

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.2

2017年4月
第7卷 第2期



风灾



雷暴



覆冰



雾霾

电网气象灾害风险评估

气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



04>

9 772095 197170

中国气象局气象干部培训学院 主办

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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

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

常务编委 (按音序排名)

成秀虎	高学浩	龚建东	郭虎	郭学良
李柏	李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉
任小波	沈文海	王存忠	王卫丹	武炳义
杨修群	俞小鼎	张朝林	张庆云	赵平

编委 (按音序排名)

毕宝贵	陈镜明	陈云峰	陈振林	崔春光
崔讲学	董文杰	杜钧	封国林	何金海
何清	胡欣	胡跃文	姜彤	金飞飞
雷小途	李集明	李俊	李良福	李耀辉
李跃清	李忠明	梁旭东	刘晶森	刘黎平
刘立成	刘实	刘征宇	卢乃锰	陆日宇
罗兵	罗亚丽	马舒庆	马耀明	彭莹辉
浦一芬	索燕	索渺清	汤绪	田红
万齐林	王斌	王斌(海外)	王东海	王元
王建林	王武功	王延青	王迎春	王立广
王自发	卫晓莉	温敏	王翁富忠	杨崧
谢志辉	闫冠华	延晓冬	杨萍	杨大林
杨昭明	姚学祥	伊兰	翟武全	赵广忠
张广俊	张立祥	张小玲	张跃堂	朱定真
周定文	周建华	周凌晔	周显信	邹晓蕾
朱小祥	朱玉洁	祝燕德	邹立尧	

编辑部

张萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民
地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081
电话: (010) 68409927/68409933
邮箱: amst@cma.gov.cn
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA
网址: <http://cmalibrary.cn/amst>
投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P
定价: 30元



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

目次

第7卷 第2期 2017年4月

1 许小峰: 主编语

研究论文

封面报道 电网气象灾害风险评估

- 6 庄文兵, 张海斌, 赵宏宇, 吴世新, 万明阳: 电线覆冰预报模型研究综述
- 13 庄文兵, 章涵, 王建, 田浩, 赵建平, 何君, 金莹: 基于中尺度和微尺度的复杂地形大风预报方法研究
- 20 马琳, 邓帮飞, 李红云, 黄文娟, 万明阳: 基于相关分析的电力微气象站选址研究
- 24 王建, 田浩, 庄文兵, 章涵, 任华, 张陵, 金莹: 过去三年新疆大风沙尘分布及电网吐哈线路大风灾害风险分析

研究进展

- 32 李超, 唐千红, 陈宇, 刘鑫, 黄琰, 李志敏: 多源数据融合系统LAPS的研究进展及其在实况数据服务中的应用

专题 专业气象服务

- 39 戴至修, 柳艳香, 王志, 李宛育, 陈仲榆, 李巧媛: 高速公路降雨致灾风险预警技术应用进展
- 46 崔新强, 付佳, 代娟, 刘静, 周小兰: 高铁气象灾害防御体系现状分析与对策研究

主编语

人类在生存与发展中需要规避可能发生的自然灾害,同时需要充分依赖和利用大自然赋予的环境与资源,相依共存,和谐发展。而气象工作在其中则承担着不可或缺的角色,及时提供趋利避害所需的服务产品。世界上很多国家的统计研究都表明,国民经济的诸多领域,都会受到天气和气候的影响。例如,本期封面报告给出的一组研究结果,显示了在能源领域,尤其是与风能 and 太阳能相关的清洁能源以及电网维护等领域,气象条件是不可忽视的主要因素之一。电力生产集中在发电厂,而电力用户则广泛分布于不同区域,因此,电力输送线系统被称为现代社会的命脉是有一定道理的,这时电网覆冰天气预报服务能力(P6)以及电网风灾风险分析和预警(P13和P24)等行业气象服务,就成为保证这一命脉的关键。而保障电力网安全的微气象站建设(P20)则是行业气象观测创新方面有益的尝试。

本期封面报道4篇文章均有气象服务企业的参与,这一情况也是一个很好的启示:行业气象服务不仅依靠气象部门服务于行业的气象实体本身,也可望发展成为行业。这样的发展首先由服务给行业带来的巨大效益驱动,而新的行业健康和快速发展,又离不开国家气象部门和

各研究机构在资料、技术和创新上的合作与共享,本期“电网气象灾害风险评估”主题封面报道多篇论文的作者呈现企业与研究机构合作的态势,就是这种多样化发展中合作创新的例子。

我们相信,有企业参与的合作创新,更有助于能源气象学这样的气象学学科分支的形成和发展。

上一期“刊中刊”——“进展报告2017:气象服务”的推出,取得了较大反响,也体现出气象服务持续的受关注度及其越来越重要的社会影响力。由于版面的限制,未能随“刊中刊”一起发表的优秀文章将会从本期开始陆续呈现给作者。本期推出的“专业气象服务”专题的文章,分别对交通(P39和P46)、旅游(P50)等方面的气象服务进行了阐述,同时对于当前热门的大数据在气象服务中的应用进行了展望(P54)。而“论坛”栏目的文章则着重介绍了英国气象局的服务效益现状(P60),以及气象服务在传播手段上的探索(P63和P70)。

这一期的推出,相信能使读者从更多元的角度去认识和理解气象服务的内涵,以及促进政府部门与企业间的合作。

许小峰

- 50 郑健, 中华羽, 徐蓉, 俞芳芳, 姚日升: 宁波市旅游气象业务系统建设
- 54 唐延婧, 彭芳, 罗喜平, 陶勇: 大数据在贵州专业气象服务的应用及展望

论坛

- 60 王淞秋: 英国气象局公共气象服务现状分析
- 63 葛丽婷: 音频气象服务的多媒介传播研究
- 70 赵嵘: 数据图形在气象影视节目中应用的现状及探索

科学观察

- 2 读图 数字 榜单



特写

- 73 周煜, 胡晓静: 《气象知识》防灾减灾科普之实践

阅读

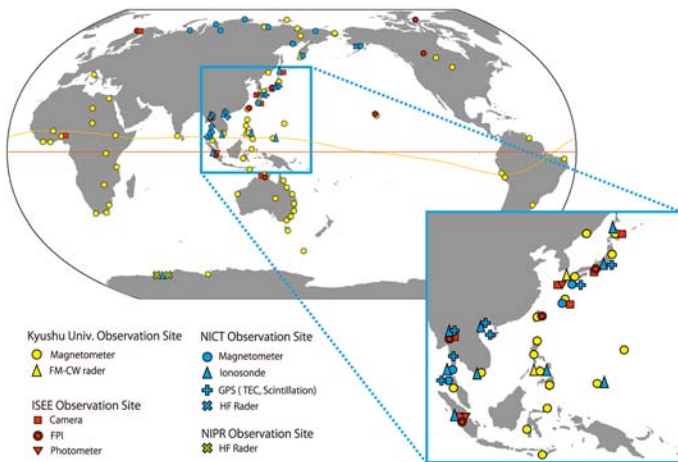
信息

- 31 新书架
- 45 贾朋群: 当今天气大师风采
——记美国FV3模式主要研发者
- 59 气象科技史委员会秘书处: 中国科技史学会气象科技史委员会成立
- 75 高被引论文选编
- 76 编辑选编
- 79 涓流细雨
- 封3 媒体扫描

封3



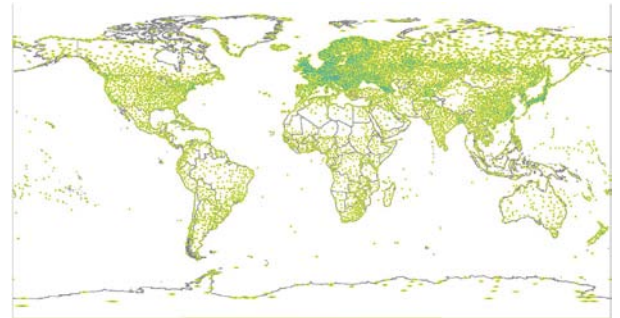
Observation Site World Map



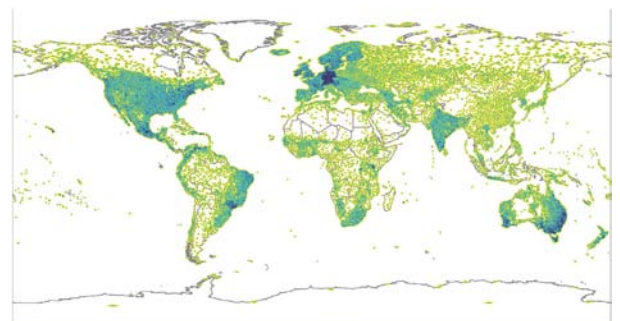
日本空间天气研究活动

日本位于地磁低纬，激烈空间天气的社会影响较大。日本信息和通信技术国家研究所（NICT）牵头开展空间天气研究和业务，众多研究机构中名古屋大学的研究处于领先地位。目前，日本确定了开展空间天气研究的几个核心要素，包括利用数值预报建立的空间天气预报系统、大尺度地面观测网（如图）和通过2015年建立的日地环境预测项目（PSTEP）开展合作研究等。

来源：Space Weather



0 10 25 50 100 km
Distance from nearest gauge



0 10 25 50 100 km
Distance from nearest gauge

全球降水观测站覆盖率：不到足球场的一半

一项由美国、德国、英国和加拿大学者合作开展的研究，分析了全球地面雨量站的分布情况，他们用到最近雨量站的距离地图，表示了全球参与全球交换的GTS雨量站（上图）和实时交换较差的全球降水气候中心（GPCC）雨量站（下图）的全球覆盖情况，指出全球雨量站的覆盖情况，还不及全球足球场覆盖率的一半。

来源：BAMS

HOW OUR HEALTH IS HARMED BY CLIMATE CHANGE
Impacts Differ by Geographic Region



气候变化损害健康：医生的警告

美国由医疗社团组成的“气候和健康医学社团联盟”在最新发表的《医学警报！气候变化在损害我们的健康》报告中，给出美国不同区域气候变化带来的损害健康的主要影响要素。

来源：<http://medsocietiesforclimatehealth.org>

数字

1.13 亿美元
2017年2月NOAA与Vencore公司签订了价值1.13亿美元的系统工程和技术服务（SETS）类合同，后者在一年合同期里，针对NOAA的GOES和JPSS系列业务卫星开展技术支持和服务。

321 亿吨
国际能源署日前宣布，2016年全球CO₂排放量为321亿吨，连续3年持平。而同年全球经济增长3.1%，表明人类可以在不损害经济增长的前提下，达到遏制碳排放的目的。

3.2 mm
最新发布的《2016年中国海平面公报》显示，1980—2016年，中国沿海海平面变化总体呈上升趋势，平均上升速度为每年3.2 mm，高于同期全球平均水平。

国际“电网气象”主题被引频次最高的前11篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引
1	Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms	Wang, C.	Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(4)	59
2	Climate change and electricity demand in California	Franco, Guido	Climatic Change, 2008, 87(S1)	33
3	Realizing the electric-vehicle revolution	Tran, Martino	Nature Climate Change, 2012, 2(5)	31
4	Extended study of extreme geoelectric field event scenarios for geomagnetically induced current applications	Ngwira, Chigomezyo M.	Space Weather-The International Journal of Research and Applications, 2013, 11(3)	25
5	Climate change and the global atmospheric electrical system	Roebber, PJ	Atmospheric Environment, 1997, 31(20)	17
6	Assessment of lightning-related damage and disruption in Canada	Mills, Brian	Natural Hazards, 2010, 52(2)	16
7	Probabilistic life cycle analysis model for evaluating electric power infrastructure risk mitigation investments	Francis, Royce A.	Climatic Change, 2011, 106(1S1)	12
7	EGATEC: A new high-resolution engineering model of the global atmospheric electric circuit-Currents in the lower atmosphere	Odzimek, A.	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2010, 115	12
9	Future cost-competitive electricity systems and their impact on US CO ₂ emissions	MacDonald, Alexander E.	Nature Climate Change, 2016, 6(5)	10
9	Health and climate benefits of different energy-efficiency and renewable energy choices	Buonocore, Jonathan J.	Nature Climate Change, 2016, 6(1)	10
9	The sun, space weather and GIC effects in Sweden	Lundstedt, H.	Space Weather Prediction: Applications and Validation, 2006, 37(6)	10

来源: SCI-E数据库

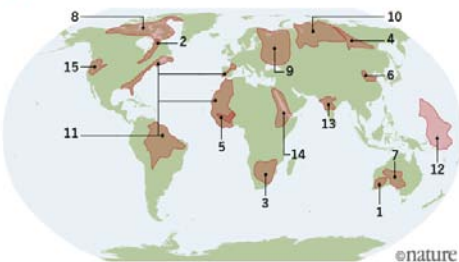
检索时间: 2017年4月5日

田晓阳 提供

EARTH'S BIGGEST ERUPTIONS

Scientists have extended the geological record of massive volcanic eruptions, uncovering evidence for world-changing events that occurred more than 2 billion years ago.

■ Eruptions, showing extent of lava flow

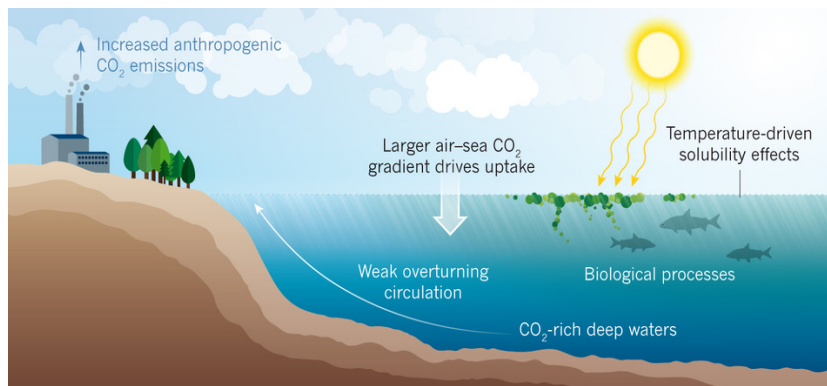


1. Widgemootha 2.42 billion years
2. Ungava 2.22 billion years
3. Bushveld 2.05 billion years
4. Timp-ton 1.75 billion years
5. Essakane 1.52 billion years
6. Dashigou 920 million years
7. Gairdner 820 million years
8. Franklin 725 million years
9. Kola-Dnieper 370 million years
10. Siberian Traps 252 million years
11. Central Atlantic Magmatic Province 200 million years
12. Ontong Java 120 million years
13. Deccan Traps 66 million years
14. Afro-Arabian 30 million years
15. Columbia River 17 million years

全球火山喷发: 30亿年档案

加拿大和俄罗斯学者利用火山岩浆揭示了过去30亿年以来重要的火山喷发, 结果表明比以往知道的最剧烈的喷发还要大的喷发, 在过去30亿年里至少发生过10次。

来源: Nature



21世纪以来较弱的海洋环流提升了海洋碳吸收

人类工业化时期使用化石燃料等向大气排放的CO₂有大约40%被海洋吸收, 然而这种吸收是多变的: 1990年代下降, 但是到2000年代显著增加。什么因子控制着海洋的吸收一直困扰着科学家, 美国和澳大利亚学者的一项最新研究认为, 是2000年代以来, 海洋上层相比1990年代较弱的翻转环流导致了海洋碳吸纳能力的提升。

来源: Nature

280 万美元

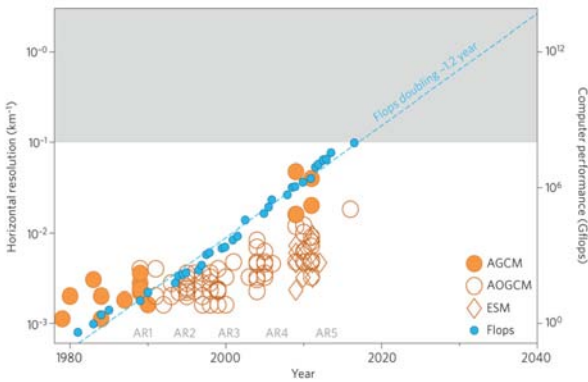
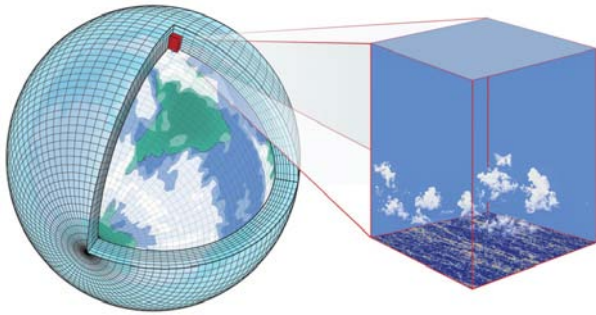
加拿大航空局最近和通信与电力实业公司(CPI) 签署一项价值280万美元的合同, 后者为“表面水和海洋地形(SWOT)”项目的一个探测设备制作飞行硬件。SWOT由美国、法国和加拿大3国联合支持, 计划2021年4月升空, 对地球表面90%区域的河流、湖泊、水库和洪涝区域进行精确高度观测。

27%

一项利用卫星和模式针对美国粮食产量进行的研究表明, 1984—2013年太阳光照的增加, 在美国玉米带农作物产量增长中的贡献比例为27%。

7所

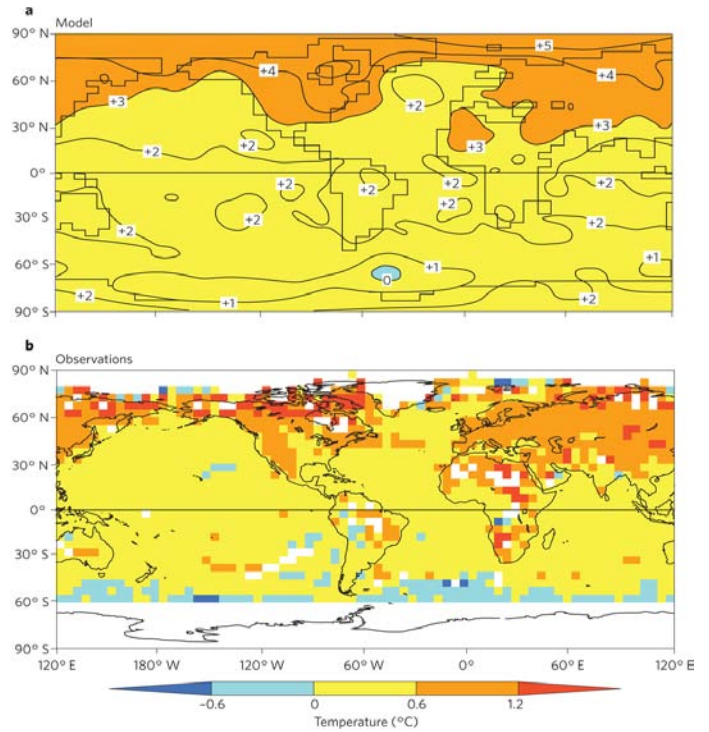
英国QS世界大学2017年最新排名中, 在地球和海洋学科, 美国大学在前10所中占据了7所: 哈佛大学(第2)、加州大学伯克利分校(并列第3)、麻省理工学院(第5)、加州理工学院(第7)、斯坦福大学、哥伦比亚大学和华盛顿大学(第8—第10)。瑞士联邦技术学院位列该学科第一。



气候模式：分辨率带来的能力提升

无论是大气环流模式（AGCM）、耦合大气—海洋环流模式（AOGCM）以及地球系统模式（ESM），1979年以来其分辨率都有了很大提高（下图）。模式分辨率的提升，还带来了模式能力的跨越，例如当全球气候模式分辨率达到5 km时，浅积云的大尺度涡旋模拟进入模式（上图），这为开发低云湍流动力的参数化方案提供了新机会，也让天气和气候模式更好地相互借鉴。

来源：Nature-Climate Change



验证：30年前的气候预测

以IPCC全球气候变化评估为代表的的变化预测已经开展了数十年，最早的全局海气耦合模式，例如美国流体动力实验室开发的AOGCM模式，最早在1989年对全球地面温度变化进行了预测（上图），那时的预测和实际观测温度（下图）的对比表明，预测还是基本准确的，例如陆地区域比周围海洋升温要快等主要特征预测与观测相一致，而预测升温最小的区域位于北大西洋等特征，则与观测不是很吻合。

来源：Nature-Climate Change



CryoSat-2卫星最新提供极地海洋洋流信息

地球高纬度海洋的信息，以前因为无法获取足够的高度计数据，难以通过地球观测卫星获取。2010年发射的欧洲CryoSat-2卫星改变了这一状况。英国和意大利的学者，评估了该卫星针对海洋监测的产品，充分肯定了该卫星数据在海洋学研究，特别是高纬海洋区域的价值。综述论文最新发表在Remote Sensing of Environment期刊上。

来源：Remote Sensing of Environment

数字

250 万美元

美国国家气象局与地球网络公司签订一项价值250万美元的合同，在今后5年里气象局利用该公司分布于90多个国家的1500个闪电传感器数据，更加快速地确定强天气，改进预警提前时间和强化预报员态势感知，加强创新预报工具研究。

0.06 °C

3月23日气象日来临之际，世界气象组织秘书长塔拉斯表示，2016年是有气象记录以来的最热年，温度比工业化前高出1.1°C，比之前最热的2015年高出0.06°C。

50%~60%

目前，北极地区降水的35%是降雨，荷兰气象局学者与合作者用37个模式进行模拟研究表明，2100年前北极地区降水将增加50%~60%，且增加的降水全以降雨形式出现。

中国“电网气象”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引
1	华中电网日负荷与气象因子的关系	胡江林	气象, 2002/03	78
2	极端冰雪灾害对电力系统运行影响的综合评估	张恒旭	中国电机工程学报, 2011/04	56
3	2008年广西罕见凝冻灾害评估及思考	高安宁	灾害学, 2008/06	39
4	1000 kV特高压输电线路覆冰区的研究与划分	欧阳丽莎	高压电器, 2010/05	25
5	基于灰关联分析微气象因素和导线温度对输电线路导线覆冰的影响	欧阳丽莎	高压电器, 2011/03	20
6	辽宁省电线积冰特征与电网冰区划分研究	龚强	冰川冻土, 2010/06	18
7	雷雨大风与河北电网灾害特征分析	付桂琴	气象, 2012/03	16
8	北京太阳能气象指数预报研究与应用	张德山	气象, 2005/08	14
8	气候变化对三峡水库运行风险的影响	张建敏	地理学报, 2000/12	14
8	全球暖化与电力系统的相互影响综述	苏盛	电网技术, 2010/02	14

来源: CAJD数据库

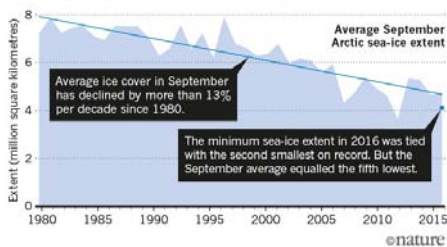
检索时间: 2017年4月5日

田晓阳 提供

GOING, GOING...

The Arctic Ocean is rapidly losing its summer ice cover. The yearly cycle reaches its minimum each September and hit a record low in 2012.

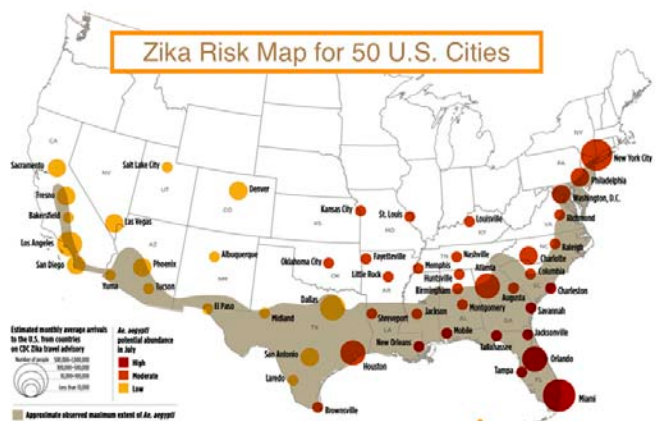
Sea-ice extent: ■ 1980 ■ 1998 ■ 2012 → Ice flow



北极海冰都去哪儿了?

每年9月达到最低值的北极海冰范围, 具有较大的年际变化(上图), 但总体上9月份海冰面积减少的趋势明显(下图), 2016年更是观测到仅次于2012年的第二低值, 好在9月的平均值只是排在第五最小值。

来源: Nature



Source: UCAR

气象学者告知寨卡的风险

无论是寨卡还是登革热和基孔肯雅热, 这3种在全球传播的病毒有很多共同的地方: 例如, 都是通过埃及伊蚊传播, 而且最近全都出现在美国出现过。美国NCAR的科学家通过公开科学讲座告诉公众: 气候因子可以影响埃及伊蚊的发育、繁殖和生存, 还能调节蚊体中病毒的孵化和再生, 从而构造了病毒传播的多种途径。科学家还给出美国50座城市寨卡风险分布, 提醒公众注意预防。

来源: UCAR

8.5_d 最新印发的《GRAPES数值预报系统发展规划(2016—2020年)》提出, 到2020年, GRAPES全球中期确定性预报系统的水平分辨率将达10 km、卫星资料同化占比超过80%、可用预报时效接近8.5 d。

45% 最新发表的《BP世界能源展望2017年版》(中文版)预计, 到2035年, 中国将占世界能源消费总量的26%, 占全球净增长量的35%。中国的能源强度在展望期内将下降45%, 年降幅为3%。

191起 瑞士再保险对2016年全球灾害的统计表明, 全年共发生灾害327起, 其中191起为自然灾害, 136起是自然灾害, 这些灾害共造成1750亿美元经济损失, 约1.1万人死亡或被认定失踪。

电线覆冰预报模型研究综述

庄文兵¹ 张海斌² 赵宏宇³ 吴世新³ 万明阳⁴

(1 国网新疆电力公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830001; 2 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 400000;
3 北京国网富达科技发展有限公司, 北京 100070; 4 象辑知源(武汉)科技有限公司, 北京 100084)

摘要: 我国地域广阔、地形复杂、气候多变, 输电系统面临相当严重的覆冰灾害威胁。导线覆冰导致的电力系统事故, 严重影响了正常的国民经济生活。为了保证电网系统安全可靠的运行, 有必要对输电线路导线覆冰的预测模型进行深入研究。首先总结了电线覆冰的相关气象因素, 然后列举了一些比较典型的经验和半经验模型, 综合阐述了覆冰物理过程的流体力学和热力学理论, 最后对国内的覆冰预测模型研究现状做了简要介绍。

关键词: 电线覆冰, 物理模型, 统计模型

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.001

Review of the Research for Powerline Icing Prediction

Zhuang Wenbing¹, Zhang Haibing², Zhao Hongyu³, Wu Shixin³, Wan Mingyang⁴

(1 Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011 2 Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400000 3 Beijing State Grid Fuda Science & Technology Development Co.Ltd., Beijing 100070, 4 Xiangjizhiyuan (Wuhan) Technology Co.Ltd., Beijing 100084)

Abstract: China's various territories, complex terrain and changing climate, results in frequent power line icing disaster, which is a serious threat to the normal national economic life. It is necessary to conduct in-depth study of ice coating of transmission line wires to ensure the safe and reliable operation of the power grid system. This paper firstly summarizes the relevant meteorological factors that cause the powerline icing, then enumerates some typical examples of empirical and semiempirical models of ice coating. The hydrodynamics and thermodynamics of the icing process are also described. The advantages and disadvantages of each model are compared and analyzed, and some recently developed statistical forecasting methods are briefly introduced. Finally the research status of domestic powerline icing prediction model is briefly reviewed.

Keywords: powerline icing, physical model, statistical model

0 引言

电线覆冰是空气中的过冷水滴、雾滴以及冻雪附着在0℃左右或以下的导线上形成的冻结物^[1-2]。近年来, 在全球气候变暖背景下, 极端天气气候事件引起的气象灾害频数和强度呈增加趋势, 覆冰作为一种特殊的气象灾害, 给世界各地许多电网线路的安全运行造成了严重影响^[3-4]。2008年初我国南方特大雨雪冰冻灾害期间, 电线积冰造成南方地区电网大面积损毁、电力供应中断, 直接经济损失上千亿元, 对社会正常生活造成了巨大影响^[5]。深入研究电线覆冰的形成机理及其天气成因, 建立有效的覆冰灾害预警预报方法, 对经济社会可持续发展具有重要的现实意义。

从20世纪50年代至今, 国内外科研人员对电网覆

冰的气象条件和形成机理进行了细致的研究^[6-8], 形成了对覆冰形成物理过程的较为完善的认识, 在此基础上发展出多种预测覆冰厚度的理论模型, 并在覆冰监测^[9-10]、导线除冰^[11]等技术领域都取得了长足的进步。本文对于经典覆冰模型的发展历程和近年来国内的覆冰预测模型研究现状进行了综合阐述。

1 电线覆冰成因分析

1.1 覆冰分类

电线覆冰按照形成的气象条件可以分为雨淞、雾淞、混合淞、雪淞四类。雨淞是指大气中的过冷水滴在导线的迎风面形成的清澈光滑透明的覆冰, 密度为0.5~0.9 g/cm³, 对电网系统的威胁最大。雾淞是大气中的水汽在过饱和时附着或升华凝结, 在导线上形成放射状的结晶, 密度约为0.1~0.3 g/cm³, 雾淞形成时的气温通常小于-5℃。混合淞则是雨淞和雾淞混合冻结形成的不透明或半透明覆冰, 密度介于雨淞和雾淞之间。雪淞是由自然降雪粘附在导线上形成的覆

收稿日期: 2016年11月9日; 修回日期: 2016年12月23日

第一作者: 庄文兵(1984—), Email: dommo@126.com

资助信息: 国家电网公司总部科技项目《电网气象监测网组网及应用关键技术研究》资助

冰, 雪淞的密度小, 结构松散, 容易破碎, 造成的危害较小, 故对雪淞的专门研究较少。

1.2 影响因素

影响覆冰形成的自然因素包括气象因素和地形因素, 而地形因素从根本上是通过影响气温和大气环流等气象条件从而对电线覆冰产生影响的。从气象学的角度看, 影响覆冰的微气象因素主要有温度、降水、湿度、风速和风向等。

一般而言, 气温介于 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 最容易形成覆冰, 若气温小于 -10°C 时观察到的覆冰现象极少, 这是由于温度过低将导致空气中的过冷水含量减少。降水量和湿度决定了大气中的过冷水滴含量, 因而与导线覆冰厚度呈正相关。风速对覆冰的影响在于与导线垂直方向的风速越大, 单位时间内运送到导线上的过冷水滴数量越多, 水滴碰撞速度越大, 覆冰增长越快。但另一方面, 当风速大到一定程度时, 过冷水滴还未结冰就会被风吹走, 导致冻结系数下降, 从而使得覆冰增长率减缓。大风的另一个危害在于导线覆冰后会在风力下持续振荡, 造成导线断裂和跳闸。

除气象和地形等自然因素以外, 导线本身的悬挂高度、线径粗细、电线扭转、电场及电负荷等也会对覆冰的厚度、质量产生影响^[1]。

2 经典覆冰预测模型

电线覆冰是由多种微气象因素决定的综合物理现象, 仅从单一的气象要素难以建立准确的覆冰厚度预测模型, 需要通过研究电线结冰的物理机制, 根据热力学、流体力学等方面的知识建立守恒方程, 从而获得覆冰厚度与各类气象要素的综合定量关系。从20

表1 覆冰模型中常见参数的物理意义及单位
Table 1 Physical meanings and units of common parameters in ice models

符号	物理意义	单位
m	单位长度导线覆冰质量	g/m
R_0	导线原始半径	mm
R	覆冰后导线半径	mm
ΔR	覆冰厚度	mm
t	覆冰时间	h
T	气温	$^{\circ}\text{C}$
v	风速	m/s
ϕ	风向与导线夹角	rad
P	单位时间降雨量	mm/h
H_g	降水量	mm
H_v	液水当量	mm
w	液态水含量	g/m^3
ρ_0	液态水密度	g/m^3
ρ_i	覆冰密度	g/m^3
a	液滴中值半径	cm

世纪50年代起, 国内外的学者对覆冰形成的物理过程和影响因素进行了大量研究, 提出了多种覆冰预测模型, 本节对其中较为经典的模型进行简要评述。各模型中常见参数的物理意义和量纲统一列于表1中。

2.1 经验模型

在覆冰研究早期, 由于对覆冰成因的认识不够全面, 研究者通常是根据试验观测结果提出的经验模型。

2.1.1 Lenhard 模型^[12]

Lenhard模型假设覆冰增长仅与降水量呈线性关系

$$M = C_1 + C_2 H_g, \quad (1)$$

由于忽略了气温和风速的影响, 该模型过于简单, 不能反映覆冰发生时电路沿线复杂气象状况的影响。

2.1.2 Imai 模型^[13]

Imai模型认为覆冰质量受导线传热过程控制, 覆冰质量的变化率与气温相反数呈正比, 得到如下的冰厚预测模型

$$R^{3/2} = C\sqrt{vR}(-T)t, \quad (2)$$

式中, R 为覆冰后的导线半径, v 为风速, T 为气温, t 为覆冰时间。该模型忽略了降水和空气湿度的影响, 当温度接近 0°C , 由于常数 C 值偏小, 往往会低估覆冰荷载。而模型中的湿增长条件在气温低于 -5°C 时并不成立, 因而在极端低温条件下又容易高估覆冰厚度。

2.1.3 McComber 雾凇模型^[14]

McComber模型是根据华盛顿山上的雾凇试验提出的经验公式

$$M = M_0 e^{kt}, \quad (3)$$

式中, M_0 为 $t=0$ 时单位导线上的覆冰质量。McComber模型假定结冰厚度随时间呈指数式增长, 其中指数 k 由气温、风速、液水含量、液滴直径、冰重等参数计算得到。尽管McComber指出该模型与试验数据拟合较好, 但实际上公式中的常数 k 具有很大的可变性, 在实际应用中较难确定。另一方面, McComber模型只能预测覆冰的增长趋势, 而没有反映覆冰形成和消融的过程, 因而实用价值较低。

2.2 干增长数值模型

干增长数值模型根据大气液态水和导线覆冰的质量守恒建立方程, 对过冷水滴在导线附近的运动轨迹和热力学性质涉及较少。干增长模型的前提假设是, 与导线接触的过冷水滴全部冻结成冰, 即过冷水滴的冻结系数为1, 且在这类模型中通常没有明确提出碰撞率的概念, 难以反映复杂的覆冰物理过程。但另一方面, 由于一些干增长模型的输入数据能够直接测量得到, 且多数情况下能够准确预测覆冰趋势, 这类模

型在实际操作中也得到了广泛的应用。

2.2.1 Chaine 模型^[15]

Chaine模型假设环境温度接近或低于0℃，与导线接触的过冷水滴全部在导线表面冻结成冰，则导线覆冰的当量径向厚度为

$$\begin{cases} \Delta R = \left[\frac{R_0 k}{2} \sqrt{H_g^2 + H_v^2 + R_0^2} \right]^{1/2} - R_0, \\ H_g = Pt, H_v = wvt \end{cases} \quad (4)$$

其中， k 是人为引入的修正系数，与气温和导线半径有关。相比于早期的覆冰理论模型，Chaine模型综合考虑了气温、降水、风速、大气湿度等因素的影响，但其主要缺点在于公式中的修正系数 k 较难确定。有其他文献指出，Chaine模型中的修正系数 k 实际上依赖于覆冰厚度 ΔR ，因此公式(4)实际上是一个隐式模型，无法直接应用^[32]。Chaine模型中将覆冰来源划分为两类，即降水与导线直接碰撞形成覆冰，以及过冷水滴与导线侧面碰撞结冰，这种划分方法也被后来的一些数值模型所采纳。

2.2.2 Goodwin 模型^[16]

Goodwin模型默认过冷水滴的收集系数为1，覆冰质量增长率正比于风速、液态水含量和导线半径，进而导出覆冰厚度公式：

$$\Delta R = \frac{\rho_0}{\rho_i} \frac{H_g}{\pi} \sqrt{1 + \left(\frac{v}{v_d} \right)^2}, \quad (5)$$

式中， v_d 为雨滴降落速度。Goodwin模型与Chaine模型的出发点较为相似，但Goodwin模型给出了在物理概念上自洽的覆冰厚度预测公式。相比于之前的各类经典覆冰数值模型，Goodwin模型能够达到较高的准确性，但由于其为干增长模型，当温度接近0℃时难以反映真实的覆冰物理过程。

2.2.3 Jones 简单模型^[17]

Jones模型假设导线为无限长圆柱体且导线表面均匀覆冰，考虑降雨量和风速的影响，根据液态水向覆冰转化过程中的质量守恒，提出一种计算最大可能标准冰厚的简单模型：

$$R_{eq} = \frac{1}{\rho_i \pi} \sum_{j=1}^N \left[(P_j \rho_0)^2 + (3.6 w_j v_j)^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

式中的求和号为逐小时求和。按照Best提出的经验公式，液态水含量 w 通过降雨量 P 计算得出

$$w_j = 0.067 P_j^{0.846}. \quad (7)$$

Jones利用Springfield的历史观测数据进行检验，将简单模型和四种经典模型进行对比，发现简单模型与Makkonen模型的预测结果十分接近。Jones模型的

缺点除了其干增长假设以外，还在于忽略了导线本身直径对覆冰厚度的影响。尽管如此，由于Jones模型所采用的参数易于获取，并且能够较准确地预测覆冰增长率，在国外常常被应用于实际的覆冰数值模式预报。Musilek^[18-19]等在其覆冰增长预报系统中，引入冻雨因子^[20]对Jones模型进行修正，并采用中尺度数值预报模式WRF生成的气象预报数据作为输入值，计算出的标准覆冰厚度与实际测量值的均方误差小于2mm。

2.3 覆冰过程的物理模型

上述一类干增长模型的共同特点为：

- 1) 过冷水滴的运动路径为直线，水滴与导线的碰撞面积等于沿导线直径的剖面面积；
- 2) 与导线碰撞的过冷水滴将全部驻留在导线表面形成覆冰；
- 3) 导线覆冰形状为均匀的圆柱形或椭圆形。

这些假设简化了覆冰计算过程，具有一定的实用性，但并没有深入全面地反映导线结冰的物理过程。在较为严密的导线覆冰物理模型中，通常引入3个重要的物理参量：碰撞率 α_1 、捕获率 α_2 和冻结系数 α_3 （表2）。覆冰物理过程模型的基本公式为^[23]

$$\frac{dm}{dt} = 2\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 w v R \sin \phi. \quad (8)$$

表2 覆冰理论模型的重要物理参量

Table 2 Important physical parameters of theoretical model of icing

物理参量	物理意义
碰撞率	气流中过冷水滴与导线的碰撞幅度和覆冰导线直径之比
捕获率	驻留在导线表面的水滴量与所有碰撞导线表面的过冷水滴之比
冻结系数	冻结水滴量与驻留在导线表面的水滴总量之比

前述Goodwin模型本质上是式(8)在 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ 时的特例。在混合淞和雨淞覆冰过程中，捕获率 α_2 通常等于1，因此对于覆冰物理过程的研究主要是集中于对碰撞率和冻结系数的研究，前者由流体力学规律确定，而后者则通过求解热力学方程计算得出。

2.3.1 流体力学模型

如图1所示，导线的存在会使气流的流线扭曲，

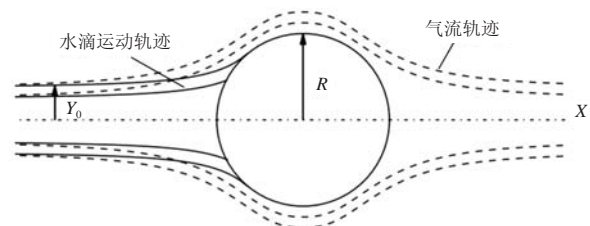


图1 导线附近气流和水滴运动轨迹
Fig.1 Trajectories of airflow and water droplets near the conductor

从而改变气流中水滴的流动方向。设运动轨迹与导线相切的水滴在无穷远处与X轴的距离为 Y_0 ，则碰撞系数定义为

$$\alpha_1 = Y_0 / R. \quad (9)$$

在20世纪40年代，Langmuir和Blodgett利用流体力学方法计算出气流中水滴绕圆柱运动的轨迹^[21]。为简化计算过程，该模型中做出如下假设：①水滴在足够远处的运动速度 v_0 与气体流速相等；②水滴为球形，不发生形变；③水滴所受重力忽略不计。设气体流速和水滴速度矢量分别为 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} ，以 v_0 作为速度单位，即令 $\mathbf{u}' = \mathbf{u} / v_0$ ， $\mathbf{v}' = \mathbf{v} / v_0$ ， $\tau = tv_0 / R$ ，则导线附近水滴的无量纲运动方程为

$$k \frac{d\mathbf{v}'}{d\tau} = \frac{c_F Re}{24} (\mathbf{u}' - \mathbf{v}'), \quad (10)$$

式中， c_F 为水滴与气流作相对运动遇导线阻滞时的空气阻尼系数， k 为水滴的惯性参数（斯托克斯数）， Re 为水滴在气流中运动的雷诺数。雷诺数和惯性系数与水滴半径 a 、水滴密度 ρ_0 、空气密度 ρ_a 、空气粘滞系数 μ 以及覆冰导线半径 R 具有如下关系

$$Re = \rho_a a |\mathbf{u} - \mathbf{v}| / \mu, \quad (11)$$

$$k = \rho_0 a^2 v / (9\mu R). \quad (12)$$

通常情况下，方程（10）没有解析解，其数值计算结果表明，过冷水滴碰撞率与水滴惯性系数 k 呈正相关，惯性系数较大的水滴不容易偏离其直线路径，因而与导线的碰撞概率更大。由式（12）可以得知，如果导线半径越小，水滴直径和风速越大，则水滴碰撞率越大。

Langmuir和Blodgett以及后来的研究者参考上述模型提出了一些计算碰撞系数的经验公式，从而免去了对于气流场和水滴轨迹的复杂计算过程。主要代表有Stallabrass公式^[22]，Makkonen公式^[23]和Finstad公式^[24]等，这些公式与严格数值解的误差尚在可接受的范围内，在覆冰研究中得到了广泛应用。

以上经典碰撞率理论的不足之处在于：①将气流场看作理想层流，而实际上湍流的存在会影响覆冰的最终结果；②将覆冰导线截面看作均匀的圆形，忽略了覆冰造成的导线表面形貌改变对气流和水滴路径产生的影响；③导线附近的电场会使水滴因极化而荷电，从而同时受到空气粘滞力、自身重力和电场力的作用，而在上述模型中仅考虑了空气粘滞力的作用。随着计算机硬件和数值模拟技术的发展，这些问题部分得到了解决。从20世纪80年代起，飞机覆冰领域的研究者开发出一系列覆冰计算软件，如CANICE^[25]、LEWICE^[26]等，但这些软件较少应用于导线覆冰研究

上。2004年Fu等开发出专门的电线覆冰数值模拟软件^[27-28]，采用计算流体动力学求解气流场，用拉格朗日或欧拉算法求解局部碰撞率。该模型模拟了导线覆冰的形状，并考虑了导线在覆冰过程中的扭转问题，具有较高的物理逼真性，实际预测效果得到了大幅提升。

2.3.2 热力学模型

过冷水滴在导线表面冻结的过程实质是一个热平衡过程，冻结系数可由覆冰表面的热平衡方程决定。Lozowski, Makkonen等对覆冰表面热平衡过程进行了深入全面的研究，建立了如下热平衡方程^[23]

$$q_f + q_v + q_k + q_a + q_n + q_R = q_c + q_e + q_l + q_s + q_i, \quad (13)$$

式中， q_f 为过冷水滴冻结时释放潜热； q_v 为气流与导线的摩擦热； q_k 为水滴碰撞动能； q_a 为水滴结冰后从冰点温度 T_F 降到冰面稳态温度 T_s 释放的热量； q_n 为日光短波辐射加热； q_R 为传输电流焦耳热； q_c 为自然对流热损失； q_e 为液水蒸发或冰升华导致的热损失； q_l 为过冷水滴从环境温度 T_a 升温至冰点温度 T_F 吸收的热量； q_s 为长波辐射损失热量； q_i 为传热损失。Makkonen等给出了各项热流量的详细计算公式^[23, 29-31]。

覆冰湿增长过程的必要条件是冰面温度 T_s 等于 0°C ，将这一条件与各热流项的表达式代入热平衡方程中，则可以计算出覆冰冻结系数 α_3 ，此时还需对计算结果分3种情况进行讨论。若计算结果满足 $0 < \alpha_3 \leq 1$ ，则覆冰过程确实为干增长过程。若 $\alpha_3 \leq 0$ ，则表明在相应环境条件下，过冷水滴不会在导线表面继续结成覆冰。若解出 $\alpha_3 > 1$ ，则覆冰过程为干增长过程，与导线碰撞的过冷水滴不仅全部冻结，且有能力使冰面温度 T_s 降低至 0°C 以下，此时可令 $\alpha_3 = 1$ 代入方程（13）中来求解实际冰面温度值。对导线覆冰热平衡方程的计算结果表明，湿增长条件下冻结系数受环境温度、风速、液态水含量、水滴直径、导线直径、导线电流的影响。其中环境温度、风速、液态水含量、水滴大小和导线电流的增长都会引起冻结系数下降，而导线直径与冻结系数的关系在一些情况下存在极小值。

传统覆冰理论认为，在湿增长过程中未冻结的液态水将从导线上滴落，不会对后续覆冰过程产生影响。Makkonen在进一步考察实际覆冰形状后指出，在雨淞覆冰过程中，未冻结的过冷水滴不会立即滴落，而是流向导线底部，在流动过程中逐渐冻结形成冰棱，进而增大与空气中过冷水滴的接触面积，使得覆冰率进一步增长^[32]。这一结论在利用蒙特卡罗法进行颗粒随机行走仿真的三维形态生成模型中得到了验证

和发展^[33]。

与早期的经验覆冰模型和仅考虑质量守恒的干增长模型相比，以 Makkonen 模型为代表的理论模型深入地考察了覆冰过程中的物理细节，能够精确地计算出导线覆冰量与各类环境参量的函数关系。尽管 Makkonen 模型也存在对实际物理过程的简化，例如没有考虑电场作用和导线晃动等因素，但已经能够取得较为理想的试验效果。利用在自然环境中，液滴半径谱等参数较难精确测量，成为限制模型准确率的主要因素。随着传感技术的发展和天气数值预报精度的提高，对大气环境参数的监测和预报更加准确，各类覆冰模型的预测能力有望得到进一步提升。

3 国内覆冰模型研究进展

3.1 物理数值模型

国内对覆冰物理模型的研究始于20世纪50年代末期^[34]。由于电线积冰问题的重要性，水电部西南设计院于1964年底建立了首个观冰站，进行了连续4年的积冰观测。谭冠日^[35]、江祖凡^[36]等对这些资料进行了分析，在积冰厚度与高度、风向、电线直径的关系和雾凇形成的气象条件等方面取得了一些成果。在 Makkonen 模型的理论基础上，蒋兴良等对电线积冰物理机制，包括碰撞率、冻结系数、覆冰密度和干湿增长转变的临界条件等进行了比较详细的分析，给出了一套相对完整的覆冰计算理论体系^[1, 37-38]。

近年来国内覆冰灾害频发，导致电力系统瘫痪不断，引起了国内学者的广泛关注，在覆冰预报、监测和除冰领域进行了大量研究工作。现有覆冰物理模型的研究进展可分为3个部分，一是对经典覆冰理论的物理细节进行进一步整理和完善；二是将已有的覆冰模型与气象站可测量的常规气象要素相结合，使其能够充分应用于本地的覆冰预报业务；三是利用已有的覆冰计算理论，对输电线路负载和故障概率进行评估。

刘春城在已有覆冰理论基础上，对雨凇模型的收集系数、冻结系数和覆冰形状做了一定程度的简化，分析了水滴中值半径、风速以及导线直径变化时覆冰增长随时间的演变规律，并取得了和 Makkonen 模型相近的效果^[39]。梁曦东等在经典碰撞率模型中加入了电场作用项，采用边界元法计算气流场，对导线表面单元的局部碰撞率和局部冻结系数进行单独计算，开发了导线覆冰形貌的时变仿真模型^[40]。该模型能够得到随时间变化的覆冰形貌、密度分布和覆冰质量，与已有的模拟和试验结果都符合得较好，具有较高的工程应用价值。朱永灿等在其数值分析模型中做出了相似

的工作，由于考虑了未冻结液滴的溢流过程，得出的冰形轮廓更加圆滑^[41]。

传统覆冰物理模型中用到诸如液态水含量、液滴半径谱、液滴撞击速度之类的因子，由于无法在通过常规气象站观测得到，不能直接应用于工程设计。针对这一问题，吴息等利用四川省二郎山观冰站的观测数据建立了基于常规气象资料的导线覆冰模型^[42-43]，根据已有的观测数据，对覆冰密度与气温，冻结系数与风速，以及液水含量与能见度、大气湿度的函数关系进行非线性拟合并代入覆冰增长方程，从而得到冰厚的时间序列值。该模型是一个半经验模型，其对于覆冰密度等中间参量的非线性拟合并不十分精确，但冰厚拟合值与实测值的相关系数达到0.834，已经能够较好地反映覆冰厚度的变化趋势。由于该模型仅利用了一处观测站的资料，其能否适用于其他地形条件下的覆冰预报，还需要进一步深入研究。

在覆冰灾害风险评估模型方面，谢云云等^[44]根据 Jones 简单模型计算雨凇覆冰厚度，进而得到导线冰风总荷载和最大应力，对覆冰过重、导线舞动和绝缘子闪络引起的线路故障概率分别进行了评估。该模型中计入了地理环境特征的作用，但没有考虑融冰因素对故障率的影响，这一问题在朱斌等的研究中得到了完善^[45]。其改善方法为，在每一次计算迭代的过程中，先利用热平衡方程（13）计算冰面温度 T_s ，若 $T_s > 0$ 则表明导线覆冰处于外部融化状态，覆冰增量为负数。此外，该模型中还考虑了由于导线焦耳热引起的内部融冰过程。对实际输电线路进行的算例分析表明，上述模型计算出的故障概率曲线与输电线路的实际故障情况基本相符，因而具有较高的实用价值。

3.2 统计预测模型

相比于根据物理规律建立的覆冰数值预测模型，近年发展起来的统计预测模型绕过具体的物理过程，通过对实际气象观测资料和覆冰资料进行统计分析，从数据关联性出发建立由气象因子到覆冰厚度的定量映射关系。尽管统计模型本质上仍是一类经验模型，但其输入参量能够通过常规气象要素观测或数值天气预报模式直接或间接获取，因而在碰撞率和冻结系数较难计算，并且相关气象数据种类足够多、样本量足够大的情况下，能够取得和经典物理模型相近甚至更佳的预测效果。统计模型通常以覆冰厚度作为输出结果，而实际容易测量的物理量为覆冰质量，因此通常的做法是先根据实测冰重计算标准冰厚^[46]：

$$\Delta R = \left[\frac{M}{0.9\pi L} + R^2 \right]^{1/2} - R. \quad (14)$$

较早期的统计方法通过多元回归建立覆冰定量预测模型^[47-49]。在廖玉芳建立的湖南电线覆冰厚度估算模型中，其输入变量除了地面常规气象要素外，还包含低层探空资料的温度信息以及海拔、坡度、坡向等地形因子。该模型在海拔高度小于1000 m时的平均绝对误差小于2 mm，但在海拔高于1000 m时表现较差。

由于电线覆冰本质上是复杂的非线性过程，利用线性拟合的手段难以对覆冰厚度增量进行精确拟合。近年来随着机器学习领域的迅速发展，神经网络^[50]和支持向量机^[51]等非线性模型被广泛应用于构建覆冰预测模型。殷水清等利用三层BP神经网络对全国范围内48年电线结冰观测数据和气象要素数据进行分析，将前期冰冻日数，预报前1天的日最低气温、日相对湿度、日平均风速和日降水量作为神经网络输入，将结冰厚度分为6个等级进行分类预测，达到了81.3%的准确度，但对于极端高值低估明显^[52]。传统BP神经网络常常存在着诸如收敛速度慢、易陷于局部极小值和过拟合等方面的缺陷，当学习的样本量较小或数据质量较差时，相比简单模型并不占优势^[49]。对此的一个改善方法是，先利用遗传算法或粒子群算法等优化算法对神经网络的参数空间进行全局搜索，再利用BP算法寻找最优解，从而加快网络学习速率，避免陷入局部最小值^[53]。

支持向量机(SVM)是一种建立在统计学习理论的VC维理论和结构风险最小原理基础上的监督学习模型，可用于分类和回归分析。相比传统BP神经网络，SVM算法过拟合风险和人工调参成本相对较低，训练时间短，在小样本模式识别中具有独特的优势，因此有较多的覆冰统计模型采用了这种算法。下面对其基本原理进行简要介绍。

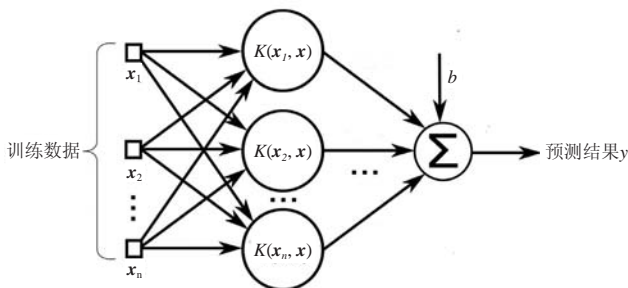


图2 支持向量机示意图
Fig. 2 Sketch map of SVM

SVM的出发点是利用非线性映射 ϕ 将输入向量映射到高维特征空间，使得分属不同类别的数据能够在高维空间中利用超平面 $\mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}) + b = 0$ 线性分割开来。对于回归问题，则是希望在高维特征空间中寻找结构

风险最小化的回归函数 $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}) + b$ ，能够满足以下最优化条件

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \\ \text{s.t. } |y_i - \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}_i) - b| < \varepsilon, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (15)$$

由于高维空间中内积的计算复杂度较高，SVM理论中通常寻找一个核函数 $K(x_1, x_2) = (\phi(x_1), \phi(x_2))$ 来代替特征空间中的内积运算。模型预测效果的关键在于核函数的选取，最常用的一类核函数为径向基函数：

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = e^{-\gamma(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)^2}, \gamma > 0. \quad (16)$$

对方程(13)的直接求解较为困难，通过引入拉格朗日乘子 α_i 和 α_i^* ，可以将原始参数空间中的优化问题转化为对偶空间中的优化问题，求解得到的回归函数 $f(\mathbf{x})$ 可以表示为核函数的线性组合

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b. \quad (17)$$

戴栋等^[54]在其基于支持向量机的覆冰回归模型中，选取环境温度、湿度、风速和前一段采样时刻的覆冰数据作为模型输入，对贵州电网的3个覆冰过程进行了短期预报模拟，结果显示该模型在1 h内的滚动预测效果较好，而更长时间的预测效果较差。

上述模型的一个明显缺陷是输入数据的维度较小，从经典物理模型的角度来看，仅依靠3种气象数据的确难以对覆冰厚度进行精确估计。尽管如此，在微气象数据的种类和数量短期内难以迅速增长的情况下，利用已有微气象数据人为构造特征变量，仍有提高模型准确率的可能。例如在侯雨伸等^[55]的统计模型中，初始输入变量仍是气温、湿度和风速数据，但是在训练SVM模型之前，先根据历史冰厚数据的变化量，将气象过程分为覆冰增长、覆冰维持、覆冰消融3个集合，并根据气象过程样本数据与各集合中心点的马氏距离来确定各样本的模糊隶属函数。在训练SVM时，除了原始气象数据和上一时刻的覆冰厚度以外，当前时刻的3个隶属度函数也作为特征变量一并输入，使得模型输入向量的维度增加到了7维，并且预测结果与实测冰厚的相对误差均值从22.66%降低至10.16%。在考虑气象参量的权重之后，相对误差均值能够进一步降低至6.62%。

除上述方法外，利用粒子群算法调参^[56]以及利用KNN算法预先提取临近样本^[57]的模型也取得了比传统SVM更优的预测效果。由于这些统计模型都只采用了少数几个地理位置的观测数据进行训练和检验，仍有必要进行深入研究来增强模型的准确性和泛化能力。

4 总结与讨论

本文对电线覆冰的经典物理概念和国内覆冰预测模型的研究进展进行了综合介绍。

诸如Imai模型的一类经验模型，体现了影响覆冰厚度的部分气象因素，但既不能反映电线覆冰的物理过程，又无法准确预测覆冰厚度。20世纪70—90年代提出的一些干增长模型建立在过冷水滴碰撞率和冻结系数为1的假设上，同样不能反映详细的覆冰物理过程，但其中仍有一些模型预测效果较好，如Jones简单模型，其计算过程相对简单且输入参量易于测量，因而得到了广泛应用。以Makkonen模型为代表的一类理论模型，利用流体力学和热力学理论严格计算过冷水滴的碰撞率和冻结系数，对覆冰的干湿增长过程有清晰的判定，已经形成了较为成熟的理论体系，并且得益于计算机仿真技术的发展，对于覆冰形状和覆冰质量能够给出非常精确的模拟结果。由于理论模型中的部分参数在自然环境下较难精确测量，实际覆冰预报的准确率仍有待进一步提升。

统计方法根据可观测和可预报的微气象数据，利用多元线性回归或神经网络、支持向量机等机器学习算法建立覆冰预测模型，理论上其精确程度低于严格的物理模型，但在实际的覆冰预测业务能够充分发挥已有数据的价值，因此可能取得更好的效果。由于目前国内电网微气象站和观冰站数量较少，现有统计模型研究通常只应用了少量微气象数据进行拟合，其准确性和全面性有待进一步研究。虽然一些数据处理方法能够使得模型准确率有所提升，但统计模型的实际应用最终仍然依赖于积冰过程和气象因子的观测资料的大量积累。

在已有的研究工作中，对覆冰物理模型的研究和对统计模型的研究大多是独立的，很少有将二者结合起来的尝试，这可能是未来覆冰预测模型的一个发展方向。此外，无论是物理模型还是统计模型，若要提升预报时效性，均依赖于电网线路附近的局地微尺度天气预报。因此提升现有微尺度模式的准确性，开发精细化的数值天气预报产品，对于电线覆冰模型的实际应用具有极其重要的意义。

参考文献

- [1] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 中国南方电网公司. 电网防冰融冰技术及应用. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] Jones K F, Ramsay A C, Lott J N. Icing severity in the December 2002 freezing-rain storm from ASOS data. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(7): 1630-1644.
- [4] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨. *高电压技术*, 2008, 34(2): 215-219.
- [5] 陆佳政, 蒋正龙, 雷红才, 等. 湖南电网 2008 年冰灾事故分析. *电力系统自动化*, 2008, 32(11): 16-19.
- [6] 黄新波, 欧阳丽莎, 王娅娜, 等. 输电线路覆冰关键影响因素分析. *高电压技术*, 2011, 37(7): 1677-1682.
- [7] Farzaneh M, Savadjiev K. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(2): 1080-1087.
- [8] Lozowski E P, Makkonen L. Fifty years of progress in modelling the accumulation of atmospheric ice on power network equipment. *Proc Eleventh International Workshop on Atmospheric Icing on Structures*, Montreal, 2005. http://iwais.compusult.net/html/IWAIS_Proceedings/IWAIS_2005/Papers/IW59.PDF.
- [9] 黄新波, 孙钦东, 程荣贵, 等. 导线覆冰的力学分析与覆冰在线监测系统. *电力系统自动化*, 2007, 31(14): 98-101.
- [10] 曹永兴, 张昌华, 黄琦, 等. 输电线路覆冰在线监测及预警技术的国内外研究现状. *华东电力*, 2011, 39(1): 96-99.
- [11] 刘建伟, 周娅, 黄祖钦, 等. 高压输电线路除冰技术综述[J]. *机械设计与制造*, 2012, (5): 285-287.
- [12] Lenhard R W. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires. *Bull Amer Meteor Soc*, 1955, 36 (3):1-5.
- [13] Imai I. Studies on ice accretion. *Researches on Snow and Ice*, 1953, 3(1): 35-44.
- [14] McComber P, Govoni J W. An analysis of selected ice accretion measurements on a wire at Mount Washington. *Proceedings of the Forty-second Annual Eastern Snow Conference*, Montreal, Canada, 1985.
- [15] Chainé P M, Castonguay G. New approach to radial ice thickness concept applied to bundle-like conductors. *Industrial Meteorology Study IV*, Environment Canada, Toronto, 1974.
- [16] Goodwin III E J, Mozer J D, DiGioia Jr A M, et al. Predicting ice and snow loads for transmission line design. *Pennsylvania Power and Light Co Allentown Pa*, 1983.
- [17] Jones K F. A simple model for freezing rain ice loads. *Atmos Res*, 1998, 46(1): 87-97.
- [18] Musilek P, Arnold D, Lozowski E P. An ice accretion forecasting system (IAFS) for power transmission lines using numerical weather prediction. *SOLA*, 2009, 5: 25-28.
- [19] Pytlak P, Musilek P, Lozowski E, et al. Evolutionary optimization of an ice accretion forecasting system. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(7): 2913-2929.
- [20] Ramer J. An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output. *International Conference on Aviation Weather Systems*, 5th, Vienna, VA, 1993: 227-230.
- [21] Langmuir I, Blodgett K. Mathematical investigation of water droplet trajectories. *Atmospheric Phenomena*, 1946: 335-347.
- [22] Stallabrass J R. *Trawler icing: a compilation of work done at NRC*. Ottawa: National Research Council of Canada, 1980.
- [23] Makkonen L. Modeling of ice accretion on wires. *J Clim Appl Meteor*, 1984, 23(6): 929-939.
- [24] Finstad K J, Lozowski E P, Gates E M. A computational investigation of water droplet trajectories. *J Atmos Ocea Tech*, 1988, 5(1): 160-170.
- [25] Franc-Para, Morency, Tezok F, et al. Anti-icing system simulation using CANICE. *J Aircraft*, 1999, 36(6): 999-1006.
- [26] Wright W B. User Manual for the NASA Glenn Ice Accretion Code LEWICE. Version 2.2.2. NASA: 2002.
- [27] Fu P. Modelling and simulation of the ice accretion process on fixed or rotating cylindrical objects by the boundary element method. *Chicoutimi: Université du Québec à Chicoutimi*, 2004.
- [28] Fu P, Farzaneh M, Bouchard G. Two-dimensional modelling of the ice accretion process on transmission line wires and conductors. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 46(2): 132-146.
- [29] Lozowski E P, Stallabrass J R, Hearty P F. The icing of an unheated, nonrotating cylinder. Part I: A simulation model. *J Clim Appl Meteor*, 1983, 22(12): 2053-2062.
- [30] Cansdale J T, Gent R W. Ice Accretion on Aerofoils in Two-Dimensional Compressible Flow-A Theoretical Model. *Royal Aircraft Establishment Technical Report*, 1983, 82128.

(下转19页)

基于中尺度和微尺度的复杂地形大风 预报方法研究

庄文兵¹ 章涵² 王建¹ 田浩² 赵建平¹ 何君² 金莹³

(1 国网新疆电力公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 2 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074;
3 象辑知源(武汉)科技有限公司, 北京 100084)

摘要: 复杂地形气象预报误差主要与模型对地形特征的准确描述、对物理动力过程的假设有关。采用融合中尺度数值天气预报系统(WRF)和微尺度风速模拟模型(CalMet)的方案,既能考虑大尺度、中尺度和微尺度上的动力学过程,又能最大程度上体现局部地形影响。融合预报结果与中尺度预报结果的对比分析表明,融合预报方法能更好地模拟复杂地形的大风过程,对于复杂地形地区大风风灾预测、预警和分析有重要的参考价值 and 指导意义。

关键词: 中尺度, 复杂地形, CalMet, 风速预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.002

Study of Wind Forecasts Based on Numerical Modeling and Downscale Diagnostics

Zhuang Wenbin¹, Zhang Han², Wang Jian¹, Tian Hao², Zhao Jianping¹, He Jun², Jin Ying³

(1 State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011 2 NaRi Group Corporation/State Grid China
Electric Power Research Institute, Wuhan 430074 3 Xiangjizhiyuan (Wuhan) Technology Co., Ltd, Beijing 100084)

Abstract: The error of meteorological forecast for complex terrain is mainly related to the model accurateness for describing terrain features and the physical dynamic processes. Integrating the mesoscale numerical weather forecasting system WRF and the CalMet model on micro-scale wind velocity simulation, it may account the dynamic processes on large scale, mesoscale and micro-scale, also may describe the local terrain effect upto the maximum extent. The results of the integrating model comparing to the mesoscale prediction show that the integrating forecasting method has a better capability of predicting the gale in complex terrain, and gives important reference and a significant guidance for forecasting, early warning and analyzing the windstorm in complex terrain.

Keywords: mesoscale, complex terrain, CalMet, wind forecast

0 引言

复杂地形地区风速预报准确率一直是难点和重点。目前预报研究主要集中在应用WRF(中尺度数值预报模式)对研究区域做不同边界层参数化方案模拟,发现参数化方案实用性因地而易,无明显统一变化规律。李艳等^[1]对中国沿海滩涂与内陆复杂高原山地进行两种不同边界层参数化方案(YSU/MRF)的对比检验,并选择WRF/Noah/YSU作为典型地形的风场预报系统,发现预报系统对春、秋季的预报效果优

于夏季,日变化的预报效果因地形而异,无统一变化规律。张华等^[2]应用WRF模型模拟分析风力发电场风速,并选用不同陆面过程方案,发现WRF模式能够较好地反映电场近地面风场情况,且模拟结果受到地形及地表粗糙度的影响较大。张德等^[3]还利用WEST(加拿大风资源数值模拟系统)进行中国地区风场模拟,发现WEST对低海拔地区模拟效果较好,而对中西部高海拔地区模拟效果欠佳。

随着计算机计算能力增强,计算成本不断降低,人们开始将中尺度模式和微尺度模式进行结合应用。程雪玲等^[4]就将WRF与CFD模式的Fluent软件耦合到一起做高分辨率风速分布资料,为风场的精细化模拟预报提供了一种耦合方法。其还利用地形高程数据建立地形计算网格模型,为复杂地形的风场研究做准

收稿日期: 2016年11月11日; 修回日期: 2016年12月27日

第一作者: 庄文兵(1984—), Email: dommo@126.com

资助信息: 国网新疆电力公司电力科学研究院科技项目
(5230DK15003s)

备^[5]。何晓峰等^[6]将耦合MM5中尺度模式和WindSim软件应用到鄱阳湖复杂地形风场研究中,发现对10 m高度的风速模拟有所改善。方艳莹等^[7]对WRF/WT和WRF/WAsP两个模型耦合风场预报方法做了对比分析,发现WRF/WT模式系统在风速频率分布不满足Weibull分布的情况和陡峭地形条件下有较好的模拟效果,相对WRF/WAsP有明显优势。

由于研究区域地貌复杂多样,地势高低起伏,山地盆地相互交错,数值模式虽然对中尺度的背景流场有较好的模拟能力,但不能准确模拟小尺度地形效应对流场产生的影响。因此采用中尺度模式预报,结合微尺度降尺度诊断的方法,既保留了中尺度模式对背景场的模拟,又利用了降尺度诊断模型中微气象学的相应理论,最终获得较合理和准确的小尺度要素场。CalMet降尺度模型经过了十多年的开发更新,已经非常成熟,其模型的核心部分是诊断风场和微气象模块,充分考虑地形因子和微气象原理,因此也被用来做复杂地形风场研究和多尺度耦合研究与应用。如周荣卫等^[8]建立了一个由MM5、CalMet以及风能资源参数计算模型组成的模式系统,并检验了该系统在我国不同地形下对风资源的评估能力。张弛等^[9]用WRF/CalMet做了近地面精细化风场的动力模拟试验,发现在层结相对稳定时模拟的准确度较高。王文勇等^[10]利用WRF/CalMet模式模拟山区风场,发现耦合模拟的结果与真实值更加接近,指出了WRF/CalMet对山区大气流场模拟的可行性。其他研究也表明^[11-12]CalMet使降尺度结果更加准确,但是,也有研究^[13]指出只靠提高中尺度模式的分辨率就能够模拟出较准确的风场。

本文选取新疆2014年4月大风灾害天气过程,分别利用数值模拟方法、WRF/CalMet降尺度融合方法来模拟此次大风过程。并且比较两种方法的准确性,找到更有效的大风模拟预报方法。

1 研究区概况与资料说明

1.1 资料说明

本文资料包括电网沿线微气象观测资料、国家基本站新疆地区资料、全球模式预报资料、土地利用数据、地形数据。

1.1.1 资料来源

微气象数据来自电网微气象监测的10个微气象站(表1)。气象站数据来源于中国气象局国家级气象资料存储检索系统资料,将其中离电网线路较近的哈密市十三间房站、哈密市鄯善站和巴里坤站3站地面气象观测数据用于CalMet降尺度中,站点信息见表2。全球背景场资料为NCEP/NCAR提供的全球再分析资料,

空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间分辨率为6 h,该数据同化了全球卫星资料、降雨观测和其他加入国际数据交换的气象观测站的资料,是目前世界上使用较广泛,稳定性和准确性都较好的初始场资料。土地利用数据来自美国地质勘探局(USGS)的GLCC数据库中欧亚部分,精度1000 m,数据时间为2000年(<http://Ita.cr.usgs.gov/GLCC>)。地形数据来自srtm.csi.cgiar.org的SRTM数据,精度90 m,格式为GEOTIFF。

表1 微气象观测站基本信息
Table 1 Information of automatic weather station on towers along power lines

线路	编号	坐标	风速风向仪高度(m)	测风时间段
1	030	43.112°N, 89.458°E	48	2014年4月20—26日
	155	43.088°N, 90.175°E	66	
	296	43.173°N, 90.978°E	52	
	365	43.169°N, 91.381°E	51	
	385	43.169°N, 91.506°E	49	
399	43.178°N, 91.590°E	70		
2	472	43.143°N, 92.006°E	34	
	544	43.071°N, 92.427°E	36	
	620	43.124°N, 92.858°E	35	
	719	42.995°N, 93.338°E	42	

表2 国家气象站信息
Table 2 Information of national weather stations

站名	站号	坐标	测站高度(m)	测风时间段
十三间房	52495	43.217°N, 91.733°E	721.4	2014年4月20—26日
鄯善	51581	42.85°N, 90.233°E	398.6	
巴里坤	52101	43.6°N, 93.05°E	1679.4	

1.1.2 观测数据质量控制

由于原始观测数据有很多的误差来源,针对所有接入的气象观测资料除了进行格式检查外,还要对主要资料进行要素级的质量检查,本文依据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)对数据进行检查,包括气候极值检查、台站极值检查、数据完整性检验、合理性检验、内部一致性检查和时间一致性检查,根据检查的综合结果对每一个被检查的要素给出质量标志,在数据被使用前提供参考。

数据完整性检验如表3所示,包括应测、缺测、完整率统计,结果表明数据的连续性较好,7个观测塔完整率达到80%以上,一个观测塔(620号)完整率过低,只有18%,因此不对620号观测塔进行对比分析。

合理性检验标准及结果如表4所示,包括范围检验和趋势检验。结果表明,观测数据均在合理范围之内。

1.2 研究区概况

研究区域位于新疆维吾尔自治区内,共有两段电网

表3 完整性检验
Table 3 Integrity check

编号	年月	风速			风向		
		应测数据	缺测数据	完整率 (%)	应测数据	缺测数据	完整率 (%)
030			140	86.11	140	86.11	
155			143	85.81	143	85.81	
296			530	47.42	530	47.42	
365			140	86.11	140	86.11	
385	2014年4月20—26日	1008	192	80.95	1008	192	80.95
399			140	86.11		140	86.11
472			188	81.35		188	81.35
544			270	73.21		270	73.21
620			821	18.55		821	18.55
719			141	86.01		141	86.01

线路,吐哈一线长369.6 km,吐哈二线长369.9 km,两段线路上微气象装置均在91°E, 43°N附近(表1),每个微气象站装置之间的经向方向距离约为9.3~79 km,纬向方向距离约为0.4~14.3 km。两段线路毗邻天山山脉东麓,北面有高山,南面有盆地,地形差异很大(图1)。



图1 研究区地形地貌示意图

Fig. 1 Topographic schematic of research domain

2 模型简介

本文采用的中尺度模式为NCEP、NCAR等科研机构为中心开发的一种中尺度数值天气预报模式WRF-ARW (Weather Research and Forecasting)。WRF模式为完全可压缩的非静力模式,水平网格采用Arakawa-C网格,垂直方向上采用地形追随坐标。WRF模式提供单向或双向网格嵌套,可选择多种物理过程及参数化方案,主要包括:微物理过程、长波辐射、短波辐射、积云参数化、边界层方案、表面层和陆面过程方案等。它是目前在气象领域应用最广泛的中尺度天气预报模式。

表4 合理性检验标准
Table 4 Data validation check

主要参数	高度 (m)	合理范围	超出范围组数
平均风速 (m/s)	80	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
	70	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
	50	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
	30	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
	10	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
风向 (°)	80	$0 \leq \text{平均值} < 360^\circ$	0
	10	$0 \leq \text{平均值} < 360^\circ$	0
1 h 平均风速变化	—	$< 6.0 \text{ m/s}$	0
1 h 平均气温变化	—	$< 5^\circ\text{C}$	0
3 h 平均气压变化	—	$< 1 \text{ kPa}$	0

本文采用的降尺度模型为CalMet模型,是美国EPA推荐的环境空气质量模拟系统中用来模拟地形风场的边界层气象学模型。它基于质量守恒原理对风场进行诊断、对地形动力学、斜坡流、热力学阻塞等进行调整与诊断分析,考虑地形动力学和微气象大气边界层湍流相似性理论过程,输出混合层高度、稳定度等基于3D网格点的气象要素。在降尺度运算的过程中融合观测数据与模式预报数据,考虑高精度的地形和土地利用类型,在原理上非常适用于复杂地形气象要素诊断分析。

3 数值模式预报

3.1 数值预报区域

中尺度预报模式WRF-ARW的区域选择如图2所示。中心为电网线路中段位置,中心经纬度为43°N, 90°E。外层嵌套分辨率为27 km,中层嵌套分辨率为9km,内层嵌套为3 km。外层覆盖面积984.15万 km²,中层覆盖面积428.652万 km²,内层覆盖面积9.9099万 km²。

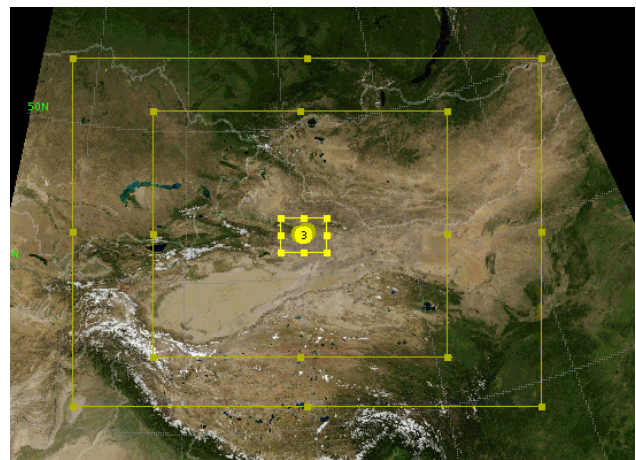


图2 中尺度WRF模式定义域设置示意图

Fig. 2 WRF domain

模式纳入了足够多的背景场信息。

3.2 数值预报时间

2014年4月21日00时—25日23时，研究区内发生了一次严重的寒潮大风天气过程，新疆电网吐哈一段和吐哈二段在4月23日均出现跳闸事故，造成了严重的经济损失。因此本文模拟预报时间为2014年4月的这次大风过程。数值模式的预报时间分辨率为逐10 min。

3.3 物理方案选择

由于WRF模式可选择多种物理过程及参数化方案，每种物理过程和参数化方案侧重点不同，即使对同一区域的同一气象要素进行模拟，不同方案得到的预报结果也大不相同，因此需要利用集合预报的方式选出最佳的预报结果。我们首先给出多种参数化方案组合，进行多任务集合预报，然后通过对比观测数据和预报数据的统计结果，包括相关系数、均方根误差等，选出模拟效果最好的参数化方案组合。

本研究针对每个微气象站进行多任务集合预报，一共10个微气象站14种参数化方案，即14个预报任务，140个站点时间序列提取任务。在14种方案中，考虑了大气边界层类型4种（PB1：YSU方案边界层，PB2：Mellor-Yamada-Janjic TKE方案，PB5：MYNN2.5层TKE方案，PB7：ACM2方案），城市下垫面类型3种（SU0：不考虑城市下垫面类型，SU1：考虑单层城市下垫面，SU2：多层城市下垫面），地表类型2种（SF2：unified Noah 路面模型，SF3：RUC路面模型），土壤类型4种（SC1：修正的MM5 Monin-Obukhov方案，SC2：Monin-Obukhov方案，SC5：MYNN方案，SC7：Pleim-Xiu方案）。还考虑了有无noah_mp陆面过程模块，该模块可选择多种陆气交换过程中的关键系数，本文考虑了与湍流扩散线相关的3种不同的拖拽系数（OP1：Monin-Obukhov常数，OP2：原始Noah常数，OP3：MYJ常数，OP4：YSU常数）。此外，方案名称中用no0和no1分别表示无noah_mp过程和有noah_mp过程。这些方案基本上涵盖了所有数值模式的可选参数化方案。其中边界层方案最为关键，它直接决定了边界层内大气运动遵从的物理规律，PB1方案有明确的卷夹层且在不稳定层中湍流动能扩散线呈抛物线状。PB2方案为ETA层参数化方案，特点是一维诊断湍流动能结合局地垂直混合过程，PB5方案的特点是可以预测次网格的湍流动能，PB7的特点是假设边界层大气的不对称对流运动，即局地向下混合结合非局地向混合过程。这些边界层方案都有自己侧重的优势，对于地形复杂地区各种湍流运动过程都可能出现的条件下这些方案都有

可行性。此外，在复杂地形下，不同的陆面过程、土壤类型对近地面天气过程有很大的影响。SF2假设土壤温湿通量层有4层，且考虑陆面雪的比例和冻土物理过程，对新疆一些山地和高寒地区的模拟会更加合理，SU3与SU2物理机制相似，但土壤温湿通量层增加到6层。因此两种方案对比可以反映出下垫面能量和水分传输过程的深度对近地面大气运动的影响。此外，虽然新疆地区城市下垫面复杂度较东部发达地区小，但仍需加以考虑，因此有无城市下垫面、单层还是多层城市下垫面都要模拟，从模拟结果中反推出最优方案。

3.4 站点提取与方案对比

先确定各微气象观测设备所在高度，将预报风速在该高度上做垂直差值，再用最邻近点法做水平差值，得到微气象观测设备所在位置对应的预报数据，然后对预报结果和观测值进行对比分析。

预报结果与观测数据的对比分析得到的绝对误差和相关系数如表5所示。结果表明，尽管10个站点相隔很近，但是最优参数化方案不是完全一致：030、544号站得到的最优方案为SU1PB7SC7SF7no0NU2，155号站的最优方案为SU1PB5SC5NU6SF3，296号站的最优方案为SU1PB7SC7NU4SF2，719号站的最优方案为SU1PB1SC1NU6SF3，365、385、399、472号站的最优方案为SU1PB5SC2NU6SF3，620号站的最优方案为SU1PB5SC1NU6SF3。这也说明了利用参数化集合预报的优势和必要。其中4个微气象站最优方案都为SU1PB5SC2NU6SF3，如果不用集合预报的方法，可以选用该方案进行统一预报以节省时间和计算资源。

表5 集合参数化方案预报结果
Table 5 Ensemble parameterization results

微气象站站号	最优方案名称	平均误差	相关系数
030	SU1PB7SC7SF7no0NU2	1.689004	0.489064
155	SU1PB5SC5NU6SF3	2.654931	0.543326
296	SU1PB7SC7NU4SF2	4.065386	0.676176
719	SU1PB1SC1NU6SF3	2.072327	0.462699
544	SU1PB7SC7SF7no0NU2	2.354298	0.308254
365	SU1PB5SC2NU6SF3	3.262691	0.639623
385	SU1PB5SC2NU6SF3	5.363964	0.286543
399	SU1PB5SC2NU6SF3	3.611419	0.727915
472	SU1PB5SC2NU6SF3	5.834655	0.414252
620	SU1PB5SC1NU6SF3	1.327692	0.910592

图3为各微气象观测站最优方案预报结果与观测数据的对比图。如图可见，数值模式预报可以捕捉风速随时间变化的总趋势。其中模式对030、155、296、365、719号观测站模拟效果较好，能较好地模

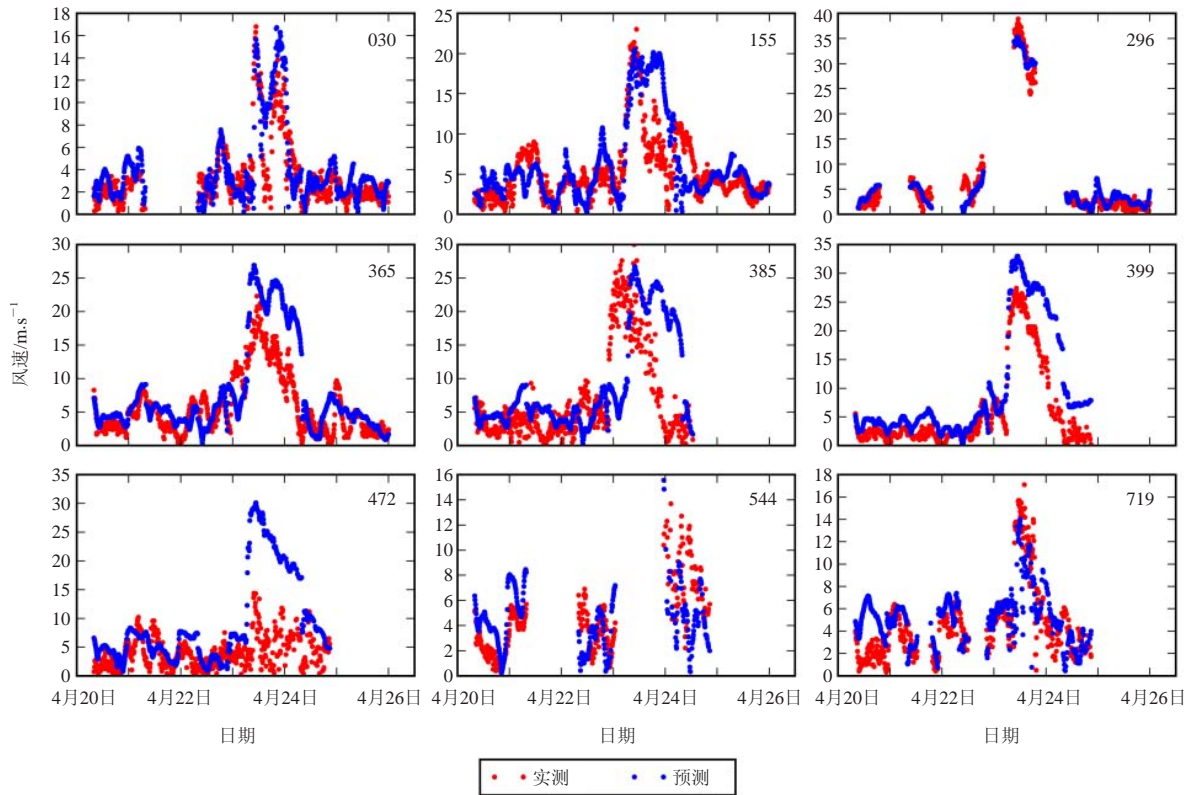


图4 CalMet降尺度得到的风速与观测风速对比图
(标题为微气象观测塔编号)

Fig. 4 Comparison between observations and CalMet downscaling diagnostics
(Titles are tower IDs)

拟到大风开始和结束的时间，大风最大值的模拟与观测也较接近。模式对385、399号观测站位置的大风起止时间模拟有一定的滞后，但大风最大值与观测也比较接近。对472号观测站模拟效果欠佳，明显高估了大风最大值。此外，由表5统计发现模式对620号观测站模拟的相关性最高误差最小，但是该观测站提供的观测数据量过少而未通过完整性检验（表3），无法给出客观评价，故在此不予讨论。

4 CalMet降尺度模拟

4.1 降尺度模拟区域

本文降尺度模拟旨在考察对比WRF/CalMet融合模拟与WRF单独模拟对风速预报的准确性。因此，降尺度区域选择中尺度模拟预报结果中绝对误差较大的385、395、472号3个观测站所在范围为中心，即以90.23°E，42.78°N为左下网格起始点，降尺度网格距离设置为1000 m，X方向网格数265，Y方向网格数80。垂直高度定义10层，分别为34、49、51、70、320、640、1200、2000、3000和4000 m，其中前3层分别对应3个观测站所在高度。选择大地基准面并将

经纬度坐标转换为通用横轴墨卡托坐标。

4.2 降尺度诊断时间

降尺度诊断时间与中尺度模拟时间相同，即为2014年4月21日00时—25日23时。时间分辨率为10 min。

4.3 站点提取与数据分析

在模拟区域设置里已将研究对象所在的高度层设置为垂直高度，因此在站点数据提取中，只需要用最邻近网格方式提取观测塔对应经纬度上的风速数据。并将降尺度结果和观测数据进行对比分析。

结果显示，296、365、385、399和472号观测站降尺度之后平均误差减小，其中，385号观测站的绝对误差为4.647267，相关系数为0.369514；399号观测站的绝对误差为2.191520，相关系数为0.697748；472号观测站的绝对误差为4.186236，相关系数为0.263354。如图4所示，385、399、472号3个站风速趋势预报准确，大风最大值偏差较小。其中，299号观测站的大风开始和结束的时间被很好地捕捉。296、365、719号3个站误差有所减小但是最大风速在降尺度过程中未能模拟出来。544号降尺度之后平均误差

表6 降尺度预报结果
Table 6 CalMet downscaling results

微气象站站号	平均误差	相关系数
030	4.763190	0.399784
155	3.719442	0.441573
296	3.635110	0.446160
719	2.235418	0.458132
544	2.585170	0.647313
365	2.567843	0.612213
385	4.647267	0.369514
399	2.191520	0.697748
472	4.186236	0.263354

增加,但相关系数提高到了0.647313,且高估了大风最大值。030号误差增加较大,主要原因是其所在的纬度位于降尺度模拟网格的边缘,模拟效果受到影响。

5 结果与讨论

由本文对大风过程的模拟可见,本次电网沿线大风过程开始于4月23日白天,结束于4月24日凌晨,大风最大值出现在23日上午到中午这段时间,其中365、385、399和472号站的10 min平均最大风速达到20 m/s以上,296号站甚至超过30 m/s达到狂风级别。

由图3和图4对比可见,WRF单独预报能较好地模拟最大风速小于20 m/s的各站,但是由于中尺度的精度限制,对局地低值区有过高估计,譬如472号观测站,该观测站的观测数据明显达不到大风级别,但是数值模拟依然给出过高预测,当融合CalMet降尺度过程后,模拟结果有非常明显的改善。此外,经过降尺度诊断的3个站预报绝对误差都有所减小,385号观测站减小了13%,399号观测站误差减小了39%,472号观测站误差减小了28%。385号观测站大风起止预报时间滞后的现象有所改善,399号观测站大风起止时间预报的滞后问题得到解决,472号观测站大风最大值预测过高的问题得到解决。无论是统计大风起止时间还是大风最大值上,利用WRF/CalMet融合方案都得到了很好的解决。可见CalMet降尺度在WRF的基础上大大地提高了预报准确性。WRF/CalMet融合方案能够更好捕捉局地效应,模拟复杂地形风速变化,预报更准确。另外,由图3和图4对比也发现030、155、719这几个站点,WRF/CalMet融合方案没有提高模拟效果,155站虽然相关系数增加,但是误差也增大。这主要由于模拟点在降尺度模拟网格的边缘,效果不

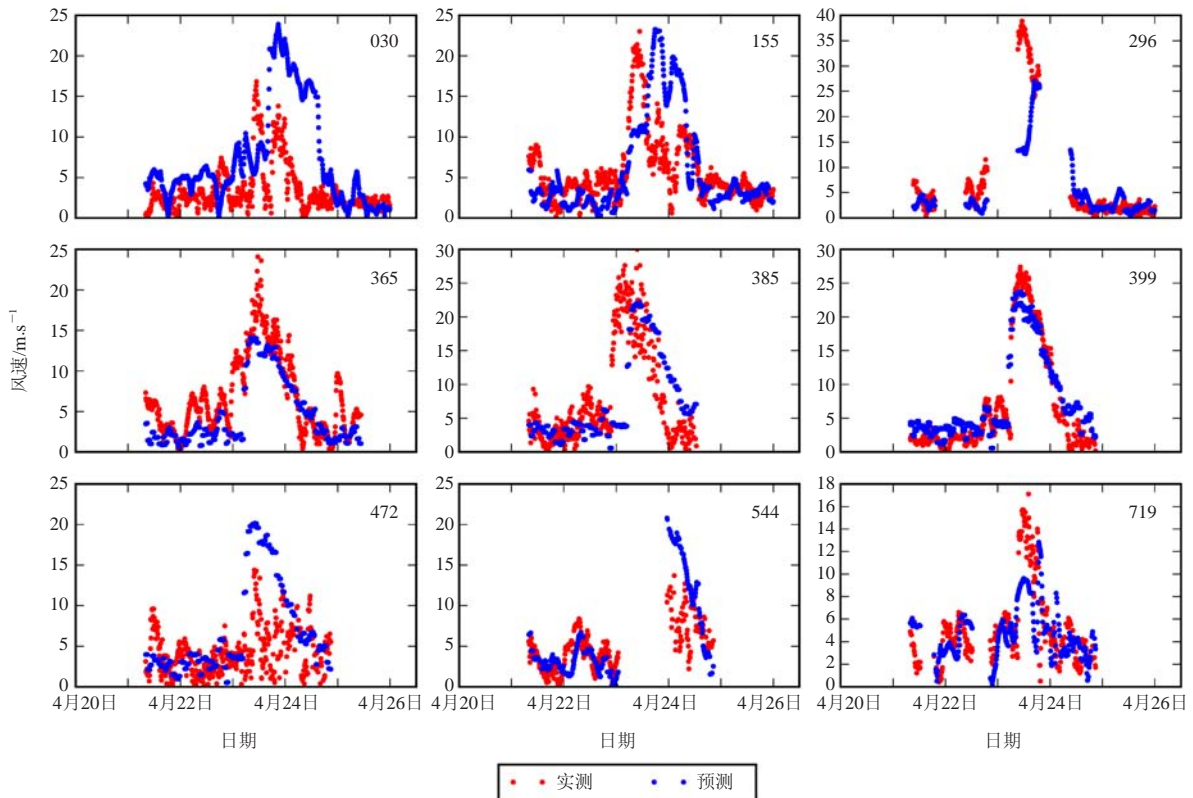


图4 CalMet降尺度得到的风速与观测风速对比图
(标题为微气象观测塔编号)

Fig. 4 Comparison between observations and CalMet downscaling diagnostics
(Titles are tower IDs)

理想,如果有更大范围的地形数据,能将这几个点置于网格中心位置,效果应该会有所提高。

本文通过研究数值模式和WRF/CalMet融合两种预报方法,对新疆地区大风灾害过程进行预报,并与实况进行对比分析。研究显示,当研究站点设置在降尺度模拟网格中心位置时,WRF/CalMet融合预报方案能够修正数值模式预报的误差,对大风出现和结束的时间预报更为准确,但当站点所在位置在降尺度网格边缘时,模拟效果较差。本文局限于地形数据的覆盖面积及土地利用数据的分辨率,在CalMet降尺度诊断中的空间分辨率最高只能为1 km,地形数据只能覆盖一部分电网微气象站点。如果能够获得更高分辨率的土地利用数据,进一步降低空间插值带来的误差,或者获得更大覆盖范围的地形数据,从理论上讲,风速诊断准确性会得到进一步提高。本研究表明,融合预报方法既能考虑大尺度、中尺度和微尺度上的动力学过程,又能体现局部地形影响,对于复杂地形地区大风风灾预测、预警、分析有一定的指导意义和实践价值。

参考文献:

- [1] 李艳,成培培,路屹雄,等.典型复杂地形风能预报的精细化研究.高原气象,2015(2):413-425.
 - [2] 张华,孙科,田玲,等.应用WRF模型模拟分析风力发电场风速.天津大学学报(自然科学版),2012(12):1116-1120.
 - [3] 张德,朱蓉,罗勇,等.风能模拟系统WEST在中国风能数值模拟中的应用.高原气象,2008,27(1):202-207.
 - [4] 程雪玲,胡非,曾庆存.复杂地形风场的精细数值模拟.气候与环境研究,2015,20(1):1-10.
 - [5] 程雪玲,胡非.复杂地形网格生成研究.计算力学学报,2006,23(3):313-316.
 - [6] 何晓凤,周荣卫,朱蓉.MM5与CFD软件相结合对复杂地形风能资源模拟初探——以鄱阳湖地区为例.资源科学,2010,32(4):650-655.
 - [7] 方艳莹,徐海明,朱蓉,等.基于WRF和CDF软件结合的风能资源数值模拟试验研究.气象,2012,38(11):1378-1389.
 - [8] 周荣卫,何晓凤,朱蓉.MM5/CALMET模式系统在风能资源评估中的应用.自然资源学报,2010,25(12):2101-2113.
 - [9] 张弛,王东海,巩远发.基于WRF/CALMET的近地面精细化风场的动力模拟试验研究.气象,2015,41(1):34-44.
 - [10] 王文勇,陈楠.山区风场的WRF/CALMET模式模拟.西南交通大学学报,2010,45(6):990-998.
 - [11] 马明亮,张加昆,魏鸿业,等.基于CALMET对复杂地形下风场的模拟研究.青海环境,2010,20(4):181-184.
 - [12] 成培培.复杂地形风能预报的精细化研究.南京:南京信息工程大学,2014.
 - [13] 佐河疆,孙银川,崔洋.WRF模式三种降尺度方案在风功率预报业务中的效果对比.电网与清洁能源,2013,29(10):105-108.
-
- (上接12页)
- [31] Makkonen L. Heat transfer and icing of a rough cylinder. Cold Regions Science and Technology, 1985, 10(2): 105-116.
 - [32] Makkonen L. Modeling power line icing in freezing precipitation. Atmos Res, 1998, 46(1): 131-142.
 - [33] Lebatto E, Farzaneh M, Lozowski E P. Three-dimensional morphogenetic model of ice accretion on a non-rotating cylinder. Proc 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, 2005.
 - [34] 滕中林. 电线结冰厚度随高度的变化. 天气月刊, 1959.
 - [35] 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨. 气象学报, 1982, 40(1): 13-23.
 - [36] 江祖凡. 电线积冰增长速度的研究. 科学通报, 1983, 15: 928-931.
 - [37] 蒋兴良, 孙才新. 三峡地区导线覆冰的特性及雾凇覆冰模型. 重庆大学学报, 1998, 21(2): 16-19.
 - [38] 孙才新, 蒋兴良, 熊启新, 等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 141-145.
 - [39] 刘春城, 刘佼. 输电线路导线覆冰机理及雨凇覆冰模型. 高电压技术, 2011, 37(1): 241-248.
 - [40] 梁曦东, 李雨佳, 张轶博, 等. 输电导线的覆冰时变仿真模型. 高电压技术, 2014, 40(2): 336-343.
 - [41] 朱永灿, 黄新波, 贾建援, 等. 输电导线覆冰生长及影响因素数值分析模型. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 120-125.
 - [42] 吴息, 孙朋杰, 熊海星, 等. 利用常规气象资料建立的导线覆冰模型. 大气科学学报, 2012, 35(3): 335-341.
 - [43] 吴息, 孙朋杰, 刘渝, 等. 基于雾条件下能见度估算的导线覆冰气象模型. 应用气象学报, 2012, 23(6): 755-762.
 - [44] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线故障率影响的时空评估. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41.
 - [45] 朱斌, 潘玲玲, 邹扬, 等. 考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 79-84.
 - [46] 电力规划设计总院. 电力工程气象勘测技术规程: DL/T 5158—2012. 北京: 中国计划出版社, 2012.
 - [47] 谢运华. 三峡地区导线覆冰与气象要素的关系. 中国电力, 2005, 38(3): 35-39.
 - [48] 廖玉芳, 段丽洁. 湖南电线覆冰厚度估算模型研究. 大气科学学报, 2010, 33(4): 29-30.
 - [49] 温华洋, 田红, 唐为安, 等. 安徽省电线积冰标准冰厚的气象估算模型. 应用气象学报, 2011, 22(4): 747-752.
 - [50] 闻新, 周露, 李翔, 等. MATLAB神经网络仿真与应用. 北京: 科学出版社, 2003.
 - [51] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机. 自动化学报, 2000, 26(1): 32-42.
 - [52] 殷水清, 赵珊珊, 王遵娅, 等. 全国电线结冰厚度分布及等级预报模型. 应用气象学报, 2009, 20(6): 722-728.
 - [53] 郑振华, 刘建生. 遗传算法与BP神经网络相结合的输电线路覆冰厚度预测方法. 电网与清洁能源, 2014(4): 27-30.
 - [54] 戴栋, 黄筱婷, 代州, 等. 基于支持向量机的输电线路覆冰回归模型. 高压电技术, 2013, 39(11): 2822-2828.
 - [55] 侯雨仲, 王秀丽. 气象过程信息挖掘与输电线路覆冰预测. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 43-49.
 - [56] 尹子任, 苏小林. 基于粒子群算法优化支持向量机的输电线路覆冰预测. 电力学报, 2014, (1): 6-9.
 - [57] 黄宵宁, 许家浩, 杨成顺, 等. 基于数据驱动算法和LS-SVM的输电线路覆冰预测. 电力系统自动化, 2014, (15): 81-86.

基于相关分析的电力微气象站选址研究

马琳¹ 邓帮飞² 李红云¹ 黄文娟¹ 万明阳³

(1 北京国网富达科技发展有限公司, 北京 100070; 2 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 400000;
3 象辑知源(武汉)科技有限公司, 北京 100084)

摘要: 基于湖北省气象站的观测资料, 分析了微气象数据的偏相关系数与站点水平距离的关系, 利用正则化的最小二乘法进行指数拟合, 得到对于微气象数据相关距离的最小估计, 并对微气象数据统计值与站点海拔高度进行了线性拟合, 结果对于电力微气象站选址距离的确定具有参考意义。

关键词: 电力微气象站, 微气象数据, 相关分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.003

Study of Sitting a Micro-Station Based on Correlation Analysis

Ma Lin¹, Deng Bangfei², Li Hongyun¹, Huang Wenjuan¹, Wan Mingyang³

(1 Beijing State Grid Fuda Science & Technology Development Co., Ltd, Beijing 100070
2 Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400000
3 Xiangjizhiyuan (Wuhan) Technology Co. Ltd., Beijing 100084)

Abstract: This article analyzes correlations between micrometeorological data and horizontal distances at different sites in Hubei Province. Then an exponential regression is carried out by normalizing the least square method in order to obtain the minimum estimation of relative distances to select a site of micro-station. Additionally, the fitting statistics are also performed between meteorological data and altitudes. The result gives a reference to determine the appropriate distance of setting a micro-station.

Keywords: micro-station, micrometeorological data, site selection

0 引言

近年来, 国家电网规划建设交流1000 kV和直流±800 kV特高压输电系统, 以加快我国电力事业的发展, 保证经济稳定持续快速发展^[1]。然而随着电网系统变电站、输电线路的覆盖面不断扩大, 大风、雷电、雾霾、冰冻等灾害性天气对输电通道及变电站安全运行产生的侵扰随之增大^[2], 尤其一些极端天气会直接导致线路故障停运, 例如2008年冬季的雨雪冰冻灾害, 对电网的运行、电力的供应和电网企业的经营效益造成了极为严重的影响^[3]。电网安全生产需要从输电线路及变电站气象条件、环境条件、风险因素和地理位置开展动态评估, 从而指导运维检修计划的开展。

电力微气象站是安装在输电线路杆塔上的微型气象站, 通过无线网络将温度、湿度、气压、风速、雨

量、光辐射等微气象数据实时传输到监控系统, 有助于电力部门判断杆塔附近区域的气象状况^[4-5]。由于我国自动气象站大多建立在城镇和郊区, 其观测记录可反映该城镇附近的气象条件, 但难以反映电网沿线峡谷、风口、高山等复杂地形的实际气象情况, 因此迫切需要在输电通道增设电力微气象站, 以掌握更详尽的电网微气象资料, 在这种情况下合理的电力微气象站选址规划变得尤为重要。

本文基于湖北省71个国家气象站的观测数据, 通过对各站点间气象数据关联性的统计分析, 拟合出微气象数据的相关系数与气象站距离的关系, 对电力微气象站的布局规划给出了初步的建议。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用气象数据来自于湖北省71个国家基准站的逐小时观测记录, 站点分布如图1所示。气象数据种类包括气温、湿度、气压、降水量、风速、露点温度, 起止时间为2015年12月1日—2016年9月30日。高

收稿日期: 2016年11月9日; 修回日期: 2016年12月25日
第一作者: 马琳(1984—), Email: mmlaaqi@163.com
资助信息: 国家电网公司总部科技项目《电网气象监测网组网及应用关键技术研究》资助

程数据来自ASTER GDEM V2的30m精度TIF数据。



图1 所用资料站点分布

Fig.1 Geographical distribution of the weather stations

1.2 资料处理方法

1.2.1 关联性计算

两个气象站观测数据的关联性是随着水平距离增大而下降的,本研究的目的在于通过已有观测数据计算出气象要素的关联性随距离变化的衰减系数,从而确定两个相邻微气象站的合理距离。

一般情况下,两组时间序列 X_1 和 X_2 的关联性可由其相关系数来表示^[6]:

$$r_{12} = \text{Corr}(X_1, X_2) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{2i} - \bar{x}_2)^2}}, \quad (1)$$

式中, x_{ki} 表示第 k 个气象站在第 i 个时刻的数据。对于降水等没有明显周期性变化的气象要素,如果两个气象站的相关系数较高,则能够反映出两地由于地理位置接近而具有相似的天气状况。

另一方面,气温等气象要素具有较高的自相关性,各地的气温通常呈现出相似的日变化和年变化趋势,即使两个站点相距较远,其观测数据也具有较高的相关系数。为了突出由于地理因素造成的气象要素相关性,弱化由相似的整体变化趋势带来的影响,本文中采用偏相关系数来表征两个气象站的关联性。具体来讲,以所有气象站的平均值序列 X^M 来代表整个湖北省天气状况的整体变化趋势,则气象站数据对于该平均值序列的偏相关系数 $r_{12(M)}$ 可由公式(2)进行计算^[7]:

$$\begin{cases} X^M = \sum_{k=1}^K X_k \\ r_{jM} = \text{Corr}(X_j, X^M), j=1,2. \\ r_{12(M)} = \frac{(r_{12} - r_{1M}r_{2M})}{\sqrt{(1-r_{1M}^2)(1-r_{2M}^2)}} \end{cases} \quad (2)$$

以武汉站和宜昌站的数据为例,两个气象站的水平距离为260 km,由表1可以看出,其气温和气压相关系数均超过0.95,湿度相关系数超过0.7,这主要是由于较大地理范围内的温、湿、压要素具有相似的日变化规律造成的,并不能说明两地的气象状况具有高度相关性。相对地,表1中所有气象要素的偏相关系数均低于0.5,属于弱相关至中等相关的水平,以两地的水平距离来看,以偏相关系数代表其相关性显然更为合理。为简单起见,若无明确说明,下文中的相关系数均指代偏相关系数。

表1 武汉站和宜昌站气象要素的相关系数和偏相关系数对比
Table 1 Comparison between correlation coefficient and partial correlation coefficient of meteorological elements in Wuhan and Yichang Stations

气象数据	气温	气压	湿度	风速	降水量
相关系数	0.971	0.991	0.773	0.169	0.097
偏相关系数	0.332	0.487	0.248	0.106	0.056

相比于水平距离的变化,气压等变量对于高程的变化更为敏感。由于文中采用的气象站间距离较大,难以比较同一区域内的相关系数随高程的变化趋势,所以本文采用对变量平均值和高程进行线性拟合的方式,这在一定程度上能够反映高程对气象要素的影响。

1.2.2 相关系数参数拟合

气象要素关联性随着站点水平距离增大呈递减趋势,本文以指数衰减函数对其进行拟合:

$$r = e^{(-d/D)}, \quad (3)$$

式中, r 为相关系数, d 为站点水平距离, D 为待拟合参数。以指数衰减函数拟合的好处是,拟合参数 D 可以直接作为气象要素的相关半径。当两个气象站的水平间距大于 D 时,其相关系数的期望值小于 e^{-1} ,关联性较弱,因此气象站的观测数据仅在这个范围以内具有代表意义。对参数 D 的拟合采用最小二乘法:

$$D = \arg \min_D \sum_{i=1}^N [r_i - e^{(-d_i/D)}]^2. \quad (4)$$

由于任意两个气象站点间的地形、地貌、土壤和植被状况相差悬殊,式(3)不可能完全反映出气象要素相关性随距离的变化关系。从 r - d 散点图(图2)上可以看出,相关系数与站点距离表现出明显的负相关关系,但相同距离下的相关系数在纵轴上仍具有较大分布,如果直接采用上述模型进行拟合,将有高估站点相关性的风险。

对于电力微气象站而言,由于电网杆塔通常架设在山区和丘陵地区,较为复杂的局部地形使得小范围内气象状况变化迅速,因此对于气象因子的强相关半

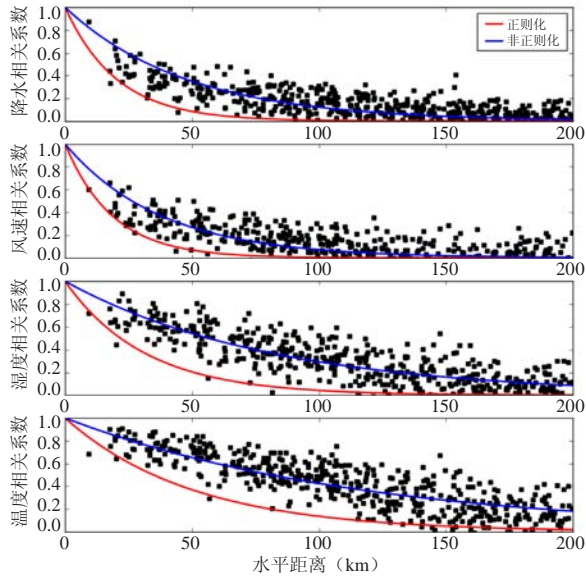


图2 $r-d$ 散点图与拟合曲线
Fig. 2 $r-d$ scatter plot and fitted curve

径估计得越小越好。基于上述考虑，在最小二乘拟合中引入二次正则项作为相关半径 D 的惩罚函数，即：

$$D = \arg \min_D \left\{ \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [r_i - e^{(-d_i/D)}]^2 + \alpha D^2 \right\}, \quad (5)$$

式中， α 为正则化参数，正则项的引入将使得 D 的拟合值偏小。如果选择了恰当的正则化参数，式(2)的计算值将作为该距离下相关系数的下界而非平均值，因而得到的相关半径 D 具有较高的置信度。另一方面，如果 α 取值过大将使得拟合结果失去参考价值。本文中选取 $\alpha=3.5 \times 10^{-5}$ ，既能使参与拟合的多数点位于拟合曲线上方，又不至于将 D 拟合得太小，具体结果如表2所示。

表2 相关系数与水平距离参数拟合结果
Table 2 The results of fitting between correlation coefficients and horizontal distance

	D_0 (km)	D_R (km)	A
降水	49	22	98.7%
风速	45	20	97.9%
湿度	84	33	97.5%
温度	118	52	95.0%

2 气象站观测数据的相关分析

2.1 $r-d$ 参数拟合结果分析

选取所有气象站中海拔差距不超过50 m，水平距离不超过300 km的组合，计算其降水、风速和湿度的相关系数，并分别按公式(4)和(5)进行相关半径的拟合。表2中， D_0 为按照原始的最小二乘法拟合出的相关半径， D_R 为引入正则项后拟合出的相关半径，

参数A为位于正则化拟合曲线上的点所占比例。

由表2及图2可以看出，正则项的引入使得对相关半径的估计明显降低，并且有超过95%的点位于拟合曲线上方，拟合出的曲线可近似作为相关系数的下界线。表2的拟合结果表明，即使在采用偏相关系数表征关联性的情况下，温度和湿度数据仍具有较大的相关范围，而降水量和风速的相关半径相对较小且都接近于20 km。因此，降水量和风速可作为决定气象站水平相关距离的关键因素，即使考虑地形和土壤等因素，在 $D_R=20$ km范围内的常规气象要素也应当具有显著相关性。如果以相关系数大于0.8作为强相关判据，则可以定出气象要素的强相关半径为：

$$D = -\ln 0.8 \cdot D_R \approx 4.5 \text{ km}. \quad (6)$$

气象站的观测数据在这个范围以内具有较强的代表性，因此在地势起伏变化不大的平原或丘陵地区，每4~5 km设置一个微气象站即能够满足大部分的常规气象观测需求。

2.2 气象要素与高程的相关分析

相比于水平距离的变化，温度、气压等要素对高程的变化更为敏感，图3列出了各气象站的气象要素统计值与高程的分布散点图。由于湖北省中部和东部多为平原地区，大部分气象站所处海拔高度都小于200 m。在6个气象要素中，降水、风速和湿度均值与高程无明显相关关系，而气温、露点温度和气压平均值与高程具有明显的负相关关系。根据线性拟合结果，当海拔差距超过200 m时，平均温度的差异在1℃以上，此时气象站观测数据的相关范围主要受垂直高度的影响。由于气温和气压平均值与海拔高度具有较高的线性相关性，因此一个比较经济的气象站选址方案是在山谷和接近山顶处分别设立气象监测装置，利用线性插值来估计不同海拔位置的气温和气压值。

3 总结与讨论

本文基于湖北省71个国家级气象站的逐小时观测记录，分析了常规气象数据的关联性与气象站距离的关系，具体结论如下。

1) 由于各地的气温等气象因子具有相同的整体变化趋势，其相关系数普遍较高，而采用偏相关系数更能够突出由于邻近的地理位置造成的气象关联性。

2) 降水和风速是决定气象站观测数据相关距离的重要因子，本文利用正则化的最小二乘法拟合，估计出气象站常规要素的最小强相关距离为4.5 km。在平原和丘陵地区，每隔4~5 km设置一个电网微气象站较为合适。

3) 气压和气温与海拔高度具有明显的线性相关

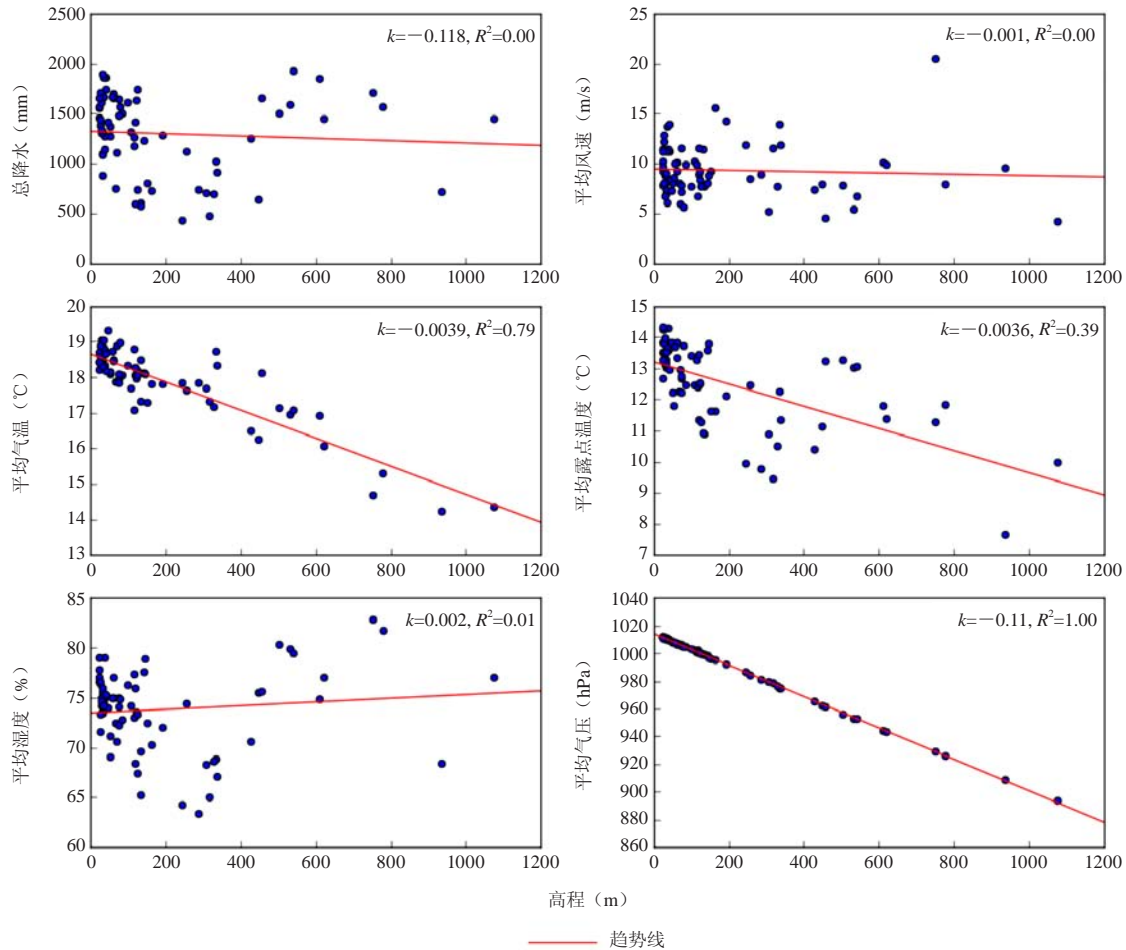


图3 气象数据均值—高程线性拟合图

Fig. 3 Linear fitting of mean values of meteorological data to the altitudes

性，当输电通道沿线地势起伏较大时，可在山顶和山谷分别设立气象监测装置，利用线性内插来估计中间区域的气象要素值。

本文选取的气象站为国家级气象站，由于气象站间距较大，文中只简单地考虑了高程差和水平距离的影响，没有将实际的复杂地形和植被数据纳入考虑，也没有考虑海拔对于风速的影响，因此结论的可靠性有待进一步验证。在实际电网微气象站选址工作中，往往还需要考虑历史气象灾害分布，将气象站建立在易发生覆冰、大风等灾害的地区，以方便对电网气象灾害的监测和预警。

参考文献

- [1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新. 电网技术, 2013, 37(3): 566-574.
- [2] 李庆峰, 范峙, 吴穹, 等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析. 电网技术, 2008, 32(9): 33-36.
- [3] 潘力强, 张文磊, 汤吉鸿, 等. 2008年湖南电网特大冰灾事故综述. 电网技术, 2008, 32(26): 20-25.
- [4] 邓春宇. 微气象实时监测技术在输电线路中的应用. 电力信息化, 2008, 10(6): 67-71.
- [5] 赵宏波, 朱朝阳, 于振, 等. 电力微气象监测与预警系统研究. 华东电力, 2014(5): 912-916.
- [6] 黄嘉佑. 气象统计分析方法与预报方法 (第三版). 北京: 气象出版社, 2007.
- [7] 王海燕, 杨方廷, 刘鲁. 标准化系数与偏相关系数的比较与应用. 数量经济技术经济研究, 2006, 23(9): 150-155.

过去三年新疆大风沙尘分布及电网吐哈线路大风灾害风险分析

王建¹ 田浩² 庄文兵¹ 章涵² 任华² 张陵¹ 金莹³

(1 国网新疆电力公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 2 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 3 象辑知源(武汉)科技有限公司, 北京 100084)

摘要: 采用新疆地区国家级观测站的风速和能见度数据。研究2014—2016年新疆地区大风沙尘分布特征及其相关关系。研究表明, 北疆大风多发生在冬季到第二年春季, 南疆多发生在春末; 北疆沙尘高发时段为3月, 南疆为4—6月。大风有利于沙尘天气的形成, 但是狂风以上强度的风有利于沙尘的迁移和局地沙尘天气的减弱。电网线路上除了与十三间房毗邻的365号路段大风灾害风险较高外, 其他路段大风灾害风险相对较低, 可在该区域进行电网后续建设及扩容。

关键词: 大风, 沙尘, 灾害, 电网, 新疆

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.004

Distribution of Gale Dust in Xinjiang during the Past Three Years and Risk Analysis of Wind Disaster in Tuha Line

Wang Jian¹, Tian Hao², Zhuang Wenbing¹, Zhang Han², Ren Hua², Zhang Ling¹, Jin Ying³

(1 State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011; 2 NanRi Group Corporation/State Grid China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074; 3 Xiangjizhuyuan(Wuhan) Technology Co., Ltd, Beijing 100084)

Abstract: The observational data of wind speed in automatic stations in Xinjiang were used to study the distribution characteristics and correlation of wind with dust in Xinjiang for 2014–2016. The results show that the northeasterly gale occurred in the winter and spring in the second year, and the southern Xinjiang occurred in the late spring. The high sand-dust period in northern Xinjiang was in March while that in southern Xinjiang was in April to June. Strong winds are favorable for the formation of sandstorms, but winds above gale intensity are favorable for the migration of sand dust and the weakening of local dust weather. In addition to the power line adjacent to section 365 is in high wind risk, the risk of wind damage in other sections is relatively low, so that the regions around other sections rather than the 365 section are suitable for follow-up power line constructions and expansions.

Keywords: wind, dust, disaster, powerline, Xinjiang

0 引言

沙尘天气是指强风从地面卷起大量尘沙, 使空气混浊, 水平能见度明显下降的一种天气现象, 是由特殊的地理环境和气象条件所致的一种自然现象^[1]。大风是一定天气形式与特殊地形共同作用产生的天气过程^[2]。很多研究^[3-4]表明, 大气运动状态决定的大风和不稳定大气, 是沙尘形成的驱动因子, 主要决定了沙尘的强度、移动路径和持续时间。

多年来, 灾害性的大风一直威胁着新疆电网输电线路的安全运行, 因强风和沙尘暴造成的输电线路倒杆塔、断线、风偏、污闪、绝缘子脱串和金具断裂等

事故时有发生^[5-6]。新疆是重要的电力能源输出地, 保障输电线路的安全对新疆的电力向疆外输送具有极其重要的地位。因此分析新疆地区大风天气分布特征, 尤其是新疆电网线路附近的大风沙尘时空分布特征, 对建立新疆大风预警机制, 建立电网沿线的气象监测网有重要的指示意义。

高婧^[2]研究表明新疆沙尘发生频率高、分布广、强度大, 是我国沙尘暴高发区、强沙尘暴多发区。毛炜峰等^[7]研究发现新疆春季沙尘天气与前一年夏、秋季的大气环流之间存在明显的隔季相关现象。高卫东等^[4]发现大风的分布与大气环流形势和地形有关。还有研究表明^[8-9]大风的分布北疆多于南疆, 中、低山区多于平原地区, 地形开阔的高原地区高空等压面坡度大, 大风也比较多, 大风日数的高值区在北疆西北部、东疆和新疆西部。新疆独特的地理环境, 造成了

收稿日期: 2016年11月13日; 修回日期: 2016年12月23日
第一作者: 王建(1986—), Email: yaowang360@163.com
资助信息: 国网新疆电力公司科技项目(5230DK15000L)

大风分布的复杂特点。当冷空气侵入新疆时,由于天山山脉的阻挡,北疆大风较多,南疆大风较少。李红军等^[10]在研究了新疆45年沙尘暴(相当于普通沙尘天气)日数统计分析后发现年沙尘暴日数与气温和降水呈反相关关系,与大风呈正相关关系,与大风的相关性最高。王旭等^[11]、陈洪武等^[12]指出沙尘暴高发区位于南北疆两大沙漠,并以沙漠为中心向四周逐渐减少。马禹等^[13]也发现沙尘高发区在南疆的塔克拉玛干沙漠附近,而且平均沙尘日数南疆远远高于北疆,南疆是北疆的7倍,北疆沙尘天气主要是3—9月,多发生在3月,而南疆在3—9月,多发生在4月。

本文分析了过去3年新疆地区国家级观测站观测到的大风天气分布特征,旨在分析区域分布特点,了解大风和沙尘的运动规律,了解新疆电网附近沙尘分布特征,为建立极端天气预测模型提供基础。

1 研究区概况

1.1 资料 and 统计方法说明

本文所用资料为新疆地区105个国家级气象站(包括基本站、基准站以及一般站)观测资料中的风速与能见度数据,时间为2014年2月—2016年10月,其中风速数据为10 min平均风速的每小时平均值,能见度数据为每小时10 min平均水平能见度的最小值。其中新疆电网线路选择吐哈线路,其附近的国家站有哈密站、十三间房站、鄯善站、巴里坤站和吐鲁番站。

气象学对大风和沙尘等级划分标准^[14]指出,大风指风速在17.2 m/s以上的风(即风力达到8级及以上的风),而沙尘天气能见度基本在1000 m以下。依据此标准,在所有国家站观测数据中挑选出大风数据及其对应时次的最小水平能见度数据。结果显示105个国家站中有12个国家站在研究时间段内出现大风现象,有94个国家站在研究时间段内出现沙尘现象。此外,依据大风和沙尘等级划分标准^[14],将大风天气进一步划分:风速 $\geq 17.2 \sim 20.7$ m/s称为大风(风力8级),风速 $\geq 20.8 \sim 24.4$ m/s称为烈风(风力9级),风速 ≥ 24.5 m/s称为狂风(风力10级及以上)。将沙尘天气进一步划分:能见度 < 50 m称为特强沙尘天气,能见度为 $50 \sim < 500$ m称为强沙尘天气,能见度为 $500 \sim < 1000$ m称为普通沙尘暴天气。最后,统计以上出现过大风现象的所有观测站在过去3年有多少日出现过大风、大风持续最长时间(小时)及其对应的时段,并统计各观测站大风和沙尘天气每日在哪些时间点出现、每月在哪些日出现、每年在哪些月出现,不同等级的大风和沙尘天气每日在哪些时间点出现、每月在哪些日出现、每年在哪些月出现。

1.2 研究区地形气候特征

本文研究区域位于新疆维吾尔自治区内,新疆维吾尔自治区总面积160多万平方千米,地形起伏较大,海拔为300~1500 m,是著名的三山夹两盆的地形,从北到南依次为阿尔泰山—准葛尔盆地—天山—塔里木盆地—昆仑山(图1),形成高山与盆地相间分布的独特地形地貌特征。



图1 新疆地貌图

Fig. 1 Geomorphological map of Xinjiang

研究区天气气候特征复杂:夏季高温,阳光充沛,昼夜温差大,冬季阿尔泰山脉雪情频繁,容易出现雪灾。北疆受西风带影响降水偏多,南疆为暖温带降水稀少。高山地区地形雨偏多,山顶常有冰川覆盖。全年平均相对湿度约40%,春季平均不足30%，“三十里风区”和“百里风区”(其中“三十里风区”位于吐鲁番到达坂城区间,“百里风区”位于兰新铁路中红旗坎站—小草湖站—红台站—大步站—十三间房站—红层站—了墩站)(如图2中虚线标记所示)常出现西北偏北大风,3—6月最为频繁^[3]。

研究区大风沙尘发生和分布的气候特征如表1所示,气候特征研究显示大风频发区位于百里风区十三间房、北疆西部、天山中部、准噶尔盆地、北疆西北部,沙尘暴多发区在北疆和沙漠中,北疆的大风和沙尘暴都多于南疆,大风和沙尘多发生在夏季,冬季较少。此外,大风和沙尘暴的出现和持续时间在20世纪六七十年代很多,80年代以后减小,有研究表明这种突变发生在1987年前后^[10],与全球变暖引起的大气环流减弱进而使入疆冷空气强度减小有关。

2 新疆地区强风沙尘时空分布特点

2.1 历史强风时空分布特征

空间分布上,统计过去3年有多少日出现过大风、

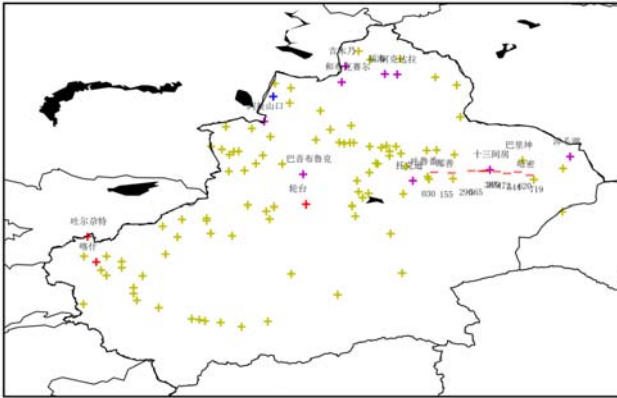


图2 站点分布图
Fig. 2 Site map

(红色一字：电网线路的观测站；十字：所有国家级观测站；紫色十字：有大风天气出现的北疆观测站；红色十字：有大风天气出现的南疆观测站；黄色十字：有沙尘天气发生的观测站；蓝色十字：未出现大风或沙尘天气的观测站；以上颜色有重叠和覆盖)

大风持续最长时间(h)及其对应的时间段(表2)。结合大风情况(表1)和新疆地区国家观测站分布(图2)可知,过去3年,处于北疆的大风日数多于南疆以及天山山脉附近。其中,十三间房出现大风日数最多,有278 d,且大风天气最长持续了108 h。吉木乃和淖毛湖在3年内只出现过一次大风天,且持续时间不足1 h。

时间分布上,如图3~5所示,北疆大风多出现在春季,尤以3月居多。南疆大风多出现在春末夏初4~6月。由月变化可见,过去3年内,北疆大风多出现在1~3日、10~14日及25日前后,南疆大风主要出现在7日和23日左右。由大风频次日变化可见,北疆

表1 新疆大风、沙尘发生和分布的气候特征^[2, 8, 10-11, 15-16]
Table 1 The climate characteristics of occurrence and distribution of wind, sand and dust weather in Xinjiang

现象	分布特征
大风频发区	百里风区十三间房(206 d) ^a ,北疆西北部阿拉山口(155 d) ^a ,天山中部山谷达坂城(148 d) ^a ,准噶尔盆地西缘塔城老风口(144) ^a ,北疆西北部、东疆和南疆西部 ^b
大风较少区	北疆准噶尔盆地南部 ^{ab} 、天山山区 ^a 、南疆塔里木盆地西南部(小于10 d) ^{ab}
大风最多季节	4—7月 ^a , 5—6月 ^{bc}
大风最少季节	1月 ^a
大风发生趋势	20世纪60年代最多,70年代次之,80年代位居第三,2000年以后最少 ^b ;20世纪80年代以后大风年总日数减少 ^b
沙尘暴频发区	北疆,南北两大沙漠中 ^b
沙尘暴最多季节	4—8月 ^b , 6月 ^c
沙尘暴最少季节	10月—次年3月 ^b
沙尘发生趋势	逐渐减小,南疆减小趋势强于北疆 ^d ,高发年代为20世纪六七十年代,90年代出现日数明显减少 ^b

注: a为1999—2009年; b为1961—1999年; c为1980—2000年; d为1961—2005年; e为1958—2007年。

大风主要出现在09—13时,南疆大风出现频次较均匀,无明显时间变化。

2.2 历史沙尘时空分布特征

从全疆地区沙尘天气分布来看(图6),普通沙尘的时间分布均匀无明显时间特征。强沙尘主要发生在10—12月,尤其在月末和夜间出现频率较高。特强沙尘主要发生在10月中旬到12月,月频率高值在26日一次月3日,日发生频率高值在19时一次日04时。从南疆、北疆的时间分布上来看(如图7、图8所示),北疆普通沙尘多发生在12月一次年1月,日发生频率高值在00—02时,月频率高值在4日和30日左右;南

表2 气象站大风信息表
Table 2 Weather station's wind information

站名	大风日数(d)	最长持续时间(h)	最长持续时间段	经纬度
吉木乃	4	*	*	85.8667°E, 47.4333°N
福海	6	3	2015年3月30日11—14时	87.4667°E, 47.1167°N
阿克达拉	1	1	2016年3月3日06—07时	87.9667°E, 47.1°N
和布克塞尔	14	10	2015年10月5日05—15时	85.7167°E, 46.7833°N
阿拉山口	27	8	2014年11月24日23时—25日07时	82.5667°E, 45.1833°N
淖毛湖	1	*	*	94.9833°E, 43.75°N
十三间房	278	124	2016年7月29日09时—8月3日13时	91.7333°E, 43.2167°N
巴音布鲁克	2	1	2014年5月20日11—12时; 2014年5月30日21—22时	84.15°E, 43.0333°N
托克逊	4	1	2016年3月3日02—03时; 2016年4月24日05—06时	88.6°E, 42.7667°N
轮台	1	2	2014年4月23日03—05时	84.2667°E, 41.8167°N
吐尔尕特	1	2	2014年12月7日14—16时	75.4°E, 40.5167°N
喀什	4	1	2014年4月22日19—20时; 2014年5月22日05—06时	75.75°E, 39.4833°N

注: *表示最长持续时间不足1 h。

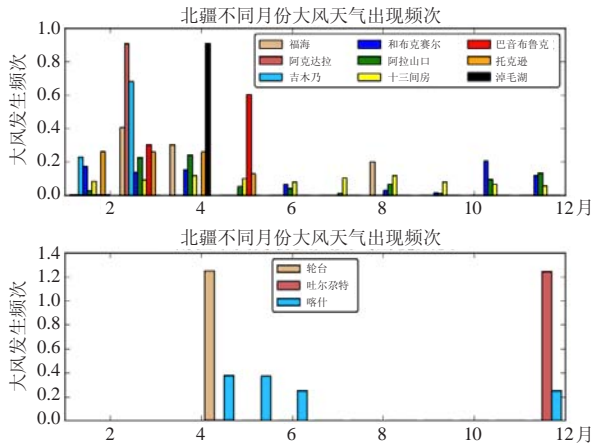


图3 大风天气出现频次季变化
Fig. 3 The seasonal variation of wind frequency
(北疆站点为图2中紫色十字, 南疆站点为图2中红色十字)

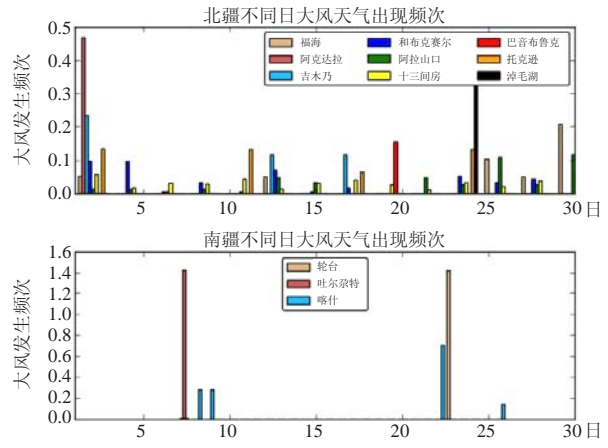


图4 大风天气出现频次月变化
Fig. 4 The monthly variation of wind frequency

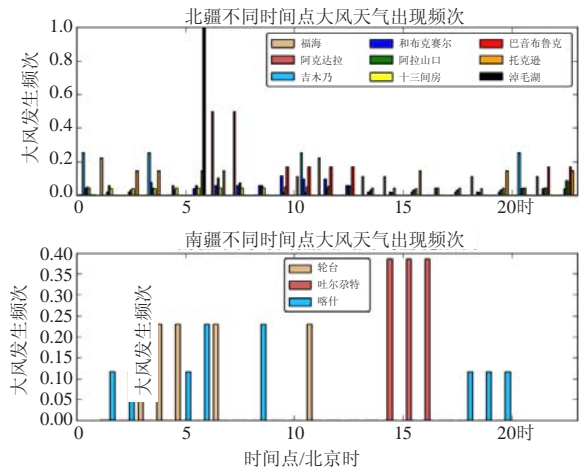


图5 大风天气出现频次日变化
Fig. 5 The daily variation of wind frequency

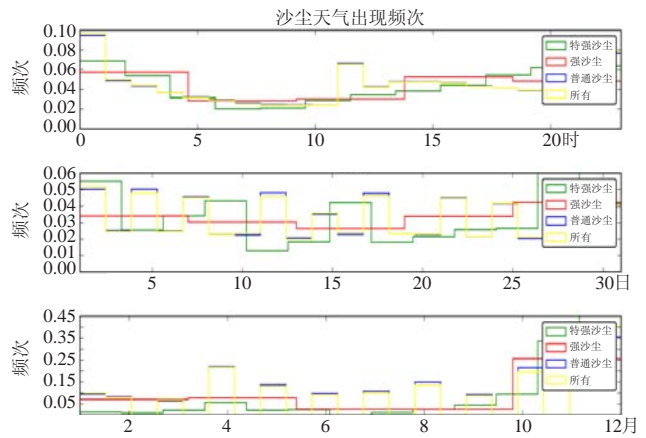


图6 全疆沙尘天气出现时间分布
Fig. 6 The time distribution of dust weather in Xinjiang

疆普通沙尘多发生在12月和4月, 高发时段为凌晨和傍晚。北疆强沙尘多发生在12月, 月频率高值在30日左右, 高发时段为凌晨和20时以后; 南疆强沙尘多发生在4月, 月频率高值区在28日一次月5日, 高发时段与北疆相似。北疆特强沙尘主要发生在11月左右, 月频率高值在26日和6日前后, 高发时段为05时、10时及20时前后; 南疆特强沙尘主要发生在4月和11月左右, 月发生率高值在6日和26日左右, 高发时段为04时、14时和20时前后。

2.3 两者的相关性分析

对大风天气和沙尘天气对比发现(图3~6), 从季节上来看, 在北疆基本呈现大风高发季节沙尘天气减少的现象: 北疆沙尘天气都主要发生在冬季到次年年初, 而大风多发生在3月, 在此期间沙尘天气很

少出现, 此后4—5月重新发生沙尘天气, 直到10月初沙尘天气出现频率明显降低; 而南疆大风与沙尘天气基本同时出现, 5月和12月前后均为大风和沙尘多发月份。从月变化来看, 北疆大风多发日与强和特强沙尘天气有较好的对应关系, 大风提前于特强沙尘天气发生时间, 与普通沙尘对应关系不明显; 南疆无明显相关性。从日变化来看, 北疆大风日发生频率比较均匀, 高值区在中午, 而沙尘天气在中午这段时间要比早上和傍晚发生的频率小一些, 南疆大风天气和沙尘天气基本同时出现, 但是随着大风天气的持续, 沙尘情况逐渐减少, 这种关系在上午时段比较明显。总体上来说, 大风天气与沙尘天气基本上相伴相生, 当大风持续时间长时, 该地区强和特强沙尘现象在大风结束时有所缓解。在季节尺度上, 春季和冬季为主要沙

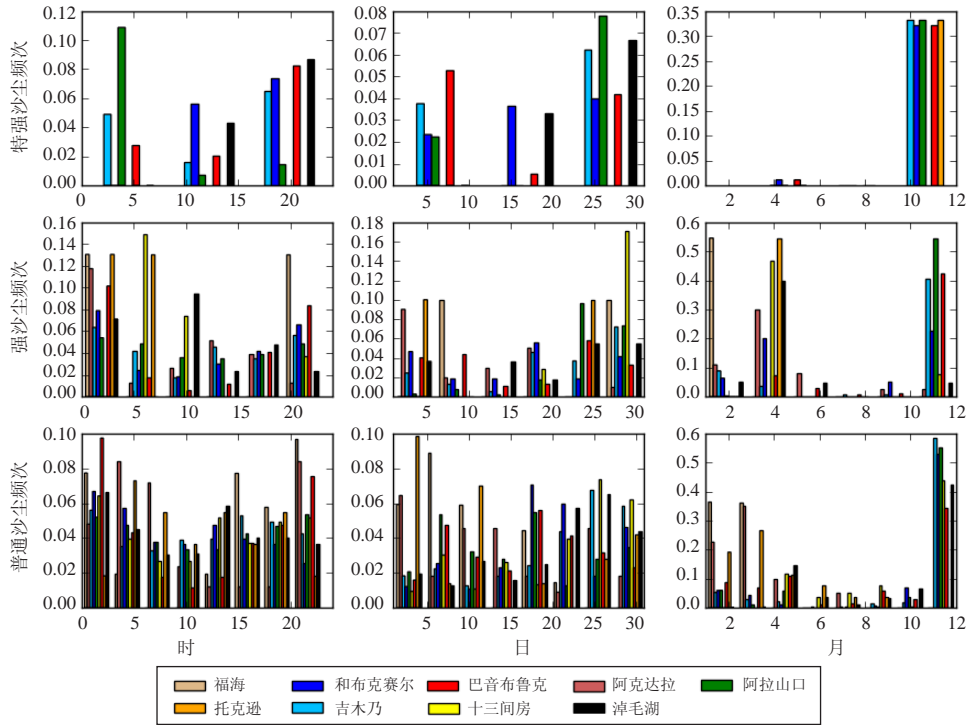


图7 北疆不同等级类型沙尘出现频次

Fig. 7 Occurrence frequency of different grades of type dusts in the northern Xinjiang

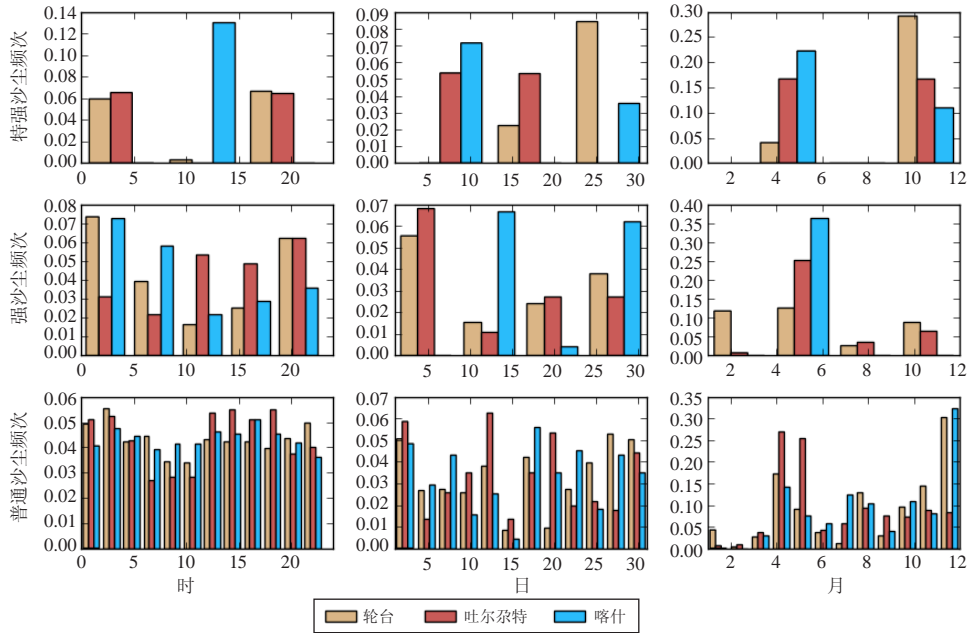


图8 南疆不同等级类型沙尘出现频次

Fig. 8 Occurrence frequency of different grades of type dusts in the southern Xinjiang

尘发生季节，大风天气在北疆主要发生在春末，在南疆多发生在春季和冬季。

由不同大风强度和沙尘强度等级的对比图（图7~10）可见，从季节尺度上看，烈风以上程度的风更容易诱发强沙尘，反而对特强沙尘有减少的作用，可能原因是在风速极大时，局地沙尘被快速带到

其他地方。而大风和普通沙尘在季节变化上相吻合，大风频发的2月、4月、12月也正是普通沙尘频发的时间段。月变化和日变化上，大风与特强沙尘的变化图吻合度较高为狂风，吻合度最低为烈风。进一步表明烈风强度的风有利于的沙尘迁移，而大风强度的风有利于沙尘天气在局地的逗留。

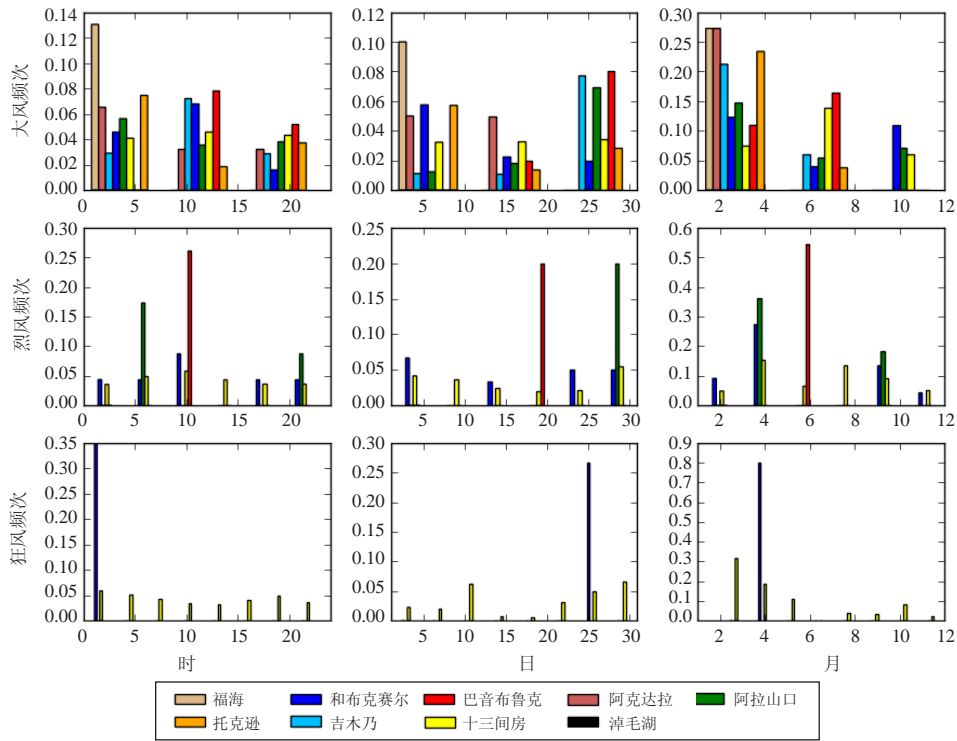


图9 北疆不同强度等级风速出现频率

Fig. 9 Frequency of different strength grade of wind speed in the northern Xinjiang

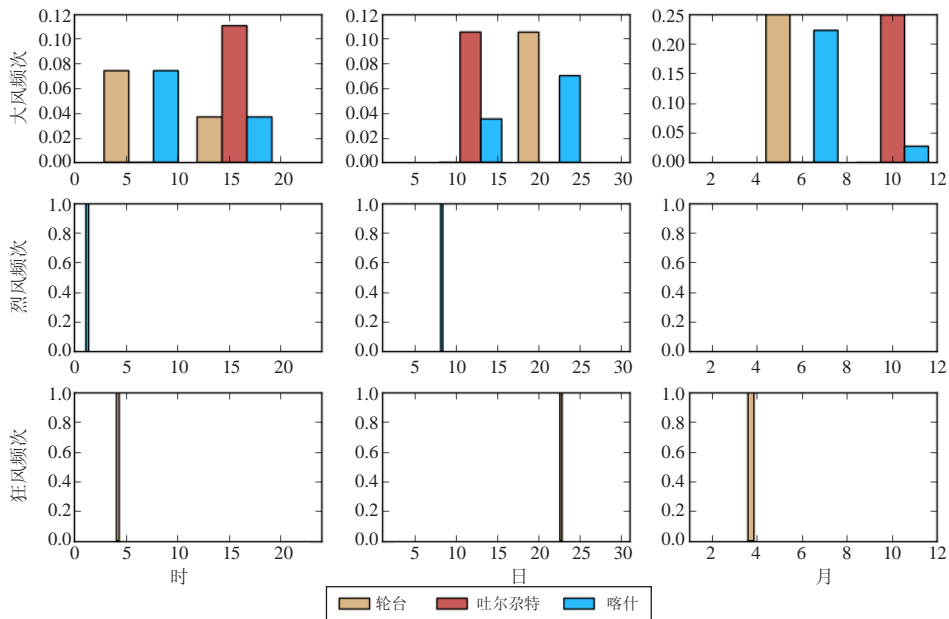


图10 南疆不同强度等级风速出现频率

Fig. 10 Frequency of different strength grade of wind speed in the southern Xinjiang

3 电网线路附近大风沙尘分布统计特征

3.1 气象观测站可代表性分析

由于电网线路上微气象站观测的数据有限，通过分析输电线路附近的国家级气象站与电网线路上的微

气象观测站的观测数据之间的总体均值差异和相关关系，期望找到在统计上能够代表电网线路风速沙尘分布的国家观测站，然后利用代表性强的国家站的长时间序列资料分析电网强风沙尘的分布特征。

电网线路上的微气象站如图2红色一字所示，

从西向东站号分别为030 (43.112°N, 89.458°E, 48 m), 155 (43.088°N, 90.175°E, 66 m), 296 (43.173°N, 90.978°E, 52 m), 365 (43.169°N, 91.381°E, 51 m), 385 (43.169°N, 91.506°E, 49 m), 399 (43.178°N, 91.590°E, 70 m), 472 (43.143°N, 92.006°E, 34 m), 544 (43.071°N, 92.427°E, 36 m), 620 (43.124°N, 92.858°E, 35 m), 719 (42.995°N, 93.338°E, 42 m) 10个微气象观测站, 所得数据为10min平均风速, 并根据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)对数据进行检查和质量控制。统计分析过程中, 从新疆地区国家气象站中挑选电网线路附近的观测站, 分别为巴里坤、哈密、吐鲁番、鄯善和十三间房气象站(图2)。将这些国家气象站测得的风速和电网微气象站观测的风速做统计分析, 检验国家站与微气象站之间的相关关系。利用检验统计分布与相关性的方法, 找到最能代表电网附近各微气象站的观测结果。

统计结果表明, 巴里坤站与7个微气象站观测风速之间的相关系数(R)在0.4以上, 且假设检验值(P)远远小于0.05信度。进一步做MWW RankSum检验发现巴里坤站与6个微气象站观测风速的 P 值大于0.05, 说明这些观测数据的分布无显著不同。同时满足有显著线性相关和无显著分布差异的有4个站, 分别是030、296、385和399号, 说明巴里坤站在统计上可以代表电网线路上的观测。此外其他4个自动观测站观测数据虽然与线路上的微气象站观测数据有显著相关, 但是其分布没有通过显著性检验, 即分布差异过大, 不具备可代表性。十三间房站的观测风速数据分布只与线路上365号微气象站的观测风速数据分布相似, 因此对线路气象数据的可代表性低于巴里坤站。基于以上统计分析, 在输电线路微气象观测数据量不足的情况下, 可以用巴里坤站的气象观测数据代表电网线路附近的风速分布特点。另外, 多分布方差分析(ANOVA analysis)表明地形对风速观测有显著影响, 即不同地理位置风速总体的均值差异较大, 所以尽管巴里坤站观测到的风速可以在总体分布上代表电网线路上的气象观测结果, 能够比较好地描述电网附近的风速变化情况, 但是只能反映风速的相对变化情况, 不能代表风速的绝对变化。此外, 由站点分布图2可见, 两个站在地理距离上接近并不代表互相的代表性就好。

3.2 气象观测站大风分布特征

可代表性分析指出巴里坤站最能代表电网附近各微气象站的观测结果。因此分析巴里坤站3年来的

10 min平均风速的小时平均值以及每小时最小水平能见度来分析电网线路附近的风速沙尘时间变化特征。

从代表站分析可以推测, 电网附近10 min平均风速的小时平均呈明显的周期性变化, 每年1—6月风速逐渐增大, 6月达到最大, 到7—8月有所回落, 随后10月呈风速小高峰之后持续下降, 到次年1月风速下降到上年1月的水平。每年平均风速最大值稳定在10 m/s左右, 平均风速最小值出现在冬季并基本稳定在1 m/s左右。能见度分布同样呈现出明显的周期性变化, 且变化周期与风速相似, 但振幅逐年增加, 即最大能见度在夏季且逐年递增, 而能见度最小值出现在冬季且变化不大。

3.3 气象观测站大风区域分布特征

气象上定义的大风为风速大于17 m/s的风。根据此定义, 在10 min平均风速资料中筛选风速大于17 m/s的数据及其对应的最小水平能见度, 发现线路附近的国家站中只有十三间房站在过去3年内出现过风速大于17 m/s的数据。可以初步推出, 与十三间房有较高统计相似性的365号微气象站附近大风灾害风险更高。而与巴里坤站统计相似性较高的其他微气象站附近大风灾害风险相对较小。

4 结论与讨论

本研究发现, 大风天气的发生与大风强度等级有助于预测和判断沙尘天气发生发展, 其气候趋势基本一致。过去3年北疆大风最大风险时段为3月, 沙尘最大风险时段为冬季到次年年初, 烈风以上强度的风有利于沙尘迁移, 表现为更容易诱发强沙尘, 对特强沙尘有减少的作用。而大风强度的风有利于沙尘天气在局地的逗留, 表现为大风与特强沙尘的变化较一致。陈洪武等^[17]也给出了相似的发现, 新疆沙尘暴与大风的地理分布刚好相反, 沙尘暴多的地区大风较少, 但是该研究没有区分大风强度等级。此外, 本文发现过去3年大风等级的风出现频率最多, 且主要出现在4—6月。这与夏炜萌等^[15]研究新疆20年105个站大风灾害分布时的发现相似, 新疆地区主要是大风轻灾, 基本为大风等级的风, 且发生在5—6月。

此外, 电网附近气象观测站的代表性分析发现, 电网线路附近有6月和10月两个大风小高峰, 这段时间大风风险较大, 且大风最大值在过去3年年变化不大, 而沙尘最大值在过去3年逐年减小。另外, 电网线路上除与十三间房毗邻的365号路段大风灾害风险较高外, 其他路段大风灾害风险相对较低, 可在该区域进行电网后续建设及扩容。在研究可代表性分析时发现, 电网微气象观测设备的高度在30~70 m不

等,高于国家气象站的观测高度10 m,因此,直接利用国家气象站观测风速分析电网线路的大风风险很可能会造成低估。气象部门与电网部门应该联合设计并建立有针对性的气象观测网络,在电网线路上建立密集的观测站,并获得长期连续的观测数据,以便对电网气象灾害进行及时监控和分析,真正让气象数据应用于电网气象风险分析和运行保障中。

参考文献

- [1] 王继新,谢云,余小玲.新疆沙尘天气及其演化特征.黑龙江科技信息,2012,(26):62-63.
- [2] 高婧.新疆大风时空变化特征及环流背景研究.兰州:兰州大学,2010.
- [3] 霍文,杨青,何清,等.新疆大风区沙尘暴气候特征分析.干旱区地理,2011,34(5):754-761.
- [4] 高卫东,袁玉江,刘志辉,等.新疆沙尘源状况及其沙尘气溶胶释放条件分析.中国沙漠,2008,28(5):968-973.
- [5] 郑文鹏.新疆电网输电线路杆塔防风偏优化研究.城市建设理论研究,2013,(35).
- [6] 付豪,陈立新.大风对新疆电网输电线路的危害浅析.新疆电力技术,2014,(1):9-12.
- [7] 毛炜峰,艾力买买提明,陈胜,等.新疆春季沙尘天气与前期月环流特征量的关系.干旱区地理,2015,28(2):171-175.
- [8] 王旭,王健,马禹.新疆大风天气过程的特点.新疆气象,2002,25(2):4-6.
- [9] 王旭,马禹.新疆大风的时空统计特征.新疆气象,2002,25(1):1-3.
- [10] 李红军,李军,何清.新疆沙尘暴的趋势和突变研究.中国沙漠,2008,(5):117-121.
- [11] 王旭,马禹,陈洪武.新疆沙尘暴天气的气候特征.中国沙漠,2003,23(5):539-544.
- [12] 陈洪武,王旭,马禹.新疆沙尘暴气候背景场的分析.气象,2003,29(6):37-40.
- [13] 马禹,王旭,黄镇,等.新疆沙尘天气的演化特征及影响因子.干旱区地理,2016,29(2):179-185.
- [14] 中国气象局.地面气象观测规范.北京:气象出版社,2003.
- [15] 夏祎萌,何清,李军,等.新疆大风灾害灾度和危险度分析.中国沙漠,2012,32(4):1025-1028.
- [16] 王存忠,牛生杰,王兰宁.中国50a来沙尘暴变化特征.中国沙漠,2010,30(4):933-939.
- [17] 陈洪武,王旭,马禹.大风对新疆沙尘暴的影响.北京大学学报(自然科学版),2003,39(2):187-193.

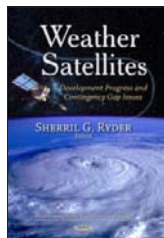
新书架 NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



《大气科学和全球气候变化研究重大科学问题》

编著者:黄荣辉,等
出版者:科学出版社
出版年:2016



Weather Satellites: Development Progress and Contingency Gap Issues
《气象卫星:开发进展及应急资料缺失问题》

编著者: Louise O. Berkan
出版者: Nova Science Publishers Inc
出版年: 2013



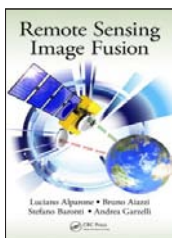
《气象信息化发展战略:研究与探索》

编著者:气象信息化战略研究课题组编著
出版者:气象出版社
出版年:2016



《2030年可持续发展的转型议程:全球视野与中国经验》

编著者:潘家华,陈孜
出版者:社会科学文献出版社
出版年:2016



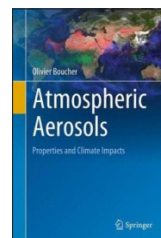
Remote Sensing Image Fusion
《遥感图像融合》

编著者: Luciano Alparone等
出版者: CRC Press
出版年: 2015



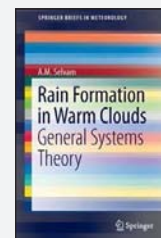
《中国学科发展战略:大气科学》

编著者:国家自然科学基金委员会,中国科学院
出版者:科学出版社
出版年:2016



Atmospheric Aerosols: Properties and Climate Impacts
《大气气溶胶:特性与气候影响》

编著者: Olivier Boucher
出版者: Springer
出版年: 2015



Rain Formation in Warm Clouds: General Systems Theory
《暖云中雨的形成:一般系统理论》

编著者: A. M. Selvam
出版者: Springer
出版年: 2015

多源数据融合系统LAPS的研究进展及其在实况数据服务中的应用

李超 唐千红 陈宇 刘鑫 黄琰 李志敏
(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: 随着我国气象观测网建设的稳步发展, 观测数据的时空密度大大提高, 但各数据源时空代表性差异大, 将多源数据结合起来开展融合分析是国内外的研究热点之一。由美国NOAA开发的局地分析与预报系统(LAPS), 可以参考每种资料来源的可信度, 分析得到三维的、高分辨率格点数据。LAPS系统具有代码开源、分析算法完整、框架灵活等特点, 能够较快地调整以适应国内的观测和业务环境, 因而有较多的研究和业务应用。回顾了LAPS融合系统的研究进展, 特别聚焦于其在实况数据服务中的应用。

关键词: LAPS, 数据融合, 数据服务

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.005

An Overview of Progresses in LAPS and Prospective Applications in Real Time Data Service

Li Chao, Tang Qianhong, Chen Yu, Liu Xin, Huang Yan, Li Zhimin
(China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081)

Abstract: The spatial-temporal density of observation data is greatly improved with steady developments of meteorological observation system in our country, while the spatial and temporal representativeness of each data source is very different. Combining multi-source data to carry out fusion analysis is one of the research hotspots at home and abroad. The LAPS, local analysis and forecasting system developed by NOAA, is used to analyze three-dimensional and high-resolution grid data with reference to the reliability of each data source. LAPS system has the characteristics of open source code, complete analysis algorithm and flexible framework, which can be adjusted quickly to adapt to the domestic observation environment, and leads to enormous research and applications. This paper reviews the research progress of LAPS fusion system, especially focuses on the application to real time data service.

Keyword: LAPS, data fusion, data service

0 引言

我国气象观测系统建设稳步发展, 观测数据的时空密度大大提高。各数据源时空代表性差异大, 其融合分析是国内外的研究热点之一。融合产品既可以为预报模式提供初始场从而减少spin-up时间, 也可以用于天气监测和分析诊断。尤其要指出的是, 高时空分辨率的格点实况融合产品, 在气象信息服务中具有显著的社会效益。

局地分析与预报系(Local Analysis and Prediction System, LAPS)是由NOAA/ESRL开发的中尺度数据分析融合工具(详见<http://laps.noaa.gov/>)。系统融合分析来自地面观测网、航空卫星和飞机、垂直探

测器等的地基、天基、空基的观测网数据, 并在分析中考虑各资料来源的可信度、时空代表性和互相的制约关系, 最终得到三维的、高时空分辨率的气象格点场^[1]。

LAPS系统具有融合分析算法完整(包含风分析、温度分析、水汽分析、云分析等)、源码公开(基于Fortran、C++编制)、框架灵活(模块化设计)的特点。另外, LAPS系统便于根据局地观测网特点和应用需求进行本地化, 因而在国内有较多的科学研究和业务应用。综述LAPS研发进展和国内应用现状, 有利于明确融合系统的特点、改进融合算法并规范融合产品应用。

1 LAPS融合系统

融合系统包括资料预处理, 各种物理量分析, 导出量分析, 平衡约束分析, 以及格式后处理等部分。

收稿日期: 2016年10月25日; 修回日期: 2017年1月3日
第一作者: 李超(1981—), Email: lichao@cma.gov.cn

概括说，系统是建立在全国/区域/局地数值预报模式基础上的，利用各尺度观测网数据对模式预报场进行调整和填充，各数据源相互订正，最后获得一个覆盖研究区域的三维高分辨率格点场。

由图1所示，各种观测数据首先经过“质量控制”（quality control），进入“数据融合”（data fusion）模块。一部分数据同时进入“云方案”（cloud scheme）模块，得到的比湿等水汽数据进入“数据融合”模块，在背景场为初始猜测场的基础上进行调整，得到融合后格点上的气象要素值。“云方案”则输出云量场等数据。数据中的气压、气温、风矢量数据要进入“动力约束”（dynamic constraints）模块得到满足动力平衡约束的格点数据。融合后的数据会经过后处理，最终用于天气监测，或插值到模式的格点上作为模式热启动的初始场。

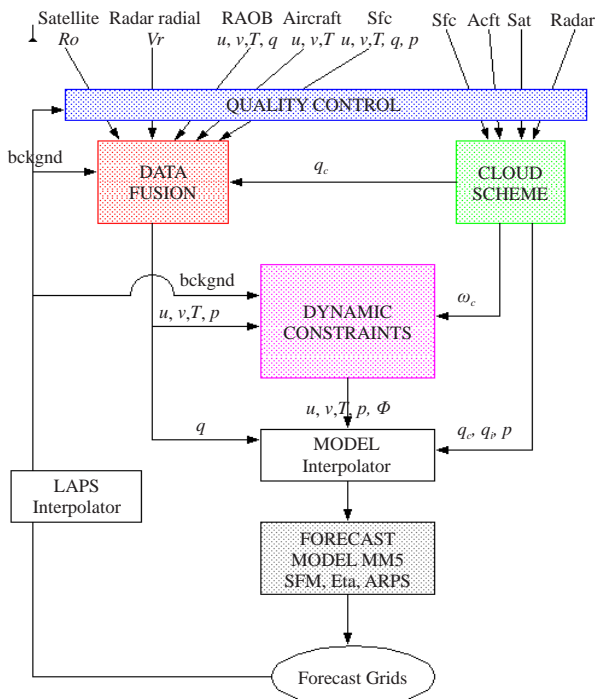


图1 LAPS系统框架^[1]

Fig. 1 The system scheme of LAPS^[1]

近年，LAPS正在经历较大的改造升级，计划从最初的客观分析方法转变为变分同化系统^[2-3]。在保留原始的资料质量控制和分析功能基础上，引入基于多重网格技术的连续变分方法，依次对各尺度的信息进行分析，因而得以较好地避免长波分析和短波分析的误差相互混淆，得到更精确、细致的分析场^[3]。

2 国外研究及应用

Hiemstra等^[4]应用LAPS系统开展美国科罗拉多州及周边地区（覆盖面积1250 km×1050 km）气象观

测数据融合研究。基于两年半的观测资料，对融合数据与独立观测资料（不参加LAPS数据融合）开展比较，结果表明：温度分析场的误差小于2℃、相对湿度场的误差小于9%。学者将LAPS分析场与独立观测数据进行对比^[5-8]，全面考察LAPS的云分析、温度分析、风分析等的分析结果，一致认为其分析场效果良好，可以为局地或区域陆面模式、生态模式等预报模式提供所需的气象驱动场。借助LAPS高分辨率分析场，学者开展多种天气系统的中尺度分析^[9-14]。LAPS分析场作为预报模型初始场的热启动研究几乎囊括了所有主流的区域预报模式^[15-17]，如初始化WRF^[18-19]、初始化多模式集合预报系统^[20-21]以及初始化MM5^[22]，研究热启动对其降水等要素的预报能力的影响。结果表明，LAPS初始化的模拟比冷启动具有更高的技巧。

LAPS的分析算法并非一成不变。Xie等^[2]提出基于多重网格技术的连续变分方法（Space-Time Multiscale Analysis System, STMAS），是一次融合系统框架的突破。作者考虑到在传统分析框架下，长波和短波信息是混合在一起的，这样，最小化目标函数时常常过度压缩长波误差而忽略短波误差，并且这样的框架下变分的约束函数会越来越多且不平衡。因此，作者借助了多重网格技术来解决变分问题（图2），主要思路是：定义若干个空间分析尺度，依据气候物理条件为不同尺度选择各自的平衡和动力约束，这些分析网格是由粗到细嵌套，依次对各尺度的观测信息进行融合分析。美国麻省理工大学的林肯实验室最早业务化应用STMAS于边界层辐合线诊断和监测。

近年，LAPS正在经历一次重大升级，充分利用新兴的数据同化技术来满足用户更高数据精度、更快计算速度的需求。升级基于STMAS框架，主要包括两个方面：一是由改进的Barnes客观分析方法升级为基于状态变量的同化方案，二是由一维变分分析调整到三维多尺度变分分析方案，新版本称为vLAPS^[3]。当前，系统联合应用了同化分析（如EnKF或3DVAR）

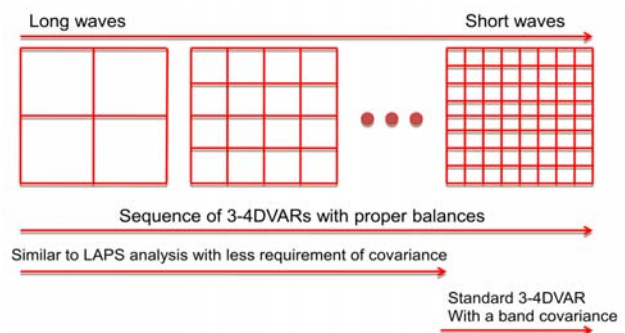


图2 STMAS的主要思想^[2]

Fig. 2 The main scheme of STMAS^[2]

和传统客观的分析（如Barnes分析）。2013年春季，vLAPS在NOAA的2013年危险天气测试平台上开展了第一次实时测试^[21]。传统和新版本的LAPS都为下一代AWIPS (AWIPS-II)所应用，在美国国家天气服务（NWS）天气预报办公室（WFO）运行^[2]，用于实时天气情况的感知以及短临预报的初始化。

LAPS系统在美国的气象业务单位、高等院校和研究实验室广泛应用，同时，意大利、西班牙等国和地区也移植并实时业务运行。韩国将其应用到本国的快速循环预报系统，并开展代码优化和基于GPU计算的程序改造，称为KLAPS。

LAPS被嵌入各预报和服务系统中。1996年亚特兰大奥运会，其气象保障系统OWSS就嵌入了LAPS分析，产生覆盖所有运动场馆的逐小时8 km空间分辨率的大气分析场，一方面用于气象形势监测，另一方面为区域大气模拟预报系统RAMS提供初始场产生每3h更新、2 km空间分辨的气象要素预报场^[22]。

3 国内研究及应用

中国台湾较早引进LAPS系统实现天气预报模式的热启动业务^[23-24]。中国大陆，范蕙君、李红莉^[25-26]等较早阐述LAPS系统分析框架、系统功能、产品属性以及源数据格式处理、输出产品和预报模式的接口等。利用我国的天基、地基、空基观测网资料，气象工作者将地面观测、多普勒雷达、FY卫星、GPS水汽、微波辐射计、探空等资料陆续接入LAPS，为多源数据融合研究及应用打下了基础^[27]。之后，学者开展了多方面工作，主要包括：利用融合资料开展的天气系统分析和诊断、以系统为平台考察各种观测资料的作用、对融合分析场开展质量检验以及将融合分析场作为预报模式初始场的热启动研究。

3.1 天气系统分析和诊断

刘志雄等^[28]对湖南常德澧县的一次局地强冰雹事件进行动力、热力条件分析。结果表明：同化雷达资料后，LAPS分析场刻画了冰雹事件的精细动力结构，对诊断强对流运动发展非常有利，但同时也发现对热力参数的刻画并不理想。刘寿东等^[29]对上海的一次强对流天气过程进行动力、水汽和热力条件分析。结果表明：在流场扰动较为明显的情况下，LAPS风场资料对实况的反映真实，冰晶含量和水汽条件等物理量能较好地解释成雹条件，K指数和CAPE等物理量反映了风暴发生过程中低层能量的变化情况。崔春光等^[30]对鄂东一次暴雨（局部大暴雨）天气过程利用武汉暴雨研究所实时业务运行的LAPS再分析场进行环流背景、影响天气系统、物理量场、干侵入等诊断

分析。结果显示，LAPS分析资料揭示了暴雨的特点与成因，尤其是中尺度暴雨的物理量场分析对该次暴雨具有明显的指示意义。周后福等^[31]对安徽沿淮和大别山地区的一次暴雨天气过程进行不同时空分辨率分析场的评估。对比了空间5 km、时间3 h分辨率和空间3 km、时间1 h分辨率两种分辨率的LAPS分析场。结果表明，分析场能够显示实况信息，对比而言，高分辨率分析场对风场和云的中尺度结构（如降水过程中所伴有的风场辐合及切变）的解析更精细。李平等^[32]对安徽沿淮一次短时暴雨过程进行诊断分析。结果表明：LAPS输出的垂直风场分布及雷达反射率回波剖面分析充分表征出雷达回波单体的演变。结合云中液态水含量分析场，对探讨降水过程成因机制、分析天气结构起到重要作用。唐玉琪^[33]将LAPS用于城市气象研究。以上海为例，研究结果表明：LAPS分析场能够反映城市热岛、城市尺度的海陆风（湖陆风）环流和水汽输送特征。有利于分析城市效应对夏季强对流天气发生发展的影响，并由此提出了上海中尺度天气分析的辅助方案。王晓芳等^[34]分析了湖北的一次伴有前导层状降水对流线（RFLS）的发生、发展、消亡的结构特征。结果表明：LAPS分析场能捕获到RFLS系统移过前后的温度、地面气压和降水特征，特别是系统强盛时期以及对流上空较高层的系统结构特征。

可见，融合多种探测资料比单一的探测资料更客观真实，尤其是中尺度资料的融合使得分析场在天气形势、降水分析、物理量诊断等方面显现出明显的优势。通过对多种探测资料的融合处理，提高了分析场的时空精度，有利于常规观测资料、雷达拼图、卫星云图等资料的对比分析和互相校正，有效提高多源资料的利用率和客观性，从而为研究中小尺度天气系统的演变过程和结构特征提供了详实数据。

3.2 多源资料作用和融合效果

彭菊香等^[35]考察雷达资料、探空资料、地面资料分别在LAPS风分析、温度分析、水汽分析的作用。对比试验结果显示，雷达和探空资料对风场和温度场的分析有正效果。水汽分析的相对湿度分析场较特殊，单独融合雷达、探空资料或是综合融合两种资料，其融合场都比仅融合背景场的误差要大。李红莉等^[36]考察地基GPS水汽资料在LAPS水汽分析中的作用。与实况进行对比的结果表明，GPS水汽资料同化较大地调整了湿度场产生，其作用比雷达资料大一个量级。并且，GPS测站分布区域的模式降水预报有较大改善，甚至对下游暴雨预报有明显正作用，暴雨量级的TS降水评分显著提升。刘杰^[37]考察了FY卫星和

GPS水汽资料在LAPS水汽分析中的作用。设计3种实验方案,即分别融合FY-2C气象卫星资料、GPS MET总水汽资料,以及将卫星和GPS数据同时融合的分析方案。结果表明,不同资料调整水汽三维分布不同方面。卫星资料主要调整中高层水汽,GPS数据调整各层的水汽值的范围和空间趋势。卫星资料和GPS水汽资料能够相互订正,因而同时融合两种资料对三维水汽分布产生的调整最大。刘瑞霞等^[38]考察了FY-2C静止气象卫星、地面云观测、多普勒雷达资料在LAPS三维分析中的作用。采用北京地区和华南地区2次个例,设计了5种对比试验分析云量场变化。结果表明,地面观测主要订正云底结构,雷达观测辅助调整云中、底部信息,而卫星云图数据对云顶分布的订正效果显著。简言之,融合的客观数据越多,得到的三维云场越客观。

中国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX)采集了较全面和高密度的观测资料,武汉暴雨研究所基于此数据,应用LAPS融合系统生成华中、华南、江淮和长江三角洲这四个观测区的中尺度气象分析场(空间分辨率为5 km、时间分辨率为3 h)。崔春光等^[39]、李红莉等^[40]对该分析场的质量评估显示,分析场对中尺度强对流系统表现了很强的再现能力。气温、气压、湿度、风矢量等基本要素分析场的平均分析误差在观测误差范围以内。

可见,由于各观测仪器在观测原理、时空代表性、观测视角上各异,它们在融合中起到的作用大相径庭。雷达资料及探空资料可以明显改善风场以及温度场的分析。在资料密集区,探空资料在水汽方面的作用优于雷达资料。卫星辐射资料、GPS水汽等资料同化进入LAPS系统后提高了水汽分析能力。在各基本要素场中,湿度场的精度略差,已有资料的同化对其改善优势不明显,需要进一步研究。

3.3 预报模式热启动

李国静等^[41]以我国长江中游的一次大暴雨过程为例,开展WRF中尺度模式及WRF-3DVAR变分同化系统的预报对比试验。应用LAPS系统对多普勒雷达基数据进行退模糊等预处理,得到分仰角的NETCDF格式体扫数据。接着,将极坐标数据转换为局地坐标,用经纬度、离地球表面的垂直伸展高度来表示,进入WRF-3DVAR系统。结果显示,直接同化雷达径向速度和反射率因子资料可改进强暴雨数值预报,其中,反射率因子的同化对降水雨带及中心的预报的改进更为显著。刘春文^[42]比较GRAPES/3DVAR和GRAPES/LAPS两种方案模拟预报能力。采用同相参数化方

案,通过28个个例数据,分析两种方案的24 h降水的TS评分,以及模拟输出的温度、气压和风矢量要素场。结果表明,初始时刻的风场和温度场,LAPS方案优于3DVAR方案。高度场和相对湿度场,LAPS方案的效果则略差。24 h降中雨、大雨和暴雨的TS评分,LAPS方案略好于3DVAR方案。总体而言,LAPS初始场能够有效改进GRAPES模式对中雨至暴雨的预报技巧。张涛^[43]对比GFS(Global Forecast System)预报场和LAPS分析场分别初始化WRF模式对北京“7·21”大暴雨的模拟效果。结果表明,和控制试验相比,LAPS初始化WRF对降水的模拟有明显改善。雨带出现时间及时,降水的雨量和落区与实况较吻合。另外,云系中雷暴生消过程也得以再现,较好体现了雨带中心的变换与移动。王叶红等^[44]以LAPS云分析产品为基础,进行了AREM模式冷、热启动的数值试验。结果表明:模式冷启动时,0~6 h的降水强度预报偏弱明显,通常只有不足5 mm的降水产生;模式热启动对0~6 h内云和降水预报影响显著,在积分的初始阶段产生较强的降水,并且对6~24 h降水预报仍保留正影响。

合理的模式初值(边值)是提高数值模式预报准确性的重要因素,湿度场、辐散场和温度场同时调整才能使物理初始化达到合理的结果^[45]。LAPS热启动可以同时调整模式的动力、热力和云的初值,使其相互匹配,从而较有效地减缓降水预报的SPIN-UP现象。

3.4 融合方案更新

学者持续跟踪算法更新升级后的有效性检验。张涛等^[46]应用STMAS开展地面气象要素数据融合。分别在北京、华北和中国三个不同大小的区域设计4种空间分辨率(1、5、10和20 km)的融合方案,利用国家级自动站数据开展独立性检验。结果表明,传统客观分析方法的平滑作用导致了观测信息损失。STMAS逐层分尺度的分析,使观测中细小的特征也能够较好体现,融合结果更接近实际观测。尤其是在青藏高原这样的观测资料稀疏的地区,STMAS方案的优势尤为显著。刘淑媛等^[47]考察了STMAS算法中雷达回波强度资料的三维变分同化方案和水汽惩罚项方案。以2009年8月的Morakot台风为个例的检验结果表明,同化方案比控制试验显著改善了降水落区、降水强度的预报。水汽惩罚项能有效削弱水汽影响的同时加强其他物理量(如台风总降水)的变化。雷达回波强度资料的同化方案对强降水区域的降水强度改善明显。

可见,更新后的系统确实加强了数据融合精度,在观测密集地区提供更多的细节,并且在资料稀疏的

地区也较好地规避了不良噪音。值得一提的是，中国气象局全球预报系统基于LAPS云分析方案和ADAS同化系统，发展了区域中尺度数值预报模式GRAPES-Meso中的云分析系统，实现了地面、卫星等多源观测资料在全球预报模式中的综合同化应用^[48]。

综上，由国内外研究现状可知，多源观测融合技术由美国发展起来。LAPS作为数据融合系统的先河，已经应用于多个国家和地区的实时气象业务，并集中在动能的应用系统中。20世纪引入国内以来，学者开展了较系统的算法及应用研究，但多集中在强降水、台风等典型气象现象的诊断和预报。多个单位建立了业务化体系，但多用于解决各预报模式热启动的降水预报精度。也就是说，LAPS的本地化侧重于系统和预报模式的联调效果，且主要关注降水。实况数据服务以高时空密度三维大气状态再现为目标，其本地化工作应侧重时空密度和风、温、压等多种要素，以此为目的的参数化研究和应用较少。

4 融合产品在实况数据服务的应用

4.1 基于位置的实况气象服务

以点为要素的全国气象观测资料是基于定点持续观测所积累的气象要素序列，由于站点分布不均、序列长短不一，在实际应用中受到诸多限制。我国现代公共气象服务系统建设目标之一是提高气象信息覆盖面，要求能够实时获取任意时间、任意空间尺度的气象服务信息，即基于位置的气象服务。基于位置服务^[49]是指服务提供商根据用户的位置信息和上下文信息提供的个性化服务。可见，基于位置的气象服务中，高时空分辨率的格点数据产品是重要数据基础。

中国气象局公共气象服务中心是中国气象部门对外服务窗口，更多承担了社会化气象服务的责任，《公共气象服务中心深化业务技术体制改革方案》明确指出，要加快推动气象服务格点实况数据集的研发与应用。

中国气象局公共气象服务中心2013年8月开展LAPS系统调研，2014年5月建立“高时空分辨率气象服务格点实况数据研发及应用”业务流程再造团队，团队目标是开展精细化、高频次气象服务格点实况数据融合研发。以LAPS系统本地化为基础，制作出一套基本覆盖全国的、基于实际地形的、接近实际观测的地面、高空多要素客观分析产品。

4.2 高分辨率实况格点产品

团队的实况格点产品研发包括三方面主要工作：

1) 将国内观测数据源转化为LAPS数据预处理模块能够识别的格式；2) 建立输出分析场和国内预报模式

耦合的连接程序，使其满足初值和边值条件应用方式；3) 根据本地的气象、气候条件以及国内观测仪器的精度和特点本地化分析模块的若干参数。

形成地面数据集两套：全国3 km空间分辨率数据集和全国1 km空间分辨率数据集。数据产品包括气温、露点温度、风矢量、风速、相对湿度和1 h累积降水量等（见图3~6）。全国3 km空间分辨率数据集，以T639模式预报场为初始场，融合4万余个地面自动站观测。分析区域的中心（37°N，102°E），格点数目为1901×1801，于2015年12月通过中国气象局应急减灾与公共服务司组织的业务化准入评审。全国1 km空间分辨率数据集则采用GRAPES模式预报场为初始场，分析区域中心不变，格点数据为5701×5401。

利用全国2380个国家级地面观测站，以3 km数据融合系统为基础，基于2012年全年的观测数据开展融合有效性检验。结果显示：气温的融合效果最好；相对湿度误差在观测站点较稀少地区（如新疆沿天山一带、四川盆地等地）较大；风速是空间非连续的物理量，融合系统分析能力较有限；1h累积降水的总体效果较好（表1）。不同量级降水的融合效果存在较大差异，小雨量级（0.1~1.9 mm）的模拟效果最好，大暴雨量级（≥20 mm）次之；中雨、大雨、暴雨的模拟效果稍差，并且，小雨和大暴雨的空报率很低，但大雨以上量级漏报率偏高，表明了融合系统对极端降水的再现能力稍低（表2）。

2016年，团队将该系统更新为vLAPS，并扩展至三维分析。使用GRAPES-Meso预报场作为背景场，已融合的观测资料包括风云卫星、日本葵花卫星、探空资料、地面资料，以及多普勒雷达资料，产生每小时一次的三维分析场。数据产品顶层为100 hPa，垂直层数为41层，分析要素进一步增加，除了基本的气温、压力、湿度、风的三维场，还包括云量、云高、云液

表1 气温、露点温度、1h累积降水、风速、相对湿度检验结果
Table 1 The statistic tests of surface temperature, surface dew point temperature, 1h accumulated precipitation, wind speed and relative humidity

要素	气温	露点温度	降水	风速	相对湿度
单位	℃	℃	mm	m/s	%
均方根误差	0.85	0.80	1.98	1.23	4.9

表2 1h累积降水量的分级检验结果
Table 2 The statistic tests of classification of 1h accumulated precipitation

统计量	0.1~1.9mm	2.0~4.9mm	5.0~9.9mm	10.0~19.9mm	≥20mm
均方根误差	0.87	1.94	3.66	7.04	17.19
空报率	0.09	0.43	0.52	0.50	0.24
漏报率	0.30	0.47	0.58	0.62	0.65

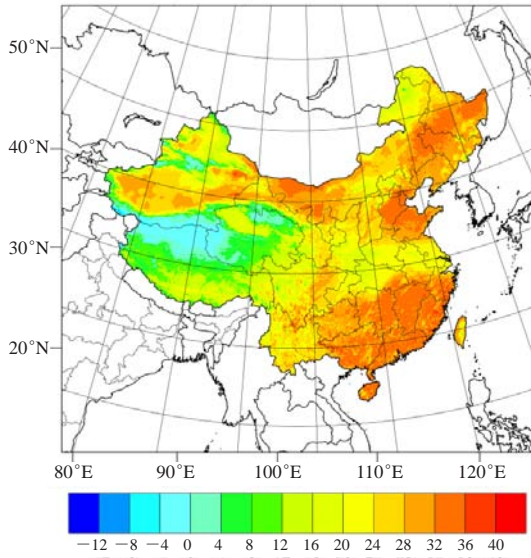


图3 2015年06月16日15时融合气温场
Fig. 3 The surface temperature on June 16, 2015

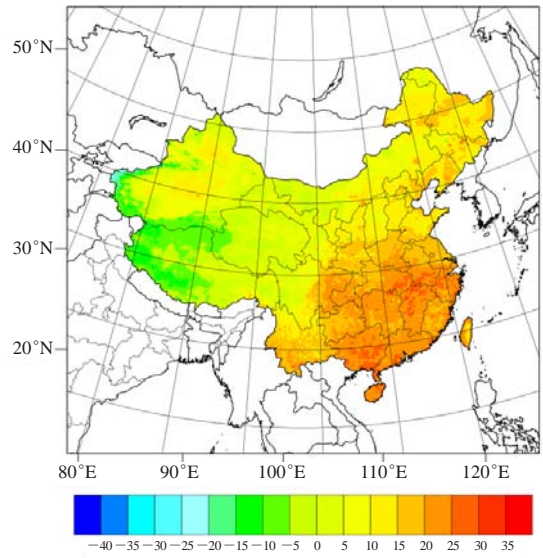


图4 2015年06月16日15时融合露点温度场
Fig. 4 The surface dew point temperature on June 16, 2015

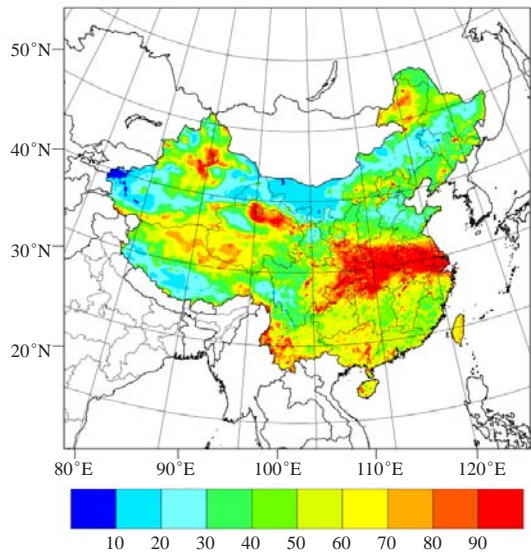


图5 2015年06月16日15时融合相对湿度场
Fig. 5 The relative humidity on June 16, 2015

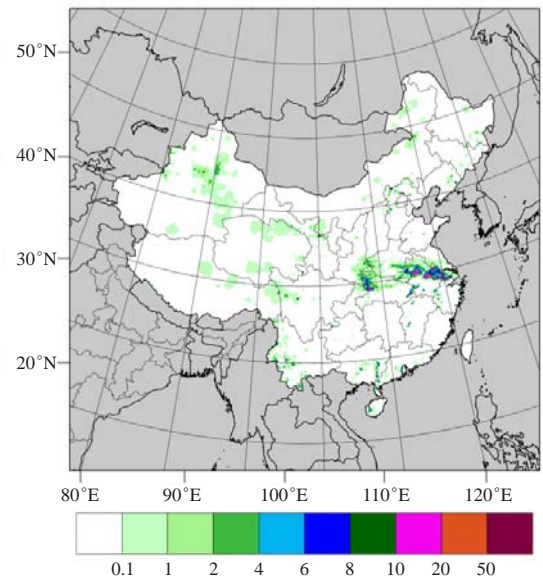


图6 2015年06月16日15时融合1h累积降水场
Fig. 6 The 1h accumulated precipitation on June 16, 2015

态水含量、云冰含量等三维产品。

为航空、保险等行业气象信息服务提供数据基础。

5 结语

LAPS系统为多源数据融合的研究提供了一个基础平台，有利于掌握各种资料时空特性。经过十余年的努力，国内学者已经初步完成了各常规资料的融合接口，以及融合效果的检验分析。在此基础上，依据研究目标的不同，学者和应用单位对系统开展了参数订正，使其更符合中国的天气气候特征、地形条件、

气象观测仪器特征，并不断跟进国际上对系统的更新发展。LAPS系统已应用于多项业务工作，其中，基于LAPS的高时空分辨率的实况产品，为基于位置的气象信息服务提供了数据基础。基于此数据集充分挖掘观测数据中的有用信息，对服务社会发展具有极强的现实意义。

参考文献

- [1] Albers S C, Mcginley J A, Birkenheuer D L, et al. The Local Analysis and Prediction System (LAPS): analyses of clouds,

- precipitation, and temperature. *Weather and Forecasting*, 1996, 11(3): 273-287.
- [2] Xie Y, Koch S, Mcginley J, et al. A space-time multiscale analysis system: a sequential variational analysis approach. *Mon Wea Rev*, 2011, 139(4): 1224-1240.
 - [3] Jiang H, Albers S, Xie Y, et al. Real-time applications of the variational version of the Local Analysis and Prediction System (vLAPS). *Bull Amer Meteor Soc*, 2015, 96(12):2045-2057.
 - [4] Hiemstra C A, Liston G E, Pielke R A, et al. Comparing Local Analysis and Prediction System (LAPS) assimilations with independent observations. *Wea Forecasting*, 2006, 21(6):1024-1040.
 - [5] Albers S C. The LAPS wind analysis. *Wea Forecasting*, 1997, 10(2): 342-352.
 - [6] Albers S C, Xie Y, Raben V, et al. The Local Analysis and Prediction System (LAPS) cloud analysis: validation with all-sky imagery and development of a variational cloud assimilation// AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, California, USA December 09-13, 2013.
 - [7] Jesuruga R T, Ramer J, Albers S, et al. Validation of aviation weather products for the Advanced Traffic Management System. Fourth International Conf on Aviation Weather Systems, Paris, France, June 24-28, 1991.
 - [8] Alberoni P P, Costa S, Selvini A, et al. Implementation and test of a mesoscale data assimilation system for Northern Italy. MAP meeting, Chamonix, France, October 7-10, 1998.
 - [9] Bouttier F, Courtier P. Data assimilation concepts and methods March 1999. Meteorological training course lecture series. ECMWF, 2002.
 - [10] Birkenheuer D. The effect of using digital satellite imagery in the LAPS moisture analysis. *Wea Forecasting*, 1999, 14(5): 782-788.
 - [11] Conte D, Miglietta M M, Moscatello A, et al. A GIS approach to ingest Meteosat Second Generation data into the Local Analysis and Prediction System. *Environmental Modelling and Software*, 2010, 25(10): 1064-1074.
 - [12] Costa S, Mezzasalma P, Alberoni P P, et al. Mesoscale and radar analysis of the 30 June 1998 supercell. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, 25(10/11/12): 1289-1292.
 - [13] Li P W, Lai E S T. Applications of radar-based nowcasting techniques for mesoscale weather forecasting in Hong Kong. *Meteor Appl*, 2004, 11(3): 253-264.
 - [14] Shaw B L, Mcginley J A, Schultz P. Explicit initialization of clouds and precipitation in mesoscale forecast models. 14th Conf. on Numerical Weather Prediction, Ft. Lauderdale, FL, July 30-August 2, 2001.
 - [15] Schultz P, Albers S. The use of three-dimensional analyses of cloud attributes for diabatic initialization of mesoscale models. 14th Conf. on Numerical Weather Prediction, Ft. Lauderdale, FL, July 30- August 2, 2001.
 - [16] Jankov I, Gallus W A, Segal M, et al. Influence of initial conditions on the WRF-ARW model QPF response to physical parameterization changes. *Wea Forecasting*, 2007, 22(3): 501-519.
 - [17] Etherton B, Santos P. Sensitivity of WRF Forecasts for South Florida to Initial Conditions. *Wea Forecasting*, 2008, 23(4): 725-740.
 - [18] Yuan H, Lu C, Mcginley J A, et al. Evaluation of short-range quantitative precipitation forecasts from a time-lagged multimodel ensemble. *Wea Forecasting*, 2009, 24(1): 18-38.
 - [19] Yuan H, Xie Y. Impacts of the STMAS cycling data assimilation system on improving hurricane prediction. *J Water Resources Planning and Management*, 2010, 123(6): 531-535.
 - [20] Jian G J, Shieh S L, Mcginley J A. Precipitation simulation associated with Typhoon Sinlaku (2002) in Taiwan area using the LAPS diabatic initialization for MM5. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2003, 14(3): 261-288.
 - [21] Clark A J, et al. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011, 93: 55-74, doi:10.1175/BAMS-D-11-00040.1.
 - [22] Snook J S, Stamus P A, Edwards J, et al. Local-domain mesoscale analysis and forecast model support for the 1996 centennial Olympic Games. *Wea Forecasting*, 1998, 13(1): 138-150.
 - [23] 周宜萍. 同化雷达资料对数值预报影响之研究. 台湾: “大气物理研究所”, 2005.
 - [24] 简国基, 邓仁星. 中央气象局LAPS/MM5系统在短时(0~12小时)定量降水预报之应用——梵高(Vamco, 2003)台风个例研究. *大气科学*, 2005, 33(1): 77-101.
 - [25] 范蕙君. 应用LAPS系统分析风、温度、云和降水. *气象科技*, 1997(4): 44-48.
 - [26] 李红莉, 张兵, 陈波. 局地分析和预报系统(LAPS)及其应用. *气象科技*, 2008, 36(1): 20-24.
 - [27] 李红莉, 崔春光, 王志斌, 等. 中尺度分析系统LAPS应用雷达资料的个例研究. *高原气象*, 2009, 28(6): 1443-1452.
 - [28] 刘志雄, 戴泽军, 彭菊香, 等. 基于LAPS的一次局地强冰雹过程分析. *暴雨灾害*, 2009, 28(4): 313-320.
 - [29] 刘寿东, 唐玉琪, 邵玲玲, 等. LAPS分析场在一次强对流天气过程尺度分析中的应用. *大气科学学报*, 2012, 35(4): 391-403.
 - [30] 崔春光, 李红莉, 彭菊香, 等. LAPS资料在一次鄂东初夏暴雨分析中的应用. *暴雨灾害*, 2008, 27(4): 307-312.
 - [31] 周后福, 郭品文, 翟菁, 等. LAPS分析场资料在暴雨中尺度分析中的应用. *高原气象*, 2010, 29(2): 461-470.
 - [32] 李平, 官莉, 黄勇, 等. 应用LAPS资料分析安徽沿淮一次短时暴雨特征. *气象与环境学报*, 2011, 27(6): 20-27.
 - [33] 唐玉琪. 基于LAPS的上海市中尺度天气分析和同化技术研究. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
 - [34] 王晓芳, 胡伯威, 李红莉, 等. 梅雨期一个伴有前导层状降水对流线的结构特征. *高原气象*, 2011, 30(4): 1052-1066.
 - [35] 彭菊香, 李红莉, 崔春光. 华中区域LAPS中尺度分析场的检验与评估. *气象*, 2011, 37(2): 170-176.
 - [36] 李红莉, 万蓉, 谢有方. 利用LAPS系统同化地基GPS水汽资料的应用研究. *热带气象学报*, 2010, 26(6): 702-709.
 - [37] 刘杰. 基于多源观测数据的大气三维水汽协同融合技术. 天津: 天津大学, 2011.
 - [38] 刘瑞霞, 陈洪滨, 师春香, 等. 多源观测数据在LAPS三维云量场分析中的应用. *应用气象学报*, 2011, 22(1): 123-128.
 - [39] 崔春光, 倪允琪, 李红莉, 等. 中国南方暴雨野外试验中尺度气象分析场的建立及其质量评估. *气象学报*, 2011, 69(1): 26-40.
 - [40] 李红莉, 彭菊香, 张艳霞. 多源观测资料在LAPS中尺度分析场中的作用分析. *暴雨灾害*, 2014, 33(3): 273-280.
 - [41] 李国静, 徐幼平, 成巍, 等. 一次大暴雨过程的多普勒雷达资料同化的敏感性试验. *暴雨灾害*, 2009, 28(2): 97-103.
 - [42] 刘春文. LAPS系统对多种探测资料的融合及在GRAPES模式中的应用研究. 兰州: 兰州大学, 2011.
 - [43] 张涛. 基于LAPS/STMAS的多源资料融合及应用研究. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
 - [44] 王叶红, 赵玉春, 李红莉, 等. AREM模式的热启动数值模拟——以2007年7月13日暴雨过程为例. *高原气象*, 2011, 30(6): 1488-1504.
 - [45] Donner L J, Rasch P J. Cumulus initialization in a global model for numerical weather prediction. *Mon Wea Rev*, 2009, 117(12): 2654-2671.
 - [46] 张涛, 苗春生, 王新. LAPS与STMAS地面气温融合效果对比试验. *高原气象*, 2014, 33(3): 743-752.
 - [47] 刘淑媛, 王奇, 刘海霞, 等. STMAS中雷达反射率数据三维变分同化方案. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(3): 337-343.
 - [48] 屈右铭, 陆维松, 蔡荣辉, 等. GRAPES-Meso云分析系统的设计与试验. *气象*, 2010, 36(10): 37-45.
 - [49] 唐科萍, 许方恒, 沈才樑. 基于位置服务的研究综述. *计算机应用研究*, 2012, 29(12): 4432-4436.

高速公路降雨致灾风险预警技术应用进展

戴至修¹ 柳艳香¹ 王志¹ 李宛育¹ 陈仲榆¹ 李巧媛²

(1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2 湖南省气象台, 长沙 410007)

摘要: 利用全国高分辨率定量降水预报 (QPF) 定量评估降雨对高速公路的危险性, 结合承灾体的脆弱性和暴露性、公路附近的环境敏感性以及当地防灾减灾能力, 研究高速公路降雨致灾风险的预报预警方法。借助GIS平台按照层次分析法 (AHP) 的思路将公路状况、经济水平等社会统计数据及地理信息融合为高速公路降雨易损背景场, 藉此将气象要素预报转化为影响预报; 降雨对高速公路影响的风险预报被定义为五级预警。以高速公路阻断信息对照预警试验结果, 基于本研究搭建的模型对于全国高速公路因降雨阻断的预警效果良好。

关键字: 公路交通, 降雨, 气象灾害预警, AHP, 易损背景场

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.006

Advances in Application of Early Warning of Risks to Precipitation Induced Transport Disasters on Freeway

Dai Zhixiu¹, Liu Yanxiang¹, Wang Zhi¹, Li Wanyu¹, Chen Zhongyu¹, Li Qiaoyuan²

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

2 Hunan Provincial Observatory, Changsha 410007)

Abstract: By assessing the hazardness resulted from precipitation based on national quantitative precipitation forecast (QPF), and estimating the fragility and exposure degree of the freeway, environmental sensitivity of surrounding areas, and capacity of disaster prevention and reduction of the local government, this study proposes a set of specifications on early warning of risks in precipitation induced transport disasters on freeway. The social statistical data including road conditions, economic level and geographic information are integrated into a normalized vulnerability metric, which help convert the rainfall intensity forecast into some impact pre-assessment, i.e. the five levels in early warning of risks. Compared with freeway blockage records, the results from this study are illustrated to be reliable and indicative for the precipitation induced freeway blockages.

Keywords: road transport, precipitation, meteorological disaster warning, AHP, vulnerability metric

0 引言

在气候变化的背景下, 恶劣天气的发生概率提高, 气象条件对公路交通安全性和连通度的影响变得更加复杂多变; 尤其是降水, 2012年“7·21”北京特大暴雨和2016年“7·19”华北强降雨过程两次刷新历史日降水极值, 积水造成了不同程度的区域交通瘫痪。另一方面, 自2005年交通部、中国气象局启动公路交通气象监测、预报和预警合作以来^[1], 公路事故数量和相应的经济损失连年下降, 气象灾害风险预警对于公路交通防灾减灾的意义已得到普遍认可。

据有关资料显示, 按天气和路况统计, 公路交通受天气影响最大的问题是降雨和路面潮湿^[2]。降雨对高速公路的影响涉及多种雨型和灾害类型, 属于非

线性多目标规划问题^[3], 对于单一灾害的风险预报, 物理过程相对明确, 有一系列较成熟的思路和技术可供借鉴^[4], 如临界雨量法^[5]、经验预报法^[6]、预报模型法^[7]等。但我国幅员辽阔, 不同地区的气象要素自然特征和孕灾环境社会特征差异巨大, 降雨影响高速公路的主要物理过程和临界阈值不尽相同, 此前的研究适于在区域特征一致的小范围内应用, 全国范围的降雨预警需要做出一些必要的模型简化。

灾害风险评价技术可应用于风险预警, 定量分析时主要涉及两个关键问题。首先, 目前降雨致灾风险评价的难点在于不同学科工作者之间合作, 如何针对不同评估目的, 整合、分析相关空间数据, 进而建立具有较强可靠性和针对性的评价模型^[7]。层次分析法 (AHP) 是灾害风险评价体系中一种可直观应用专家经验的决策方法^[8], 根据专家意见筛选与灾害相关的要素, 并归类建立递阶层次关系, 确定各层次内因子间的权重体系, 最后加权结合量化风险。另一个关键

收稿日期: 2016年9月2日; 修回日期: 2016年12月5日

第一作者: 戴至修 (1988—), Email: daizx@cma.gov.cn

资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201406029)

问题在于如何针对风险确定预警级别，相关思路包括按样本统计特征^[9]、取经验阈值^[5]，通过模型或试验计算重现期或发生概率^[10]，本研究主要参考降雨级别对风险进行分级，并以公路阻断实况加以调整。

1 资料和方法

1.1 资料

本文采用国家气象中心业务化的逐6 h间隔5 km格点定量降水预报资料(QPF)作为预警模型的气象输入数据，该资料参考T639以及ECMWF、NCEP、日本、德国等多家机构的模式产品^[11]，预报性能随数值模式的进步将不断提升，目前根据检验效果截取了未来3d预报作为预警的气象输入数据。

路网拓扑及公路阻断信息来自交通部路网中心，其他交通相关数据主要来自交通运输部《交通行业发展统计年报》^①及交通运输部科学研究院整理的《2004—2013年道路交通事故统计数据》^②；另外，基础地理信息来自国家测绘地理信息局，经济数据来自国家统计局《中国统计年鉴》^③及各省市政府官网发布的相关报告。

非气象指标在时间维上变化不大，观测数据在空间维上还表现了明显的分布不均，考虑到各指标的有效特征半径和各地区的预警需求，数据预处理阶段将各指标数据融合成易损背景场^[12]，并插值为10 km分辨率的栅格数据。

1.2 方法

1.2.1 层次分析

在基于AHP的灾害评估体系中，高速公路降雨致灾风险评价的准则层可划分为降雨的危险性、高速公路交通的脆弱性和暴露性、公路附近环境的敏感性以及当地的防灾减灾能力等(图1)。

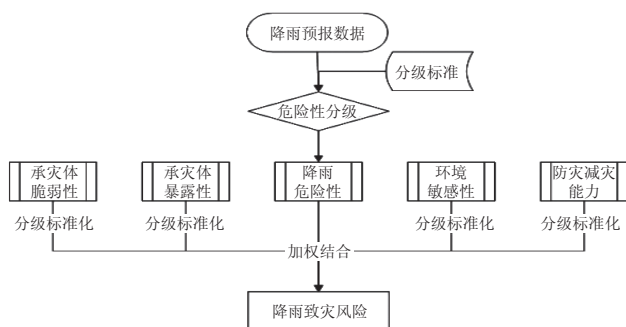


图1 降雨致高速公路交通灾害风险评价流程图

Fig. 1 Flow schedule for risk assessment of precipitation induced freeway transport disasters

从经济收效来说，针对突发降雨的预警效果更好；参考公路交通的需求，本研究以6 h雨量作为降雨的危险性指标。降雨情况随时间变化大，以日常更新的危险性作为预警模型的驱动指标。另外，敏感性包括公路地势的坡度和起伏、岩层类型、周边河网分布和植被覆盖，暴露性包括人口密度、车流量、路网密度等，脆弱性包括公路阻断情况、灾情信息等，防灾减灾能力主要体现在地方财政预算和GDP等方面(表1)，其中所有随时间变化相对稳定的非气象要素指标，可综合为易损背景场：以专家打分法获得各准则层内部的权重体系，标准化后按权重累加成准则层指标，考虑到基础数据的精度和指标在全国范围的差异性，不妨将各指标分级，以分级指标衡量高速公路降雨易损等级。

表1 AHP分析高速公路降雨致灾风险指标内容
Table 1 Risk assessment inventory of precipitation inducing freeway transport disaster

目标层	准则层	指标层(方案层)
高速公路降雨致灾风险 A	危险性B1	6 h累积雨量 C1
	敏感性 B2	坡度/起伏度 C2
		土壤/岩石类型 C3
		河网分布 C4
		植被覆盖率 C5
	暴露性B3	人口密度 C6
		车流量 C7
		路网密度 C8
		车辆保有量密度C9 高速公路里程密度C10
	脆弱性B4	高速公路阻断信息C11
		高速公路灾情信息 C12
		人员伤亡 C13
		经济损失 C14
	防灾减灾能力 B5	地方财政预算 C15
地均GDP C16		
人均GDP C17		

1.2.2 模型简化

基于AHP方法的模型关键技术在于各层指标的分级，以及层内指标间合成。实际上，以上两步均有多种实现方式，按致灾因子特征和易损条件对模型调试，根据预警效果筛选最优技术方案。许多研究表明^[13]，在非气象要素确定的条件下，单位时间内降雨越强，降雨导致公路交通灾害的风险越大。本研究力求在全国范围内提高对降雨灾害的整体预警能力，模型设计时作了如下基本假设。

1) 灾害相关的各项指标均与灾害风险单调线性相关，且经筛选后的指标间相互独立，通过加、乘基本运算叠加即可反映风险大小。

2) 全国所有样本符合同一分布，高速公路降雨灾

① 交通运输部. 2004—2013交通行业发展统计年报. <http://www.moc.gov.cn/zizhan/siju/guihuasi/tongjixinxin/>.
② 交通科学数据共享网. 2004—2013年道路交通事故统计数据. <http://www.transdata.cn>.
③ 国家统计局. 2004—2013中国统计年鉴. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>.

害的各准则层均可通过一组特定阈值分级反映强度。

3) 降雨对高速公路的影响综合体现于降雨灾害风险, 高风险路段上各类降雨的不利影响整体较强, 发生灾害(如公路阻断)的概率更高。

1.2.3 指标分级

本研究参考多个行业气象分级标准^{①[14]}和相关研究^[2], 试验应用几组不同分级阈值, 模型对2015年全国高速公路因降雨阻断的预警效果, 不同分级标准下模型不同级别预警落区会有系统性差异(组图略), 权衡预警对阻断的指示性和预警落区的针对性, 以预警落区的有效范围最大为宜, 据此推荐一组应用于全国范围的高速公路降雨危险性阈值, 见表2。其余非气象要素指标也分别按照与灾害风险成正比设计, 除有明确行业标准的, 根据全国所有空间样本的统计分布特征采用自然断点法进行分级。

表2 按6 h降水量判定各级危险性阈值

Table 2 Hazardness grading standards in 6 h accumulated amount

危险性级别6h 降水量 (mm)	0	1	2	3	4	5
分级标准	0	(0-10]	(10-15]	(15-30]	(30-50]	(50,+∞)

1.2.4 风险评价

将分级标准化后的高速公路降雨危险性易损背景场以乘法运算相结合, 表示各指标条件相继满足导致灾害风险。计算出的高速公路降雨致灾风险值直接按大小对应各预警级别: 所有指标均按阈值划分为五级, 除防灾减灾能力一项与致灾风险呈反比, 其余指标均与致灾风险呈正比, 令负相关的指标等级反序

排列, 即对防灾减灾能力一项取逆序指标(6-该指标等级), 该逆序指标与致灾风险同样成正比; 敏感性、暴露性、脆弱性及防灾减灾能力组成高速公路因降雨易损背景场, 各指标级别值除五归一, 即合成的易损背景场除以5⁴(即625), 见图2; 基于雨强与灾害强度正相关的假设, 将危险性级别与归一的易损背景场相乘, 以危险性级别直接对应预警级别, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{降雨致灾风险} &= \text{危险性} \times \text{易损背景场} \\ &= \text{危险性} \times [\text{敏感性} \times \text{暴露性} \times \text{脆弱性} \times (6 - \text{防灾减灾能力})] / 625 \\ &= \text{危险性} \times \text{敏感性} \times \text{暴露性} \times \text{脆弱性} \times (6 - \text{防灾减灾能力}) \times 0.0016. \end{aligned}$$

1.2.5 效果检视

以2015年5月—2016年9月交通部路网中心在册的全国因降雨(积水)阻断记录与降雨等级预报与降雨风险预警结果对照, 上述预警模型对降水造成阻断指示作用明显强于原始的降雨预报且全年表现稳定, 即总有高风险落区较强降雨落区范围能更集中地对应公路因降雨阻断, 或小到中雨落区中风险较高区域对应阻断。

总体而言, 在我国大部分地区, 模型对于因降雨造成的阻断预警效果比降雨预报指示性强, 尤其在降雨危险性不强但高速公路降雨易损等级较高的华北和四川盆地区域, 风险预警较降水预报明显更有针对性; 但在部分地区, 为达到更好的预警效果, 应对模型做出一定调整, 如: 在西北和东北地区, 模型预警等级偏低, 应当结合该地区降雨强度, 对危险性分级阈值作出调整; 在江淮、江汉地区, 模型预警效果较降雨预报不显著, 应考虑参考该区域公路降雨灾害发生机理, 调整易损背景场内部指标合成方案。以下以2016年华北“7·19”强降雨过程为例, 展示模型预警效果。

2 高速公路降雨致灾风险预警试验

2016年7月18日18时, 因全国范围出现分散阵性强降水, 中央气象台发布暴雨橙色预警。19日01时—20日23时期间, 因黄淮气旋北上, 华北出现多年罕见的强降雨过程, 北京市区降雨总量超过2012年“7·21”特大暴雨, 交通部路网中心通报多地发生公路阻断, 利用国家气象中心逐小时QPE累积全国6 h降雨实况见图3。

图4显示了2016年7月18日08时制作的未来24 h高速公路降雨致灾风险预警, 高风险区与图3中强降雨落区相匹配, 具体可以看到: 18日白天, 四川境内

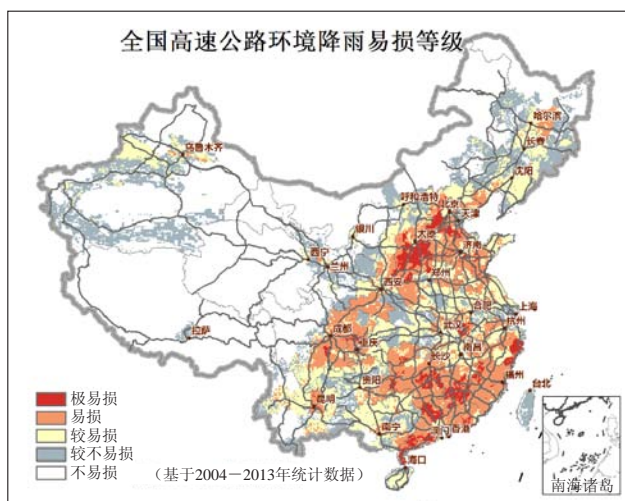


图2 全国高速公路因降雨易损背景场

Fig. 2 Nationwide normalized vulnerability metric of freeway subject to precipitation

① 中央气象台. 全国6小时降水量实况分级. <http://www.nmc.cn/publish/observations/6hour-precipitation-02.html>.

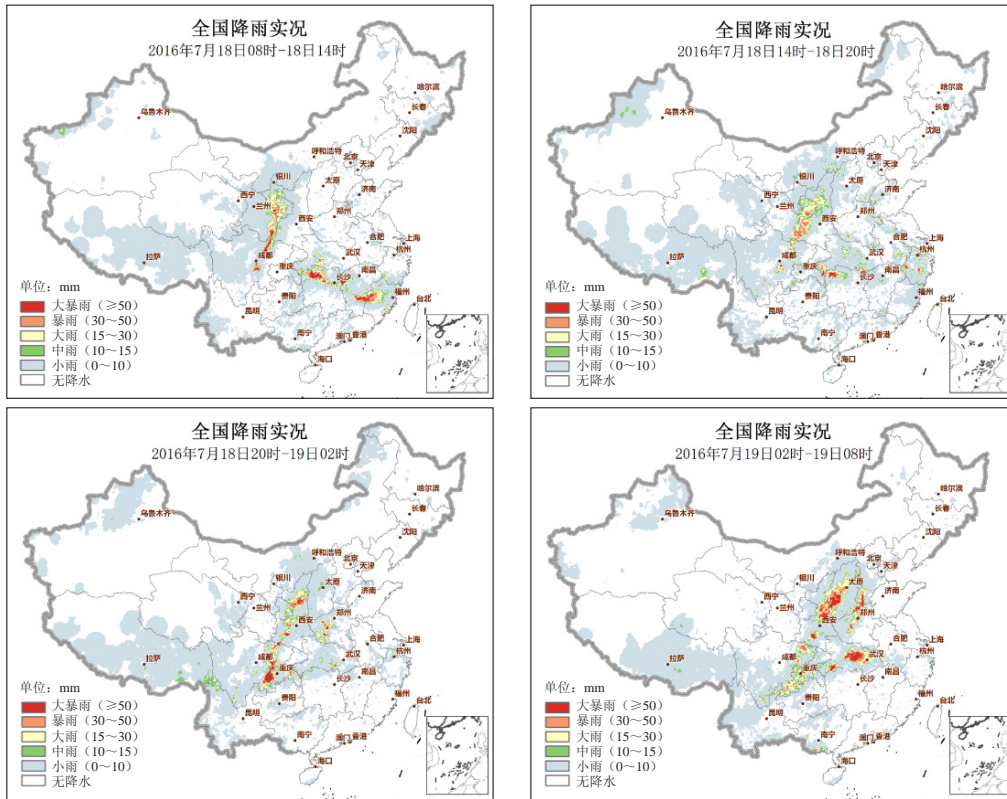


图3 2016年7月18日08时未来24h内逐6h全国降雨实况

Fig. 3 Observations of 6 h precipitation in 24 h started at 08 BT July 18, 2016

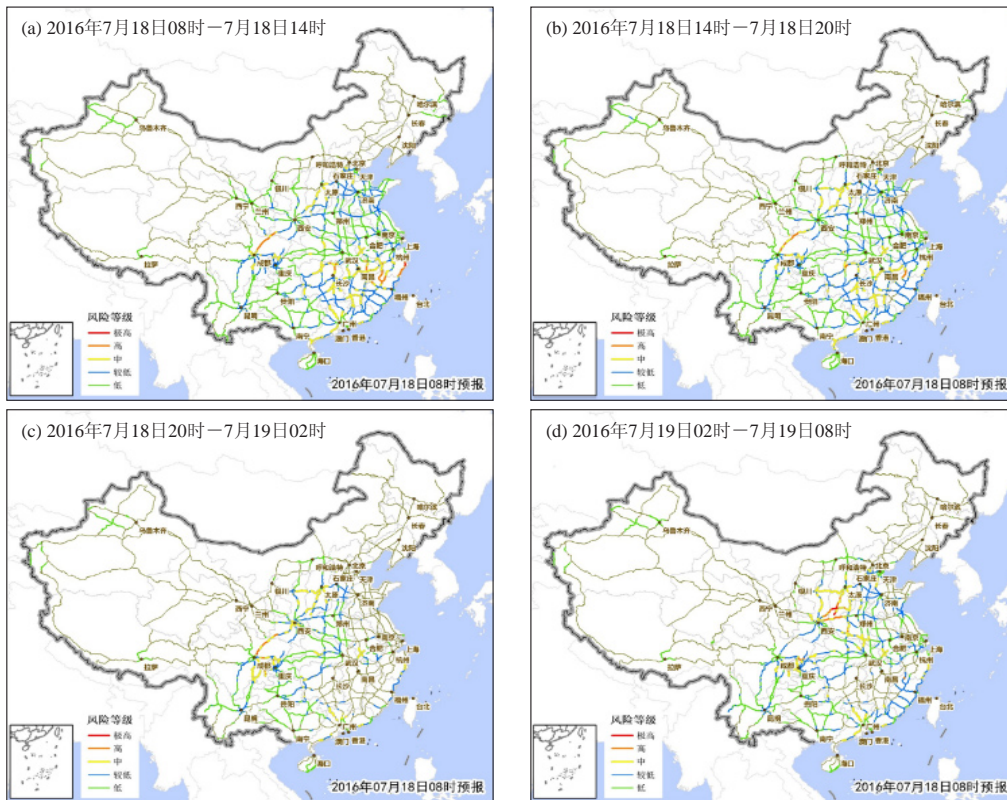


图4 2016年7月18日08时未来24h内逐6h高速公路降雨致灾风险预警

Fig. 4 6 h risk warning (lined) of precipitation induced freeway transport disaster in 24 h started at 08 BT July 18, 2016

京昆高速部分路段风险高；山西—河北境内青兰高速，四川境内兰海高速，湖南境内二广高速，江西境内沪昆和泉南高速部分路段风险中。18日夜间至19日早间，山西境内二广高速，四川境内厦蓉、渝昆、包茂高速部分路段风险高；四川境内兰海、沪蓉高速及G93、G212部分路段；河北境内京昆、青兰高速部分路段风险中。上述路段附近在相应预警时段均有因降水造成的阻断发生。

如表3所示，公路阻断与降雨致灾风险预警中级以上的路段匹配度高，对于2016年7月18—19日降雨过程，阻断主要集中在四川、山西—河北境内，尤其对四川境内公路阻断的风险预警的指示意义强。西南与华北地区常年降雨量不大，高速公路降雨易损等级高，因而此次强降雨过程对这些地区的高速公路影响更大，风险预警效果较其他地区更明显。浙江、安徽、福建、广东境内有相当多的路段风险预警中级以上，但同期并没有任何匹配的阻断记录，与图3实况对照，这些区域存在不同程度空报情形；另外，这也提示在这些区域，尤其是上海、广州等大城市周边，可能由于路网密度与交通量较高，模型对于降雨对高速公路的影响过于敏感，即公路降雨易损等级偏高，导致风险预警偏高。

图5对比了本研究的风险预警结果与降雨预报等级，虽然二者趋势变化一致，但在落区形势上还是颇有出入。

对照公路阻断，风险预警明显针对性更强：某些区域预报降雨量级大但并没有发生阻断，如18日白天，宁夏—陕西北部预报有大到暴雨，但对高速公路致灾风险较低，没有造成明显的公路阻断；而某些降雨量级本身不大但风险较高的区域确实发生了阻断，如18日夜间至19日晨，山西境内二广高速因降水发生阻断；对比结果说明，除了降雨强度，降雨预警还体现了公路交通暴露程度与地区路网条件的脆弱性和敏感性等非气象条件对降雨致灾风险的影响。

3 结论与讨论

1) 6h降雨量可作为高速公路降雨危险性的简化指标，该指标与降雨灾害关联性高，时间分辨率满足公路交通的精细化服务需求，同时操作简单、节省计算量。

2) 危险性分级体系应当既体现地区降雨特征，同时保证全国范围内危险性等级具有横向可比性；本文采用的分级标准主要适用于我国中东部大部分地区，对于西部少雨的地区，可以根据地区标准调整分级阈值。

3) 较气象要素预报，结合承灾体易损条件的气象灾害风险预警兼顾了致灾过程中各环节相关影响因子，高速公路降雨致灾风险预警模型对于因降雨引起的公路阻断的指示针对性更强，对于防灾减灾工作更有指导意义。

表3 2016年7月18日08时预报未来24 h高速公路降雨风险预警路段

Table 3 Early warning routes on precipitation induced freeway transport disasters risk, made at 08 BT July 18, 2016

风险预警时段 级别	风险极高路段	风险高路段	风险中路段
18日08—14时	浙江: 沈海、G104 福建: G316	四川: 京昆 湖南: 京港澳 浙江: 甬金、温丽 福建: 京台、长深、福银	山西: 二广 山西—河北: 青兰 四川: 兰海 湖南: 二广、杭瑞、泉南 江西: 厦蓉、大广、济广、沪昆、福银、泉南 浙江: 长深、京台 广东: 二广、沈海
18日14—20时		四川: 京昆 湖南: 杭瑞、G106 福建: 京台	山西: 京昆、 山西—河北: 青兰 陕西: 包茂、青银 河北: 京沪、京昆、G112、G108 四川: 兰海、沪蓉 湖南: 京港澳、泉南 江西: 沪昆、福银、厦蓉、大广 广东: 二广、京港澳
18日20时—19日02时		陕西: 京昆 四川: 厦蓉、渝昆、京昆、兰海、G318、G319、G321 湖南: G209	陕西: 包茂、青银、G210 山西: 京昆、青银、G108、G209 四川: 兰海、沪蓉、G93、G212 浙江: 沈海 安徽: 沪渝、济广 广东: 二广
19日02—08时	山西: 京昆 河南: 连霍	山西: 二广 四川: 包茂、沪蓉、厦蓉 湖北: 福银 湖南: G209 福建: 京台	河北: 京昆、青兰 山西: 青银 浙江: 沈海 广东: 京港澳、二广、沈海

注: 红色字为同期发生阻断路段。

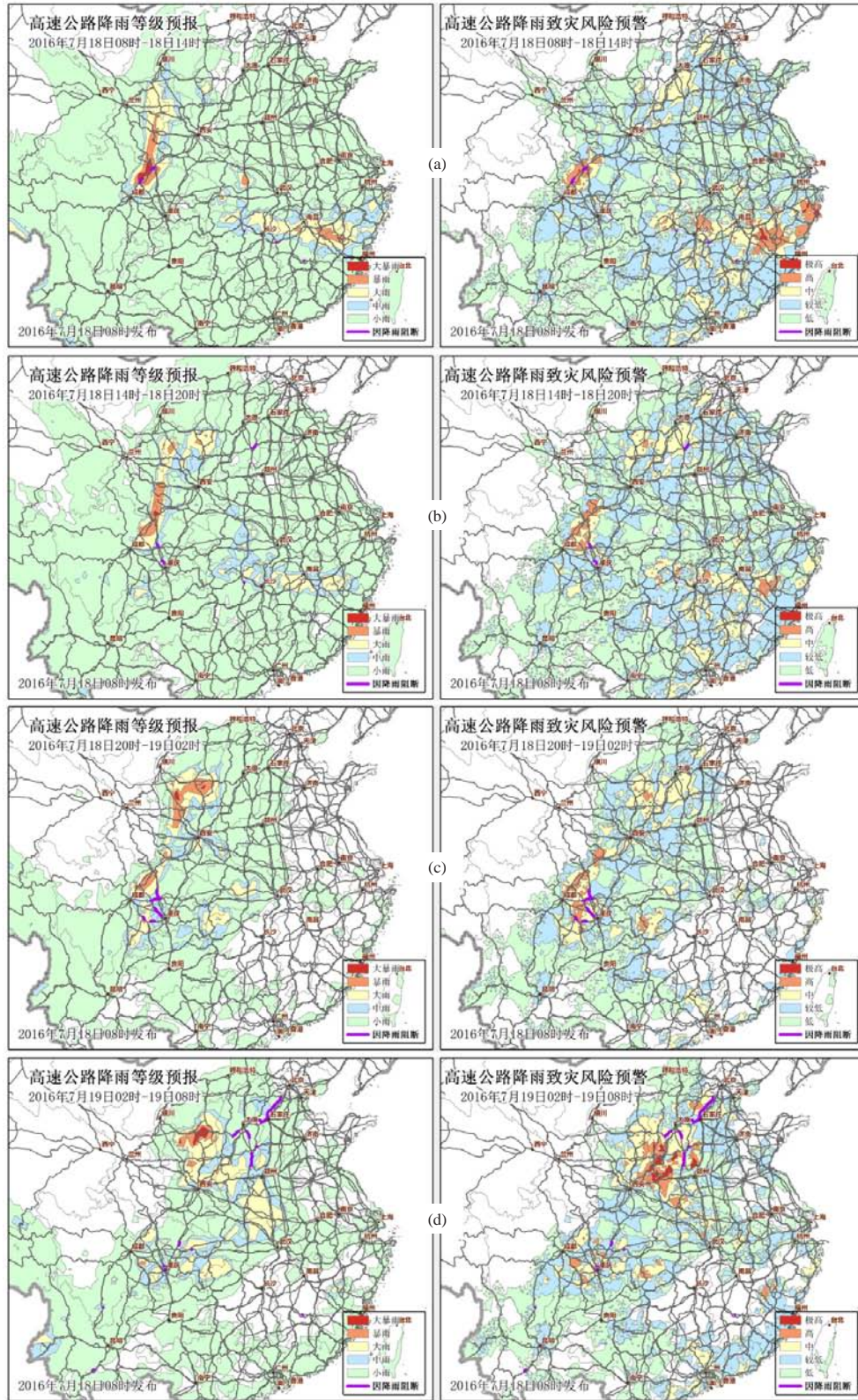


图5 2016年7月18日08时发布未来24h内逐6h降雨等级预报落区(左)和高速公路降雨致灾风险预警落区(右)与高速公路因降雨阻断对照图组

Fig. 5 Comparisons of 6 h precipitation grade forecast (shaded in the left maps of each panel) and risk warning of precipitation induced freeway transport disaster (shaded in the right maps of each panel) to the temporal freeway blockages (purple lined) in 24 h started at 08 BT July 18, 2016

当今天气大师风采

——记美国FV3模式主要研发者

■ 贾朋群



2017年4月14日出版的《科学》杂志，在特写栏目里推出了题为“天气大师”的文章，介绍了华人气象学家Shian-Jiann Lin在开发统一的天气和气候预报模式方面的杰出贡献。这份国际科学界顶尖期刊，用整整4个页面刊载了这篇特写文章，特别是占了半个页面的押题图——文章的主角在全球大气环流图前的淡定、自若，让读者感觉到气象学家的胸有成竹，世界风云尽在其掌控中。押题图和特大号的简明题目相呼应，令人难忘，更让全球气象界同仁多了些期待和祝福。

1958年出生的华裔科学家Shian-Jiann Lin博士（同事们都叫他S. J.），自小就有很深的气象情结。在中国台湾长大的他，目睹了太多台风登陆带来的巨大风暴，并在他脑海里留下很深的印记。这样的风暴能量来自哪里是他很小就思考的问题，用S. J.自己的话来说，就是“飓风已经融入我的血液”。而S. J.在《科学》杂志文章里被称为天气大师，很大程度上基于其领导的大气动力核心模式——FV3，在美国下一代模式研发过程中，在激烈的模式竞标活动中胜出。

S. J.在台湾读大学的主要专业是微处理器，他连带学习气象和流体力学。这两个课程打下了未来他用不连续的计算机0或1的语言，解读大气中连续流场的基础。1983年，他赴美留学，选择他可以支付学费的奥克拉荷马州大学航空工程系学习，曾经想成为火箭专家的他，却得到指导老师的点拨：具有计算流体力学天赋的他，应该转向与地球物理流体力学实验室（GFDL）关系密切的普林斯顿大学。

于是，不忘少年初衷的S. J.于1985年在俄克拉荷马大学获得宇航和机械工程硕士学位后，1989年在普林斯顿大学

获得大气科学博士学位。获得博士学位后，S. J.回到俄克拉荷马大学，作为博士后研究模拟龙卷风。然而，气象研究的第一步并不顺利，那时计算机还无法模拟如此小尺度的大气运动。这样令人难以接受的失败，却在S. J.脑海里留下了这样的教训：面对特殊问题选择合适的复杂度，而且在掌握资源时再试图解决问题。而这时NASA试图解决南极臭氧洞的问题而苦于缺少模式模拟研发人员，S. J.等来了合适的问题和机会，1992年他加入NASA，开始走向天气模拟大师的成功之路。2003年，他携FV3模式来到GFDL，实现了20年前他的研究生导师的主张。

2016年3月30日，S. J.在宾州大学演讲时指出：“美国下一代全球预报系统项目让不同的模拟哲学之间的强烈对比昭然天下，这种对比发生在科学界内部和外部（例如，通过流行的博客）。”在这次题目为“区域天气和全球气候模拟中的教条和行规”的演讲中，他介绍了FV3模式研制过程中，如何向阻碍创新的不同“教条”和“行规”宣战的抗争过程，而他的团队做这些的目的，是试图统一天气和气候应用的区域和全球模式。基于FV3的预报系统，未来不仅能告诉市政部门明天是否要准备扫雪机械，还能告知未来海平面上升的幅度。

中标后的S. J.团队，还在努力完善FV3模式，其中一项重要的改进，就是让模式增加强大的“聚焦”功能，因此可以很好地“瞄准”主要天气系统。改进后的模式网格能够在主要天气系统周围生成边长为2~3 km的高分辨率的嵌套网格。拥有这一功能的模式，在面对飓风等天气系统时，可以和全球预报同步完成对飓风的预报，而不是像现在，先要完成全球模式的预报，再用区域模式进行飓风预报。FV3模式的成功开发以及进行中的改进，无不践行着S. J.最早开发龙卷风模式失败所汲取的教训而得到的研发规则：掌握合适的复杂度和选择好解决问题的时间。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

参考文献：

- [1] 张弛. 专业气象预报走进公路交通. 中国交通信息产业, 2005, (8): 15-16.
- [2] 余健, 余丽萍, 栗建勇. 气象因子对高速公路交通安全的预警初探. 浙江气象, 2008, 29(1): 43-46.
- [3] 魏权龄. 数学规划引论. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.
- [4] 高云, 李庆林. 山洪预警预报技术研究与应. 黑龙江水利科技, 2016, 44(2): 117-119.
- [5] 吴建军, 袁成松, 周曾奎, 等. 短时强降雨对能见度的影响. 气象科学, 2010, 30(2): 274-278.
- [6] 刘廷新, 商岳, 姜华, 等. 基于模糊神经网络的高速公路微气象交通预警方法: CN 102722989 A. 2012.
- [7] 王福恒. 基于GIS的区域公路边坡灾害评价与预测研究. 西安: 长安大学, 2011.
- [8] 扈海波, 王迎春, 熊亚军. 基于层次分析模型的北京雷电灾害风险评估. 自然灾害学报, 2010(1): 104-109.
- [9] 狄靖月, 王志, 田华, 等. 降水引发的西南地区公路损毁风险预报方法. 应用气象学报, 2015, (3): 268-279.
- [10] 杨秋珍, 徐明, 李军. 对气象致灾因子危险度诊断方法的探讨. 气象学报, 2010, 68(2): 277-284.
- [11] 宗志平, 代刊, 蒋星. 定量降水预报技术研究进展. 气象科技进展, 2012, 2(5): 29-35.
- [12] 殷坤龙, 朱良峰. 滑坡灾害空间区划及GIS应用研究. 地学前缘, 2001, 8(2): 279-284.
- [13] 陈方, 戴晓峰, 吉选, 等. 降雨对城市交通系统的影响与预警对策. 武汉理工大学学报(社会科学版), 2013, 26(4): 506-509.
- [14] 中国气象局. 高速公路交通气象条件等级(QX/T 111-2010). 北京: 气象出版社, 2010: 1-2.

高铁气象灾害防御体系现状分析与对策研究

崔新强 付佳 代娟 刘静 周小兰
(湖北省气象服务中心, 武汉 430074)

摘要: 从分析我国及日本、法国、德国等发达国家高铁气象灾害防御体系现状入手, 对四国高铁气象灾害防御体系特征进行了概括分析, 提出了进一步加强我国高铁气象安全防灾能力建设的几点建议, 为高铁安全运营管理和气象防灾减灾服务提供决策参考。

关键词: 高铁, 气象灾害防御, 现状分析, 对策研究

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.007

An Analysis and Countermeasure of Current Situation in the High-Speed Railway Disaster Prevention System

Cui Xinqiang, Fu Jia, Dai Juan, Liu Jing, Zhou Xiaolan
(Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205)

Abstract: Based upon comparisons of current situation in the high-speed railway disaster prevention system in our country with that in developed countries such as Japan, France, Germany, this article summarized four characteristics of the high-speed railway disaster prevention system and gives several suggestions to further construction of the high-speed railway security and disaster prevention ability, also provides a decision-making reference on the high-speed rail safety operation management, disaster prevention and mitigation services.

Keywords: high-speed railway, disaster prevention, analysis of the situation, countermeasure research

0 引言

自2008年我国第一条高铁——京津城际铁路开通以来, 我国高铁建设十分迅猛。截至2016年6月, 我国高铁运营里程已达到2万 km, 稳居全球第一, 实现了2008年规划提出的“四纵四横”目标。根据2016年7月最新发布的《中长期铁路网规划》, 我国高铁网将升格到“八纵八横”, 到2020年, 高铁运营里程将达到3万 km, 覆盖全国80%以上的大城市。

高铁运营与气象、地震、地质条件极为密切。高铁因其速度很快, 一旦出现突发情况可供处置的时间很短, 可供选择的方式也有限, 造成的损失往往比较惨重。1998年6月3日, 由慕尼黑开往汉堡的德国高铁事故曾造成101人死亡、105人重伤的惨剧。2011年7月京沪高铁开通, 曾因暴雨雷电天气在4天中就发生了3次故障。同年7月23日, 因雷击导致设备故障后应

急处置不力造成的“7·23”杭深线动车追尾事故, 造成40人死亡、200多人受伤^[1]。

尽管高铁运营安全事故时有发生, 但在最早开通高铁的日本和法国, 却一直保持着高铁运营“零死亡”的记录, 被公认为全世界高铁最发达和最安全的国家。这些国家的共同特点是高度重视高铁灾害防御系统的建设。日本新干线自1964年10月1日开通以来, 52年来从未发生过一起导致人员死亡的事故, 创造了世界高铁运营的奇迹^[2]。法国最早的高铁1983年开通, 同样创造了33年安全行驶“零死亡”的记录。

分析比较发达国家与我国高铁气象安全防灾业务现状^[3-6], 对于构建我国高铁安全运营灾害防御体系, 提升我国高铁安全运营管理和气象防灾减灾服务水平无疑具有积极的借鉴作用。

1 国外高铁气象灾害防御体系现状

日本、法国、德国等发达国家, 从高铁修建之前就一直致力于高铁的安全防灾系统研发, 由于其经济和技术优势, 高铁安全保障主要依靠完善和密集的实时自动监测系统及智能化信息管理系统^[7-10], 为世界

收稿日期: 2016年10月28日; 修回日期: 2016年11月24日

第一作者: 崔新强(1963—), Email: zytctxq@126.com

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项经费项目
(GYHY201306058)

高速铁路安全运营树立了典范。

1.1 日本高铁气象灾害防御体系现状

日本对新干线的安全防范极为重视,新干线运行以来,创造了铁路运输史上一个又一个奇迹^[1]。经过几十年的不断研发,已经从最初简单的气象观测、报警、防护逐步构建了一整套安全防灾智能化信息管理系统,加强对强风、暴雨等主要气象灾害的监测,以确保新干线的安全。其安全防灾体系具有以下2个方面的鲜明特征,这也许是新干线创造一个又一个神化的“秘密武器”。

1) 自然环境预测和警报系统。新干线在高铁沿线多处布设了地震侦测器、风速计、雨量计、水位报警器、降雪监视器、铁轨温度报警装置、塌方落石报警装置等。构建了多个智能信息管理系统,如气象安全监测系统(MICOS)、风廓线系统(WINDAS)、智能地震预警系统(UREDAS)。

MICOS系统依据不同路段气象灾害风险情况设置有不同的风、雨、雪等气象灾害临界值,一旦系统监测到的气象要素值达到灾害临界值,系统会自动采取行车方案(减速或停车),同时将报警信息显示在驾驶台上。如新干线规定: $25 \text{ m/s} \leq \text{平均风速} < 30 \text{ m/s}$, 列车限速 160 km/h ; $30 \text{ m/s} \leq \text{平均风速} < 35 \text{ m/s}$, 列车限速 70 km/h ; 平均风速 $\geq 35 \text{ m/s}$, 列车停止运行。1 h降水量超过 25 mm , 列车开始警戒; 1 h降水量为 $40 \sim 45 \text{ mm}$, 列车限速 170 km/h ; 1 h降水量一般区间超过 50 mm , 高架、无砟桥超过 70 mm , 列车停止运行。钢轨积雪在 $17 \sim 19 \text{ cm}$ 时, 列车限速 210 km/h ; 钢轨积雪在 $19 \sim 22 \text{ cm}$ 时, 列车限速 160 km/h ; 钢轨积雪在 $22 \sim 30 \text{ cm}$ 时, 列车限速 110 km/h ; 钢轨积雪 30 cm 以上时, 列车停止运行。

WINDAS系统由于观测频次多、获取资料连续性强、自动化程度高、运行成本低等特点,也越来越广泛地得到应用,在新干线风灾防御中发挥了重要作用。

UREDAS系统通过探测网络可以在检测到第一轮地震P波后即停止向新干线送电,紧急刹车装置会自动启动,这一系统可保障列车自动停车。2011年“3·11”大地震期间,行驶在东北新干线区域的列车全部实现了自动安全停驶,避免了因地震造成列车出轨而引发的严重人员伤亡事故发生。不仅是地震,只要路基出现异常,比如凹凸不平,新干线也会自动停车。

2) 行车管理自动控制系统。主要依靠列车自动控制系统。例如,驾驶室信号和列车自动控制系统(ATC)、列车自动停车系统(ATS)以及列车集中控制系统(CTC)。现在新干线已经采用新的管理系统

(PTC),实现了完全电脑系统自动化管理方式,操作要点、信号控制,车站自动广播及车辆的管理、运输障碍时的时间表修正等,全部实现了自动化管理。

1.2 法国高铁气象灾害防御体系现状

法国对高铁安全防灾工作也非常重视。法国第一条高铁从立项到开通了整整12年时间,可见其对安全工作的重视程度。法国高铁气象安全防灾体系主要有以下3个方面特征。

1) 重视智能化管理与控制系统研发。法国的列车自动控制系统(TVM430)能够实现列车与地面信息的交换,能代替列车驾驶人员的全部功能,当地面出现危险情况时,无须驾驶人员参与就能确保列车安全停车。除此而外,系统还具有设备状态和自然环境检测、报警子系统。自动检测系统可实现列车自动检测、接触网电压检测、热轴检测、大风监测、降雨量监测、降雪量监测、立交桥下落物监测等7个子系统装置,强化了列车安全保障功能。

在气象灾害防御方面,法国高铁主要依照上述实时和可靠的大风、降雨量、降雪量等气象监测信息,通过上述智能化控制系统来自动控制列车限速或停车,无须列车调度和驾驶人员手动控制。另外,为获取地中海沿线可靠的风监测数据,法国在地中海沿线设置有两套并行运行的风监测系统,每套系统均具有独立的测量和处理系统,以此来保障气象监测系统的可靠性。

2) 制定铁路标准并严格执行。法国政府有专门针对铁路领域的标准化机构——铁路标准协会(BNF),专门制定、实施、修订铁路相关标准。法国铁路标准体系,在系统性、逻辑性、实用性、严谨性等方面,一直被称为典范。这些标准为法国高铁安全运行奠定了坚实的基础。

3) 重视试运行和人员培训。法国高铁建成后,一般都会有9个月至1年的试运行期。试运行期间,列车不搭载乘客,进行空载和模拟负载运营,同时对驾驶人员和相关技术人员进行操作培训,以确保相关人员熟练掌握列车操作、线路状况以及设备故障处理方案等。

1.3 德国高铁气象灾害防御体系现状

德国高铁属客、货混运型,且隧道约占线路长度的1/3,因此,隧道内的行车安全成为德国高速铁路安全保障的重点。德国对高铁安全防灾体系建设极为重视,从建设高铁之前,便一直致力于高铁安全保障系统研发。其气象安全防灾体系具有以下特征。

1) 采用自动防灾报警装置。德国在高铁新线上

采用了新型防灾报警系统（MAS90）。该系统可监督线路装备的运行状况外，还可监测和及时报告风、雨、雪等气象、地质等环境对行车安全的影响，以及移动设备发生破损的情况。为配套这一系统的探测报警仪器主要有：LSMA隧道气流报警器（在长度大于1.5 km的隧道内安装）、WMA风测量仪（在所有桥梁上安装）、BMA火灾报警仪、EMA隧道口塌方报警信号装置等。

2) 重视自动控制系统研发。德国研制的LZB80型连续式机车自动停车装置，利用铺设在轨道之间的电缆实现车地之间的双向信息传输，可以将列车的精确位置、运行速度、工作状态等信息及时送到地面控制中心。这一装置通过所获得的实时气象、地质等信息直接对列车运行速度进行综合控制。

德国对高铁隧道和桥梁行车尤为重视，制定了非常严格有效的防范措施。在隧道建设时必须考虑行车安全，如在隧道内安装气流报警装置、隧道内壁喷锚支护、铺设整体道床、设置灭火辅助设备，在所有的桥梁上安装风速测量装置等，以最大程度地减少气象及地质灾害对安全行车造成的风险。

3) 重视安全法规体系建设。德国铁路安全的支柱，是德国《通用铁路法》。该法律要求铁路公司必须设立有资格、高水平的独立安全主管。安全主管具有特别的法定权利，专门负责安全管理，维护安全利益。

2 我国高铁气象灾害防御体系现状

我国高铁从2008年开通运营到现在不过8年时间，在高铁气象安全防灾体系建设方面，与日本、法国、德国等发达国家尚有一定差距。现有的气象安全防灾体系主要有如下特征。

1) 建设了监测系统，但不全面。我国高铁监测系统主要由综合视频监控、CCTV监控系统、机房监控系统和防灾安全监控系统等4大系统构成。实现了供电、通信等关键部位，以及车站、广场、机房、道路异物等全方位、多视角监控。运用视频分析技术，对采集的视频资料进行分析，为安全运营提供科学调度依据。

2) 世界先进的控制技术得到广泛应用。我国高铁自动控制系统主要由列车自动控制系统（ATO）、自动防护系统（ATP）、技术调度集中系统（CTCS2）等构成。其中CTCS2属我国自主研发，负责列车运行监视、车次追踪等功能，相当于铁路的指挥中枢。

3) 紧急停车多需人工操作。在日本、法国、德国等先进国家得到广泛应用的突发状况自动停车技术

还没有在我国高铁中得到广泛应用，我国高铁对于紧急情况的处理还需要人工进行干预，这也许是我国高铁与发达国家的差距，也是未来减少高铁事故发生需要努力的方向。

在气象灾害防御方面，我国与日本、法国、德国相比差距较大。一是监测要素仅限于风、雨、雪，其他对高铁安全运营有影响的灾害天气如雷电、大雾、结冰等并未纳入监测范围。二是气象监测数据的可靠性难以保障。目前，高铁沿线的气象监测设施几乎全部都是铁路部门自建的，设备标定也未纳入气象部门管理，气象监测数据的可靠性存疑较大。三是气象监测数据汇总基本上还是靠人工来完成的，而且监测数据不能在第一时间直接到达驾驶台上，而是先汇总到调度中心，由调度中心根据气象监测数据来调整列车运行速度或停止列车运行。四是对气象监测数据的应用还不充分，重视程度也远远不够，气象监测数据的智能化应用及与安全行车控制系统的融合方面亟待改进。

3 进一步提升我国高铁气象安全防灾能力的对策建议

3.1 加快推进高铁气象监测体系建设

高铁的气象安全，已经成为减少灾害影响的重要研究领域^[12-14]。研究表明^[15]，影响我国高铁安全运行的气象灾害主要有雷电、大风、降雨、降雪、低能见度（雾、霾、沙尘暴、降雨、降雪、吹雪、扬沙等）、低气温、冻雨、冰雹等。未来还需要根据这些气象灾害的分布情况不断完善高铁气象监测系统，并实现智能化管理和控制。

高铁运行是否安全，除了需要性能可靠的设备提供支持外，还需要实时掌握沿线气象、地质、地震等监测信息，并根据这些信息对调度方案及时地进行自动化修正。我国高铁一般都建有风、雨（雪）量等气象灾害监测系统。一方面需要增加气象监测密度，建议按照3~5 km布设一个气象监测点。另一方面需要重点监测对高铁影响较大的风、雨、雪等气象要素；同时在一些重点地段增加雷电、雾和霾、结冰等对高铁运行影响较大的气象监测设备。第三就是加强气象等监测信息的智能化应用，加强气象与地质、地震等部门实现信息共享，将高铁沿线的气象、地质、地震监测站点实时信息与高铁的指挥控制系统紧密地结合起来，以发挥资源整体效益，有效降低自然灾害对列车安全运行造成的影响。

3.2 建立和完善高铁气象灾害预警体系

有了气象、地质、地震等监测资料，还需与这些

专业部门进行广泛合作,通过联合研究,制定适合高铁运行的气象、地质、地震等灾害预警指标,对上述自然灾害的发生、发展和演变做出提前预警,这也是较少气象等自然灾害的重要手段,特别要强化0~0.5 h的高铁气象灾害短时临近预警业务,为列车安全运行提供科学依据,最大限度减少气象等自然灾害对高铁运行造成的事故影响。当然,这些监测的信息搜集和信息处理都具有一定的专业性,为避免信息交换时的混乱现象,需要建立一个自然灾害预警综合信息平台,并与列车智能控制系统相融合,以实现气象地质等预警信息的自动化管理和控制。

3.3 努力提升高铁智能化控制系统水平

国外高铁发展的经验证明,高铁安全运行必须高度重视智能化管控系统,对列车运行过程中的设备、轨道状况以及气象、地质、地震、异物跌入等自然环境进行实时动态监测,并根据这些监测数据动态修正驾驶速度,使列车在危机事件发生前的第一时间自动减速或停车。虽然我国高铁硬件设备的制造技术已经世界领先,但与日本、法国、德国等高铁发达国家相比,我国在诸如智能化控制系统等软件方面还有比较大的差距。未来,需要按照“自动为主,人工为辅”的原则,加大高铁智能化控制系统的研发,尤其要加强自动报警、危机状态识别和突发状况自动停车等系统的研发,努力使我国高铁在生产、运营、管理等方面全面领先世界。

3.4 健全高铁安全法律法规体系

加强高铁安全运营立法是努力将我国铁路危机管理机制建立在依法行政基础之上的关键所在。以法律手段来处理高铁事故与紧急事件,是国外先进国家普遍采取的做法。我国的高铁需要制定一部从法律层面明确政府、铁路相关企业、公民个人职责、权利及义务的法律,整合高铁运营管理的不同部门各自独立的法律法规,尽快完善《铁路法》或出台《铁路安全法》等专用法律,通过立法手段确立高铁各职能部门之间组织协调应对危机的依法治路原则和行动规范。

3.5 完善高铁安全运营标准体系

“京津、武广、郑西、京沪等高铁的成功建设运行,我国已建立和形成了具有自主知识产权的高速牵引供电技术体系和标准体系。”但是,在如何利用气象、地质、地震等自然环境监测和预警预报信息,做到“该慢则慢,改停则停”等科学调度方面,目前还没有相应的标准,需要加强与气象、地质、地震等部门的密切合作,通过联合进行科技攻关,加强科学研究,制定与高铁安全运营相适应的气象、地质、地震

等标准,为高铁安全运营提供更加全面的标准支撑。

3.6 加强安全管理和人员培训工作

建立高铁安全管理和人员培训机构。高铁的安全运营,离不开高素质、高水平的专业技术人才。目前,我国从事危机管理方面工作的人才还比较匮乏,应该把安全管理和人员培训工作作为重要目标,不断提升安全管理和运行人员队伍的整体水平,从源头上强化安全管理,最大限度减少人为不规范操作等造成事故的概率,实现高铁“安全、快捷、舒适”的运营目标。

4 结语

纵观日本、法国、德国等高铁铁路发达国家安全防灾体系特征,其共同特征是建立高度密集的包括气象、地质、地震、异物跌入等环境监测及预报预警系统,并将这些实时监测预警信息应用到智能化系统管理中,一旦系统收到危机预警指令,列车可以在第一时间自动减速或停车,这样就最大程度上避免了自然环境对列车行驶构成的威胁,确保了列车运行的安全。因此,要进一步提高我国高铁气象安全防灾体系能力,特别需要加强以下3个方面的工作,一是需进一步加大气象、地质、地震等环境监测站点的密度,增加相关的监测要素,二是需尽快构建高铁气象安全防灾预报预警体系^[6],三是要不断提升智能化控制系统水平。

参考文献

- [1] 万孟琳.从甬温先动车事故谈中国高铁的发展与稳定.理论探索,2013,511(1):212-213.
- [2] 高津利次.日本高铁的历史与未来.甘霖,译.国际城市规划,2011,26(6):6-15.
- [3] 刘秀英,李芬,范永玲,等.强降水对铁路安全的影响.科技情报开发与经济,2007,17(17):271-272.
- [4] 马淑红,马槿娟.我国高铁强风灾害风险评估与区划方法研究.轨道交通,2013(8):94-96.
- [5] 杜欣.我国高速铁路运营概况与未来需求展望.中国铁路,2011(1):31-33.
- [6] 陈铭儒.简述我国高速铁路的发展概况.当代经济,2010(16):82-83.
- [7] 赵华.发达国家高铁安全管理之鉴.中国减灾,2011(8):25-27.
- [8] 吕忠扬,李文兴.国外高铁发展对我国高铁可持续发展的启示.物流技术,2013,32(3):18-20.
- [9] 木易.国外高铁的安全经验.兵团建设,2011(8):35.
- [10] 王彤.高速铁路防灾安全监控系统研究与开发.中国铁路,2009(8):25-28.
- [11] 孙启鹏,冯雪松,边凯,等.日本高速铁路运营组织管理的借鉴与思考.交通运输系统工程与信息,2011,11(5):11-14.
- [12] 刘远鹏.发达国家高速铁路安全对策与我国建设高速铁路之探讨.牡丹江大学学报,2007,16(6):95-97.
- [13] 刘斌,孙钰.试论我国高速铁路的安全问题及解决对策.知识经济,2013(11):72-73.
- [14] 朱艳.中国高铁存在的问题及对策.物流科技,2012(5):75-78.
- [15] 崔新强,周小兰,付佳,等.高速铁路安全运行高影响天气条件等级标准研究.灾害学,2016,31(3):26-30.
- [16] 王丽卉,易亮,等.铁路气象灾害监测预警业务服务系统的建立与完善.中国应急救援,2010,(4):29-30.

宁波市旅游气象业务系统建设

郑健¹ 中华羽² 徐蓉¹ 俞芳芳¹ 姚日升²

(1 宁波市奉化区气象局, 宁波 315500; 2 宁波市气象局, 宁波 315012)

摘要: 介绍了宁波市旅游气象业务系统的设计思路、技术框架、关键技术和应用情况。针对目前宁波市旅游气象服务的需求和特点, 业务系统主要包含旅游短期预报、适游度指数预报和旅游预警三个部分。基于多种分指数合成的综合性适游度指数开发, 提供旅游气象的分项和综合指数预报, 开启了旅游气象服务的新模式。预报服务产品通过互联网和短信对外发布, 取得较好的效果, 为旅游气象服务工作的开展提供重要支撑。

关键词: 旅游气象服务, 适游度指数, 旅游预警

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.008

On Developments of Meteorological Services for Tourism in Ningbo

Zheng Jian¹, Shen Huayu², Xu Rong¹, Yu Fangfang¹, Yao Risheng²

(1 Fenghua District Meteorological Bureau of Ningbo, Ningbo 315500;

2 Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo 315012)

Abstract: This paper gives an introduction to the Ningbo's meteorological service system for tourism including the design, technical framework and key technologies in applications. The system consists of three main parts, namely the short-term weather forecasts, tourism index forecasts and weather warning. The composite index of the system was set up based on an overall consideration of weather-related factors on travel, and helped to develop a new model for tourism weather services. The service products are issued via Internet and short messages, which provides important supports for the local tourism and has been proved being effective.

Keywords: tourism weather services, tourism index, tourism weather warning

0 引言

随着生活水平的提高, 近年来选择外出旅游的人数正不断增长, 旅游业作为地方经济的新引擎日益受到重视。宁波地处东海之滨, 依山傍海, 四季分明, 旅游资源充足, 仅2015年全市实现旅游总收入1233.3亿元, 比2014年增长15.5%。气象条件是影响旅游质量和旅游安全的重要因素, 绝大部分游客在出行前都会主动了解旅游目的地的气象条件。目前国内的旅游气象预报多数还仅停留在就某个旅游点进行日常天气预报发布。在旅游指数预报上, 大部分仍局限于单一气象条件指数预报, 使得受众难以得到景点是否适合游玩的综合评价, 综合性的指数评定研究很少有人涉猎。南阳市气象局^[1]采用VB.NET软件开发工具, 调取MICAPS资料并根据各景点的地理、气候特性对站点要素进行判识修订, 做出多种专业气象指数预报。丁国香等^[2]针对安徽省山岳型景区旅游气象服务的需

求和特点, 以旅游气象观测网为基础, 基于短时临近预报系统(INCA系统)、云海景观预报技术、雷电监测预警技术、旅游气象条件综合评级等技术, 开发了安徽省山岳型景区旅游气象服务业务系统, 其对旅游气象条件综合评级, 主要是将影响旅游活动的气象条件因子分为几个方面, 然后分别对这些因子进行分档分级, 通过指标叠加法, 最后再综合进行评价。宋静等^[3]通过对气温、天气、大风以及景点特色对花果山游客数的影响分析, 以打分的方式建立了旅游气象指数。郭菊馨等^[4]依据云南省迪庆州观测资料结合天气预报的时间和空间尺度理论, 用最靠近景区的气象观测站所提供的逐时观测资料作为景区指数预报的基础, 同时根据景区的经纬度、海拔高度、植被状况进行订正, 获取旅游景区的各类特种气象预报指数。

各地在旅游气象服务的探索中结合本地区实际情况逐步建立了相应的业务平台, 服务内容和形式走向多样化, 但以单一性指数预报为主, 对综合性旅游指数构建研究依然较少, 对气象现代化发展中出现的新资料、新技术、新方法运用不够多。宁波市旅游气象业务系统的设计思路是基于气象监测、精细化天气预报、适游度及各分指数预报和景区灾害天气预警等技

收稿日期: 2016年8月29日; 修回日期: 2016年9月27日

第一作者: 郑健(1990—), Email: zjweiwu@qq.com

资助信息: 浙江省气象科技计划项目(2014YB06); 宁波市气象局科技计划项目(NBQX2014002B)

术,重点研究影响适游度的气象要素,结合景区特点构建复合型适游度指数,搭建宁波市旅游气象服务平台,实现旅游气象服务综合数据处理、服务产品加工制作及发布共享,为旅游者提供及时准确的综合气象条件预报,以引导人们健康出游、安全出游,为新型生态保健旅游提供科学依据和参考信息。

1 宁波市旅游气象业务系统介绍

1.1 系统设计与业务流程

为对全市旅游景点开展针对性服务,通过前期对公众需求的调研,以及与旅游部门的沟通,确立业务系统三个主要功能模块:旅游短期天气预报、适游度指数及各分指数预报和旅游预警服务。采用自动输出客观产品与人工订正相结合的方式,以尽可能减少预报员人为干预为原则。主要的特点是在预报多种单项生活指数的基础上,构建了更加科学合理的适游度指数,改进了传统的只对影响因子进行简单叠加而建立综合指数的方法,兼顾了多因子间的复杂关系和景点本身的特点。建立的旅游预警区别于传统的气象灾害预警信号,从区域性预警转变为针对景点的精细化预警,预警发送后短信同步推送,提高灾害天气应急响应的效率。本系统具有较高的自动化、集约化水平,减轻了预报员的日常工作负担,同时易于维护和升级。

旅游气象产品的制作、发布流程见图1。短期预报、适游度指数及各分指数等级预报,由后台程序自动生成客观预报产品,预报员在预报制作平台上对各种客观预报产品进行修改、审核和发布,旅游预警则由预报员参考各种气象资料后,根据评估的危险等级进行包含主观预警意见的发布。

根据计算所需的各数值产品生成时间,旅游气象业务系统每日05和14时开始运行,每次运行生成72 h内预报产品,存入客观产品数据库。业务平台的预报制作界面默认显示客观产品数据,预报员依次完成旅游短期预报、旅游指数预报产品的审核订正,订正后的产品数据存入正式产品库,并通过网站等渠道对外发布。旅游预警服务产品为不定时产品,仅当实时监测到或预报景点有气象灾害风险时,预报员制作旅游预警信号并显示在外网上。已经发布旅游预警的景点,其管理人员会收到提醒短信。

1.2 所用资料及来源

旅游气象业务系统中主要用到了气温、云量、风速、降水量、相对湿度等常规气象要素,该类要素预报数据均采用欧洲中心 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 精度的细网格预报场。考虑到业务运行稳定性,对预报产品未能及时更新的情况采用两种方式处理:一是优先使用前一起报时次的预报产品,二是用T639和ZJWARMS模式输出的数值预报产品来代替。

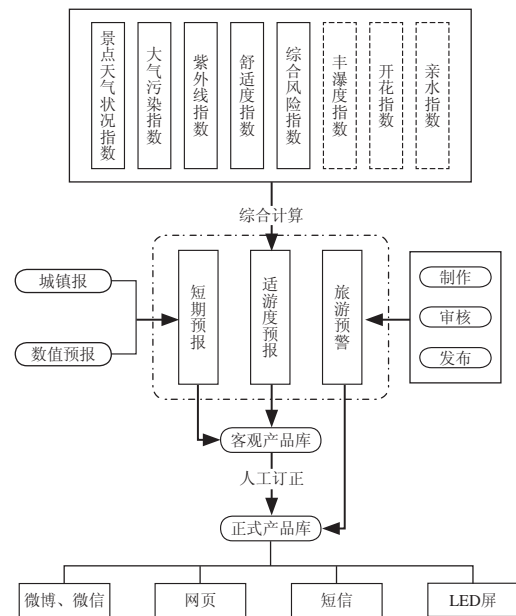


图1 产品制作、发布流程图
(图中虚线框内子指数表示选择性参与计算)
Fig. 1 Products processing flow
(The indexes in the dashed box are optional)

除常规气象要素外,旅游气象业务系统中还用到了颗粒物浓度预报产品来预报空气质量。该产品数据取自浙江省气象科学研究所开发的区域环境空气质量数值预报模式(CUACE)产品,其空间精度可达7 km,时间分辨率为1 h,此外还有WRF模式中的每小时颗粒物浓度预报产品作为补充。

2 关键技术

2.1 适游度分指数选择

虽然近些年旅游气象指数预报逐渐受到重视,但大部分仍局限于单一气象条件指数预报,对综合性的指数评定研究不足,公众难以得到景点是否适合游玩的综合评价,只能依靠自己的判断。本项目通过大量的调查访问,整理出游客出行时非常关心的五大基本气象因子作为基础的分指数,分别为:①景点天气状况指数;②舒适度指数;③大气污染指数/空气清新度指数;④紫外线指数;⑤综合风险指数。

旅游目的地的天气状况是普通公众出行考虑的第一要素。对天况的客观预报,常用的方法是根据数值预报细网格资料中的降水量、云量等数据进行分析,但因数值预报存在不稳定性,尤其是降水强度和落区预报偏差较大,需要进行主观订正,因此实际业务中首选每天的城镇天气预报。根据需要取近3天白天(08—20时)的天气状况预报,并按表1形式进行分级。

舒适度指数也是大众出行时重点考虑的气象因素之一,目前国内使用较多的评价人体舒适度的指数有

寒冷指数、体感温度、不适指数等。适游度指数预报中借鉴了由Tom提出，Bosen进一步发展的人体舒适度指数公式，本质是温、湿要素的基础上考虑了风的影响^[5-7]，其计算如下：

$$K = 1.8T - 0.55(1.8T - 26)(1 - RH) - 3.25\sqrt{V} + 32, \quad (1)$$

式中， T 为气温， RH 为相对湿度， V 为风速，日常选择旅游的时间基本在白天，所以公式中的气温、相对湿度和风速都是取白天段08—20时的数值预报产品。

在选择目的地时，人们倾向于选择山清水秀、空气新鲜的景点。据此加入了大气污染指数/空气清新度指数，对于城市或城镇采用大气污染指数，而对地处山区的景点，采用基于负氧离子浓度预报的空气清新度指数^[8]。在具体计算时引入浙江省气象局和宁波市气象局污染物扩散和输入模型，分级时参照环境空气质量指数(AQI)技术规定(HJ 633—2012)，将其中的第5级和第6级做合并，即AQI值达200以上判定为5级重度污染。这是考虑到旅游景点多处在较好的自然环境中，污染物浓度普遍小于城市、工业区等易形成大范围重污染的区域。

紫外线指数和综合风险指数构成较为复杂。紫外线强度与季节、太阳高度角、云量等因素密切相关^[9]，此处参考了董美莹等^[10]开发的浙江省紫外线指数预报系统，在此之上利用宁波市紫外线辐射观测和常规气象要素观测数据以及模式输出资料，分析紫外线辐射强度的时空变化规律，构建紫外线预报模型。按照中国气象局中气预发(2000)11号《紫外线指数预报业务服务暂行规定》的内容将紫外线等级划分为5个等级。

综合风险指数是表示旅游景点气象灾害风险等级的指标，目前主要考虑地质灾害、大雾、霾、雷电、积雪、低温、高温、大风、大幅降温这九类灾害，根据其发生的种类和强度整合成综合风险指数，按照其危险性从低到高分成5级。

表1 景点天气状况指数等级划分表

Table 1 Weather index grades for the scenic spots

天气状况	等级	是否适宜出行
晴、多云	1级	非常适宜出行
小雪、阵雪、阴	2级	适宜出行
小雨、阵雨、雨夹雪	3级	可以出行
中雪、中雨、雷阵雨	4级	不适宜出行
大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨、大雪、暴雪	5级	无法出行

2.2 适游度指数建立

确定了五个组成适游度指数的基础分指数后，需要进行合成。指数的设计合成方法较多^[11]，本项目在合成中主要考虑以下3个方面。

1) 因子加权原则：由于各分指数对适游度指数贡献不可能是均等的，不能简单地使用平均法，否则无法体现贡献大小，分指数贡献越大的因子，其权重

就应该越大。而且不同景点间由于存在各自特点也不宜使用相同的权重分配，如室内景点对紫外线指数和综合风险指数的敏感度相对较小。从前期调查来看，景点天气状况和综合风险是公众出行时最为关心的因素，所以权重在所有要素中也是最高的。为便于日后不断改进各景点分指数的权重分配，以使之更加符合实际情况，系统设置权重系数配置表，可随时进行修改。

2) 因子排它原则：尽管在因子加权时已经考虑了分指数比重各有不同，但由于各因子与适游度指数不一定呈线性关系，各分指数的权重系数在不同情况下也会发生变化，某些情况下个别分指数对适游度指数的影响力非常大，其他分指数的影响必须是在这种分指数满足条件的情况下才有意义。为了简化处理这种情况下因子的权重系数，采用因子排它原则：该种分指数如果不满足条件，则立即得出结论，基本或全部不考虑其他分指数的作用，即“一票否决”的方法；或者将最后的计算结果增大或减小若干等级。

旅游目的地的天气状况是出行前的首要考虑因素，天气状况的好坏直接影响旅游人数。所以在适游度指数中，景点天气状况是具有排它性的重要因素。参照表1，系统在景点天气状况指数为1~3级时不对计算出的适游度指数产生“一票否决”作用，而一旦达到第4级和第5级会将适游度指数强制下降到不适宜出行的级别。在五个基础分指数中，综合气象风险指数也具有排它性，但具体运算中不赋予其“否决权”，这是因为在旅游气象业务系统中还有旅游预警服务，当预报员认为气象风险高到可以产生灾害时，将通过旅游预警这一更高级别的形式传递给公众和景点管理人员，以提高服务效果。

3) 非气象因子：宁波市旅游气象中心现阶段对全市16个景点进行预报服务，这些景点从地理环境和旅游资源上都有鲜明的特点，包括滨海观光区、生态旅游区、深山峡谷区。为此设立相应的特色分指数，包含是否适宜戏水的亲水指数、根据花期预报^[12]确立的赏花指数以及瀑布美景观赏性的丰瀑度指数。这类特色分指数均分为5级，在基本分指数的基础上根据景点具体情况选择性加入，遵循前述因子加权和排它原则，所以每个景点参与适游度指数计算的分指数数量并不一致。

结合上述3项原则最终得出适游度指数计算公式(2)，并按照表2划分等级。

$$Y = \sum_{i=1}^n (G_i/5)(100/n)k_i, \quad (2)$$

式中， Y 表示适游度指数， n 表示参与计算的分指数总个数， G_i 表示第 i 个分指数等级， k_i 表示第 i 个分指数对应的系数。

对适游度指数准确性检验主要通过两种方式完

成，一是以景区日游客量和当日计算出的适游度指数做对比分析；二是通过景区调查问卷获取数据，游客根据自身感受对当日适游度指数预报的准确性进行打分。

表2 适游度等级划分表
Table 2 Tourism index grades

适游度等级	适游度指数 (Y) 取值范围	服务用语
1	$0 < Y \leq 20$	不适宜游览
2	$20 < Y \leq 40$	不建议游览
3	$40 < Y \leq 60$	可以游览
4	$60 < Y \leq 80$	适宜游览
5	$80 < Y \leq 100$	非常适宜游览

2.3 旅游预警服务

为有效防御恶劣天气给景区游客生命财产带来的威胁，建立了具有旅游景点特色的旅游预警信号，实现从常规区域性气象灾害预警到针对景区精细化预警的转变。旅游预警信号等级从低到高分别用蓝、黄、橙、红4色表示，其发布标准与气象灾害预警信号并不一致，设置的发布标准是依据各景点可能发生的气象灾害特点而独立制定。旅游预警信息制作、审核、发布均以人工方式完成，确保旅游预警准确无误。预警时效默认为24小时，超过该时效未进行续发或人工解除则会自动解除。完成发布后除在网页显示以外，同时用短信通知有关景点负责人以便及时开展对应的灾害防御工作，短信可根据设置自动发送，减轻预报员的工作负担。

短信发送是通过调用短信声讯平台Web Service接口实现。Web Service也叫XML Web Service，是一种可以接收从internet或者intranet上的其他系统中传递过来的请求，轻量级的独立的通信技术。其是通过SOAP在web上提供的软件服务，使用WSDL文件进行说明，并利用UDDI进行注册。通过“添加服务引用”，让VS.NET环境来生成客户端代理类，然后调用对应的web服务。

2.4 旅游气象服务产品的发布与展示

宁波市旅游气象业务系统已投入试运行，主要通过互联网对公众展示（图2），预警则同时发送短信。景点在网页中分为两级，一级景点直接在主页面上显示，二级景点为特色小景点或者是季节性强的景点，通过放大地图后显示，以保证浏览界面的简洁。主页面上仅显示适游度和短期天气预报，点击每个景点后会显示组成适游度的各分指数等级，帮助游客全面了解当地气象条件。当景点发布旅游预警后，网页上不再显示该景点的适游度指数，转为闪烁显示当前旅游预警标识。从前期设立在旅游气象网上的满意度网络问卷调查来看，旅游气象业务系统投入使用后的公众反馈良好，适游度指数与天气状况联系密切，同时兼顾了景点特色。旅游预警为游客和景区管理及

时防御灾害性天气提供了重要参考。



图2 旅游气象产品展示主页面

Fig. 2 Main webpage of tourism weather products

3 小结

宁波市旅游气象业务系统建设过程中，充分考虑了本地旅游气象服务的需求和特点，凝练了前期工作的经验。利用现代气象业务中的新资料、新技术和新方法，开发了有别于以往单一性旅游指数的综合性适游度指数，设立旅游预警完成了预警从区域性到精细化的转变。丰富了旅游气象预报产品种类、提高了服务质量，为公众出行、景区管理和旅游部门决策提供参考帮助。系统本身具有较高的自动化、集约化水平，减轻了预报员的工作负担，也易于维护和升级。

旅游气象业务系统尚有改进的空间和需求，其一是分指数合成适游度指数时权重系数有待继续优化调整；其二是分指数预报模型的完善，紫外线预报模型、丰瀑度模型、综合风险分析模型具有非常复杂的建立过程，当前仅使用了简化后的预报模型，有待进一步开发和完善；其三是可拓展夜游预报产品，目前预报的景点均为白天开放，所以推出的服务产品也围绕这一特点。未来随着预报景点的扩充，将推出夜游气象服务产品，为月光经济的发展助力。

参考文献

- [1] 易伟霞, 温洛, 刘萌. 南阳市旅游气象服务保障系统. 气象与环境科学, 2008, 31(增刊): 216-218.
- [2] 丁国香, 刘安平, 刘承晓, 等. 安徽省山岳型景区旅游气象服务业务系统. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2016, 8(1): 71-75.
- [3] 宋静, 姜有山, 张银意, 等. 连云港旅游气象指数研究及其预报. 气象科学, 2001, 21(4): 480-485.
- [4] 郭菊馨, 白波, 王自英, 等. 滇西北旅游景区气象指数预报方法研究. 气象科技, 2005, 33(6): 604-608.
- [5] 张书余. 城市环境气象预报技术. 北京: 气象出版社, 2002: 124-126.
- [6] 吴兑. 多种人体舒适度预报公式讨论. 气象科技, 2003, 31(6): 370-372.
- [7] 李玉姣, 杨云洁, 张滨, 等. 不同天气条件下温湿对室内外人体舒适度的影响. 气象科技, 2015, 29(6): 1197-1202.
- [8] 顾小丽, 钱燕珍, 鲍岳建, 等. 宁波市负氧离子浓度分布与预测模型及其在旅游气象中的应用. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 128-133.
- [9] 丛菁, 孙立娟, 蔡冬梅. 大连市紫外线辐射强度分析和预报方法研究. 气象与环境学报, 2009, 25(3): 48-52.
- [10] 董美莹, 沈翊, 张力. 浙江省紫外线指数预报系统. 科技通报, 2007, 23(6): 785-789.
- [11] 严明良, 沈树勤. 环境气象指数设计方法探讨. 气象科技, 2005, 33(6): 583-588.
- [12] 姚日升, 涂小萍, 丁焯毅, 等. 宁波桃树花期预报方法. 气象科技, 2014, 42(1): 180-186.

大数据在贵州专业气象服务的应用及展望

唐延婧¹ 彭芳² 罗喜平² 陶勇¹

(1 贵州省气象服务中心, 贵阳 550002; 2 贵州省气象台, 贵阳 550002)

摘要: 对目前热议的大数据, 从理念、表现、数据获取方面, 就其在各专业气象服务中的应用做了探讨。并指出大数据应用于专业气象服务的核心, 是大数据技术获取非气象类的大数据, 及其与气象数据的碰撞。因此从实际业务工作角度出发, 以旅游、交通、能源专业气象服务为对象, 分行业对各专业气象服务的现状、特点, 以及非气象的大数据在各专业气象服务中的应用进行了阐述和展望, 以期今后在大数据时代开展专业气象服务开拓思路。

关键词: 专业气象服务, 大数据, 旅游, 交通, 能源

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.009

Application and Prospects of Big Data in Guizhou's Professional Meteorological Service

Tang Yanjing¹, Peng Fang², Luo Xiping², Tao Yong¹

(1 Meteorological Service Center of Guizhou Province, Guiyang 550002; 2 Meteorological Observatory of Guizhou Province, Guiyang 550002)

Abstract: Big data is a hot issue now. This article discussed the application to each professional meteorological service on aspects of concept, performance and data acquisition. The core of big data's application to professional meteorological services is non-meteorological data, which could be gotten through big data technology, and its collision with meteorological data. This article expounded and prospected each professional meteorological service's status, characteristics, and non-meteorological data's application to the perspective of professional such as tourism, transportation and energy. We try to carry out more ideas on professional meteorological service in big data age.

Keywords: professional meteorological service, big data, tourism, transport, energy

0 引言

从IT界广泛传播至各行各业, 并引起热议的大数据, 是指无法在可承受的时间范围内用常规软件工具进行捕捉、管理和处理的数据集合, 是需要新处理模式才能具有更强的决策力、洞察发现力和流程优化能力的海量、高增长率和多样化的信息资产。《大数据时代》^[1]一书中, 作者将大数据理念的精髓概括为3点: 不是随机样本, 而是全体数据; 不是精确性, 而是混杂性; 不是因果关系, 而是相关关系。大数据技术的关键, 在于对超大量、众多类型的数据进行获取、分析, 以获得有价值的信息。

国务院印发的《促进大数据发展行动纲要》中提出, 2018年年底建成国家政府数据统一并开放平台, 率先在科技、气象、海洋等重要领域实现公共数

据资源合理适度向社会开放。贵州作为大数据发展基地, 需要建设7朵“大云”, 其中包含气象大数据, 作为国家气象的重点试点省份进行建设。而另一方面, 在气象大数据加码力推的同时, 云端的海量数据信息也应该反向为气象行业所用。大数据在气象行业的应用, 大数据技术与气象科技的结合, 成为了气象科技发展的前沿议题。专业气象服务作为气象与各专业之间直接关联的部分, 理所应当成为大数据在气象的应用中探讨的主要领域。

随着社会经济的发展, 许多与气象息息相关的专业, 受到气象条件的影响越来越大。在旅游方面, 游客通常根据天气情况选择旅游目的地, 气象条件不仅直接影响出行、游玩, 因天气原因造成的旅游安全事故也占比较多, 往往引起很大的社会关注。在交通方面, 气象原因是造成交通事故、影响铁路、航运等运营不能正常开展的主要原因之一, 因低能见度、大雾、结冰、雨、雪等灾害性天气造成的事故频繁发生, 危害也越来越大。在电力、燃气等能源产业方

收稿日期: 2016年10月6日; 修回日期: 2016年11月1日
第一作者: 唐延婧(1982—), Email: 370128885@qq.com

面,气象条件的变化直接影响到能源消耗量,其对体量越来越大的能源调度、管理造成的影响也越来越大;另据中国电力科学研究院1981—2000年的统计结果显示,自然灾害已成为造成电网系统稳定破坏事故当中仅次于设备故障的第二大因素。正因此,目前气象服务已经到了无限需求和有限能力矛盾的凸显期。大数据概念的提出,大数据技术的发展,正为专业气象服务指明了道路,提供了更广阔的发展空间。

本文从实际业务工作角度出发,探讨大数据带来的挑战和机遇。从旅游、交通、能源这3个合作较深入、成熟的专业气象服务对象为代表,分专业对大数据在气象服务中的应用进行阐述和展望,以期为今后开展专业气象服务开拓思路。

1 大数据应用于各专业气象服务的理念

从数据本身的角度出发,大数据在专业气象服务中的应用,主要是提取适用的信息与气象信息碰撞、结合。在大数据时代原本看起来很难收集和使用的数据开始容易被利用起来了,有许多过去无法开展的工作现在看到了实现的希望。在下一节中我们还将深入展开讨论。

另一方面,从专业气象的需求反观大数据本身的特点,在信息海洋中捕获所需数据,本身就需要有深入的研究,有着丰富的经验;此外,光是各种信息的获取,不加以技术方法处理,想要得出具有价值的结论犹如大海捞针。因此,大数据要真正释放活力,离不开应用气象技术、大数据技术的指引。

最后,大数据的专业气象服务,将从量化走向指向性。文献[2]中一针见血地指出大数据理念“是全体数据而不是样本数据、是模糊结论而不是精确结论、是相关关系而不是因果关系”,都是由于采用大数据技术提取替代专业信息数据,所获取的信息不能完全达到规范、精细而形成的特点。因此相较于传统专业气象服务给出具体数值作为结果的主要形式,大数据时代的专业气象服务产品,将从量化结果走向指导性、指向性、建议性结论。

总之,大数据应用于各专业气象服务的理念,核心是大数据技术获取非气象类的大数据,及其与气象数据的碰撞,实现服务水平的提升和服务方式的革新。

2 各专业气象服务的大数据应用及获取

各专业气象服务对大数据的应用,都可归纳为气象数据、行业数据、互联数据3类数据的碰撞与应用。由于有着成熟和完备的气象数据信息处理体系,各类气象数据的获取和分析,对气象部门的科研人员来说非常熟悉和便捷,应用的重点主要是其他两类非

气象的大数据。总体来说,大数据时代的行业数据、互联数据可通过泛在的数据源采集,利用云计算、数据分析、数据挖掘等大数据技术获取各专业气象服务所需数据。

2.1 通过其他观测手段补充专业气象数据

专业气象数据获取最直接有效的方式,就是结合专业气象服务的需求、特点,进行补充观测。如利用在交通工具、工程设施上的特定观测仪器和手机用户分享的实景图片等,结合视频图像处理技术、无线数据传输技术、数据挖掘技术等,可获取如能见度、高空稳定度、路温、路面状况(结冰、积水)、雷电负荷等数据,对气象数据进行时空分辨率、数据类型、数据覆盖范围的有效补充,形成三维立体无缝观测,为拓展专业气象服务能力提供基础观测支撑。

2.2 气象数据与大数据融合技术

大数据海洋中各类数据的融合,是大数据应用的关键技术之一。气象数据的存储从气象观测至今已经建立了一系列的标准方式,国际气象组织的grib格式编码、netcdf格式、hdf格式等都是较好的存储方式,气象常用的观测数据也已经建立了结构化的数据库。目前的大数据存储主要是分布式存储,通过研究气象数据的分布式存储方法,并对其他行业数据按需进行标准化,使得所有数据能够按照分布式计算的需求进行存储设计,进而实现融合。

2.3 大数据应用于专业气象精准服务

近几年各行业对气象服务的要求越来越高,出现了专业气象精准服务的需求,即针对不同人群将提供不同的气象服务方式、服务产品,具有明确的指向性,区别于过去不细分服务对象、服务范围的粗犷服务方式。目前大数据应用最多、最广的主要为两类:基于开源地图的各种GIS信息;通过手机定位技术,以及手机用户群体划分等大数据挖掘技术获得人流热力分布、人群划分。它们可以在专业气象精准服务上发挥重要作用:例如利用大数据获取的交通线路信息,开展针对交通线路的天气预报、气象预警等交通气象服务;通过大数据获取的人流、车流热力分布信息等数据,可为气象预警、预报、服务信息进行优先发布、指定发布用户范围、用户类型所用(图1)。

3 大数据在各专业气象服务中的应用

大数据在专业气象服务中的应用,以大数据技术获取非气象类的大数据,及其与气象数据的碰撞为核心。下文将着重就各专业气象服务中,需要用到的大数据及技术进行讨论。

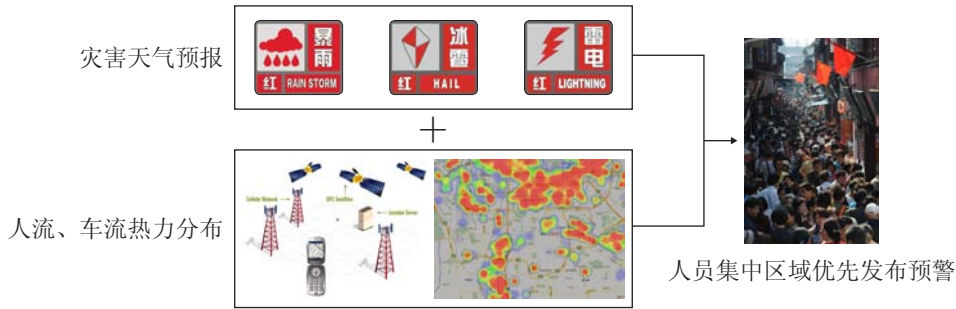


图1 精准服务的优先发布示意图——以灾害天气预报发布为例

Fig. 1 Priority of publishing an accurate service: example of publishing disaster weather forecast

3.1 大数据在旅游专业气象服务中的应用

旅游专业的发展、服务备受国家及各级政府重视。然而旅游中不可估计的突发事件，有很大一部分与灾害性天气有关。暴雨、大风、雾、霾、高温、雷暴等灾害性天气随时可能影响游客的旅游体验，甚至财产、生命安全。例如2016年5月28日在广东江门某漂流景点由于暴雨而造成的人员伤亡；又例如2015年6月1日的长江客船翻沉事件，就是龙卷大风的恶劣天气引起。在特色旅游方面，天气条件将决定参观特色景点的成功与否，除了云雾、雾凇、冰雪、日出日落、极光这些气象景观游览，“赏花游”、“采摘游”、“钓鱼游”、“美食游”等，都与气象因素息息相关。

3.1.1 贵州省旅游气象服务的现状

目前贵州各地政府都非常重视旅游产业发展，凉爽的贵阳、多彩贵州、水城凉都等打出了自己的品牌旅游。这些都是通过当地气候资源挖掘，打造的旅游名片。除了旅游资源开发，旅游气象服务目前以针对各景区的常规天气预报为主。气象部门针对旅游部门的需求制作节假日专题服务材料，对公众、游客也会

有节假日天气预报作为出行参考。随着预报准确度的提高，管理部门及公众的满意度也有所提高。当前贵州正开展的旅游景点精细化预报业务，以及新增的微博、微信等新媒体发布渠道，使旅游气象预报及服务手段上都有了明显提升（图2）。

3.1.2 大数据在旅游气象的应用前景

1) 旅游管理方面：通过气象数据与景观期的相关分析，可进行适游期常年分析及预测，得出相关的气象服务产品。将气象信息与景区GIS信息、交通信息、热力分布、人群特征等大数据进行分析，通过决策平台针对旅游服务者提供来客预估、气象因子的景区调度管理方案等智能产品。此外，大数据分析结果使得旅游资源开发、特色景点推荐、旅游路线设计等更加有科学依据。

2) 游客服务方面：通过包括短信、声讯、手机app、网站、微信等多渠道向游客提供景区热度、气象适游度、推荐景区、路线等旅游气象产品，甚至可以结合出行天气订制个性化的旅游路线，为游客出行提供参考。



图2 旅游气象服务产品开发示意图

Fig. 2 The development of meteorological service products for tourism

3) 旅游突发气象事件保障: 针对灾害性天气, 各级气象部门会发布相应的预警信号作为提醒。通过大数据时代的信息采集, 可以实现游客集中景点、区域和灾害性天气预警区域叠加分析, 制定预警信息发布优先级别、发布范围等, 实现精准服务; 景区管理人员和旅游行政管理人员能够准确及时获取结合了灾害天气和游客密度的事件危险程度信息, 做好应急决策。



图3 大数据应用于交通气象服务示意图

Fig. 3 The application of big data to meteorological service products for traffic

3.2.1 贵州省交通气象的现状

目前贵州省的交通气象服务通过2013年以来的快速发展, 初步建成了由交通气象监测网、监测数据库、基于GIS的高速公路交通气象服务网站构成的交通气象服务系统^[3]。通过基于GIS的交通气象服务网站, 实现了交通气象信息监控功能。在贵州山区对交通影响尤为严重的雾和道路结冰方面, 有较为成型的交通气象灾害天气预报模型和较为深厚的理论基础。目前还在积极开展精细化交通气象预报业务。但交通气象服务的准确性、时效性和针对性, 仍一定程度受制于交通信息与气象信息的分离。

3.2.2 大数据在交通气象的应用前景

1) 决策服务方面: 交通一气象数据的融合可通过最大风力、雨强等参数评估, 为桥梁抗风性能、隧道泄洪、城市路段排涝设计提供支撑; 交通一气象数据碰撞可为建设施工及运营、边坡垮塌、事故临界雨量、道路结冰厚度等的研究提供参考; 指挥调度部门则可根据天气状况, 制定交通管制、限速等决策, 并准确规划强天气出现后需要投入的人力、物力配备等。

2) 公众出行服务产品: 交通一气象大数据, 以

3.2 大数据在交通专业气象服务中的应用

气象条件影响交通设计、建设、指挥调度等各生产环节, 气象大数据的应用将为交通部门的决策提供有利的依据, 并协助各部门提前进入应急准备。公众对交通气象服务的需求巨大是不言而喻的, 人们选择出行时间、方式、地点, 大多会先进行气象信息的查询(图3)。

及其他事故相关、地理信息相关大数据的多数据融合, 可研发更为丰富、直观的交通气象服务产品: 如通过不同致灾气象因子(凝冻、降水、降雪)及其引起的道路结冰厚度、路面积水、积雪厚度等, 对道路摩擦力的影响, 研究出道路湿滑指数; 根据大雾、降雨、降雪等造成的低能见度对行车的影响, 研究视程障碍指数。基于以上研究, 以机场、高铁站、汽车站等为出发点, 定位目的地, 根据当前公路交通拥堵、航班(火车)到站及沿途天气条件状况, 结合交通位置、视频等数据进行整合运算, 为公众推荐最佳路线选择, 提醒乘客或驾驶者做好防范措施(比如控制车速、开启防雾灯等)。

3) 精准的交通气象信息发布: 通过大数据技术, 使网络、手机、道路沿线可变情报板、电子显示屏、传统媒体等多种发布渠道的信息接收与灾害天气落区等交通气象信息嵌套, 定向、及时发布交通气象服务信息, 如提醒绕行路线、出行路线规划、行车安全提示等。

3.3 大数据在能源专业气象服务中的应用

这里将电力、燃气、新能源专业合并为能源专

业气象服务，一是电力、燃气对气象条件的敏感度是类似的：实时的气象条件变化都会反映为用电、用气量的变化，气象灾害、极端天气会影响到输电线路、LNG燃气运输、工程建设等；二是光伏、风能等新能源的选址、并网、调度管理，都与气象息息相关；

三是能源互联网概念的提出^[4]，从能源消耗角度，电力、燃气、新能源有共同消耗源，虽然现在还属于各自为政的状态，未来多源能源联网管理是必然趋势，因而需要拓展能源调度气象条件产品研发，这里也离不开大数据的参与（图4）。

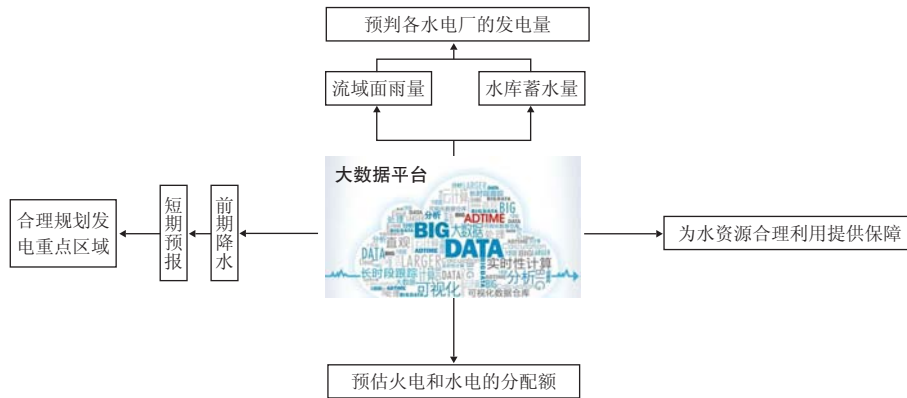


图4 大数据应用于能源气象服务示意图

Fig. 4 The application of big data to meteorological service products for energy

3.3.1 贵州省能源气象服务的现状

贵州省水电较为发达，作为送电大省，电力气象服务开展较早，在水电服务方面开展了流域面雨量阈值方面的研究^[5]，在电力调度方面建立针对电力负荷的主要气象因子逐时预报模型^[6]，在电线积冰^[7]方面也有相关研究成果。依托深厚的技术实力，针对电力行业的气象服务在中长期水电专题预报、电力负荷气象因子预报、导线覆冰预报方面都颇有成效。近年开展的燃气气象服务，在用气调度决策方面根据送气区域GIS信息开展了定制区域的天气趋势、预警信号服务，在服务针对性方面收效甚好。此外，在新能源方面，通过专业观测数据与气候资料的结合，进行风能、太阳能资源评估，为新能源开发提供了科学参考；通过GIS信息与数值预报降尺度技术结合，开展的风电场气象服务工作也初见成效。

3.3.2 大数据在能源气象的应用前景

1) 能源安全生产保障服务：导线覆冰是冬季最主要的电力气象灾害，在贵州主要受特有的凝冻天气影响，其形成、量级与温度、降水（冻雨、雪）具有很好的相关性，通过气象大数据和大数据获取的输电线路信息的碰撞，推测、预测导线覆冰厚度，为冬季电网安全运行提供决策。此外，雷暴、强降雨造成的滑坡、泥石流等地质灾害也会对输电线路、LNG运输、工程建设造成影响，灾害性天气信息与能源工程的GIS信息、工程进度等大数据结合，可实现灾害性天气的能源工程、能源安全影响区域预警、预报。

2) 水电决策服务：随着西电东送电力来源中水电比重的增加，西电东送受天气的影响逐步增大。运用大数据GIS信息、下垫面信息、模糊算法等嵌套的水文气象模型，结合降水量预报的气象信息，可为水电站的短期，甚至中长期电站来水的预报提供更多想象空间，从而为水电发电量、输电外送、能源的年度调度提供科学参考。

3) 气象因子电力负荷预报：以往由于缺少耗电量的数据，电力（能源）负荷预报停留在气象要素预报层面。现在通过大数据技术，可以估算日能耗数据，作为气象因子能源负荷预报模型研究的基础，通过相关分析来进行模型构建，真正满足能源专业气象服务的需求。

4 结论

1) 大数据应用于各专业气象服务的理念，核心是大数据技术获取非气象类的大数据，及其与气象数据的碰撞，表现为专业气象服务水平的提升和服务方式的革新。

2) 各专业气象服务对大数据的应用，重点为行业数据、互联数据。补充观测可直接、有效地获取专业气象数据。格式规范的气象数据与其他各类数据的融合，是大数据应用的关键技术之一。基于开源地图的各种GIS信息、通过手机定位技术获得的人流热力分布及手机用户群体划分数据，都能用于提升专业气象服务的精准性。

3) 目前贵州省的旅游气象服务主要为：气候资

源挖掘应用于旅游资源开发、节假日服务、精细化预报。大数据应用后,可推出适游期预测、来客预估、气象因子的景区调度管理方案、景区热度、气象适游度、推荐景区、路线等旅游气象产品;还可通过精准服务提升旅游突发气象事件保障能力。

4) 贵州省的交通气象服务系统,实现了基于GIS的交通气象信息监控功能,在雾和道路结冰理论研究、精细化交通气象预报上都有一定成效。大数据应用于交通气象决策服务:可为交通工程设计、施工提供支撑;应用于公众服务可研发路湿滑指数、视程障碍指数、最佳路线选择,防范措施提醒等公众出行服务产品;还可用于实现精准、定向、多元的交通气象信息发布。

5) 目前贵州的能源气象服务工作在中长期水电专题预报、电力负荷气象因子预报、导线覆冰预报方面都颇有成效。燃气、新能源方面也有专业数据与气

象数据的结合。大数据可应用于导线覆冰、雷暴、地质灾害等对能源安全影响较大的灾害性天气的预警、预报业务;还可用于能源相关的气象预报模型研究中,如水电站的短期、中长期来水预报模型、气象因子电力负荷预报模型,从而为能源调度提供科学参考。

参考文献

- [1] 维克托·迈尔·舍恩伯格,肯尼思·库克耶. 大数据时代. 盛杨燕,周涛,译. 杭州:浙江人民出版社,2013.
- [2] 沈文海. 再析气象大数据及其应用. 中国信息化,2016,(1): 85-96.
- [3] 唐延婧. 贵州高速公路交通气象监测的发展及应用. 气象软科学,2015(105): 48-52.
- [4] 张涛,张福兴,张彦. 面向能源互联网的能源管理系统研究. 电网技术,2016,40(1): 146-155.
- [5] 胡跃文,秦杰,夏晓玲,等. 乌江流域洪家渡水电站面雨量阈值指标分析. 水资源研究,2015(4): 101-108.
- [6] 杜正静,熊方,苏静文. 贵阳市供电量与气象要素的关系及预测. 贵州气象,2005,29(4): 8-10.
- [7] 陈百炼,吴战平,张艳梅,等. 贵州冬季电线积冰及其天气成因分析. 气象,2014,40(3): 355-363.

中国科技史学会气象科技史委员会成立

气象科技史委员会秘书处



2017年2月28日,中国科技史学会第一届气象科技史委员会代表大会在北京召开。中国气象局党组副书记、副局长许小峰,中国科技史学会理事长孙小淳,中国科学院院士周秀骥、丑纪范,中国工程院院士许健民、丁一汇以及近60位学者参加了会议。第一届气象科技史委员会理事长高学浩主持会议,中国科技史学会副秘书长罗兴波宣读了《中国科技史学会同意成立气象科技史委员会的函》。会议讨论通过了委

员会工作条例。

许小峰在会上指出,气象科技史是气象事业发展不可或缺的部分。气象科技史立足当下、连接过去和未来,不仅为气象教育和人才队伍的建设提供帮助,有助于推动交叉学科相互影响,更重要的是为气象事业发展提供借鉴,对现代气象科技创新有启示作用。

孙小淳认为,自古以来,气象科学技术与人类关系就十分密切,大气科学是前沿的学科,气象科技史也是一个可以深入挖掘的宝库。

与会的专家对气象科技史委员会提出了许多宝贵意见和建议。丁一汇院士建议,要着重研究现代气象史,要正确评价中国气象科学家的贡献;许健民院士建议强化科学精神,通过专业人才将知识一代代传下去;周秀骥院士建议,要搜集大量真实的资料,去伪存真,从在重要人物和重大事件的史料中挖掘出规律;丑纪范院士建议成立气象科技史研究所,培养高层次人才,气象科技史要承前启后、推陈出新。

英国气象局公共气象服务现状分析

■ 王淞秋

英国气象局向英国政府提供3种核心基础服务，并以此获得大部分资金：公共气象服务由英国前商务、创新和技能部代表英国政府和民航局提供资金，国防服务由国防部提供资金，英国气象局哈德雷中心的气候计划由能源与气候变化部和环境食物与农村事务部提供资金。

英国被列为世界上可以提供最精确气象服务的国家之一。根据世界气象组织（WMO）的标准，英国气象局（Met Office, MO）在天气气候服务方面的领先地位也被全球所认可。英国气象局拥有全面的科学研究计划，其目的在于向本国公众提供优化的天气和气候服务、为政府提供决策咨询，同时推动商业发展。根据英国气象局向英国政府提供的分析报告，2015—2025年气象服务将为英国商业带来近300亿英镑的效益，其收益回报比约为14:1，对比世界银行评估的其他国家的气象服务收益回报比，英国的收益回报比已经相当高了。

1 英国气象局概况

英国气象局是隶属于英国商业、能源和工业战略部^①（Department for Business, Energy and Industry Strategy, BEIS）的国家研究和执行机构。与其他国家气象局的性质略有不同的是，英国气象局是公共研究部门（PSRE）^②性质的机构，同时也是英国国防、安全和民用应急基础设施的重要组成部分。

英国气象局具有很强的技术支撑能力，包含由高性能计算机和复杂观测网支撑的可复原的发布基础设施，具备提供国家天气气候服务的能力；拥有天气气候一体化的模式；提供开放的加工数据，能够支撑英国的商业气象服务市场；提供商业和私人用户定制预报及其他服务；按照协议为英国民用和军事政府机构提供服务，同时还向公众提供免费的服务；是少数向其他国家政府机构出售气象服务的国家气象服务机构（NMS）之一；也是世界上仅有的两个世界区域预报中心之一，发布全球预报；可以为民用和军用航空同时提供支撑。

英国气象局的经费是通过贸易基金维持的，但近

几年的收益已经超过了英国财政部（HMT）的首要目标收益。英国气象局参与市场竞争提供商业气象服务，通过政府贸易基金政策建立的“公共天气服务用户组织（PWSCG）”机制，促使其公共气象服务紧跟市场水平，及时了解民众需求变化和跟踪先进技术。

英国气象局通过众包监测用户使用情况及满意度，定期审核监测和评估系统以保证系统能利用最新的技术，并结合传统方法（收音机、电视和纸媒）以全面地了解公众、应急响应人员和私营部门的需要。通过这些手段了解其预报是否被公众理解，也使得英国民众可以实时参与。社交媒体网络，如Facebook和Twitter以及气象局的网站也被利用来监测天气和气候服务的有效性。

2 英国气象局财政情况

英国气象局作为一个贸易基金支持机构，并不是政府支持机构，所以需要从政府、商业用户以及其他方面获取收益以实现收支平衡。在2016年4月英国气象局向英国上议院科学和技术委员会提供的“欧盟会员与英国科学”主题的书面证词里显示，英国气象局向英国政府提供3种核心基础服务，并以此获得大部分资金（约占80%）：公共气象服务由英国前商务、创新和技能部（BIS）代表英国政府和民航局提供资金，国防服务由国防部（MOD）提供资金，英国气象局哈德雷中心的气候计划由能源与气候变化部（DECC）和环境食物与农村事务部（DEFRA）提供资金。

通过英国气象局2011/2012—2015/2016五个财年的财政收入（图1）也可以看到，其收入主要部分来自于政府资金，并且近五个财年是稳定增加的；其商业收入比较稳定，维持在3100万英镑左右。而2015/2016年度财政收入为2.275亿英镑，较上一财年

① 其前身为英国商务、创新和技能部（Department for Business, Innovation and Skills, BIS）

② PSRE机构（Public Sector Research Establishment），即公共研究部门，主要指面向公共事业的研究型机构（如研究实验室等），这类机构由国家所有，也有私营，或国家通过合同协议委托经营。

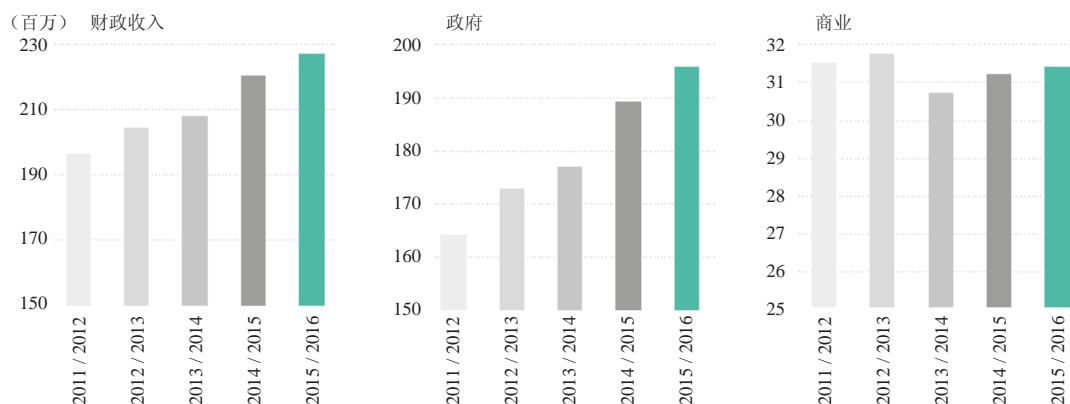


图1 英国气象局2011/2012—2015/2016财年财政收入情况

增长了3%（2014/2015财年为2.208亿英镑），增长主要来自于气候科学、航空和空间天气方面，但利润却下跌了9%，从1210万英镑降到880万英镑。其主要原因是增加了对信息技术的投资，以提高气象局的服务能力并且能够最大限度发挥新高性能计算机的效益。

根据英国气象局2014/2015财年的数据，公共气象服务的总投入为1.198亿英镑，其中9140万英镑由BIS提供，1850万英镑来自于航空；还有680万英镑用于极地卫星，这部分资金主要由BIS拨款；其他的财政收入来自于数据的批发出售和国际研究经费。按照服务的6个项目细分其投入的话，国家天气预警服务、公众服务、城市应急以及数据服务属于服务类，国家能力及国际承诺属于为提供服务而加强的基础设施类。英国气象局在基础设施类共投入了1.106亿英镑（表1），占了公共气象服务投入的绝大部分。如果按照投资的时间来划分，小于2年为短期，2~5年为中期，5年以上为长期（表2），可以看到中长期投入也是整个投入的主要部分。

表1 公共气象服务按目的投入资金情况（单位：万英镑）

目的	项目	投入 (2014/2015财年)	合计
国际承诺		5120	5120
国家能力	观测站	3040	5940
	模式发展	1450	
	预报产品	1450	
服务	公众(网站、apps、BBC和图书馆)	590	780
	城市应急(顾问、预警)	190	
管理		140	140
总计			11980

英国气象局为相当广泛的群体提供世界级的、有附加值的天气气候相关的服务，同时面向公众以及私人用户。但面对两类用户所实行的商业模式差异很大，对政府主体需求的服务是非竞争性的，而通过

商业方式提供给政府内外用户的服务通常是竞争性的。但是英国气象局对不同类别用户的收费标准是一致的。其收费标准是按照英国法律法规的各项要求制定的，每个用户的协议和价格单独设定，但服务价格均遵守英国财政部的指导标准。竞争性的商业服务根据服务性质和用户的需求，由单独的标准基于市场定价，面对公共用户和私人用户统一定价标准。英国气象局向其他政府部门提供的一系列非竞争性服务支撑了其大部分的财政收入。

3 英国气象局公共气象服务能力与效益评价

目前，英国气象局应用的天气气候一体化模式可以为英国国防、安全及城市应急基础设施提供保障，具备为民用和军用服务的双重能力。英国气象局还向其他国家的政府机构出售预报服务，包括澳大利亚、南非、韩国以及美国空军等。同时也向商业和私人用户提供定制的预报服务。英国气象局还向市场提供开放的数据资源。

3.1 英国气象局公共气象服务能力

英国气象局公共气象服务的目的是保护公众生命、财产以及设施免受天气影响，利用天气信息促进英国经济增长，根据BIS的规定主要有6方面：

1) 国家极端天气预警服务：旨在为民众、商业和基础设施提供极端天气（风、雨、冰、雾）影响的权威、精确和及时的预警。

2) 公众天气服务：旨在为国内外的英国居民提供及时可得的天气预报、预警和天气信息，把天气对生命、财产、商业和基础设施的相关影响降到最低，保证经济的增长和繁荣。

3) 国民应急团体服务：旨在为包括中央政府、相关行政部门等的英国国民应急团体提供精确、持续且及时的天气信息，以保证天气对生命、财产、商业

表2 公共气象服务按时间的投资情况

目的	项目	短期 (万英镑)	中期 (万英镑)	长期 (万英镑)
国际承诺		—	—	5120
国家能力	观测站 (观测网、质量控制)	250	1850	930
	模式发展 (科学研究)	—	1450	—
	预报产品 (预报员、系统、高性能计算机)	10	1440	—
	小计	260	4740	930
服务	公众 (网站、apps、BBC和图书馆)	20	570	—
	城市应急 (顾问、预警)	10	180	—
	小计	30	750	—
管理		—	140	—
总计		290	5630	6050

和基础设施的影响降到最低。

4) 数据服务: 向市场提供气象数据, 凡拥有开放数据牌照或是通过数据批发都可以使用公众气象服务的数据。

5) 国际承诺和基础设施: 按照英国与世界气象组织、欧洲气象卫星组织、欧洲中期天气预报中心等组织的协议要求, 需要对全球气象基础设施建设进行相应的投资维护。

6) 国家能力: 旨在发展保障英国国家气象服务能力的基础设施及其性能。这是英国公共气象服务的基础。它包括维持观测网、保持世界级科学基础地位、发展数值预报模式、制作全球和本国预报日常产品、收集发放预报和数据的信息网络设备、维护国家档案。

根据图2所示, 英国公共气象服务的价值链里蓝色部分为基于公共气象服务的投入和产出, 在包含了BIS所规定的6个方面的目的的同时也服务于国防、航空、洪水预警以及气候 (红色部分), 而绿色部分则是基于公共气象服务产品和数据而衍生的更广范围的商业服务。

3.2 英国气象局公共气象服务效益评价

英国公共气象服务的经济效益分7个部分: 公众、航空、城市应急、陆运、避免洪水破坏带来的损

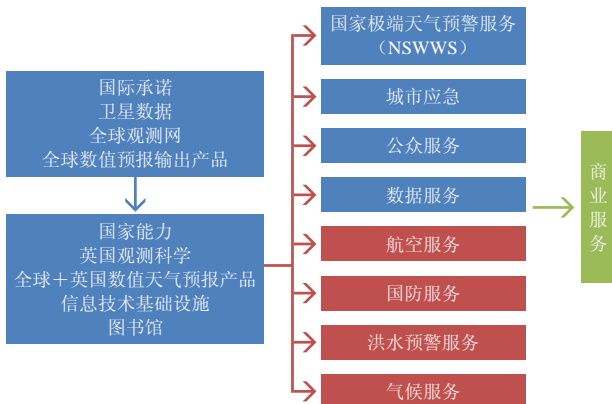


图2 英国公共气象服务的价值链

失、避免风暴破坏带来的损失, 以及对经济的附加价值。

根据英国公共气象服务2015年度收入报告估算总价值达到15.24亿英镑, 其中天气预报对英国公众的价值一年约为4.8亿英镑; 气象服务减少飞机飞行时间以及机场的费用, 从而为航空产业节约经费, 其经济效益约为4亿英镑; 天气信息为英格兰和苏格兰地区冬季严寒导致的陆运损失或额外支出节约1亿英镑; 英格兰和威尔士地区每年由于公众天气预报避免的洪水破坏损失为4800万~8000万英镑, 其中间值约为6400万英镑; 避免风暴破坏造成的损失约为8000万英镑; 公众天气预报对天气依赖型产业的经济附加值每年大约为4亿英镑。农业、建筑业、能源 (电力、天然气、水供应) 及矿业属于天气依赖型产业, 其总产值约1608.96亿英镑, 根据欧洲卫星组织的研究, 天气预报的附加经济值为经济产值的0.25%~1%, 按中间数0.5%计算, 假设公众天气预报贡献50%的服务, 则可计算出其经济附加值约为4亿英镑 (1608.96×0.5%×50%) (表3、表4)。整个公共

表3 英国天气依赖型经济产值

天气依赖型产业	产值 (亿英镑)
农业	94.38
建筑业	867.89
电力、天然气、水供应	332.89
采矿采石业	313.80
总计	1608.96

表4 公共气象服务经济效益

公共气象服务	价值 (亿英镑/年)
公众	4.80
航空	4.00
陆地运输	1.00
减少洪水破坏	0.64
减少风暴破坏	0.80
对经济附加值	4.00
总计	15.24

(下转69页)

音频气象服务的多媒介传播研究

■ 葛丽婷

在特殊的环境下，靠无线电波进行声音传播的广播是应急的首选，而基于中国气象局预警信息发布平台建立起来的应急广播，除了要提供全方位的气象服务之外，还要第一时间肩负起传递信息、播报灾情、提示后续影响以及指导防范避险等职责。

气象音频，在过去的十几年中因其一直借助于传统的广播平台发声，被称为广播气象节目或广播天气连线。随着新媒体的出现，内容创业者纷纷在微博、微信、网络电台开辟音频专栏，其中不乏气象内容。2016年，随着现有媒介的纷纷转型，国家级音频气象服务也开始试水移动出口，初显成效。在新旧媒体共存的全媒体环境下，未来气象音频服务是要全面占领新媒体，还是要坚守传统广播？二者的比重该如何分配？产品该如何研发和运维？本文正是通过对国家级音频气象服务现状和问题的分析，认清媒介环境的改变对音频产业的影响，并逐一找出上述问题的解决途径，帮助气象音频从业者摆脱媒介转型带来的困惑。

1 国家级音频气象服务现状：稳定、求新与不足共存

按媒介性质区分，目前国家级音频气象服务共面对两大类服务对象，即传统的广播电台和新兴的移动终端。这两大类的气象音频服务都有其不可替代的传播价值，但也有提升的空间和亟需解决的问题。

1.1 传统节目：稳定成熟、影响力大

国家级音频气象服务最早开始于2004年的中央人民广播电台经济之声，随后，音频气象服务在传统媒体上快速拓展至中央人民广播电台的6个频道和中国国际广播电台环球资讯广播，这些传统的广播气象节目每天首播总量达39档，总时长79分钟，覆盖全国、播出频次高、影响力大。

1) 用“气象+”模式打造差异化服务

不同定位的广播电台有着不同信息诉求的听众，国家级广播气象节目将气象产品与电台定位和行业服务结合起来，形成“气象+资讯”“气象+经济”“气象+农业”“气象+交通”“气象+生活”等丰富的专

业内容，并根据需求用录播或直播等多种表现形式，完美地实现了差异化显著的气象服务，深受电台和听众好评。

2) 用快速优势承担突发应急任务

广播气象节目制播简单、传播迅速，再加上与合作媒体的临时节目方案调整便捷，因此，在历次突发天气或重大事件时，第一时间发声的优势相较于其他媒体来说格外突出。不论是预警解读，还是深度科普，广播气象节目都能快速、及时、有效地承担起应急任务。

3) 用多样形式完成大型科普宣传工作

广播气象节目除了日常短平快的节目形式之外，还有长达60分钟以上的大型直播。在遇到特殊节日如“3·23世界气象日”时，广播气象主播会参与到国家级广播平台，完成以气象为主题的大型互动直播节目，这对于实现气象深度科普和宣传工作来说十分重要。

1.2 移动音频：试水初显成效

2016年开始，国家级音频气象服务突破传统广播的界限，开始将服务延伸至新的移动媒体端，手机app中国天气通和网络电台喜马拉雅上先后出现了区别于UGC^①气象播报内容的PGC^②专业气象音频产品。

1) app音频，短小实用服务精准

2016年，气象音频登陆“中国天气通”手机app页面，成为众多天气服务类app中唯一有真人语音播报的服务。该音频以本地化气象服务为主，北京地区率先体验，随后江苏、安徽和河北也先后增加音频服务。音频只针对本地天气进行精细化的解读，目标用户明确、信息到达精准，服务体验极佳。

2) 网络电台，深度解析彰显专业水准

2016年6月24日，针对江苏省盐城市龙卷灾害性

① UGC (User Generated Content)，互联网术语，指用户生产内容，用户上传原创内容。

② PGC (Professional Generated Content)，互联网术语，指专业生产内容(音视频网站)、专家生产内容(微博)。

天气，国家级气象服务推出深度解读音频，首次在网络电台喜马拉雅亮声，在随后上线的包括气象科普和气象脱口秀等共8期节目，突破了原有制播模式下时长和流量的限制，均是以“深度”为特点，配合大数据和历史资料，在没有统一策划和推广的情况下，点击量达到5.2万。

1.3 存在的问题与不足

1) 传统平台限制多，可拓展空间小

传统的广播气象节目，是借平台发声的。传统的广播电台受政策和制度的限制，使得音频气象服务在内容编排、播报形式、主持风格甚至是广告经营等方面都很难再有进一步的拓展空间，而这一问题带来的直接后果就是广播气象服务处于长期一成不变的节目样态，容易造成听众的流失，同时对于合作模式的可持续发展也是一种考验。

2) 新媒体思维弱，创新能力低

移动端气象音频为新尝试的服务模式，制作团队受固有传统思维的束缚，再加上缺乏新媒体节目制作经验，以及对新媒体平台推送规律、用户使用诉求不够了解，导致新旧媒体上出现的气象音频在内容和形式上都差异不大，在创新方面显得后劲不足。然而，移动端媒体上信息传递量极大，这又要求气象服务必须足够“新”才能有立足之地。

综上，音频气象服务在传统平台上遇有瓶颈，而在新媒体平台上又发展滞后。国家级音频气象服务要想做好媒介布局和产品研发，最关键的一步就是要认清当下新旧共存的媒体环境和发展形势。

2 音频传播环境改变，新旧媒体互争共荣

在“听”的渠道上传播信息，传统广播有着上百年的经验积累，然而新技术的出现，以摧枯拉朽之势将更多的收听行为移动化、场景化，使得现在的声音市场，形成了新媒体音频与传统广播相互博弈又融合共生的局面。

2.1 移动音频市场快速兴起

近年来，多个移动音频应用迅速发展，应用下载和用户规模已达亿级，市场价值不可估量，移动音频产业正处在快速上升阶段。

1) 应用终端不断涌现

自2011年蜻蜓FM综合类移动电台成立以来，国内又相继出现了喜马拉雅、荔枝FM、考拉FM等移动电台，据不完全统计，目前国内活跃在听众中的移动电台有20个左右。在国外也同样如此，像美国图书馆的有声收听已经达到45%的覆盖率，德国也有1/10左

右的人成为移动音频固定消费群体。

2) 用户黏性大且数量激增

相比于文字、图片、视频来说，移动音频需要体验一段时间才能有感觉。同时，在不同场景的切换中，音频用户的使用成本比较高。当然这也会使用户对于平台黏性更大，不会轻易转换平台。

第三方营销数据技术公司秒针系统于2015年四季度发布的报告显示，国内城市人口中每3人中就有1人经常收听移动音频。收听终端的变迁令移动听众规模逐步庞大。iiMediaResearch数据显示，截至2015年底，中国移动电台用户总规模1.78亿。用户活跃度高的电台都是亿级用户，移动音频正逐渐被人们所熟知和接受。

而在网络信息建设十分发达的美国，网络电台用户的增量更是惊人（图1），近些年美国互联网电台覆盖的人群比例正在接近甚至是赶超传统广播。预计到2020年，美国互联网电台用户数量将高达1.85亿，接近美国60%的人口数量。

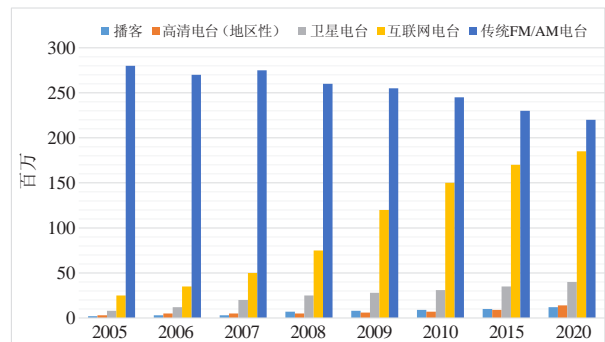


图1 美国不同收听媒介覆盖人数
(数据来源: Edison research and Triton Digital)

3) 广告份额逐年增高

雄厚的资金和丰厚的广告，可以给新生媒介注入长久的发展动力。在美国，移动音频的市场份额逐年增高，2011年广告收入达到7亿美元，据预测，2015年后将逐步达到与传统广播广告均等的情况。在国内，移动电台仍处于融资阶段，即便如此，2016年上半年，蜻蜓FM获融资估值25亿，而考拉FM则完成了1.7亿元的融资。风投的青睐意味着市场可期。

2.2 新媒体环境下更要维系好广播合作平台

新媒体带给传统媒体的冲击有目共睹，但传统媒体依旧有其难以取代的优势和发展空间，特别是广播，作为政府媒体，其权威性、公信力以及传播影响力是新媒体短期内无法比拟的，同时广播凭借着可移动、可伴随的特质，兼具了移动电台传播范围广、传播对象准确、性价比高以及互动性强的特点。2015

年，广播仍然拥有6.87亿的全国听众，较上一年增加600万左右。

1) 传统收听方式依然是音频产品的主要消费方式

从图2尼尔森对国内音频消费市场的调研分析来看，在新媒体音频快速发展的当下，传统广播的收听比例依然高达56.33%，是“听者”中选择获取信息方式最多的一种，所以在用声音发布和传递气象信息的渠道当中，广播媒体依然是首选，这主要是因为广播所独有的伴随性与非视觉媒体特性在车载收听环境下得以充分发挥，显示出了不可替代的媒体个性。

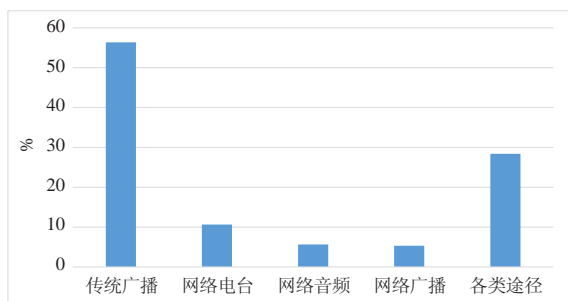


图2 国内音频消费方式对比 (数据来源: 尼尔森媒体消费市场)

2) 广播电台深受广告客户的认同

与2014年相比，在传统媒体2015年整体广告投放市场中，广播电台是唯一有上升的媒体，同比上升了11% (图3)。而从广播广告本身的纵向对比来看，虽然广告在电台投放量的增速在日趋放缓，但是电台媒体凭借车载人群的不断增加，连续几年在传统媒体中一枝独秀，稳定增长 (图4)。这样的增长，能够让广播电台在传统媒体中保持有力的竞争优势。

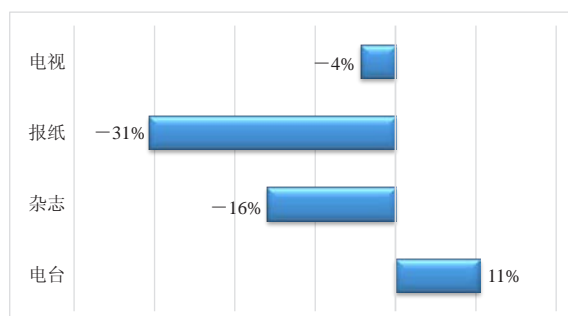


图3 2015年传统媒体类型广告花费同比
(数据日期: 2015年1—12月, 同比日期: 2014年1—12月, 数据来源: 尼尔森网联全媒体广告监测)

全媒体时代带动了音频市场的异军突起，不管是新媒体中移动收听用户的激增，还是传统媒体中广播市场份额的稳步增长，都表明音频产品是当下全媒体融合环境中的新宠，公共气象服务要做好多媒介音频产品的维护和开发。

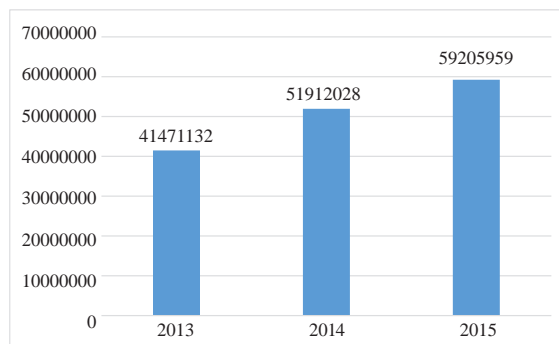


图4 电台市场广告投放量 (数据来源: CTR AD Power)

3 音频气象服务发展策略: 做好多媒介布局

随着移动互联网技术的应用，音频信息的传递方式从广播传统收听终端和车载收听终端的两极传播模式，扩展为传统、车载、智能共存的三级收听终端平台。音频气象服务要在这三级终端进行媒介布局，但也要讲究策略，有的放矢。

3.1 坚持本地化属性布局传统和车载终端

目前，音频的车载收听方式，主要是传统广播内容的车载收听端，未来随着车联网布局的展开、自主内容的研发，车上收听人群可选择的音频源将更加丰富，但不管内容生产者是谁，传统广播和车载终端的使用人群对信息的诉求都是本地化为主，因此，气象服务要以地域为界限，布局当地广播电台媒体。当然，国家级广播电台除外，因为他们本身有着全国落地政策，特别是中国之声、经济之声理论上能够达到100%的全国覆盖率，国家级气象服务借此平台发声，能够有效地达到服务公众、防灾减灾的目的。

3.2 考虑用户诉求布局智能端

音频新媒体用户在选择app时的首要共性是追随内容，即看一款app上是否有独家的版权资源或是他感兴趣的内容。气象音频布局智能端务必要考虑用户的诉求。

布局“中国天气通”手机app，是因其目标用户明确，他们使用的唯一诉求便是获取专业的气象信息，所以本地化的音频解读配合图文信息，能够实现信息的精准投放。

之所以选择在喜马拉雅上推出天气深度解读，也是充分考虑到了用户诉求。首先，在尼尔森对用户选择的调查中发现 (图5)，网络电台app在各类移动音频应用中的认可度最高，是用户的首选。与此同时，图6显示，2015年以提供综合资讯类音频内容的移动电台用户的活跃度最高，而气象的深度解读本身就属于资讯类的范畴。

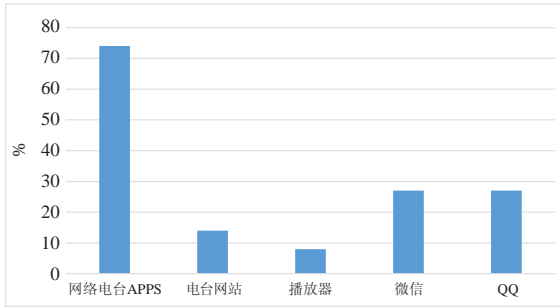


图5 2015年新媒体音频使用情况 (数据来源: 尼尔森)

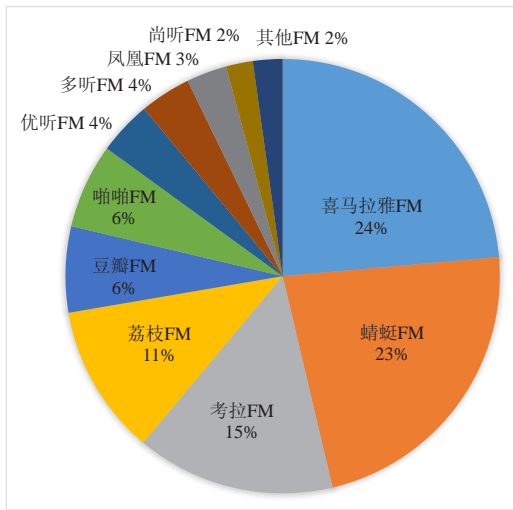


图6 2015年中国移动电台活跃用户分布 (数据来源: iiMediaResearch)

4 气象音频传播策略: 以优质产品促进推广

4.1 如何打造多媒介的气象音频产品

1) 尊重媒介线性与非线性的传播规律

线性传播, 按照时间顺序进行传播。对于音频节目来说, 这是直播式传播方式, 对于广播听众来说就是等着听、顺着听, 是固有模式。在气象信息的制作上, 可以大胆采用“现在进行时”的信息内容, 特别是那些可以辅助预报信息或天气过程的当前天气实况, 以最新资讯的形式传播出去, 以强烈的现场感传递权威性和真实性。

非线性传播, 可点播、可回放、可下载的留存式传播方式。对于新媒体用户来说就是挑着听、跳着听的收听模式, 他们的信息获取以订制为主, 但用户的收听时间并不等于推送时间, 所以在信息内容的生产过程中要符合“一般现在时”, 要能满足随时随地都具备可听性。

如为中国天气通提供的音频中, 天气平静时一般采用短期预报与中期预报相结合的内容为主, 适合全天任何时段收听; 当遇到高影响天气时, 会使用精细

化的预报内容, 但与之相配的是提高更新频次。再比如为喜马拉雅提供的音频, 尽量避开“预报”内容, 有时效特征的天气也仅仅是作为资讯引入, 更多的是结合着气候、科普、大数据等进行的深度分析, 适用于任何时间、任何场景下收听。

2) 充分考虑听众需求与用户体验

传统、车载、智能为载体的广播受众三元主体, 其本质还是听众与用户的区别, 就目前统计到的数据来看, 二者的重叠率仅有2.33%, 即100个当中只有2~3个人会既听传统广播又听移动音频, 既然如此, 气象音频在内容生产上也就不用兼顾太多。

广播(车载)听众, 更倾向于信息的实用性与专业性。根据尼尔森广播听众调查分析, 广播电台收听人群的平均年龄为41.9岁, 其中50后到80后是主力, 占到了所有听众的84.5%, 他们当中除了中老年人之外, 更多的是社会中坚力量甚至精英, 高学历和高收入是其主要特征。从连续3年全国广播收听市场各类频率的市场份额的调查数据可以看出, 广播听众更偏向于对资讯信息喜好, 或者是会偏重于某一行业或某一领域的内容, 类型化广播的概念深入人心, 因此气象服务也要做到结合频率特色提供差异化气象信息。像目前在国家级广播媒体上采用的“气象+”的模式, 就很好地满足了电台听众对信息的差异化诉求。

新媒体用户, 更期待信息的精准性和趣味化。新媒体信息呈现出“海量”的特征, 新媒体用户在碎片时间里对信息的读取, 更希望获得的是精准化的信息, 即精炼、专业。因此, 相对于传统的广播气象节目, 优化形成过程与内容表达, 是气象信息在新媒体上亮声的前提。因此, 移动端上的国家级气象音频在生产之初, 便根据媒体定位分为两种内容侧重点和表达方式: 一是中国天气通上的本地化气象信息解读, 以精细化预报为主, 短小精炼、核心内容明确; 另一种是在网络电台喜马拉雅上推出的天气深度解读频道, 专业的气象工作者用大数据和历史资料, 形成专业化的解读和表现形式。两种气象音频均获得不错的点击量。

根据尼尔森数据分析, 新媒体音频用户的平均使用年龄为26.4岁, 以80后、90后为主要用户群, 这是一个追求个性化和交互性体验的用户群体, 同时认可UGC生产模式。在喜马拉雅电台上的《天气早知道》就是用户生产天气内容的典范, 虽然其持续性无法保障, 专业性也有待考量, 但因其主打儿童类节目定位, 点击量相当可观。由此可借鉴的是, 传统广播“气象+”的节目, 做好前置设计后再分类传播, 在

网络电台的不同频道,或是各类行业app,如航空、公路、农业、期货、运动等,均可实现传统与新媒体在内容上的互生共融。

3) 接收听场景提供有价值的内容

场景是指人与周围景物的关系的总和,其最为核心的要素是场所与景物等硬要素,以及与此密切相关的空间与氛围等软要素。因为不需要占用双眼,音频具有独特的伴随属性,不论是传统的广播、还是新媒体音频,都可以在各种场景中发挥最大效用。事实上,音频本身有碎片化特征,是真正的随时随地就能听。这使得音频内容的消费场景和频次更高、更广。既然“听”的行为都是移动化、场景陪伴化,那么在内容构建上就可以打破新旧媒体的界线,充分考虑到场景以及场景中的主体即可。

从尼尔森收听场景调研的排名来看,乘坐交通工具时听广播或网络音频的人高达69.6%。另外睡前收听有56.5%、垂钓时收听有43.5%、体力劳动时收听有30.4%,而他们选择在这些场景下的收听诉求首先是消磨时间,其次才是获取信息,气象服务在内容和结构上的设计要充分考虑到以上因素。

内容方面,如果是时长受限的传播平台,信息量不能过于饱和,主题要明确、线索要清晰,如只介绍一种天气现象或是只关注一个地区,信息单薄可以用多频次制播的功能来弥补;如果是不受限的时长,就要格外注意结构设计,关键词或总分总的表述方式是最理想的,点面结合的内容安排也能够有效地保证信息的到达率。

有一种特殊的收听场景,那就是突发应急,此时到达率高是评判渠道和信息价值的唯一标准。在特殊的环境下,靠无线电波进行声音传播的广播是应急的首选,而基于中国气象局预警信息发布平台建立起来的应急广播,除了要提供全方位的气象服务之外,还要第一时间肩负起传递信息、播报灾情、提示后续影响以及指导防范避险等职责。随后,这些应急的音频文件可以不经加工而是直接平移到各新媒体载体上,达到最大程度上的应急信息覆盖率。

4.2 如何处理好多媒介传播的技术指标

目前,对外传播的气象音频分为两种形式,一是直播,即直接与电台进行电话连线,具体的音质调节是由电台设置的;另一种是录播,即提前录制好音频节目,再在各平台上播出。从技术指标来看,录播音频的要求最为严格。

1) 最佳音质与音频大小

无论是什么样的播出平台,对声音的质量都有

着最基本的要求,从听感上来说都要满足一定的清晰度、明亮度和真实度。但具体到声音的品质参数,传统广播和新媒体平台还是有着一一定的区别。

传统广播电台要将音频提前导入播出线,像国家级电台使用的xstudio系统,对外来的音频要求必须是MP3格式,但同时要求音质要达到CD的品质,因此在生成音频的时候要将采样频率定为44.1 kHz以上,比特精度为16 bit,持续比特率320 kbit/s,至于是单声道还是立体声,要看播出平台的兼容性。按照这样的数据参数生成的音频都比较大,像是1分钟的音频通常会有2.5 MB左右,如果将这样的音频直接上传到新媒体平台,对于流量的耗费会令用户望而却步。

对于新媒体用户,特别是移动在线收听的用户来说,最理想的使用体验是用最小的流量听到最佳的音质。因此在生成音频时,其他参数不变,只需要将持续比特率尽可能地压缩,例如压缩成24 kbit/s后,1分钟的音频大小只有176 KB,非常适合在手机等移动端在线收听。

2) 气象音频的最佳时长

根据“CTR天气预报满意度调查分析报告”,以及国家级气象广播节目的制作和收听经验来说,一期纯天气的音频,时长以2~3分钟为最佳。

时间太短,最基础的天气信息难以表述清楚,深度或个性化解读更无从谈起。时间太长,尤其是超过3分钟的节目,对于制作者来说,需要大量的构思,从结构到内容设计都要足够地吸引人,而这有悖于气象服务通过音频形式“快速”发布的初衷;同样太长的音频,对于伴随状态下的听者来说,同样需要有足够的时间和耐心,否则极易导致信息的流失。

对于深度解析类的音频,时长可以适当延长,因为关注这类音频的用户,往往是关注此类话题的人。不过长音频需要在后期进行优化处理,比如把整篇内容按照层次、主题、观点等切割开来,加上转场音效,如果能配上适当的背景音乐,整期音频就会有比较好的听觉体验。

3) 建立声音素材库

从现有的气象音频来看,需要进行包装和音效处理的,都是在新媒体平台上播放的音频。新媒体自由发挥度大的特点给了音频后期创作的空间,因此在前期创建一个与气象音频制作紧密相关的声音素材库是十分必要的。

首先,对于包装素材来说,音乐的版权一定要清晰,可以购买或是自制背景音乐。有了版权音乐,就可以在制播线上自行制作包装素材,如短小紧凑型的

音乐用作片头或片尾，而长音乐要利用渐出效果提前剪辑出不同时长的背景乐。其次，准备大量的音效用以提升节目的听感，这些音效要包含两方面的内容，一是各种与天气有关的自然音效，如风、雨、雷电，另外一种则是各种风格的转场音效。

声音素材库的建立可以提高气象音频的制作效率，特别是在出现重大天气时，能够跟上应急的节奏。

4) 自主平台的开发

在新媒体环境中，气象音频既可以借平台发声，也可以自主开发专有平台。自主平台的优势是可以充分地在新媒体自身的优势化为己用、提升自我。

比如对内开发移动端音频制作系统，实现直接录制、一键上传的快速发布的技术模板，实现随时随地快速发布的输出模式；对外研发与气象音频相配套的交互应用系统，在气象信息服务用户的同时，还可以实现在线交互、节目打赏、问卷募集、互动游戏、广告植入、甚至是线上交易和会员服务等技术功能，增强用户体验，维护用户关系。

4.3 如何进行气象音频的推广

1) 精准定位品牌形象

品牌意味着公信度和影响力，对于一个节目的生存来说至关重要。在品牌塑造的过程中，首先要给予品牌精准的定位。“定位”是一个运用广泛的营销术

语，是品牌运行管理的重要一环，所以无论传播平台是什么，气象音频从策划之初就应该明确它存在的目的和目标受众，做到有的放矢。

作为公共气象服务的重要表现形式，气象音频注定要以公众作为自己的目标受众，而它所肩负的任务，除了传播常规的天气要素之外，最重要的就是防灾减灾。以防灾减灾为己任，以防灾减灾的内容定位吸附垂直人群，从而构建品牌、强化形象，这是气象音频的无形资产，也是其在维护社会效益的同时，进行营销推广最强有力的王牌。

2) 根据需求适时推送

在信息密集的时代，怎样能够让气象信息脱颖而出，又不会引起反感，这需要把握好推送时间。推送时间的恰当与否，影响着气象音频的传播价值。

对于传统的广播来说，听众收听广播的时间较为分散，存在不集中、非固定收听的趋势（图7）。但根据赛立信对全国广播市场的调查显示，07:00—08:59、12:00—12:59、17:00—18:59和21:00—22:59是广播全天收听的4个高峰时段，而这4个高峰时段恰好是各主流广播媒体以资讯节目为主的时段，说明此时听众对信息资讯的需求大，气象节目选择在这4个时段进行发布，能够实现较高的信息到达率，并能够帮助听众养成固定收听的习惯。

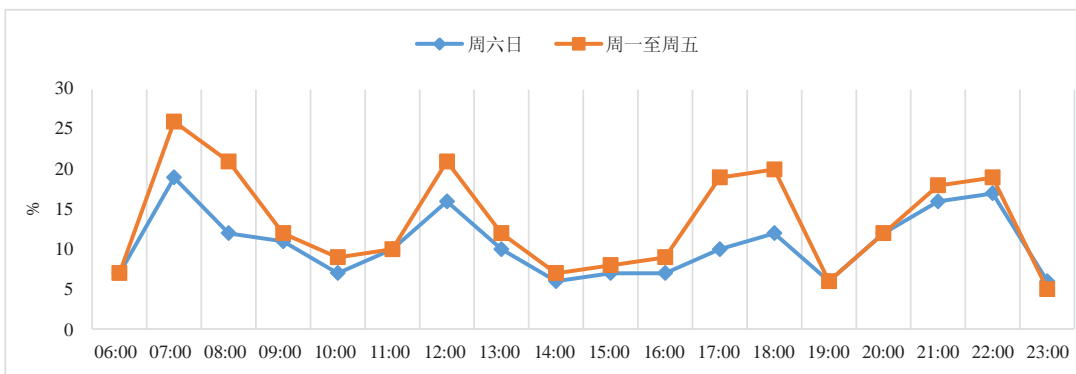


图7 听众收听广播的时间 (数据来源: 赛立信媒介研究)

对于新媒体来说，推送的时间更为重要，推送精准才能有效的到达，才能用好的体验留住用户。根据艾瑞调研数据显示（图8），平板电脑使用的高峰在晚间，而智能手机因其能够填充各种碎片时间，因此它从早上08时开始至22时，整个苏醒时段覆盖人数比例均在40%以上，其中12—14时的午休时段是使用高峰。

和传统媒体不同，新媒体的使用高峰时段要避免推送气象音频。因为使用高峰意味着此时是信息大

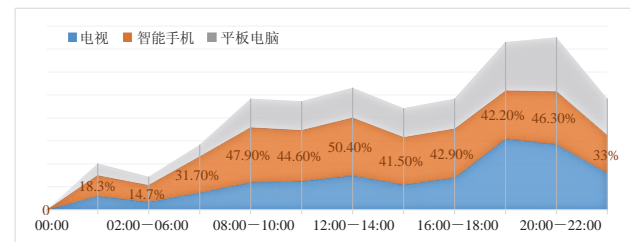


图8 2014年中国新媒体各终端各时段覆盖人数比例 (数据来源: 艾瑞调研)

量涌入的时段，也是用户固定使用其他应用程序的时段，如果在这个时候推送气象音频，很可能会使其淹没于众多信息当中，也可能会打断用户使用其他应用程序，时间久了很可能会使用户选择屏蔽或退订。

仅针对智能手机来说，既然白天都有大比例的人群覆盖，所以早间、上午和傍晚这3个时段可以视为气象音频的最佳推送时间，因为这3个时段是气象信息需求量最大的时段，也是气象数据更新的时段。

5 结语

媒介格局的多元化发展之势不可逆，传统媒体有其不可替代性，而新媒体更有其无法超越的优势，因此，对于国家级音频气象服务来说，双管齐下、全面布局广播电台和移动新媒体是毋庸置疑的发展之道。媒介多元化并不等于同质化，不同的媒介有不同的定位，不同场景下用户有不同的需求，气象音频要想实现它的服务价值、形成优势品牌，就要遵从音频的制

作与传播规律。音频气象服务的从业者要在新技术的支持下，致力于研发具有差异化的气象音频产品，用“气象+”的概念部署本地化平台和智能端，并通过科学的运维推广，在媒介融合与转型期，将气象音频产业做大做强。

深入阅读

- 李正国, 王跃进, 2014. 媒介融合环境下广播发展现状、趋势及对策. 中国广播电视学刊, (5): 5-9.
- 谭天, 2015. 从渠道争夺到终端制胜, 从受众场景到用户场景——传统媒体融合转型的关键. 新闻记者, (4): 15-20.
- 项永, 2016. 知己知彼 融合有道——传统广播与移动互联音频调研分析报告. 中国广播, (9): 32-37.
- 杨蔚, 2015. “移动人”的音频世界——关于音频新媒体用户的使用行为与态度的调查. 中国广播, (12): 26-30.
- 张毅, 陶春宇, 2016. 移动音频市场厮杀正酣未来谁主沉浮? // 官建文. 移动互联网蓝皮书2016版——中国移动互联网发展报告(2016). 北京: 社会科学文献出版社.

(作者单位: 中国气象局公共气象服务中心)

(上接62页)

气象服务再加上气候服务，其效益估值每年将超过20亿英镑。

根据欧洲卫星组织研究给出的欧洲天气服务的经济效益每年为150亿~610亿欧元，英国GDP约占欧洲GDP的13%，也可估算出英国的公共气象服务效益每年为16亿~63亿英镑。与英国气象局自己的估计值基本接近。

4 小结

英国气象局气象相关信息的使用为社会带来了巨大的经济效益，根据估算，2015—2025年它将为英国带来295亿英镑的效益，其中商业（27.4%）、航空（26.5%）、对公众的价值（14.9%）以及气候变化信息收益（10%）4个主要部分占据了共计约79%的效益。还不包括国防安全领域、国际领导力、健康和外交等方面，目前还难以定量评估其产出的效益。

英国气象局气象服务高效益依赖于开展广泛的气象服务，其坚实的基础则是提供天气气候一体化的，并居世界前列的高精度预报产品。从英国公共气象服务的基础成本可以看出，核心研究、提升科学能力和基础设施建设占比90%以上。英国气象局的长期投资也占

据了整个投入的绝大部分，其长期的投资决策，像全球卫星的投入、运行超级计算机和研究都需要5~30年的时间。正是英国气象局不断投资的“世界级”高质量预报，为英国今后一段时期带来了约75亿英镑的预估经济效益（约占整个预估经济效益的1/4）。所以通过对英国气象局公共气象服务现状分析可以发现，高质量的公共气象服务离不开对基础能力的投资，其也将相应地带来很高的回报潜力。

深入阅读

- EUMETSAT, 2014. The Case for EPS/Metop Second Generation: Cost Benefit Analysis. Darmstadt: EUMETSAT. http://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/documents/PSTG-3_Doc_11-04_MetOP-SG.pdf
- Gray M, 2015. Public Weather Service Value for Money Review. Public Weather Service Customer Group Secretariat.
- Met Office, 2016. Annual Report and Accounts. London: Met Office.
- Met Office, 2016. General Review Economic Analysis-Final Report. London: Met Office.
- WMO, 2015. Valuing Weather and Climate: Economic Assessment of Meteorological and Hydrological Services. Geneva: WMO.

(作者单位: 中国气象局发展研究中心)

数据图形在气象影视节目中应用的现状及探索

■ 赵喏

气象服务在传播中，需要传达的信息包括趋势、变化、程度、特征、关联、影响等，这些内容通过图形的方式更易于让观众快速接收服务。

俗语说“百闻不如一见”“一图胜千言”，充分说明人类信息的获取70%~80%源于视觉。因此，面向公众、用户传播与发布复杂信息的最有效途径是将数据可视化。“可视化”意即“生成符合人类感知”的图像。

科学信息可视化在数据可视化分类中是可视化领域最早、最成熟的一个跨学科研究与应用领域。早在1686年，就出现了历史上第一幅天气图。气象信息图从最早供气象专家及专业人员进行参考、分析、研究慢慢进入到公众服务领域，气象服务在传播中，需要传达的信息包括趋势、变化、程度、特征、关联、影响等，这些内容通过图形的方式更易于让观众快速接收服务。气象影视节目是气象服务的重要组成部分，依托电视这种媒介方式，在有限的时间内要达到信息清晰有效的传递更是离不开气象数据的可视化图形。特别是近十多年来，气象影视节目图形早已不再局限于传统的卫星云图、实况及预报图，经过不断开发已经变得更加丰富多彩，在表现形式上也更加形象化、动态化。为能使气象图形在节目中所使用的信息图更丰富、传达信息的效果更有效且符合电视传播的一定规律，本文对近年来传播情况进行了分析，明确其优势与不足，为在信息化发展中提高传播效率，做好优质服务，提供基本依据。

1 气象数据在影视领域的可视化的应用分析

气象公众服务的基本元素来源于气象数据信息，其本身不仅具备多种要素，包括人们常常接收的温、压、湿、风等类型的数据信息，还会涉及不同的雷达、云图等观测信息。气象信息在服务的应用中，都需要与时间、三维空间信息相互叠加运算后，才能提供服务。

随着现代社会经济的快速发展，气象应用服务信息与人类生产生活等活动密切相关，应根据对人类生活的影响、所处区域或分众特征开展有效服务。这些复杂的信息在结合应用后，信息维度会变得比较复杂，如以口述、文本或不能够使用图形可视化的方式展示，不仅在科研上显得更复杂，甚至影响科研结论，在给公众或决策者提供服务时，必然会存在关键

影响要素梳理不清、原理展示不清、传播效果不好，甚至引起歧义等问题。而图形作为可视化的重要手段，比较适合在各类气象服务中应用，尤其是在公众气象影视服务中。

气象图形的应用，需要首先对数据进行分析处理，包括数据的定位、识别、清洗、分类、质控、排列、比较、关联等。这些经过分析处理的数据，经过可视化处理展示后，可以提升对信息的认知率以及对呈现效果的判断力，引导推理做出有效结论。

生成图像图形的过程是可视化过程中的重要一环，其目标是强化认知、分析掌握事物的规律。尤其是面向公众的传播和服务，在发布多要素信息时，以图形形式的可视化方式呈现，可以很好地把信息之间协同协作后产生的、便于决策的内容呈现出来，达到重要信息、规律、传播目标的有效表达。

2 专业气象信息图形应用

气象影视服务由于主要面向公众，需要以提供地面气象信息服务为主，因此地理信息与气象信息可视化的结合应用是气象公众服务中最常使用的图形，也是气象领域独特的专业图形。基于地理信息的气象信息可展示方式很多，包括对气象要素的点气象数据展示、区域气象数据展示、场气象数据展示等。

1) 等值线图(图1)。这是气象专业服务领域最常用的一种图形，使用数值相等的数据点连线的方式显示连续分布和变化规律。目前气象影视节目应用到的预报、预警、实况监测等信息图形均属于此类图形。此外，气压、高度、深度等也常用这种图形展示。根据2016年4—8月对《新闻联播天气预报》节目的统计，此类图形的使用占总图形量的80.33%，在气象影视节目图形中占有主导地位。

2) 点气象数据(图2)。常用来展示重点区域、城市特殊天气变化。比如东北主要城市降温8~12℃，华北主要城市降温6~8℃，就可以在地图上的长春、北京等城市上标注降温或可能达到的气温。也常用来展示各个站点实况数据情况。其中颜色



图1 CCTV-1新闻联播天气预报中等值线图应用

的应用可以大致看出整个地图区域内气温分布变化。根据2016年4—8月对《新闻联播天气预报》节目的统计,此类图形的使用占总图形量的11.62%,其中包括与等值线图的叠加应用。

3) 卫星云图与雷达图(图3)。这是地面接收到的来自气象卫星的云况图片以及地面雷达发射并回收到的雷达回波图。同时,此类图形又往往可以叠加等值线、点数据、场数据等气象要素,使各类气象要素的内在相互关系可以清晰地呈现出来。此类图形在气象影视节目中一般应用于分析重要、激烈的天气过程,如冷空气移动、台风动向、强对流天气的影响等。

4) 场气象数据(图4)。这种图形的主要数据通常来源于数值模拟,用来展示导向趋势信息,表达场中的模式,识别关键特征区域。由于大部分场描述的流体不论是气体还是液体,都是透明介质,它的运动

无法用人眼观测,因此可视化是其展示的重要手段。气象图形一般用来展示风场、气压等变化。场数据展示常用方法包括图标法,即传统的箭头图标展示方式;几何法,如流线法、迹线法等;纹理法是以纹理图像方式展现向量场的全貌,由于能够清晰勾勒出向量场的特征,特别是汇点、漩涡、鞍点等信息,常用来做复杂天气展示和研究。在气象影视节目中,这类图形多用于阐述热带气旋、台风等的影响。

3 基本统计信息图表图形在气象影视领域中的应用

统计图表是最早的数据可视化形式之一(图5),作为基本的可视化元素仍然被广泛地使用。在气象影视节目中也会经常出现此类图形,如柱状图、折线图、饼状图、条形图等。使用场景往往与历史统计数据紧密关联,对某种天气、气候现象进行趋势分析、对比

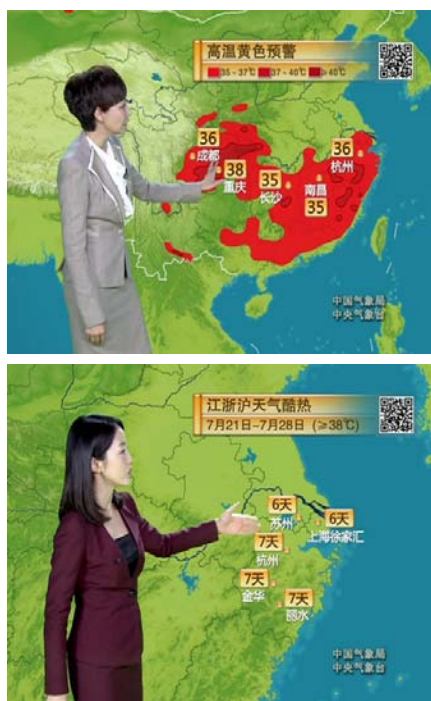


图2 CCTV-1新闻联播天气预报中点气象数据图应用



图3 CCTV-1新闻联播天气预报中卫星云图与雷达数据图应用

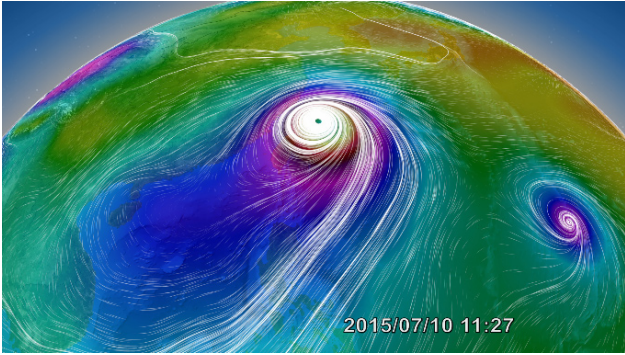


图4 气象影视节目中场数据图形应用

判断等，或对气象知识进行科学普及，或对某种天气现象答疑解惑。在气象影视节目应用中此类图形可单独使用，也常常与等值线等气象专业图形叠加使用。根据2016年4—8月对《新闻联播天气预报》节目的统计，此类图形的使用占总图形使用量的7.76%，需要说明的是，此类图形在2006年以前的节目中几乎从未出现过，而随着节目内容与形式的不断变化提升，近几年的应用呈逐年递增的趋势。

1) 趋势图。包括曲线图和折线图。一般使用笛卡尔坐标显示单变量的发展趋势。X轴为自变量，Y轴为因变量。在气象影视节目中温度的走势就常用趋势图展示。

2) 柱状图。包括堆叠图、直方图等。此类图形可以快速获取对比所形成的结论，例如降水量图或中长期气温变化图。如图2所示，从多年历史平均气温来看气候变化趋势。对于24 h降水量就可以按逐6 h降水量的堆叠图来展示，既可以对比各站点的总降水量，同时可以对比各个时段的降水量。如果在某一时段或某一区域内做降水量分析，可以使用直方图。这两种图均可让观众快速看到变化趋势和变化对比。

3) 饼图。可以表现各个要素在总量中所占的比例。在气象影视节目中一般表达某种天气现象在总体天气情况中的占比，如某月台风登陆个数在全年的占比情况，以此给观众一个比较客观的正常或异常判断。

4 我国气象影视数据图形应用的优势与不足

优势主要有两点：其一，气象影视节目的数据图

形对比平面媒体与网页天气信息来说，最大的优势在于与主持人的互动性，主持人解说与气象图形相辅相成，使气象信息更易使观众理解；其二，运动性是影视区别于其他艺术的重要特性之一，因此，气象影视节目数据图形更加追求以及强调图形的动态及美感。

不足主要体现在以下方面：其一，图形制作系统受数据接口开发力度及数据产品格式所限，数据到气象图形可视化表现形式很难实现突破，例如我国特有的MICAPS系统，以人工手绘为主的图形数据，即通常所说的第十四类数据，在图形可视化呈现上很难达到美观及产生动态；其二，可视化图形产品在丰富性上还有很大的扩展空间，如雨雪区在地图上的三维立体呈现等方面目前还主要是以利用第三方绘图软件进行效果的生成与预报图进行叠加的方式制作，影响了制作美观性及制作效率；其三，图形与节目的内容互动性仍需进一步深入挖掘，很多情况下图形上所呈现的内容主持人并没有深入地进行挖掘讲解，造成观众对所要表述的内容并不能产生直观的理解。

5 视觉效果设计与应用

视觉效果属于电视包装范畴，通过包装可最大限度地增强电视节目的可视性。在分享服务效果和质量的同时，还能给观众带来更多的艺术享受，以此扩大电视节目的收视率和影响力。目前数据可视化是气象服务的第一要务。

1) 要素颜色与地图区分。要素是数据图表达的主体信息，通常认为重要的即是突出的，所以数据要素的表现要与地图颜色明显区分，使其成为画面中最受注意的部分。

2) 颜色、透明度、纹理图案等都可以作为信息的可视化表达。在设计方面，气象信息最常用的表现方式即是赋予不同的颜色，颜色的变化又以色度、明度及饱和度的变化为主。而另一个维度—透明度也能起到非常重要的效果。例如，预测台风影响范围的区域用到了加大透明度的方式；降雨的区域也可以用密集的雨点纹理表达。



图5 CCTV-1新闻联播天气预报中基本统计数据图形图表应用

(下转74页)

《气象知识》防灾减灾科普之实践

■ 周煜 胡晓静



2016年《气象知识》杂志社在出版传统纸媒的同时，还根据多年积累的气象科普资源，完成具有自主知识产权的气象科普动画31个、互联网访问产品40个、游戏5个；开发台风VR产品、气象观测仪器系列AR产品、《二十四节气》系列手绘动画短片、配合气象科普进校园的课件33个。

《气象知识》杂志1981年创刊，其宗旨就是弘扬科学精神，传播气象科学知识，破除封建迷信。三十多年来，《气象知识》秉承这一宗旨，创新办学理念，特别是在减灾防灾这一气象科普的主战场上发力，取得较好效果。

1 设置期刊视点栏目，及时编发气象灾害事件分析，提高防灾理念的新闻价值

《气象知识》杂志设置期刊视点栏目，及时编发国内外发生的气象灾害事件的报道，每一个事件都是活生生的例子，形成一本活的教材，也是大自然为人类敲响的警钟。编发的报道深入分析气象灾害事件，查找灾害发生背后的因果关系，得出一些经验和教训。例如，针对1998年长江发生特大洪水，杂志社迅速派记者前往湖南、湖北和江西重灾区，实地拍摄洪水灾情照片，了解灾情，采访当地主管水利的政府领导和灾区百姓，得到第一手资料。同时，在当地气象部门的配合下，期刊编辑和当地的气象专家举行座谈，对特大洪水灾害发生的自然原因和人为因素做出科学分析，撰写成气象科普文章发表，引起读者热烈响应。四川汶川特大地震、2015年“东方之星”号翻沉、重大雾霾天气等事件发生时，杂志社都及时联系气象部门专家，对事件的原因做出周密分析和判断，并组织编发特稿，取得了不错的科普宣传效果。

2 常设“防灾减灾”栏目，实现防灾意识常抓不懈

《气象知识》杂志常设“防灾减灾”栏目，按季节时令的变化编发应时稿件，针对不同地域、不同季节的气象防灾减灾活动，让刊发的稿件更具有针对性、实用性。

3 配合重大科普活动组织科普增刊

在做好常规期刊的编辑和出版工作外，期刊还针对每年的“3·23”世界气象日和“5·12”防灾减灾日等组织专门的专题报告、专家访谈、专题新闻和互动科普活动等。突出防灾减灾科普宣传主题，充分运用多种创新形式，帮助社会公众了解气象服务产品，用好气象服务信息，知晓预警信息的含义，掌握科学有效的自救、互救知识和方法。

从1998年开始，根据每年世界气象日的主题，编发《气象知识》气象科普增刊（图1）。同时配合世界气象日和防灾减灾日举办大众参与的

活动，采取订阅和免费赠送阅读的方式，发送《气象知识》科普增刊。

4 面向青少年，“校园气象增刊”成为学校的期待

《气象知识》杂志把中小学防灾意识的提高作为一个专项任务来抓，投入相当的人力、物力和财力进行专项工作，2011年，《气象知识》“校园气象增刊”首次出版发行，这是首次推出面向中小学生的增刊。出版“校园气象增刊”，既是推动气象科普进校园工作的有益实践，也是拓展气象科普工作的新的探索。《气象知识》校园增刊继续秉承以中小学生读者群体兴趣爱好为原则，以全新的校园风格、贴切的栏目设置打造出学生们喜欢的科普杂志。

《气象知识》杂志校园专刊，有针对性地刊载有关校园气象灾害预防和应对突发性灾害的文章和论文，普及避灾自救和互救常识。在栏目设置方面，更加符合中小学生的特点：相继开辟了校园气象杂谈、教学园地、作品展厅、气象大课堂、科技小论文等栏目。在版面设计上，因为读者都是在校学生，我们尽量采取生动活泼的格式，加入原创卡通、漫画等设计元素，稿件质量筛选上尽量做到贴近校园实际状况，形式上采用绘画和短文相结合等多种方式，便于学生阅读，受到他们的欢迎。

近几年，《气象知识》通过校园增刊为各校园气象站、气象科普教学成果提供了展示和交流的平台，同时



图1 2017年气象科普增刊封面

对校园气象站在更多学校开花结果起到推动作用。在进行校园气象小组活动的同时，同学们针对自己感兴趣的气象问题，通过自己科学实践和气象观测，本着严谨的科学态度，让学生自己根据采集的数据、自己分析，在专业气象辅导员、老师和家长的指导下，精心撰写小小气象论文，使每个同学都成为气象科普工作的亲历者，起到了很好的科普作用，也给他们留下了深刻的印象。《气象知识》杂志社还在每年的杂志年度优秀文章的评选中，专门开辟了《气象知识》校园增刊的评选项目，给那些优秀小小气象论文和优秀文章以充分奖励，让校园气象科普活动这朵鲜花常开常艳！

另外，我们也根据学生不同的年龄层次，采取多种形式的活动方式，把校园气象科普活动扩展到大学校园和幼儿园，让更多青少年在寓教于乐的科普活动中提高防灾减灾意识。

5 发挥新媒体作用，创新气象科普工作

《气象知识》在其官网科普资源

的基础上，相继开通了《气象知识》微博和微信公众号。同时，分门别类建立了气象科普现代化业务系统，第一时间加工、制作和发布公众喜闻乐见形式的气象科普微博、微视频、动画等，配合重大灾害性天气预报和预警，使公众对已经发生，或者即将发生的灾害性天气有了相应的了解，采取必要防御措施，同时，也让网上的谣言无处藏身。

目前，《气象知识》网站、微博、微信、H5动画和微视频在气象科普宣传中，大有赶超传统纸媒的趋势，2016年《气象知识》杂志社在出版传统纸媒的同时，还根据多年积累的气象科普资源，完成具有自主知识产权的气象科普动画31个、互联网访问产品40个、游戏5个；开发台风VR产品、气象观测仪器系列AR产品、《二十四节气》系列手绘动画短片、配合气象科普进校园的课件33个。截止到2016年底，《气象知识》微信公众号关注已达2万多、微博粉丝也已经达到7.56万。2016年在重大、关键

性天气气候事件及应急服务中，如：江苏盐城龙卷、南方高温、暴雨、北方7·20暴雨、超强台风等，根据当时灾害性天气情况，杂志社都及时通过网站、微博和微信推出原创气象科普作品进行科学解读，为公众解疑释惑。由于反应迅速，释疑及时，制作的气象科普作品得到了人民网、光明网、今日头条等各大媒体平台的广泛传播和转载。其中，《龙卷风能被预报出来吗？》的点击阅读量达到1500万，《北方暴雨元凶，原来是它》的阅读量也有458万。

未来，随着信息技术不断发展，个人移动终端的极大普及，气象科普在“互联网+”时代，可以在重大气象灾害天气服务过程中实现高效无缝对接，有效地扩大了气象防灾减灾信息覆盖面，解决专业气象信息传播“最后一公里”的瓶颈问题。

（作者单位：周煜，中国气象局气象宣传与科普中心；胡晓静，河北省承德市双滦区实验小学）

（上接72页）

3) 接近用户的心理期待。日常生活中观察的颜色在很大程度上受心理因素的影响，即形成心理颜色视觉。除了冷暖之外，还能给人以重量、湿度等感受。例如在狭窄的空间中，若想使它变得宽敞，应该使用明亮的冷调。在气象图形中应用的色彩也必然要考虑用户的色彩心理期待，如高温图用暖色表现，而冷空气、寒潮等应该用冷色表达。

4) 考虑色障用户。为保证气象信息传达广泛及准确，在设计中，往往还要考虑色障用户对气象信息图形的接收能力。全色盲的人只能看到明度不同的灰，就像正常视觉的人看黑白电视一样。他们的明视觉光谱敏感度曲线与正常人的暗视觉光谱敏感度曲线一样。所以，在气象图形色彩设计上要考虑加大色彩明度变化的方式。

6 对未来发展的思考

随着公众对气象服务水平需求的不断提高，气象专业领域的数据产品将会不断丰富和提升。同时计算机图形处理技术的飞速发展也为处理更为复杂的气象

数据属性创造了无限可能。当下，“虚拟现实”无疑是计算机图形领域的热词，其应用领域涵盖军事、工程、医学、教育等方面，并且起着重要作用。影视领域也不例外，虚拟演播室技术的应用正呈蔓延之势。在气象影视服务领域，将会更多应用虚拟演播室技术，气象数据产品的图形也将会向着三维立体化的方向发展，虚拟现实技术的应用也将给观众带来更多的视觉震撼和艺术享受。

深入阅读

北京华风气象影视信息集团公司, 2005. 电视气象基础. 北京: 气象出版社.
陈浩磊, 邹湘军, 等, 2011. 虚拟现实技术的最新发展与展望. 中国科技论文, 6(1): 1-5.
陈为, 沈则潜, 陶煜波, 等, 2013. 数据可视化. 北京: 电子工业出版社.
日本视觉设计研究所, 2004. 设计配色基础. 于雯竹, 陆娜, 译. 北京: 中国青年出版社.

（作者单位：中国气象局公共气象服务中心）

高被引论文选编

“电网气象”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2015—2016年

气候变化和变率对电力发电的影响
——The impact of climate change and variability on the generation of electrical power. *Meteorologische Zeitschrift*, 2015, Vol. 24, No. 2.

发电与气候变率和变化之间存在着密切联系。电力行业的化石燃料燃烧是人为气候变化的主要驱动因素，而水力发电对气候的影响仍有争议。很大程度上，发电依赖于天气/气候参数，例如风（风力发电）或气温（通过影响水温而影响火力发电）。降水和温度影响下的径流对水力发电和火力发电厂的制冷尤为重要。基于此，德国波茨坦气候影响研究所的Koch等分析了德国气候变率和变化对发电的影响。研究共考虑了火力发电、风力发电和水力发电三种发电类型。研究指出，由于径流下降或水温偏高，水电站和火电厂受到负面影响，风力发电没有发现明显的趋势。不过，由于装机容量略有增加，以及涡轮机和发电机的技术革新，水力发电量的减少并不明显。对于火力发电厂，通过使用新型的闭路冷却系统替代旧的一次性冷却系统，可以显著降低对发电的负面影响。而计划增加的风力发电装机容量明显超过气候变化带来的变化。

发电规划对水文气候变化的稳健响应
——Robust response to hydro-climatic change in electricity generation planning. *Climatic Change*, 2015, Vol. 130, No. 4.

加拿大维多利亚大学的Parkinson等介绍了一种适应水文气候变化的发电规划框架，该规划框架体现了水文气候情景相关的发电

风险和机遇。该研究以加拿大不列颠哥伦比亚省的电力系统为例，论证了其在水文气候变化的稳健响应。由于水电资源对该区域电力供应的巨大贡献，发电对水文气候变化的适应战略在这一地区至关重要。利用降尺度全球气候数据驱动流域尺度水文模型，由此得到的分析结果表明，到2050年，区域流量特征的变化可能会使不列颠哥伦比亚省每年的水电潜力增加10%以上。加上由于温度升高，电力需求估计下降2%，这样总体上可能会再增加11亿千瓦时的能源。但是，这些所预测的气候影响的不确定性，强调了技术配置将需要长期的运营灵活性，以确保系统的可靠性。而融合了适应能力的区域长期发电模型的模拟结果表明，为确保系统的稳健性，对非水力发电组合的需求变化，将导致累积运行成本增加1%~7%。

不同能效和可再生能源选择的健康和气候益处
——Health and climate benefits of different energy-efficiency and renewable energy choices. *Nature Climate Change*, 2016, Vol. 6, No. 1.

能效（energy efficiency, EE）和可再生能源（renewable energy, RE）可以通过减少来自化石燃料发电机组的排放而为大家带来好处。由于电网以及人口在不同的区域具有不同的分布特征，因此，随区域变化，EE/RE的装机类型和位置的优势可能会存在很大差异。然而，以往研究尚未正式探讨这些区域特征是如何单独和共同影响不同地点及EE/RE装机类型的优势变化的。为此，哈佛大学陈曾熙公

共卫生学院的Buonocore等开发了一种称为EPSTEIN的高分辨率模型，该模型将PROSYM市场分析（一种复杂的经济模拟电力调度模型）的输出结果与一个为SO₂和NO_x排放提供健康影响经济价值估算的健康模型联系在一起，以模拟和比较美国中大西洋和五大湖区六个不同地点的四种不同EE/RE装机类型的公共卫生和气候效益。研究发现，对于所有地点及EE/RE装机类型，它们的年收益在5.7~210百万美元，这说明了基于点的信息对于准确评估EE/RE公共卫生和气候效益的重要性。

未来电力系统的成本竞争及其对美国CO₂排放的影响
——Future cost-competitive electricity systems and their impact on US CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 2016, Vol. 6, No. 5.

化石燃料发电引起的二氧化碳排放是人为气候变化的主要原因。风力和太阳能发电的部署可以减少这些排放，但易受天气变化的影响。NOAA的MacDonald等使用美国连续的具有高空间（13 km）和时间（60 min）分辨率的天气数据计算了可变电力发电机的成本优化配置。研究结果显示，在使用风能和太阳能未来的预期成本时，美国电力部门的二氧化碳排放量相对于1990年的水平可以降低高达80%，而不增加电力成本。在目前的技术和不使用电存储的情形下，这种减少也具有可能性。随着系统发展到包括了大尺度天气模式，风电和太阳能发电增加了电力生产的份额。碳排放量的减少是通过从区域划分的电力部门转移到可实现高压直流输电的国家系统来达到的。

中国电力能源碳排放强度的时空演变及省际间差异性
——《干旱区资源与环境》2015年第28卷第1期

李新等采用政府间气候变化专门委员会（IPCC）《国家温室气体清单指南》碳排放数学模型，测算

了2001—2010年中国及各省电力能源消费碳排放量和碳排放强度,研究了省际间碳排放强度时空演变和差异性特征。结果表明:1)全国电能消费碳排放总量从2001年303 Mt逐年上升至2010年745 Mt,平均年增长9.99%;各省碳排放量呈增长趋势,2010年东部地区五省碳排放属超重型(≥ 40 Mt);西部省份碳排放速度保持较快增长速度。2)全国电能消费单位GDP碳排放强度从276 (kg/万元)下降至182 (kg/万元),平均年下降4.42%;西部省份碳强度普遍高于东部发达地区,说明西部经济发展对电能消费碳排放的依赖性强,东部地区电能消费低碳经济格局开始形成。省际间电能消费碳排放强度的差异性与资源禀赋、经济发展、人口状况、消费水平等因素相关,为我国制定差异化的区域节能减排目标和电力产业发展调控政策提供参考。

时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用——《电力系统保护与控制》2015年第43卷第15期

传统的电网可靠性评估采用固定不变的元件年均故障率模型,难以适应电力系统短期风险评估需求。电网故障与灾害性天气具有较强的时间相关性,气象灾害具有明显的季节性特征,因此电网风险也具有时间波动性。在描述电网元件故障参数时,需要从原来的一维横向连续时间下的年均值模型,拓展到考虑历史同期(纵向)时间和导致故障的因素,特别是外部气象环境因素,以便更准确地描述时间及环境相依的电网故障率。熊小伏等在传统年均值模型的基础上建立了不同时间尺度、不同气象灾害类型下的元件故障模型,并依据此模型进行电网可靠性评估。按照该方法对西南某省级电网近3年内500 kV输电线路的故障数据进行了分析,对该电网的可靠性进行了评估。计

算结果表明,不同时间段电网的可靠性指标与年均值相比具有较大差异,验证了时空环境相依的可靠性评估的必要性。

考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算——《电力系统保护与控制》2015年第43卷第10期

朱斌等根据导线覆冰表面热平衡方程分析内外部融冰因素对导线冰载荷的影响,计及地形对冰载荷的影响以及覆冰引起导线等效半径增大对风载荷的影响,通过气象实测的降雨量、风速、风向、温度等信息以及电网运行信息、当前监测覆冰厚度等信息建立输电线路覆冰厚度增长预测模型。从输电线路覆冰过载机理出发,构建覆冰故障概率计算框架,从力学角度分析覆冰厚度及风速对输电线路的共同作用,采用反映金属承载极限特性的指数模型计算输电线路故障概率。以实际线路为例验证了该模型计算得到的线路覆冰故障概率变化趋势与实际故障情况相符,能够充分验证覆冰故障率与实际天气的相关性。

输电线路最佳经济寿命区间评估——《电气系统自动化》2015年第39卷第12期

为提高电网规划与运维决策的科学性,许巍等提出了一种以全寿命周期年平均成本最小为依据的输电线路最佳经济寿命区间评估方法。该方法在计算输电线路故障率时,不仅考虑了线路役龄,还考虑了气候与自然灾害、地理与外力破坏环境因素,以及部件与土建、运行与检修质量状况对输电线路故障率的影响;并采用最小二乘支持向量机按故障后果严重程度分别计算一般故障、较大故障和严重故障3类故障率,使得故障率的计算更加可信。此外,该方法采用区间分析法计算输电线路寿命周期的各项成本,消除了单一定值带来的成本计算误差。算例验证了输电线路最佳

经济寿命区间评估方法的有效性,并指出了评估结果对电网规划与运维决策的指导作用。

输电线路运行安全影响因素及防治措施探析——《中国高新技术企业》2015年第22卷第31期

输电线路覆盖地域辽阔,多数电压相对比较高的线路电能传输距离远,而且主要通路紧密设置了多回线路。输电线路途经地区的气象、地势状况各异,极端气候发生跳闸等现象对电力网的正常运转和安全性都造成严重影响。方宏等对输电线路运行安全影响因素及防治措施进行了探讨。他指出,在春冬干燥季节,各种原因引发的山火有所增长,在山火频发地区应尽量减少紧凑型输电线路的建设;针对输电线路的覆冰,要与运行资料数据结合,对容易出现冰舞的输电线路,在发现不均匀覆冰的情况后立刻采取措施,避免舞动出现;针对雷击方式的多样性,线路的防雷措施要综合全面地分析输电线路的实际工作特性,通过关注雷击的各种途径综合运用安装防雷线、安置线路型避雷器、增加线路绝缘等多种方式全面提升输电线路防雷水平。

编辑选编

利用土壤水分主动/被动探测卫星(SMAP)雷达和辐射计反演地表冻融状态——Retrieving landscape freeze/thaw state from Soil Moisture Active Passive (SMAP) radar and radiometer measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 194.

全球1/3以上的土地每年都在冻结和非冻结状态之间进行季节性转变,在北方地区和高纬度地区,陆地冻融(freeze/thaw, FT)对水文和生物圈过程具有控制性影响。基于土壤水分主动/被动探测卫星(SMAP)高分辨率L波段(1.4 GHz)雷达的升轨和降轨观测数据,NASA生产发布了

3km空间分辨率的FT日产品。在2015年7月SMAP雷达出现异常之后，NASA采用较粗分辨率（36 km）的SMAP辐射计数据作为输入，开发出替代的每日被动微波冻融产品。为了比较SMAP辐射计和雷达反演地表冻融状态的差异，加拿大环境与气候变化部的Derksen等使用原位观测分析了重叠观测时段内3 km雷达与36 km辐射计测量地表冻融状态的敏感性。在高纬度SMAP核心验证站点的检测评估显示，两种传感器与原位观测非常一致，超过了SMAP任务精度要求的80%。使用由空气温度和土壤温度导出的FT参考标志，也发现雷达和辐射计产品具有类似的性能。总体上，被动遥感（SMAP辐射计；Aquarius辐射计；AMSR-2）获得的冻土区域比主动产品（SMAP雷达；Aquarius雷达）更少。

使用微波和MODIS卫星数据产品表征有和没有积雪覆盖的全球冻土格局——Characterizing global patterns of frozen ground with and without snow cover using microwave and MODIS satellite data products. *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 191.

在冬季，积雪覆盖影响着生物对气候变化的反应，因为积雪和冻土之间的隔热和热稳定区域（称为subnivium）为生物提供了避寒场所。为了评估未来冬季气候变化对依赖于subnivium的生物的影响，美国威斯康星大学麦迪逊分校的Zhu等基于MODIS积雪产品和源于SSM/I及SSMIS的NASA全球冻融状态日数据集，研究了有和没有积雪覆盖的全球冻土格局，并开发了一套新的500 m分辨率数据集，给出了2000—2012年全球范围内积雪覆盖地面（Dws）和无雪冻土（Dwos）的持续时间及变化特征，同时还量化了Dws和Dwos随纬度的变化。结果表明，Dws和Dwos的平均和年际变化随纬度和地形的变化而变化。其中，平均Dws随纬度升高而增加。

而比较反常的是，在33°N附近，Dwos有较长的持续时间；相比，33°N以北、以南，Dwos都有所下降，甚至较高纬度的冻土（无雪或有雪覆盖）持续时间都比33°N要短。发生这种情况是因为中纬度地区的积雪少而短暂，导致了无雪地面较长的冻结时间。Dws的年际变化随纬度而增加，但北美、欧洲、亚洲和南半球的这种关系的斜率也有所不同。总的来说，对于依靠subnivium在冬季生存的生物，中纬度地区的生物对寒冷的适应可能会比较高或较低的纬度地区更好。此外，由于Dwos的年际变化在高纬度地区更大，所以预期那里的生物会适应暴露于冻结的不可预测性。总之，分析气候变化在冬季对生物的影响时应考虑subnivium的特征，气候变暖可能会使北方地区在生态功能上更为寒冷，无雪但冻结情形的持续时间的年变化可能会导致冬天开始和结束时间具有更大的不可预测性。

基于植被格局估算山区年降水：以怒江流域为例——Remapping annual precipitation in mountainous areas based on vegetation patterns: a case study in the Nu River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, Vol. 21, No. 2.

精确的高分辨率降水数据对于理解山区流域尺度的水文过程至关重要。传统插值方法或基于卫星的遥感产品在捕获山区降水的空间变异性方面存在局限。清华大学的Zhou等对卫星降水、器测降水和植被指数进行融合，改善了山区年降水的估计。该融合框架大致由植被数据合并、植被响应建立和降水重新制图三方面内容构成。将该框架应用于怒江流域的山区进行降水估算，结果表明，该框架在再现高分辨率降水格局和捕获其在怒江流域高空间变异性方面具有较好的可靠性。此外，与反距离加权（IDW）方法和TRMM降水产品相比，该框架可以显著降低降水估计误差。

芬兰西部Aurajoki流域部分森林覆被地区的土壤水分反演——Soil moisture retrievals over partially forested areas in Aurajoki catchment, western Finland. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, in press.

粗糙的地面分辨率限制了当前卫星遥感（无论主动还是被动遥感）对土壤水分反演的准确性，因为粗糙分辨率下的许多像素包含了不同的土地覆盖类型。其中，一个重要的不确定性因素是稠密植被的引入，特别是在森林和开放土地覆盖区域的过渡地区。芬兰阿尔托大学的Seppanen等利用高分辨率L波段机载辐射计，在北方森林地区异质像素分布的情况下，研究并尝试量化和隔离了不同地形类型对土壤水分反演的影响。这项工作基于HUT-2D干涉辐射计在芬兰进行的一系列机载辐射计测量。研究将辐射计导出的土壤水分值与通过流域模拟和预测系统模型给出的土壤水分估计值进行了比较，结果表明，在异质像素覆盖（包括约30%的森林）的农业区域，土壤水分反演的精度可达到 $0.032 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，因此L波段辐射测量在湿地水文过程的研究中具有一定的适用性。

气象卫星的云观测——《气象》2017年第43卷第3期

云体现着不同尺度天气系统发生、发展和消亡的过程。云还通过反射太阳辐射和阻止地球发射辐射，维持着全球能量平衡。1960年气象卫星的出现，揭开了从浩瀚太空，俯视千变万化云系的历史。气象卫星云图的获取，加深了人们对天气、气候变化过程的认识，推进了大气科学的发展。卢乃锰等围绕气象卫星云遥感主题，首先概述了利用卫星资料开展云检测、云相态识别、云光学厚度与等效粒子半径反演的原理和方法。而后，着重介绍了各类天气尺度和中尺度天气过程的云系特征。最后，文章

回顾了国际卫星云气候方面的工作，展望了未来云观测技术的发展前景。

近百年来ENSO强度的变化特征——《气候变化研究进展》2017年第13卷第1期

史珩瑜等利用美国NOAA提供的月平均海表温度资料和英国Hadley中心提供的全球逐月海温格点资料，研究了1900—2015年间厄尔尼诺—南方涛动现象(ENSO)的强度变化。结果发现，1900—2015年中ENSO事件强度发生了明显变化：20世纪初期至50年代ENSO强度为近百年来最弱时期，而从50年代以后其强度显著增强，特别是70年代至90年代末期ENSO强度达到近百年来最强，但在2000年以后其强度又有所减弱。进一步分析表明，在20世纪20—50年代的强度偏弱期，ENSO空间型的南北宽度为近百年来最窄，伴随着最大海温异常中心位置偏西；相比之下，在20世纪70年代以来的强度偏强期，ENSO空间型的南北宽度达到最宽，对应着最大海温异常中心位置偏东，而2000年以后的情形有向相反方向发展的趋势。

超强厄尔尼诺事件海洋学特征分析与预测回顾——《气象学报》2017年第75卷第1期

2015/2016年厄尔尼诺事件被认为是一次与1982/1983和1997/1998年相当的超强事件。任宏利等基于多套再分析数据，比较了此次事件的海洋上层变量主要特征与历史上两次超强事件的异同，并利用热带太平洋混合层热收支方程对主要物理过程进行了定量分析。研究认为，2015/2016年事件前期为异常高海温东传特征，且前期形成了一次弱的中太平洋型暖事件；但后期表现为弱西传特征，在成熟位相转换成东太平洋型强厄尔尼诺。此次事件中伴随着多次西风爆发事件和开尔文波东传，但赤道开尔文波在盛期基本维持在中东太平洋而不继续东传，赤道外罗斯贝波西传特征

亦不明显。相比之下，此次事件在发展一成熟期前后的赤道“热容量放电”过程更加明显些。此次事件异常暖中心位置偏西，其主要原因很可能与赤道东太平洋的强东风异常和冷海水上翻，以及纬向洋流异常和次表层温度异常分布偏西有关；东边界冷水入侵，削弱赤道东太平洋海温异常程度，可能是此次事件位置偏西的直接原因。在海洋上层热量收支中，此次事件中温跃层反馈是促进海温升高和位相转换的最关键过程，纬向平流反馈项亦发挥了重要作用，两种过程共同形成了超强的升温幅度和偏西的异常暖海温分布型。中国国家气候中心新一代ENSO预测系统(SEMAP2.0)每年两次的实际会商预测中给出了较为合理的预测，特别是考虑前期海洋变化预报因子信息的统计模型更好地预测出了海温异常的波动演变状况，成为多方法集合(MME)的重要成员。

利用KAZR云雷达对SACOL站云宏观特性的研究——《科学通报》2017年第62卷第8期

云是气候系统中最为重要的因子之一，对地气系统的辐射收支有显著影响。然而由于云在气候模式中的表征和反馈作用不能很好地被描述，因而也是造成气候预测存在较大不确定性的主要因子。兰州大学半干旱气候与环境监测站(SACOL)于2013年7月引进了Ka-Band Zenith Radar(KAZR)，在西北干旱区进行云的长期连续观测。朱泽恩等利用云雷达观测数据，首先实现了目前ARM用于云检测的业务算法。在此基础上对2014年SACOL站上空云宏观特性进行统计，初步分析了云底、云顶和云厚的分布变化，结果表明：云底在1.5和5.5 km处出现频率最高，云顶发生频率在2.5和8.5 km处达到峰值；67%的云层厚度分布在2 km以内；月平均总云量的发生频率为44%~76%，低云、中云和高云的发生频率分别为13%、30%和34%；单

层云、双层云和三层云占到云总数的98%，其中夏秋季节多层云发生频率较高；各个季节不同类型的云都具有一定的日变化特征；通过KAZR与Cloud Sat和CALIPSO卫星的观测对比，结果表明Cloud Sat对厚云的穿透性好，但无法探测到反射率因子低于30 dBz的弱云，CALIPSO对弱云最敏感，但信号受云滴粒子衰减较快，对于厚度较大的云探测的云底高度偏高。

夏季亚洲大地形双加热及近对流层顶位涡强迫的激发：伊朗高原—青藏高原感热加热——《中国科学(地球科学)》2017年第47卷第3期

刘屹岷等基于诊断和数值模拟，研究了夏季青藏高原和伊朗高原热力强迫的相互作用，其对亚洲副热带季风区水汽通量辐合的贡献及对欧亚大陆上空高对流层顶和平流层低层冷中心形成的影响。结果表明两大高原感热加热存在相互影响和反馈，伊朗高原感热加热减少青藏高原的表面加热，而青藏高原的感热加热则增加伊朗高原的表面加热；形成了观测到的伊朗高原感热加热—青藏高原感热加热和凝结潜热释放—大气垂直环流之间的准平衡耦合系统(TIPS)，影响大气环流。青藏高原上的感热—潜热相互反馈在这个TIPS耦合系统中起主要作用。两大高原感热加热对其他地区的影响有相互加强也有相互抵消；青藏高原感热加热引发的对亚洲副热带季风区水汽通量辐合贡献率为伊朗高原感热影响的2倍以上；伊朗高原和青藏高原的感热加热共同作用对亚洲副热带季风区的水汽辐合作出最主要的贡献。TIPS的加热作用使对流层温度升高，并抬升了其上空的对流层顶，造成了那里平流层下层温度偏低；与欧亚大陆大尺度热力强迫共同作用，形成了对流层上层的暖性但在平流层下层为冷性的强大的反气旋环流南亚高压，从而影响区域和全球的气天气候。

《《 涓流细雨 》》

"I'm supportive of getting more private companies to provide satellite information, but so far we have not seen that the private sector can provide this data with the same level of quality and accuracy."

“我支持让更多的私企提供卫星信息，但是截至目前我们还没有见到私企能提供同样质量和准确性的数据。”

——近一段时间，美国下一步无线电掩星技术提供渠道的讨论逐步升温。一方面，NOAA于2016年9月在美国国会压力下通过和私企签订卫星数据购买协议的方式，实施利用商业化资源的示范项目；另一方面，研究机构主持的合作项目COSMIC二期项目，后半阶段的经费尚没有落实。未来，国家和公共机构要获取的类似卫星数据从哪里来，既是一个技术问题，更是一个全局性问题。COSMIC-2负责人Bill Kuo就技术层面做了上述表态。

"Americans from coast to coast will now be better prepared for severe weather with the passage of the Weather Research and Forecasting Innovation Act. This bill has been four years in the making and is long overdue. It will transform our nation's weather gathering efforts and help save lives and property. This legislation strengthens the underlying atmospheric science while simultaneously advancing innovative technology and reforming operations to provide better weather data, models, and forecasts. We look forward to the Senate approving this bill soon."

“天气研究和预报创新法的通过，能让从东海岸到西海岸的所有美国人更好地应对激烈天气。这个法案已经存在了4年，早已经逾期。法案将改变我国的天气合力，帮助挽救生命和财产。这个立法在强化基础大气科学的同时，推进创新技术和改进业务以提供更佳的天气数据、模式和预报。我们期待参议院很快通过这个法案。”

——2017年1月9日，美国国会众议院通过了H.R. 353号法案《天气研究和预报创新法案》。这个美国两党共同策划了多年的法案，目的是要求NOAA专注于研究下一代天气数据、模拟和计算技术。委员会主席Lamar Smith对这个法案进行了如上评述。

"With this mission we will see another first for Surrey: this receiver will be our first space hardware onboard the ISS."

“这个项目还让Surrey实现了另一个第一：这个接收器将是我们安装在国际空间站上的第一个空间硬件设施。”

——英国Surrey卫星技术公司(SSTL)日前向NASA喷气推进实验室(JPL)提交了空间GPS接收器(Space GPS Receiver, SGR-20)，作为NASA的轨道碳观测站-3计划(Orbiting Carbon Observatory-3, OCO-3)项目的组成部分。OCO-3的使命之一就是收集空基大气CO₂观测数据。一旦OCO-3实施，该系统将被安装在国际空间站(ISS)日本试验暴露模块设施(Japanese Experiment Module-Exposed Facility, JEM-EF)上。就此项合作，Surrey公司项目负责

人Eugene Hockenberry做出上述评介。据悉，SSTL提供的SGR-20是一个单一频率、多天线GPS接收器，设计功能是在小卫星低地球轨道(LEO)应用中作为宇宙飞船定轨子系统。借助该系统精度优于20m的定位信息和准确性优于0.25m/s的速度数据，计划2018年发射的OCO-3有望提供更精准的探测数据。

"Our business was built on a foundation of understanding and solving the most complex challenges associated with satellite and ground operations. We are honored to work with NESDIS, which plays such an integral role in managing critical space assets that make important contributions to environmental resource management and our national security."

“对有关卫星和地面操作最复杂挑战的认识和解决，是我们企业生存的基础。我们为与NESDIS合作感到荣幸，该局在管理关键空间设施方面是一个综合角色，为环境资源管理和我们国家安全做出重要贡献。”

——位于美国弗吉尼亚州的Vencore公司，2017年2月获得来自NOAA有关卫星的系统工程和技术服务合同，这份价值1.13亿美元，时限为1年的合同，意味着高科技企业全面参与NOAA气象卫星创新任务。面对这样的情形，Vencore公司总裁兼首席执行官Mac Curtis先生也倍感振奋，给出了上述看法。据悉，Vencore公司是一家有40多年历史，与美国政府保持良好关系的高科技公司，公司旗下员工达3800人。

"1) NWS is aware of the data outage impacting customers across the nation. We will pass along more detailed information as soon as possible.

2) In the meantime, please follow your local forecast office's social media accounts for updates."

"1) NWS意识到数据中断影响了全国客户，我们将尽早提供更为详尽的信息。

2) 在此期间，请联系当地气象部门社交媒体终端获取更新信息。”

——2017年2月13日美国东部时间13:08—15:44，美国气象局所有通过互联网发布的产品中断，包括预报、警报、雷达和卫星图像以及当前天气实况等。美国气象局网站(<https://www.Weather.gov>)也停止更新信息。只是美国气象局在其推特上发布了上述2条信息，告知了情况。根据美国气象局转天的解释，这次网上信息中断源于电力供给中断，带来的影响是“重要的”。据悉，事故当天，暴风雪移过缅因州和北加利福尼亚州，面临洪水风险。

"It's going to be a record low minimum no matter what happens right now, it's just a matter of, how low do we go. It could be any day now (The ice is even lower now than it was when we spoke)."

“无论现在情况怎样都将是一个创纪录的最低值，问题仅仅是到底有多低。最低值现在随时可能出现(海冰现在可能比刚才我们开始说话时还少)。”

——1979年以来南极海冰范围的记录已经持续了38年，2017年2月底出现最低值：2月28日213.1万 km²，这比之前的

最低值，1997年2月27日出现的229万 km²减少了15.9万 km²，几乎相当于佛罗里达州的面积。获取南极海冰数据的美国国家冰雪数据中心主任Mark Serreze对今年南极海冰面积极小值的出现做出上述评价。

“With GRACE, we effectively created a new field of spaceborne remote sensing: tracking the movement of water via its mass”

“有了GRACE，我们有效地建立了一个新的天基遥感领域：通过其质量跟踪水的运动。”

——2007年3月17日，美国和德国合作的GRACE卫星（Gravity Recovery and Climate Experiment，重力恢复和气候实验）升空，GRACE运行15年来所获取的数据，改变了科学家审视地球水的流动和存贮的视角。原始GRACE项目科学家，目前是NASA喷气推进实验室主任的Michael Watkins给出上述评价。已经运行了15年的GRACE，已经是其最初预计的生命期的3倍。项目组在努力让其运行的时间尽可能延长，但卫星将很快燃料用尽，或许就在今年夏天。2012年开始，美国和德国开始了其后续项目，即GRACE Follow-On（GRACE-FO）开发，其发射时间预计在2017年12月—2018年2月。

“This work will help expand our understanding of remote sensing data and gain new insights into the availability of natural resources in the area and their impact on food supply.”

“这项工作将拓展我们对遥感数据的认识，进一步洞察这些区域自然资源的可用性及其对粮食供给的影响。”

——近日，美国国防部先进研究项目局（DARPA）批准笛卡尔实验室（Descartes Labs）小企业创新奖励二期项目，以支持其在全球粮食产量预测方面开展进一步工作。DARPA认为，该实验室基于卫星图像海量数据，完成了云平台建设，开展各种科学分析和预测。据悉，借助这一项目的支持，实验室将研发中东和北美地区小麦产区自动分析、监测和产量预报系统。谈及未来的研发，实验室共同创建人和首席执行官Mark Johnson先生如是说。

“We get some sensors on the plane telling us what’s happening with regards to turbulence. That information goes into a smart gateway, which Gogo puts on the plane. That information to go to that gateway has to go through the Gogo network. It then goes through a cloud-based aggregation, at one of the cloud-based locations we have in several hangars across the globe. That information is then available to The Weather Channel through an API, and they write an API directly into us to access that information and run the algorithm. You’re going to see us do things such as this with The Weather Company with a number of different companies both within aviation and most likely outside of aviation as we continue to solidify a position within the aviation internet of things.”

“我们在飞机上安装传感器，得到湍流实况信息。该信息进入Gogo公司安装在飞机上的智能网关，随后进入Gogo的网络。之后信息进入一个基于云的数据分中

心，这类数据分中心是我们在全球几个机库中基于云的地点建立起来的分中心的其中一个。于是，该信息就通过API与天气频道公司共享，天气频道公司用直接编API给我们的方式获得信息和通过算法计算加工信息。你将会看到我们和天气公司这样的合作，也在与其它一些公司展开，有航空类企业，但大部分是非航空公司，借此我们将持续坐稳在航空物联网领域中的地位。”

——多年来，商业飞机获取天气信息无非来自卫星和地面雷达。最近，航空制造商、互联网提供商以及其他企业一起，在探讨另外的天气信息来源：即“相互连接的”或“联合的”群参与和云资源天气信息。主持这项开发的Gogo公司市场和数字战略副总裁Lisa Peterson女士就新天气信息来源和借助物联网（IOT）价值链开展的多领域合作进行了如上解释。

“Every year, an estimated 2000 million tons of dust is emitted into the atmosphere. While much of this is a natural part of the Earth’s cycles, a significant amount is generated by human-induced factors, especially unsustainable land and water management. Dust is a major component of atmospheric aerosols, which affect the global climate and have important effects on weather through their influence on atmospheric dynamics, clouds and precipitation. We need to improve our observations and monitoring of airborne dust for public safety considerations but also to understand the feedbacks with the climate system.”

“每年，估计有20亿吨沙尘注入到大气中。尽管这一过程主要是地球循环的自然部分，但人类因素，尤其是不可持续的土地和水管理，导致的沙尘量也是不可忽视的。沙尘还是大气气溶胶的主要组成部分，后者影响全球气候并通过影响大气动力、云和降水给天气带来重要影响。出于公共安全考虑，我们应该改进浮尘观测和监测，而且还要认识其与气候系统的反馈。”

——世界气象组织2017年4月12日发布了《浮尘公报》，这份第一次发表的报告，对2016年全球大气浮尘水平、地域分布情况和年际变化情况进行了概述。WMO沙尘暴预警咨询和评估系统指导委员会主席，来自西班牙气象局的Enric Terradellas先生概括了这份报告的意义所在。

“OFS is an innovation in Indonesia maritime forecasting that can provide ocean condition up to 7 days. Indonesian should be proud about this amazing and world class technology.”

“OFS是印度尼西亚海洋预报的创新，系统可用预报长达7天的海洋状况。印度尼西亚人应该为这一令人惊异的世界级技术感到骄傲。”

——2017年3月31日，印度尼西亚海洋事协调部长Luhut B. Pandjaitan先生在雅加达宣布，BMKG（印度尼西亚气象、气候和地球物理局）海洋预报系统（OFS）投入使用，他还用上述语言评价了该系统。据悉，BMKG-OFS系统2016年开发，系统覆盖印度尼西亚周边海域，该系统是BMKG气象早期预警系统的一部分，后者包括了风、海浪、涌浪、洋流、海温、海水盐分、潮汐、海平面和沿海洪水等要素的7天预报。

《美国全球变化研究项目成果》 2017年2月

美国全球变化研究项目（USGCRP）基于美国《1990全球研究法》建立，向与该法相关的开展全球环境变化科学研究的13个联邦部门提供协调制定战略规划。美国科学院发表的这份项目成果报告，重点给出整个项目协调和综合评估产品两方面的主要成果。报告分4章，其中最后一章提出未来25年USGCRP在观测扩展协调、基于应用的研究方向、国际合作和多样化需求等方面的设想。



《全球空气状态2017》 2017年2月14日

全球人口的90%以上生活在不健康的空气中，2015年室外空气污染造成的死亡人数达到约420万。1990—2015年，因吸入大气细颗粒物导致的死亡增加了20%以上。上述统计是这份由全球疾病负担项目和位于美国波士顿的健康影响研究所共同发表的这份报告给出的。报告指出，颗粒物目前是第五健康风险，排在高血压、吸烟、高血糖和高胆固醇之后。

《新科学家》 2017年3月

地球重力成为本期封面主题。包括气象科学在内的地学和物理学等学科关注的地球重力科学，都来自牛顿和爱因斯坦：牛顿发现了万有引力，爱因斯坦解释了重力是由物体弯曲时空而致。科学家提出了暗物质概念后，从量子信息理论领域去审视星系时，带来了重新思考重力的科学问题。



《自然：气候变化》 2017年3月

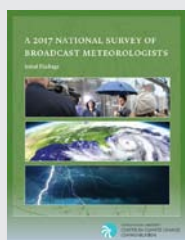
本期封面瞄准始于1999年的中国北极科考活动（the Chinese National Arctic Research Expedition, CHINARE），本期刊发的中美学者合作论文，阐述了北冰洋西部海水酸化增加。

媒体扫描

MEDIA SCAN

《天气》 2017年2月

这本由英国皇家气象学会编辑的月刊，本期推出“闪电探测开发”专辑。除了“推进闪电探测”的社论外，刊载了6篇专辑文章，从空间探测、边界层大气、全球闪电定位系统和相关会议评述等视角，展开对专辑主题取得进展和未来发展的报道。



《2017年广播气象学者国家调查》 2017年2月

这份由George Mason大学气候变化交流中心完成的调查报告表明，过去一年里气象播报人员传递气候变化对社区的局地影响看法的最主要渠道是：自身社交媒体账号（49%）、访问学校（41%）、社区活动（39%）、实况报告（36%）、网站（35%）和网站的社会媒体（32%）等。其中电视天气主持人通过实况转播宣传气候变化知识较过去几年增加了500%。

《大众科学》 2017年3月

这份科普期刊本期为“水专辑”，给出全球水资源状况的调查等信息。期刊以地图方式，给出了2017—2040年间水资源压力在全球变动的情况，提出美国西南部、秘鲁沿岸、德国、中东和印度西北部等5个更干燥区域。



《医学警报！气候变化在损害我们的健康》 2017年3月

美国11个有影响的医学社团，以发表这篇报告的方式，宣布结成“气候和健康医学社团联盟”。报告分气候变化在损害全美国人的健康、热浪、极端天气、空气污染、虱子和蚊子、污水、食品污染、精神健康、营养问题、医生的担忧和应对和预防采取的行动等方面，对主题进行了全面阐述。

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

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors-in-Chief

Wang Zhiqiang

Xiao Ziniu

Zhai Panmao

Luo Yunfeng

Li Weijing

Hu Yongyun

Tan Zhemin

Sun Jian

Fei Jianfang

Zhao Licheng

Zhang Peng

Guan Zhaoyong

He Jianxin

Huang Jianping

Liao Xiaohan

Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yuewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Jiang Jianmin

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,

Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

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

<http://weibo.com/2115232930/profile>

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief
Article

6 Zhuang Wenbing, Zhang Haibing, Zhao Hongyu, Wu Shixin, Wan Mingyang/ Review of the Research for Powerline Icing Prediction

13 Zhuang Wenbin, Zhang Han, Wang Jian, Tian Hao, Zhao Jianping, He Jun, Jin Ying/ Study of Wind Forecasts Based on Numerical Modeling and Downscale Diagnostics

20 Ma Lin, Deng Bangfei, Li Hongyun, Huang Wenjuan, Wan Mingyang/ Study of Sitting a Micro-Station Based on Correlation Analysis

24 Wang Jian, Tian Hao, Zhuang Wenbing, Zhang Han, Ren Hua, Zhang Ling, Jin Ying/ Distribution of Gale Dust in Xinjiang during the Past Three Years and Risk Analysis of Wind Disaster in Tuha Line

32 Li Chao, Tang Qianhong, Chen Yu, Liu Xin, Huang Yan, Li Zhimin/ An Overview of Progresses in LAPS and Prospective Applications in Real Time Data Service

39 Dai Zhixiu, Liu Yanxiang, Wang Zhi, Li Wanyu, Chen Zhongyu, Li Qiaoyuan/ Advances in Application of Early Warning of Risks to Precipitation Induced Transport Disasters on Freeway

46 Cui Xinqiang, Fu Jia, Dai Juan, Liu Jing, Zhou Xiaolan/ An Analysis and Countermeasure of Current Situation in the High-Speed Railway Disaster Prevention System

50 Zheng Jian, Shen Huayu, Xu Rong, Yu Fangfang, Yao Risheng/ On Developments of Meteorological Services for Tourism in Ningbo

54 Tang Yanjing, Peng Fang, Luo Xiping, Tao Yong/ Application and Prospects of Big Data in Guizhou's Professional Meteorological Service

Forum

60 Wang Songqiu/ Analysis of the Met Office's Public Weather

63 Ge Liting/ Study of Multi-Media Communication of Weather Audio Service

70 Zhao Rong/ The Situation Study of the Application of Meteorological Data Graph in Meteorological Programs

Survey

2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

73 Zhou Yu, Hu Xiaojing/ *Meteorological Knowledge Magazine's Effort to Prevent Disasters*

Reading

45 Jia Pengqun/ The weather master

Information

75 Selected Papers