影响期间EC和T639模式预报光流检验对比分析

取台风中心附近4个格点的平均误差代表数值模

式对台风区域的预报误差，分别计算了EC和T639模式的24, 48和72h预报强度误差、位移误差和角度误差（表1）。

从表1a看到EC的24, 48和72h预报具有稳定的强度误差，它的24h预报强度误差比观测低2~9gpm，48h预报强度误差比观测低8~18gpm，72h预报强度误差比观测低-25~26gpm，随着预报时效的增加，误差也相应的在增大。作为比较，T639的强度误差表现不稳定，24h, 48h和72h预报强度误差分别为-6~29, -45~46, -86~4gpm，变化都较大。从标准差也可以看出，EC的预报强度误差稳定性更好。

从表1b中可以看到，对预报位移误差而言，EC和T639的24h预报表现都比较稳定，EC为0.2~1.1个经纬距，T639为0.2~1个经纬距。EC的48h和72h预报位移误差也比较稳定，基本在1~2个经纬距。T639的48h和72h预报位移偏差相对对应时次的EC预报表现要

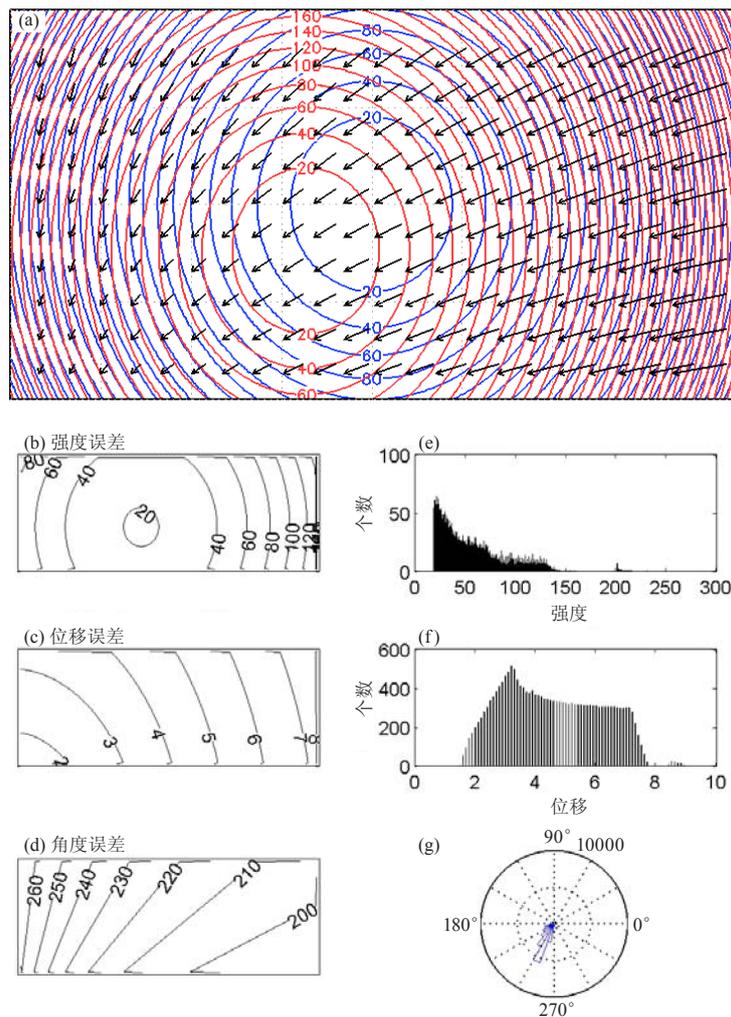


图1 模拟场的光流检验场以及3种误差场。(a)为光流场(蓝色代表观测场,红色代表预报场),(b)、(c)、(d)为3种误差场的空间分布,(e)、(f)、(g)为3种误差场的统计直方图

更好一些，但误差在0.4~1.7以及0.6~2.5个经纬距之间，变化较大。

从表1c可看到EC的24h预报角度误差在180°~240°之间，48h预报角度误差同样在180°~240°之间，72h预报强度误差在170°~290°之间，也就是说，EC的24、48和72h预报角度误差主要是偏向西到西南向。在预报角度误差方面，T639同样表现不稳定，其24h预报角度误差在1—2日主要偏向西北到北，在3—8日则主要偏向西南；48h预报角度误差在1—5日主要偏向西北到偏北方向，而在6—7日则主要偏向西南，8日偏向西北；72h预报角度误差在1—8日主要偏向西北到偏北方向。从标准差也可以看出，EC的预报角度误差稳定性更好。

### 6 光流法订正释用结果分析

计算1—8日EC和T639模式的24、48和72h 500hPa

预报场与分析场的相似离度（表2）。可以看到，EC和T639的24h预报与实况的相似度最好，两个模式24、48和72h预报尽管存在误差，但相似离度变化不大，也就是说，两个模式对整个高度场的预报都比较稳定。另外，EC的24、48和72h预报都要比T639表现更好。

从前面的分析来看，模式的预报往往具有一些相对稳定的误差，如果将模式的24h预报误差用来订正48h预报，将能够使模式预报结果更接近实况。利用前面介绍的订正方法，计算了48h预报场和订正后的48h预报场与分析场的相似离度（图4）。可以看到，对EC和T639两个模式，在2—8日，订正后的48h预报场与分析场的相似离度比订正前基本都有所减小，这说明，将光流技术计算的24h预报场误差用来订正48h预报场是一种有效的方法。

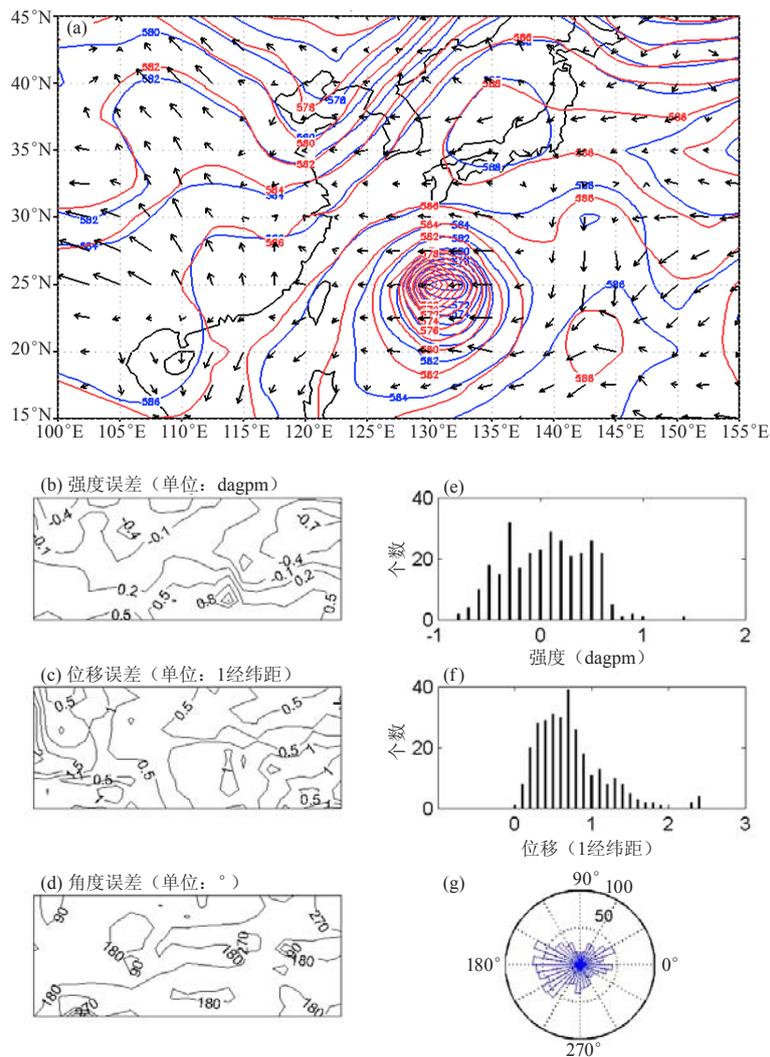


图2 与图1类似，是EC模式2011年8月3日20时500hPa 高度场24h预报检验

## 7 结论与讨论

### 7.1 结论

利用光流技术对台风“梅花”期间EC和T639模式的500hPa高度场预报进行了检验和释用，主要得出以下几点结论：

(1) 利用光流技术，可以很好地表征预报场相对于观测场的预报误差，并将误差分解为强度、位移和角度3种误差场，在反映不同模式对一次天气过程的预报效果和特点方面具有较高的实用价值。

(2) 在预报误差方面，光流技术提供了EC和T639两个数值预报模式对台风区域预报的有用信息。EC的24、48和72h预报具有稳定的误差。EC的24h预报强度误差为2~9gpm，角度误差在180°~240°之间，也就是西到西南向。EC的48h预报强度误差为8~18gpm，角度误差同样在180°~240°之间；EC的72h预报强度误差比观测低-25~26gpm，预报角度误

差在170°~290°之间。作为比较，T639的预报强度和预报角度误差则相对不那么稳定。

(3) 两个模式24、48和72h的预报场与对应的分析场的相似离度表明，EC比T639具有更好的表现。当通过光流技术得到的24h预报误差被用来订正48h预报时，订正预报场比预报场本身更近似于观测场。

(4) 利用光流检验技术，可以连续跟踪数值模式的预报偏差，通过长时间序列的统计分析，有助于发现数值模式的系统误差，从而为改进数值模式的预报性能提供必要的参考。

### 7.2 讨论

通过本文的研究，发现光流技术是一种比较有效的数值检验方法，未来在应用中还需要注意，对于海平面气压、位势高度等空间连续场的检验，光流技术应用起来比较简便，但对降水这样的不连续场，因为涉及到边界问题，光流检验技术还没有很好的应用，

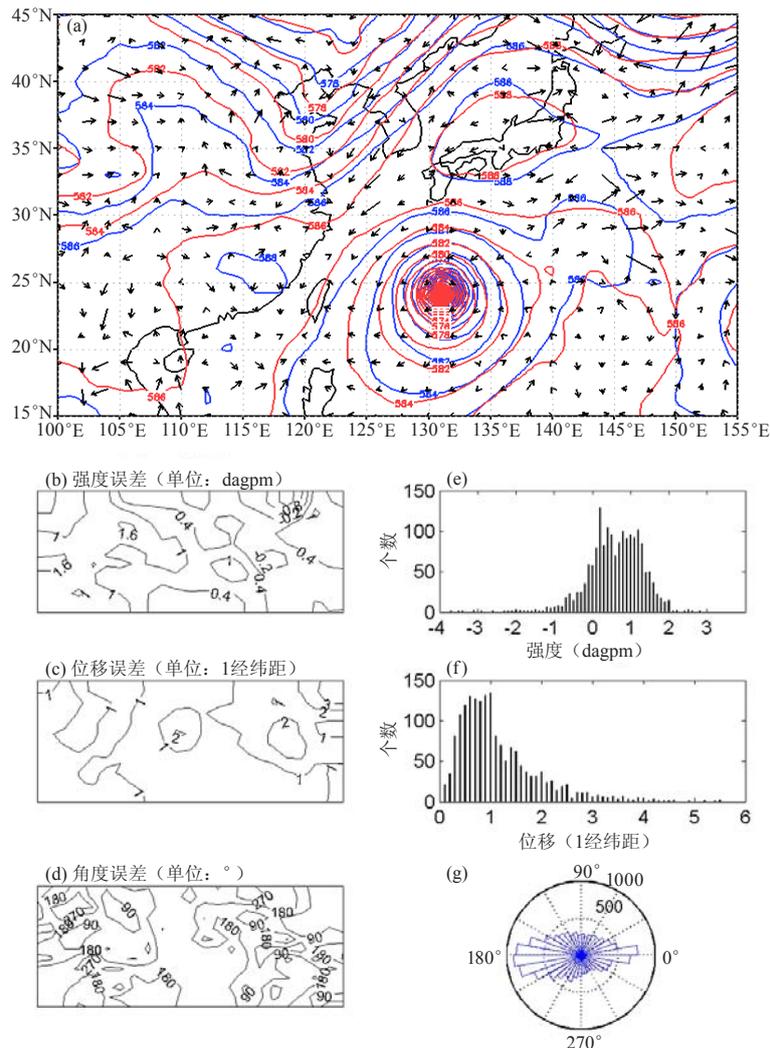


图3 与图1类似，是T639模式2011年8月3日20时500hPa高度场24h预报检验

表1a EC和T639模式24, 48和72h预报强度误差 (单位: dagpm)

时间	EC模式			T639模式		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h
2日20时	0.5	1.8	2.3	0	0.6	-1
3日20时	0.5	1.4	2.6	0.6	0.8	-0.6
4日20时	0.2	1.3	2.2	-0.6	-0.1	-0.9
5日20时	0.2	0.8	1.4	1.9	-0.5	-0.3
6日20时	0.6	1	0.8	1.9	2.9	0.4
7日20时	0.7	1.7	0.9	2.2	4.6	-0.8
8日20时	0.9	1.5	-2.5	2.9	-4.5	-8.6
标准差	0.2	0.4	1.5	1.1	2.5	2.9

表1b EC和T639模式24, 48和72h预报位移动误差 (单位: 1经纬距)

时间	EC模式			T639模式		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h
2日20时	0.8	0.9	1.3	1	1	1
3日20时	0.7	1.6	1	0.6	1.7	0.8
4日20时	0.7	1.1	1.8	0.2	0.9	1.5
5日20时	0.8	1.2	1.5	0.3	0.4	0.9
6日20时	0.6	2.2	2.6	0.3	0.5	0.6
7日20时	0.2	1.5	1.8	0.3	0.8	0.6
8日20时	1.1	1.4	1.3	0.9	1.1	2.5
标准差	0.3	0.4	0.6	0.3	0.4	0.6

表1c EC和T639模式24, 48和72h预报角度误差 (单位: °)

时间	EC模式			T639模式		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h
2日20时	213	198	193	344	345	314
3日20时	186	204	170	214	4	23
4日20时	238	198	210	124	318	12
5日20时	201	234	209	227	36	353
6日20时	189	239	235	124	236	300
7日20时	214	197	246	220	214	244
8日20时	203	202	288	195	317	316
标准差	15.1	17.4	35.4	76.4	122.4	130.9

表2 EC和T639模式24, 48和72h预报场与观测场的相似离度

时间	EC模式			T639模式		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h
2日20时	0.37	0.67	0.99	0.73	1.13	1.73
3日20时	0.49	0.75	1.15	0.68	1.24	2.21
4日20时	0.42	0.64	0.99	0.66	1.12	1.71
5日20时	0.39	0.67	0.89	0.70	1.17	1.45
6日20时	0.39	0.61	0.78	0.67	1.04	1.51
7日20时	0.42	0.70	0.99	0.68	1.04	1.41
8日20时	0.43	0.79	1.20	0.77	1.25	1.63

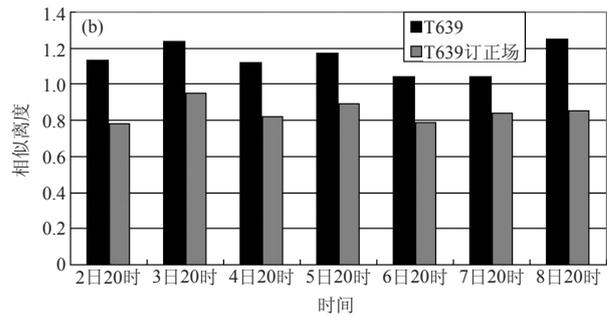
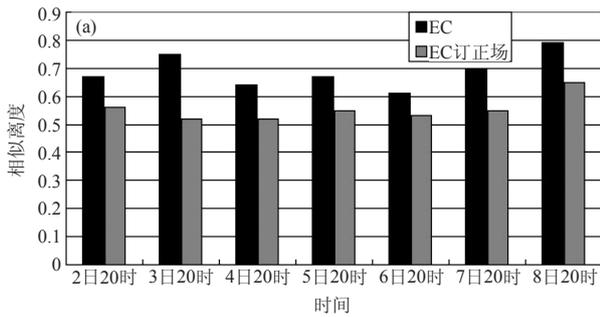


图4 2011年8月2—8日EC (a) 和T639 (b) 的48h预报场与订正场的相似离度比较

这需要进一步的研究。

参考文献

[1] Barron J L, Fleet D J, Beauchemin S S. Performance of optical flow technique. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 12(1): 43-77.

[2] Camus T. Real-time quantized optical flow. *Real-Time Imaging*, 1997, 3: 71-86.

[3] Hwang S H, Lee U K. A hierarchical optical flow estimation algorithm based on the interlevel motion smoothness constraint. *Pattern Recognition*, 1993, 26: 939-952.

[4] Kearney J K, Thompson W B, Boley D L. Optical flow estimation: An Error Analysis of Gradient-Based Methods with Local Optimization. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 9: 229-244.

[5] McCane B, Novins K, Crannitch D, et al. On benchmarking optical flow. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 84: 126-143.

[6] Weber J, Malik J. Robust computation of optical flow in a multi-scale differential framework. *Int J Comput Vision*, 1995, 14: 67-81.

[7] 韩雷, 王洪庆, 林隐静. 光流法在强对流天气临近预报中的应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(5): 751-755.

[8] Marzban C, Sandgathe S, Lyons H, et al. Three Spatial Verification Techniques: Cluster Analysis, Variogram, and Optical Flow. *Weather and Forecasting*, 2009, 24: 1457-1471.

[9] Marzban C, Sandgathe S. Optical Flow for Verification. *Weather and Forecasting*, 2010, 25: 1479-1494.

[10] Horn B K P, Schunck B G. Determining Optical Flow. *Artificial Intelligence*, 1981, 17: 185-203.

[11] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision (darpa). In: *Proceedings of the 1981 DARPA Image Understanding Workshop*, April 1981.

[12] 李开乐. 相似离度及其使用技术. *气象学报*, 1986, 44(2): 174-182.

# 150天韵律方法月内过程预测系统简介及应用检验

林纾<sup>1</sup> 惠志红<sup>2</sup> 郭俊琴<sup>1</sup> 罗雪梅<sup>2</sup> 杨苏华<sup>1</sup>

(1 西北区域气候中心, 兰州 730020; 2 甘肃省气象信息与技术装备保障中心, 兰州 730020)

**摘要:** 给出150天韵律方法做延伸期预报的原理和检验办法, 经检验2002—2012年间天气过程预测准确率定性评分为67.3分, 空报率为5.9%, 漏报率为26.8%。介绍了150天韵律方法月内过程预测系统框架, 系统分为系统介绍、NC数据处理、数据调用、分析与计算、制作预报结论、评估数据管理、产品分发和系统设置八大功能块。该系统可计算相似系数、历史概括率以及历史过程预测的“正确、空报、漏报”情况, 提高了该方法定量化应用程度。

**关键词:** 150天韵律方法, 预测系统, 应用检验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.008

## Introduction and Application Test of the 150 Days' Cycle Method in the Prediction System for Precipitation Processes within a Month

Lin Shu<sup>1</sup>, Hui Zhihong<sup>2</sup>, Guo Junqin<sup>1</sup>, Luo Xuemei<sup>2</sup>, Yang Suhua<sup>1</sup>

(1 Northwest Regional Climate Center, Lanzhou 730020 2 Meteorological Information and Technique Support and Equipment Center of Gansu Province, Lanzhou 730020)

**Abstract:** This paper presents the principle and testing method to the precipitation processes predicted by the 150 days' cycle. The precipitation processes predicted by the 150 days' cycle method from 2002 to 2012 were assessed qualitatively, and it presented an average score of 67.3, the vacancy forecast rate is 5.9% and the missing forecast rate is 26.8%. The framework of the prediction system for precipitation processes within a month was introduced. The system has eight major function parts, system introduction, NC data processing, data call, analysis and calculation, prediction conclusion making, assessment data management, production issue, and system settings. This system can calculate the similarity coefficient, historical coverage rate and the historical evolution accuracy, vacancy or missing process. The quantitative application of the method was improved by the system.

**Keywords:** 150 days' cycle method, prediction system, application test

### 1 引言

目前, 气象部门的天气预报主要包括三种时间尺度。短期天气预报的时效为几小时至3d, 预报结果主要依托复杂的数值天气预报, 再结合卫星云图、气象雷达等观测结果以及预报员经验修正获得; 中期预报抓过程, 其时效为4~10d; 短期气候预测负责气候趋势预测, 一般为月以上到年尺度的一些气象要素的趋势。如此, 3种不同时效的预报导致了旬尺度和月尺度之间约20d时间尺度的预报空白点(称为11~30d延伸期, 以下简称延伸期)。实践表明, 延伸期预报具有重要意义, 社会经济发展客观上要求气象部门能提供延伸期预报, 即预报预测逐步实现无缝隙服务, 月

内过程预报无疑是实现无缝隙预报的重要一环。

然而, 目前10d以上的预报技巧十分有限, 发展延伸期预报已成为国内外气象学界亟待解决的问题。已经有不少学者开始尝试延伸期预报的工作。如林纾<sup>[1, 2]</sup>在2005年应用150天韵律方法对沙尘暴、低温连阴雨、主汛期降水、高温等做延伸期预测, 指出该方法适用于我国35°N以北的北方地区, 并已在业务工作中应用了十余年; 孙国武、信飞<sup>[3-6]</sup>等的低频天气图方法很好地应用了天气学原理, 根据不同地区低频的演变特点和关键区来预报未来的降水过程, 并在上海世博会期间发挥了重要作用; 覃志年等<sup>[7]</sup>将延伸期预测应用在广西6月区域性暴雨过程中; 史印山等<sup>[8]</sup>则用相似释用方法制作小麦生育期逐旬气候预测; 刘德等<sup>[9]</sup>应用BP神经网络方法试验了长期天气过程预报; 钱维宏<sup>[10]</sup>则比较完整地阐述了中期-延伸期天气预报原理。这些基础性的工作都为今后延伸期预报的应用和发展打下了良好的基础。

收稿日期: 2012年10月29日; 修回日期: 2013年2月1日  
第一作者: 林纾(1964—), Email: treewest@163.com  
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006038-5-1);  
国家自然科学基金(41175081)

早在2001年12月,西北区域气候中心已经开始应用150天韵律方法发布延伸期预报服务产品,2010年在上海市气候中心牵头的业务试点工作——“月内重要过程与趋势预测”工作的推动下,“150天韵律方法月内过程预测系统”与河北气候中心的“异常相似释用预测方法”共同充实了“月内重要过程与趋势预测系统”。其中“150天韵律方法月内过程预测系统”模块是西北区域气候中心依据应用多年的150天韵律方法所建。本文着重介绍150天韵律方法原理、评估办法、系统架构和应用效果评估。

## 2 150天韵律方法原理

天气过程指天气系统及其相伴天气的发生、发展和消失的全部历程,包括寒潮、暴雪、强对流、暴雨、连阴雨等不同季节的多种天气现象<sup>[11-15]</sup>。从天气过程发生的频次分析,平均3~5d一次天气过程;如果从气象资料统计的角度,通常统计逐日、候、旬、月、季和年等时段的气象要素。两者结合起来,以候尺度500hPa平均位势高度场(以下简称候平均场)来表征关键区,既不会有过多的“杂音”,也不会平滑掉太多的信息。

我国的短期天气预报基本考虑东北半球范围内各种气象要素的演变及变化,所以首先把东北半球500hPa候平均场中高纬度分为若干个影响我国天气的关键区,如乌拉尔山区、贝加尔湖区、鄂霍次克海区、中国西北、中国西南、中国东北、中国东南等,划出不同的关键区后,对关键区内网格点上的高度做算术平均,就产生该关键区逐年、逐候数据序列,对这些序列进行周期分析,可以发现这些区域大多有29~31候即准150天的韵律<sup>[1,2]</sup>。以此为理论基础,就可以利用这种大气的准周期运动来推断未来的状况。确切地说150天韵律方法是以500hPa候平均场的周期性来预测未来对应的候平均场,在这个候平均场上能够捕捉到天气过程具有的特征,这在表述上很繁冗,于是在本文中“拿来”中短期预报里常用的“天气过程”,对延伸期里候平均场对应的天气过程的预测简称为“过程预测”。

在不同月份或季节,找出如高温、强冷空气、强降水、低温、沙尘暴等各种天气类型典型的高度场形势,在做预报时,把预报场与典型场采用相似系数<sup>[16]</sup>进行比较,来定量地判断两个场的相似程度。相似系数由下式计算:

$$\cos\theta_{12} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m y_i^2}} \quad (1)$$

其中,  $m$ 是两个进行相似比较的场的站点数或网格点

数,  $\cos\theta_{12}$ 就是两幅图相似程度的定量指标,称为相似系数。相似系数等于1.00为完全相同,相似系数为-1.00为完全相反,为0时表示完全不相似。正值越大越相似,负值越大越相反。理论上,预报场愈相似典型场,其结果也愈接近典型场。但场的相似得有一个界定,把 $m$ 作为序列长度,  $\cos\theta_{12}$ 相当于相关系数,把 $\cos\theta_{12}$ 通过0.10信度检验的值当作预报场与典型场是否相似的界定标准。

## 3 周期分析结果

这部分的分析资料取自NECP2001—2010年逐日500hPa高度资料,并整理成逐候场。分别对500hPa的8个关键区(具体范围见文献[1])做候高度平均,并把2001—2010年10年的候资料按月和年顺序形成720候的序列做周期分析,取其通过信度检验的候数,结果见表1。

从表1可以看到,8个区域里29、32、33候的周期大多能通过0.10的信度检验。将该结果与文献[1]中1991—2000年的分析结果对比发现,各个区域通过信度检验的周期有所变化,这也符合文献[2]中所指出的该方法不同年代际应用的效果有所不同。进一步证实影响我国北方或西北地区关键区的大气准150天韵律的基本规律仍然存在,该方法确实能够在延伸期预报中发挥一定作用。

## 4 检验评估办法

假设通过0.10信度检验的临界值为 $R$ ,规定:

(1) 当间隔145或150或155d的两个相似比较场的相似系数 $\geq R$ 且对应应有降水时,或相似系数 $< R$ 且对应无降水时,称之为正确;(2) 当相似系数 $\geq R$ 但对应无降水时,称之为空报;(3) 当相似系数 $< R$ 但对应应有降水时,称之为漏报。

## 5 系统框架与功能

150天韵律方法月内过程预测系统分为系统介绍、NC数据处理、数据调用、分析与计算、制作预报结论、评估数据管理、产品分发和系统设置8大功能块(图1)。

表1 各关键区通过信度检验的候数

关键区名称	信度值		
	0.10	0.05	0.01
乌拉尔山	33		
贝加尔湖	29	36、37	
鄂霍次克海		36、37	
新疆	29		
青藏高原	32、33		35、36
中国	32		
中国西北	29、32		
中国甘肃	32、35、36		

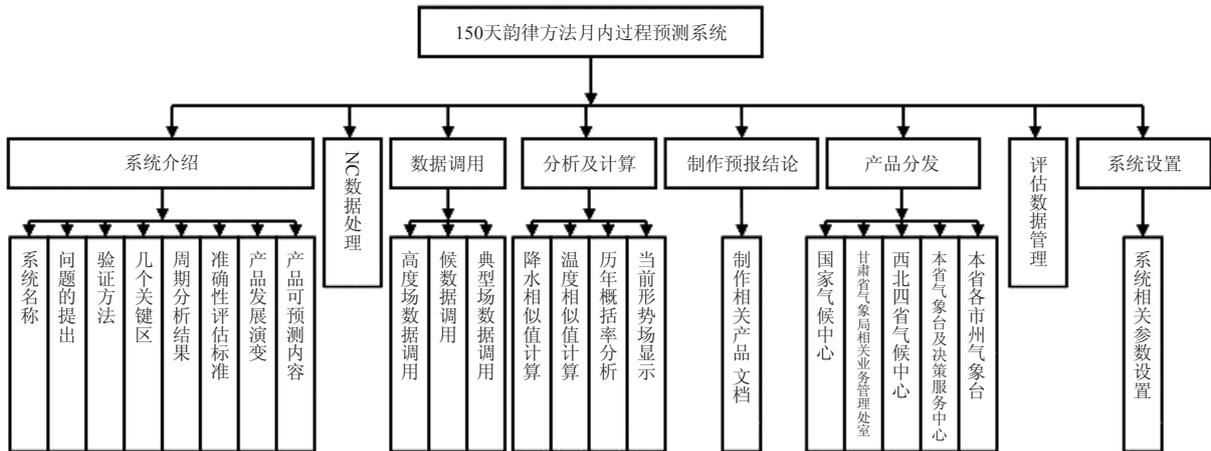


图1 150天韵律方法月内过程预测系统框图

## 5.1 系统介绍

详细介绍了150天韵律方法做月内过程预测问题的提出、验证方法、关键区的选取、周期分析的结果、评估标准、产品演变和可预报内容等所有内容，可以使初学者一目了然，便于学习和尽快掌握。

## 5.2 NC 数据处理

系统可自动将用户下载的NCEP资料进行存储、完成资料的解码、候平均和候距平资料的统计计算、资料入库处理等，并自动完成文件的命名，存入相应的资料目录。

## 5.3 数据调用

用户可按经纬度查询 $0^{\circ}$ — $180^{\circ}$ E、 $0^{\circ}$ — $90^{\circ}$ N范围内500hPa位势高度逐日、逐候和典型场平均位势高度资料。

## 5.4 分析与计算

该部分是本系统的核心，用户通过年、月、旬的选择，可显示过程预测所需500hPa候平均场图和候平均场资料，也可通过“计算相似系数”功能键计算出预报场与典型场的相似系数，并对比相似系数临界值，定量化了解相似程度；亦可看到近40年同期的历史概括率，为预报员提供客观的背景资料。同时系统为用户提供了历史过程预测回算的“正确、空报、漏报”的结果并进行显示，预报员可以直接根据候图和历史回报情况得出预报结论。

## 5.5 制作预报结论

该部分有预报产品的模板，预报员可根据预报结论在模板上进行编写、修改与保存。

## 5.6 评估数据管理

用户通过过程预测结果“评估数据录入”和“评估

数据查询”功能的选择，实现对预测结果的评估管理。

## 5.7 产品分发

这部分产品按单位分类及其邮箱，用户可根据系统提供的产品分发名单实现预测产品的分发功能，便于产品及时分发给相关业务和管理人员。

## 5.8 系统设置

可以设置系统的路径、资料库和产品存放的地址。

## 6 产品效果检验

发布的业务产品是应用150天韵律方法，对甘肃、青海、陕西和宁夏四省（区）范围的延伸期预报，这里给出2011和2012年5—9月主要过程预测按照评估标准进行的检验结果（表2）。2011年降水过程预测评分为72.3分，空报率为5.3%，漏报率为22.4%；2012年降水过程预测评分为66.9分，空报率为7.6%，漏报率为25.5%。

对2002—2012年间天气过程预测准确率进行应用评估，定性评分为67.3分；空报率较小，为5.9%；漏报率相对较高，为26.8%。在表2中也可看到，不同年份、不同时段准确率大为不同。

## 7 小结

(1) 通过150天韵律方法原理的介绍，可以看到该方法有一定的理论基础，并通过2001—2010年的周期分析，进一步证实影响我国北方或西北地区关键区的大气准150天韵律的基本规律仍然存在。虽然业务化十余年，但还需进一步总结归纳不同季节、不同类型天气过程特点，不断提高延伸期预测准确率。

(2) 作为气候业务试点工作的“月内重要过程与趋势预测系统”中的一个模块——“150天韵律方法月内过程预测系统”，可计算相似系数、历史概括率以

表2 西北四省(区)2011年和2012年5—9月主要过程预测与趋势检验结果

预测时段	降水过程预测评分					
	2011年			2012年		
	准确	空报	漏报	准确	空报	漏报
5月1—31日	50	6	44	70	8	22
5月11日—6月10日	90	0	10	85	5	10
5月21日—6月20日	90	2	8	60	9	31
6月1—30日	90	5	5	80	0	20
6月11日—7月10日	50	12	38	40	10	50
6月21日—7月20日	100	0	0	50	15	35
7月1—31日	90	0	10	100	0	0
7月11日—8月10日	80	9	11	85	0	15
7月21日—8月20日	50	22	28	85	3	12
8月1—31日	100	0	0	50	8	42
8月11日—9月10日	100	0	0	65	13	22
8月21日—9月20日	0	10	90	25	19	56
9月1—30日	50	3	47	75	9	16
平均	72.3	5.3	22.4	66.9	7.6	25.5

及历史过程预测的“正确、空报、漏报”情况,提高了该方法量化应用程度,同时也提高了工作效率,对这项工作近40年来历史的应用情况有了细致的了解,便于在今后的延伸期预报中更好地应用、改进和提高。

(3) 应用150天韵律方法,2002—2012年间天气过程预测准确率定性评分为67.3分,空报率较小,为5.9%,漏报率相对较高,为26.8%;同时也看到,不同年份、不同时段准确率大为不同。

#### 参考文献

- [1] 林纾. 准150天韵律方法在过程预报中的应用研究. 中国沙漠, 2005(s): 78-81.
- [2] 林纾. 季以上尺度预报春季区域性沙尘暴过程的方法研究. 中国沙漠, 2006(3): 478-483.
- [3] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法. 高原气象, 2008, 27(增刊): 64-68.
- [4] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报. 高原气象, 2010, 29(5): 1141-1147.
- [5] 孙国武, 孔春燕, 信飞, 等. 天气关键区大气低频波延伸期预报方法. 高原气象, 2011, 30(3): 594-599.
- [6] 信飞, 孙国武, 陈伯民. 自回归统计模型在延伸期预报中的应用. 高原气象, 2008, 27(增刊): 69-75.
- [7] 覃志年, 李维京, 何慧, 等. 广西6月区域性暴雨过程的延伸预测试验. 高原气象, 2009, 28(3): 688-693.
- [8] 史印山, 顾光芹. 用相似释用方法制作小麦生育期逐旬气候预测. 气象科技, 2013, 41(2): 389-393.
- [9] 刘德, 李晶, 李永华, 等. BP神经网络在长期天气过程预报中的应用试验. 气象科技, 2006, 34(3): 250-253.
- [10] 钱维宏. 中期-延伸期天气预报原理. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] 牛若芸, 乔林, 陈涛, 等. 2008年12月2—6日寒潮天气过程分析. 气象, 2009, 35: 74-82.
- [12] 刘惠云, 崔彩霞, 李如琦. 新疆北部一次持续暴雪天气过程分析. 干旱区研究, 2011, 28(2): 282-287.
- [13] 童哲堂, 胡昌琼, 汪高明, 等. 2008年盛夏湖北一次连续性暴雨天气过程分析. 暴雨灾害, 2010, 29: 186-192.
- [14] 尤红, 肖子牛, 王刚平, 等. 低纬高原两次特殊灾害性强对流天气过程分析和比较. 暴雨灾害, 2010, 29: 216-223.
- [15] 潘昉, 李建, 廖捷, 等. 2009年2—3月我国南方连阴雨天气过程分析. 气象, 2010, 36: 39-46.
- [16] 顾骏强, 施能, 薛根元. 近40年浙江省降水量、雨日的气候变化. 应用气象学报, 2002, 13(3): 322-329.

# 福州市百余年来气温资料处理及变化特征分析

郑东旗<sup>1</sup> 祁旭<sup>2</sup> 刘增基<sup>3</sup> 李岩<sup>1</sup>

(1 福州市气象局, 福州 350008; 2 福建省气象局, 福州 350001; 3 福建省气象台, 福州 350001)

**摘要:** 介绍了福州市百余年来气象观测站的变迁。从福建省气象局于1976年1月整编出版的气温资料书籍和福建省气象台气象观测数据库中, 提取1901—2012年年平均气温、年极端最高气温、年极端最低气温资料, 并利用数理统计方法对个别缺漏记录进行了插补, 对测站迁移前后的数据进行订正和检验, 结果表明整理后的百年气温数据具有较好的连续性。同时应用现代统计等多种方法对这些宝贵的长序列气温资料进行分析, 揭示出福州百余年来气温演变的若干气候特征。

**关键词:** 福州, 气温, 资料处理, 特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.009

## The Variation Characteristics Analysis and Data Processing on Temperature Data over 100 Years in Fuzhou

Zheng Dongqi<sup>1</sup>, Qi Xu<sup>2</sup>, Liu Zengji<sup>3</sup>, Li Yan<sup>1</sup>

(1 Fuzhou Meteorological Bureau, Fuzhou 350014 2 Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001  
3 Fujian Municipal Meteorological Service, Fuzhou 350001)

**Abstracts:** This paper introduces the changes of meteorological observation stations in Fuzhou over 100 years or more. This research picks up 1901—2012 annual average temperature data, annual extreme maximum temperature data and annual extreme minimum temperature data from the temperature data books which were published by Fujian Meteorological Bureau in January 1976 and the meteorological observatory database, and interpolates the individual missing records by using mathematical statistics for revision and testing on the data before and after the migration. The results show that the temperature data over one hundred years has good continuity. The modern statistics and many other such methods are used for a long sequence of temperature data analysis. It reveals some climatic features of temperature evolution over a hundred years in Fuzhou.

**Keywords:** Fuzhou, temperature, data processing, characteristic

### 1 引言

气候变化或称气候变暖问题是近年来人们热议的话题<sup>[1]</sup>, 也是气象学家所关注并潜心研究的重要课题。开展这方面研究的前提是拥有年代长久、连续性较好的气温资料。福州市地面气象观测历史悠久, 自1888年开始在仓山区泛船浦设立海关测候所开展气象观测, 至今已有逾百年的历史, 这在全国来说也不多见。但由于历史和战争等原因曾造成测站多次迁移甚至短期中断, 致使新中国成立前的气温资料存在一定欠缺, 对这些难得的历史资料进行必要的插补处理及其订正检验, 同时使用这些极其宝贵的数据进行系统全面的研究, 对了解福州地区气温的历史变化特征, 具有重要的参考价值<sup>[2]</sup>。此前, 黄文堂<sup>[3]</sup>、邹燕等<sup>[4]</sup>也曾对福州市气温的历史演变问题进行了探讨, 但就利

用福州市气温资料而言, 它们在年代的长度和资料的质量上都有一定的局限性。作者使用经过订正检验处理的百余年来福州市年平均气温、年极端最高气温、年极端最低气温等资料, 采用气候统计分析方法并结合小波分析法<sup>[5]</sup>和Mann-Kendall检验<sup>[6]</sup>对相应项目进行比较全面的研究, 揭示出福州百余年来气温演变的若干气候特征。本文除对福州历史气温资料的整理、订正和检验的方法进行阐述外, 也对福州百余年来气温演变的若干气候特征进行简要介绍。

### 2 数据来源及处理

#### 2.1 资料来源

本文所用资料来源: 1901—1975年所有气温数据取自福建省气象局于1976年1月整编出版的《福州市逐日平均气温》、《福州市逐日最高气温》、《福州市逐日最低气温》等书籍; 1976—2012年的所有气温数据取自福建省气象台测报数据库。分析研究极端高温气候变化时采用历年6—9月的极端最高气温数据,

收稿日期: 2012年7月10日; 修回日期: 2013年8月13日  
第一作者: 郑东旗 (1956—), Email: zdq561013@163.com

分析研究极端低温气候变化时采用历年12月一次年2月的极端最低气温数据, 分析研究平均气温气候变化时采用历年年平均气温资料<sup>[7,8]</sup>。

### 2.2 测站迁移、站名变更情况

自1901年以来福州地面气象观测站进行过4次迁移, 站名共有过12次变动, 具体变更情况见表1。

### 2.3 空缺资料的处理

(1) 空缺资料的插补

空缺资料采用前后各二点的资料进行平均而获取, 假定空缺资料在序列中序号为*i*, 则其频数*P* (或气温*T*) 为

$$P_i = (\sum_{j=1}^M (P_{i-j} + P_{i+j})) / (2 \times M) \quad (1)$$

其中,  $M=2$ 。

(2) 滑动平均

① 频数的3点滑动平均

$$\begin{aligned} P_i^3 &= (P_i + P_{i-1} + P_{i+1}) / 3 & i = 2, 3, \dots, N-1 \\ P_1^3 &= (P_1 + P_2) / 2 & i = 1 \\ P_N^3 &= (P_{N-1} + P_N) / 2 & i = N \end{aligned} \quad (2)$$

② 气温的5点滑动平均

$$\begin{aligned} T_i^5 &= (\sum_{j=0}^M T_{i+j}) / M & i=1, 2, 3, \dots, N-4 \\ T_i^R &= (\sum_{j=0}^R T_{i+j}) / R & i \geq N-4 \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $M=5; R=N-i$ 。

③ 年平均气温的30年滑动平均

$$T_L^{30} = (\sum_{j=1}^M T_{(L-1) \times 10 + j}) / M \quad (4)$$

其中,  $M=30; L$ 为年代序号,  $L=1, 2, 3, \dots, N-2; N$ 为年代总数。

### 2.4 资料的订正检验

福州市1948—2012年共计65年气温资料为乌山观测站观测获得, 而在此之前, 即1901—1947年共计47年气温数据为乌山以外其他测站观测获得, 为了保证前后资料的一致性, 本文对1901—1947年气温资料进行高度订正 (因为所用数据的测站均在福州市内, 除海拔高度差异较大外, 其他环境条件比较接近, 故只做高度订正)。方法是: (1) 自20世纪80年代末至今的24年中福州市晋安气象站与福建省气象台乌山观测站保持了同步气象观测, 经统计分析, 获得气温垂直递减率 $\gamma=0.77^\circ\text{C}/100\text{m}$ , 并按乌山观测站的高度对晋安气象站气温资料进行高度订正, 所得资料与乌山观测站实测资料进行*t*检验, 计算得到 $t=0.06279$ , 满足 $\alpha=0.1$ 的信度要求。二者序列相关系数分别为: 年平均气温 $r=0.989332$ , 年极端最高气温 $r=0.849429$ , 年极端最低气温 $r=0.788236$ ; (2) 利用 $\gamma=0.77^\circ\text{C}/100\text{m}$ , 对1901—1947年气温数据进行高度订正 (订正到与乌山观测站同高度), 所得资料与1948—2012年乌山站实测数据进行*t*检验, 计算得到 $t=0.9969$ , 达到 $\alpha=0.1$ 的

表1 福州地面气象观测站站名变动一览表

站名	时间
海关测候所	1880年1月1日—1935年12月31日
福州民国国立科学馆测候所	1934年7月1日—1935年8月31日
福州民国福州测候所	1935年9月1日—1949年8月24日
福州气象台	1949年8月25日—1951年10月
福建军区福州气象台	1951年11月—1953年7月
福州气象台	1953年8月—1955年11月
福州海洋气象台	1955年12月—1958年9月
福建省农业厅气象局观象台	1958年10月—1961年4月
福建省气象局观象台	1961年5月—1966年4月
福建省气象局气象服务台	1966年5月—1971年3月
福建省气象局气象台	1971年4月—1978年12月
福建省气象台	1979年1月—1990年12月31日
福州国家基准气候站	1991年1月1日至今

表2 福州地面气象观测站站址迁移情况表

地址	时间	北纬	东经	海拔高度 (m)
福州海关测候所	1901年3月—1935年12月	25°59'	119°27'	19.8
福州解潘路 (鼓屏路口)	1936年1月—1944年3月	26°05'	119°18'	22.0*
福州西门外协职农校 (福州祭酒岭)	1945年11月—1945年12月	26°05'*	119°16'*	19.8*
福州乌石山王家祠	1946年1月—1948年4月	26°05'	119°17'	68.9
福州乌石山邻霄台	1948年5月至今	26°05'	119°17'	84.0

注: 1. 表中带\*号资料为2012年调查补测。1944年4月—1945年10月福州因抗日战争沦陷, 观测中断;  
2. 乌石山邻霄台观测场几经改造、重测, 现观测场经纬度为119°17'E, 26°05'N, 海拔高度84.0m。

信度要求,表明前后气温数据具有较好的一致性,可以应用于统计分析。

### 3 福州市近百余年气温演变特征

为了更详尽地揭示出福州百余年气温演变的气候特征,本文取1901—2012年福州市年平均气温、年极端最高气温、年极端最低气温等资料,采用气候统计分析方法并结合小波分析法和Mann-Kendall检验对相应项目进行初步的分析研究,揭示出福州百余年气温演变的若干气候特征<sup>[9, 10]</sup>。初步分析表明,福州市1901—2012年气温总体呈上升态势,特别是从20世纪80年代—21世纪初叶,气温上升最显著。

#### 3.1 年平均气温变化特征

福州市1901—2012年年平均气温变化趋势呈波浪式振荡起伏情形,见图1。

在1901—2012年30年滑动平均气温的9个年代中呈现三峰二谷的形态,而总体呈上升趋势,1981—2010年30年滑动平均气温为20.2℃,较之1911—1940年30年滑动平均气温高1.2℃(图2)。

#### 3.2 年极端最高气温变化特征

福州市1901—2012年年极端最高气温分布以

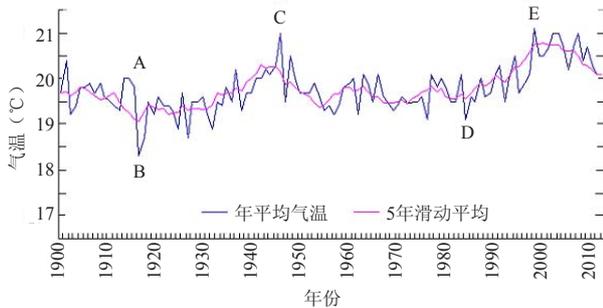


图1 福州市1901—2012年年平均气温及其5年滑动平均趋势图

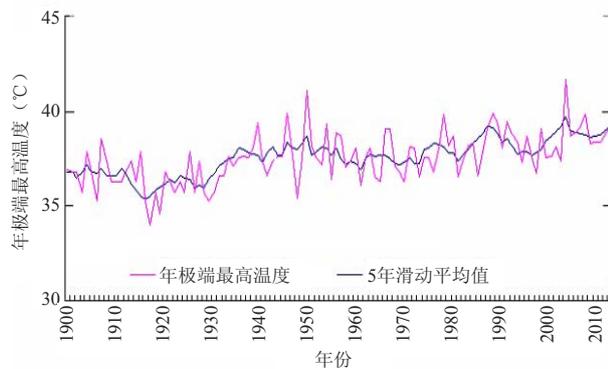


图3 福州市1901—2012年年极端最高气温及其5年滑动平均的演变趋势图

1950年为分界线可分为两段“U”态势分布,前半段1901—1949年49年年极端最高气温平均值为37.3℃,后半段1950—2012年63年年极端最高气温平均值为38.1℃,后63年平均值较前49年平均值高0.8℃,振荡幅度前半段大于后半段(图3)。

#### 3.3 气温演变的周期性特征

对1901—2012年 $\geq 35^\circ\text{C}$ 高温日数和年平均气温的标准化距平进行Morlet小波分析,发现 $\geq 35^\circ\text{C}$ 高温日数存在较稳定的准25年和15年的振荡周期,而且比较明显(图4和5)。

#### 3.4 年极端最低气温变化特征

福州1901—2012年年极端最低气温呈两头高中间低的演变态势(图6)。

#### 3.5 气温演变趋势的突变点分析

通过Mann-Kendall检验法对气温演变趋势进行分析,发现福州地区年平均气温1990年附近发生突变,1990年后福州地区升温显著。

### 4 结束语

福州市气温观测已有100多年历史,这些资料十分珍贵,但新中国成立前由于气象观测不能正常开

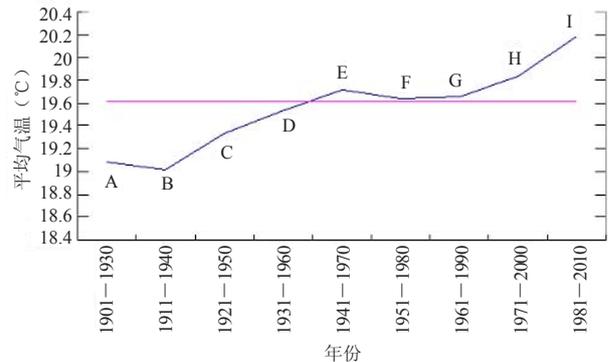


图2 年平均气温30年滑动平均演变趋势图

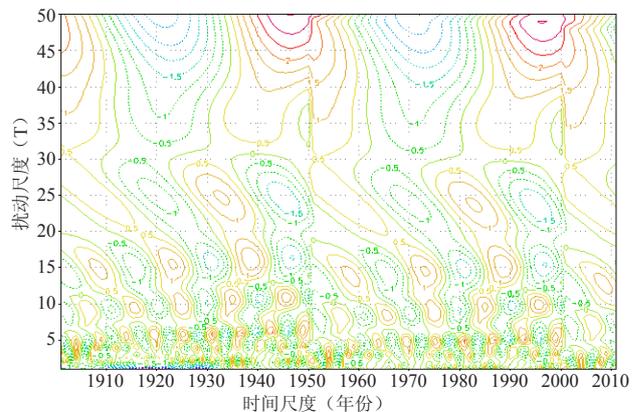


图4 1901—2012年 $\geq 35^\circ\text{C}$ 高温日数标准化距平的Morlet小波分析(实部)

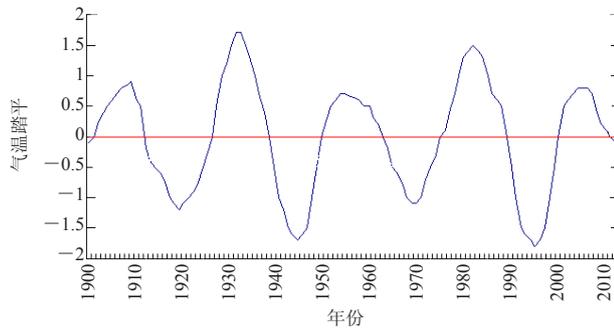


图5 周期为25年的反演图

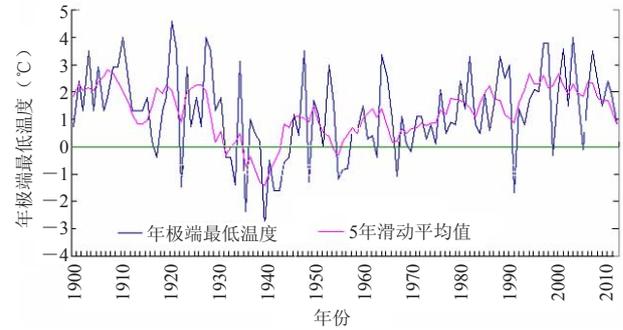


图6 福州市1901—2012年年极端最低气温逐年演变趋势图

展, 气温资料质量较差。将这些数据通过插补、订正与1949年新中国成立后的气温观测数据组成百余年的长序列气象记录, 经检验后表明具有较好的连续性、准确性和代表性, 这些宝贵资料对研究福州地区气温的历史演变和开展气象服务具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] 丁一汇, 戴晓荣. 中国近百年来的温度变化. 气象, 1994, 20(12): 19-26.
- [2] 吴增祥. 北京地区近代气象观测记载. 气象科技, 1999(1): 60-64.
- [3] 黄文堂. 近50年福建气温降水变化的统计特征. 气象, 1994, 20(7): 20-25.
- [4] 邹燕, 周信禹, 林毅, 等. 福建省夏季高温成因分析. 气象, 2001, 27(9): 26-30.
- [5] 简虹, 骆云中, 谢德华, 等. 基于Mann-Kendall法和小波分析的降水变化特征研究. 西南师范大学学报, 2011, 36(4): 217-222.
- [6] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann-Kendall检验方法在降水趋势分析中的应用. 农业科技与装备, 2008, 10(5): 35-40.
- [7] 刘增基, 邹燕, 吴宾. 福州市近百年强降水频数的统计特征. 气象, 2002, 28(2): 46-49.
- [8] 蔡文华, 王加义, 岳辉英. 近50年福建省年度极端最低温度统计特征. 气象科技, 2005, 33(3): 227-230.
- [9] 唐国利, 林学椿. 1921—1990年我国气温序列及变化趋势. 气象, 1992, 18(7): 3-6.
- [10] 郭军, 任国玉, 任雨. 近100年天津平均气温与极端气温变化. 高原气象, 2011, 30(5): 1399-1405.

#### 会议信息

- ◆ 气候科学的下一步 (Next steps in climate science), 2013年10月2日, 伦敦, 英国 (<http://royalsociety.org/events/2013/climatescience-next-steps/>)
- ◆ 非洲气候会议 (Africa Climate Conference), 2013年10月15—18日, 阿鲁沙, 坦桑尼亚 (<http://www.climdev-africa.org/acc2013>)
- ◆ 亚洲—澳大利亚季风委员会第13次届会 (13th Session of the Asian-Australian Monsoon Panel, AAMP13), 2013年10月26—27日, 澳门 (<http://www.clivar.org/organization/aamp/activities/aamp13>)
- ◆ 第80届海平面科学年会 (80th Anniversary Workshop on Sea Level Science), 2013年10月28—29日, 利物浦, 英国 ([http://www.psmsl.org/about\\_us/news/2013/workshop\\_2013/](http://www.psmsl.org/about_us/news/2013/workshop_2013/))
- ◆ 第5届国际季风学术会 (Fifth International Workshop on Monsoons, IWM-V), 2013年10月28日—11月1日, 澳门 (<http://iwm-v.smg.gov.mo/>)
- ◆ GODAE海洋观测2013年学术会——GODAE海洋观测5周年——当前进步和未来优先领域 (GOADE Ocean View Symposium 2013: “5 years of GODAE OceanView - current progress and future priorities”), 2013年11月4—6日, 马里兰, 美国 (<https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/symposia-summer-schools/Symposium-Review-2013/>)
- ◆ 区域气候国际会议——WCRP、欧盟和IPCC之间的合作 (International Conference on Regional Climate - CORDEX 2013, A partnership between WCRP, the European Commission and IPCC), 2013年11月4—7日, 布鲁塞尔, 比利时 (<http://cordex2013.wcrp-climate.org/>)
- ◆ 第6届国际20世纪CLIVAR气候学术会议 (6th International CLIVAR Climate of the 20th Century Workshop), 2013年11月5—8日, 墨尔本, 澳大利亚 (<http://www.iges.org/c20c/workshops/201311/home.html>)
- ◆ 区域海平面变化高端情景及其不确定性会议 (Workshop on High-end scenarios of regional sea-level changes and their uncertainties), 2013年11月20—22日, 汉堡大学, 德国, (<http://www.cen.uni-hamburg.de>)
- ◆ 第14届南半球夏季讲习班——通过多种方法研究沿海和开放海域 (Austral Summer Institute XIV (ASI XIV) -Coastal and Open Ocean Studies through Multiple Approaches), 2014年1月, 康塞普西翁, 智利 (<http://www2.udec.cl/oceanoudec/asi-14/eng/index.html>)
- ◆ 美国气象学会第94届年会——极端天气—气候和建筑环境: 新视角、机会和工具 (The 94th AMS Annual Meeting-Extreme Weather-Climate and the Built Environment: New Perspectives, Opportunities, and Tools), 2014年2月2—6日, 亚特兰大, 美国 (<http://annual.ametsoc.org/2014/>)
- ◆ 国际季节内到季节预报学术会 (International Conference on Subseasonal to Seasonal Prediction), 2014年2月10—13日, 马里兰, 美国 (<http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/s2s/>)
- ◆ 夏威夷海洋科学会议 (Hawaii Ocean Science Meeting), 2014年2月23—28日, 夏威夷, 美国 (<http://www.sgmeet.com/osm2014>)
- ◆ 第7届全球水和能量循环国际科学会议 (7th International Scientific Conference on the Global Water and Energy Cycle), 2014年7月14—17日, 海牙, 荷兰 (<http://gewex.org/2014conf/home.html>)

# 对气象信息化的理解和再认识

■ 沈文海

近年来，以互联网为核心标志的信息技术和产品正在深刻影响着当代人类社会，以致一些学者将其称之为“20世纪人类最伟大的发明”。与此相伴，“信息化”作为一个完整概念，一经问世，便迅速传播并被广泛接受。新一届中国政府已将信息化作为本届政府努力奋斗的“新四化”目标之一，在很大程度上反映了信息化对当代社会的重要程度。

从广义上看，气象行业的业务特点就是获取信息、处理信息、应用并发布信息产品，因此气象业务是典型的信息业务，气象业务系统是典型的信息系统，气象部门也是有关信息技术最早和较为充分应用的部门。信息化对于气象行业究竟意味着什么，气象信息化究竟包含哪些内涵，什么是气象信息化的实质，气象信息化与气象业务信息化之间的关系如何，这是需要认真思考和深入分析的。笔者拟通过本文，对上述问题做出分析和回答。

## 一、信息化的概念和理解

信息化的概念起源于20世纪60年代，由日本社会学家Tadao Umesao在题为《论信息产业》的文章中首次提出，而后被译成英文传播到西方，20世纪70年代后期西方社会开始普遍使用“信息社会”和“信息化”等概念。

我国于1997年召开的首届全国信息化工作会议，首次对信息化进行了官方定义：信息化是指培育、发展以智能化工具为代表的新的生产力并使之造福于社会的历史过程；国家信息化就是在国家统一规划和组织下，在农业、工业、科学技术、国防及社会生活各个方面应用现代信息技术，深入开发广泛利用信息资源，加速实现国家现代化进程。

联合国1998年发表的《知识社会》一文，对信息化进行了如下阐述：信息化既是一个技术的进程，又是一个社会的进程。它要求在产品或服务的生产过程中实现管理流程、组织机构、生产技能以及生产工具的变革。

我国政府于2006年发布的《2006—2020年国家信息化发展战略》，再次修订了信息化的定义：信息化是充分利用信息技术，开发利用信息资源，促进信息交流和知识共享，提高经济增长质量，推动经济社会发展转型的历史进程。修改后的定义有3层

含义：（1）信息技术迅速发展，这是背景和前提条件；（2）IT应用的广泛深入，这是信息化所要完成的工作；（3）经济社会的发展转型，这是信息化的目标。

因此，从广义上理解，信息化代表了一种信息技术被高度应用，信息资源被高度共享，从而使得人的智能潜力以及社会物质资源潜力被充分发挥，个人行为、组织决策和社会运行趋于合理化的理想状态。而从经济学的角度看，所谓信息化，是指社会经济的发展，从以物质与能源为经济结构的重心，向以信息为经济结构的重心转变的过程。同时，信息化也是IT产业发展与IT在社会经济各部门扩散的基础之上，不断运用IT改造传统的经济、社会结构，从而通往如前所述的理想状态的一个持续的过程。

事实上，某一技术的产生和存在未必能形成生产力，只有当该技术实现了社会化生产与应用之后，方才可能。信息化的目的就是要实现信息技术的社会化生产以及在社会经济各个领域中的广泛应用——这是信息时代社会生产力发展的必然要求。

人类社会中反映生产力水平和状况的标志，是劳动者创造的生产工具，而生产工具的进步取决于人们认识、开发和利用资源的能力，人类能够利用什么样的资源，就可以创造出什么样的生产工具。在人类社会的发展进程中，可供利用的战略资源自远古至今按年代顺序依次为：物质、能源和信息。其中：物质的作用在于提供材料，能源用以提供动力，而信息则是知识和智慧的载体。从这个角度理解，信息化就是运用已知技术，推动并优化人类产生知识和智慧的过程。只要人类社会依然存在，“信息和知识的生产和传播”便是永恒的主题，而运用技术手段优化这一生产和传播过程也就永远不会结束。因此，信息化永远不会结束。

## 二、信息技术的引入以及气象业务的进步

阿尔弗雷德·D·钱德勒在《信息改变了美国》一书中，曾生动而详细地描述了近代和现代信息技术的发展过程，以及信息技术的社会应用给美国社会带来的跌宕起伏、日新月异的变化。就气象行业而言，也是如此。

1901年无线电通信技术的发明，以及气象探测传

感设备的数字化，导致了无线电探空仪的发明，从而使得气象探空业务成为可能。二战初期原本用于战时防空的雷达技术，催生了云雨雷达以及雷达这项全新技术在气象领域的广泛应用，以至于出现了雷达气象这门学科分支。美国于1958年1月试验成功本国第一颗人造卫星，在短短的两年之后，便于1960年4月发射了军民合用试验卫星“泰勒森-1号”，开启了气象天基观测业务；卫星技术从诞生之日起，便与气象探测有着千丝万缕的联系。

现代气象业务能力重要标志的数值预报学科的发展历程，也能反映出信息技术对气象业务的作用：早在1922年，英国的数学和物理学家Richardson便明确提出了应利用数值方法对运动方程进行积分，并指出了实施方法。然而受当时观测能力、理论水平和计算能力的影响，没有做出成功的预报。直到1948年前后，动力气象学理论日益丰富和完备，探空技术日臻成熟，尤其是世界上第一台真正意义上的电子计算机（ENIAC）的出现，使得在规定时间内完成大规模数值积分的梦想成为可能，从而开启了数值预报的大门。此后的数十年间，在计算技术迅猛发展的助力下，数值天气预报学科一路高歌猛进，其发展阶段如表1所示。我国气象行业数值预报业务的发展基本与此同步（表2）。

在计算机问世的60多年中，计算能力从几千次/秒提升到千万亿次/秒，相应地数值预报模式也经历了从网格距几百千米的粗糙的地转近似模式到网格距只有1km左右、不采用传统动力学近似的精细模式的发展历程。从这个意义上可以说，计算机的性能及其利用效率决定了数值预报模式的性能。

与此相同步的，20世纪50年代后期电传技术的引入，逐步改变了气象观测信息以莫尔斯码方式进行

通信传输的落后状态，大幅提高了观测信息的传输时效。20世纪60年代传真广播的应用，使得气象预报服务覆盖面和服务时效都有很大的提高。20世纪90年代卫星通信技术的成熟以及9210工程的成功，使得全国探测资料实现了实时传输和应用。而光纤通信技术的迅猛发展和全国气象地面宽带网络的建成，彻底消除了困扰我国气象行业数十年的气象广域通信问题。

气象科学发展道路上存在诸多阻碍，有学科理论方法方面的，也有信息资源、处理能力资源以及处理技术方面的，信息技术不是气象科学，它无法解决气象学科中的科学机理和方法问题，它只是满足了气象学科因发展而产生的众多需求中的某些需求（如处理能力资源、处理技术等）。由于这些需求的被满足，产生这些需求的学科分支（如数值预报等）因之得以突破由资源、技术等因素所织成的藩篱，在发展道路上逐渐起飞。而其他学科分支，由于其需求没有得到满足，便依然局促于技术藩篱之中。

需要强调的是，信息技术不是万能的，它不能替代气象科学。那些享受到信息技术所创造的良好条件，资源、技术需求被充分满足的气象学科分支，如果在本学科的理论方法上没有进一步的发展和提高，则整个学科分支的发展便依然困顿，不会因为信息技术的引入而产生本质变化。这样的例子在我国气象界俯拾皆是。

气象学科的发展，需要多种其他学科和技术的综合有效应用，以解决不断涌现的各方面需求。在这些学科和技术当中，信息技术由于半个多世纪以来的迅猛发展和广泛渗透，无疑成为其中最具活力、最有前途、最有能力解决更多问题的助力者。

因此，笔者认为，气象信息化就是“充分利用信息技术，有效解决气象学科和气象业务发展过程中不

表1 数值天气预报的发展阶段

年代	数值模式发展阶段	计算技术	形态	峰值性能
1904年—20世纪50年代	数值模式的酝酿期			
20世纪50—60年代	数值模式架构的完善期	电子管、晶体管	主机	数十万次/s
20世纪60—80年代	大气环流模式的发展	集成电路、大规模集成电路	主机、服务器	百万次/s、千万次/s
20世纪80—90年代	完善物理过程和资料同化	超大规模集成电路	阵列机、服务器集群	亿次/s、数十亿次/s
20世纪90年代之后	耦合模式的发展	超大规模集成电路、并行计算技术	超大规模集群	千万亿次/s

表2 我国气象行业数值天气预报业务的发展概况

年代	模式名称	模式分辨率	计算机	性能
1959年	正压模式		不详	不详
1969—1978年	A模式	三层原始方程模式	DJS-6	6万次
1980—1982年	B模式	381km, 5层	日立 M170	百万次
	亚洲有限区域模式	200km, 15层		
1994年	T42、T63、T106		CRAY (C92)	亿次
1995年	T213L31		IBM SP2	760亿次
2004年	T639L60, 三维变分同化	3km	IBM Cluster 1600	23万亿次

断涌现的问题和需求，促进气象学科和业务的高效、持续、健康发展的工作进程”。而所谓“气象业务信息化”则相对具体，即“充分利用信息技术，有效解决气象业务发展过程中不断涌现出的问题需求，不断推进气象业务的系统化、自动化发展及其高效运转的工作进程”。

### 三、气象信息化的内涵

#### 1. 信息技术是新的生产力

蒸汽机无法代替纺织工艺和技术，但蒸汽机却因其解决了关键的动力问题，导致纺织业由分散的手工作坊朝大规模工业化生产的方向发展，从而引发了第一次工业革命。同样，信息技术无法替代气象科学，但信息技术却因其能够解决气象学科中信息采集、传输、处理、存储和应用等关键环节的技术难题，使得气象学科和业务得以解脱诸多技术桎梏，为其高速发展提供了可能。在目前信息时代里，信息技术的革命性变革及其具体载体计算机、光纤通信、互联网、云计算等的陆续出现和迅速普及，正在改变人们的生产生活方式，人们的思维观念乃至组织结构和社会形态都在随之产生悄然而深刻的变化。2004年5月联合国经社理事会曾指出：互联网的普及和应用无论在广度上还是在深度上，其影响均可与18世纪的工业革命相比拟。

信息技术已将气象业务从50多年前依靠莫尔斯电码发送和接收气象观测资料，依靠专业绘图员手工绘制天气形势图，预报员根据天气形势图，依靠自身积累的经验和知识主观判断天气趋势，依靠无线电广播发布天气预报和趋势预测的原始业务形态，发展成今天地基、天基和空基有机融合的综合观、探测，信息高速实时传输，客观预报已占相当比重，气象服务涵盖上至国家最高层、下至最偏远地区的村寨家庭每一个角落的现代气象业务。

因此，信息技术是推进气象事业发展的最具生命力的新的生产力。

#### 2. 气象信息化绝不只限于信息技术和设备在气象行业的引入

一个行业或部门的信息化，体现在信息技术在该行业的有效应用，而IT设备是信息技术的基本载体之一。因此，信息技术和IT设备的引入以及信息系统的建立，是该行业或部门信息化的外在表象以及必然过程之一，但这绝不是信息化的全部（甚至主要）内容。以数字化和微处理为主要特征的现代信息技术发展到今天，已经远远超出了技巧和工具的范畴。就

信息技术应用而言，与其发展的阶段性特征相对应，应用这些信息技术的指导思想普遍经历了由“计算机化”到“业务流程优化”，进而发展到“机构重组”的三个阶段。

所谓计算机化，就是在生产和管理过程中，能用到计算机的地方尽可能使用计算机，即所谓将原有业务工作以及业务流程“计算机化”，以达到借助计算机及其附属设备来提高工作效率和管理水平的目的。迄今为止，计算机化仍然是现代信息技术应用的基础和重要目标之一。

现代信息技术的真正潜力并不只限于使原有业务流程运作良好，而且在于能使单位或部门打破原有的规章制度和过时的设想，创建新的更富效率和活力的工作方式及工作流程，即所谓“业务流程优化（或再造）”。业务流程是围绕数据或数据产品的生成过程组织在一起的业务系统的组合。就气象业务而言，目前不少传统业务流程已经落后于业务发展的需求。以地面观测资料收集流程为例，传统的并且延续至今的以ftp为核心技术的传输流程是：观测站（县局）—省局—国家气象信息中心。以该流程传输的地面观测资料，即便采用再高的网络传输带宽，能力再强的处理服务器，往往仍需要数分钟甚至数十分钟方能到达国家级业务中心，这种时效在流程建立之初可以满足当时的业务需求；但业务发展到今天，对资料传输时效的需求较之当初已大幅提高，仍以这样的时效传输实时观测数据，必然严重影响预报业务时效。而目前正在试验（包括消息中间件技术在内）的新的通信技术，可在数秒内将地面观测数据从观测设备直接传至国家级业务中心。因此目前的传输流程完全可以进行优化甚至改造。

据统计，目前国家级业务系统约50个，这些业务系统依循彼此间上下游关系直接接收上游发来的数据，并向下游传输本系统的产品。由此在这些系统间编织出一张极其复杂的数据流程网络，业务变更十分困难。而如果设置一个业务产品库，居中接收并管理所有业务系统产生的业务产品及中间产品，所有业务系统从该库获取上游的数据，并将本系统产生的数据传输至该库，数据流程将会大大简化，业务变更将会十分简单，而流程效率也不会因此降低。

美国某著名汽车公司在20世纪上半叶规模鼎盛时期，曾拥有包括钢铁厂、橡胶厂甚至玻璃厂在内的所有产品及零部件的生产加工工厂。后在该公司业务优化战略调整过程中，逐步出售了所有可利用社会资源完成零部件生产的工厂，只留下了设计研究所、发动

机生产厂和成车组装厂。从而使该公司生产效率大大提高,成本大幅下降,对市场需求反应更加灵活。反观气象行业某些在技术环境相对落后时期构建的管理结构,在当下通信、加工处理等技术产生突破,尤其是管理系统产生、成熟并逐渐普及后,完全可以将原来因技术限制而不得不设置的树状层级管理体系,改变成管理效率更高的扁平化结构,并因之调整原有的组织。

所以,气象业务信息化不单在于业务工作和业务流程的“计算机化”,其更大的作用和价值在于资源(包括信息资源以及计算、存储和网络资源)的充分共享和利用、业务和管理流程的持续优化,实现行业内部各种资源的优化和重组,促进行业内部结构(首要的是业务和管理结构)的进一步合理化和价值最大化。气象业务信息化不能只局限在技巧和操作层面(即所谓IT设备的引入和装备),它应当而且必须包括管理层面和组织机构层面的变革。在已上报的气象现代化实施方案中,国家气象信息中心将气象业务信息化的标志具体归纳为:业务体系扁平化、数据流程简约化、资源利用高效化、服务响应便捷化和方法规范化。

### 3. 气象信息化的要义:做强气象

“力争在较短时间内,将我国从气象大国建设成气象强国”,这是近年来气象部门努力奋斗的战略目标。气象强国绝不是单指气象从业人数的众多,办公楼宇的巍峨,各种气象设备及装备的丰富和先进,以及气象业务和科研经费的充足;气象强国的核心标志集中体现在预报和服务等业务能力和水平方面。归纳起来,做强气象至少有三个重要指标:能力强大、反应敏捷和自身健康。所谓“能力强大”,是指服务功能的强大,反映在业务层面的表现,就是观探测信息精准、预报准确、气象服务全面及时到位。“反应敏捷”是指对外界不断产生的对气象服务新的需求信息的快速感知和准确获取,以及满足这些新需求的新的服务能力的迅速形成和业务化。而“自身健康”是指内部信息及指令准确,内部流程通畅简约,以及维持强大预报和服务功能所付出的代价(“能耗”)的最小化,即所谓“可持续发展”。这里的“能力强大”不等于“反应敏捷”和“自身健康”,反之亦然。此三指标彼此独立存在,缺一不可。

前已详述,信息技术代替不了气象科学,气象预报、产品制作、探测理论等方面与世界气象强国的差距,需要气象科学家们的专业知识、智慧和辛勤劳作。与此同时,处于信息时代的气象业务,通过信

息技术手段的具体运用,在提高局部业务功能效率的基础上,优化业务组合、降低无益的延迟和消耗、最大限度地发挥各业务单元的作用,使其整体功能效益达到最大化,同样能够提高业务水平和能力,而这一切,有赖于信息化在气象部门的持续和深入。因此,信息化在气象部门的持续和深入,未来在“做强气象”方面大有可为。

高性能计算能力的快速增长,使得数值预报特别是短临预报、集合预报等方法迅速发展并不断完善,从而使得灾害性天气预报的准确度不断改善和提高。通信方法和技术的长足进步,尤其是互联网的横空出世及其荷载应用的日益丰富,使得气象服务手段、方法、渠道和时效成倍扩展。业务流程的优化和再造、信息资源规划以及高度共享,能使部门内部流程更加简约合理、资源利用效率及效能更高、可更加灵活地随需而变。尤其是云计算和虚拟化技术的有效应用,将根本改变人们使用信息、计算和存储资源的模式,极大提高资源的利用效率,降低资源使用成本,进而有可能改良气象业务的传统格局。约20年前,美国政府组织研究并提出的“敏捷制造”的概念、方法以及经验,也为敏捷的个性化气象服务提供了新的思路和可供借鉴的案例。

信息化对于气象部门而言,其要义和核心价值在于通过提高效率和效能来“做强气象”,而其实际效果和最终价值体现,都在于做强气象业务。随着气象信息化的不断深入,新的技术、理念和方法的不断引入和成功运用,信息化一定能够成为“做强气象”的主要途径之一。

## 四、目前需要解决的主要问题

### 1. 信息化进程中的“云计算”

社会的需求是全方位的,而某一项关键技术的突破以及代表性产品的问世,往往能在满足社会有关方面需求的同时,逐渐引导社会沿着这项关键技术所开辟的方向发展。个人PC、服务器、网络技术、磁盘阵列、数据库等的出现,以及在社会和气象部门造成的在工作模式、形态和效率上的深刻变化,无一不再说明了这一点。随着互联网的出现,人们甚至在上生活方式上都在发生着悄无声息地改变,网购巨头阿里巴巴2008年平均每天在互联网上的交易额已达2亿元人民币左右,十天就可超过北京王府井百货公司全年的销售营业额。2012年百度的广告收入已逼近同年央视的广告收入,预计今年将全面超过央视,这从一个侧面反映了人们获取信息、知识的渠道正在发生深刻变化。十多年前,气象部门技术人员还在对发达国家气

象业务系统的数据支持能力赞叹不已，而现在自身已达到几乎每个业务系统都自配一套数据库，以单独支撑本业务功能的堪称“奢华”的程度。

每个阶段都有其特定的主题和重点解决的关键问题，这甚至可以从工信部主编的《中国信息化发展报告》副标题的年度变化（2009：“跨越与融合”；2010：“转型与调整”；2011：“泛在应用与创新”）得到印证。近年来，云计算、大数据的出现和理念的迅速传播，使原本喧闹的IT界再度兴奋和激动，也引发了全社会有识之士的普遍思考。抛去商家炒作的成分，云计算至少能给我们带来建设和运行成本的大幅降低、资源更加高效的利用以及系统管理的更加便捷高效等方面的好处。基于这方面的认识，英国政府于2011年3月更新了政府的ICT战略，将其核心目标确定为：减少浪费和项目失败，刺激经济增长；创造ICT公共基础设施；基于ICT促进及应对变化；加强治理。

类似的，美国政府于一年前发布了25项IT项目管理改革办法，其改革重点为：在接下来的18个月内，至少扭转或终止1/3效率低下的IT项目；“云技术优先”迁移策略：各部门必须在3个月内选定3个向政府云上迁移的服务，其中的一个必须在12个月内完成迁移，另外两个也必须在18个月内完成迁移；到2015年，至少整合800个联邦政府数据中心。按照美国政府的见解，云计算的有效应用可在如下方面提高IT项目收益：提高资源使用效益，提升资产利用率，整合需求，加速数据中心重组，简化IT项目，提高服务灵活性，改善服务可扩展性，增加创新，提升服务效率，降低风险。

与此相对应的，我国最近发布的《十二五国家政务信息化工程建设规划》提出，信息化工程建设应注重资源共享和业务协同，将建设模式由彼此分散的粗放型转变为彼此协同的集约型，并将“构建整体系统”作为建设原则。

所以，云计算的出现，为气象行业在互联网时代大规模地整合资源、大幅度提高资源使用效率、降低运营成本、提高服务灵活性和服务效率、改善服务可扩展性、增加创新等方面，提供了可能。而这一切也正是目前“做强气象”的核心内容。

## 2. 气象信息化目前面临的主要问题

### (1) 气象信息化的阶段性特征

20世纪后二十年，气象部门进行了系统性的信息化基础建设，其标志性系统及相关信息如表3所示。进入21世纪，气象观测系统借助大气监测自动化系统工程（第一期、第二期）得以迅速发展，基本实现了国家级基准站、基本站的遥测自动化；高空探测由最初的59/701系统更新换代成包括L波段探空雷达、GPS探空、臭氧探空、闪电定位系统等在内的综合性探空体系。基本建成了覆盖全国的新一代天气雷达网，并在许多省区实现了天气雷达联网监测。

与此同时，针对新时期国家和社会对气象服务的新要求，依托若干个大型建设项目，气象业务功能建设和业务系统建设蓬勃兴起，陆续建立起一大批具有明确服务对象和服务要求的业务系统。2012年中国气象局发布的《中国气象局关于全面推进县级气象机构综合改革工作的通知》，更是要求以改革观测业务、加强监测预警业务、强化公共气象服务、建设综合气象业务系统为重点，加快构建业务一体化、平台集约化、岗位多责化的县级综合气象业务。而上述所有这些业务系统，全部是采用信息技术，建立在IT设备基础资源平台之上的典型的信息系统。

因此，如果说改革开放30年中的前20年，对于气象信息化而言，是以基础建设为主，那么进入21世纪的十余年，则是以业务系统大发展，信息技术大范围作用于气象业务的十余年。

### (2) 气象信息化需要进一步深入

对于气象信息化（尤其是气象业务信息化）而言，进入21世纪以来的十余年，既是气象业务和流程

表3 20世纪后二十年气象部门的标志性系统及相关信息

类别	系统名称	建成年份	业务范围	作用
通信	BQS系统	1981	国内/际通信	全球气象资料实时获取；国家级—省级通信自动化，绘图自动化
	VAX系统	1990	国内通信系统	同上
	9210系统	2000	国内通信系统	国内观测资料实时传输
数据处理	M360	1985	资料处理	气候资料的规范化处理
	CRAY	1994	高性能计算	T42、T63
	IBM SP2	1995	高性能计算	T106、T213、气候动力延伸预报
数据库	Alpha数据库	1987	实时资料数据库	实时气象资料的规范化存储管理和应用
业务平台	MICAPS	1997	天气预报综合业务平台	首次实现天气预报业务的计算机化、综合化和人机交互
办公平台	Lotus/Notes	1999	办公自动化	首个全行业办公自动化综合平台

被大面积“计算机化”的十余年，也是徘徊于计算机化的无形围墙之内，没能进一步深入的十余年。笔者在《从“气象信息岛网”的负面作用看业务系统的阶段性整合》一文中曾分析了目前在气象部门普遍存在的“信息岛网”现象及产生的原因；归纳起来，气象岛网的负面作用大致有三个方面：①系统数量众多导致信息流程复杂，信息同步更新困难；②系统同构和同质导致投资浪费；③“三自系统”造成运行负担沉重。而“信息岛网”之所以产生，除内外在客观因素外，总体规划的长期缺位是最根本的原因。由于总体规划的缺乏以及综合协调管理的无力甚至缺位，尽管每个项目、每个系统的设计都经过较为严格的论证和评审，但从总体看，全行业的建设依然呈现“局部有效，整体无序”的现象。

业务和业务流程的计算机化固然是气象信息化的一个必然阶段，但气象信息化绝不只限于“计算机化”。在各个业务点、面都已基本因“计算机化”而实现“局部高效”的情况下，应适时重新审视现有数据流程乃至业务流程的合理性，通过优化乃至再造业务流程来提高整体业务效率和效能。如果没有管理层面在资源配置、流程设置、业务节点（系统）的功能界定等通盘规划，以及建设过程中在统筹安排下的分步实施，那么气象业务因“计算机化”所产生的巨大潜能便无法充分发挥出来；相反，其所派生的负面效应却会因之而逐渐积累，负担和因之付出的代价日益沉重——“气象信息岛网”的纷纷涌现和逐渐扩大便是现实的例证。

因此，气象信息化绝不能止步于若干信息技术的引入、IT设备的配备等技术和操作层面，在“计算机化”达到一定程度后，气象信息化（尤其是气象业务信息化）必须进一步深入并将其上升到管理层面，适时进行业务规划、信息资源规划和IT架构规划等管理层面的通盘设计规划，凝聚部门、行业和IT界所有知识和智慧，构建起一个资源配置合理、流程简约、功能完备的健康的业务体系。在此基础上，由最高层对建设过程进行通盘调度，彼此协调、分步实施，以较高的效率贯彻总体规划。惟其如此，方可能逐步达到“强身健体”的目标。不涉及管理层面和机构层面、只停留在计算机化层面的“气象业务信息化”，犹如晚清同光年间的“洋务运动”，浮肿、迟钝、多病及高耗低效等现象是无法避免的。

所以，目前的气象信息化（尤其是气象业务信息化）亟待进一步深入，由技术和操作层面上升到管理层面。

### 3. 目前需要解决的核心问题

#### (1) 顶层协调管理：扭转目前“整体无序”的建设状态

改革开放以来30多年的气象信息化建设硕果累累，但由于始终局限和徘徊在技术和操作层面，未能主动和有意识地将信息化导入管理层面，而是依然沿用20世纪90年代甚至80年代的传统管理方法和思路，因而就气象业务信息化而言，其迄今为止所获成果多表现在气象业务系统的“做大”，伴随着业务功能问题的逐一解决，整体业务系统迅速肥硕起来，具体表现为：业务系统众多、数据库众多、服务器和存储设备众多、层级重叠、流程复杂、设备和资源利用效率很低、运行和维护代价则居高不下。

笔者此前已论述过，导致上述负面现象近年来迅速蔓延的原因，在规划层面，是缺少总体的业务架构规划和IT架构规划；而在操作层面，是缺少拥有相当执行权力的、依据总体规划通盘协调调度气象部门信息化建设的领导部门。在缺少整体规划背景下，在缺乏更高层协调管理的情况下，职能部门、业务单位之间缺乏沟通，闷头自我发展成为常态，造成的结果便是“干弱枝肥”，岛屿一个接一个建立，彼此之间仅以网络简单地连接起来。“气象信息岛网”逐年扩大，联接岛屿的网络如蛛网般复杂而脆弱，而维护这些岛网运行所必须付出的代价也给各业务单位带来了沉重负担。

一战时期法国战时总理克雷孟梭曾经说过：“战争太重要了，不可以交给将军们。”周宏仁先生将其引伸演绎成为：“信息化太重要了，不可以交给技术专家们。”周先生的本意是：对于一个部门而言，信息化进程极其重要，应当由熟悉业务、明确发展方向、具有统揽全局能力的领导集体或组织负责统领，必须跳出技术的局限，基于整体，从目的出发，从问题入手，而技术专家由于自身条件所限，往往难以具备站在全行业高度的发展视野，因而难以担负起统领本行业或部门信息化的重任。反观当下的气象部门，气象业务信息化确实没有“交给技术专家”，然而也没有交由熟稔业务、明了发展方向、可统揽全局的领导集体或组织，事实上处于无统领状态。这种统领的缺位，使得气象业务信息化事实上是“交给了一大群彼此很少往来的‘处长和科长’”。这些“处长和科长”虽明了本单位的业务需求，能有针对性地设计业务功能并组织建设相关系统，但就整体效率和效能而言，较之“技术专家”便存在相当差距了。因为技术专家至少明了技术的可行性和系统整体的简约性等基

本法，并在实施中尽可能贯彻。而缺乏统一协调的各单位分散独立建设，连整体的简约性也会因任务的紧迫、技术的相对复杂而被放弃。因为在没有整体规划的情况下，这些单位没有义务因自觉遵守系统简约性而给自己平添许多协调、沟通等方面的工作压力以及因此而造成构建系统时的技术复杂度。因此“信息化的‘交给处长和科长’”虽然很好地解决了每个业务单位具体的业务功能需求问题，但也直接导致了气象业务信息化进程的“局部有效而整体无序”。这种现象如不予遏制并改变，气象业务躯体的日渐庞大，应变反应的逐渐迟钝，前进步伐的日益蹒跚沉重，便是不可避免的。

因此，必须尽快扭转目前气象业务信息化“整体无序”的状态。而应采取的步骤，一是加快制定整体业务规划和IT架构规划；二是恢复并加强顶层协调管理，在现有基础上组建或赋予某机构以职权，总体协调管理和指导气象部门的业务信息化建设。

上海市气象局最近初步建成的“一体化气象业务平台”，打破业务部门彼此间的藩篱，构建起基于业务流程的综合业务平台，是一次十分珍贵的有益探索。该平台的建成和成功运行，为气象业务信息化的藩篱打开了一扇吹进清新之风的窗户。

## (2) 综合和集约：气象业务信息化的发展模式

高效率和高效能是信息化的特征之一，而综合和集约是实现高效率高效能的必由之路，因而这也是进入21世纪以来IT业界始终热议的主题。恢复和加强顶层协调管理，其目的也是便于实现气象业务信息化的综合和集约化，改变“整体无序”状态，使气象业务体系从局部到整体，都能达到效率最佳状态，从而使气象业务机体逐渐强健起来。

因此，当务之急，是在总体规划的指导下，在确保业务能力不被削弱的前提下，对业务系统进行适当的综合性整合，化繁为简、消冗就精；对数据、计算、存储和网络等基础性资源进行集约化整合，统一调配，移峰填谷，使中国气象业务的肌体由臃肿变为匀称，经络畅通，反应敏捷。

一些发达国家的政府部门，近年来都将整合系统和资源、提高效率和效能、降低能耗和成本作为最近一段时期国家信息化的首要工作。而云计算、虚拟化和大数据等模式的出现，为上述信息化工作的开展提供了路径的可能，并展示出光明的前景。

因此，将气象信息化（尤其是气象业务信息化）引向深入，在总体规划的指导下，综合性调整和整合

业务系统，集约化整合各类资源，以此为起点逐渐做强气象业务，此正其时也。

需要指出的是，在深化气象信息化工作的背景下，专门从事资源、系统的服务和维护工作的独立的信息化专业部门，其工作重心应当适时进行调整：传统的IT资源维护工作应尽可能交由社会上已有的成熟的专业力量代为承担，逐步将自身的工作重点调整到系统集成和集成应用等带有鲜明气象业务色彩的工作方向上来。国务院于2013年8月初发布的《“宽带中国”战略及实施方案》中，向人们展示了未来国内基础通信业的光明前景，在某种程度上也预示了气象通信这门传统气象IT业务的未来。在这方面，湖南省气象信息中心利用国家超算中心长沙分中心的高性能计算资源，构建湖南省气象局高性能计算系统，就是一个值得借鉴的成功案例。限于篇幅，不对此话题做进一步展开讨论。

## 五、结语

如同信息化是人类历史进程的永恒话题一样，只要气象事业存在，气象信息化便会永远伴随其左右。回顾三十余年来气象信息化的发展历程，既有高歌猛进、令业界称奇的辉煌时期，也有踟蹰困顿、令人迷惑不解的阶段。新一届中国政府提出的“新四化”，为徘徊中的气象信息化敲响了晨钟。往者已去，来日可追，在全行业大力提升气象科技水平的同时，气象信息化——尤其是气象业务信息化——应当冲破藩篱，以提高业务效率和效能为主要目标，与气象科技一道，驱动我国气象事业向着气象强国的目标前驶。

致谢：此文在成文和修改过程中，得到赵立成、肖文名、王春虎、马廷淮、舒红平等同事的指点，在此深表谢意。

(作者单位：国家气象信息中心)

### 深入阅读

- 矫梅燕,等. 2010. 现代数值预报业务. 北京: 气象出版社.
- 姜奇平. 2006. 信息化质变论. 2006年北大讲演录.
- 沈文海. 从“气象信息网”的负面作用看业务系统的阶段性整合, <http://www.ciotimes.com/lifecycle/itgh/75981.html>
- 沈文海. 2012. 从云计算看气象部门未来的信息化走向. 气象科技进展, 2(2): 49-56.
- 郑国光,等. 2008. 气象部门改革开放三十周年纪念文集. 北京: 气象出版社.
- 周宏仁. 2008. 信息化论. 北京: 人民出版社.

# 我国气象灾害风险评估立法环境与需求

■ 杨惜春 肖子牛 张铁仁

我国的气象灾害约占各种自然灾害的71%，种类多、分布广、频率高、强度大、损失重。近10年，全国平均每年因气象灾害死亡2000人左右，经济损失约2000亿元。随着我国经济社会的快速发展，人口更加向城镇集中，经济社会活动流动性加大，由此带来的社会孕灾环境将更加脆弱敏感、承灾体更加暴露易损、致灾因子更加复杂多样，同样强度的气象灾害事件所造成的经济损失和社会影响将比过去要大得多，应对防范气象灾害的重要性和艰巨性日益凸显。实施气象灾害风险管理，既是国际气象防灾减灾发展的新趋向，也是我国气象防灾减灾迫在眉睫的新课题。加强气象灾害风险管理，根本要求是将气象灾害防御纳入到经济社会发展的总体规划中，在经济社会发展、城乡建设中统筹考虑防御气象灾害的能力建设。这就需要构建一套科学的气象灾害风险防范体系，将气象灾害的风险识别、监测预报预警、影响评估以及灾害的适应和风险转移等作为灾害风险管理能力建设的重要内容。同时促进部门合作和学科交叉融合的科学研究，开展对气候变化背景下气象灾害风险分析和评估，以提高气象灾害防御的预见性和应对的主动性。

我国《气象法》、《气象灾害防御条例》及《国家气象灾害防御规划（2009—2020）》等均要求建设我国气象灾害风险评估法律制度，也制定了一些相关规定。但是从立法现状来看，该项制度目前只停留于原则性规定，无论内容还是程序都有待进一步明确和完善。国内学者已开始关注气象灾害风险评估立法，提出了立法建议。但总体上，我国国内研究气象灾害风险评估立法的成果还比较少见，加快和加大我国气象灾害风险评估立法研究十分必要和紧迫。本文拟探讨气象灾害风险评估立法概念及内涵，分析我国气象灾害风险评估立法的基础、现状与缺失，考察我国气象灾害风险评估立法之需求，提出我国气象灾害风险评估立法的初步建议。

## 一、气象灾害风险评估立法概念及内涵

### 1. 风险的概念及内涵

“风险”的概念起源于19世纪末，最早出现在西方经济领域中。不同领域对风险的认识有所不同。按照权威的《韦伯字典》的说法，“风险”是“面临着伤害或损失的可能性”。《辞海》中将“风险”定义

为“人们在生产建设和日常生活中遭遇可能导致人身伤亡、财产受损及其他经济损失的自然灾害、意外事故和其他不测事件发生的可能性。”

最常用的风险含义有两种：一是某种可能发生的危害，该危害的不确定性可以用概率来描述；二是指某个客体遭受某种伤害、损失或不利影响的可能性。这两种含义是从主体和受体两个角度对同一个不利事件发生可能性的描述。本研究中所指的“风险”包含以上两个方面的含义，即指在一定条件下和一定时期内发生的各种不利事件的可能性及由其造成伤害、损失或不利影响的可能性。

### 2. 气象灾害风险的概念及内涵

气象灾害风险是指一定条件下和一定时期内气象灾害发生及其造成伤害、损失或不利影响的可能性。依据风险的定义和内涵，气象灾害风险也包含两方面的含义：一是某种或者多种气象灾害发生的可能性，即致险可能性；二是因某种或者多种气象灾害对人类社会可能导致的危害性，即风险损失。

气象灾害风险既具有自然属性，也具有社会属性，无论自然变异还是人类活动都可能导致气象灾害的发生。那么气象灾害风险有些什么样的特性呢？首先，气象灾害风险具有广泛的危害性。第二，气象灾害风险具有可变性。随着导致灾害事件的气象因素的变化、人为的影响以及社会易损性的变化，灾害风险程度的大小，甚至性质都是可变的。第三，气象灾害风险具有复杂性。同种灾害对于不同的社会系统结构，其风险性质和强度可能不同；而对于同一社会系统结构，不同气象灾害所产生的风险性质和大小也不同。同时，社会系统结构中承灾体的脆弱性具有可变性，这都使得气象灾害风险变得复杂多样。第四，气象灾害风险具有一定的必然性。虽然气象灾害的产生往往给人以一种突发、偶然的感受，但气象灾害的孕灾环境和承灾体的性质是客观存在的，致灾因子的出现只是时间问题，因此气象灾害风险实际上客观存在，气象灾害突发性和随机性之后隐含着一定的必然性。

气象灾害风险危害的广泛性和复杂性要求人们应该加强对潜在气象灾害风险的认知与评价，建立风险监测预报预警系统，完善风险防范机制，主动预防和减轻灾害风险。气象灾害风险可变性中隐含着必然

性，意味着人们能够通过科技手段，客观认识和评估风险水平，并采取科学的预防、应急和处置措施，防灾于未然。

### 3. 气象灾害风险评估概念及内涵

气象灾害风险评估具有广义与狭义两种内涵。狭义的气象灾害风险评估主要是针对气象灾害致灾因子进行风险评估，通常是指对气象灾害致灾因子及其可能造成的灾情之超越概率的估算。广义的气象灾害风险评估，是对气象灾害系统进行风险评估，即在气象灾害的孕灾环境、致灾因子、承灾体分别进行风险评估的基础上，对气象灾害系统进行风险评估。

气象灾害风险评估的广义理解更具科学性和完整性，也是国际上灾害评估工作的发展趋势。但我国目前立法中并未完全明确规定气象灾害风险评估的定义及内涵，《〈气象灾害防御条例〉释义》中对气象灾害风险评估是这样解释的：气象灾害风险评估是一项综合研究气象灾害危险性、承灾体脆弱性的工作，它以气象灾害普查数据为基础，通过确定气象灾害损失指标，建立灾情序列，制定出致灾因子等级指标，构建致灾因子概率分布函数，建立起气象灾害风险评估模型。该释义接近气象灾害风险评估广义理解，但是对于孕灾环境和承灾体因素考虑仍然不够充分，为了统一和明确评估内容、范围和方法，建议在立法中明确规定气象灾害风险评估概念。

### 4. 气象灾害风险评估法律制度概念及内涵

气象灾害风险评估法律制度是气象灾害风险管理法律制度中一项不可或缺的重要制度，与气象灾害防御应急准备措施评估、灾害损失评估、防灾备灾减灾措施效果评估等一起构成气象灾害评估制度体系。其中，气象灾害风险评估主要指灾前预评估，是对未来气象灾害发生的可能性，以及可能造成的人员伤亡、经济损失、社会影响及减灾的社会经济效益的一种综合预测评价。通过对灾害发生的可能风险、可能影响进行估算与测算，预判灾害的等级和可能造成的危害，可以为采取有效的气象灾害应急防御部署和措施提出合理化建议。

气象灾害风险评估法律制度与气象灾害风险评估技术规范有联系又有区别。气象灾害风险评估技术规范是指气象灾害风险评估工作的主要指导性文件和标准，是法律制度的技术基础和实践来源。法律意义上的气象灾害风险评估制度指的是对气象灾害风险评估管理、监督、技术服务、科技开发以及公众参与等过程中的社会关系进行调整的法律规范体系，涉及调整与评估相关的政府及相关部门和机构、企事业单位、公众等主体在评估中的各项权利、义务和责任。气象灾害风险评估技术规范在性质上只是指导气象灾害风

险评估工作的技术指南和科学准则，必须经立法确认并由气象灾害风险评估行政主管部门决定适用后才具有相应的法律拘束力。我国实践中已制定有气象灾害风险评估技术规范，但是并不规范，需要通过立法使其更健全，并具有法律拘束力。

## 二、我国气象灾害风险评估立法环境及基础

### 1. 气象灾害风险评估立法国内外环境

灾害风险评估是灾害风险管理中的一项基础性工作。最近20年来，国际防灾减灾领域将灾害风险评估提高到一个很重要的位置，并且对各国开展灾害风险评估工作提出了要求，如《建设一个更安全世界的横滨战略和行动计划：自然灾害防灾、备灾和抗灾方针》提出：危险度评价是制定适当而有效的减灾政策和措施的必要步骤，要将减灾、防灾和抗灾工作纳入基于灾害评估的社会经济发展规划工作之中。

《2005—2015年兵库行动纲领：加强国家和社区的抗灾能力》更为具体地指出：更有效地将灾害风险因素纳入各级的可持续发展政策、规划和方案，同时特别强调防灾、减灾、备灾和降低脆弱性；风险评估是非常重要的投资，能够保护和拯救生命、财产和生计，促进可持续发展；与主要依靠灾后应对和恢复相比，它们在加强处理机制方面的成本效益要高得多。

从国外风险管理经验和实践来看，有效的风险管理机制都是以灾害风险评估为基础和核心的。如在英国伦敦，城市风险管理工作关口前移，以风险登记为核心，突出风险评估在应急管理工作中的核心地位。日本的应急管理体系工作重心逐步向事后应急处置与事前主动防范并重转变，风险评估成为应急管理的基础性和日常工作。美国的自然灾害风险评估是减灾规划编制的前提和基础，减灾规划是风险评估的结果和产出。综上所述，将灾害风险评估工作纳入法规要求，是国际减灾工作的重要趋势。

“以防为主”一直是我国灾害防御中的重要指导思想，我国在2013年“5·12”防灾减灾日也将主题确立为“识别灾害风险，掌握减灾技能”。从工作实践来看，我国目前已经建成全国气象灾害影响评估业务系统，结合地方实际，开展了一些风险评估工作，如安徽省暴雨洪涝定量化风险评估、广东省公路交通内涝灾害风险评估和城市重点区域精细化风险评估等；同时，也配合政府的决策工作，为一些重大社会活动提供了气象风险评估。尽管我国的气象灾害风险评估工作在实践中已经打下了一定的基础，但与社会需求相比还有很大的差距，亟需通过立法手段，加快社会化进程。

## 2. 我国气象灾害风险评估立法基础

1999年颁布的《气象法》是对我国气象工作进行规范的法律。该法第28条第1款规定：“各级气象主管机构应当组织对重大灾害性天气的跨地区、跨部门的联合监测、预报工作，及时提出气象灾害防御措施，并对重大气象灾害做出评估，为本级人民政府组织防御气象灾害提供决策依据”，这是我国最早的涉及气象灾害风险评估的法律条款。

2007年出台的《突发事件应对法》是我国公共应急法制建设的里程碑。该法确立了“预防为主、预防与应急相结合”的灾害应对原则，确立了风险评估制度。如第5条：国家建立重大突发事件风险评估体系，对可能发生的突发事件进行综合性评估，减少重大突发事件的发生，最大限度地减轻重大突发事件的影响。第20条：县级人民政府应当对本行政区域内容易引发自然灾害、事故灾难和公共卫生事件的危险源、危险区域进行调查、登记、风险评估，定期进行检查、监控，并责令有关单位采取安全防范措施；省级和设区的市级人民政府应当对本行政区域内容易引发特别重大、重大突发事件的危险源、危险区域进行调查、登记、风险评估，组织进行检查、监控，并责令有关单位采取安全防范措施；县级以上地方各级人民政府按照本法规定登记的危险源、危险区域，应当按照国家规定及时向社会公布。其中第5条确立了我国风险评估法律制度，第20条对风险评估的责任主体、分类管理以及结果公布等进行了规定。

2010年颁布施行的《气象灾害防御条例》是根据《气象法》的相关规定，在总结我国多年来气象灾害防御实践经验的基础上，针对气象灾害防御制定的一部专门性的行政法规。该法规从气象灾害的预防、监测、预报和预警、应急处置、法律责任等方面进行了全面而具体的规定，是我国目前开展气象灾害风险管理的重要法律依据。该法第一次明确提出了气象灾害风险评估法律制度的概念并就评估组织、管理和实施的主体、评估范围、内容、流程、方式、对象及结果运用的目的和意义等给予了规定，如第10条：县级以上地方人民政府应当组织气象等有关部门对本行政区域内发生的气象灾害的种类、次数、强度和造成的损失等情况开展气象灾害普查，建立气象灾害数据库，按照气象灾害的种类进行气象灾害风险评估，并根据气象灾害分布情况和气象灾害风险评估结果，划定气象灾害风险区域。第11条：国务院气象主管机构应当会同国务院有关部门，根据气象灾害风险评估结果和气象灾害风险区域，编制国家气象灾害防御规划，报国务院批准后组织实施。第27条：县级以上人民政府

有关部门在国家重大建设工程、重大区域性经济开发项目和大型太阳能、风能等气候资源开发利用项目以及城乡规划编制中，应当统筹考虑气候可行性和气象灾害的风险性，避免、减轻气象灾害的影响。《气象灾害防御条例》中的以上规定是我国目前进行气象灾害风险评估活动的主要法律依据。

我国很多省（区）、市在其地方性法规和规章中确立了气象灾害风险评估法律制度。地方法规如《甘肃省气象灾害防御条例》第22条规定：在气象灾害易发区进行重大基础设施建设、公共工程建设，在可行性研究阶段应当进行气象灾害风险评估；可行性研究报告未包含气象灾害风险评估内容的，有关审批机关不得审批。《湖南省雷电灾害防御条例》、《浙江省气象灾害防御办法》等也对气象灾害风险评估工作提出了明确要求。《江苏省气象灾害评估管理办法》是目前对气象灾害风险评估规定得最为详细和具体的地方政府规章，该办法中的气象灾害评估实质上主要是指气象灾害风险评估。该办法对气象灾害风险评估立法进行了积极的探索，可供参考和借鉴。

在部门规章中对雷电灾害风险评估管理有更加明确的界定和要求。如中国气象局依据相关法律法规于2000年制定了《防雷减灾管理办法》，并随着社会对雷电灾害风险管理需求的加强而在2005、2011和2013年先后对该办法进行了修订。现行的《防雷减灾管理办法（修订）》对于我国雷电和雷电灾害的研究、监测、预警、风险评估、防护以及雷电灾害的调查、鉴定等雷电灾害防御活动进行了规范。

《国家气象灾害防御规划（2009—2020）》提出要制定《气象灾害风险评估办法》，要建立重大工程建设的气象灾害风险评估制度，建立相应的建设标准，将气象灾害风险评估纳入工程建设项目行政审批的重要内容，确保在城乡规划编制和工程立项中充分考虑气象灾害的风险性，避免和减少气象灾害的影响，这是我国气象灾害风险评估立法的国家政策依据。

## 三、我国气象灾害风险评估立法缺失及需求

从国内外防灾减灾的理论和实践来看，全面实施灾害风险管理已经成为重要的发展趋势。虽然目前我国法律法规中有前述的气象灾害风险评估相关规定，但是这些规定都还比较单一。从规范体系来看，这些规范散见于各法律文件中，气象灾害风险评估专门性法规和规章仍然缺位；从规范内容来看，气象灾害风险评估立法的理念、目的、原则、法律制度和法律责任等都没有统一和明确的规定；从规范实施来看，目前的法律规范针对性、可操作性和现实指导性等方面都还比较欠缺。我国气象灾害风险评估法律制度内容和程序

上的立法缺失与需求主要体现在如下几个方面:

(1) 评估监管体制还需进一步完善。《气象灾害防御条例》第10条规定了我国气象灾害风险评估的组织管理体制,即县级以上地方人民政府对评估负组织责任、气象等有关部门负责评估具体实施。但是目前立法中,还没有关于评估监督机构的相关规定。

(2) 国家和地方评估指南亟需建立和制定。气象灾害风险评估指南是重要的评估技术规范,与法律法规相配套。灾害风险管理较为成熟的国家和地区都很重视灾害风险评估指南的制定,以评估指南为指引确保灾害风险评估工作的统一规范,实现各层级、地方和部门的统一兼容,实现对风险的全过程精细化、标准化、空间化管理。但是我国目前尚未制定国家和地方气象灾害风险评估指南,因此对于评估工作要求,风险名录,评估的内容、程序与方法,评估结果的运用,各级各类评估示例,评估标准,评估报告书编写内容、要求、方法及示例等都缺乏统一规范。

(3) 评估对象范围有待扩充。我国目前立法中主要规定了两类评估对象,即行政区域评估与重大工程、重大项目等项目评估,但是对于可能受气象灾害风险影响的各类战略性发展政策和计划尚未纳入评估范围,战略风险评估对象仅限于规划编制,如《气象灾害防御条例》第27条规定,城乡规划编制应当开展气象灾害风险评估。此外,项目评估的范围也有待扩充和明确规定。

(4) 评估机构需要进一步明确。气象灾害风险评估机构是指接受委托为气象灾害风险评估提供技术服务的机构。目前立法中只规定了评估具体实施部门为气象等有关部门,尚未规定各类评估机构,也尚未体现根据不同评估对象确定不同评估机构的理念,尚未赋予第三方机构开展气象灾害风险评估的资格和权利,缺乏相关授权、管理和监督条款。

(5) 评估程序需要统一和规范。风险评估本身是一项技术性很强的工作,要保证该项工作能够有序开展,必须通过规范化的程序要求以指导实践部门。目前立法中对于风险评估程序尚未规定。

(6) 评估科技支撑体系需要进一步健全。美国气象灾害风险评估比较成熟,其中很重要的一点就是重视科技的支撑作用,国际减灾战略性文件以及我国法律和政策对于加强气象灾害风险评估科技研究和开发也提出了很多具体要求,但是我国评估科技支撑体系还不够健全。立法中对于气象灾害风险评估主管机构、评估机构、科研院所、高等院校以及其他有关部门等在评估科技研究和开发中的权利、义务和责任缺乏规定,也尚未确立支持评估科技研究和开发的各种

措施,比如设立专项基金、组建专家委员会、开展专项研究项目以及建设相关学科和团队等。

(7) 评估公众参与机制亟需建立完善。公众参与与自身利益有关的社会管理活动是公民的基本权利和义务,气象灾害风险评估中的公众参与有利于防止政府滥用职权、盲目决策,防止建设单位暗箱操作、违规建设。现有立法中规定了公众参与气象灾害防御的原则和义务,但是并未对公众参与气象灾害风险评估的权利、义务和责任,参与的主体范围,参与内容、方式和程序,参与效力等做出相应规定。

(8) 评估法律责任需要明确和界定。气象灾害风险评估法律责任是指违反气象灾害风险评估法律规定,不依法承担责任、履行义务,或者违法侵犯其他主体合法权益等所应承担的不利后果,是确保气象灾害风险评估法律制度得到实现必不可少的部分。目前立法尚未界定气象灾害风险评估法律责任主体、法律责任种类及相应的责任承担方式等。

#### 四、结语

气象灾害风险评估是气象灾害风险管理中的一项基础和核心工作,我国目前立法尚难以满足气象灾害风险评估社会化的需求。通过对我国气象灾害风险评估立法目的及意义、立法概念及内涵、立法现状及基础、立法缺失及需求进行分析,提出如下立法建议:

(1) 建议将气象灾害风险评估设计成为我国气象灾害风险管理立法中的一项基础制度和核心制度,使风险管理工作建立在科学的风险评估之上。

(2) 建议制定《气象灾害风险评估条例》,并逐步完善配套法律和技术规范体系。

(3) 建议在气象灾害风险评估法律制度中健全评估监管体制、制定国家和地方评估指南、明确评估对象和内容、规范评估机构、规范评估程序、建立评估科技支撑体系、建立评估公众参与机制以及界定评估法律责任等。

本文由中国气象局软科学研究面上项目[2013]第022号和中国气象局软科学研究重点项目[2013]第002号共同资助。

(作者单位:杨惜春,中国气象局气象干部培训学院,中国气象局气象干部培训学院湖南分院;肖子牛,中国气象局气象干部培训学院;张钦仁,中国气象局)

#### 深入阅读

国务院法制办公室,中国气象局. 2010. 气象灾害防御条例释义. 北京:中国法制出版社.  
王志强. 2013. 有效防御气象灾害的法制建设研究. 阅江学刊, 5(3).  
许小峰,等. 2012. 气象防灾减灾. 北京:气象出版社.

# IPCC SREX报告中来自专门机构的引文分析

■ 郑秋红 胡英 秦连霞

IPCC于2012年发布了《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》(简称SREX,图1)。该报告通过IPCC第五次评估报告第一、二工作组的通力合作,第一次将气候科学和社会经济科学相结合,综合评估了气候变化背景下极端灾害的情况及灾害风险管理和适应措施的进展,为各国科学应对气候变化、有效降低灾害风险提供了重要的参考信息。

本文对SREX报告中,引用各种专门机构的研究报告情况进行计量分析,重点分析这些机构的类型及其关注的领域,国际气候变化谈判主要利益集团的声音,并对其中主要的机构进行介绍。

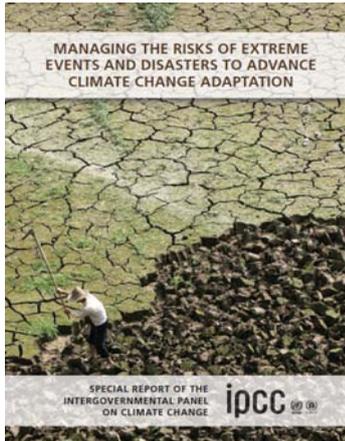


图1 SREX报告封面

## 一、机构报告所关注的领域

SREX报告共分9章,所引用的各类文献中,来自机构的报告589篇次,占总文献量的11.5%(表1),共涉及各类机构205个。

SREX报告的第4,6,7,8和9章,机构报告引文占总文献量的10%~30%,是仅次于期刊引文的第二大文献来源,表明在国家、国际层面上的研究及各种案例分析中,



联合国及其所属机构是引文的主要贡献者,被引报告284篇次,占总量的48.2%,且在各个章节均有报告被引。

机构的力量不容忽视。

## 二、机构类别及主要机构简介

### 1. 机构类别分析

总体上,机构研究报告引文中,以国际和国家级机构发布的报告为主,分别为381和154篇次,占总数的64.7%和26.1%;区域和地方级机构发布的报告分别为39和15篇次,占总数的6.6%和2.5%。报告来源的分章分布详见表2。

各级政府及政府间组织是主要贡献者,被引报告总量为439篇次,占机构引文总数的74.5%。其次是非盈利性的非政府组织(NPO),被引报告总量为100篇次,占总数的17.0%。整个SREX报告所采纳的大学中以机构名义发布的报告并不多,只有9篇次,占总数的1.5%。其余是一些企业、跨国集团,或者是国际、国家研究计划发布的报告,共有41篇次,占总数的7.0%。

### 2. 引文主要来源机构分析

被引报告超过5篇次的机构共有23个,其中包括国际级机构19个,区域级机构2个,详细信息见表3。

联合国及其所属机构是引文的主要贡献者,被引报告284篇次,占总量的48.2%,且在各个章节均有报告被引。其关注度较高的3领域(发布报告最多)分别为第9,6和7章。下面对一些主要机构进行介绍。SREX共引UNISDR的报告67篇次。UNISDR隶属于联合国秘书处,其目的是确保国际减灾战略的实施。UNISDR为全球减灾提供切实的服务和工具,例如减灾网站PreventionWeb、一些好的实践经验的报告、国家层面及全球的减灾评估报告。从2009年起,UNISDR共发布了3次(每两年发布1次)《全球减灾评估报告》,提供权威的全球灾害风险和趋势分析。WB的报告被引36篇次。WB是联合国下属的一个专门机构,其主要帮助对象是发展中国家。1978年起,WB每年发布《世界发展报告》。气候变化亦是WB高度关注的领域,在WB主页,以“climate”为标题检索,可以显示结果4800多条。UNFCCC的报告被引26篇次。UNFCCC是世界上第一个为全面控制二氧化碳等温室气

表1 SREX报告各章引文中来自专门机构的文献数量及比例

章节名称	引文总数 (篇)	机构文献数 (篇)	机构文献比例 (%)
1 气候变化: 灾害风险、暴露、脆弱性和恢复力中的新维度	345	39	11.30
2 风险维度: 暴露和脆弱性	526	42	7.98
3 气候极端事件的变化及其对自然环境的影响	1093	3	0.27
4 极端气候事件影响的变化: 人类社会系统和生态系统	610	58	9.51
5 在局地水平上管理极端气候事件风险	594	39	6.57
6 管理极端气候和灾害风险的国家系统	474	113	23.84
7 管理风险: 国际水平和跨尺度整合	297	88	29.63
8 通向一个可持续的和有恢复力的未来	656	63	9.60
9 案例研究	513	144	28.07
合计	5108	589	平均11.53

表2 SREX报告引用专门机构文献的机构类别及文献数量分布 (单位: 篇次)

章号	国际级机构				区域级机构			国家级机构				地方级机构	
	联合国所属机构	其他政府间组织	NPO	其他	政府间组织	NPO	其他	政府组织	大学	NPO	其他	政府组织	NPO
1	19	0	6	1	1	1	1	2	2	5	1	0	0
2	22	1	7	2	2	0	2	3	1	2	0	0	0
3	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	24	2	1	1	6	1	0	13	1	4	4	1	0
5	14	0	6	0	3	0	0	6	0	5	4	0	1
6	59	1	19	4	7	1	0	13	2	4	3	0	0
7	54	6	11	2	2	0	0	8	1	1	3	0	0
8	23	3	8	3	6	0	1	7	0	8	4	0	0
9	67	4	6	3	5	0	0	39	2	3	2	13	0
合计	284	17	64	16	32	3	4	92	9	32	21	14	1
		381				39			154				15

注: 本表统计的均为署名第1位的机构; 国际级政府间组织包括联合国及其下属机构以及其他政府间组织; 区域级机构是指以服务区域为核心的机构, 例如: 欧盟等; NPO (Non-Profit Organization) 是指非政府组织中的非盈利性组织; 政府组织除了政府部门外, 还包括由政府组织建立起来的独立研究机构, 例如: 南太平洋应用地球科学委员会 (SOPAC) 即为一个政府间的地方组织; 其他包括一些国际研究计划、企业及跨国集团等, 例如: 美国的阿姆斯咨询公司 (RMS), 慕尼黑再保险公司 (Munich Re), 全球计划研究计划 (Sphere Project) 等; 大学归为国家级机构。

体排放, 以应对全球气候变暖给人类经济和社会带来不利影响的国际公约, 也是国际社会在应对全球气候变化问题上进行国际合作的一个基本框架。UNDP的报告被引23篇次。UNDP是世界上最大的负责进行技术援助的多边机构。其工作重点是, 帮助各国建立和共享减贫、千年发展目标、民主治理、危机预防和恢复、环境和能源的可持续发展等方面的方案, 帮助发展中国家吸

引和有效地利用援助。

各级NPO组织的声音从某种意义上代表着公众的意愿, 因此, NPO事实上提供了一种弥合官方和民间鸿沟的桥梁和纽带, 能够给政府提供一个社会的视角。NPO机构中, IFRC报告被引最多, 它是一个遍布全球的志愿援助组织, 是世界上最庞大, 也是最具影响力的类似组织, 许多国家立法保障其特殊地位。灾害风险管理是IFRC关注的重

要领域, 20世纪90年代开始, IFRC每年针对不同主题发布《世界灾害报告》, 并在其网站提供“灾害法律数据库”。NRC的报告被引10篇次。NRC是1916年由美国国家科学院 (NAS) 创建的“民间非营利组织”。ICSU的报告被引9篇次。ICSU简称“国际科联”, 是目前科学界最有权威的非政府国际组织, 也是中国科协代表我国加入的最重要的国际民间科技组织。

一些企业及跨国金融集团也在关注灾害风险管理及气候变化领域, 瑞士再保险集团 (Swiss Re) 和慕尼黑再保险集团 (Munich Re) 均被引报告4篇次。

国家及地方政府的报告, 尤其是地方政府的报告, 较集中地出现在了第9章的个例分析中。

### 三、机构国别及引文时间分布

#### 1. 国别及利益集团分析

国家和地方级的169篇次引文报告按照国别划分, 以美国发布的报告最多, 为48篇次。其次是英国、加拿大和澳大利亚, 分别为26、20和16篇次 (详见表4)。没有中国机构的报告被引。

从气候变化谈判各利益集团分析, 以美国为首的伞形国家集团 (美国、日本、加拿大、澳大利亚、新西兰) 是声音最强的,

表3 SREX报告引用专门机构文献超过5篇次的机构清单 (按篇次排序)

序号	机构名称缩写	中文译名	引文篇次
1	UNISDR	联合国国际减灾战略署	67
2	WB	世界银行	36
3	UNFCCC	联合国气候变化框架公约	26
4	UNDP	联合国开发计划署	23
5	IPCC	政府间气候变化专门委员会	17
6	IFRC	红十字会与红新月会国际联合会	17
7	FAO	联合国粮食及农业组织	14
8	NRC	美国国家研究委员会	13
9	WMO	世界气象组织	11
10	WHO	世界卫生组织	10
11	UN	联合国	10
12	DFID	英国国际发展部	9
13	ICSU	国际科学理事会	9
14	EEA	欧洲环境署	7
15	UN-HABITAT	联合国人居署	7
16	UNEP	联合国环境规划署	7
17	Oxfam	乐施会	7
18	UNESCO	联合国经济及社会理事会	6
19	OECD	经济与合作组织	6
20	GEF	全球环境基金	5
21	CCCD	气候变化和发展委员会	5
22	UNOCHA and IDMC	联合国人道主义事务协调办公室	5
23	IOM	国际移民组织	5

表 4 SREX报告引用的国家及地方级机构文献的国别分布 (按篇次排序)

序号	国别	引文篇次	序号	国别	引文篇次	序号	国别	引文篇次
1	美国	48	9	菲律宾	4	17	孟加拉	2
2	英国	26	10	莫桑比克	4	18	日本	2
3	加拿大	20	11	南非	4	19	新西兰	2
4	澳大利亚	16	12	比利时	3	20	丹麦	1
5	德国	8	13	蒙古	3	21	挪威	1
6	法国	7	14	芬兰	2	22	泰国	1
7	瑞士	5	15	哥伦比亚	2	23	叙利亚	1
8	巴西	4	16	肯尼亚	2	24	印度	1

共被引报告88篇次。其中, NRC (13篇次)、加拿大自然资源部 (NRCAN) (4篇次)、澳大利亚维多利亚州议会 (4篇次) 等是该集团的重要研究机构。伞形国家集团报告被引篇次最多的前4个章节分别为第9章 (31篇次), 第4, 5和8章 (每章分别有12篇次)。

欧盟国家 (英国、德国、法国、比利时、芬兰、丹麦等) 共被引报告47篇次。另外, 欧盟作为一个整体, 其区域机构报告被引12篇次。英国国际发展部 (DFID) (9篇次), 欧洲环境署 (EEA) (7篇次), 英国环境、食品和农村事务部 (DEFRA), 慕尼黑再保险公司 (分别4篇次) 等是报告的重要来源机构。欧盟报告关注的前3个章节分别第6, 4和9章 (分别被引12, 11和11篇次)。

与伞形国家集团和欧盟相比, 发展中国家的声音较弱。“基础四国” (中国、印度、巴西和南非) 共有被引报告9篇次, 且均在第9章被引。除“基础四国”外的其他发展中国家机构共被引报告19篇次, 其中的11篇次亦在第9章被引。

同时, 有一些发展中国家组成的区域性组织机构的报告被引, 但数量非常有限, 例如亚洲的OECD (6篇次), 南美洲的安第斯共同体 (Comunidad Andina, 2篇次)、非盟 (African Union, 1篇次)、南部非洲发展共同体 (SADC, 1篇次) 和太平洋小岛屿发展中国家 (PSIDS, 1篇次) 等。

## 2. 时间分布

这些机构报告都是在1970—2011

年间出版的, 且数量随着时间快速增长 (图2)。2000年以后的引文占总引文量的95.9%, 其中2005年及以后的引文占总引文量的83.5%, 说明国际社会对“管理极端事件和灾害风险及气候变化适应”领域的关注度在飞速提升。2010—2011年报告数量较2008—2009年少, 可能是因为SREX报告初稿于2011年完成, 2011年相关报告没有完全被引的缘故。

## 四、讨论和小结

IPCC于1990年, 1995年, 2001年和2007年分别发布了4次评估报告, 2013年9月起, 其第五次评估报告将陆续发布。除了综合评估报告外, IPCC在历次评估过程中还针对某一阶段的热点问题发布相关的特别报告, 例如。2011年推出了《可再生能源与减缓气候变化特别报告》、2005年推出了《二氧化碳捕集与存储》、《保护臭氧层和全球气候系统: 与氢氟碳化物和全氟化

碳相关的问题特别报告》等。

SREX即为IPCC在AR5评估周期发布的一个特别报告, 它是介于IPCC第四次评估报告和第五次评估报告间的“中间产物”。在气候变化背景下, 极端气候事件总体上将更多、更强地发生, 危害也将更大, 越来越成为科学界的共识。

本文的阐述表明, 在气候变化领域, 国际上已经培育了一批专业的研究机构。此外, 气候变化及其所带来的灾害风险会给自然和社会经济系统带来直接或间接的影响, 农林业、水利、陆地和海洋生态系统、人居环境等都是其影响的重要领域, 可以说, 气候变化所带来的灾害风险直接影响到人类安全和可持续发展。因此, 当前很多政府机构及相关组织也都在开展气候变化及其灾害风险方面的研究。本文的研究结果, 在一定程度上反应了专门机构在该领域的研究现状。

本文由国家科技支撑项目 (2012BAC20B05) 和中国气象局气象干部培训学院2013年课题“IPCC AR5系列报告科学文献来源国别及中国影响力的计量分析”共同资助。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

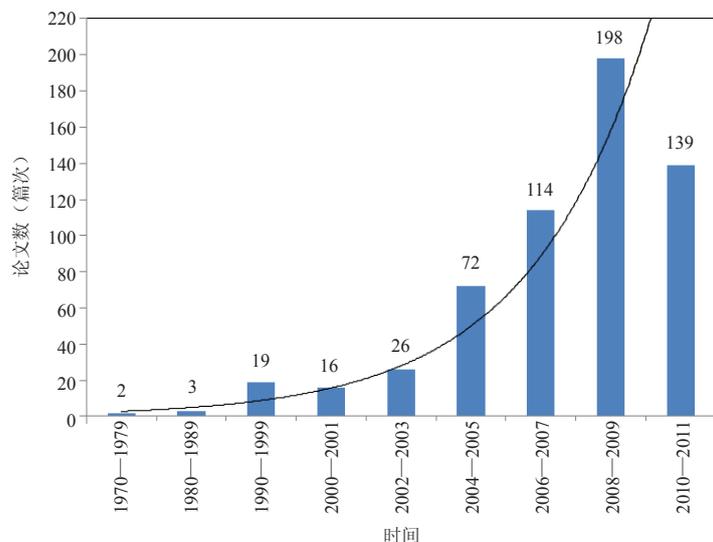


图2 SREX引用机构报告的时间分布图

# “罗斯贝波”主题文献计量分析

张萌 李婧华

## 一、数据来源及统计方法

利用ISI Web of Science平台SCI-E数据库和中国知网学术期刊网络出版总库(以下简称CNKI)针对国内外有关“罗斯贝波”主题文献进行检索,给出在此领域发表文献较多的国家、机构及学者的相关数据和简要分析。分别使用检索式TS=“Rossby wave”OR“Rossby waves”,主题=“罗斯贝波”或“Rossby波”,学科类别限定为“气象学与大气科学”和“海洋学”,检索命中收录于SCI-E的文献2779篇,其中中国作者署名的文章194篇;收录于CNKI的文献674篇。检索时间为2013年9月。

## 二、统计结果与分析

### 1. 论文产出年代分布

1939年,罗斯贝提出长波理论,使气象学在理论研究上有了重大突破。后人为纪念罗斯贝做出的贡献,将满足地转平衡的波命名为“罗斯贝波”。而SCI-E收录主题包含“罗斯贝波”的文献最早发表于1963年刊载在Deep-Sea Research,由Moore撰写的Rossby Waves in Ocean Circulation。CNKI收录的该领域最

虽然中国在此领域的研究在国际上影响力不大,但是华裔科学家在动力研究方面却有比较突出的成绩。

早文献则是巢纪平和叶笃正1977年发表于《大气科学》的“正压大气中的螺旋行星波”一文。

从发文总量看,作为基础理论研究的“罗斯贝波”研究的文献数远不及“气候变化”、“数值预报”等社会和学科热点的发文数。某种程度上表明基础理论的研究团队少,且较难出成果。即便如此,SCI-E收录的“罗斯贝波”主题文献量依然成逐年上升趋势(图1),1991年(56篇)较1990年(21篇)实现了成倍的增长,之后基本成平稳增长的态势,并于2010年达到最大值(193篇)。中国作者参与发表的文献最早出现于1989年,之后进入空白期,1995年重新出现,并逐年增多。而CNKI数据库收录的“罗斯贝波”主题文献数则是波动的,1990—1994年是中国科学家在SCI-E发表该领域文章的空白期,但这期间发表在CNKI的文章数却达到最高值(1993年34篇),之后数量逐渐

回落,直到2000年后才稳定在每年发表25篇上下。

### 2. 国家和机构产出分析

在SCI-E“气象学与大气科学”和“海洋学”两个领域近3000篇有关“罗斯贝波”主题的文献中,美国作者和机构参与发表的文献数多达1457篇,占总文献的52.429%,远超其他国家;中国产出193篇,排名第4。从他引总次数和h指数两个影响力指标来看,美国依旧是当之无愧的第一,而中国虽产出量排名第四,但文献影响力却不如产出量不到200篇的法国、德国、加拿大和澳大利亚(表1)。

表2给出国内外“罗斯贝波”主题文献产出量较多的机构,国外机构中NOAA产出141篇,位居第1,夏威夷大学马诺阿分校、东京大学和NCAR位列2~4位,中国科学院排名第5,可见机构排名与国家排名分布基本吻合。中国机构在国际上的声音主要来自中国科学院,产出量占据了所有中国机构产出的49.741%。中国海洋大学,中国气象科学研究院分列2,3名。CNKI数据库检索数据表明,国内该领域文献产出最多

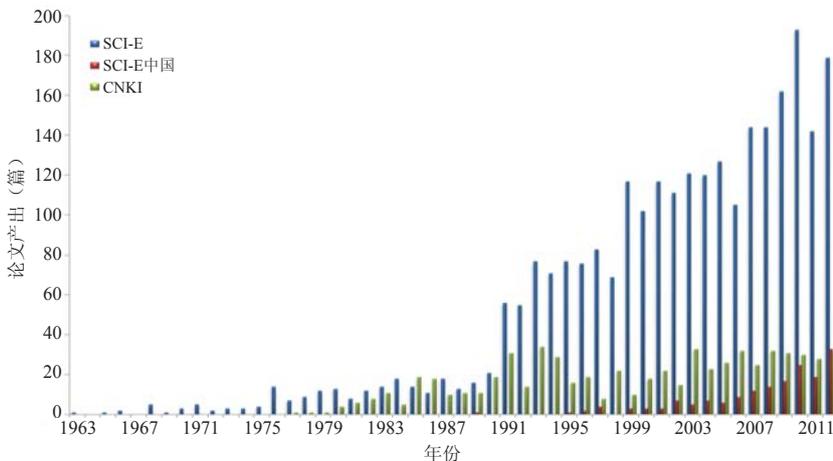


图1 1963—2012年CNKI和SCI-E数据库收录“罗斯贝波”主题文献产出量的年代分布

表1 “罗斯贝波”主题文献产出量较多的国家/地区及其影响力(SCI-E)

国家/地区	产出(篇)	他引总次数	h指数
美国	1457	33596	88
日本	329	4751	39
英国	248	6501	43
中国	193	1116	20
法国	183	2538	28
德国	150	2147	24
加拿大	108	1642	24
澳大利亚	101	2143	24

的机构里中国科学院大气物理研究所一枝独秀,以很大的优势位列第1;南京信息工程大学也以较大的优势排在第2,中国气象科学研究院排名第3。整体看来,大气动力研究的主力军主要集中在高校及科研院所里。

### 3. 高产作者与热门文献

国内外在“罗斯贝波”研究主题发表文献较多的作者见表3。被SCI-E收录最多的作者是Montgomery,值得一提的是,华裔科学家Wang Bin以一篇之差位居第2,并且在以“Rossby wave”为主题词检索的热门文献中,Wang B的*Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?*

一文被引次数排在第1(详见本期P3榜单)。另一位华裔科学家Xie SP也同时出现在高产作者与热门文献的榜单上。可见,虽然中国在此领域的研究在国际上影响力不大,但是华裔科学家在动力研究方面却有比较突出的成绩。文章被CNKI收录最多的作者是北京大学的刘式适教授,共31篇。

SCI-E和CNKI数据库中刊载“罗斯贝波”主题文献较多的期刊详见表4。同为美国气象学会期刊的*Journal of the Atmospheric Sciences*和*Journal of Physical Oceanography*分列一二位。国内期刊《气象学报》和《大气科学》刊载该主题文献较多。

### 三、结论

从检索数据不难看出,关于“罗斯贝波”主题的研究文献数量不多,在一定程度上反映出大气动力学等基础理论的研究队伍相对较少,难出成果。目前,“罗斯贝波”研究已延伸到大气、海洋以外的地学、物理学分支学科中,对于大气、海洋中的罗斯贝波,其研究主战场主要集中在高校及科研院所,其中,华裔科学家的成果在此领域有较大影响力。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

表2 国内外“罗斯贝波”主题文献产出量较多的机构

SCI-E			SCI-E中国			CNKI	
机构	产出(篇)	比例	机构	产出(篇)	比例	机构	产出(篇)
NOAA	141	5.074	中国科学院	96	49.741	中国科学院大气物理研究所	136
夏威夷大学马诺阿分校	129	4.642	中国海洋大学	25	12.953	南京信息工程大学	77
东京大学	104	3.742	中国气象科学研究院	20	10.363	中国气象科学研究院	52
NCAR	102	3.670	南京信息工程大学	20	10.363	北京大学	51
中国科学院	96	3.454	中国气象局	13	6.736	南京大学	51
佛罗里达州立大学	81	2.915	香港城市大学	12	6.218	解放军理工大学	43
美国海军	81	2.915	解放军理工大学	9	4.663	中国海洋大学	30
雷丁大学	76	2.735	国家海洋局	9	4.663	成都信息工程大学	24
华盛顿大学	74	2.663	南京大学	8	4.145		

表3 国内外“罗斯贝波”主题文献高产作者

SCI-E				CNKI		
作者	机构	产出(篇)	h指数	作者	机构	产出(篇)
Montgomery MT	科罗拉多州立大学	43	24	刘式适	北京大学	31
Wang B	夏威夷大学马诺阿分校	42	25	张铭	解放军理工大学	16
Nakamura H	东京大学	31	16	张立凤	解放军理工大学	13
Hoskins BJ	雷丁大学	29	19	刘式达	北京大学	13
White WB	加利福尼亚大学圣地亚哥分校	26	16	沈新勇	南京信息工程大学	13
Yamagata T	东京大学	22	10	巢纪平	中国国家海洋环境预报研究中心	13
Mccreary JP	诺瓦东南大学	21	13	张庆云	中国科学院大气物理研究所	12
Reznik GM	PP Shirshov 海洋研究所	21	7	李崇银	解放军理工大学	12
Xie SP	夏威夷大学马诺阿分校	20	14	罗德海	中国科学院大气物理研究所	11

表4 SCI-E和CNKI数据库中刊载“罗斯贝波”主题文献较多的期刊

SCI-E来源出版物	产出(篇)	CNKI来源出版物	产出(篇)
<i>Journal of the Atmospheric Sciences</i>	520	气象学报	105
<i>Journal of Physical Oceanography</i>	385	大气科学	83
<i>Journal of Climate</i>	290	<i>Advances in Atmospheric Sciences</i>	64
<i>Journal of Geophysical Research: Oceans</i>	244	热带气象学报	38
<i>Journal of Geophysical Research: Atmospheres</i>	146	气象科学	26
<i>Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society</i>	127	大气科学学报	26
<i>Monthly Weather Review</i>	125	高原气象	22

## 文摘 (中文文献)

### 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策——《科学通报》2013年第58卷第21期

过去20多年来, 国际科学界对全球变化研究不断深化, 逐步形成了人类活动产生的碳排放是全球变暖的重要驱动力、全球变化影响人类经济社会可持续发展等共识。为应对全球变化挑战, “共同但有区别的责任”等原则要求发达国家实行强制减排和发展中国家采取自主减缓行动, 目标是在21世纪末将由人类活动引起的地表增温控制到不超过工业化前 $2^{\circ}\text{C}$ 。但是, 处理全球变化与可持续发展的关系必须坚持哪些原则, 重点开展何种研究, 采取什么政策保障还没有明晰的思路。徐冠华等提出, 立足国际和区域平衡发展, 依靠科技进步制定全球变化应对对策; 必须在人与自然和谐, 同时人类社会自身和谐前提下妥善处理应对全球变化与可持续发展之间的关系; 坚持减排与增汇并举, 减缓与适应并重等原则; 加强科学研究, 减少全球变化认识的不确定性。应对全球变化挑战实质上为人类发展创造了新机遇, 为促进人类能源结构转变、改善和恢复地球生态环境、促进人类生产和生活方式改变、国际与区域间人类社会和谐发展提供了条件。

### 非线性误差的信息熵理论及其在可预报性中的应用——《中国科学: 地球科学》2013年第43卷第9期

由于初始误差的不确定性, 非线性系统预报误差也是不确定的, 信息熵可以度量这些不确定性。黎爱兵等将动力学的非线性误差增长理论和统计学的信息理论有效结合, 提出了基于非线性误差的信息熵概念。非线性误差的信息熵可分为时间信息熵和空间信息熵, 其不

仅可用来估计系统整体和各分量的可预报性, 还可分析系统各分量之间的联系和各分量对整个系统可预报性的影响。以Lorenz系统为例, 还研究了非线性误差的信息熵在可预报性中的应用, 给出了系统整体可预报性的空间分布。结果表明: 无论空间信息熵分析, 还是时间信息熵分析, Lorenz系统在两吸引子周围和运动空间边缘运动时, 系统对初值的敏感性较小, 可预报性较高且可预报期限较长。通过对Lorenz系统可预报性的实例分析, 验证了非线性误差的信息熵理论在可预报性研究中的可行性和有效性, 尤其在估计系统整体可预报性方面, 为下一步研究大气不同气象要素的联合可预报性奠定了理论基础。

### 全球和中国区域近50年气候变化检测归因研究进展——《气候变化研究进展》2013年第9卷第4期

孙颖等回顾了近年来国内外对全球和中国区域气候变化的检测归因研究, 主要集中在对20世纪中期以来温度、降水和主要极端事件变化的检测归因研究进展, 没有涉及更长时间尺度历史气候变化的检测归因。分析表明, 国际上近年来在气候变化检测归因研究领域发展迅速, 从全球尺度气温变化的检测归因发展到区域尺度和多变量的检测归因。但在中国, 虽然也有一些研究探讨了中国东部南涝北旱等发生的原因, 但在以数理统计推断方法为基础的气候变化事实归因领域的研究仍然亟待加强。一些重要的问题, 如中国不同区域的变暖、不同区域的变干或变湿的归因分析, 以及这些因子和引起全球气候变化因子的异同等, 都是迫切需要回答的科学问题。

### 北京夏季晴天边界层特征及城市下垫面对海风影响的数值模拟——《地球物理学报》2013年第56卷第8期

张亦洲等对耦合了Noah陆面模式和单层城市冠层模式的WRF (Weather Research and Forecasting)

模式系统进行了改进和优化, 通过对2010年8月6—7日北京地区晴天个例的模拟试验, 检验了优化前后模式系统的模拟能力, 分析研究了该个例中城市边界层的特征及日变化。另外, 使用优化后的模拟系统通过两组敏感性试验研究了京津城市下垫面对海风的影响。结果表明, 优化方案能够显著提高模式系统对该个例的模拟性能, 模式系统基本能够模拟出北京夏季边界层的日变化特征, 精确的地表使用类型分类等地理信息数据对提高模式预报的准确度有着至关重要的作用, 京津城市对海风的发展和推进过程有明显影响, 能够阻碍海风的推进、加强风场的水平辐合和垂直上升气流, 北京城市下垫面还能在海风到达前增加其强度和推进速度, 并在海风经过后延缓其消亡、增加其推进距离。

### 东亚—太平洋型季节内演变和维持机理——《气象学报》2013年第71卷第3期

吴捷等利用850hPa的纬向风异常建立一个逐候东亚-太平洋 (East Asian Pacific, EAP) 型指数, 研究其季节内演变特征, 发现东亚—太平洋型经向波列是东亚夏季风季节内变化的主要模态。其演变过程为: 扰动首先出现在北太平洋中部, 并通过正压不稳定过程从基本气流中获得能量而发展, 在高层罗斯贝波能量向南频散, 激发热带对流异常和赤道罗斯贝波, 并相互锁相, 因赤道罗斯贝波受 $\beta$ 效应影响而共同向西移动。热带对流和环流异常在菲律宾附近达到最强, 此时在东亚沿岸出现经向三极型波列, 此后中低纬度异常继续向西北方向移动, 使降水异常在长江流域能维持较长时间。东亚-太平洋型在东亚发展和维持有以下原因: 首先, 菲律宾暖水上空的对流和低层环流之间存在正反馈; 其次, 由于海陆热力差异导致暖大陆和冷海洋之间存在特殊的纬向温度梯度和北风垂直切变, 东亚-太平洋型在经向上有向北

倾斜的斜压结构,能通过斜压能量转换从平均有效位能中获得能量,同时,也能从经向温度梯度的平均有效位能中获得能量。

### 基于贝叶斯原理降水订正的水文概率预报试验——《应用气象学报》2013年第24卷第4期

气象与水文关系密切。近30年来,随着气象学与水文学的快速发展,水文气象学作为气象学分支以及水文学重要组成部分也得到迅猛发展。梁莉等利用淮河流域加密站点2008年6月1日—8月31日逐日降水资料、对应的T213模式的24,48以及72h集合预报,采用贝叶斯模型平均(Bayesian Model Averaging, BMA)方法对集合预报15个成员的降水预报进行了概率集成与偏差订正,采用排序概率评分(CRPS)、平均绝对误差(MAE)对BMA的订正结果进行检验,并将订正后的降水预报输入VIC(Variable Infiltration Capacity)水文模型中进行水文概率预报。结果表明:经BMA订正后的24,48,72h降水预报精度较订正前有所提高;BMA模型给出的有效区间(第25至第75百分位数)预报将实况降水量包含在内的可能性比订正前更大;由水文概率预报检验指标分析可知,经BMA订正的降水集合预报,由VIC水文模型模拟得到的径流量变化趋势与实况较吻合。

### 基于自组织神经网络算法的华北区域夏季天气气候学特征——《气象》2013年第39卷第7期

对华北区域的天气气候学研究,有助于理解该区域大气环流场与地面要素场之间的相互联系。代刊等利用自组织神经网络算法(SOMs),基于1958—2002年夏季ERA 40日平均海平面气压距平场(MSLPA),对华北区域的海平面气压场进行分型,研究其天气气候特征。36种典型地面环流形势被识别出来,包括强北高南低、强西高东低槽、强西北低东南高和强东部高压西伸4种极端类型,以及它们

之间的过渡型。天气型的空间特征分析表明二维自组织图上天气型的对称性体现了华北区域天气气候的一般性特征,而非对称性则体现其独特性。天气型演变特征分析表明高、低压系统越强,或以高压系统活动为主时,华北地区的天气形势相对稳定,反之则转变较快。年际变化分析指示出其中6种天气型出现较明显的年际线性变化趋势。最后,分析天气型相应的降水分布特征,表明区域内不同地区的降水来自不同天气型的影响,地面环流场的细小差别将会造成地面强降水中心位置的较大不同,且地形的影响将进一步放大该差别。上述分析结果采用更完整和更高时间分辨率的资料,量化地研究华北区域夏季的天气分型特征,拓展其天气气候学研究成果可用于发展客观化的数值模式典型天气过程识别技术,以及作为区域气候情景分析的基础。

### 一种新的El Niño海气耦合指数——《大气科学》2013年第37卷第4期

陈圣劼等利用1980—2010年月平均Hadley中心海表温度、美国全球海洋资料同化系统(GODAS)海洋温度和NCEP/NCAR大气环流再分析资料,通过对2个海洋要素(海表温度SST、上层热含量HC)和5个大气要素(海平面气压SLP、850hPa风场、200hPa速度势和对外长波辐射OLR)的多变量经验正交函数展开(multivariate EOF,简称MV-EOF)探讨了热带太平洋的主要海气耦合特征。结果表明,MV-EOF分析的前两个耦合模态分别很好地对应了传统型El Niño和El Niño Modoki的海气耦合特征:传统型El Niño期间,伴随着赤道中东太平洋SST的异常增温,HC、SLP、200hPa速度势等要素总体呈东西反相的“跷跷板”变化,低层850hPa赤道中太平洋出现较强西风距平,西北太平洋上空为反气旋性异常环流;El Niño Modoki期间,SST持续增温和HC正异常中心均显著西移至中太平洋,低层SLP

和高空200hPa速度势均呈现纬向三极型异常分布,低层异常强西风向西移至暖池东部,西北太平洋上空呈现气旋性异常环流。两类El Niño的海气耦合特征存在显著差异,较优的El Niño指数应不仅可以客观描述和区分El Niño现象本身,更要紧密联系两类事件所产生的大气响应。以往定量表征El Niño年际变化的指标大多立足于SST或SLP,作者选取HC作为研究指标,定义了一组新的El Niño指数HCEI和HCEMI。较以往基于SST的El Niño指数,HCEI和HCEMI不仅能更清楚地表征和区分两类El Niño(如1993年的传统型El Niño和2006年的El Niño Modoki),而且能更好地反映和区分两类El Niño与大气间的海气耦合特征,为El Niño的监测和短期气候预测工作提供了一个新工具。

### 空间天气驱动源——太阳风暴——《中国科学:地球科学》2013年第43卷第6期

太阳风暴作为一个约定俗成的术语,近年为学术界和公众所普遍接受。它形象地描述了以强太阳耀斑和日冕物质抛射为代表的太阳爆发事件扫过行星际空间。在行星际传播、发展和影响空间环境的物理过程。太阳风暴所驱动的空间灾害性天气,影响人类技术系统的安全和运行的可靠性,是在高技术时代人类面临的自然灾害之一。汪景琇等概述太阳风暴的观测特征和相关基础研究中的主要科学问题,着重评述近年国内外太阳风暴观测研究的主要进展,评介中国学者的学术贡献及面临的机遇和挑战。在国际空间观测竞相发展、不断取得突破性发现的今天,发展我国独立自主的太阳物理学和空间物理学空间探测,是推动我国空间科学基础研究发展的关键;而聚焦太阳风暴发生、发展和空间天气形成的机理研究,形成空间灾害性天气预报的理论框架,则成为提高我国空间灾害性天气预报和预警能力的根本。

## 文摘 (英文文献)

**官方确认：“旅行者1号”已经离开太阳系**——It's official—Voyager has left the solar system. *Science*, 2013, Vol. 341, No. 6151.

NASA证实，经过36年的疾速，“旅行者1号”已经进入星际空间，尽管它的传感器出了故障，它的能量所剩无几。最新数据显示，“旅行者1号”穿越了太阳风层最外层，这表明它已经离开太阳系，它与地球的距离已经是海王星轨道距地球距离的六倍。至于准确的离开日期，“旅行者”项目组的科学家一致认为是2012年8月25日，那一天，“旅行者1号”的一个仪器记录到产生自太阳风层内的宇宙射线的暴跌，另一个仪器记录到太阳风层之外、银河系产生的宇宙射线的同步增长。不过，并不是所有科学家都认同这个结论，美国西南研究院的空间物理学家David McComas认为，除非磁场方向改变，否则不能说明“旅行者1号”已经离开太阳系。Michigan大学的几位研究人员也不认为“旅行者1号”已经离开。2020年开始，“旅行者1号”的仪器必须通过打开和关闭来分享电源，而到2025年，所有仪器都会被关闭。无论如何，可能仍然有足够的时间等待磁场方向的改变，或者不变。

**白天和夜晚升温对北半球植被的不对称影响**——Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *Nature*, 2013, Vol. 501, No. 7465.

温度数据显示过去50年间夜晚的全球地表升温速度要比白天更快。预计这种升温不对称现象会影响植物的碳同化和消耗，因为大多数植物的光合作用发生在白天，对日最高温度 ( $T_{max}$ ) 更为敏感，

而植物的呼吸作用白天和夜晚都会发生，这样，日最高和最低温度 ( $T_{min}$ ) 都会影响植物的呼吸。大多数有关陆地生态系统对气候变暖响应的研究忽视了这种不对称强迫对植被生长和 $CO_2$ 通量造成的影响。为了寻找这种影响，北京大学的彭书时等分析了卫星反演的北半球归一化植被指数 (NDVI) 与 $T_{max}$ 、 $T_{min}$ 的年际关系。去除了 $T_{max}$ 与 $T_{min}$ 的相关之后，研究发现，在北方地区许多湿润凉爽的生态系统， $T_{max}$ 与NDVI的偏相关为正， $T_{min}$ 与NDVI的偏相关为负；在干燥的温带地区， $T_{max}$ 与NDVI的偏相关为负， $T_{min}$ 与NDVI的关系更为复杂。从全球大气反演模型获得的陆地植被净 $CO_2$ 交换具有与上述类似的格局。另外，根据阿拉斯加Point Barrow站的大气 $CO_2$ 浓度长期观测记录，发现伴随着5—9月 $51^\circ N$ 以北的陆地 $T_{max}$ 约 $1^\circ C$ 的升温， $CO_2$ 的峰与峰振幅 (peak-to-peak amplitude) 增加了 $23 \pm 11\%$ ，而伴随着 $T_{min}$ 的 $1^\circ C$ 的升温，该振幅下降了 $28 \pm 14\%$ 。目前许多全球碳循环模型并未考虑到这种不对称昼夜变暖过程，研究认为，如果夜晚升温继续保持比白天快的趋势，那么使用日平均温度的模型可能会对到本世纪末北方植被生产力的增加状况有所高估。

**利用陆面再分析数据检测多源卫星土壤湿度产品**——Monitoring multi-decadal satellite earth observation of soil moisture products through land surface reanalyses. *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 138.

土壤水分是水、能量和碳循环的主要驱动因子之一，也是数值天气预报的一个关键变量。鉴于土壤水分实地观测的有限性，以往研究多利用陆面模式、遥感反演或二者结合来提取土壤水分数据，评价这些数据的质量变得尤为重要。欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的Albergel等利用ERA-Interim 陆面组分 (ERA-Land) 的土壤湿度数据评

价了一种新的多源卫星土壤湿度产品 (SM-MW) 的质量。ERA-Land 土壤湿度数据来自于由高质量大气强迫数据驱动的陆面模式的模拟结果，能够很好地捕捉土壤湿度的时空动态特征。ERA-Land的大尺度特征、固定配置、全球可利用性、准确反映土壤水分变异的能力，使其成为利用地面观测校正土壤湿度遥感产品的有益补充。以1980—2010年间的每3年为一个分析时段，统计全球尺度上SM-MW与ERA-Land土壤湿度具有显著相关的像元，研究发现二者的平均相关系数 (95%置信区间) 在1986—2010年间从 $0.52 \pm 0.10$ 稳步增加至 $0.66 \pm 0.04$ 。研究还发现，只使用了被动微波遥感 (SSM/I, Ku波段: 19.3GHz) 的SM-MW产品 (1987年9月—1991年6月)，与ERA-Land具有较低的相关，这反映出多传感器融合反演的重要性。总体上，同ERA-Land相比，随时间推移，SM-MW表现的相对稳定；在半干旱区域二者具有较好的一致性，而在热带、高纬度、高海拔区域二者的相关性较低。

**使用首先去除海洋强迫的模型验证统计技术分析北美植被对大气的局地 and 远距离影响**——Observed local and remote influences of vegetation on the atmosphere across North America using a model-validated statistical technique that first excludes oceanic forcings. *Journal of Climate*, 2013, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00080.1, in press.

植被和大气的交互主要受到了大气强迫的控制，难以提取来自植被的强迫。而且，大气不仅仅受到了植被的影响，它还受到了海洋的影响，因此必须首先去除海洋影响，才能准确得到植被对大气的影 响。威斯康星大学—麦迪逊分校的Wang等在首先去除海洋的影响之后，量化了北美植被对大气的局地和 非局地影响，并指出了植被对大气具有显著影响的两个气候和生态 区：北美季风区 (North American

monsoon region, NAMR) 和北美北方森林 (North American boreal forest, NABF)。研究使用了一种多元统计方法——广义平衡反馈分析方法 (GEFA) (该方法细节可参考《气象科技进展》2012年第1期P20页) 来提取植被对大气的影 响, 并基于充分耦合的气候模式 CCSM3.5 以及一个动态试验验证了 GEFA 方法在 NAMR 的效果。在 NAMR, 观测到的植被对大气影响在夏季 (JJA) 达到顶峰, 这种影响主要由粗糙度和水文反馈引起。植被高度增加使蒸散和地表粗糙度增大, 这导致了局地海平面气压的下降, 导致了大气遥相关响应。这种大气响应导致美国中西部更湿和更冷的大气条件, 而墨西哥海湾各州更干、更暖。在 NABF, 观测到的植被对大气影响在春季 (MAM) 达到顶峰, 这与热力反馈有关。植被绿度增强使局地气温增加。大气往往会形成一个正的 PNA 型环流, 这种大气环流异常及相应的水分平流导致美国西部更为湿润, 东部更为干燥。

### 卫星遥感在气候变化研究中的角色

——The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Climate Change*, 2013, Vol. 3, No. 10.

清华大学地球系统科学研究中心的 Yang 等发表了卫星遥感在气候变化研究中所扮演角色的综述文章, 指出通过量化大气、陆地和海洋的过程和时空状态, 卫星遥感技术为认识气候系统及其变化提供了重要支持。综述强调了一些没有被气候模式和常规观测检测到的有关气候系统的重要发现, 例如, 海平面上升的空间格局和平流层气溶胶增加所带来的冷却效应。尽管卫星观测具有无可比拟的全球与精细尺度的空间覆盖, 然而, 时间跨度较短的卫星观测序列和观测的不确定性依然为准确捕捉许多气候变量的长期趋势构成了挑战, 在未来气候变化研究中需要更好地利用遥感技术。

中国 CO<sub>2</sub> 排放的多年变化: 源自对流层 NO<sub>2</sub> 柱卫星观测数据的间接估计——Multiannual changes of CO<sub>2</sub> emissions in China: indirect estimates derived from satellite measurements of tropospheric NO<sub>2</sub> columns. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, Vol. 13, No. 18.

俄罗斯科学院应用物理研究所的 Berezin 等使用对流层 NO<sub>2</sub> 柱的卫星观测数据评价了 1996—2008 年间中国的 CO<sub>2</sub> 排放变化。利用一个基于 CHIMERE 中尺度化学传输模式模拟的简单反演模型和来自于全球大气研究排放数据库 (EDGAR) 全球人为排放清单和亚洲区域排放清单 (REAS) 的 CO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> 排放比率数据, 即可从卫星观测的 NO<sub>2</sub> 柱数据提取出间接的自上而下的 CO<sub>2</sub> 年排放数据。研究分别评估了 1996—2001 年、2001—2008 年两个时段 CO<sub>2</sub> 年排放标准化时间序列的指数趋势, 结果显示, 这两个时段 CO<sub>2</sub> 排放皆显示出强烈的正趋势, 并且第二个时段的趋势明显大于第一个时段。然后, 比较了本研究得到的自上而下的 CO<sub>2</sub> 排放变化与相应的由 EDGAR 和全球碳计划 (GCP) 全球排放清单提供的自下而上的 CO<sub>2</sub> 排放变化, 发现尽管二者皆显示出所研究时段内 CO<sub>2</sub> 排放增长的加速, 但全球排放清单可能强烈高估了 CO<sub>2</sub> 排放变化的非线性特征。自上而下与自下而上 CO<sub>2</sub> 排放趋势的显著差异出现在 1996—2001 年 (全球排放清单显示该时段的 CO<sub>2</sub> 排放趋势不是正的, 而本研究的估计却具有显著的正趋势), 这说明全球排放清单输入信息中的有关中国的能源生产和其他活动数据可能具有大的不确定性, 这也与早期的研究发现相一致。而对于 2001—2008 年, 不同数据间的数据的差异可能处在本研究所使用方法的系统不确定性的范围之内。需要特别指出的是, 大气 NO<sub>2</sub> 观测并不能证实排放清单数据在 2000—2002 年间出现的突然转折。无论如何, 卫星观测 NO<sub>2</sub> 数据是估计与氮氧化物相搭配的 CO<sub>2</sub> 排放的潜在工具。

热带山区植被动态对近来气候变化的一致响应——Consistent response of vegetation dynamics to recent climate change in tropical mountain regions. *Global Change Biology*, 2013, doi: 10.1111/gcb.12362, in press.

全球气候变化已经成为生态系统变化的主要驱动力。印度 Suri Sehgal 生物多样性和保护中心的 Krishnaswamy 等发现泛热带 (30°N—30°S) 山地生态系统植被对近来气候变化的响存在全球一致性。研究使用了 1982—2006 年间的 NDVI 和气候数据, 分析了 5 个生物多样性热点地区的 47 个山地保护区植被绿度的年代际趋势和季节循环特征。5 个热点地区 NDVI 年最大值时间序列皆显示出轻微的增长趋势 (尽管伴随着 1990s 中期的显著减弱)。在同一时期, 温度显示出增加趋势, 但降水仅存在一些极端变化。NDVI 年循环随时间而增加的幅度与温度增幅密切相关。进一步采用了使用时间依赖性回归参数的动态模型分析了 NDVI 与气候关系的时间演化特征, 发现植被绿度和温度之间的关系随着时间的推移出现了减弱或变负。以往研究也发现其他区域存在这种正的温度敏感性的消失, 这可能与温度引起的水分胁迫有关。研究还使用动态模型提取了去除温度和降水影响之后的植被绿度变化趋势, 发现所有地区皆存在残留的褐化 (植被绿度减少) 和绿化 (植被绿度增加) 趋势, 这表明温度和降水以外的因素也影响植被动态。分位数回归模型显示, 随着海拔增加, 植被褐化速率逐渐减弱。热带山地植被对气候变化非常敏感, 这些广泛的跨区域的一致响应表明了气候变暖和相应的水分胁迫具有全球尺度的影响。

# 丑纪范先生关于资料同化的学术思想探讨和回忆

——写在丑先生80华诞之际

■ 郜吉东

2013年7月23日，是丑纪范先生80寿辰。最近我刚刚完成兰州大学为此出版的文集中两篇文章的校稿任务。百感交集，觉得非得写点什么，才能表达导师多少年来对我辛勤培育的感激。在丑先生的众多学生中，我是跟随先生时间最长（6年）、受益最大的学生之一。由于我的不善言谈、不善交际，总是觉得怎么说也难以表达清楚多年来先生对我的辛勤栽培，先生多年来对学生付出的劳动和汗水也确实是无法用语言能形容的。我只是先生众多学生中的一员，其他同门可能会有比我更多、更深刻的体会。在这里我想就先生多年来对数值预报资料同化方面的学术思想，结合我自己在这些方面的研究体会做些简要的回顾。同时把我藏在内心深处多年来对先生的感激之情写出来。

从我1988年进入兰州大学成为丑先生的研究生到现在25年，我的研究领域一直在数值天气预报的资料同化方面，所以我想主要讨论一下在这个研究领域我对丑先生学术思想的粗浅认识。当然丑先生的主要研究方向是气候动力学，在这方面的贡献有待其他学生去研究和揭示。

## 一、学术思想的核心和学生配养

在先生的学术思想中，最为重要的是数值预报中多时刻资料的使用问题。1956年，丑先生以优异的成绩从北京大学物理系气象专业毕业，被分配到当时的中央气象局从事数值天气预报的研究工作。当时，数值天气预报在国际上还处于起步阶段，在中国更是一个超前的课题。他加入了一个由著名的老一辈气象学家顾震潮先生领导的数值预报研究团队。顾先生认为，数值天气预报有一个根本性的缺陷，就是只用一个初值，大量的历史资料没有被运用，实际上作为初值问题的数值预报与提为地面天气演变问题的外推预报是等价的。他鼓励丑先生下大工夫研究并思考如何克服此缺陷。丑先生以其坚实的数理基础对这个问题进行了创造性的研究，于1962年写成《天气数值预报中使用过去资料的问题》一文，将泛函分析引入数值预报问题中，从微分方程只是近似描述了大气实际过程的观点出发，通过把微分方程定解问题变为等价的泛函极值问题——变分问题的途径，推广了微分方程解的概念，引进新型的“广义解”，并利用希尔伯特空间的理论，论证了“广义解”比原来意义

### 【编者语】

2013年正值丑纪范院士80华诞，作者作为丑先生的学生特别撰写此文来回顾先生关于数值预报中资料同化的学术思想，以表对先生的感激之情。丑先生作为本刊名誉主编，为本刊的发展提供了很多宝贵意见，编辑部也借此机会向丑先生献上最真挚的祝福。

下的“正规解”更接近所描述的物理现象的“实况”。这实际上是二十多年后兴起的四维变分同化的理论基础。在这里需要指出国外关于把泛函分析引入数值预报问题中的系统性研究发表在1987年的英国皇家气象杂志上。

我认为在《天气数值预报中使用过去资料的问题》一文中，更为重要的是将数值预报方程中未曾观测到的物理量，通过使用蕴含着这种量的历史资料来加以考虑。给出了实际可行的使用多时刻资料的短期数值预报模式。这一提法当时在国际上也是领先的。和这一思想类似的研究直到1969年才由美国的著名气象学家，也是数值天气预报的创始人之一的Charney等提出。而丑先生和他的老师顾震潮先生以及他们的研究团队早在20世纪50年代末60年代初就已对此做了系统的研究，写出了论文并开始做数值试验。比美国相似研究的提出要早近10年。应该指出，丑先生《天气数值预报中使用过去资料的问题》一文是在1962年完成的，他当时把论文寄给顾先生，想在《气象学报》上发表。顾先生在回信中写道“……在数值天气预报中，你把历史资料考虑进去，好得很”。顾先生还向当时的中央气象局建议，把此论文列为保密材料，等到他的研究团队在实际数值天气预报应用中做出一定成果后再发表。但后来由于计算机条件的限制和十年动乱的影响等，这篇具有开创性的研究论



图1 1960年北京气象科学讨论会（左一为丑纪范先生，左二为纪立人先生，右二为陶诗言先生）



图2 丑先生与联合国世界气象组织现任秘书长(2004至今)雅罗先生(Michel Jarraud)的合影  
雅罗先生曾自称丑先生是他心目中的导师。1974年,他在图书馆偶然看到《中国科学》杂志第6期上丑先生的《天气数值预报中使用过去资料的问题》一文,立即对气象学产生浓厚兴趣。这篇文章引领他进入数值预报研究,从此改变了他的一生。雅罗在他的毕业论文前言中写道:“在此,我谨向中国学者丑纪范致以敬意,他的理论为我们的研究奠定了理论基础。”

文直到1974年才在《中国科学》第6期上发表。

丑先生的另一个非常重要的学术思想是动力模式和统计方法相结合的概念。这一观点是多时刻历史资料使用问题的延伸。他在《为什么要动力—统计相结合?——兼论如何结合》一文中指出,对于同一天气预报问题,一般存在着动力和统计两种基本预报方法,二者各有其优点和缺陷。动力方法基于物理定律的初值(边值)问题,认为未来状态是现在状态和制约其变化的物理规律所确定的必然结果,但没有利用或没有充分利用已有的实况历史资料。统计方法则利用了实况资料,承认未来状态有不确定性,期望依据现在状态和近期演变对未来做出概率推断,但没有利用或没有充分利用已掌握的物理知识。承认了各自的优缺点后就应该探索新的方法,将两者结合起来。为能既充分利用已有的物理规律,又能合理使用时间演变的历史资料所包含的信息,就需要把数值预报提为模式方程的反问题。具体就是,假如数值预报模式方程中有些系数是未知的,或有些变量的初值是没有观测的,那么反问题就是利用数值模式、定解条件(已知的部分)和其他所有已知的条件,来确定未知量,求解反问题。等得到了反问题的数值解以后,再解正问题(积分数值模式)做出预报。当时这个观点主要是围绕长期数值预报提出的。多年来丑先生指导学生在这个方面做过很多研究。反问题的研究只是动力模式和统计方法相结合的一个方面,但后来资料同化的发展证明这一提法具有开创性的意义。在第二节我还将进一步论述。

1986年,丑先生和郭秉荣先生、杜行远先生一起发表了他们的合著《大气科学中数学方法的应用》一书,

系统介绍了大学中所用到的一些数学方法。这本著作的特点之一是非常系统地介绍了共轭方程(或伴随算子)理论。为此,几个老先生在20世纪70年代末、80年代初付出了很多辛勤的劳动,翻阅了大量俄文数学和气象科学杂志,并结合他们自己的研究写成此书。此书中详细阐述了如何推导数值模式的共轭方程,以及该理论在数值预报中的应用。客观地讲,这个理论本身是前苏联学者于1974年首先提出来的。后来丑先生和他的学生们关于反问题的研究,以及再后来学术界关于四维变分方法的发展都与共轭方程的理论和应用很有关系。我认为《大气科学中数学方法的应用》这本书的出版对中国关于资料同化研究的开展和对气象科学研究生的培养也做出了较大的贡献。因为它帮助读者从物理意义上理解了什么是共轭方程(或用它的另一个名字,伴随算子)。

实际上,回顾近30年来资料同化方面研究领域的一些进展,和丑先生早期学术思想的理论框架是完全吻合的。我认为先生对数值天气预报的最主要贡献可用一句话来概括,那就是:在国际上较早认识到资料同化是解决数值预报的一个关键所在,并提出了解决这一问题的理论基础。后来欧洲中期数值预报中心(ECMWF)的发展及成就证明他的学术思想和预见是正确的。正如我的同门龚建东在本刊2013年第3期发表的题为《同化技术:数值天气预报突破的关键》一文中所揭示的,ECMWF一直是全球中期数值天气预报技术研发与业务应用的领头羊,究其原因,资料同化技术的突破是其中最为关键的一环。20世纪80年代中后期兴起的以三维和四维变分同化理论为主的技术的日益成熟和丑先生早期提出的理论的预见是不谋而合的。

在变分资料同化方面，丑先生在兰州大学培养的学生中很多都做出了一些重要贡献，例如，在雷达资料同化领域有邱崇践、孙娟珍、龚建东、刘海霞和我本人；在海洋资料同化领域有李志锦和余军；在卫星资料同化领域有张邦林、蒲朝霞和张华。我们一起在国内外重要学术期刊上发表过数百篇学术论文。仅我本人，自师从丑先生后，在资料同化方面（主要是雷达）已经写出和发表了近60篇学术论文，大部分刊登在美国气象学会的期刊上。

## 二、资料同化研究与应用领域的一些回顾和进展

由于我是做雷达资料同化研究的，故先从这方面举几个例子。20世纪90年代，曾师从丑先生的兰州大学邱崇践先生在美国俄克拉荷马大学发展了一套很有创见的、简单有效的雷达资料四维变分同化技术。此技术利用多时刻雷达径向风观测反演强天气系统的二维和三维风场结构。90年代初，邱崇践先生和时任俄克拉荷马大学高级研究员（senior research scientist）的许秦先生合作，发表了多篇很有影响力的研究论文。1982年从兰州大学毕业的孙娟珍于90年代初在美国俄克拉荷马大学发展了一套四维变分同化技术，利用多时刻的雷达径向风和反射率资料，不仅能够反演风场，而且能够反演出温压场的三维结构，完全验证了丑先生关于合理使用多时刻资料来改进数值预报的学术思想。这是因为在中小尺度资料同化中，由于人力物力的限制，使得观测资料的分布一方面在给定时刻空间分布与模式变量有关的资料太少（例如雷达，只有径向风、反射率，没有三维风场、温度场的观测）；而另一方面，由于雷达卫星等先进仪器的使用，使资料的时间密度较大。把这两个问题结合起来考虑，希望把资料所包含的时间演变信息转化



图3 1994年，丑先生60岁生日时与一些学生的合影。有20世纪70年代跟随他的学生游兴恬（后排左四）；80年代的学生李维京（后排左三），谢志辉（前排左二），钱维宏（后排左二），管玉平（前排右一）和作者（后排左一）；其余为90年代的学生谷湘潜（前排左一），张培群（前排右二），李建平（后排右二），张红亮（后排右一）和祝从文（后排右四）。

为要素场的空间分布状态，并反演出没有观测到的要素的空间结构。孙娟珍的工作正好解决了在中小尺度资料同化中这一非常重要的研究课题。此后的二十多年里，她在雷达四维变分同化领域做出了很多开创性的研究成果。

我从20世纪90年代中期来美国后，利用两部或多部多普勒雷达的观测和质量连续性方程作为弱约束，在变分同化的框架下分析强风暴的三维风场结构。由于此种方法避开对质量连续性方程在垂直方向上的积分，使得垂直方向的风能更精确地反演出来并且对边界条件不敏感。考虑到强风暴系统的快速演变特征，近年来在此基础上发展了一套能快速完成计算，实时的暴雨分析系统。此种系统能利用数值模式提供的背景场和多部雷达观测快速反演出强风暴系统的三维风场结构。这套系统被应用于美国NOAA灾害性天气试验基地（Hazardous Weather Testbed）。这几年的应用证明很受预报员的欢迎。在此限于篇幅不再一一列举。所有这些成就的取得是与丑先生多年来的思想熏陶和辛勤教育分不开的！

资料同化中，丑先生的另一个非常重要的学术思想是动力模式和统计方法相结合的概念。在这里有必要做进一步的阐述。直到现在我还清楚地记得他在课堂上和文章中讲述“为什么要动力和统计相结合”。因为只有这样才能最大限度地利用已知的动力模式的信息和观测资料的统计信息，对分析场做出更为合理准确的估计。至于如何结合，几十年来，这一直是个非常重要的研究课题。他和学生们做过很多尝试。虽然他那时强调的主要是长期数值预报或短期气候预报的问题，但是这对于短期数值预报的问题同样具有指导意义。

近10年来，国际上关于资料同化方法研究的进展也正好验证了这一预见。近年来在资料同化方法的研究中出现了名为集合卡尔曼滤波（Ensemble Kalman Filter）的同化方法。这种方法利用20~100个集合预报成员来统计得到同化系统中所用的背景场协方差矩阵。最初把这种方法用于数值预报的资料同化，效果并不理想。这是由于集合预报的数量远远少于模式自由度的数量引起的。近年来在美国气象学会的期刊上发表了很多关于改进集合卡尔曼滤波的研究文章。这些研究由于引用了一些特殊的处理方法来解决集合数量少的问题，使得集合卡尔曼滤波同化方法的应用逐渐普遍化和合理化。尽管很多数值试验证明这种方法优于三维变分同化，但是它仍然存在着一些问题。首先，像四维变分同一样，这种方法过于耗费计时（尽管Gao和Xue 2008年的研究已部分解决了这个问题）。其次，由于这种方法偏重于用统计方法来表征数值模式的动力学特征，过于依赖于模式背景场的协方差矩阵，当数值模式的误差较大时容易发生滤波发散、解不收敛的情况。基于这种情形，近年来出现把三维或四维变分方法和集合卡尔曼滤波同化方法相结

合的方法，名字统称为混合（hybrid）集合变分方法。这种方法能把动力模式的演变信息和统计信息结合起来，真正使资料同化的效果达到最优。这种方法的提出正好从另外一个角度验证了丑先生早年关于动力模式和统计方法相结合的学术构想。但是由于集合卡尔曼滤波同化方法和四维变分同化方法计算代价都很昂贵，在现代计算机的条件下，很难应用于对流尺度的高分辨数值预报中的业务，尤其对于计算机条件落后的国家和地区。即使对于计算机设备较为发达的美国，由于大量非定时雷达、卫星资料的涌现，运用这种混合技术仍然存在着很大的挑战，对于暴雨尺度的资料同化问题更是如此。

由于高分辨率数值模式自由度高并且雷达资料的空间和时间密度都很高，必须应用计算效率较快的三维变分同化系统。很多研究集中在对三维风场的研究上，但如何同化雷达反射率资料仍有很多研究空间。丑先生关于多时刻资料的使用，以及动力统计相结合的学术思想多少年来深深地印在我的脑海中。很多研究者认为对三维变分同化的研究已过时，原因是在传统的三维变分同化中的背景协方差矩阵是从气候资料统计得到的，不能体现背景协方差矩阵随数值模式演变的特征。但是传统的思维方式是可以改变的。我认为只要沿着如何巧妙地把动力模式信息和统计信息相结合的思路，把集合卡尔曼滤波同化方法和四维变分同化方法的先进特点引入到三维变分中来，同时仍然保留三维变分同化计算快速简洁的特点，是能够在暴雨尺度的雷达资料同化中做出一些开创性的研究的。但具体如何去做，当然需要有很多研究课题的支撑。这里仅举一例。四维变分把数值模式当强约束植入目标泛函中。我的一个研究课题是如何把数值模式作为一个弱约束植入到目标泛函。这样不需要模式积分，大大降低计算量。仍然保持一些四维变分同

化的优点。在这方面，我已经取得一些研究进展，在未来几年会陆续发表一些研究论文。

### 三、对学生的言传身教

作为一名气象教育学家，丑先生呕心沥血，培养出了许多优秀的气象人才。在长期的研究工作中，丑先生形成了一种独特的思维方式，他要求学生不仅要有扎实的理论基础，在自己的研究领域特别精通，同时要有简化问题，抓住问题主要机制的能力。作为一名研究人员，对问题要深入浅出。所谓的“深入”就是要对问题钻得透，要有自己独特的见解，避免浮在上面，做浅层次的简单重复。所谓的“浅出”就是对问题的理解要融会贯通，再复杂的问题也要能用通俗的语言讲清楚，哪怕是对外行讲也应该能让他们明白。对这些要求他务求自己首先做到。先生在非线性大气动力学方面很有研究，提出并研究了大气动力学方程组的定性理论，即大气长期演变的渐进性质动力学理论，系统揭示了非线性大气动力学方程组的整体和全局行为，这是从动力学观点研究气候形成和气候变化的基础理论，并著有《大气动力学的新进展》一书。非常抽象复杂的非线性动力学理论经他在课堂上一讲，都会变得生动形象、妙趣横生、通俗易懂。他的学生在课堂上往往变得异常活跃。学生们常常把听他的课变成了一种享受，而不是一种负担。

许多师承丑先生的研究生，都感到经过导师的严格训练后，即使在科研上碰到再大的困难也能一步步克服。丑先生特别注重因材施教，根据每个学生的不同性格、特长等，帮助他们确定不同的研究课题，以使他们充分发挥自身潜力。这里以我自己为例来说明。应该说我1994年从兰州大学获得博士学位后的近二十多年里，在雷达资料同化方面的研究收获不小。如前所述，我取得的研究成果和将来会发表的研究成果是和我做学生时丑先生对我的教导分不开的。

六年的研究生生活确实是我生命中最为宝贵也是最愉快的一章。记得刚刚做丑先生的硕士研究生时我不怎么爱说话，也不常去请教他，还老想躲着他。他的确没有一点架子，反过来关心我，找到我沟通。估计他那时已知道我的性格，不善言谈，但比较用功勤奋，需要多加点拨。他还常对我说，因为我们硕士研究生刚刚起步，还不知道如何做科研，他要对我指导得更具体一些。所以他亲自给我挑选了很多在变分同化中非常经典的文献。例如，两位法国气象学家 Courtier 和 Talagrand 的关于四维变分同化的开创性论文，那时我都读了很多



图4 2013年，丑先生80岁生日时与他的夫人张庆云合影

遍，这为我后来20年的研究工作打下了一个坚实的基础。

当我于1991年刚刚转为他的博士研究生时，他又教导我，现在你已经是博士生了，要能够独挡一面，必须学会自己提出问题，自己解决问题。他那时鼓励我申请科研基金。虽然我那时对此没有多大把握，但居然在他的指导和帮助下，成功拿到了一个国家教委高等学校博士点专项科研基金的项目。这对我鞭策是不言而喻的，使我对科学研究和自己的能力增添了一份信心，为我后来在美国的研究工作的进行、科研项目的申请打下了初步的基础。我不再把申请科研项目看做是高不可攀的事情，总觉得别人能做的事我也一定能做得到，即使道路再曲折，申请失败了，也没什么可怕的，重新再来就是了。

以上所述只是在研究工作方面丑先生对我的培养。更使我铭记终身的是我的师母张庆云老师在生活中对学生无微不至的照顾。也许丑先生的很多学生都想说同样的话，都有很多故事要写。因为我知道，很多家境贫寒的学生都得到过他们在生活上的接济和照顾。但我是跟丑先生时间最长的学生之一，也许是受益最大的学生之一。永远无法忘记师母做的美味佳肴红烧肉、梅菜扣肉的味道。有一段时间我假期没回家，几乎三天两头被邀请到他们家去做客。当时我也觉得不好意思，怕给他们增添太多麻烦，但经不住师母的热情邀请。那时师母在图书馆工作，我也经常在图书馆学习，一到下班她就喊我去她家一起吃饭。那段美好的时光我会永远永远记在心里。现在回忆这些，心里有说不出的滋味。有时觉得自己是否辜负了老师和师母培育之恩，因为在后来很多时候我由于忙于工作和生活中的琐事，经常忘了多给老师和师母写个信、打个电话，说声感谢、道个祝福。虽然我也知道他们会体谅我，正如父母对孩子的感情，那种付出永远都不要回报。我们这些学生，每一个都是丑先生和师母的另一个儿女，大家一起组成了一个和睦的大家庭。在丑先生80华诞之际，我代表全体学生祝先生生日快乐，健康长寿，福如东海，寿比南山！

(作者单位：NOAA国家强风暴实验室)

## 深入阅读

- Charney J, Halem M, Jastrow R. 1969. Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere. *J Atmos Sci*, 26: 1160-1163.
- Gao J, Xue M, Shapiro A, et al. 1999. A variational analysis for the retrieval of three-dimensional mesoscale wind fields from two Doppler radars. *Mon Wea Rev*, 127: 2128-2142.
- Qiu C J, Xu Q. 1992. A simple adjoint method of wind analysis for single-doppler data. *J Atmos Oceanic Technol*, 9: 588-598.
- Sun J, Flicker D W, Lilly D K. 1991. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated Doppler radar data. *J Atmos Sci*, 48: 876-890.
- Talagrand O, Courtier P. 1987. Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. I: Theory. *Quart J Roy Meteor Soc*, 113: 1311-1328.
- 丑纪范. 1974. 天气数值预报中使用过去资料的问题. *中国科学*, 1974, 17(6): 635-644.
- 丑纪范. 1986. 为什么要动力—统计相结合? ——兼论如何结合. *高原气象*, 5(4): 367-372.
- 丑纪范. 1990. 大气动力学的新进展. 兰州: 兰州大学出版社.
- 丑纪范, 郗吉东. 1995. 长期数值天气预报(修订版). 北京: 气象出版社.
- 郗吉东, 丑纪范, 李自锦. 1995. 一中利用气象场时空信息确定其空间分布状态的方法及数值模拟研究. *大气科学*, 19(3): 257-269.
- 龚建东, 李维京, 丑纪范. 1999. 集合预报最优初值形成的四维变分同化方法. *科学通报*, 44(10): 1113-1116.
- 顾震潮. 1958. 作为初值问题的天气形势预报与由地面天气历史演变作预报的等值性. *气象学报*, 29: 93-98.
- 邱崇践, 丑纪范. 1987. 改进数值天气预报的一个新途径. *中国科学:B辑*, 17(8): 903-910.
- 邱崇践, 丑纪范. 1989. 天气预报的相似—动力方法. *大气科学*, 13(1): 22-28.
- 邱崇践, 丑纪范. 1990. 预报模式的参数优化方法. *中国科学:B辑*, 20(2): 218-224.
- 任宏利, 丑纪范. 2005. 统计—动力相结合的相似误差订正法. *气象学报*, 63(6): 988-993.
- 张培群, 丑纪范. 1997. 改进月延伸预报的一种方法. *高原气象*, 16(4): 376-388.

## 《科学通报》“地下水”专栏 2013年9月

本专栏着眼于通过陆地—海洋表面水交换这一水循环中重要因素，即海底地下水排泄（submarine groundwater discharge, SGD）。SGD是陆地物质通过表面径流进入海洋的重要通道，因此也影响着海洋地球化学循环。专辑封面描述了海洋和地下水通过SGD相互作用的机制，后者由陆地水力梯度、海水和内陆地下水密度之间差别以及海洋波浪抽吸、潮汐抽吸和热梯度这样的海洋过程驱动。SGD分布广泛，在一些地区甚至较表面径流具有更大的海洋生态意义。专栏围绕主题，由编者按、2篇评述文章和5篇研究论文组成。



## 《澳政府回应文件》 2013年8月

2011年12月发表的针对澳大利亚气象局能力的评估报告，在时隔一年多后终于获得澳大利亚政府的回应。在这份回应文件中，澳政府确认了改进气象局应对未来极端天气和自然灾害事件能力的措施，特别强调了如果这些灾害事件，例如洪水、林火、风暴和热带气旋同时发生在多地时的应对能力。前份由澳总理提议开展的独立评估活动得到的报告，提出了一系列针对澳气象局和各级政府部门采取的优先行动的建议，针对这样的建议，澳政府在这份反馈文件中确认，成立新的国家极端天气中心，同时依据评估报告中最为优先的行动建议，增加前沿预报，建设新的预报系统和发布设施。在这份回应文件中，对评估报告提出的29条建议，逐条给出了回应意见。

## 《2012年极端事件的气候 注解》 2013年9月

《美国气象学会公报》以特别报告的方式，对2012年全球极端天气事件进行了梳理，特别是从气候变化的角度，对这些事件的成因进行了分析，也从一个侧面，正面回答了2012年美国的干旱和热浪，英国破纪录的降雨，在肯尼亚、索马里、日本和澳大利亚等地出现的罕见大雨，西班牙的干旱，中国遭遇的洪水以及无法忘却的超级飓风桑迪等“这一切是否要归因于气候变化”的问题。报告认为，极端天气半数受气候变化的影响。



## 《观点》 2013年8月

这份1972年创刊的法国新闻周刊，本期结合法国生态部发起的“水30”项目的研究结果，直面未来法国的水资源和水生环境状况。报道描述了生态部的研究，在综合农产品生产、能源价格、生物多样性、人口、就业率和政府治理水平等因素后开展研究得到的令人悲观的结果，对2030年法国水资源状况表示了担忧。研究针对2030年水状况，给出3种可能，其中最糟糕的情况是，如果人类加速破坏环境，则2015年前世界将爆发一系列重大生态灾害。

## 媒体扫描

## MEDIA SCAN

### 《科学》

2013年8月2日

本期包含了名为“变化中的气候的自然系统”专栏。专栏的4篇新闻特写描述了气候的过去和未来，4篇评述文章基于古气候记录，讨论了气候变化的当前和未来的影响，另外3篇评述文章则着眼于气候变化的特殊影响，例如疾病传播、人类粮食安全和海冰减少的生态区域作用等。本期的主编语也围绕这一主题，全面阐述了气候变化影响及其应对等问题。

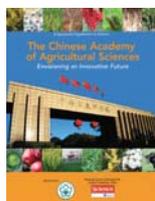


## 《滑坡科学和实践》 2013年

著名的Springer出版社2013年陆续出版了《滑坡科学和实践》系列出版物。目前已经出版的1~7卷分别涉及了滑坡的各个方面：卷1：滑坡清单、敏感性和危险区划；卷2：早期预警、仪器和监测；卷3：空间分析和模拟；卷4：全球环境变化；卷5：复杂环境；卷6：风险评估；卷7：社会和经济影响及政策。该系列专著内容来自国际滑坡协会召开的第二届世界滑坡论坛交流论文。

## 《中国农业科学院专刊》 2013年

美国《科学》杂志出版的这份中国农业科学院专刊，重点关注了中国农业科学院的科研进展、成果转化、各所情况、研究生培养等情况。美国科学促进会CEO在引言中指出，中国的“三农”问题，不仅需要培训将知识转化为实践技巧，而且还要借助专业知识的进步，开发出更加有效的农具，改进农牧业品种，以及更好地监测体系以保护自然资源，减少人类活动对环境的影响。



## 《自然》 2013年8月29日

本期封面故事，报道了英国杜伦大学学者针对以往人们认为对气候变化不是很敏感的东南极冰架开展的研究。研究者通过对东南极沿岸冰架的卫星资料开展测绘分析，发现东南极冰架也在对10年尺度上的气候变化做出反应：20世纪70和80年代冰架后退、20世纪90年代扩张。而从21世纪开始，东南极冰架则既有扩展又有后退。研究者认为，作为世界上最大冰体，东南极冰架对外部力量的反应可能比以前的认识要来得更大。

**Supervisor** China Meteorological Administration (CMA)  
**Sponsor** CMA Training Centre  
**Published by** Editorial Office of Advances in Meteorological  
Science and Technology

**Honorary Editor** Chou Jifan

**Editor-in-Chief** Xu Xiaofeng

### Associate Editors

Xiao Ziniu  
Zhai Panmao  
Luo Yunfeng  
Wang Huijun  
Li Weijing  
Hu Yongyun  
Tan Zhemin  
Fei Jianfang  
Guan Zhaoyong  
Zhou Dingwen  
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 Zihui, Yan Guanhua, Yang Shaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Hua, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, 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, Yang Song, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zou Xiaolei

### Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Hu Ying, Li Jinghua, Chen Zhongmei

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 Mingcheng Printing Co., Ltd.

**ISSN 2095-1973**  
**CN 10-1000/P**  
**RMB 30.00**

## Main Contents

### Message from the Editor-in-Chief

### Article

- 6 Cai Ming et al/ On the Oscillation Mechanism and Restoring Force for Rossby Waves  
12 Hu Yonghong et al/ Validation for Downward Shortwave Radiation of GLASS Product by the Coordinated Enhanced Observation  
19 Sun Jian et al/ A Preliminary Analysis on the Coverage of Weather Warning in China  
24 Song Qiaoyun et al/ The Business Application of Wind Profiler Radar in Beijing Meteorological Bureau  
29 Yang Yanchen et al/ Introduction of WOFOST Crop Growth Simulation Model Mechanism and Its Use  
36 Li Jiao et al/ Discussion on Threshold Determination in Defining Extreme Temperature Indices  
41 Zhu Zhihui et al/ Verification and Application for 500hPa Height Forecasts During the Period of Typhoon MUIFA(1109) Using the Optical Flow Technique  
48 Lin Shu et al/ Introduction and Application Test of the 150 Days' Cycle Method in the Prediction System for Precipitation Processes within a Month  
52 Zheng Dongqi et al/ The Variation Characteristics Analysis and Data Processing on Temperature Data over 100 Years in Fuzhou

### Forum

- 56 Shen Wenhai/ Understanding Meteorological Information Construction  
63 Yang Xichun/ On the Legislation for the Assessment on the Meteorological Disaster Risk in China

### Reading

Information  
72 Selected Papers

### Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking  
Feature  
67 Zheng Qihong et al/ Bibliometric Analyses of Reports from Organizations in IPCC SREX  
70 Zhang Meng et al/ Bibliometric Analyses of the Scientific Literature in the Field of Rossby Wave

### History

People/Event

- 76 Gao Jidong/ The Contributions of Professor Chou Jifan to Atmospheric Data Assimilation and His Style of Nurturing Students : A Special Celebration on His 80th Birthday