

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

No.1

2014年2月
第4卷 第1期

城市气象



气象科技 **进展**
Advances in Met S&T

ISSN 2095-1973



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

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

常务编委 (按音序排名)

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

编委 (按音序排名)

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

海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

编辑部

张 萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 陈忠美
地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081
电话: (010) 68409927/68409933
邮箱: amst@cma.gov.cn
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA
网址: <http://library.cma.gov.cn/amst>
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>
印刷: 北京铭成印刷有限公司

国际标准刊号: ISSN 2095-1973
国内统一刊号: CN 10-1000/P
定价: 30元



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

目 次

第4卷 第1期 2014年2月

1 许小峰: 主编语

研究论文

专题 城市气象

- 6 苗世光, 王迎春: 基于用户需求的城市气象研究: 进展与展望
- 15 孙继松: 城市精细天气预报的理论与技术研究进展
- 22 吴蒙, 吴兑, 范绍佳, 等: 珠江三角洲城市群大气污染与边界层特征研究进展
- 29 沈小静, 孙俊英, 张养梅, 等: 北京上甸子典型天气个例的大气气溶胶数谱分布特征
- 36 李炬, 窦军霞: 北京城市气象观测试验进展

研究进展

- 46 张书余, 罗斌: 国际生物气象学研究的新动态
——第十九届国际生物气象学年会综述

专题 基层气象现代化

- 53 尹恒, 沈定成, 夏金, 等: 湖北一次飑线天气过程对流发展机制分析
- 58 杜钧, 康志明: 天气预报中不确定性问题的调查分析

主编语

城市化,是由以农业为主的传统乡村社会向以工业和服务业为主的现代城市社会逐渐转变的必然过程,除生产方式、产业结构、土地及地域空间等的变化外,财产、人口、信息、交通等的集中度会显著提升,城市环境也随之发生各种改变。因此,这是一个涉及经济、社会、人文和环境等的多领域变动。2011年,中国内地城市化率首次突破50%,伴随中国城市化进程的加快,城市气象及相关问题自然也受到专业人士和社会公众的广泛关注。

城市群的逐渐兴起,引发了显著的城市热岛现象和大气环境问题。以往在大气探测课程中让学生“只闻其名,不见其形”的“霾”,如今成为笼罩在城市上空的常客,威胁着人类健康;城市化带来的财富和人口集中、生活空间狭窄,增加了人类面对自然灾害时的脆弱性;极端天气及衍生灾害造成的风险,会伴随城市化被放大。如何提升精细、定量、无缝隙的城市气象和大气环境的预报预警能力,解决气象灾害带来的城市内涝、交通安全及人体健康等问题是气象界面临的挑战。

继2013年第6期首次推出“城市气象”专栏后,本期将继续以专栏的形式阐述这一问题。《基于用户需求的城市气象研究:进展与展望》(P6)一文回顾了城市气象观测和数值模拟研究方面的进展,并对未来基础研究及业务应用进行了展望。专栏的其他文章则分别从城市天气预报技术(P15)、珠三角

气象特征(P22),以及北京地区的观测试验(P29、P36)等方面内容进行论述。我们希望这些成果不仅有助于读者更加深刻认识城市气象的意义所在,也有助于我们强化服务的意识。

2006年国务院3号文件提出了全面推进国家气象现代化的目标,气象现代化实现与否,基础能力和水平是关键。本刊从本期开始,推出“基层气象现代化”栏目,一方面面向基层业务人员,鼓励他们写出更多掷地有声、涉及关键问题的“小主题”文章;另一方面,也面向关注基层预报业务问题的专家,在了解基层问题难点的基础上,用自己的智慧给予一线预报员实在的点拨。本期专栏刊载的来自湖北省十堰市气象局的预报员(P53)及关注一线预报业务的NOAA研究员的文章(P58),可以作为前述两个面向的范例。

新年伊始,本刊迎来了创刊后的第4个年头,我们从本期开始,对因工作调动的编委会成员进行了微调,欢迎成都信息工程学院的何建新老师加入。此外,为了让本刊内容更加贴近实际、贴近读者,提升可读性,本刊计划每年聘请约100位评刊员,听取他们对办刊方向、内容和相关细节的意见、建议,我们也期待更多的读者和作者,能以各种形式对杂志未来的发展表达自己的想法。

许小峰



专题/封面图:城市气象
封面照片:北京上甸子观测场

科学观察

2 读图 数字 榜单

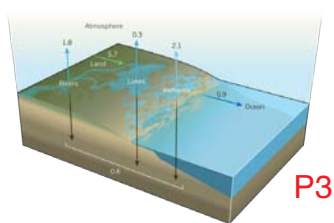
特写

68 吴灿,李婧华:“城市气象”主题文献计量指标分析

往事钩沉

人物

70 黄建平:大道至简,气象自成
——贺恩师丑纪范院士八十寿辰



阅读

会评

74 冀文彬,邹立尧,高婕,等:世界气象学习创建活动——第十届CALMet国际会议评述

信息

52 第十届长三角气象科技论坛在浙江安吉召开

76 编辑选编

80 《气象科技进展》2013年主要内容回顾

封3 媒体扫描

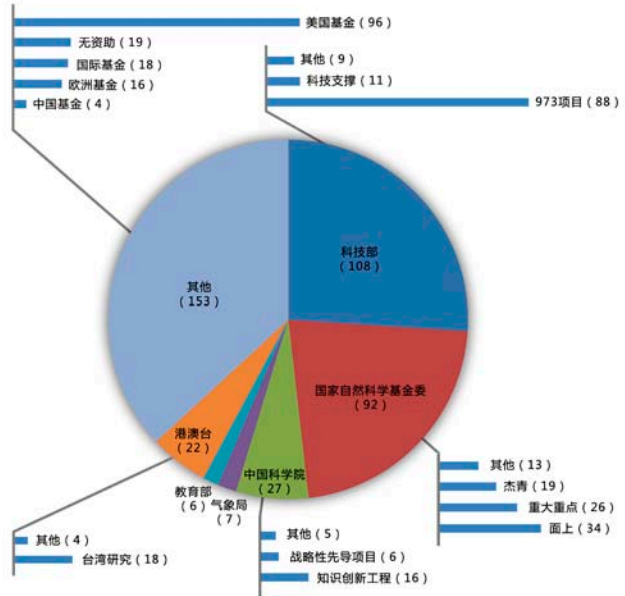
封3



IPCC AR5: 各类基金助力中国作者的研究

2013年9月, IPCC发表了第五次气候变化评估 (AR5) 周期中最重要的报告之一, 即第一工作组气候变化科学基础的报告草稿。分析报告引用的中国作者参与的415篇引文的第一资助信息, 得到不同类别基金支持的分布情况。其中, 科技部“973”项目和基金委的面上项目位列国内前两位, 而得到“美国基金”支持的引文达到96篇, 是最多的资助来源, 表明在气候变化科学研究方面中美科学家的合作最为活跃。

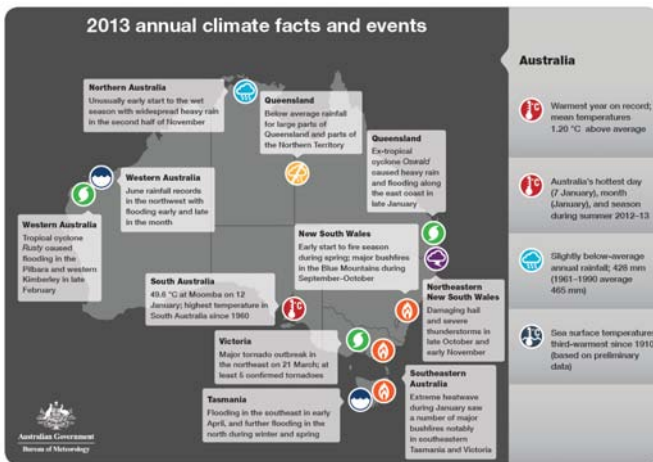
来源: 本刊



澳大利亚: 难捱的2013年

澳大利亚气象局 (Bureau of Meteorology) 最新发表的2013年年度气候报告显示, 2013年是该国1910年有气象记录以来最炎热的一年, 平均气温达到23°C, 比以前最热的2005年还要高出0.17°C, 较平均值更是高出1.2°C。澳学者认为, 这样程度的高温, 是一个巨大的反常现象。

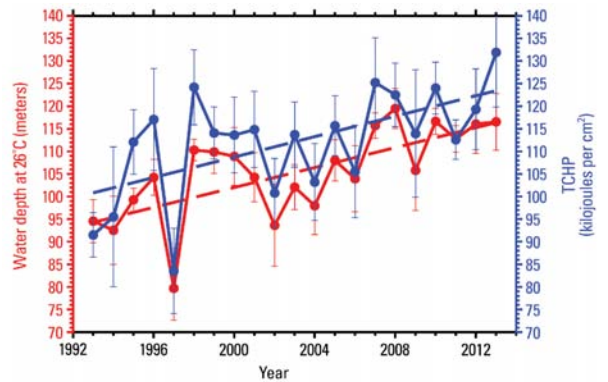
来源: Bureau of Meteorology



台风“海燕”: 海洋蓄力的喷发?

2013年台风“海燕”的威力和它造成的危害让人记忆深刻, 这个时速达到314km的风暴, 其能量无疑主要来自海洋。从最近20年“海燕”运动路径的纬度上, 温暖海洋层 (水温在26°C以上) 变厚 (红线) 以及驱动热带风暴的潜热 (蓝线) 增加的情况来看, 二者几乎同步抬升, 这一趋势或许能够让人们认识“海燕”有所启发。

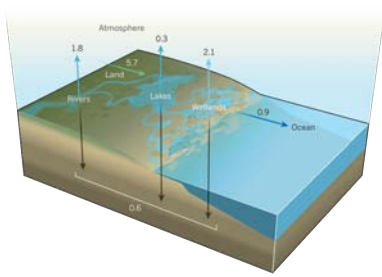
来源: Science



数字 **460万** 英国政府将投资460万英镑, 为期3年, 建立一个新的空间天气中心。该中心也作为美国NOAA的空间天气中心 (SWPC) 的合作和支持机构, 于2014年4月开始提供每天24小时的服务。

30% 美国内布拉斯大学最近的一项研究指出, 全球约有30%的粮食作物, 包括水稻和小麦等, 其产量潜力可能已经达到极限, 数据显示粮食产量趋于稳定, 甚至有急速下降的趋势。

12.4亿加元 一项耗资12.4亿加元的加拿大“碳捕获和储存”项目, 预计在2014年4月开始商业化运营, 该项目有望大大减少位于萨斯喀彻温省的边界大坝煤炭发电厂向大气层的碳排放量。



CO₂借助内陆水体转移的机制

几十年来科学家们逐渐清晰地意识到，内陆水体将大量的CO₂释放大气中，但是如何量化估计这部分温室气体的转移一直以来都是严峻的挑战。美、德和比利时等多国科学家最新研究，试图采用新数据和系统方法解开谜团。研究指出，溪流、江河、湖泊和水库的全球碳排放速度大约为每年1.8Pg（10¹⁵g或10⁹t）。此外，CO₂通量的大约70%发生在20%的陆地表面。图为内陆水体每年向大气排放（单位：Pg）的示意图，包括河流、湖泊和湿地向大气的排放（淡蓝色向上箭头）。图中还给出河流溶解并向海洋排放的碳（深蓝色箭头），以及存储在沉积物和湿地土壤中的有机碳（向下的箭头）。图中数字表明，陆地植被固定的碳的大部分侧向输出到地表水体中（绿色箭头），这会影响陆地区域碳收支。

来源：Nature

国际“城市气象”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations	Dubovik, O	Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59(3)	974
2	Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system	Byun, Daewon	Applied Mechanics Reviews, 2006, 59(1-6)	546
3	Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island	Arnfield, AJ	International Journal of Climatology, 2003, 23(1)	384
4	Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas	Pickett, STA	Annual Review of Ecology and Systematics, 2001, 32	362
5	Fully coupled online chemistry within the WRF model	Grell, GA	Atmospheric Environment, 2005, 39(37)	347
5	The relation between ozone, NO _x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments	Sillman, S	Atmospheric Environment, 1999, 33(12)	347
7	Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review	Peterson, TC	International Journal of Climatology, 1998, 18(13)	309
8	A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models	Masson, V	Boundary-Layer Meteorology, 2000, 94(3)	308
9	Urban aerosols harbor diverse and dynamic bacterial populations	Brodie, Eoin L	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(1)	231
9	NARSTO critical review of photochemical models and modeling	Russell, A	Atmospheric Environment, 2000, 34(12-14)	231

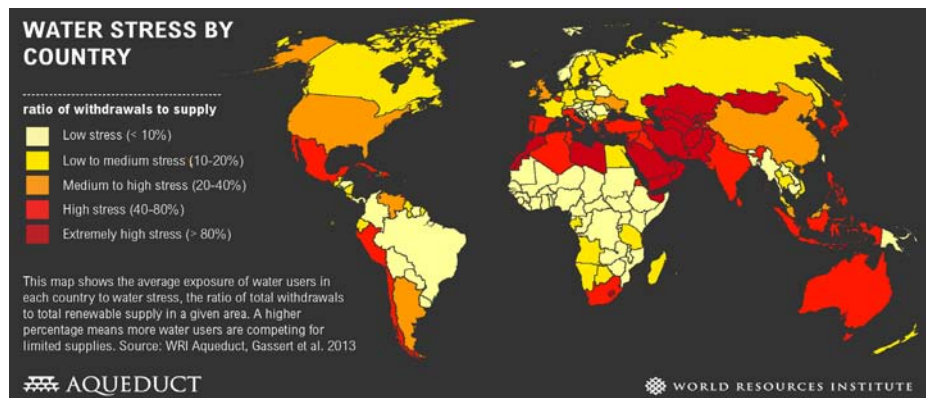
来源：SCI-E数据库，检索时间：2014年1月7日

吴灿 提供

水压力：持续的挑战

世界资源研究所（WRI）在最近发表的一篇研究中指出，世界上有37个国家属于水资源严重短缺的国家。这项研究按照全球总的水需求与总的水可再生供给比例，给出各国4级水压力的国家分布。

来源：WRI



2287人 阿富汗的坎布尔市，由于四面环山，城市废气难以消散，每年有2287人死于空气污染，这是亚洲开发银行在一份报告中给出的数据。

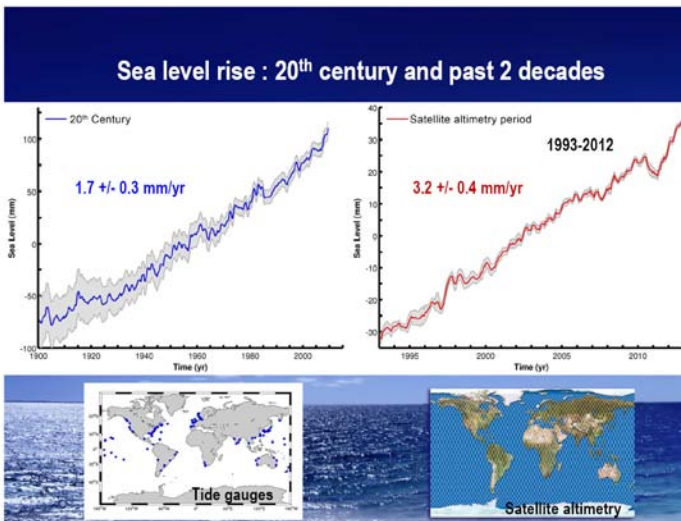
1.2m 从1899年开始，北极点每年会在西经70°方向向南偏移10cm，但是2005年起这一偏移转向东，迄今累计偏移达1.2m，科学家认为这一变化可能与格陵兰岛和北极冰盖融化相关。

1小时 2011年5月冰岛格力姆火山喷发前1小时，火山位置发生了移动并被安置在火山两侧的GPS监测到，这或许成为未来火山预报的新途径。

海平面上升：加速

1933年，世界上最早的海平面观测站之一，PSMSL站（the Permanent Service for Mean Sea Level）在英国建立。当该站迎来建站80年的时候，全球海平面科学家聚集在PSMSL站，在纪念的同时梳理20世纪，特别是最近20年来全球海平面上升的情况。无论是潮汐站记录还是高度卫星的监测结果，海平面上升的趋势都很明显，而且最近20年上升的速率几乎加快一倍。

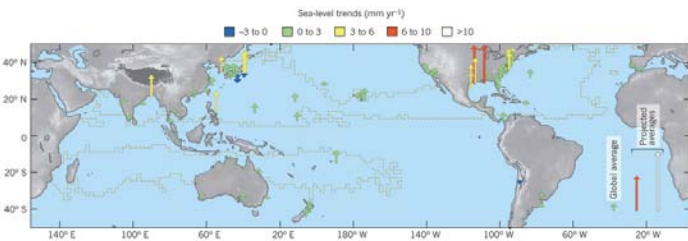
来源：<http://www.psmsl.org/>



最近50多年全球海平面上升趋势

基于全球观测时间超过50年的潮汐站记录，可以得到全球海平面上升的分布。图中绿色箭头区域表示海面上升超过全球平均。图右下方给出（左到右）全球1900年至今仪器观测均值、预测的从目前到2100年的平均值和2100年升高率。灰色虚线区域为热带气旋活动区。

来源：*Nature*



数字

15km

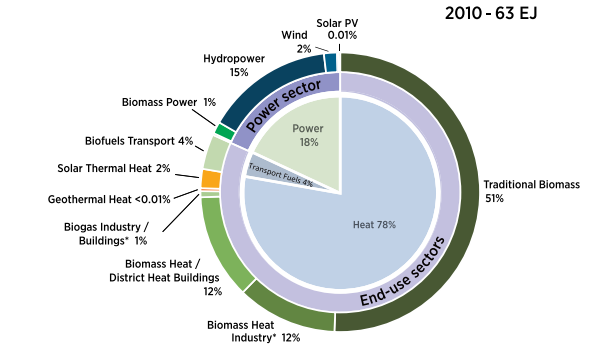
国内首个地震预警地方标准——《成都市地震预警系统监测台建设规范》于2013年12月出炉，该规范提出预警台站分布间距为15km、通信延迟小于1s等指标。

-94°C

地球上的最低温度最近被更新，NASA卫星在南极观测到-94°C的极端低温，打破了之前在1983年观测到的-89.2°C的低温纪录。

5000年前

美国科学家利用南极冰芯进行的详尽研究表明，早在5000年前，随着水稻种植的扩展加上自然驱动，全球变暖就拉开了序幕。



全球可再生能源到2030年的路线图

国际可再生能源局（IRENA）最新发表的《全球年，全球可再生能源的利用绝对值将增加110%，为了达到这一目标，世界的着眼点应该转向最终应用领域时间可再生资源的应用领域分布。

美国低温冰雪天气见证“冰震”

2014年1月7日，被冰雪和寒冷包围的美国出现了罕见的现象：冰震。人们在下午6点左右先是听见一声巨响，大地在摇动，随后又归于平静。然而，第二天在冰雪道路上，出现了一条8~10英寸深，超过100英尺长的冰裂缝。这是多雨雪天气里，地表雨雪渗入地下，不断冻结、膨胀，并最终发生爆裂的结果。

来源：<http://www.fdlreporter.com/>



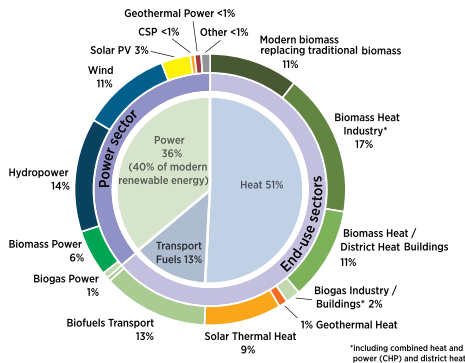
中国“城市气象”主题被引频次最高的前20篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	北京地区气温的年代际变化和热岛效应	林学椿	地球物理学报, 2005/01	182
2	人体舒适度研究现状及其开发应用前景	刘梅	气象科技, 2002/01	119
3	再论都市霾与雾的区别	吴兑	气象, 2006/04	107
4	近44年南京温度变化的特征及其可能原因的分析	唐国利	大气科学, 2006/01	96
5	北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探	王京丽	气象学报, 2006/02	82
6	北京地区严重大气污染的气象和化学因子	刘小红	气候与环境研究, 1999/03	79
7	河北省1960~2002年城市大气能见度的变化趋势	范引琪	大气科学, 2005/04	73
8	天津地区近40年日照时数变化特征及其影响因素	郭军	气象科技, 2006/04	72
9	北京“12·7”降雪过程的分析研究	赵思雄	气候与环境研究, 2002/01	71
10	北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究	孙继松	大气科学, 2007/02	70
11	珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究	吴兑	应用气象学报, 2008/01	69
12	气候显著变暖使广州极端气候事件增多	陈新光	广东气象, 2007/02	68
13	华南沿海近100年气温上升速率估算	陈特固	广东气象, 2006/03	67
13	绿洲和湖泊的冷岛效应	苏从先	科学通报, 1987/10	67
15	兰州城市气候变化及热岛效应分析	杨德保	兰州大学学报, 1994/04	63
16	近50年来兰州城市气候变化的R/S分析	赵晶	干旱区地理, 2002/01	62
16	重庆市区冬季热岛和湿岛效应的研究	李子华	地理学报, 1993/04	62
18	人对温度、湿度、风速的感觉与衣着指数的分析研究	徐大海	应用气象学报, 2000/04	60
19	北京城市下垫面边界层湍流统计特征	刘辉志	大气科学, 2002/02	56
20	昆明市热岛效应卫星监测研究	赵红旭	国土资源遥感, 1999/04	55

来源: CAJD数据库, 检索时间: 2014年1月7日

李婧华提供

REmap 2030 - 132 EJ



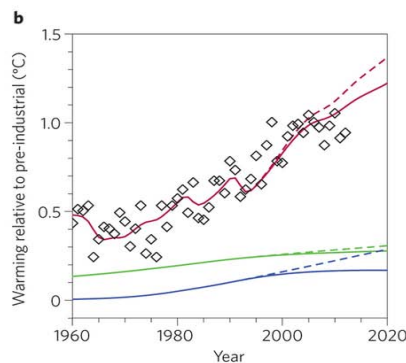
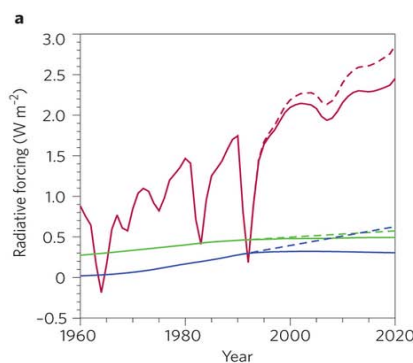
《可再生能源2030年路线图》指出, 到2030年, 可再生能源的63EJ增加到2030年的132EJ。为领域, 而非仅仅是发电。图中给出了上述两个

来源: IRENA

《条约》的力量: 0.1 °C

IPCC最新的气候变化评估报告更加肯定了人类活动对全球变暖带来的影响, 同时IPCC致力于影响决策的科学研究到底能改变什么, 回答也是不容置疑的。图中描述了《蒙特利尔条约》(简称《条约》)通过约束CFC(工业中大量生产和使用的氯氟烃, 是破坏臭氧层的主要物质)对全球变化趋势起到的明显减缓作用。不同要素影响着地球能量平衡, 其中包括大气甲烷(绿线)和CFC等其他排放受到《蒙特利尔条约》限制的气体浓度(蓝线)。所有要素共同决定了总的不断变化的辐射强迫(红线), 而《条约》的执行拉低了CFC浓度和辐射强迫(虚线为没有条约时的情景)(图a)的同时, 也改变了温度升高的进程(图b, 能量平衡模式模拟结果, 红线为温度变化, 其他同图a)即《条约》让温度几乎降低了0.1°C, 图中方块给出观测到的年均温度及其与模式温度的偏移。

来源: Nature Geoscience



339.63万公顷

第二次全国湿地资源调查结果显示, 近10年, 我国湿地面积同口径下减少了339.63万公顷, 超过两个北京市的面积, 其中自然湿地面积减少了337.62万公顷, 减少率为9.33%。

30%

日本名古屋大学的一项研究表明, 亚洲冰川的总面积比以前公认的要小30%, 只有8.5万km², 尽管冰川的总数多出5000个左右, 达到约9万个。

2.4亿欧元

拥有近2200位员工的德国气象局, 2013年发布了9万次预报和3万次天气警报, 超过1.4万份专业天气报告和约46.5万份航空预警报, 全年花费了纳税人2.4亿欧元。

基于用户需求的城市气象研究：进展与展望

苗世光¹ 王迎春²

(1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2 北京市气象局, 北京 100089)

摘要: 城市化是人类社会现代化发展过程中的必然趋势。城市化带来的土地利用/土地覆盖的变化、人为热排放、城市气溶胶和人为温室气体排放增加, 影响着天气、气候和环境; 另一方面, 天气、气候和环境亦影响城市的安全运行和居民的生产生活。简要回顾了城市气象观测和数值模拟研究两方面的主要进展, 分析了城市气象复杂多样的用户需求(例如防灾减灾、宜居城市建设等), 剖析了目前城市气象监测与预报能力的不足。在此基础上, 以不断提高气象科技为经济社会发展服务和人民安全福祉的服务能力作为未来城市气象发展的主线, 给出了城市气象未来发展方向的展望, 主要包括城市气象观测、城市气象基础数据集、城市陆面与边界层过程、城市精细预报、气候与气候变化、城市空气质量与污染扩散、人体健康七个领域的基础研究和应用研究发展趋势。最后, 分析了目前城市气象发展面临的新挑战, 倡导建立城市气象观测与数值模拟以及城市气象研究与用户需求之间的良性互动。

关键词: 城市气象, 用户需求, 进展, 展望

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.001

Advances and Prospects of Urban Meteorology Research: Meeting Users' Needs

Miao Shiguang¹, Wang Yingchun²

(1 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089 2 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089)

Abstract: Urbanization is an inevitable trend in the course of human civilization development. There are various ways for urbanization to impact on weather, climate, and the environment, including, land-use/land-cover change, anthropochory heat release, urban aerosols, anthropochory green-house gas emissions and so on. And vice versa, i.e., weather, climate, and the environment influence urban functions and residents' livelihood. In this paper, the advances in observation and numerical modeling of urban meteorology are briefly reviewed. Then the complexities of users' needs for the urban meteorology service are analyzed, outlining the shortages in observing and forecasting capacity. In order to meet end users' needs, the prospects of basic and the applied researches for urban meteorology are given. Finally, challenges in the way of urban meteorology researches are summarized. A closer coupling mechanism between observations and numerical modeling, and between the researches and end users' needs for the urban meteorology development is proposed.

Keywords: urban meteorology, users' needs, advances, prospect

1 引言

城市化是人类社会现代化发展过程中的必然趋势。从全球范围看, 一个国家城市化程度是其经济发达程度, 特别是工业化水平高低的一个重要标志, 发达国家的城市化程度已经普遍超过75%。截至2012年底, 我国城市化率已达到52.6%, 城镇人口突破七亿^[1]。我国城市面积的快速拓展, 特别是城市群发展之迅速, 在世界城市发展史上是罕见的, 其中尤以京

津冀、长江三角洲、珠江三角洲三大城市群的迅猛发展为代表。

城市化带来的土地利用/土地覆盖的变化、人为热排放、城市气溶胶和人为温室气体排放增加, 影响天气、气候和环境^[2-3]; 另一方面, 由于城市系统的脆弱性, 天气、气候和环境状况亦高度影响城市的安全运行和居民的生产生活^[4]。城市的可持续发展、防灾减灾、宜居城市建设和应对气候变化对城市气象服务的需求也越来越高, 城市化进程中出现的“超大城市”、“城市群”造成的天气、气候和大气环境效应研究, 是当前国际社会和科学界所共同关注的重大社会科学和自然科学的前沿课题之一^[5-7]。

本文将基于对城市气象用户需求的梳理, 剖析目

收稿日期: 2013年6月20日; 修回日期: 2013年9月10日
第一作者: 苗世光(1976—), Email: sgimiao@ium.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41175015); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906026)



图1 城市多尺度非均匀下垫面带来巨大挑战^[8]

前城市气象监测与预报能力的不足。简要回顾城市气象研究的主要进展，以不断提高气象科技为经济社会发展和人民安全福祉的服务能力作为未来城市气象发展的主线，给出城市气象未来发展方向展望。

2 城市气象研究进展概述

城市中不透水的下垫面、建筑物、绿地等的多尺度非均匀分布（图1），改变了城市地表及其下风

向区域的动力、热力、辐射和水文过程，导致了复杂的地气相互作用（图2）。与自然下垫面相比，城市地表增加了对太阳短波辐射的吸收，地表潜热通量减小，再加上人为热排放的影响，使得城市地区温度明显高于乡村，因此向上长波辐射增大，同时地表感热通量和热存储增大。城市建筑环境作为一个热源、粗糙元、较差的储水能力和污染源，是天气—气候系统

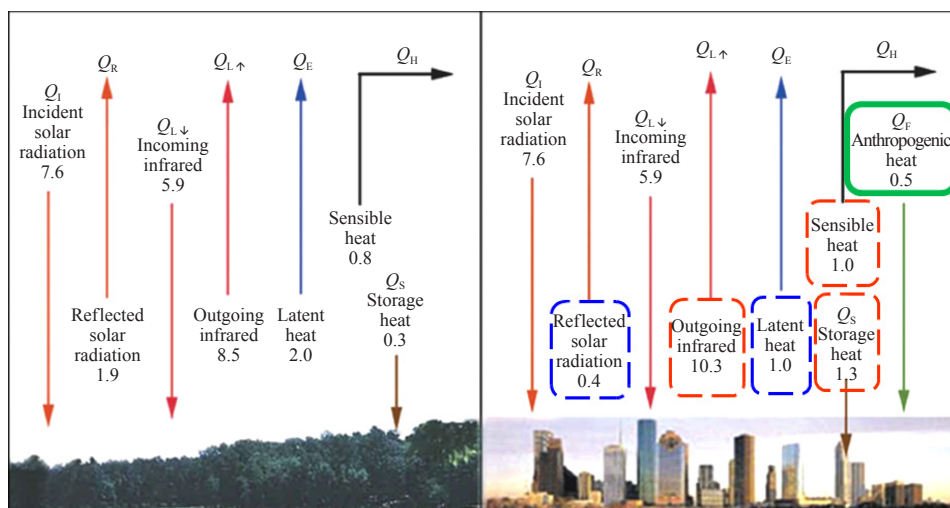


图2 城市地表能量平衡与乡村地区的差别^[9]

的一个重要强迫项^[3]。表1给出了城市化对天气-气候的主要影响途径。下面将简要回顾近年来城市气象研究取得的主要进展。

2.1 城市气象观测研究

2.1.1 城市气象观测试验和城市气象观测网

近年来,针对城市气象和城市环境问题,美国、欧洲等地相继组织了一些综合观测试验和研究计划。Grimmond^[10]和王迎春等^[6]分别回顾了城市气象观测研究的进展。这些观测试验涉及:城市地表参数的获取(反照率、粗糙度、湿参数)、地表能量平衡、城市边界层结构、城市热岛效应、城市环流与中尺度局地环流相互作用、城市对降水的影响、城市空气污染等内容。这些试验研究提升了城市作用对天气、气候影响机理以及对城市空气质量问题的认识水平。WMO 在全球开展了一系列城市气象和环境研究(GURME)项目,主要针对空气质量及其相关的气象观测,项目包括:北京大气环境污染控制机制研究项目、莫斯科超大城市可持续发展气象服务、用被动采样仪进行空气质量观测(美国NOAA)、拉丁美洲城市空气质量预报的改进以及上海城市气象和环境研究示范。

国内较全面的试验是2001—2003年在北京开展的大气边界层动力、热力、化学综合观测试验(BECAPEX),该试验获取了北京城市大气动力和大气化学三维结构特征^[11-12]。国家自然科学基金“九五”重大项目“长江三角洲地区低层大气物理化学过程及其与生态系统的相互作用”在长江三角洲地区开展了水、热与物质通量输送和转化的综合观测试验^[13]。另外,北京城市边界层观测试验(BUBLEX, 2004年)^[14],南京市城市边界层观测(2005、2006年)^[15],国家科技部“973”项目“我国东部大规模城市化的气候效应及对策”在我国东部长三角特大城市群区,针对地表物理特性、陆面过程、城市冠层和大气边界层、大气污染物及其辐射特性等,设计和开展多过程的协同强化观测试验,国家科技支撑计划“京津冀城市群高影响天气预报中的关键技术研究”

围绕京津冀城市(群)局地环流与其对城市高影响天气过程影响开展综合观测科学试验,重点对城市(群)山谷风环流、热岛环流和海陆风环流和边界层结构进行观测。这些试验均是在特定环境条件下开展的短期观测试验,主要针对城市边界层结构、城市空气质量、城市化的天气/气候效应等开展研究,同时亦用于数值模式的发展与检验,并取得不同程度的进展。

Wood等^[16]介绍了长期运行的研究级城市气象观测网——芬兰赫尔辛基城市边界层观测网的仪器配置、初步结果及其局限性。Muller等^[17]总结了近年来与城市气象研究相关的中尺度、城市尺度和小尺度观测网,从数据收集、管理、显示、使用等方面分析了现状和存在的问题,指出今后应关注观测网特征存档、观测方法和指南的标准化,并提出了一个城市气象网元数据协议^[18],包括网络及子网、观测站、观测仪器、网络运行四个方面的内容。

2.1.2 新探测技术及应用

近年来,新探测技术的发展及应用为城市边界层观测提供了新途径。风廓线雷达和声雷达可观测水平风、混合层高度、垂直速度的垂直廓线,多普勒激光雷达可实现边界层三维风场观测,差分吸收激光雷达可实现边界层水汽廓线观测,地基微波辐射计可观测水汽、温度和云水的垂直廓线。另外,光导纤维温度测量等新技术和无人驾驶飞机(UAV)、要素自动采集器(HOBO)等新仪器平台的发展为更高水平及垂直空间分辨率三维大气观测提供了可能^[6]。

李炬等^[19]在北京CBD地区约1.5km²范围内建立了由32个温湿度固定监测站(HOBO)组成的热环境观测网,分析了不同季节、不同天气条件下CBD地区局地热环境精细空间分布特征及变化规律,并开展了温湿度流动观测,研究了流动观测技术在城市热环境监测中的适应性和可靠性(图3)。

基于空基遥感资料,可反演城市土地利用、城市热岛、气溶胶、降水和水文气象参数^[20],为城市气象研究提供新的思路。

表1 城市化对天气-气候的主要影响途径(修改自文献[3])

	城市土地利用/土地覆盖	城市气溶胶	人为温室气体排放
近地面气温与城市热岛	土地利用变化及人为热排放改变地表能量平衡特征(SEB)	气溶胶直接效应	辐射增温及反馈
湍流场、扩散传输	SEB, 城市形态, 机械湍流	气溶胶直接和间接效应及相关热动力过程, 扩散传输	辐射增温及反馈
云和降水	SEB, 城市热岛引起的不稳定、环流及辐合区	气溶胶对云降水微物理的间接影响	辐射增温及反馈
地表水文	地表径流, 下渗和蒸腾的减少	气溶胶对云微物理和降水过程的间接影响	辐射增温及反馈
碳循环	耕地的减少	黑碳气溶胶	辐射增温及反馈, 二氧化碳通量
氮循环	燃烧、施肥、污水和径流	酸雨、硝酸盐	辐射增温及反馈, NO _x 排放

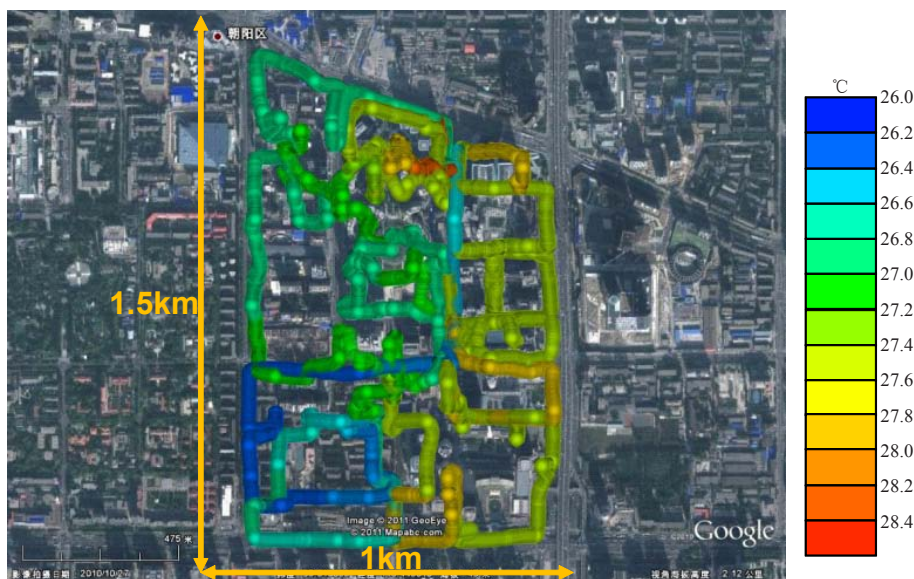


图3 北京市朝阳区CBD温度流动观测 (2011-08-22 21:05—22:22, 北京时)^[19]

2.2 城市气象数值模拟研究

2.2.1 城市陆面与边界层过程数值模拟研究

近年来, 水平非均匀下垫面条件下大气边界层的研究在国际上日益受到重视, 因为它直接关系到对实际地表湍流通量和尺度通量机理的认识、以及如何准确地估算实际地表地气之间物质和能量的交换及其参数化, 从而对陆面过程的研究以及区域和全球尺度模式的发展具有重要影响。由于非均匀地表动力、热力和水份分布的非均匀性, 使得其上的湍流运动比均匀下垫面情形要更加复杂, 无论观测试验还是数值模拟都很困难。尽管国际上已经开展了不少非均匀边界层观测试验、理论和数值模拟研究, 提出了一些新的概念和方法, 例如混合高度 (blending height) 概念, 依此可修正非均匀地面的通量估计中平流作用的影响^[21], 又如“马赛克”方法, 可用于改善次网格通量的估计。但是从目前来看, 就相对均匀边界层问题的研究而言, 非均匀边界层问题的研究比人们预想的还要复杂得多。无论是理论建模, 还是数值模拟和观测试验都遇到较大的困难。当前科学界对非均匀问题的研究和了解仍处于粗浅的阶段, 非均匀下垫面条件下关于大气边界层结构和湍流特性及与之密切相关的边界层物理和能量与物质输送交换特性及其变化规律的研究尚有待深入开展^[22-24]。

城市是最复杂的非均匀下垫面类型之一。目前对城市近地层结构和湍流特性, 形成了“城市冠层+粗糙子层+惯性子层+混合层”的结构认识^[25]。大量的观测研究表明, 城市冠层 (Urban Canopy Layer) 内

建筑物三维表面的能量平衡过程及由此诱发的对近地层大气的通量交换过程与平坦下垫面显著不同^[26], 如果能详细地描述出城市区域尺度数值模拟中城市冠层对上部大气的能量、动量和物质交换的影响, 大气数值模式的预报及诊断效果就能得到很好的改进。对于城市效应及人为活动影响大气运动的可分辨程度及处理方法不同, 小区尺度和微尺度的数值模拟中, 水平分辨率多为数米至十几米, 建筑物是尺度可分辨的。而在城市区域尺度的数值模拟中, 建筑物是尺度不可分辨的, 须采用次网格的参数化方案考虑建筑物对大气运动的影响, 才能合理地模拟城市边界层及气象环境、大气环境等的变化。随着城市规模的扩张, 城市下垫面建筑物覆盖率显著增加, 进行城市环境、城市边界层结构等的数值模拟研究工作必须合理地考虑城市建筑物三维结构对大气运动的影响。由于城市建筑物对空气的黏滞性和摩擦作用, 城市边界层内有其独特的风切变特征。强的风切变特征再加上地表显著的储热特征, 使城市边界层内的湍流得以充分发展成各种尺度的湍流涡旋。这种湍流交换或湍流混合构成了通过边界层向上或向下的质量、能量和热量的交换机制, 从而使一定范围的城市地表对自由大气具有明显的强迫作用。Roth^[25]的研究指出, 城市复杂非均匀下垫面影响边界层结构主要是通过以下两个方面, 其一为由于建筑物的存在对气流产生拖曳影响, 并使更多平均动能向湍流发展; 其二为建筑物对太阳短波辐射的阴影遮蔽影响, 对地气长波辐射的截限影响, 及由于建筑物地表使地气潜热交换减小。粗糙子层的湍流

特性具有不同于自然下垫面的特征，城市地气（动量和热量）交换过程由于下垫面的复杂结构而远没有被认识清楚。

传统的陆面模式对于城市效应的处理仅通过改变下垫面动力、热力特征参数来体现^[27]，而未能详细考虑特殊的城市下垫面几何特征对低层大气动力、热力结构和地表能量平衡的影响，导致城市陆面能量与水分平衡的模拟能力不足，成为影响城市气象数值模拟研究能力的关键因素。为了精细描述城市化的天气气候效应，2000年以来相继发展了多种复杂程度的城市冠层模式^[28-29]，主要包括：整体城市陆面模式^[27, 30]、单层城市冠层模式^[31-32]和多层城市冠层模式^[33-35]。Grimmond等组织的“国际城市地表能量平衡模式比较计划”研究表明^[36-37]：没有任何一个模式对城市地表能量平衡的所有分量都有好的模拟效果，模式中合理考虑蒸发过程至关重要。

2.2.2 数值模式的城市化

国内外已有许多学者将城市冠层模式引入到中尺度气象模式^[29]、气候模式^[38]以及大气扩散和空气质量模式^[39]中，开展了城市热岛、边界层结构、及其对降水、污染扩散影响等方面的研究工作。英国气象局^[40]和法国气象局^[31]已经或者正在其业务模式中测试城市冠层模式的性能。北京市气象局亦正在开展北京快速更新循环数值预报业务系统BJ-RUCv2.0耦合城市冠层

模式的效果测试，初步结果表明（图4）：耦合后可在一定程度上改善了近地层气象要素的预报效果，有效提高模式对城市边界层特征的模拟能力。

由于城市和非城市区域对气候变化的响应不同，并且城市范围不断扩大，因此，为了更好地研究城市化对全球气候的影响，需要在空间分辨率不断提高的全球气候模式（GCM）中加入对城市陆面过程的描述。目前国际上已经开展了相关研究，但还处于起步阶段。Oleson等^[41-42]在GCM中加入城市参数化方案，并指出简单的陆面模式无法反映城市地表能量平衡，进一步导致无法反映城市化的气候效应，因此建立了一个城市冠层模式，并对城市化的气候效应做了初步评估。Jin等^[43]亦指出，为了对城市天气和气候进行建模，必须在全球和区域气候模式中加入城市地表，并提出可以利用MODIS等卫星资料建立城市方案。McCarthy等^[44]在全球气候模式HadAM3中加入了MOSES（Met Office Surface Exchange Scheme）城市陆面方案^[40]，并对由CO₂引起全球变化影响和城市化影响的贡献比例进行了估计，研究表明：城市化引起的土地利用改变和人为热对气温升幅的贡献在某些地区与CO₂贡献相当，但该结论还有较大不确定性。

2.2.3 空气质量与应急模拟

目前的空气质量预报业务系统大多采用化学传输模式与气象模式离线耦合方式^[45-46]。即，用气象模

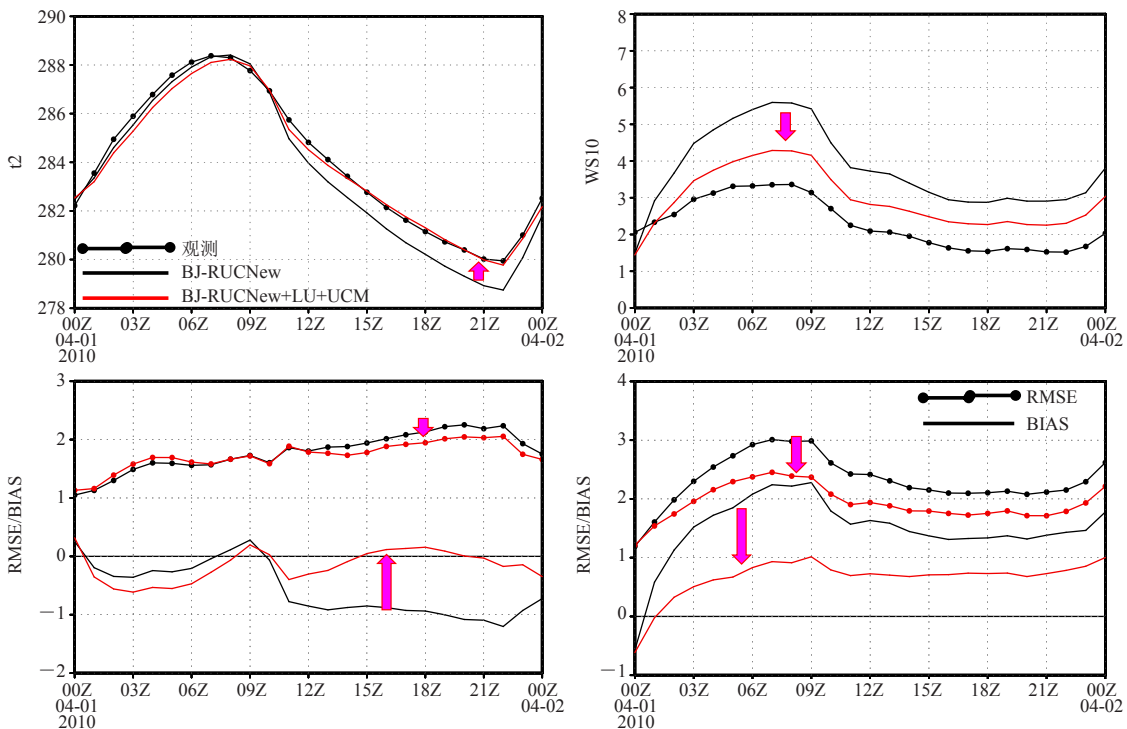


图4 BJ-RUCv2.0中采用新土地利用分类资料和城市冠层模式效果的对比测试
(基于2010年04月30天预报结果的统计分析)

式每30min或1h的输出场驱动化学传输模式，没有从化学传输模式到气象模式的反馈过程。这种化学与气象的单向耦合忽略了气溶胶对辐射收支、云微物理和降水等方面的反馈，亦不能体现气象场的连续时间变化。WRF/Chem模式^[47]为双向耦合研究提供了有效模拟手段。Herwehe等^[48]对单双向耦合的对比研究表明：气象模式在陆面、边界层、云物理等方面的变化均对空气质量预报有重要影响。

在城市突发安全事件中（有毒物质泄漏、火灾等），城市环境应急管理需求快速、可靠的气象场和有害物质影响范围信息。计算流体力学（CFD）模式因为计算耗时较多而限制了其在快速响应方面的应用。“超大城市群复杂下垫面边界层过程及精细气象预报关键技术研究”项目组研发了能够在较短时间内（~2min）模拟千米尺度、考虑建筑物动力影响的快速风场诊断模式和包含不同气体处理、可燃性和剂量模拟的高效城市应急扩散模式，基于精细数值预报系统和城市地理信息系统建立了城市环境气象应急响应系统^①。该系统已在北京市气候中心业务试运行。

2.2.4 耦合模拟系统

近年来，利用三维建筑数据库、机载激光雷达、数字高程、卫星等资料建立了高分辨城市形态数据集（例如美国的NUDAPT平台^[49]），并已应用到城市边界层及降水模拟中，取得了较好的效果^[50-53]。

Salamanca等^[51]将建筑物能量模式耦合到WRF模式中，研究了精细城市形态资料 and 不同复杂程度的城市冠层模式对近地层气象要素模拟效果的影响，以及空调系统对气温和制冷能源消耗的影响。Miao等^[52]基于WRF/Noah/SLUCM耦合模拟系统，采用高分辨率城市形态资料，通过对北京城区一次局地暴雨过程的数值模拟及敏感性试验，研究了北京城市化对雷暴生成、发展和移动的影响，以及对降水面积、位置和强度的影响。研究表明：城市冠层精细模拟对城市地区降水模拟的改进较为明显；与对照试验相比，无城市时，降水明显减少；城市使雷暴单体合并，城市化初期（20世纪80年代）使雷暴合并后减弱、降水减少，城市化后期（21世纪）使对流增强，进一步城市化易使降水出现分叉结构；城市热力影响比动力影响更重要；热力影响中，感热和潜热同等重要。

城市街区尺度气象模式^[54-55]或计算流体力学模式，通过与中尺度气象模式相耦合，可以更好地模拟建筑物可分辨尺度的气象环境场特征，为城市气象精

细模拟、气象服务、应急管理等方面提供了一个有效的解决途径^[56-57]。

3 城市气象用户需求分析——防灾减灾和宜居城市建设

城市化给人们生产生活带来便利的同时，也带来了巨大的环境压力和较大的灾害风险。城市面临着高温热浪、楼宇风、城市洪涝、空气污染、水污染、公共健康及社会安全（恐怖活动、污染泄露）等各方面的威胁，沿海城市还面临着海平面上升、风暴潮影响等诸多问题。城市人口、基础设施和生产要素密集，使得城市灾害承载力不断下降，脆弱性不断增加。极端天气事件（如“城市洪涝”）和环境灾害事件（如“城市雾霾”）频发，对城市运行的危机管理和风险管理不断提出挑战。城市管理者为降低城市脆弱性、提高城市应对风险的能力，不断提出新的城市气象服务需求。更好地认识、科学地适应和应对气象及环境问题已成为城市可持续发展面临的迫切任务。

表2列出了目前亟待解决的主要城市气象用户需求，可归纳为以下几个方面。

（1）按照用户需求定制的观测和模式系统：目前，非常缺乏针对城市气象用户需求而开展的观测和数值模拟工作，这将极大地限制城市气象的应用和效益的发挥。

（2）数据共享：很多城市气象用户有自己的观测系统，形成了独立的资料库。然而，各用户之间有共性的数据需求。如果管理部门把各用户的资料规范化、收集、共享，则可以最大限度地发挥各观测系统的作用，避免重复建设和资料使用的不规范。

（3）短期预报更长的预报时效、精度和可信度问题：精准的预报可以有效减少气象灾害造成的损失。因此，延长短期预报的时效、提高精度和可信度，对于减少“空报”带来的人财物损失和“漏报”带来的灾害损失至关重要。

（4）长期预报更好地预报极端事件和趋势：传统的长期预报中没有包含城市的影响。需发展可考虑城市影响的预报方法和降尺度技术，以满足用户的需求。

（5）环境干预措施影响评估：目前，亟需在不同尺度上开展城市绿地、垂直/空中花园、白色墙壁/屋顶、透水路面等环境干预措施影响的定量评估。然而，基于现有数值模拟方法尚不能给出明确的结论。

（6）城市气象模式与其他模式的耦合：发展陆

① “超大城市群复杂下垫面边界层过程及精细气象预报关键技术研究”项目组，基于精细数值预报系统的城市环境气象应急响应系统测试报告，2013年4月25日

表2 亟待解决的用户需求^[6]

用户	亟待解决的需求
城市积涝	降雨/融雪产生的地表径流量，城市透水地表储水能力，水汽输送通道
应急响应	街道尺度雨洪及其时间变化趋势信息，城市冠层及以上高时空分辨率风湿数据
交通管理	街渠风速，降水及相态、路面状况，地面观测代表性，高空间分辨率预报（如道路尺度），道路表面温度、能见度
电力	评价能源需求及电网负荷所需的气温，新能源评价所需风和辐射数据
健康	与健康应用尺度匹配的太阳辐射、风、湿度、气温，热岛空间分布，极端降水、极端高温/低温预报，街道尺度空气质量
节能	供暖节能所需局地尺度温度、湿度、风速、辐射精细预报
保险	精确及时的极端事件预报，风速及登陆后的衰减情况
商业	农业所需辐射、降水、空气质量，街渠风速
城市规划	植被作用，城市空气质量，绿色屋顶、植树等城市热岛减缓措施评价，城市和区域的气候变化减缓与适应战略
安全	高时空分辨率资料（城市边界层结构、混合层高度、雷达-雨量计定量降水估计等），城市地理信息资料

地—海洋—城市耦合模式满足海岸城市的用户需求，发展大气化学—气象耦合模式（包含污染物对气象场的影响）满足气象和大气化学双方用户的需求，等等。

4 基于用户需求的城市气象研究展望

随着科学技术的飞速发展，城市气象的发展正面临如下方面的新挑战。

(1) 城市气象观测新技术：如何利用PDA网络（包括智能手机）、机动车等新技术，实现全边界层的观测。

(2) 非常规的信息传播技术：通过网络（社交网站、视频网站等）、短信等多种方式，实现重要信息报告/资料获取。

(3) 动态城市：城市GIS资料的定期更新。

(4) “城市”信号与气候：缺乏长期的城市气候记录，城市影响与温室气体影响的区分，GCM的“城市化”，GCM结果的降尺度。

(5) 数值模式系统的“城市化”：天气/气候/空气质量模式的城市化、城市地区模拟结果的检验方法。

(6) 城市气象—决策支持综合体系构建：将城市气象科学研究与业务应用紧密结合，形成有机整体，主要包括以下各方面：

- ① 城市气象观测与数值模拟研究计划、观测与数值模拟的互动；
- ② 城市气象专家与用户之间的有效沟通/交流机制；
- ③ 城市气象试验基地（Testbed）；
- ④ 研究成果业务应用框架（及时将研究成果落地）。

面对上述挑战，城市气象服务一方面需要基础研究为其提供科技支撑，另一方面需要应用研究为其提供工程技术支持。在上述城市气象用户需求分析、研究进展评述和面临挑战剖析的基础上，给出了基于用户需求的城市气象研究展望（表3），包括基础研究和应用研究两个方面。

城市地表变化是城市化最显著的表现之一。城市

化使自然地表变为人工地表，通过下垫面与大气之间进行的动量和能量交换，改变了低层大气物理过程。城市生产生活的集中排放，改变了城市地区大气成分、增加大气浑浊度、消减太阳辐射、降低能见度，在加剧大气污染的同时为云、雾和降水的形成提供了丰富的凝结核。城市化从热力、动力和化学成分等多个方面影响了城市天气气候和环境。因此，研究城市气象和环境问题重点需要以下几个方面的科技支撑。

(1) 城市气象观测研究

城市边界层是最复杂的非均匀大气边界层之一，开展边界层观测是认识这一复杂大气边界层的有效途径。针对城市陆面与边界层过程多尺度非均匀性的特点，发展新探测技术与设备，研究城市气象观测方法，开展城市气象综合观测试验，建立观测网。

为了满足现代化城市运行管理的基本目标，气象要素要成为城市运行态势监控与危机应对实时信息采集系统之组成部分，必须在传统气象观测基础之上，通过城市气象观测系统工程建设，建立起以用户需求为导向、预警与预报相结合、定点与机动互补的城市气象观测体系。

(2) 城市气象基础数据集的建立

城市气象基础数据集建设是开展城市气象研究的重要基础性工作。开展基于遥感资料的城市气象基础数据反演方法研究，建立人为热排放清单（包括感热和潜热两部分）。同时，研究适用于业务系统的城市气象基础数据获取方法，实现数据的共享和有效管理。

(3) 城市陆面与边界层过程研究

城市陆面与边界层过程研究是开展城市气象研究与应用的基础。针对我国城市及其地理、气候特点，研究城市非均匀地表非线性相互作用机理，发展能够合理反映城市化影响的城市陆面模式和边界层参数化方案，并实现与天气、气候、空气质量及污染扩散模式的耦合。在精细模拟方面，发展建筑物能量模式，

表3 基于用户需求的都市气象研究展望

研究领域	基础研究	应用研究
城市气象观测	新探测技术与设备; 城市气象观测方法; 城市气象综合观测试验与观测网	针对城市气象服务需求(用户需求)的观测网设计**
城市气象基础数据集	土地利用/土地覆盖类型; 建筑形态学资料; 人为热排放清单; 城市发展模型	适用于业务系统的城市气象基础数据获取方法**
城市陆面与边界层过程	城市非均匀地表非线性相互作用机理; 城市陆面模式及陆面资料同化系统; 分布式城市水文模式; 城市边界层特征及参数化方案	交通气象预报系统; 城市沥涝模型*
城市精细预报	短时、临近预报系统的“城市化”; 城市热岛效应及成因; 城市化及城市过程对降水的影响机理; 小尺度数值模式与模拟	灾害性天气短时、临近预报系统; 城市安全运行气象影响预报技术*; 城市气象灾害监测预警、风险区划与管理*; 城市供暖(制冷)气象节能技术*; 风能、太阳能精细预报技术**
气候与气候变化	区域及全球气候模式的“城市化”; 城市化对气候及气候变化的影响机理	风能、太阳能资源评估*; 城市地区气候变化适应对策*; 气候适应及减缓措施效果评估*; 城市环境气候图、城市规划建设气候可行性论证技术方法与业务平台**
城市空气质量与污染扩散	空气质量及污染扩散模式的“城市化”; 城市气溶胶对辐射、云雾物理及降水过程的影响机理; 城市(持续性)雾霾天气成因	城市化对大气环境的影响评价及调控技术*; 城市应急管理支撑技术*
人体健康	城市气候特征对人体健康的影响机理; 城市空气污染对人体健康的影响机理	极端天气和大气污染人体健康预警系统**

注: *应用于减灾; **应用于宜居

研究城市能源消耗与气象条件的反馈过程。发展分布式城市水文模式,与城市陆面模式耦合,建立城市沥涝模型。

(4) 气象—化学耦合模拟

除城市下垫面改变和人为热排放影响外,城市污染(气溶胶等)对辐射及降水的影响亦非常重要。需发展气象模式与大气化学模式在线、双向耦合技术,研究城市气溶胶对辐射、云雾物理及降水过程的影响机理。

(5) 城市气象决策支持系统

城市管理者需要基于风险管理要求建立相应的决策支持系统,极端天气和大气污染对各行各业和人民生活的影响评估是其重要组成部分。开展城市气象灾害发生发展演变规律研究,加强城市气象灾害监测预警、风险区划与管理;开展城市交通、管网等基础设施和运行系统的脆弱性、暴露度和承灾能力的评估;开发城市安全运行(供电、供暖、供水、交通等)和大气环境、公共健康等领域气象影响预报技术;开发智能化的专业气象服务产品的制作和发布技术;开展城市气候变化影响评估和城市应对气候变化措施研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国2012年国民经济和社会发展统计公报. 北京: 国家统计局, 2013.
- [2] 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用. 中国科学D辑: 地球科学, 2005: 145-155.
- [3] Seto K C, Shepherd J M. Global urban land-use trends and climate impacts. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2009, 1(1): 89-95.
- [4] 谢璞, 李青春, 梁旭东. 大城市气象服务需求与关键技术. 气象科技进展, 2011, 1(1): 25-29, 34.
- [5] 中国气象学会城市气象学委员会. 城市气象科学技术发展的思考. 中国气象报, 2009-09-22.
- [6] 王迎春, 梁旭东, 苗世光, 等. 城市气象研究动向的思考. 气象, 2012, 38(10): 1232-1237.
- [7] Chen F, Bornstein R, Grimmond S, et al. Research priorities in observing and modeling urban weather and climate. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(11): 1725-1728.
- [8] Committee On Urban Meteorology Scoping the Problem D T N. Urban Meteorology: Forecasting, Monitoring, and Meeting Users' Needs. Washington DC: The National Academies Press, 2012: 176.
- [9] Shepherd J M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. Earth Interactions, 2005, 9(12): 1-27.
- [10] Grimmond C S B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. Theoretical and Applied Climatology, 2006, 84(1-3): 3-22.
- [11] 徐祥德, 周秀骥, 丁国安, 等. 城市环境综合观测与大气环境动力学研究. 北京: 气象出版社, 2010.
- [12] 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 等. BECAPEX科学试验城市群落边界层大气环境特征及其影响. 气象学报, 2004, 62(5): 663-671.
- [13] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究. 北京: 气象出版社, 2004.
- [14] 李炬, 舒文军. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析. 地球物理学报, 2008(2): 360-368.
- [15] 刘红年, 蒋维楣, 孙鉴泞, 等. 南京城市边界层微气象特征观测与分析. 南京大学学报(自然科学版), 2008(1): 99-106.
- [16] Wood C R, Järvi L, Kouznetsov R D, et al. An overview on the Urban Boundary-layer Atmosphere Network in Helsinki. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(11): 1675-1690.
- [17] Muller C L, Chapman L, Grimmond C S B, et al. Sensors and the city: A review of urban meteorological networks. International Journal of Climatology, 2013, 33(7): 1585-1600.
- [18] Muller C L, Chapman L, Grimmond C S B, et al. Towards a standardised metadata protocol for urban meteorological networks. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(8): 1161-1185, doi: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00096.1.
- [19] 李炬, 张子曰, 李艳, 等. 北京中央商务区热环境流动观测试验.

- 城市气象论坛(2012年):城市与气候变化,深圳,2012年11月24日.北京:中国气象学会城市气象学委员会、北京气象学会,2012.
- [20] Hand L M, Shepherd J M. An investigation of warm-season spatial rainfall variability in Oklahoma city: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(2): 251-269.
- [21] Arola A. Parameterization of turbulent and mesoscale fluxes for heterogeneous surfaces. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(4): 584-598.
- [22] 胡非,洪钟祥,雷孝恩.大气边界层和大气环境研究进展. *大气科学*, 2003(4): 712-728.
- [23] 刘红年,刘罡,蒋维楣,等.关于非均匀下垫面大气边界层研究的讨论. *高原气象*, 2004(3): 412-416.
- [24] 刘罡,蒋维楣,罗云峰.非均匀下垫面边界层研究现状与展望. *地球科学进展*, 2005(2): 223-230.
- [25] Roth M. Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126(564): 941-990.
- [26] 苗世光,窦军霞,Chen F,等.北京城市地表能量平衡特征观测分析. *中国科学D辑:地球科学*. 2012, 42(9): 1394-1402.
- [27] Liu Y, Chen F, Warner T, et al. Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma city area during the Joint Urban 2003 field project. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 45(7): 912-929.
- [28] 王咏薇,蒋维楣,刘红年.大气数值模式中城市效应参数化方案研究进展. *地球科学进展*, 2008(4): 371-381.
- [29] Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 273-288.
- [30] 孟春雷,戴永久.城市陆面模式设计及检验. *大气科学*, 2013, 37(6): 1297-1308.
- [31] Masson V. A Physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 94(3): 357-397.
- [32] Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 101(3): 329-358.
- [33] Martilli A, Clappier A, Rotach M W. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 104(2): 261-304.
- [34] Salamanca F, Martilli A. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-Part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3-4): 345-356.
- [35] Salamanca F, Krpo A, Martilli A, et al. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-Part I. Formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3-4): 331-344.
- [36] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. The international urban energy balance models comparison project: First results from phase I. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(6): 1268-1292.
- [37] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 244-272.
- [38] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(12): 1848-1865.
- [39] Baklanov A, Grimmond S, Mahura A, et al. *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas*. Berlin: Springer, 2009: 183.
- [40] Best M J, Grimmond C S B, Villani M. Evaluation of the urban tile in MOSES using surface energy balance observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118(3): 503-525.
- [41] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(4): 1038-1060.
- [42] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model. Part II: Sensitivity to input parameters and the simulated urban heat island in offline simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(4): 1061-1076.
- [43] Jin M, Shepherd J M. Inclusion of urban landscape in a climate model: How can satellite data help? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(5): 681-689.
- [44] Mccarthy M P, Best M J, Betts R A. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(9): L9705.
- [45] 王自发,谢付莹,王喜全,等.嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用. *大气科学*, 2006, 30(5): 778-790.
- [46] Fenger J. Air pollution in the last 50 years: From local to global. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 13-22.
- [47] Grell G, Peckham S, Schmitz R, et al. Fully coupled 'online' chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(37): 6957-6975.
- [48] Herwehe J A, Otte T L, Mathur R, et al. Diagnostic analysis of ozone concentrations simulated by two regional-scale air quality models. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(33): 5957-5969.
- [49] Ching J, Brown M, Mcpherson T, et al. National urban database and access portal tool. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(8): 1157-1168.
- [50] Miao S, Chen F, Lemone M A, et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(3): 484-501.
- [51] Salamanca F, Martilli A, Tewari M, et al. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(5): 1107-1128.
- [52] Miao S, Chen F, Li Q, et al. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(4): 806-825.
- [53] Miao S, Chen F. Formation of horizontal convective rolls in urban areas. *Atmospheric Research*, 2008, 89(3): 298-304.
- [54] 苗世光,蒋维楣,王晓云,等.城市小区气象与污染扩散数值模式建立的研究. *环境科学学报*, 2002(4): 478-483.
- [55] Miao S, Jiang W, Wang X, et al. Impact assessment of urban meteorology and the atmospheric environment using urban sub-domain planning. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118(1): 133-150.
- [56] Liu Y S, Miao S G, Zhang C L, et al. Study on micro-atmospheric environment by coupling large eddy simulation with mesoscale model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 107-108: 106-117.
- [57] Wyszogrodzki A A, Miao S, Chen F. Evaluation of the coupling between mesoscale-WRF and LES - EULAG models for simulating fine-scale urban dispersion. *Atmospheric Research*, 2012, 118: 324-345.

城市精细天气预报的理论与技术研究进展

孙继松

(北京市气象台, 北京 100089)

摘要: 对最近二十多年, 城市中尺度天气学和精细预报技术研究进展进行了回顾, 包括以下几个方面: (1) 城市环流对中尺度降水系统的影响研究; (2) 城市环流与地形相互作用的物理过程及其对中尺度系统的影响过程研究; (3) 城市环流与海(湖)风环流的相互作用对中尺度天气系统的影响过程研究; (4) 城市或城市群对大雾形成与分布的影响研究。最后, 对未来城市精细天气预报技术的发展方向进行了展望, 认为针对特大城市典型的中尺度天气系统开展精细化观测研究, 并将研究成果应用于中尺度模式物理过程的改进之中, 进一步完善城市冠层模式, 可能是提高城市精细化预报能力的主要有效手段。

关键词: 城市, 中尺度天气学, 精细天气预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.002

The Essential Theory and Technology on Accurate Urban Weather Forecast

Sun Jisong

(Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089)

Abstract: This paper reviews the advances in urban meso-scale synoptic meteorology and accurate urban weather forecast technology in the last two decades. It embodies following aspects: (1) The researches on influence of urban circulation on meso-scale precipitation system; (2) The advances in physical process of interaction between urban circulation and topography, and influence of the interaction on meso-scale synoptic system; (3) The progress in the interaction between urban circulation and sea-land breeze, and its effect on meso-scale synoptic system; (4) The investigation on distribution and development of a big fog caused by urban or urban-group effect. Finally, the paper indicates the direction on accurate urban weather forecast technology, and figures that it is possibly an effectual technique to enhance the capability of accurate urban weather forecast so as to carry out an accurate observation research on typical metropolis. By using the above achievements, we may promote the physical process of meso-scale numerical mode and improve urban canopy mode (UCM).

Keywords: urban, meso-scale synoptic meteorology, accurate forecast

1 引言

根据联合国人口司发布的《世界城市化展望》(2006年修正版), 预计世界城市人口在2030年达到49亿, 即60%的全球人口将居住在城市地区。城市特别是特大型城市一般是所在区域的政治、经济、文化和消费中心, 同时也是交通运输、工业生产的主要基地和商品流通集散地。因此, 城市单位面积上的经济当量、人口密度是其他区域无法比拟的, 相同程度的气象灾害发生在城市时, 所造成的生命财产损失、社会关注度往往是巨大的。从另一角度来看, 由于城

市下垫面的绝大部分被非透水性物理介质(如水泥、沥青等)所覆盖, 高度起伏的大面积建筑物、坡度不一的立体路面交通网以及人为地表坡度, 为地表径流的快速汇流提供了条件, 当强降水发生时, 低洼路段不仅成为城市交通网的“栓塞”, 造成大面积交通瘫痪, 而且已经直接威胁到居住或途径低洼地区市民的生命安全。近几年来, 无论是沿海的上海、天津, 还是内陆的北京、武汉、西安、济南、重庆、郑州、乌鲁木齐等绝大多数大型城市中心区, 几乎都发生过不同程度的局部内涝, 造成交通严重受阻、甚至巨大的人员伤亡。另外, 城市高耸的建筑进一步加大了雷电灾害对生命的威胁, 高大建筑之间的狭管效应也直接加重了风灾的危害, 极易造成高空物件坠落, 临时建筑、广告牌、绿化树木等倒塌造成人员伤亡事件也屡见不鲜。另一方面, 城市对电、水、燃气等资源的过度集中使用, 当突然遭遇高温热浪、寒流等气象灾害

收稿日期: 2013年6月3日; 修回日期: 2013年9月9日

作者: 孙继松(1965—), Email: sunjs_0314@sina.com

资助信息: 北京市科技计划项目“极端天气事件对城市安全运行的影响评估系统研究”; 中国气象局“全国强对流预报创新团队”项目

袭击时，往往造成这些管网不堪重负而发生崩溃。最近几年，先后发生在欧洲大陆、美国等地的高温热浪引发的城市大面积停电事故，不仅造成了城市生活的无序状态，而且造成了大量的城市人口死亡。从这一角度讲，看似坚固的城市，在气象灾害面前显得更加脆弱。从服务需求来看，具有重大国际影响的政治、经济、体育、文化等大型活动一般都在中心城市举行，常规天气预报服务的技术方法和科学支撑能力几乎无法满足这些活动对气象保障的精细化要求，正是由于城市气象服务的特殊需求，催生了城市中尺度天气动力学的兴起和发展。

从城市气象学的发展进程来看，气象学家们首先注意到的是城市或城市群的崛起对局地气候的影响，提出了城市气候的概念，并开展了一系列的气候学研究，特别是在城市能量平衡（urban energy balance）、城市热岛效应（Urban Heat Island Effect）、城市大气边界层结构（structure of urban boundary-layer）^[1-10]等方面取得了大量的研究成果。一直到现在，城市气候学研究依然是气候学中最活跃的分支之一。随着全球气候变化研究不断深入，气象学家们逐渐意识到世界城市化进程对全球气候变化的可能影响，特别是最近几十年全球气候变暖并非像以前认为的整个对流层都在迅速升温，而可能只出现在近地面非常薄的一层大气中^[11]。一些气象学家认为，气候变暖在很大程度上可能受到了城市热岛效应的影响，而且在很多情况下，对一些大城市热岛效应的估计可能偏低^[12]；如果城市一直处于一种平稳发展的过程，评估热岛效应的影响可能容易一些，但是一些新兴的工业化国家（如中国、印度等）的迅速崛起，城市的快速扩张和区域城市群的出现，使得城市热岛效应对区域气温的影响评估变得非常困难，造成了全球气候变暖研究中的最大不确定性因素^[13]，而城市气候的形成，实质上是城市中小尺度大气环流的一种长时间平均态。最近几年来，大城市天气灾害所造成的损失和社会反响日益突显，例如，2001年12月7日发生在北京地区一次小雪天气而衍生的“城市雪灾”；2004年7月10日北京城区的短时暴雨造成的交通受阻，同年发生在上海的局地强风暴过程；2007年发生在济南、乌鲁木齐、重庆、郑州等地的特大暴雨等中尺度灾害天气造成了巨大人员伤亡；最近几年，西安、广州、深圳、香港、太原、天津、武汉等几乎所有的大城市都曾先后出现过局地强对流暴雨灾害，造成了巨大的经济损失，造成了极大的社会影响。

从本质上讲，城市中尺度天气动力学的核心问题是通过城市边界层与自由大气之间相互作用而造

成发生在城市及其周边地区特有的中小尺度天气现象及其物理机制进行系统性研究，进而形成精细预报技术。随着中尺度天气动力学的发展和数值天气预报技术的进步，针对城市特定环境下的中尺度天气系统的发生、发展和演变机理等方面的研究受到了广泛关注，在一定程度上提高了城市天气预报服务的精细化程度。但是，应该看到，横亘在气象工作者面临的诸多科学问题和预报技术难题仍然艰巨。本文旨在对近几年来有关城市中尺度天气动力学研究，特别是城市中尺度气象灾害动力学、预报技术方面的研究进展进行梳理，并就未来城市天气动力学的发展方向和城市天气预报技术需要解决的科学技术问题进行简单的探讨。

2 城市中尺度天气系统的特殊性

针对城市的中尺度天气系统及其预报技术的研究虽然只是中尺度天气动力学研究中的一个分支，但是相较广义上的中尺度天气动力学或中尺度天气学而言，又具有明显的特殊性。这种特殊性主要体现在四个方面。

(1) 特定的城市尺度。城市，即便是特大型中心城市，其水平空间尺度一般都不大于 α 中尺度，市区面积更小。例如，北京的辖区面积约为1.68km²，中心城区面积只有约为60km×60km（以六环路为界）。但是在夏季，在很多城市经常可以观测到一个或多个水平尺度比城区面积小得多的强对流系统，在城区或郊区造成严重的雷暴、暴雨灾害；在冬季，许多降雪天气过程也只出现在局部地区。因此，就城市灾害天气研究和预报而言，关注的主要对象是天气尺度或 α 中尺度背景下的 β 、 γ 中尺度系统的演变及其相互作用过程。

(2) 特定的地理环境。大多数城市要么依山而建，要么面水而立（例如大型湖泊、江河、海洋等）。地形对各种尺度天气系统的影响程度、影响方式，一直以来是气象学界的前沿课题之一，地形环流（山谷风环流）与城市环流（热岛环流）的相互作用过程对中尺度天气系统发生发展的影响进一步增加气象学家对城市中尺度天气系统形成机理的认识难度；海陆风、湖陆风的变化与城市大气的相互作用过程也是造成城市中尺度天气系统演变的重要原因。

(3) 特定的人为环境。城市是受人类活动影响最剧烈的区域，城市大气要素的变化幅度和速率都是其他区域无法比拟的。城市气候学更多地关注这些要素的长期影响，而城市中尺度天气动力学在于如何科学地描述它们的短期甚至短时变化：不同天气背景

下,起伏巨大的建筑造成了边界层流场的不同变化;下垫面物理属性的变化和人为热源形成了城市热岛,城市热岛的季节变化、剧烈的日变化及其强度、中心位置的非定常性改变了边界层内热力层结的垂直变化和水平分布,必然强迫流场、气压场、湿度场等发生相应的调整,这种调整过程本身就可能诱发中尺度天气系统的发生;气溶胶浓度存在的剧烈短期变化直接造成了城市上空凝结核数量的激烈变化,也可能是降水非均匀性变化的原因等。很显然,这些环境要素的短期变化与分布差异将直接影响中尺度天气系统的演变进程与高影响天气的落区变化。

(4)城市环流对上下游天气的影响。城市中尺度天气动力学需要解释天气系统在城市环流的影响下,天气系统内部发生的一系列调整过程。而城市环流的强迫作用造成城市上下游发生的特有的中小尺度天气系统生消过程则是城市天气精细预报不得不面对的另一个课题。已经有研究^[14]表明,以特大型城市为中心的都市群的崛起,不仅改变了城市的局地环流,而且很可能已经或者正在影响更大尺度范围内天气系统的演变。

针对城市中尺度天气系统的上述特殊性的认识,不仅是建立和完善城市天气精细化预报技术的科学基础,而且是推动中尺度天气动力学进步的关键环节。如果我们能够将不同天气背景、不同地理特征和不同人为环境下的 β 中尺度、 γ 中尺度系统的演变机制进行科学、完整的数学物理描述,那么,阻碍中尺度数值模式发展进步的主要物理过程问题将迎刃而解。

3 城市中尺度降水系统研究

气象学家首先把城市或城市群作为一个整体,研究它对天气系统的影响。最先受到气象学家关注的是:降水、雷暴活动在城市下风方向有明显增多、增强现象。1971年,Changnon等人^[15]的统计研究就表明:城区及其下风方的年降水量比周围农村地区高出10%~17%,其中雷暴的增加可达到21%。蒙伟光等^[16]最近进行的数值模拟表明,发生在珠江三角洲地区的雷暴发展和演变过程与这一地区的城市化发展有密切关系:与城市影响有关的低层辐合主要位于500m以下的近地面层,形成于上风方的雷暴在城市下风方明显增强。黎伟标等^[17]利用TRMM卫星资料的研究结果也表明,发生在珠三角都市群的降水与比邻海区的降水存在明显的不同,前者以对流性降水为主,后者以稳定性降水为主。

关于城市及其下风方降水增加的原因,可能和环境气流与城市热岛效应、城市大气污染相互作用,以及高层建筑导致机械湍流增强有关。孙继松等^[18]就城

市化过程对北京地区冬夏季中尺度降水分布的影响进行了研究,结果表明,在北京城区南北两侧,冬季和夏季的降水日数、降水量的相对变化趋势明显不同:相对区域平均而言,在城区及南部近郊区,冬季降水日数和降水量都在明显增加;夏季,城区北侧的降水日数呈加速增长趋势,尽管南部平原郊区的相对降水日数变化不大,但降水量在相对减少,并指出,这种现象可能是城市热岛与盛行风流场相互作用的结果。Rosenfeld^[19]则认为,城市及下游方向降雨、降雪量的增加不仅与城市化进程有关,而且与城市空气污染程度和扩散方向有关。

随着城市极端天气事件的频繁发生,发生在城市中心区的中尺度灾害天气系统的形成机理和演变过程受到了越来越多的关注。城市地表加热的非均匀性是城市中尺度系统发生、发展的根本原因之一。Thielen等^[20]的数值研究表明,城市地表的感热通量、特别是降水发生之前4小时内的感热通量变化对 γ 中尺度的对流降水有重要影响;孙继松等^[21]的研究结果认为:在夏季,城市热岛可能直接对一些雷暴起到强迫和组织作用,晴空背景下,中午前后,开始出现郊区气流向中心城区辐合的现象,这种热力强迫有利于形成城市中尺度的低空风场辐合线,它的存在不仅可能触发局地对流单体,而且对多单体起到了组织作用,同时城区与郊区的这种热力差异,还可能造成边界层内中心城区风场垂直切变加强,即市区边界层顶气流加速;而在郊区,表现为边界层下部的风速加大,这种强迫有利于降水中心区强烈的上升运动维持,保证了低空水汽在较大范围内向对流体中流入,维持对流降水的持续(图1)。在冬季,同样存在城市热岛对流场的强迫作用:桑建国等^[22]发现,由于热岛效应的存在,容易形成一个以市区为中心的低压系统以及指向市中心的气压梯度力,造成气流在边界层内辐合,抬升的热羽在边界层上部辐散流出。实质上,由于城市热岛环流存在斜压性特征,在平坦地形条件下,由于城市

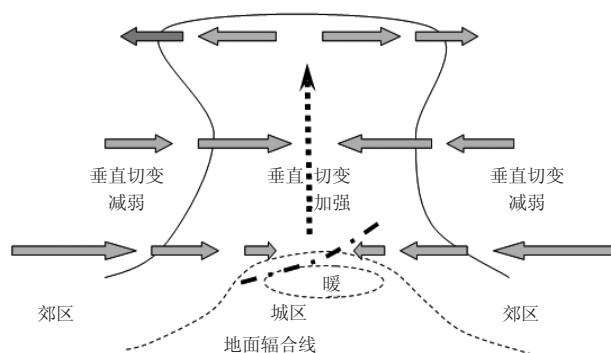


图1 城市热岛效应诱发对流性降水的动力学结构示意图^[21]

热岛的中心位于城区以及偏下风方向，造成城市中心上游地区，低层气流辐散、上层辐合，而市中心下游低层气流辐合、上层辐散，组成一个穿过城区的低空闭合环流。

4 城市环流与山地环流、水陆环流相互作用及其对中尺度天气系统的影响

大多数大城市都依山傍水，或背靠山区，或面向大面积水体（海洋、湖泊、江河），使得城市大气环流与自然环境形成的局地环流系统之间形成了复杂的相互作用关系，这种相互作用对城市及其周边地区的中尺度天气过程产生了明显影响。

4.1 城市环流与山地环流之间的相互作用

研究表明，在不同天气尺度背景下，城市环流与山地环流之间的相互作用过程对中尺度天气系统的影响呈现出多样性特征。齐琳琳等^[23]研究了上海周边地形、城市暖干性效应及城市阻滞作用对2001年8月一次特大暴雨的影响程度，结果表明：地形影响了暴雨系统的移动、停滞、发展和加强，城市化地表特征造成暴雨系统内部中尺度动力、热力结构特征出现明显变化。孙继松^[24]研究证实，在不考虑平流垂直分布差异的背景下，如果没有降水发生，局地边界层内的垂直风切变的强弱主要是由边界层水平温度梯度方向、强弱变化决定的。在晴空背景下，郊区的加热率和冷却率大于城市，如果郊区为山区，郊区与城区之间的加热率/冷却率差异更大，昼夜间城区与郊区之间容易形成更强的水平温度梯度，其方向在白天由山坡指向城区、午夜则由城区指向山坡。当夜间的这种温度梯度足够强时，中尺度边界层急流就会出现，白天则相反。因此，夜间更有利于边界层急流的形成，白天边界层急流趋于消失。中尺度边界层急流的出现不仅为边界层与对流层之间的热量、动量和水汽交换起到了重要作用，而且为某些对流活动的启动提供了动力强迫源^[25]。在存在局地强降水的背景下，边界层急流与局地降水之间还可能形成明显的正反馈，造成城市下游 β 中尺度的暴雨中心的出现^[24]。

城市热岛环流与地形热力环流之间的相互作用还有可能对局地中尺度对流系统的强度、性质产生影响。有研究^[26]表明，在弱下沉气流大尺度背景下，在中午前后，地形与平原之间容易形成很强的、由山坡指向平原的温度梯度，如果平原地区下游是城区，由于城区的温度高于郊区，因此城区与山区之间的平原地区就有可能出现一个“冷楔”。近地面层的“冷楔”不仅削弱了对流层低层的热力不稳定，而且“冷楔”形成了边界层内的辐散气流，它们对来自于上游地区（山区）的强对流单体都起到了减弱作用，使得

山坡上形成的冰雹云下山后对流高度降低，对流活动减弱，降水性质由冰雹转为降雨。当对流系统随环境风场移到城区时，在城市热岛的作用下，对流可能再次被加强。

孙继松等^[27]最近讨论了地形与城市热岛共同作用下的 β 中尺度暴雨的一系列理论特征，并利用北京地区稠密的地面观测资料以及分布于距离暴雨中心区不同距离的风廓线仪观测资料进行了证实：由于城市与山区之间的温度梯度量级不同，引发对流性 β 中尺度暴雨的垂直切变的响应时间差异较大，一般从十几分钟到几个小时不等；地形坡度的大小对中尺度暴雨系统的水平尺度起到了决定性影响；一般情况下，地形与城市热力过程相互作用造成的中尺度暴雨多发于傍晚前后或凌晨前后。地形与城市热岛效应造成的局地对流性暴雨的物理概念模型如图2。

城市热岛效应与地形相互作用形成山前暴雨的物理机制如下。

(1) 由于山体阻滞了城市热岛的水平扩散效应，在山前地区形成了最强的水平温度梯度。水平温度梯度不仅造成山坡下滑冷气流与城市暖空气流出气流之间形成了山前水平辐合气流，形成抬升运动，而且强的水平温度梯度将强迫风的垂直切变增强，形成边界层顶的气流加强，出现边界层急流的雏形；边界层急流的高度一般低于山体的高度^[24]。

(2) 山前水平辐合气流形成的抬升运动、吹向山体的边界层急流形成的强迫抬升运动，在垂直风切变环境中，触发对流发生。

(3) 初生对流形成降水后，地面气温迅速下降，造成山前与城区间的水平温度梯度进一步加强，边界层急流加速，抬升运动也在加速，造成山前对流进一步加强，形成了温度梯度与对流强度之间的正反馈过程，山前对流不断发展且位置少动，形成暴雨甚至特大暴雨。

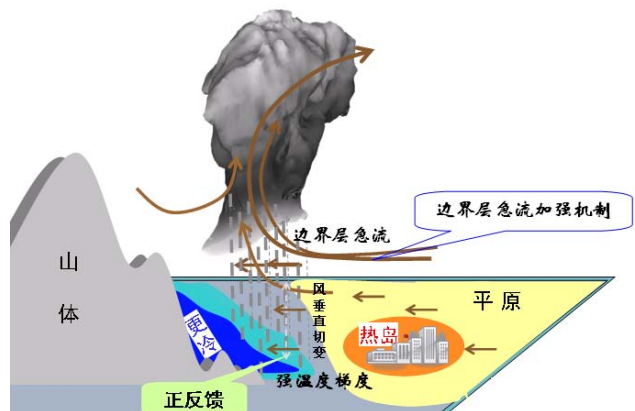


图2 城市热岛效应与地形相互作用形成山前暴雨的物理机制

4.2 城市环流与水陆环流的相互作用

与地形环流和城市环流相互作用一样，对于海（湖）滨城市来说，海（湖）陆风环流与城市环流的相互作用，往往会影响到中尺度对流系统的演变。海风与环境风场相互作用可以产生低空辐合线，形成海风锋，触发不稳定能量释放而形成中尺度局地强对流，因此对于海滨城市来说，研究海陆风环流与城市环流之间相互作用问题显得尤为重要。这种相互作用表现在两个方面，即海陆风对城市热岛的影响和城市对局地海陆风环流的影响。

Wu等^[28]对青岛海陆风的研究表明，由于胶州湾、崂山和浮山的存在，青岛近海岸存在多支海陆风，风场复杂多变，低空风场在地形作用下，在山前（城区一侧）产生爬坡运动，在山后产生背风波，这两种波动产生的波动能量都可以上传到4km以上。这一高度足以触发对流层中层存在的对流不稳定能量，产生局地强降水天气过程。张立风等^[29]和王卫国等^[30]的数值试验表明，在没有地形影响时，海风的强度减弱、向陆地伸展的范围减小，陆风也会减弱。海陆风强度与地形的这种关系可能主要是由于地形的热力作用造成的：与平原相较而言，当有地形存在时，陆地气温在白天上升和夜间下降都更快，造成海陆气温梯度加大。苗曼倩等^[31]和张雷鸣等^[32]的数值试验表明：在白天，东海海风和太湖风环流与上海城市群的热岛效应存在正反馈现象；而在夜间，陆风环流趋于减弱，出现了海陆温差减小的现象——由于海温日变化很小，局地海陆温差减小实质上表现为城乡之间的温差加大，即夜间的城市热岛效应被强化。

城市环流与海陆风环流之间存在的这些相互作用关系，对城市及其周边地区的降水分布产生了明显的影响。梁钊明等^[33,34]的数值试验表明：（1）城市下垫面较大的向上感热通量和较小的向上水汽通量以及高粗糙度对冷湿海风有削弱作用，造成城市区域与郊区相比而言，低层大气形成较高的温度和较低的湿度。另外，城市热岛环流和海风环流的共同作用使得海风在城市上空有所抬升，从而使得海风对低层大气降温和增湿的垂直范围扩大。（2）中心城区的高粗糙度对海风风速有明显削弱作用，因此海风锋在城区往内陆推进距离稍减，低层辐合和上升运动减弱。海风与热岛环流相互作用对层结不稳定造成的影响如图3：与郊区相比，城区内的自由对流高度和平衡高度都有所降低，因此，在海风作用下的城区内，对流有效位能（CAPE）比没有城市影响的海岸地区要小。另一

方面，城市粗糙度进一步削弱了海风的辐合作用，因此，相对郊区而言，城市并不利于海风环流触发的对流发展。但是，相对于没有海风影响的地区而言，海滨地区的对流有效位能都有明显增加，其中起主导作用的因子是海风带来的水汽影响。

4.3 城市群的发展对大雾分布的影响

城市或城市群的发展对大雾分布的影响日益显现。最近，我们的研究表明^①，城区大雾日数的相对减少和轻雾或霾的相对增加，除了空气污染的因素以外，城市环流的热动力学过程起到了重要作用：增强的城市热岛效应，减小了城区的昼夜温差，增加暖湿空气冷却凝结饱和的难度；另一方面，热岛效应导致的热力差异会在城市和郊区几十千米的范围形成次级环流圈，该次级环流圈能够有效阻止低层水汽进入城区，减小了大雾形成的概率；城市膨胀的速度越快，年平均雾日减少也越快。

城市的发展是一个动态过程，利用京津冀地区所有站点（98个人工观测站）每10年平均雾日与同期18个基本代表站的每10年平均雾日插值到同一网格再相减，得到的京津冀地区最近20年中每10年平均雾日分布图，这样可以过滤掉气候波动变化和地形对大雾分布的影响，结果表明：1989—2008年，北京、天津均进入城市化发展的高峰期，北京、天津城区的大雾日数减少速度明显加快，且相对减少区域已经连成一片，并不断向城市南北两面扩展，大雾日数相对增多的区域主要集中在紧邻北京南部的河北地区及北京、天津以北的河北地区。这是由于城市范围逐渐扩大，

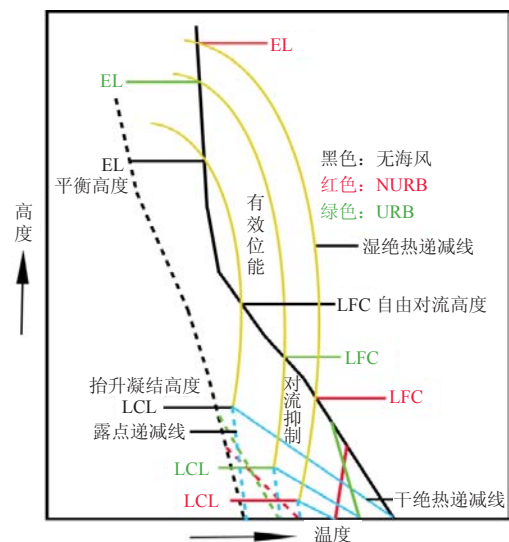


图3 海风穿过城区和郊区造成大气层结不稳定变化的示意图^[34]

① 引自“国家科技支撑计划项目：城市群高影响天气的特征和成因分析（2008BAC37B01）”技术报告，pp:50-64

城市热岛的范围也逐渐扩大，热岛环流圈的半径向南扩展，致使大雾易发区域南移。从40年来的变化趋势发现，京津城市群大雾减少的范围在逐步扩大，而南北两侧大雾发生频率相对增加的趋势在逐渐加强，说明由于城市化的发展，京津冀地区大雾发生频率及范围背离气候态特征越来越强，即极端事件发生的概率也在逐渐增强。

5 城市精细天气预报面临的科学技术问题

城市天气的客观精细预报技术的进步，在一定程度上取决于中尺度数值模式能力的提高幅度，而中尺度模式是否能够科学地描述一系列表征城市特征的边界层与天气系统的相互作用过程，将直接影响到预报员对中尺度模式产品的评价和应用。

近几年来，应用中尺度模式或云模式对城市效应引起的中尺度对流系统的演变开展了一系列数值模拟研究工作^[35-40]。概括而言，模式研究方法主要有两种：一种是通过改变模式现有过程中有关城区的反射率、粗糙度、土壤热力性质和蒸发率等来反映城市热动力学作用。这种办法比较简单，仅仅是改变了模式陆面过程中有关城市土地类型的相关参数。尽管如此，在研究城市化与对流发展的关系上，还是取得了一些令人鼓舞的成果，说明了城市陆面过程对局地对流的形成和发展产生了显著影响。另一种方法是，在中尺度数值模式中耦合城市冠层模式和城市陆面模式，不仅考虑城市建筑、道路的几何分布对热量和机械湍流的影响，还描述了城市冠层截取的辐射量、引起的风切变、边界层高度变化以及人为热源等。

尽管有关城市中尺度天气动力学研究已经取得了不少进展，但是，仍然存在大量的科学问题和技术难题有待进一步研究，目前还很少有真正建立针对城市环境的中尺度数值预报业务模式，城市精细化预报

业务还主要依赖于对不同分辨率数值模式产品的天气学解释应用和统计释用。而事实证明，目前的业务中尺度模式对相对孤立的 β 中尺度以下天气系统（即不是由更大尺度系统激发的、具备关联性的中小尺度系统）的模拟能力本身就非常有限，如果不能在模式中有效地耦合能够真实反映城市陆面过程、城市大气物理过程和动力过程的边界层模式和冠层模式，城市精细化数值模式预报技术可能很难取得实质性进展。为了解决这些科学技术问题，需要气象科技工作者在以下三个方面共同努力：

(1) 不同地理环境、不同天气背景下城市边界层的温湿垂直分布、湍流交换特征的连续变化及其与自由大气的相互作用过程的观测研究。目前有关城市大气环流变化的观测和数值模拟研究结果大多基于稳定天气背景下或气候平均态，据此得到的研究结果很可能造成无法真实地描述发生在城市的中尺度演变过程中的边界层物理过程，因为绝大多数局地天气过程、尤其是夏季中尺度对流系统往往发生在局地不稳定条件或稳定度剧烈变化的背景下。

(2) 目前，有关城市大气环流的研究主要集中在城市大气本身，例如城市大气能量平衡、湍流交换、城市局地环流等，而针对城市热力作用、动力作用与大气环流的相互作用研究比较薄弱。许多研究表明，地面热通量对局地强风暴和降水系统的影响并不只来源于当地、当时的通量变化^[41, 42]。因此，城市热量分布与低层环境流场的配置关系十分重要，因为城市地面热通量提供的感热能和潜热能可能通过大气流场在更大的范围内进行重新分布，对于城市群来说，它可能对更大范围内的天气系统演变产生了显著影响。

(3) 以稠密的城市气象观测资料（地面和风廓线观测网、微波等）为手段，研究造成城市高影响天

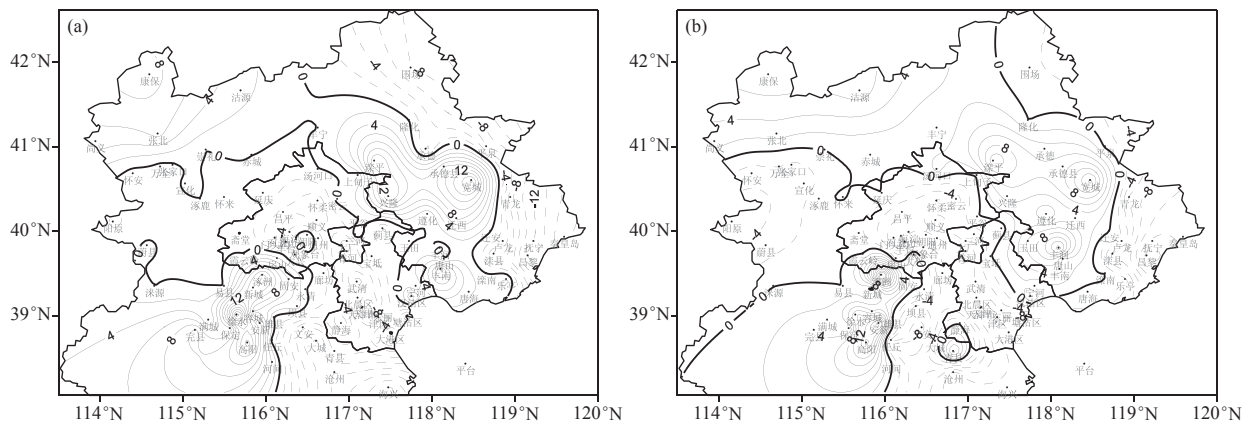


图4 京津冀地区10年平均雾日中尺度分布特征（98个观测站和18个基准站）
(a) 1989—1998年；(b) 1999—2008年

气系统的中尺度精细结构特征以及城市效应是如何影响这些天气系统的酝酿、发生、发展和消亡的物理过程等,还有待进一步破解。

6 结语与讨论

高影响天气发生发展对特大城市的物理响应过程,是城市中尺度天气动力学的核心问题,如何利用数值模式科学地描述这种过程是城市精细预报的发展方向。本文主要对最近二十多年来,城市中尺度天气学和精细预报技术研究进展进行了回顾,包括以下几个方面:(1)城市环流对中尺度降水系统的影响;(2)城市环流与山地环流相互作用的物理过程及其对中尺度系统的影响过程;(3)城市环流与海(湖)风环流的相互作用对中尺度天气系统的影响过程;(4)城市或城市群对大雾形成与分布的影响。

研究已经表明,发展能够反映城市建筑、街区几何分布对热量和机械湍流的影响,同时能够客观描述城市冠层辐射、垂直风切变、边界层高度变化以及人为热源等物理过程的城市冠层模式,并与中尺度天气模式进行耦合,并不断改进城市陆面物理过程等,能够有效地提高数值模式对地面要素的预报准确性,同时也有利于提高城市中尺度系统的预报能力。为了实现这一目标,针对特大城市的精细化观测研究,并将研究成果应用于模式物理过程的改进之中,是提高模式精细化预报的首要任务。

参考文献

- Bornstein R D. Observations of the urban heat island effect in New York city. *Journal of Applied Meteorology*, 1968, 7: 575-582.
- Oke T R. Review of Urban climatology, 1968-1973. WMO Technical Note No.134, WMO No.383. Geneva: World Meteorological Organization, 1974.
- Oke T R. The distinction between canopy and boundary-layer heat island. *Atmosphere*, 1976, 14: 268-277.
- Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108: 1-24.
- Arnfield A J. Simulating irradiative energy budgets within the urban canopy layer. *Modeling and Simulation*, 1984, 15: 227-233.
- Nunez M, Oke T R. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16:11-19.
- Melling H, List R. Characteristics of vertical fluctuations in a convective urban boundary layer. *Journal of Applied Meteorology*, 1980, 19: 1184-1195.
- Uno I, et al. An observational study of the structure of the Nocturnal urban boundary. *Boundary layer meteorol*, 1988, 45: 59-82.
- 周淑贞,束炯.城市气候学.北京:气象出版社,1994.
- Arnfield A J. Review: Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Inter Jour of climatology*, 2003, 23(1): 1-26.
- National Research Council. Reconciling Observations of Global Temperature Change. Washington DC: National Academy Press, 2000.
- Karl T. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. *Journal of Climate*, 1988, 1: 1099-1123.
- 龚道溢,王绍武.全球气候变暖研究中的不确定性. *地学前沿*, 2002, 9(2): 371-376.
- 刘洪利,李维亮,周秀骥,等.长江三角洲地区区域气候模式的发
- 展和检验. *应用气象学报*, 2005, 16(1): 24-34.
- Changnon S A Jr, Huff F A, Semonin R G. METROMEX: An investigation of inadvertent weather modification. *Bull Amer Mete Soc*, 1971, 52: 958-968.
- 蒙伟光,闫敬华,扈海波.城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响. *大气科学*, 2007, 31(2): 364-376.
- 黎伟标,杜尧东,王国栋,等.基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究. *大气科学*, 2009, 33(2): 1959-1266.
- 孙继松,舒文军.北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究. *大气科学*, 2007, 31(2): 311-320.
- Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, 287(10): 1793-1796.
- Thielen J, Wobrock W, Gadian A, et al. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: A sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale. *Atmospheric research*, 2000, 54(1): 15-39.
- 孙继松,王华,王令,等.城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用. *大气科学*, 2006, 30(2): 221-234.
- 桑建国,刘万军.冬季城市边界层风场和温度场结构分析. *气象学报*, 1990, 48(4): 459-468.
- 齐琳琳,赵思雄.局地地形、地表特征对上海暴雨过程的影响研究. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 33-48.
- 孙继松.北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究. *大气科学*, 2005, 29(3): 445-452.
- Blackadar A K. Boundary layer maxima and significance for the growth of nocturnal inversion. *Bull Amer Mete Soc*, 1957, 38: 17-121.
- 孙继松,石增云,王令.地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 76-84.
- 孙继松,杨波.地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨. *大气科学*, 2008, 32(6): 1352-1364.
- Wu Z M, Schlunzen K H. Numerical study on the local wind structures forced by the complex terrain of Qingdao area. *ACTA Meteorological Sinica*, 1992, 6(3): 355-366.
- 张立凤,张铭,林宏源.珠江口地区海陆风系的研究. *大气科学*, 1999, 23(5): 581-589.
- 王卫国,蒋维楣.青岛地区边界层结构的数值模拟. *大气科学*, 1996, 20(2): 229-234.
- 苗曼倩,唐有华.长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化影响. *高原气象*, 1998, 17(3): 280-289.
- 张雷鸣,苗曼倩,洪钟祥,等.城市发展对夜间海陆风环流影响的预测模拟. *大气科学*, 1994, 18(3): 366-371.
- 梁钊明,高守亭,王彦.渤海湾地区一次碰撞型海风锋天气过程的数值模拟分析. *气候与环境研究*, 2013, 18(6): 733-745, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12027.
- 梁钊明,高守亭,王东海,等.城市下垫面对渤海湾海风锋特征影响的一次数值试验. *大气科学*, 2013, 37(3): 53-64.
- Craig K G, Bornstein R D. MM5 simulation of urban induced convective precipitation over Atlanta. Fourth AMS Conference on the Urban Environment Conference, Norfolk, VA. Amer Meteor Soc, 2002.
- Rozoff C M, Cotton W R, Adegoke J O. Simulation of St. Louis, Missouri, Land use impacts on thunderstorms. *J Appl Meteor*, 2003, 42: 716-738.
- Liu Y, Chen F, Warner T, et al. Improvements to surface flux computation in a non-local-mixing PBL scheme, and refinements on urban processes in the NOAA land-surface model with the NCAR/ ATEC real time FDDA and forecast system. 20th conference on Weather Analysis and Forecasting /16th conference on Numerical weather Prediction, Seattle, Washington, 11-15 January, 2004.
- 江晓燕,张朝林,高华,等.城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——一个例分析. *气象学报*, 2007, 65(2): 165-171.
- 李晓莉,何金海,毕宝贵,等. MM5模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验. *气象学报*, 2003, 61(5): 15-28.
- 陈炯,郑永光,邓莲堂.城市建筑物对城市边界层三维结构影响的数值模拟. *北京大学学报(自然科学版)*, 2007(3): 343-350.
- Nuss W A, Kamikawa S I. Dynamics and boundary layers processes in two Asian cyclones. *Mon Wea Rev*, 1990, 118: 755-771.
- Benjamin S G, Carlson T N. Some effects of surface heating and topography on regional severe storm environments. Part 1: Three dimensional simulations. *Mon Wea Rev*, 1986, 114: 307-343.

珠江三角洲城市群大气污染与边界层特征研究进展

吴蒙¹ 吴兑^{1,2} 范绍佳¹ 陈慧忠² 潘洪密¹

(1 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

摘要: 珠江三角洲城市群是我国三大城市群之一, 伴随着经济的快速发展, 大气污染问题也接踵而来。尤其是近年来社会各界对大气污染问题愈加关注, 新发布的《环境空气质量标准》也针对性地提出了许多更高的要求, 因此继续深入开展大气污染成因和治理办法研究是非常迫切和必要的。通过回顾10多年来对珠江三角洲地区大气污染和大气边界层研究方面的进展, 分三个方面介绍了目前珠三角地区的污染现状、气溶胶污染特征和边界层特征的研究成果。初步归纳了珠三角能见度与灰霾日近50年来的变化特征和污染气象特征, 同时还讨论了珠三角大气污染和边界层研究的未来趋势。

关键词: 大气污染, 边界层, 气溶胶

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.003

Research Progress in the study of Air Pollution and Atmospheric Boundary Layer over the Pearl River Delta City Cluster

Wu Meng¹, Wu Dui^{1,2}, Fan Shaojia¹, Chen Huizhong², Pan Hongmi¹

(1 School of Environmental Science and Engineer, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

2 Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080)

Abstract: The Pearl River Delta city cluster is one of largest three city clusters in China. With the developing of economy, a series of air pollution problems occur one after another. People pay more and more attention to the air pollution problem, and the new Environmental Air Quality Standard is also much more stringent. All these show that it is necessary to make a study of the cause and controlling method of air pollution. Based on reviewing the research progress of air pollution and atmospheric boundary layer over the city cluster in Pearl River Delta in the recent ten years, the authors introduced the current condition of air pollution, atmospheric aerosol and atmospheric boundary layer study in Pearl River Delta. A brief summery of the characteristics of visibility, haze day, air pollution meteorology has been given, and the future trend of the air pollution and atmospheric boundary layer study in Pearl River Delta has also been discussed.

Keywords: air pollution, atmospheric boundary layer, aerosol

1 引言

珠江三角洲地区(珠三角)是我国三大城市群之一, 正处于城市化、工业化快速发展时期, 是我国经济发展快、经济总量大、综合实力强的地区之一。伴随着区域资源和能源的大量消耗, 多种大气污染物高强度集中排放, 珠三角地区光化学烟雾、灰霾等大气环境问题日益突出, 大气污染呈现出区域性、复合型、压缩型特征^[1-5]。与此同时, 空气质量恶化所引起的大气环境问题对广大人民群众的生产、生活活动造成极大的危害, 特别是对人体健康产生极大的危害,

研究表明大气污染物对人体呼吸系统伤害尤为显著, 污染浓度越高, 伤害也就越大^[6-7]。

随着生活水平的提高, 人们对环境质量的要求越来越高, 在新的《环境空气质量标准》发布后, 珠三角多数城市细粒子污染超标明显, 所面临的大气污染形势非常严峻^[8]。为解决复杂的大气环境污染问题, 近年来, 在国家大力支持下, 珠三角地区开展了大量相关研究工作, 为区域空气污染联防联控提供了科学的指导, 并在亚运会、大运会空气质量保障方面取得了许多有意义的成果, 对珠三角区域经济社会的快速发展做出了积极的贡献。

2 珠三角大气污染与边界层特征研究现状

2.1 珠三角大气污染现状

由于经济规模的迅速扩大和城市化进程的进一步加快, 人为大气污染物的排放量迅速增加, 包括直接

收稿日期: 2013年6月4日; 修回日期: 2013年9月12日
第一作者: 吴蒙(1988—), Email: wumeng@mail2.sysu.edu.cn
通信作者: 吴兑, Email: wudui@grmc.gov.cn
范绍佳, Email: eesfsj@mail.sysu.edu.cn
资助信息: 国家重点基础研究项目(2011CB403403)

排放的气溶胶和气态污染物通过化学转化与光化学转化形成的细粒子二次气溶胶，这些污染物带来的最直观的后果就是能见度的恶化和灰霾天气的出现^[9-12]。自20世纪70年代初起，珠三角大部分城市能见度开始下降，并在经济高速发展的80—90年代初进一步恶化，90年代中期之后虽然能见度变化趋于平缓，但能见度下降的趋势仍未从根本上改变。总体来看，在过去50年珠三角所出现的3次大的能见度波动，分别对应着与经济发展相伴随的粉尘污染时期、硫酸盐加粉尘污染时期、以及光化学过程的细粒子加硫酸盐加粉尘的复合污染时期^[13-15]。

珠三角大气污染的另一个显著特征就是灰霾日数的迅速增加^[16-17]。珠三角地区是国内较早开展灰霾识别、研究和治理的区域，多年来已经取得了显著的成果，并建立了较为完善的灰霾预警预报系统^[18]。吴兑

等^[19-20]最早提出了灰霾的清晰界定，即认为灰霾由空气中的灰尘、硫酸与硫酸盐、硝酸与硝酸盐、有机碳氢化合物等非水成物气溶胶系统造成的大气混浊、视野模糊并且水平能见度小于10km视程障碍的现象，并进一步提出将其视作一种灾害性天气。大量研究表明形成灰霾天气的气溶胶组成非常复杂，其本质是细粒子气溶胶污染，并且往往与光化学烟雾相关联^[15, 21]。随着灰霾灾害的日趋严重，其引发的环境效应问题和气溶胶辐射强迫引发的气候效应问题已经广泛地引起科学界、政府部门和社会公众的关注，成为当前舆论的热门话题。

图1给出的是1955—2005年珠三角部分城市各个月份灰霾日的变化情况，珠三角的灰霾天气主要是从20世纪80年代改革开放后开始迅速出现，尤其是在广州和深圳。灰霾多发生在春季、秋季和冬季，夏季则

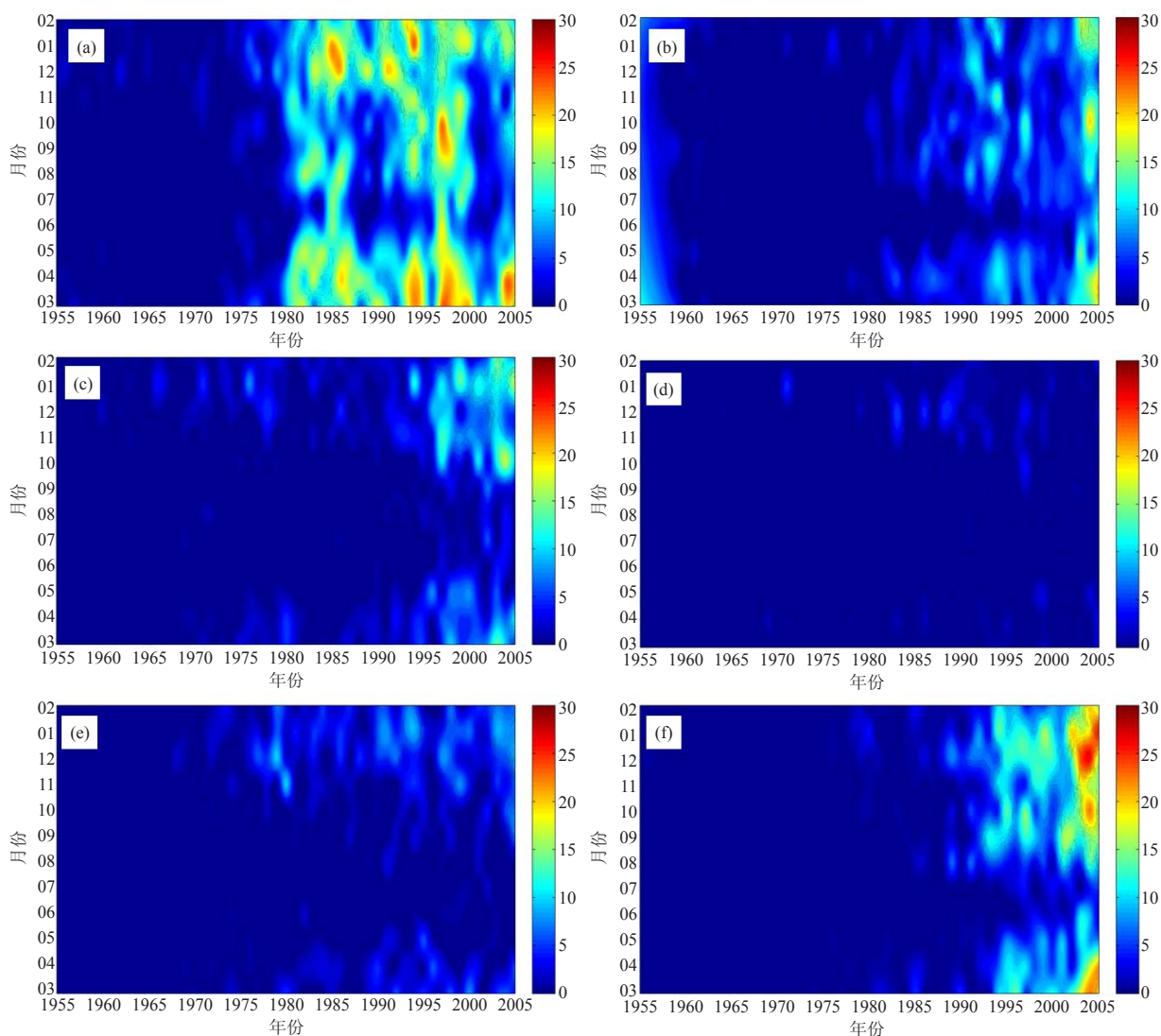


图1 珠三角不同城市1955—2005年灰霾日数(单位:d)的月变化
(a) 广州; (b) 增城; (c) 肇庆; (d) 惠州; (e) 江门; (f) 深圳

较少发生，也就是当年10月一次年4月为灰霾多发月份^[22-23]。灰霾等低能见度事件多见于 $70\% \leq RH < 90\%$ 的中高相对湿度范围，并且早晚较多发生，白天低能见度事件则一般出现在正午前后，在干季（10月一次年3月）能见度的日变化特征比较明显^[24]。

2.2 珠三角气溶胶污染特征

近年来珠江三角洲地区的气溶胶污染日趋严重，灰霾天气甚至一年四季都可以出现。造成这种灰霾天气长期频繁出现的根本原因是大气污染物排放量的增加，而大气污染物有自然源（如森林火灾、火山爆发等）和人为源（如工业废气、生活燃煤、汽车尾气等）两种，其中又以人为源为主要排放源，尤其是工业生产和交通运输所造成的人为源。不同性质的排放源排放出的污染物的理化性质截然不同，其气溶胶成分也处于不断变化中，并且所造成的危害也存在着明显的差异。在珠三角地区，大量的工业生产活动和急剧发展的城市交通都使得珠三角的污染物种类、性质十分复杂^[25-26]。

大量研究表明目前珠三角地区的气溶胶污染主要是细粒子的污染。在广州地区，超过一半年份 PM_{10} 浓度的年均值超过国家二级标准的年均值限值，而 $PM_{2.5}$ 浓度年均值则全部年份都超过国家二级标准的年均值限值，有些年份的年均值浓度甚至超过标准限值的2倍，对比20多年前的历史资料，可以发现细粒子在气溶胶中所占比例有显著增加， $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比重甚至高达80%^[27]。

图2是广州2012年10月逐时能见度、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的时间变化情况。从中可以看出，当 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度增大时，广州的能见度下降，而 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度减小时，广州能见度则上升。尤其是当能见度小于10km，出现灰霾时， $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度迅速增大。图

中能能见度与 $PM_{2.5}$ ，尤其是 PM_{10} 有非常好的关系，因此细粒子气溶胶是造成珠三角能见度恶化的主要因子。

图3给出的是广州番禺大气成分站观测到的2012年 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 逐日质量浓度变化情况。从中可以看出，广州地区2012年颗粒物质量浓度夏季最低，其他季节则相对较高，尤其是春季浓度最高，这主要是由于夏季对流旺盛，降水较多，扩散条件较好，有利于颗粒物快速扩散。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 占 PM_{10} 质量浓度百分比甚高，两者之间的相关性非常好。 PM_{10} 的浓度日均值除少数几天高于国家二级标准外，多数时候都远远小于国家二级标准，但是 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度则相对较高，有相当多天接近和达到了灰霾参考标准^[28]，进一步说明广州地区2012年细粒子污染较为严重。

大量研究表明，珠三角爱根核和积聚核的数浓度比巨核数浓度平均高3~4个数量级，在气溶胶质量权重中，黑碳气溶胶浓度增长较快^[29-33]，在水溶性气溶胶中，硫酸盐和硝酸盐贡献非常高^[34]；在平均相对湿度下，二次气溶胶对消光的贡献超过50%，而在高相对湿度的情况下，二次气溶胶对消光的贡献超过70%。沿海城市灰霾日数增长较快与海盐气溶胶粒子的氯损耗机制关系密切^[35]，二次粒子前体物如 SO_2 和 NO_x 等的排放未得到有效控制，是珠江三角洲能见度未能有效改善的主要原因。

图4给出的是广州番禺大气成分站测得的2012年黑碳、 NO_x 和 SO_2 逐日质量浓度变化情况。从中可以看出黑碳、 NO_x 和 SO_2 在冬春季节质量浓度较高，而夏秋季节相对较低，主要是由于夏秋季节气象扩散条件较好，而冬春季节扩散条件较差。此外，还可以发现 NO_x 的浓度非常高，尤其是在春季，作为二次粒子的前体物会对空气质量产生重要影响。

利用广州番禺大气成分站2009年12月—2011年9月和深圳竹子林站2011年1—9月的逐时气体观测

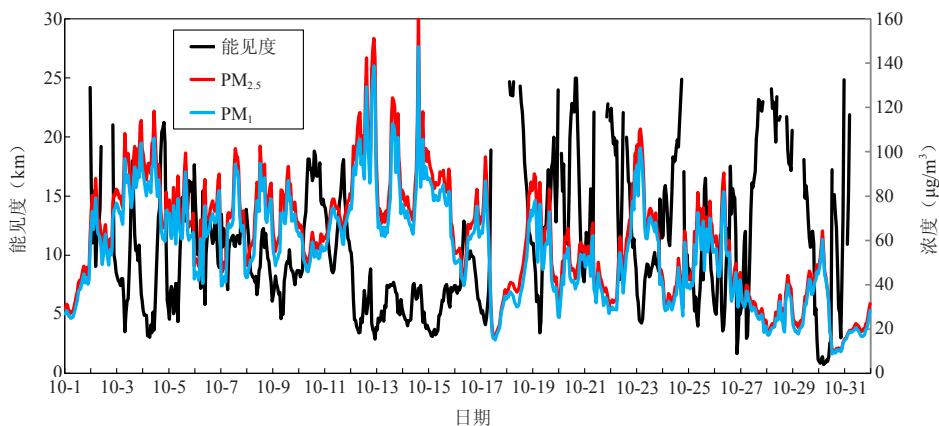


图2 广州2012年10月逐时能见度、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的时间变化

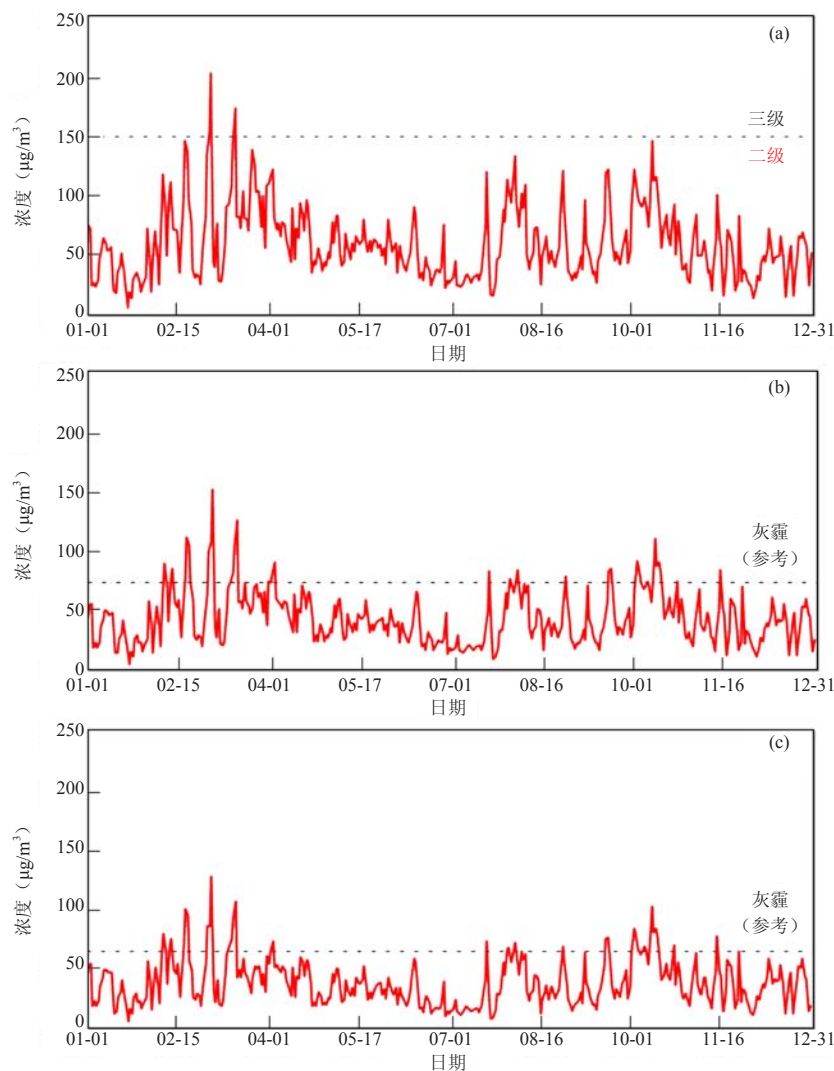


图3 广州2012年颗粒物逐日质量浓度变化
(a) PM_{10} ; (b) $PM_{2.5}$; (c) PM_1

资料, 给出了广州和深圳酸性碱性气体的百分比情况(图5), 其中酸性气体包括 HCl 、 SO_2 、 HNO_2 和 HNO_3 , 碱性气体为 NH_3 。从图中可以看出, 广州和深圳均以 HNO_2 、 SO_2 、 NH_3 为主, 但不同成分所占比例显著不同, 广州 SO_2 所占百分比要远远大于其他气体成分, 其次是 NH_3 ; 深圳 NH_3 与 SO_2 则所占比重相差不大, 分别是36%和34%; 其中, SO_2 、 HNO_3 和 H_2SO_4 在海盐氯损耗过程中起到非常重要的作用。

2.3 珠三角边界层特征

气象条件是造成大气污染的直接影响因子, 在污染物的扩散和输送中起到了主要的作用。风向、风速、温度、混合层厚度、大气稳定度等大气边界层特征和区域气候与天气背景等大尺度天气特征, 都会在能见度恶化和空气质量下降中产生显著影响。珠江三角洲北依南岭、南面南海, 特殊的地理环境使得珠三

角的气象特征非常复杂。湿季(4—9月), 珠三角极易受到南海夏季风和台风的影响; 干季(10月—次年3月), 又频繁受到寒潮的影响; 同时还受海陆风、城市热岛环流、越南岭下沉气流等的复合影响^[36-37]。

造成珠三角区域空气污染的典型天气形势主要有热带气旋型、大陆冷高压型、入海变性高压型和低压槽型4类^[38-39], 有些研究也划分为冷锋前部型、高压底部型、高压脊控制型3类^[40]。伴随稳定性高压和变性高压脊出现的稳定层结和静小风, 使得大气污染物难于扩散, 是造成区域大气污染的主要原因之一; 锋前负压与正变温、边界层逆温层、强气温日较差和低混合层高度等都有利于灰霾天气的维持; 弱冷空气难以改变大气稳定层结, 空气污染可继续维持; 强冷空气到来使大气环流形势改变, 空气质量改善^[41-42]。

近地层输送条件即地面流场对污染的稀释、扩

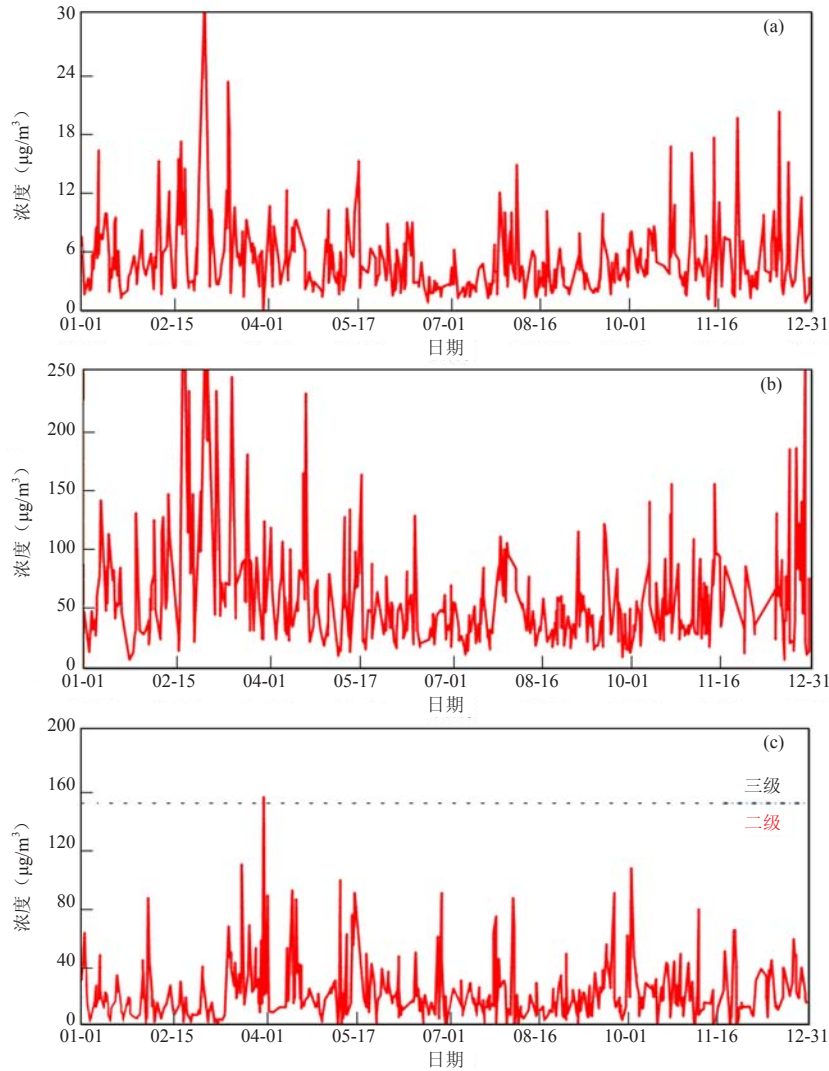


图4 广州2012年黑碳、NO_x和SO₂逐日质量浓度变化
(a) 黑碳; (b) NO_x; (c) SO₂

散、输送等起到重要作用，是影响污染物浓度的关键气象因子之一。吴兑等^[43]研究发现，在纬向环流不显著的年份，气流南北交换则比较显著，冷空气跨越南岭到达珠江三角洲的机会比较大，伴随冷空气而来的大风天气有利于污染物的扩散；反之，在纬向环流显著的年份，冷空气跨越南岭到达珠江三角洲的机会则比较小，污染物易于堆积^[44]。为了定量描述风场的水平扩散能力，吴兑等^[43, 45]提出了矢量和的概念，较小的风矢量和往往对应着与区域霾天气过程密切相关的气流停滞区，而较大的风矢量和则对应着较强的平流输送作用；同时为了定量描述风场对污染物的垂直扩散能力，廖碧婷等^[46]则利用K指数、沙氏指数和抬升指数等提出了垂直交换系数的概念，结果表明如果某地垂直交换系数小于15000，那么该地比较容易容易出现灰霾天气，反之该地则较难出现灰霾天气。

珠三角地区是我国风廓线仪和激光雷达等垂直边界层观测设备最密集的地区之一，开展了许多边界层反演研究，拥有大量、详实的边界层观测数据^[47]。在国家“973”计划、“863”计划支持下，先后在珠三角开展了3次大型的大气边界层观测试验，观测发现海陆风、山谷风、热岛环流等局地环流对珠三角的空气质量也有着不容忽视的影响^[48-50]。从珠江口地区吹向珠三角内陆城市群的海风抑制了城市群大气污染物向下风向的输送，导致城市群中的大气污染物向下风向的扩散变缓，甚至在城市群中出现短期堆积，使得城市群大气污染物浓度随海风的出现而显著上升，而珠江口地区大气污染物的浓度则随海风的出现而降低^[51]。

经过长期的观测研究积累，范绍佳等^[52-53]根据珠江三角洲地理环境、气候背景和边界层气象观测特

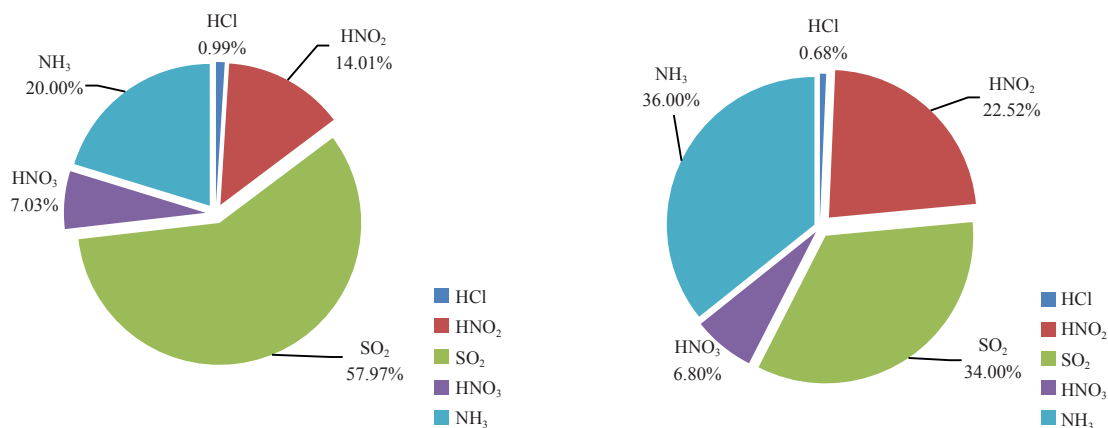


图5 广州和深圳各气体成分百分比
(a) 广州; (b) 深圳

征, 建立了一个可反映珠江三角洲大气边界层一般机理的珠江三角洲大气边界层概念模型。该模型可解释珠三角地区环境空气质量变化的原因, 有助于珠三角地区开展大气扩散能力分析、气流停滞区预测预报和灰霾天气预测预报。

由于珠三角众多的大型、特大型城市聚集在狭小的区域内, 导致在发生大气污染时污染物在不同城市之间相互输送, 造成显著的区域性污染特征^[54-55]。快速的城市化进程使得下垫面的性质显著改变, 城区高层建筑林立增加了静小风频率^[56-57]。在城市热岛环流影响下, 污染被从郊区输送回市区并可能笼罩在城市的上空, 而多个城市的聚集使得热岛环流的特征愈加复杂化^[58-62]。污染物的长距离输送也会对珠三角的空气质量产生不利影响, 当我国北方出现沙尘暴之类的重污染天气时, 伴随气流长距离输送而来的粗粒子也会造成珠三角部分地区污染^[63-65]。

3 结语

通过对近十多年来珠江三角洲地区大气污染和大气边界层研究的回顾, 可以发现, 在国家和社会的大力支持下, 经过广大科研工作者坚持不懈的努力, 在很多方面已经取得了许多非常有意义的成果, 形成了一整套卓有成效的大气污染预测预警理论和方法, 并在提供公众服务上发挥了重要作用。但是, 随着城市化进程的进一步加快, 大气污染开始逐渐向更广大范围的城乡区域蔓延。面对日益严峻的污染形势, 人民群众迫切的希望能够得到更加准确可靠的大气污染预测预报信息, 但是现有的预测预报手段还远远不能满足人民群众的需求, 因此还需要更深入地开展大气污染和边界层研究以进一步提高对污染天气的预测预报能力。展望未来, 灰霾等污染天气的成因仍

然有许多不清楚的地方需要进一步探讨, 尤其是大气气溶胶的理化特征和反应机理等内容亟待了解。作为造成大气污染的直接外因, 大气边界层具有极度的复杂多变性, 这导致目前的工作多停留在定性方面, 而定量研究仍然存在诸多困难, 这也是今后需要结合多种研究手段进行深入研究的领域。

参考文献

- [1] 范绍佳, 谭冠日. 广州迈向国际大都市的大气环境生态问题. 中山大学学报(自然科学版), 1996(S1): 162-166.
- [2] 吴兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报. 气象, 2000, 26(8): 3-5.
- [3] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述. 环境科学学报, 2012(2): 257-269.
- [4] 邓茂芝, 范绍佳, 邓奕, 等. 室内空气污染防治研究. 城市环境与城市生态, 2003(S1): 65-67.
- [5] Wu D, Tie X X, Li C C, et al. An Extremely Low Visibility Event Over the Guangzhou Region: A Case Study. Atmospheric Environment, 2005, 39(35): 6568-6577.
- [6] Tie X X, Wu D, Guy B. Lung Cancer Mortality and Exposure to Atmospheric Aerosol Particles in Guangzhou, China. Atmospheric Environment, 2009, 43(14): 2375-2377.
- [7] 吴兑. 多种人体舒适度预报公式讨论. 气象科技, 2003(6): 370-372.
- [8] 吴兑. 新版《环境空气质量标准》热点污染物PM_{2.5}监控策略的思考与建议. 环境监控与预警, 2012(4): 1-7.
- [9] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶云造成的严重灰霾天气. 自然灾害学报, 2006(6): 77-83.
- [10] 曹治强, 吴兑, 吴晓京. 1961—2005年中国大雾天气气候特征. 气象科技, 2008(5): 556-560.
- [11] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化. 气象学报, 2010(5): 680-688.
- [12] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 中国大陆1951—2005年雾与轻雾的长期变化. 热带气象学报, 2011(2): 145-151.
- [13] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. 气象学报, 2006(4): 510-517.
- [14] 黄健, 吴兑, 黄敏辉, 等. 1954—2004年珠江三角洲大气能见度变化趋势. 应用气象学报, 2008(1): 61-70.
- [15] 吴兑, 刘啟汉, 梁延刚, 等. 粤港细粒子 (PM_{2.5}) 污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究. 环境科学学报, 2012(11): 2660-2669.
- [16] 吴兑. 一种新的灾害性天气——灰霾. 环境, 2008(7): 38-39.
- [17] 吴兑. 灰霾天气的形成与演化. 环境科学与技术, 2011(3): 157-161.
- [18] 吴兑. 大城市区域霾与雾的区别和灰霾天气预警信号发布. 环境

- 科学与技术, 2008(9): 1-7.
- [19] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. 气象, 2005(4): 3-7.
- [20] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别. 气象, 2006(4): 9-15.
- [21] 吴兑, 吴晟, 陈欢欢, 等. 珠三角2009年11月严重灰霾天气过程分析. 中山大学学报(自然科学版), 2011(5): 120-127.
- [22] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降. 热带气象学报, 2007(1): 1-6.
- [23] 陈欢欢, 吴兑, 谭浩波, 等. 珠江三角洲2001—2008年灰霾天气过程特征分析. 热带气象学报, 2010(2): 147-155.
- [24] 陈静, 吴兑, 刘敏汉. 广州地区低能见度事件变化特征分析. 热带气象学报, 2010(2): 156-164.
- [25] Wu D, Tie X X, Deng X J. Chemical characterizations of soluble aerosols in southern China. *Chemosphere*, 2006, 64(5): 749-757.
- [26] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市夏、冬季室内外PM_{2.5}质量浓度的特征. 环境污染与防治, 2006(12): 954-958.
- [27] 邓涛, 吴兑, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲一次典型复合型污染过程的模拟研究. 中国环境科学, 2012(2): 193-199.
- [28] 中国气象局. 中华人民共和国气象行业标准 QX/T 113—2010: 霾的观测和预报等级. 北京: 气象出版社, 2010.
- [29] Wu D, Mao J T, Deng X J, et al. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(8): 1152-1163.
- [30] Yu H, Wu C, Wu D, et al. Size distributions of elemental carbon and its contribution to light extinction in urban and rural locations in the Pearl River Delta region, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(11): 5107-5119.
- [31] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市住宅室内、外PM_{2.5}中碳污染来源解析. 华南师范大学学报(自然科学版), 2007(4): 85-91.
- [32] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市夏季室内外PM_{2.5}中有机碳、元素碳的分布特征. 环境科学学报, 2005(9): 1242-1249.
- [33] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市夏、冬季室内外PM_{2.5}中元素组分的特征与来源. 分析科学学报, 2007(4): 383-388.
- [34] 夏冬, 杨少杰, 吴兑, 等. 广州市气溶胶质量谱和水溶性成分谱分析. 热带气象学报, 2009(6): 675-680.
- [35] 吴兑, 吴晟, 毛夏, 等. 沿海城市灰霾天气与海盐氯损耗机制的关系. 环境科学与技术, 2011(S1): 38-43.
- [36] 范绍佳, 祝薇, 王安宇, 等. 珠江三角洲地区边界层气象特征研究. 中山大学学报(自然科学版), 2005(1): 99-102.
- [37] Feng Y R, Wang A Y, Wu D, et al. The influence of tropical cyclone Melor on PM₁₀ concentrations during an aerosol episode over the Pearl River Delta region of China: Numerical modeling versus observational analysis. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(21): 4349-4365.
- [38] Chen X L, Fan S J, Li J N, et al. Typical weather characteristics associated with air pollution in Hong Kong area. *Journal of Tropical Meteorology*, 2008, 14(2): 101-104.
- [39] 陈训来, 范绍佳, 李江南, 等. 香港地区空气污染的典型天气背景形势. 热带气象学报, 2008(2): 195-199.
- [40] 李颖敏, 范绍佳, 张人文. 2008年秋季珠江三角洲污染气象分析. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1585-1591.
- [41] 黄义, 范绍佳, 刘吉. 珠江三角洲城市群一次区域性灰霾过程气象特征分析//中国气象学会2008年年会大气环境监测、预报与污染物控制分会场论文集. 中国气象学会, 2008: 9.
- [42] 杨武, 罗秋红, 李晓娜, 等. 2006—2008年秋季广州市重大空气污染过程特征研究. 热带气象学报, 2012(1): 123-133.
- [43] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究. 应用气象学报, 2008(1): 1-9.
- [44] 张人文, 范绍佳. 珠江三角洲风场对空气质量的影响. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 218(6): 130-134.
- [45] 吴蒙, 范绍佳, 吴兑, 等. 广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析. 中国环境科学, 2012(8): 1409-1415.
- [46] 廖碧婷, 吴兑, 陈静, 等. 灰霾天气变化特征及垂直交换系数的预报应用. 热带气象学报, 2012(3): 417-424.
- [47] 邓涛, 吴兑, 邓雪娇, 等. 利用激光雷达探测边界层演变研究//第27届中国气象学会年会大气物理学与大气环境分会场论文集. 中国气象学会, 2010: 1.
- [48] 张人文, 范绍佳, 李颖敏. 2008年秋季从化山谷风观测研究. 热带气象学报, 2012, 28(1): 134-139.
- [49] 李明华, 范绍佳, 王宝民, 等. 珠江三角洲秋季大气边界层温度和风廓线观测研究. 应用气象学报, 2008(1): 53-60.
- [50] 李明华, 范绍佳, 王宝民, 等. 2004年10月珠江口西岸海陆风特征观测研究. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 190(2): 123-125.
- [51] 李明华, 范绍佳, 王宝民, 等. 秋季珠江口地区海风对城市群空气污染的影响. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 198(4): 114-117.
- [52] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型. 中国环境科学, 2006(S1): 4-6.
- [53] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层概念模型的建立及其应用. 热带气象学报, 2005(3): 286-292.
- [54] 李婷苑, 邓雪娇, 范绍佳, 等. 2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析. 环境科学, 2012(9): 2932-2938.
- [55] 余纬, 罗栩羽, 范绍佳, 等. 珠三角一次重空气污染过程特征分析及数值模拟. 环境科学研究, 2011(6): 645-653.
- [56] 张人文, 范绍佳. 珠江三角洲风场对空气质量的影响. 中山大学学报(自然科学版), 2011(06): 130-134.
- [57] 周军芳, 范绍佳, 李浩文, 等. 珠江三角洲快速城市化对环境气象要素的影响. 中国环境科学, 2012(07): 1153-1158.
- [58] 陆希, 周剑超, 姚腾, 等. 珠三角地区城市化对海陆风和局地环流的影响//中国气象学会2008年年会城市气象与城市可持续发展分会场论文集. 中国气象学会, 2008: 22.
- [59] 张晶晶, 窦浩洋, 张恩洁, 等. 珠江三角洲城市群群岛特征研究. //中国气象学会2008年年会城市气象与城市可持续发展分会场论文集. 中国气象学会, 2008: 9.
- [60] 王芳, 卓莉, 冯艳芬. 广州市冬季热岛的空间格局及其差异分析. 热带地理, 2007(03): 198-202.
- [61] 饶胜, 张惠远, 金陶陶, 等. 基于MODIS的珠江三角洲地区区域热岛的分布特征. 地理研究, 2010(01): 127-136.
- [62] 麦健华, 罗乃兴, 赖文锋, 等. 城市化对珠江三角洲热岛效应影响的模拟. 热带地理, 2011(02): 187-192.
- [63] 吴兑, 吴晟, 李海燕, 等. 穗港晴沙两重天——2010年3月17—23日珠三角典型灰霾过程分析. 环境科学学报, 2011(4): 695-703.
- [64] 吴兑, 吴晟, 李海燕, 等. 以珠三角典型灰霾天气为例谈资料分析方法. 环境科学与技术, 2011(6): 80-84.
- [65] 吴兑, 吴晟, 李菲, 等. 粗粒子气溶胶远距离输送造成华南严重空气污染的分析. 中国环境科学, 2011(4): 540-545.

北京上甸子典型天气个例的大气气溶胶数谱分布特征

沈小静¹ 孙俊英¹ 张养梅¹ 张璐¹ 周怀刚² 周礼岩² 董璠³

(1 中国气象科学研究院大气化学重点开放实验室, 北京 100081; 2 北京市密云县气象局, 北京 101500;

3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要: 使用差分淌度粒径分析仪 (TDMPMS) 和空气动力学粒径分析仪 (APS) 对上甸子区域本底站气溶胶 (直径 3nm ~ 10 μ m) 数谱分布特征进行观测。利用2008年的观测结果, 分析了不同天气 (包括沙尘天气、干洁天气和雾霾天气) 条件下大气气溶胶数谱分布及其与气象要素和气团来源的关系。结果表明, 沙尘天气条件下, 上甸子站受西北方向的气团控制, 风速较大, 粗粒子数浓度明显增加, PM₁₀的质量浓度可以迅速增加到毫克每立方米 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的量级。典型的“香蕉型”新粒子生成事件通常发生在比较干洁晴朗的天气条件下, 西北气团主导, 大气中背景气溶胶数浓度较低, 核模态气溶胶数浓度迅速增长, 气溶胶的粒径呈现明显的增长过程, 核模态可以平稳地增长到约80nm, 达到成为云凝结核的尺度。雾霾天气通常是在西南气团影响下, 细颗粒物 (1 μ m以下) 不断累积、相对湿度不断升高的条件下发生的。雾霾天气条件下数谱分布的几何中值粒径出现在积聚模态, 积聚模态数浓度也高于非雾霾天。个例研究表明, 雾霾天气条件下, PM_{2.5}质量浓度可以达到非雾霾天的10倍左右, 其中以细颗粒物的贡献为主。在雾霾天气条件下, 上甸子站数浓度较高的积聚模态颗粒物主要来自城区的传输, 因此对背景地区气溶胶数谱的研究可以为解析城区气溶胶复杂来源提供依据。

关键词: 沙尘天气, 干洁天气, 雾, 霾, 气溶胶数谱分布, 新粒子生成事件

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.004

The Characteristics of Particle Number Size Distribution under Typical Meteorological Conditions at Shangdianzi Regional Station in Beijing

Shen Xiaojing¹, Sun Junying¹, Zhang Yangmei¹, Zhang Lu¹, Zhou Huaigang², Zhou Liyan², Dong Fan³

(1 Key Laboratory of Atmospheric Chemistry of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Miyun Meteorological Station, Beijing 101500 3 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological

Administration, Beijing 100089)

Abstract: By using the instruments of Twin Differential Mobility Particle Sizer (TDMPMS) system and an Aerodynamic Particle Sizer, measurements of particle number size distribution (PNSD) in the range of 3 nm~10 μ m were taken at Shangdianzi Regional Station. Based on the dataset in 2008, the characteristics of particle number size distribution under different meteorological conditions such as dust storms, new particle formation events and haze days were investigated. On a dust storm day, the air mass originated from the northwest, with high wind speed. The coarse mode particle number concentration increased sharply and PM₁₀ mass concentration could reach up to milligrams per cubic meter. A new particle formation event of a typical “banana shape” occurred when the atmosphere background was quite dry, clean and clear, with the air mass coming from the northeast. The nucleation mode particle could grow to a larger size, around 80 nm, having the potential to be activated as cloud condensation nuclei. A haze day usually occurred when southwest air mass arrived, along with the meteorological conditions of high humidity. The conditions favored fine particles (<1 μ m) accumulating. The case study showed that the PNSD on a haze day was dominated by the accumulation mode and

higher number concentration than a non-haze day. The mass concentration of PM_{2.5} could increase by 10 times on a haze day, which was mainly attributed to fine particles. On haze days, the accumulation mode particles, with a high number of concentration were mainly transported from the urban area. Thus the study of PNSD at rural sites could also provide information for analyzing the complex emission sources in the urban area.

Keywords: dust storm, dry and clean day, fog, haze, particle number size distribution, new particle formation event

收稿日期: 2013年7月17日; 修回日期: 2013年9月11日

第一作者: 沈小静 (1984—), Email: xjshen@cams.cma.gov.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (2011CB403401);

国家自然科学基金 (41175113)、公益性行业

(气象) 科研专项 (GYHY200906038, GYHY

201206037); 中国气象科学研究院基本科研业务

费项目 (2010Z002, 2013Y004)

1 引言

大气气溶胶，也称大气颗粒物，是大气中重要的微量成分，通过吸收和散射太阳辐射直接影响气候^[1]，又可通过形成云凝结核间接影响气候^[2]。很多研究表明，大气中颗粒物和人类健康有重要关系，尤其是粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的超细粒子^[3]。气溶胶在大气环境中的行为取决于其化学成分、粒径大小及其谱分布特征。根据气溶胶粒子的粒度谱分布特征，可以了解大气颗粒物的来源，为治理颗粒物污染提供依据^[4]。目前，全球范围内开展了大量有关颗粒物数谱分布的观测，主要集中在欧美地区，如德国莱比锡^[5]、芬兰赫尔辛基^[6]、美国亚特兰大等^[7]。莱比锡城市大气颗粒物数浓度冬季高于夏季，工作日高于非工作日^[5]。城市大气颗粒物数谱分布主要受交通源影响，清洁背景地区颗粒物数谱分布受新粒子形成的影响十分明显^[6]。观测结果表明， $10\sim 100\text{nm}$ 和 $100\sim 2000\text{nm}$ 颗粒物数浓度夜间较高，在交通早高峰时达到最大值， $3\sim 10\text{nm}$ 颗粒物数浓度在11—14时达到最大值^[7]。

气象条件对颗粒物数谱分布也有重要的影响。Birmili等^[8]发现来源于大陆和海洋的气团对Melpitz颗粒物数谱分布的影响不同，来自大陆的气团对应的积聚模态粒子较多。对于芬兰的两个观测站Värriö和Hyytiälä^[9]，来自西南方向俄罗斯境内和中欧的气团携带的积聚模态颗粒物数浓度比来自极地方向的气团要高。这是由于积聚模态颗粒物的生命史较爱根核模态和核模态长，由于碰并和凝结增长，核模态在大气中仅存在几个小时就会消失，而粗粒子一般只能运输十几千米就会沉降^[10]。颗粒物数浓度还受局地混合作用的影响，如果边界层稳定，局地排放和再悬浮的颗粒物会相对较少^[11]。季节的变化也影响颗粒物的数谱分布，春季冰雪解冻，有利于沙尘天气的发生^[12]，粗粒子模态较其他季节要高。Boy等^[13]研究表明较强的紫外辐射、低相对湿度和低温度有利于新粒子生成事件的发生。近年来国内针对北京开展的大气气溶胶粒度谱分布的研究取得了一定进展。张仁健等^[14]用尘埃粒子计数器测量 $0.3\mu\text{m}$ 以上的粒子数浓度，峰值出现在 $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ ，其数浓度峰值与相对湿度有密切关系。胡敏等^[15]使用TDMPS-APS系统在线测量北京城区夏季颗粒物的数浓度谱分布， $3\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 颗粒物总数浓度的变化范围是(10min平均值) $(0.7\sim 6.4)\times 10^4\text{cm}^{-3}$ ，平均值为 $(3.0\pm 0.8)\times 10^4\text{cm}^{-3}$ ，并且夏季高温高湿条件下主要是细粒子的污染，导致极低的能见度。

上甸子区域本底站自2008年3月开展大气气溶胶数谱分布($3\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$)的观测，已有的研究结果表

明^[16]，上甸子地区大气气溶胶 $3\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 数浓度平均值为 12000cm^{-3} ，核模态、爱根核模态、积聚模态和粗粒子平均数浓度分别是 3600 、 4400 、 3500 和 2cm^{-3} 。颗粒物数浓度的季节变化表现为春季较高，主要与春季新粒子生成事件多发有关。上甸子地区新粒子生成事件的发生频率为36%，成核速率为 $0.7\sim 72.7\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ，增长速率 $0.3\sim 14.5\text{nm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。后向轨迹分析表明，来自西北方向的干洁气团有利于新粒子生成事件，来自西南方向的污染气团有利于积聚模态颗粒物的累积。本研究主要以2008年的数谱分布资料为基础，主要分析不同类型天气条件下的数谱分布特征。

2 观测点和采样方法

北京上甸子大气本底监测站是我国建立的第一个区域性大气本底站，其经纬度为 $117^{\circ}07'E$ ， $40^{\circ}39'N$ ，海拔293m，位于北京东北部的密云县内，距离北京市约100km，站点周围无明显污染源。作为华北地区的区域性大气本底站，该站的北侧很少有大城市和其他污染源，北京城区位于其西南方，在东南方向有天津、塘沽等城市和工业区(图1)。从一定程度上说，上甸子本底监测站的观测资料反映了京津唐乃至整个华北地区的大气颗粒物的平均状况。

大气颗粒物数谱分布使用两个差分淌度粒径分析仪(Twin Differential Mobility Particle Sizer, TDMPS)和空气动力学粒径分析仪(Aerodynamic Particle Sizer, APS)同步在线连续测量。TDMPS系统由2个子系统组成：超细微分迁移率分析仪(Ultrafine Differential Mobility Analyzer, UDMA)和超细凝聚粒子计数器(Ultrafine Condensation Particle Counter, UCPC, TSI Model 3025)，测量粒径范围为 $3\sim 80\text{nm}$ 的颗粒物；微分迁移率分析仪

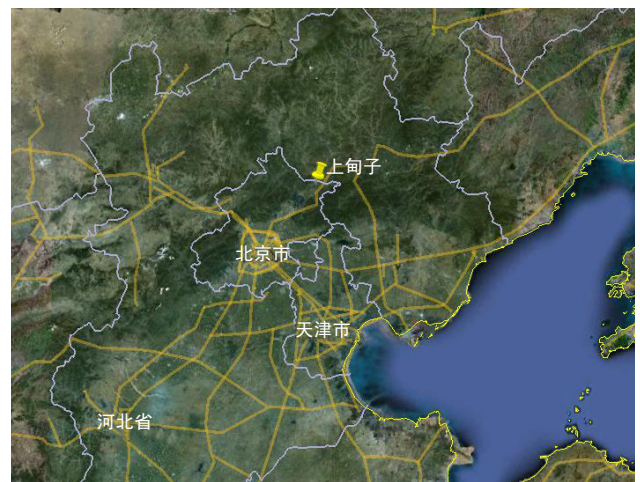


图1 上甸子观测站的地理位置(黄色实线代表主要公路分布, 图片来自Google Earth)

(Differential Mobility Analyzer, DMA) 和凝聚粒子计数器 (Condensation Particle Counter, CPC, TSI Model 3010), 测量粒径范围为 $40\sim 850\text{nm}$ 的颗粒物。TDMPs 是根据颗粒物在电场中的迁移特性不同, 在 DMA (UDMA) 中将不同粒径的颗粒物分开, 然后颗粒物进入 CPC (UCPC) 进行计数, 从而得到大气颗粒物数浓度谱分布。大气样品进入系统后分为两路, 一路通过 UDMA 筛选粒径后进入 UCPC 计数, 样品流量为 $2\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 鞘气流量为 $20\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$; 另一路通过 DMA 进入 CPC 计数, 样品流量为 $0.5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 鞘气流量为 $5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。APS 测量 $0.5\sim 10\mu\text{m}$ 粒子的粒径分布, 样品流量为 $1\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 鞘气流量为 $4\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。这套系统的时间分辨率为 10min , 并且样品气溶胶进入仪器观测之前经过干燥系统, 将相对湿度控制在 40% 以下。观测到的大气气溶胶数谱分布根据其粒径大小可以分为四个模态^[17], 核模态 ($3\sim 25\text{nm}$)、爱根核模态 ($25\sim 100\text{nm}$)、积聚模态 ($100\sim 1000\text{nm}$) 和粗粒子模态 ($>1\mu\text{m}$)。

气象资料来源于自动气象站测得的小时平均资料, 包括风速、风向、温度和湿度等。后向轨迹分析利用 HYSPLIT 软件 (<http://www.arl.noaa.gov/>)^[18]。本文所用的时间如无特殊说明均指北京时间。

3 结果与讨论

本研究主要以 2008 年的数谱分布资料为基础, 从中挑选能够代表典型天气条件下的数谱信息加以分

析, 分别讨论沙尘天气、干洁大气 (有新粒子生成事件发生的情况)、雾霾情况下的数谱分布特征。

3.1 沙尘天气

2008 年共有 7 天观测到比较明显的沙尘事件, 分别是 3 月 1 日、18 日, 5 月 20、21、27—29 日, 以 3 月 18 日发生的沙尘事件为例讨论沙尘天气的数谱分布特征。该次事件是 2008 年入春以来出现的范围较大、影响明显的一次沙尘天气。图 2 是 3 月 18 日 $3\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 颗粒物数谱分布、各模态颗粒物数浓度及气象条件的变化。从图 2a 和 b 可以看到, 粗粒子 ($>1\mu\text{m}$) 从 08 时开始增加, 粗粒子数浓度从几个每立方厘米急剧增加到约 200cm^{-3} 。而爱根核模态和积聚模态有明显的下降。从气象条件上看 (图 2c), 08 时左右风速从 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增加至 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向由东风转为北风。10 时后粗粒子模态在数谱分布中开始降低, 16 时左右逐渐消失, 此时的风速也减小至 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。在沙尘天气结束后, 核模态颗粒物数浓度在 15 时左右突然增加, 这时的大气气溶胶背景数浓度很低, 约 2000cm^{-3} , 凝结汇约为 0.01s^{-1} , 有利于新粒子生成事件的发生, 但可能由于大气中参与核模态增长的可凝结蒸汽浓度过低, 因此, 核模态无法长大到爱根核模态, 没有看到爱根核模态随后的增加, 核模态很快在大气中因碰并作用而消失。

本次沙尘事件主要受南下冷空气影响, 3 月 17 日夜间至 18 日, 华北、西北、内蒙古等多处地方遭遇扬

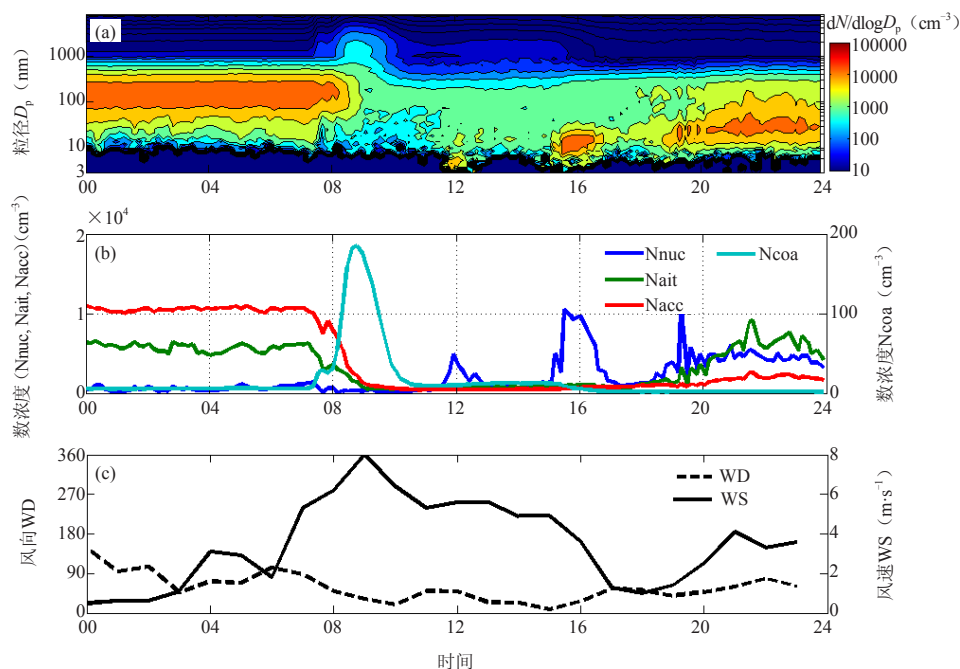


图2 2008年3月18日沙尘天气情况下数谱分布 (a)、不同模态颗粒物数浓度 (b) 和气象条件日变化 (c)

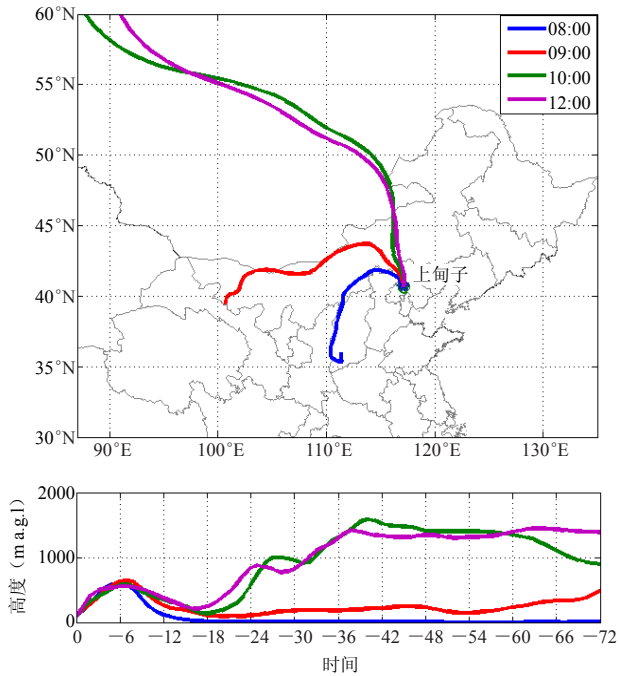


图3 2008年3月18日08时、09时、10时和12时到达上甸子的气团轨迹及其运行高度

沙天气。图3气团轨迹分析表明3月18日08时，气团主要来自西南方向，运行高度较低，运行速度慢，有利于污染物的累积。因此，08时之前，上甸子气溶胶数谱分布以积聚模态为主，数浓度达到 10000cm^{-3} 。在粗粒子出现之前，假定气溶胶密度为 $1.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，根据数谱分布可以计算出 PM_{10} 质量浓度约为 $200\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从

09时开始，气团已经开始转变为西方，来自内蒙古境内的沙尘到达上甸子站。10时之后，气团来自遥远的中东和俄罗斯地区，主要是干洁的气团，上甸子站粗粒子数浓度明显下降，表明沙尘事件已经结束。在粗粒子增加期间，根据文献[19]中给出的沙尘气溶胶的密度为 $2.5\sim 2.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，假定粗粒子的密度是 $2.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，计算得到这时 PM_{10} 质量浓度可以增长到约 $2.8\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3.2 干洁天气

根据上甸子数谱数据的统计分析，新粒子生成事件通常发生在相对湿度较低 ($<40\%$)，西北气团主导的干洁大气条件下^[15]。图4为典型的新粒子生成事件数谱分布、各模态颗粒物数浓度及气象条件的变化，该典型事件发生在2008年3月13日。新粒子生成事件的判断标准及有关特征参数，如成核速率、增长速率、凝结汇等的计算方法主要参考Dal Masso等的结果^[17]。从图中可以看出，新粒子生成事件从08时左右开始，此时背景颗粒物数浓度较低，凝结汇CS小于 0.01s^{-1} 。核模态数浓度在2h内急剧增加到 $7\times 10^4\text{cm}^{-3}$ （图4b）。15时左右核模态数浓度开始降低，20时左右核模态基本消失。在核模态降低的过程中，爱根核模态数浓度逐渐开始增长（图4b），大约滞后核模态数浓度增长6h，这个过程中核模态颗粒物逐渐长大为爱根核模态。而爱根核模态颗粒继续增长，成为积聚模态，积聚模态数浓度的增长滞后于爱根核模态大约5h，颗粒物粒径增长持续进行。该

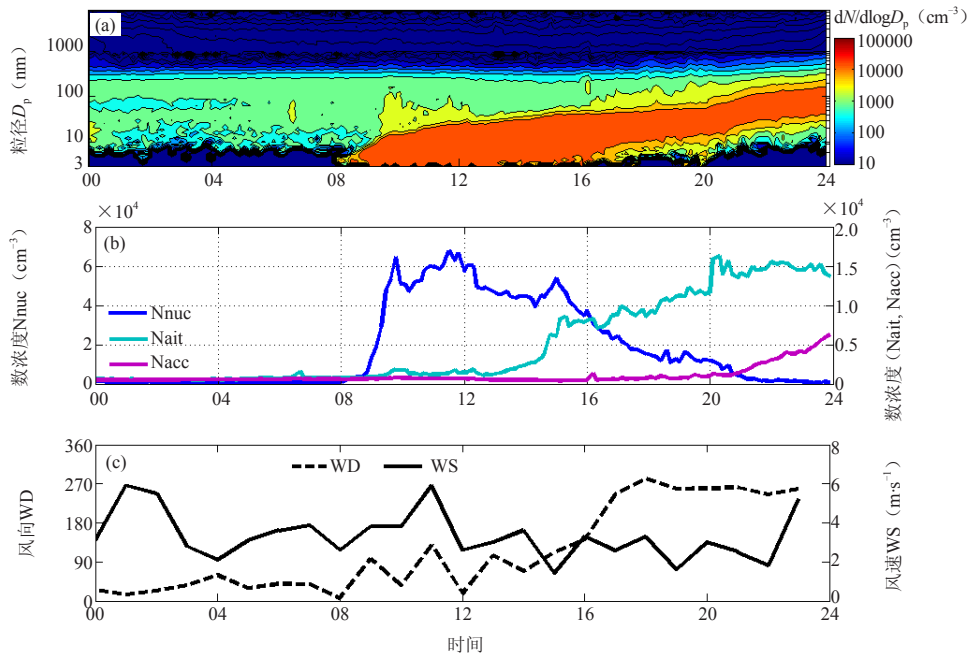


图4 新粒子生成事件条件下数谱分布 (a)、不同模态颗粒物数浓度 (b) 和气象条件日变化 (c)

次新粒子生成事件成核速率 $14.9\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ，增长速率 $3.8\text{nm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，增长速度比较缓慢并且持续时间较长。从气象条件来看（图4c），风速主要在 $2\sim 4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最高达到 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而风向由东北风主导，18时后转变为西风。由于白天局地地面风向基本维持在东北方向，利用后向轨迹计算地面100m处的气团主要是来自西北方向（图5）比较干洁的气团，经过俄罗斯东北部、蒙古、内蒙古等地区，并且气团全天没有发生变化。核模态颗粒物在气团均一的情况下呈现“香蕉型”的增长趋势，可以长大到80nm左右，达到作为云凝结核的尺度。

3.3 雾霾天气

大气气溶胶浓度的增加导致的持续性雾霾天气和重污染过程逐渐增多，引起科技人员和公众的高度关注。在气象学上，雾和霾是根据空气的相对湿度来进行区分的，相对湿度大于95%时发生的能见度低于1km的现象称为雾，相对湿度在80%以下能见度低于10km的现象称为霾。在80%~95%的相对湿度之间的低能见度现象则是雾和霾共同作用的结果。雾是由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶系统，是近地面层空气中水汽凝结（或凝华）的产物。霾是大气中的沙尘、硫酸盐、硝酸盐、有机物等组成的气溶胶系统造成能见度下降的现象。通常情况下，雾和霾在一天之中可以变化角色或者同时存在，这种区域性能能见度低于10km的空气普遍浑浊的现象就

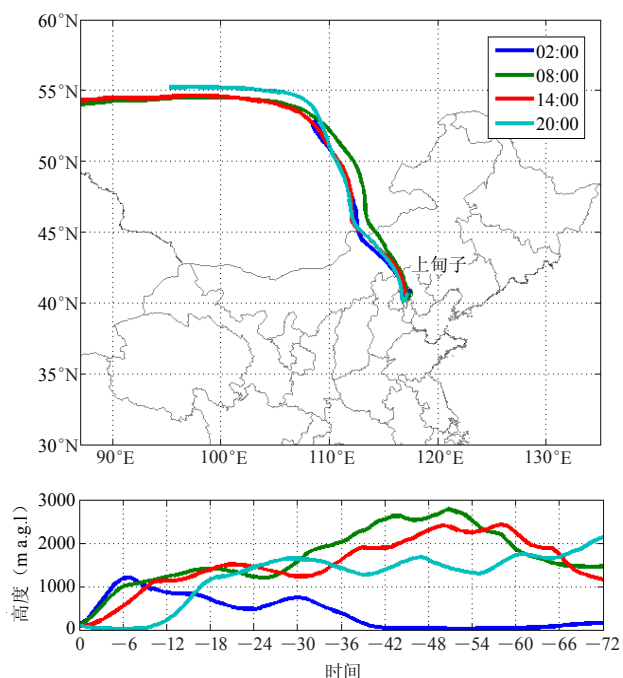


图5 2008年3月13日02时、08时、14时和20时到达上甸子的气团轨迹及其运行高度

被称之为“雾霾”。

2008年5月1—3日出现了较为典型的雾霾天气。是一次典型的大气由清洁变为污染，再变为清洁的过程。从数谱分布变化来看（图6），5月1日09时之前，颗粒物数浓度较低，核模态、爱根核模态和积聚模态数浓度分别约为 2000 、 2000 和 1500cm^{-3} 。09时开始，核模态颗粒物有急剧增加，爱根核模态也随后增加，可以认为是一次新粒子生成事件。与此同时，积聚模态颗粒物数浓度也有明显的增加，达到 10000cm^{-3} 。由于积聚模态数浓度增加，对核模态和爱根核模态颗粒物的碰并作用增强，因此在12时左右大气中的核模态颗粒物被清除，爱根核模态数浓度也开始下降，新粒子生成后的增长过程被抑制。从气象条件来看（图7），08时之前风向以东北方向为主，风速为 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，08时之后风向转变为西南方向，风速最大可以达到 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，来自西南方向的气团造成污染物在上甸子地区的累积。从轨迹分析的结果来看（图8），5月1日白天气团主要来自南方，经过山东、河北等颗粒物排放较多的地区到达上甸子。通过数谱积分计算 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度（假设颗粒物密度 $1.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ），09时左右质量浓度可以急剧增加到 $200\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最高值出现在16时，达到 $270\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，而积聚模态数浓度增加前 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度大约 $20\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，可见由于气团变性造成的污染可以使 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度增加10倍左右。污染气团维持了颗粒物质量浓度的高值，而污染发生之前（5月1日10时之前）和之后（5月3日06时之后）气团主要来自干净的西北地区。

5月2日MICAPS海平面气压场显示地面受均压场控制（图略），不利于污染物的扩散。00—12时期间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度一直维持在 $220\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右，08时之后随着太阳辐射的增强，气温升高、相对湿度下降（图7），雾滴蒸发后大量相对较干的气溶胶造成的低能见度形成了霾。12时以后 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度缓慢下降，这时风向也由西南风转为东南风，风速低于 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。15时开始风向又转为西南风，随着太阳辐射减弱，气温降低、相对湿度增加。随着相对湿度的增加，霾向雾霾共存转变的过程中， $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度逐渐增加到 $300\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。21时之后相对湿度达到80%以上，一直持续到次日06时，期间风向转为东北风， $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度缓慢降低，但一直维持在 $200\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上，主要是夜间边界层稳定，不利于污染物扩散。06时之后 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度也迅速降低，主要是太阳辐射增强后，夜间稳定的逆温层被打破，边界层逐渐发展，并且气团轨迹分析表明，5月3日白天气团来自西北

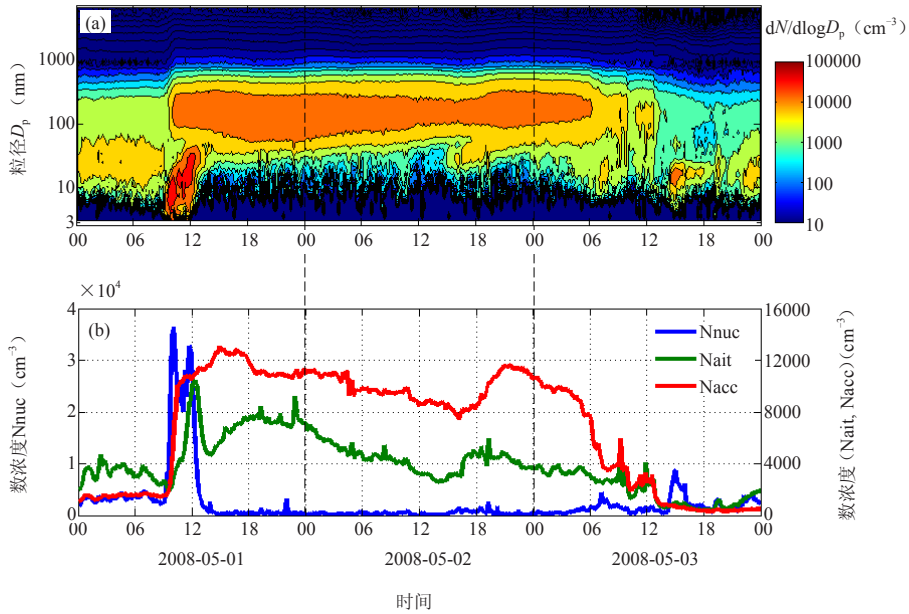


图6 污染及雾霾天气条件下数谱分布 (a) 和不同模式颗粒物数浓度 (b)

方向 (图8), 干洁气团和近地面层的污染空气混合, 导致了大气气溶胶质量浓度和积聚模态颗粒物数浓度的降低。

3.4 小结

沙尘天气时对应的核模态、爱根核模态、积聚模态和粗粒子模态平均颗粒物数浓度分别为1100、2400、3600和 30cm^{-3} 。气团主要来自西北方向, 相对湿度低于30%, 风速为 $2\sim 9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。干洁天气对应的气团主要来自西北方向, 发生频率约60%, 相对湿度低于40%, 风速适中, 为 $2\sim 6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。干洁天气下新粒子生成事件发生频率较高, 约为50%, 对应的核模态、爱根核模态、积聚模态和粗粒子模态数浓度分别为4200、4300、2200和 3cm^{-3} 。雾霾天气发生时通常对

应西南方向气团, 相对湿度在60%以上, 有时甚至达到80%以上, 风速比较低, 天气形势静稳。观测期间西南方向的气团约占40%, 其中雾霾天约占60%。雾霾天气条件下对应的核模态、爱根核模态、积聚模态和粗粒子模态数浓度分别为1200、3800、4800和 2cm^{-3} (表1)。相比之下, 雾霾天气条件下积聚模态颗粒物数浓度最高, 干洁天气条件下核模态和爱根核模态数浓度较高, 而沙尘天气表现为粗粒子模态数浓度有明显增加。

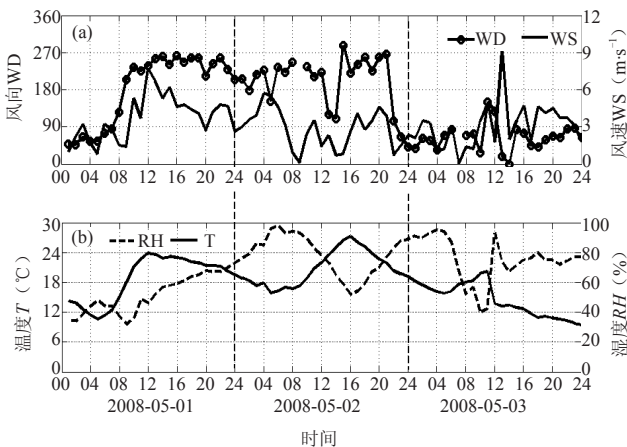


图7 2008年5月1—3日风向和风速 (a)、温度和相对湿度 (b) 的日变化

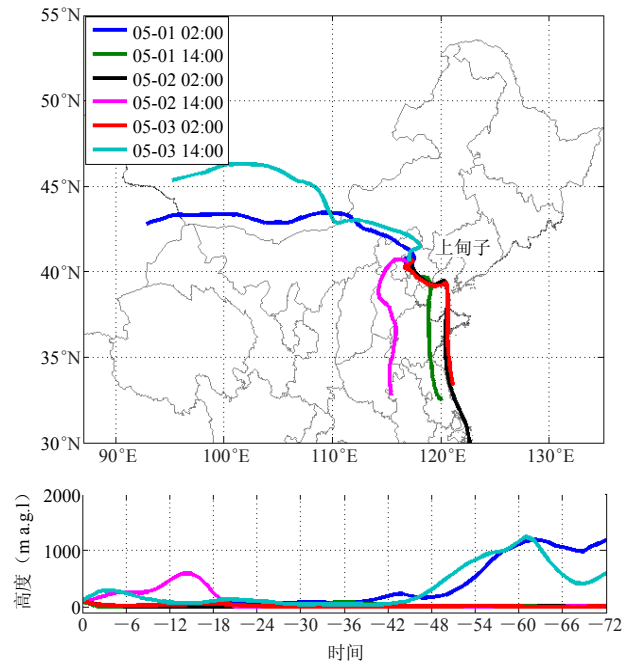


图8 2008年5月1—3日到达上甸子的气团轨迹及其运行高度

表1 不同天气条件下气溶胶各模态的浓度水平及气象条件

天气现象	核模态 (cm^{-3})	爱根核模态 (cm^{-3})	积聚模态 (cm^{-3})	粗粒子模态 (cm^{-3})	气团来源	气象条件
沙尘天气	1100	2400	3600	30	西北	$RH < 30\%$; 风速 $2 \sim 9 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
干洁天气	4200	4300	2200	3	西北	$RH < 40\%$; 风速 $2 \sim 6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
雾霾天气	1200	3800	4800	2	西南	$RH > 60\%$; 风速约 $2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

4 结论与展望

本文基于对北京上甸子区域本底站大气气溶胶数谱分布的观测资料,分析了不同天气(沙尘天气、干洁天气和雾霾天气)条件下的数谱分布特征,可以得出如下结论。

(1) 在沙尘天气条件下,受到来自内蒙古方向沙尘源区运行较快的气团影响,大气中的粗粒子数浓度有明显增加,增加的幅度可以达两个数量级(即数浓度水平从几个到上百个每立方厘米),而 PM_{10} 质量浓度可以增加10倍左右。

(2) 典型的新粒子生成事件发生日通常为晴朗的干洁天气,新粒子生成之前数浓度较低,约 2000cm^{-3} ,凝结汇小于 0.01s^{-1} 。在来自西北方向气团的稳定的控制之下,有利于核模态的持续增长,容易观测到典型的“香蕉型”新粒子生成事件。

(3) 雾霾天气现象发生时通常是受西南方向气团的影响,大气相对湿度较高,多出现在夜间,边界层较低并且稳定,有利于颗粒物不断累积,从而形成雾和霾共存的情况。白天,边界层混合作用加强,相对湿度较低,在 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度较高的情况下,容易形成霾。雾霾天气条件下对颗粒物质量浓度起主要贡献的是处于积聚模态的细颗粒物。

(4) 比较而言,雾霾天气条件下积聚模态颗粒物数浓度最高,干洁天气条件下核模态和爱根核模态数浓度较高,而沙尘天气表现为粗粒子模态数浓度有明显增加。雾霾天气对应的通常是相对湿度较高,风速较小的西南气团;干洁天气和沙尘天气主要对应的是来自西北方向、湿度较低的气团。

气溶胶在大气环境中的行为取决于其化学成分、粒径大小及其谱分布特征。纵观不同天气条件下气溶胶数谱分布的特征,可以了解到当区域本底地区气溶胶以积聚模态为主时,受北京城区的影响比较大,与污染物的长距离输送有关。背景地区大气颗粒物数谱分布的研究对解析城区大气颗粒物复杂来源有重要意义。

致谢:感谢上甸子区域本底站观测人员在仪器日常维护、运行和数据获取方面的辛勤劳动。

参考文献

- [1] Schwartz S E. The Whitehouse effect-Shortwave radioactive forcing of climate by anthropogenic aerosols: An overview. *J Aero Sci*, 1996, 27: 359-382.
- [2] Twomey S A, Piepgrass M, Wolfe T L. An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo. *Tellus*, 1984, 36B: 356-66.
- [3] Dockery D W, Pope C. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual Review of Public Health*, 1994, 13: 107-132.
- [4] 陈义珍, 柴发合, 魏强. 北京市冬季气溶胶粒子尺度谱分布研究. *安全与环境学报*, 2006, 6(1): 80-84.
- [5] Weher B, Wiedensohler A. Long term measurements of submicrometer urban aerosols: Statistical analysis for correlations with meteorological conditions and trace gases. *Atmos Chem Phys*, 2003, 3: 867-879.
- [6] Hussein T, Puustinen A, Aalto P P, et al. Urban aerosol number size distributions. *Atmos Chem Phys*, 2004, 4: 391-411.
- [7] Woo K S, Chen D R, Pui D Y H, et al. Measurement of Atlanta aerosol size distributions: Observation of ultrafine particle events. *J Aerosol Science and Technology*, 2001, 34(1): 75-87.
- [8] Birmili W, Wiedensohler A, Heintzenberg J. Atmospheric particle number size distribution in central Europe: Statistical relations to air masses and meteorology. *Geophys Res*, 2001, 106: 32005-32018.
- [9] Kulmala M, RannikÜ, Pirjola L, et al. Characterization of atmospheric trace gases and aerosol composition at forest sites in southern and northern Finland using back trajectories. *Bor Env Res*, 2000, 5: 315-336.
- [10] Mäkelä J M, Hämeri K, Väkevä M, et al. On the spatial scale of the new aerosol particle formation in southern Finland. *Journal of Aerosol Science*, 1998, 29: S215- S216.
- [11] Väkevä M, Hämeri K, Mäkelä J. Effects of meteorological processes on aerosol particle size distribution in an urban background area. *Journal of Geophysical Res*, 2000, 105: 9807-9821.
- [12] Venzac H, Sellegri K, Villani P, et al. Seasonal variation of aerosol size distributions in the free troposphere and residual layer at the puy de Dome station, France. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 1465-1478.
- [13] Boy M, Kulmala M. Nucleation events in the continental boundary layer: Influence of physical and meteorological parameters. *Atmos Chem Phys*, 2002, 2(1):1-16.
- [14] 张仁健, 王明星, 等. 北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究. *气候与环境研究*, 2003, 5(1): 5-88.
- [15] 胡敏, 刘尚, 吴志军, 等. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响. *环境科学*, 2006, 27(11): 2293-2298.
- [16] Shen X J, Sun J Y, Zhang Y M, et al. First long-term study of particle number size distributions and new particle formation events of regional aerosol in the North China Plain. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 1565-1580.
- [17] Dal Maso M, Kulmala M, Riipinen I, et al. Formation and growth of fresh atmospheric aerosols: Eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland. *Boreal Environment Research*, 2005, 10(5): 323-336.
- [18] Draxler R R, Hess G D. An overview of Hysplit_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, 47: 295-308.
- [19] Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *J Geophys Res*, 2001, 20: 255-273.

北京城市气象观测试验进展

李炬 窦军霞

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要: 2004年以来, 北京地区开展了一系列城市气象观测试验, 试验涉及城市边界层观测、城市暴雨适应性观测、复杂地形和城市局地环流观测、城市通量和能量平衡观测以及城市热环境观测。研究内容包括城市边界层结构、城市强降水可预报性、山谷风环流、海陆风环流、城市热岛环流、城市地表能量平衡、人为热估计和城市热岛时空分布特征等。通过观测试验, 揭示了北京地区城乡边界层结构特征和差异、强降水条件下的边界层结构、城乡地表能量平衡特征以及京津冀地区复杂的局地性环流特征。在大城市强降水的可预报性上, 利用适应性观测方法进行了尝试, 取得了一些初步的成果。利用固定点加密观测结合流动观测的方法, 获取了城市CBD的精细热岛分布。这些观测试验及其研究成果, 对于研究复杂地形条件下的大城市和城市群的气象问题, 具有很好的参考价值。

关键词: 城市气象, 外场观测试验, 适应性观测, 城市边界层, 城市热岛

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.005

Progress in Urban Meteorological Experiments in Beijing

Li Ju, Dou Junxia

(Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089)

Abstract: This paper reviews urban meteorological experiments conducted in the city of Beijing since 2004. The series of experiments related to urban boundary observation, adaptive observations on urban torrential rain, local circulation observation, urban flux and energy balance observation, and urban thermal environment observations, which are aiming at urban boundary layer structures, predictability of torrential rain, mountain-valley breeze, sea breeze, urban heat island circulation, urban surface energy balance, anthropochory heat estimation, and urban heat island spatial-temporal variations. These experiments revealed characteristics of urban-rural boundary layer, boundary layer structures in rainstorms, urban-rural energy balance and complex local wind systems in Beijing-Tianjin-Hebei region. For predictability of rainstorms in mega-city, methods of THORPEX are tested with some preliminary results. Using densely fixed stations and mobile observation, a high resolution UHI distribution in CBD of the city is observed. The experiences and results of these experiments will be helpful and valuable for studying urban meteorology in a big city and city clusters with complex terrain.

Keywords: urban meteorology, field campaign, adaptive observation, urban boundary layer, urban heat island

1 引言

城市大气条件和过程的观测是提高城市天气气候认识的基础。自1820年Luke Howard首次利用温度直接观测研究城市气候和城市热岛以来, 城市气象观测已有近200年的历史^[1]。针对城市气象和城市环境问题, 国际上比较有代表性的综合观测试验和计划有: 法国UBL/ESCOMPTE-CLU试验(马赛)^[2]、希腊MEDCAPHOT-TRACE试验(雅典)^[3]、欧盟COST研究计划^[4]、美国URBAN 2000(盐湖城)^[5]、美国CAP-

LTER(凤凰城)^[6]、美国Joint Urban 2003(俄克拉荷马)^[7]、英国的PUMA(伯明翰)^①、瑞典BUBBLE(巴塞尔)^[8]、日本COSMO试验^[9]、墨西哥MIRAGE(墨西哥城)^②等。这些观测试验涉及: 城市地表参数的获取(反照率、粗糙度、湿参数)、地表能量平衡、城市边界层结构、城市热岛效应(UHI)、城市环流与中尺度局地环流相互作用、城市对降水的影响和城市空气污染等内容。这些研究提升了对城市影响天气、气候的机理以及城市空气质量问题的认识水平。WMO在全球开展了一系列城市气象和环境研究(GURME)^③项目, 主要针对空气质量及其相关的气象观测, 项目包括: 北京大气环境污染控制机制

收稿日期: 2013年5月30日; 修回日期: 2013年9月3日

第一作者: 李炬(1971-), Email: jli@ium.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106050);
北京市朝阳区科技计划项目(KC1103); 国家
科技支撑计划(2008BAC37B02)

① <http://urgent.nerc.ac.uk/Air/Projpages/A1.htm>

② <http://urgent.nerc.ac.uk/Air/Projpages/A1.htm>

③ <http://mce2.org/wmogurme/>

研究项目、莫斯科超大城市可持续发展气象服务、用被动采样仪进行空气质量观测（美国NOAA）、拉丁美洲城市空气质量预报的改进以及上海城市气象和环境研究示范。在国内，大规模的城市气象观测和试验主要集中在2000年之后，2001—2003年北京开展的大气边界层动力、热力、化学综合观测试验（BECAPEX），获取了北京城市大气动力和大气化学三维结构特征^[10]；长江三角洲地区低层大气物理化学过程及其与生态系统的相互作用研究项目在长江三角洲地区开展了水、热与物质通量输送和转化的综合观测试验^[11]；南京市城市边界层观测^[12]与我国东部大规模城市化的气候效应及对策研究在长三角城市群区，针对地表物理特性、陆面过程、城市冠层和大气边界层、大气污染物及其辐射特性等开展了多过程的协同强化观测试验。

针对北京城市的气象观测和研究不仅起步早、数量多，而且受到更多的关注。本文主要介绍了2004年以来，在北京及周边开展的城市气象观测试验的情况和相关进展。这些观测试验，涉及城市边界层观测、城市暴雨适应性观测、局地环流观测、通量观测和城市热环境观测等。

2 北京地区城市气象观测试验

2.1 北京城市边界层观测试验

城市区域复杂的下垫面性质，突出的非均匀性和建筑物导致的高粗糙度，其辐射性质、热容量、含水量、粗糙度等热力、动力学性质均与一般的自然

地理环境有很大的差异，形成了城市区域特殊的大气边界层结构。城市复杂下垫面与大气边界层相互作用研究，近年来已成为大气科学研究的一个重要方面。2004、2005年夏季，中国气象局北京城市气象研究所开展了北京城市大气边界层和复杂下垫面的能量收支的综合观测试验研究。2004年夏季观测主要针对城乡边界层结构进行观测。自北向南，分别在西三旗（郊区）、宝莲体育公园（城区）、南郊观象台（郊区）布设了3台风廓线雷达，同时在每个观测点进行每天6~8次的系留艇探空。在城区站还利用激光雷达进行边界层高度的连续探测（图1和表1）。期间，南郊观象台进行了每日4次的加密无线电探空观测。

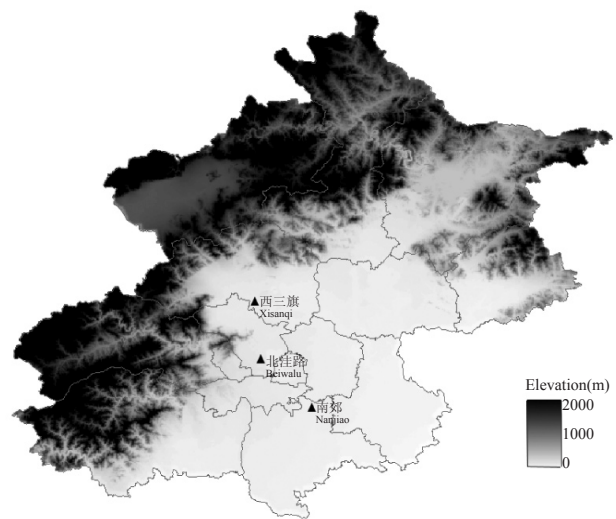


图1 观测站点（2004年夏季）

表1 观测站点和仪器列表

测量仪器	仪器型号	测量要素	观测地点	时间	观测频次	有效观测次数
系留艇	VAISALA TTS111	水平风速和风向、气压、气温、相对湿度、比湿	西三旗	2004年7月31日—8月31日	每日6~8次，遇雨和大风停测	212
留艇	VAISALA TTS111	水平风速和风向、气压、气温、相对湿度、比湿	北洼路	2004年7月31日—8月31日	每日6~8次，遇雨和大风停测	247
系留艇	AIR TS-2A	水平风速和风向、气压、气温、相对湿度、比湿	南郊	2004年7月31日—8月31日	每日6~8次，遇雨和大风停测	216
风廓线雷达	Airda-3000车载边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	西三旗	2004年7月31日—8月31日	连续观测	
风廓线雷达	23所边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	北洼路	2004年7月31日—8月31日	连续观测	
风廓线雷达	14所对流层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	南郊	2004年7月31日—8月31日	连续观测	
涡动相关	CSAT3、LICOR7500	脉动量 (u, v, w, H_2O, CO_2), 四分量辐射、净辐射、感热通量、潜热通量、土壤热通量	北洼路	2004年7月31日—8月31日	连续观测	
激光雷达	安光所便携式米散射激光雷达	气溶胶后向散射强度、消光系数、边界层高度	北洼路	2004年8月1日—9月3日	整点探测，每小时1次，加密期间每半小时1次，遇雨停测	
系留艇	VAISALA TS-5A	水平风速和风向、气压、气温、相对湿度、比湿、 O_3	北洼路	2005年8月3—31日	每日2次，遇雨和大风停测	35
风廓线雷达	Airda-3000边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	房山	2005年7月18日—9月14日	连续观测	
风廓线雷达	Airda-3000边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	北洼路	2005年7月19日—9月26日	连续观测	
风廓线雷达	Airda-3000边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	通州	2005年7月28日—9月16日	连续观测	
风廓线雷达	14所对流层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	南郊	2005年7月27日—9月16日	连续观测	
地基微波辐射计	TP/WVP-3000	温度、湿度、液态水	南郊	2005年8月1日—9月30日	连续观测	

这次观测试验, 获得了大量的边界层风、温、湿观测资料。利用探测资料, 对夜间边界层低空急流进行了研究, 初步揭示了北京地区边界层低空急流的特征^[13]。30%的夜间观测记录出现了低空急流。急流平均高度为200m, 最大出现频率在140m左右, 90%急流出现在320m以下。W、SW、SE是夜间低空急流的主要风向(图2)。不同观测地点低空急流在速度、风向和高度上存在着明显差异。城区低空急流高度大部分时间比郊区高。在夜间稳定边界层条件下, 低空急流与局地山谷风环流强弱变化有很好的相关。进一步的成因分析认为, 斜坡地形产生的热成风、山谷环流可能是北京夏季夜间低空急流形成的主要原因。

为获取城区大气边界层结构演变特征, 利用便携式米散射激光雷达在北洼路进行连续观测。观测数据显示: 北京城区夏季大气边界层高度相对稳定, 多分布在1.8km以下, 平均值为0.68km; 大气边界层内存在浓度较高的气溶胶粒子, 平均光学厚度(3km以内)在0.30左右^[14]。

2005年观测是对2004年观测的延续和补充。主

要的探测仪器设备是4台边界层风廓线雷达、1台地基微波辐射计、1个系留艇(表1)。观测的目的是捕捉强天气条件城市边界层精细的热力和动力结构。在观测期间, 捕捉到了数次强降水天气过程。通过对强降水个例的观测资料进行分析, 发现降水前十几小时就会出现双层低空急流, 急流层内结构复杂, 呈现多中心结构^[15]。这些精细的温度、水汽、风的垂直观测资料, 有助于理解和解释暴雨系统的演变。为了解北京城市O₃的垂直分布特征, 还利用系留艇对臭氧的垂直分布进行了观测。

2.2 环北京夏季暴雨适应性外场观测试验

城市对高影响天气造成灾害的“放大”效应已被广为认识。一些极端天气在城市出现, 往往会造成城市运行的混乱, 并带来巨大的财产损失, 提高城市高影响天气的预报准确率被世界气象组织视为21世纪具有社会影响力与科学挑战的重要问题之一^①。2009和2010年, 针对北京夏季暴雨预报难题, 中国气象局北京城市气象研究所联合北京区域气象中心五省(区、

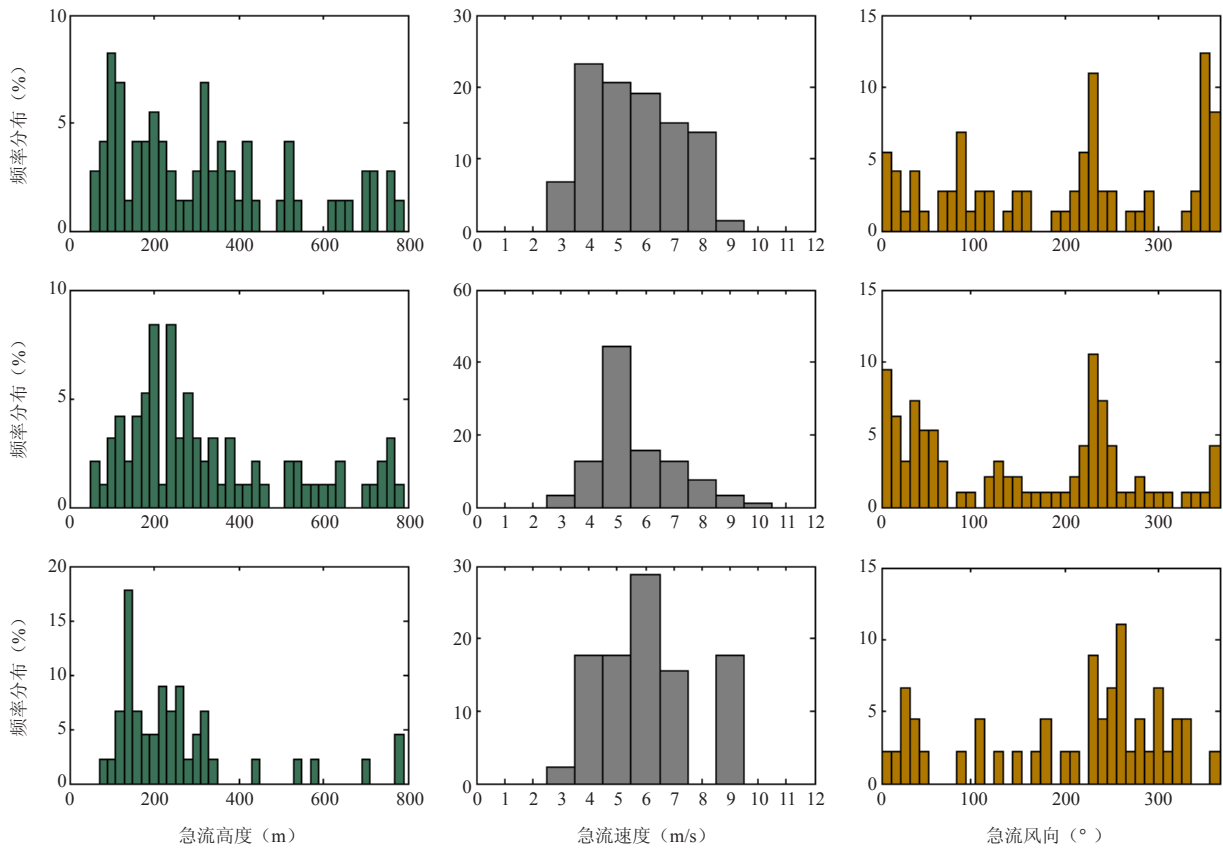


图2 基于2004年夏季观测资料统计的西三旗(第一行)、北洼路(第二行)和南郊(第三行)的急流高度、急流速度、急流风向出现频率分布

① 《观测系统研究与可预报性试验中国计划(THORPEX-China)(版本1.0)》, <http://www.thorpexchina.org.cn/Website/index.php?ChannelID=4&NewsID=15>

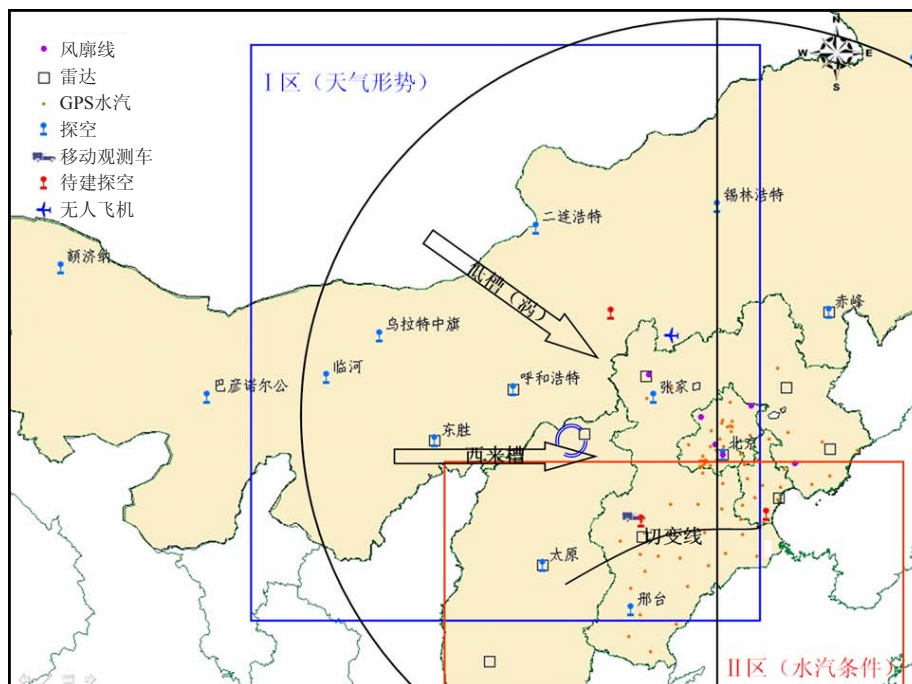


图3 观测仪器和布点 (2009年7—8月)

市)气象局、中国科学院大气物理研究所、中国气象局气象探测中心等单位,开展了环北京夏季暴雨适应性外场观测试验,针对高影响天气对其上游地区预报敏感区域实施加密观测,旨在将这些资料同化到数值模式中,提高该高影响天气数值预报水平。

试验的主要目标是:在北京夏季24h内暴雨预报的上游敏感区采用GPS探空、无人驾驶大气探测飞机等技术手段进行空间加密,结合对现有气象站网进行时间加密的方法,建成环北京夏季暴雨适应性观测系统与实施目标观测的指挥系统。对北京地区近10年来暴雨资料进行了统计分析,确定了影响北京夏季暴雨的主要天气型、关键区和关键观测要素。在此基础上,对主要的影响天气系统,设计了针对关键区和关键观测要素的观测布局方案。2009年7—8月,包括内蒙古、山西、河北、北京、天津在内的广大地区,开

展了以探空观测为主的加密观测和针对降水过程的加强观测(图3)。根据数值预报结果,在天气系统移动路径上依次启动加密探空(每天6次/8次)。探空观测站详细信息见表2。除固定探空站点观测外,还试验了机动观测:利用无人气象观测飞机在内蒙古太仆寺旗草原择机进行了多次下投探空试验,试验包括:无人挂载下投探空仪试验;降水天气条件适应性飞行试验;下投探空探测试验;利用L波段移动探空雷达车快速机动到山西山阴进行了探空加强观测。

利用条件非线性最优扰动方法(CNOP)^[16]和采用集合预报相关方法对2009年观测到的降水个例进行了敏感区诊断研究。对2009年7月23日北京地区强降水个例进行了分析(图4),对于直接影响系统为飚线的局地强对过程,暴雨发生前24h敏感区中的探空观测的同化,能够在模式中形成更加有利于飚线形

表2 环北京暴雨观测探空观测站

站号	站名	经度(°E)	纬度(°N)	海拔高度(m)	观测频次	观测频次	探空仪类型	备注
					(加密观测期)	(加强观测期)		
53068	内蒙古二连浩特	111.97	43.65	971	3次/d	6次/d	L波段	业务探空站
53463	内蒙古呼和浩特	111.68	40.82	1065	3次/d	6次/d	L波段	业务探空站
54102	内蒙古锡林浩特	116.3	44.13	1012	3次/d	6次/d	L波段	业务探空站
54543	内蒙古东胜	109.98	39.83	1462	3次/d	6次/d	L波段	业务探空站
53513	内蒙古临河	107.42	40.75	1039	3次/d	6次/d	59-701	业务探空站
53772	山西太原	112.55	37.78	790	3次/d	6次/d	400M-701	业务探空站
	内蒙古镶黄旗	113.83	42.23	1322	3次/d	8次/d	RS-92	新增临时探空站
	天津大港	117.48	38.15	7	3次/d	8次/d	RS-92	新增临时探空站
	山西山阴	112.805	39.535	1105		8次/d	L波段	车载移动探空

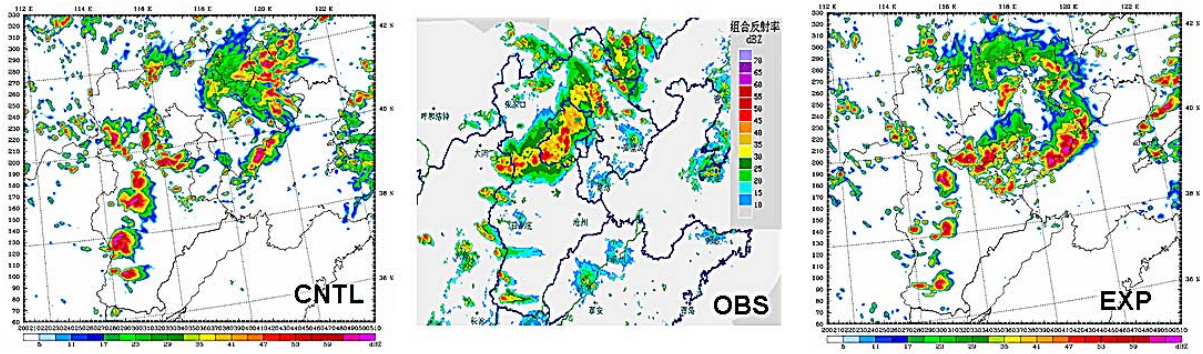


图4 敏感区观测资料同化效果检验
(CNTL: 控制试验不加观测资料; OBS: 雷达反射率; EXP: 同化敏感区内的1个探空资料)

成和发展的环境条件，这与OSSE试验结果类似，证明在敏感区进行目标观测确能改进预报效果。

在2009年观测和分析的基础上，2010年夏季结合预报的敏感区对降水进行了实际的目标观测试验。基于敏感区的理论计算区域，采用固定站点时间加密观测和移动观测相结合的方式，在敏感区内及附近的业务探空站进行时间加密观测，在敏感区内及附近的合适地点增加机动观测。针对2010年8月18日的降水过程，利用河北邢台、张家口、内蒙古呼和浩特3个业务探空站进行了8次加密观测。这次试验取得了一定的效果，为检验和改进目标观测系统提供了很好的机会。

2.3 京津冀城市群边界层综合观测试验

我国是当今世界上城市化发展规模最大、速度最快的地区之一。城市面积扩展迅速，特别是城市群发展速度之快，在世界城市发展史上是罕见的，其中尤以长江三角洲、珠江三角洲和京津冀地区三大城市群的迅猛发展为代表。从水平范围在几十千米量级的单个城市到几百千米量级的城市群，城市对局地天气、气候的影响愈加明显。京津冀地区处于华北平原，东临渤海，西部是太行山山脉余脉的西山，北部是燕山山脉的军都山，两山在南口关沟相交，形成一个向东南展开的半圆形大山弯，通常称之为“北京湾”。复杂的地理环境导致了海陆风、山谷风以及城市热岛作用产生的城市环流，这些中小尺度的局地系

统对该地区的强降水、雾霾等高影响天气产生着重要的影响。为深入了解城市群复杂下垫面在高影响天气的形成、发展和衰减过程中所起的重要作用，国家科技支撑计划“京津冀城市群高影响天气预报中的关键技术研究”围绕京津冀城市（群）局地环流及其对城市高影响天气过程影响开展了综合观测科学试验，重点对城市（群）山谷风环流、热岛环流和海陆风环流及边界层结构进行观测。从渤海湾（天津大港）到太行山脉与燕山山脉交汇处（北京小汤山），共布设了7台边界层风廓线雷达进行同步观测（图5）。该区域还有北京（325m）、天津（255m）2座气象塔。观测时间为2010年7—8月，为期2个月。

观测结果表明，北京存在明显的山地—平原风环流。由于所处地理位置不同，小汤山、海淀、南

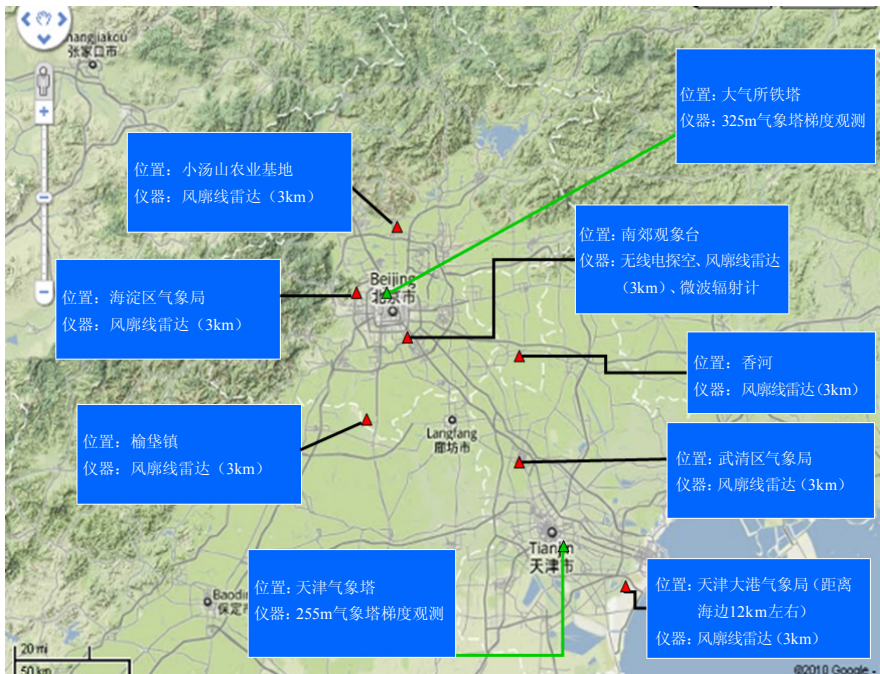


图5 京津冀城市群边界层综合观测试验仪器布点

郊观象台和榆垓的主导风向有所不同。山地平原风环流的厚度也有所不同，小汤山、南郊观象台和榆垓山地—平原风环流的厚度分别约为1500、650和550m，同时有个例分析表明，平原风的厚度可达1400~1700m。北京山地—平原风的水平范围几乎可覆盖北京整个平原地区。天津大港的风廓线雷达观测数据显示，大港300m以下中午至傍晚为东南风，其余时段为东北风，表现为较明显的海陆风环流。400~1950m以上，白天风速较小，表现为偏北风；夜间风速较大，表现为东北风。根据天津武清的风廓线雷达资料，武清的海陆风环流不明显。300m以下上午表现为西北风，下午表现为西南风。白天风速较小，夜间风速较大，表现为东北风。400~1050m夜间及上午均为东北风，下午表现为微弱的西南风。从天津大港和武清的海陆风日来看，海风的厚度大概就在300m左右。图6(a、c)为WRF模拟的2010年8月6日02和06时风场沿(116.084°E, 40.13609°N)和(117.8276°E, 38.51733°N)的垂直剖面图，其中横坐标第8、16、38和62点分别近似代表海淀、南郊

观象台、武清和大港，右为风廓线雷达观测的风廓线。数值模式的结果与地面实测风场、温度场以及风廓线雷达的观测结果有较好的一致性。从模拟结果来看，海风可以到达北京地区，甚至可达北京市区。海风一般在下午产生，但是个例模拟结果也表明，海风也有可能在10时产生。

2.4 京津城市复杂下垫面通量和能量平衡观测

在大气边界层中，湍流运动是能量、物质和水分输送的载体，湍流通量一直是城市边界层综合观测试验中的基本组成部分。自20世纪90年代后半叶以来，涡度相关技术开始被广泛地应用于大气、陆面、遥感、生态等多个学科领域，并被认为是获取湍流通量的最优方法^[17]。该方法能够较准确地估计出地表与大气间的湍流交换量，对大气模式，特别是陆面模式的检验和发展、遥感产品的地面验证等都具有非常重要的作用^[18]。中国气象局北京城市气象研究所充分利用京津科研设备和资源，利用涡动相关仪器在北京和天津的市区、城郊结合区和远郊同步开展通量观测，探讨用地属性、土地覆盖类型及所占比例以及建筑物的

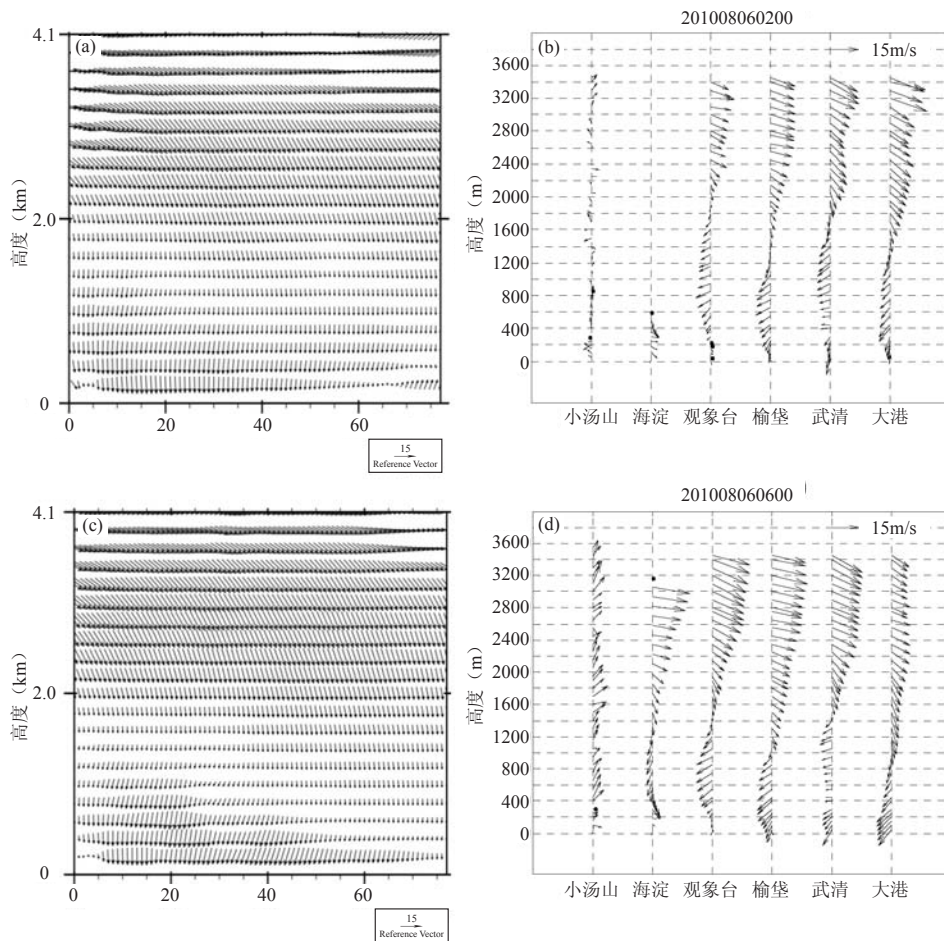


图6 2010年8月6日02和06时WRF模拟结果与风廓线雷达观测对比

表3 京津城市通量观测站仪器设置

地理位置	土地利用类型	铁塔高度(m)	观测高度(m)	物理量	仪器名称	仪器型号	采样频率	观测时间
中国科学院大气物理研究所LAPC	市内	325	47、140、280					2009年7月至今
顺义区气象局	城郊结合区	45	36	三维风速和温度 水汽/CO ₂ 向上/ 向下的长/短波 辐射	超声风速温度仪 CO ₂ /H ₂ O分析仪 四分量辐射表	CSAT3 LI-7500 CNR1	水汽/CO ₂ 、 三维风速和温 度: 10Hz; 辐 射: 1/min	2007年7月至今
密云县气象局	城郊结合区	38	36					2011年9月至今
上甸子	远郊	80	63					2011年7月至今
小汤山	远郊	10.2	9					2008年5月—2010年4月
天津气象塔	市内	255	40、120、220					2010年5月至今
天津武清	城郊	38	36					2011年7月至今

高度、布局等因素对湍流通量的影响过程、影响机制和影响程度。在此基础上,以观测值检验城市冠层/陆面模式参数化方案的计算结果,并改进、完善参数化方案;进而通过Noah/SLUCM陆面模式,检验其对城市地表能量平衡各分量的模拟效果。以期能为改善城市冠层/陆面模式物理过程,提高城市数值天气预报精度,以及城市化进程对天气、气候的影响提供科学依据。试验选择位于北京和天津的市区、城郊结合区以及郊区的7个地点建立通量观测站点,利用各站点的气象观测塔搭载涡度相关仪和气象梯度观测系统仪器开展观测,各通量观测站点的位置和仪器设置情况(表3)。

利用位于北京市北三环与北四环之间325m气象塔上140m高度的湍流观测资料,对该区域2009年6月—2011年12月共919d二氧化碳(CO₂)通量的时间变化及各方位的分布特征进行了分析研究,并计算了CO₂年排放量(图7)。结果表明,CO₂通量受交通因素影响明显,各季节CO₂通量日间早、晚峰值与车流量高峰时间相对应,这一特征在冬季表现尤为突出。冬季消耗能源取暖会显著增加CO₂的排放量;受供暖排放和植物休眠的影响,冬季CO₂通量值全天均高于其他季节,其日平均值为30.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著高于春、夏、秋季的日平均值15.2、17.9和15.8 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (*t*-test, *P*<0.001)。

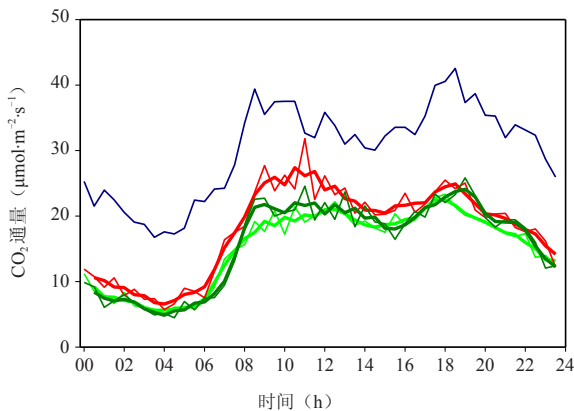


图7 2009年6月—2011年12月春(浅绿色)、夏(红色)、秋(深绿色)、冬(深蓝色)季节CO₂通量日变化特征(细线条代表日平均值,粗线条表示3点滑动平均)

CO₂通量在各方位的分布特征表明,源区内人工建筑面积所占比例越大,CO₂通量值越高,而植被覆盖比例较高的方位,其CO₂通量值相应较小。观测点附近区域是CO₂的排放源,且年平均排放量达到30.0 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,但仍小于伦敦的年排放量35.5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [19]。在北京高密度住宅区CO₂通量观测的基础上,可以对人为热总量以及人为热来自汽车排放、居民日常生活耗电和燃烧天然气排放、冬季取暖排放以及人体新陈代谢产生的热量进行计算。结果表明,汽车行驶产生的人为热在冬夏两季节人为热日总量中均占有较大比例;此外,供暖产生的人为热是冬季人为热总量高于夏季的重要原因。

利用位于北京325m气象塔(城区)上140m高度的以及顺义通量观测站点(郊区)36m高度的湍流观测资料,对这两个站点的辐射和能量平衡各分量的数值大小、时间变化规律以及能量分配特征等进行了分析研究。结果表明,夏、冬季节,白天郊区净辐射值小于城区,但夜间高于城区,郊区的净辐射日平均值总小于城区,且冬季差异较大。郊区夏、冬季节昼间的反射率总高于城区。在能量的分配中,夏季潜热通量占了最大比例,但冬季所占比例最小。在郊区观测站点(顺义),显热通量在净辐射中所占比例夏、冬季节总高于热贮量所占比例,但城区(大气所铁塔)情况不同,其冬季时是热贮量所占比例最高。

2.5 北京中央商务区(CBD)热环境观测

城市热岛效应是人类活动对气候系统产生的最显著的城市气候效应。在我国城市化进程已到了前所未有的高度的背景下,定量研究城市功能区热环境的时空演变特征,制定相应的城市高温热环境防范和改善措施已成为城市可持续发展的一项重要任务。通过开展城市热岛效应的观测和研究不仅对认识城市微气候特征及边界层现象等具有重要价值,而且在城市建筑设计、城市规划、城市环境保护、生态城市建设、城市能源利用和城市居民生活健康等方面都具有重要的现实意义。中国气象局北京城市气象研究所、朝阳区气象局等多家单位联合,从2011年开始在北京CBD地

区开展了流动观测结合固定观测的城市热环境观测。在北京CBD一块 $1.47\text{km} \times 0.88\text{km}$ 区域内，建立了32个温湿度观测站（图8）。同时，利用电动自行车，开展了对该区域进行热环境流动观测（每季度至少1次）。将便携式温湿传感器、GPS等设备安装在电动自行车上，在试验区内分2组同时进行流动测量。温湿度、经纬度坐标每秒钟采集1次，每次测量约1h，测量范围覆盖整个试验区。观测试验表明电动自行车可以胜任在较小的城市区域开展流动观测。与常见的汽车流动观测相比，电动自行车具有自身不发热、机动灵活性强、道路适应能力强等优点。

基于一年的固定观测资料分析结果表明：CBD观测试验区2012年夏、冬季各月平均气温分布特征比较稳定，绿地覆盖的小区、公园夏季平均气温较低，而主要路段交叉点和高层建筑密集区为气温高值中心。夏季平均气温的高值中心较低值中心偏高 1.0°C 左右；冬季，平均气温的低值中心较高值中心偏低 0.6°C 左右。下垫面类型和人为热排放等差异是影响北京CBD观测试验区近地面气温空间分布的主要原因。夏、冬季CBD观测试验区与朝阳站之间的地面气温差值即附加城市热岛效应周内变化具有明显的时间特征，清晨05时CBD观测试验区附加城市热岛效应很明显，夜间均比白天强、冬季比夏季明显，周六夜间均出现一个峰值，周内最高、最低及平均气温差有类似分布趋势，工作日温差高于非工作日温差，呈现出

“周末效应”。CBD观测试验区夏、冬季平均附加城市热岛效应在一天24h内存在明显的时间变化特征。CBD观测试验区夏、冬季逐小时的平均气温均高于朝阳站，且夜间差别较大、日间差别较小。附加城市热岛强度在夜间维持较大值，日出后强度急剧下降，最低值出现在14时附近，日落后附加城市热岛强度开始增大，至午夜左右达到峰值。夏季上午UHI剧烈变化开始时间早于冬季，分析主要原因是由于冬季日出较晚，太阳辐射影响时间滞后造成的；中午时段，冬季UHI强度比夏季弱。

不同天气条件下（图9），CBD区域UHI空间分布特征均比较一致，并表现为白天弱夜间强，UHI强度最高出现在夏季晴好、微风少云天气条件下，最高值达 4.3°C ；多云、阴天天气条件下，UHI在白天和夜间均较弱；降水天气条件下，UHI昼夜差异最小，说明太阳辐射对UHI强度的影响起到关键作用。多云阴天、降水、雾霾天气条件增加了对太阳辐射的遮挡以及城区人为热排放等原因，造成冬季UHI强度普遍高于夏季，且夜间更为明显。不同降水相态对UHI的影响不同，冬季降雪对UHI强度影响较夏季降雨天气更为突出，雾霾天气条件下，CBD区域UHI强度冬季明显高于夏季。不同天气条件下CBD区域UHI表现不同，城市下垫面特征对UHI强度影响较大，夏、冬季UHI空间分布基本一致。从UHI效应差异分析结果看，下垫面条件、日照和太阳辐射、风力、能见度、

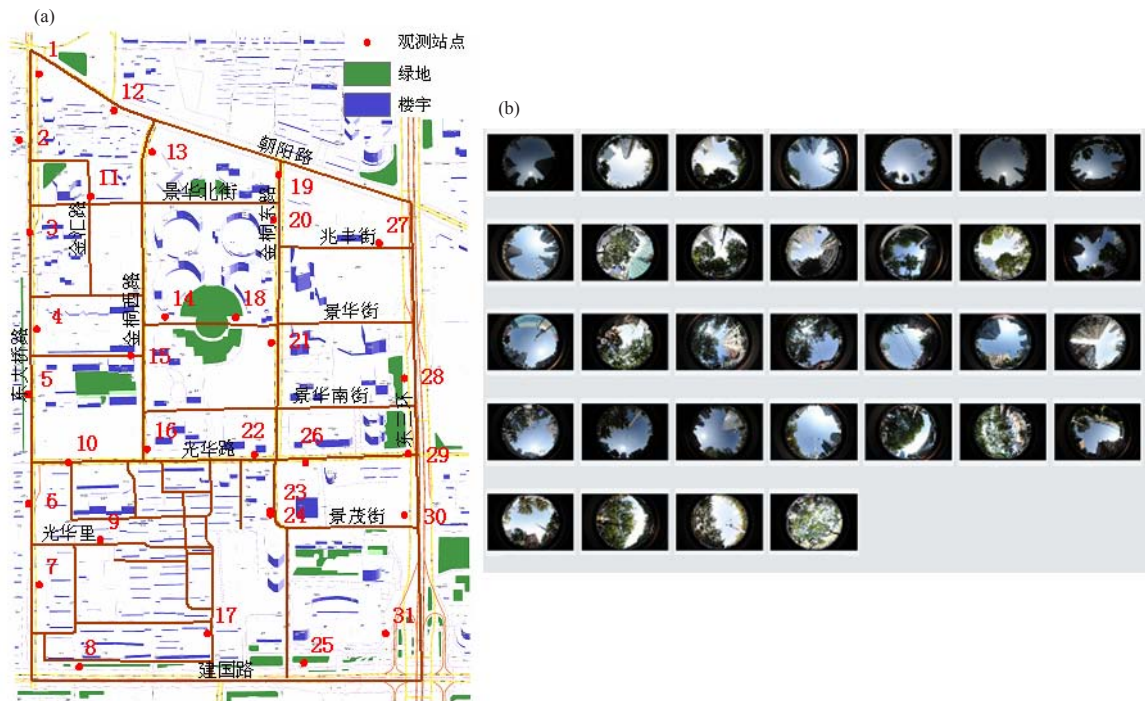


图8 北京CBD观测试验区下垫面特征及其测点分布
(a) 试验观测区下垫面特征及其测点分布；(b) 观测点天穹可见图（鱼眼图）

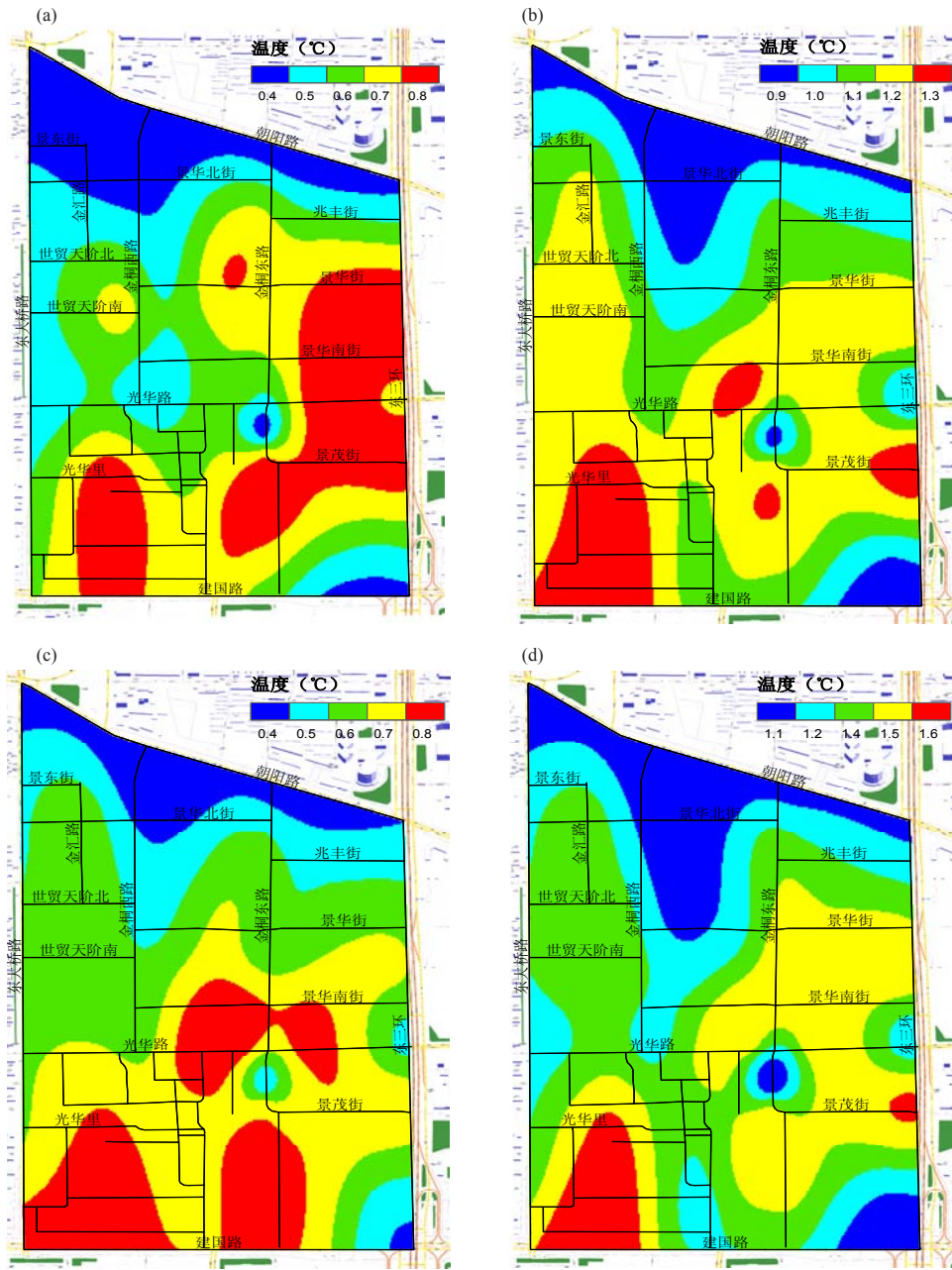


图9 冬季不同天气条件下CBD区域附加城市热岛效应空间分布
(a) 晴好微风少云天气; (b) 多云阴天天气; (c) 降水天气; (d) 雾霾天气

空气湿度、人类热释放、冬季城市供暖等对UHI效应均有影响，但不同天气条件下，各个因子的影响程度具有明显差异。

3 讨论和展望

本文介绍了近年来在北京开展的城市气象观测试验，目的之一是让更多的学者了解相关的试验情况，进而对观测试验取得的大量观测数据进行深入应用和挖掘。同时，这些观测试验对于研究与北京类似的、处于复杂地形条件下的超大城市的气象和环境问题，

也有很好的借鉴意义。在北京开展了一系列的城市气象观测试验，观测针对和涉及的主要目标有：城市对其上大气的影响作用（城市热岛、城市冠层水热通量和平衡、城市边界层结构），提高城市强降水的预报，城市群局地环流及其与高影响天气相互作用。观测尺度从街道、小区到城市和城市群，垂直方向覆盖了整个城市边界层。综观国内外城市气象观测研究，大致可以看到城市气象观测呈现出四个发展趋势：观测从描述城市大气基本状态到更多关注地气之间的能

量和物质交换；研究尺度上强调对不同尺度进行观测和研究；新科技推动了对城市地气相互作用的观测，新的传感器、新技术和新方法被大量采用；观测上更多地采用业务观测和科研观测相结合的方式，力争获取较长时间的观测资料。

如进一步细致分析，国内外城市气象观测试验存在很多差异。（1）与国外城市气象观测和试验相比^[1]，国内观测和试验更多面向当前城市气象业务和服务需求。国外则更多与城市气象、边界层理论和机理研究相结合。国内的观测试验在规模上不逊于国外，但在学术界的知名度和影响力却远不及国外。

（2）从试验的参与者来看，国外此类试验往往会聚集众多的研究部门、学校、政府部门甚至公司的参与，观测资料和仪器资源往往可以实现很好的共享。而国内不仅参与者少，且在资源和资料互惠和共享上很难做好。国外知名的观测试验，往往具有国际特点，即参与者来自多个国家和组织。国内在开展国际性的观测试验方面，尚缺乏足够的经验和尝试。

（3）国外的观测试验在设计之初，就有很高的参与度。参加试验各方能够结合自身需求和条件，对观测试验设计提出意见，有效保证了观测试验在研究上的深度和涉及研究领域的广度（包含各类参与者的需求）。而国内的观测试验，在前期的设计时，往往参与度就不够，留给试验设计和筹备的时间也太短。有可能导致对研究问题缺乏足够细致和深入的考虑，从而影响观测试验最终的成果和效果。（4）国内观测试验获取的数据，由于各种因素的制约，不能为更多的研究者共享。这些情况，导致国内观测试验无论是成果和论文数量还是影响力均无法与国外相比，也是今后我们开展类似观测试验应当注意和改进的。

当前，如何提高城市应对极端天气的弹性和防御能力，减少气象灾害损失，减缓城市热岛效应，改善空气质量等问题，是政府和民众所关心的热点问题。不仅是我国各大城市，全球很多城市也面临着类似的问题。最近，日本^①和英国^②开展了一些针对提高城市应对极端天气灾害弹性能力的计划。日本正在开展东京都市圈强对流观测试验（TOMACS），力图利用稠密的多种探测手段协同的观测网络对影响广、危害大的强对流天气进行观测。这些观测试验的特点是，将对灾害性天气观测、短时临近预报以及社会应对措

施研究作为一个有机整体相结合，更加强调科研成果的实用性。这给我们今后的工作带来了重要的启示。未来的城市气象观测，不仅为学术研究提供观测数据和事实，而且将更积极地参与从科研到服务和决策的“端到端”的整个研究计划和工作中去。

参考文献

- [1] Grimmond C S B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 84: 3-22.
- [2] Mestayer P G, et al. The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE): Set-up and first results. *Bound-Layer Meteorol*, 2005, 114: 315-365.
- [3] Ziomas I C. The Mediterranean campaign of photochemical tracers transport and chemical evolution (MEDCAPHOT-TRACE): An outline. *Atmos Environ*, 1998, 32: 2045-2053.
- [4] Fisher B, Kukkonen J, Schatzmann M. Meteorology applied to urban air pollution problems: COST 715. *Int J Environ Pollution*, 2001, 16: 560-570.
- [5] Allwine K J, Shinn J H, Streit G E, et al. Overview of URBAN 2000: A multiscale field study of dispersion through an urban environment. *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83: 521-536.
- [6] Brazel A, Selover N, Vose R, et al. The tale of two climates-Baltimore and Phoenix urban LTER sites. *Climate Research*, 2000, 15: 123-135.
- [7] Allwine K J, Flaherty J E. Joint Urban 2003: Study overview and instrument locations. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2006.
- [8] Rotach M W, et al. BUBBLE - An urban boundary layer project. *Theor Appl Climatol*, 2005, 81: 231-261.
- [9] Kawai T, Kanda M, Takashima A, et al. Outdoor scale model experiments for the evaluation of urban modeling studies. Sixth Symposium on the Urban Environment, Atlanta, GA, 29 January-2 February, 2006. Boston: American Meteorological Society, 2006.
- [10] 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 等. BECAPEX科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响. *气象学报*, 2004, 62: 663-671.
- [11] 罗云峰, 周小刚. 重大项目“长江三角洲低层大气物理化学过程及其与生态系统的相互作用”所取得的成果. *中国科学基金*, 2005, 19(1): 35-37.
- [12] 刘红年, 蒋维楣, 孙鉴泞, 等. 南京城市边界层微气象特征观测与分析. *南京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44: 99-106.
- [13] 李炬, 舒文军. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析. *地球物理学报*, 2008, 51: 360-368.
- [14] 王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层. *应用光学*, 2008, 29(1): 96-100.
- [15] 古红萍, 马舒庆, 王迎春, 等. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用. *气象科技*, 2008, 36(3): 300-304.
- [16] 穆穆, 王洪利, 周非凡, 等. 条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用. *大气科学*, 2007, 31(6): 1102-1112.
- [17] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9: 479-492.
- [18] Williams M, Richardson A D, Reichstein M, et al. Improving land surface models with FLUXNET data. *Biogeosciences*, 2009, 6: 1341-1359.
- [19] Grimmond C S B, Salmond J A, Oke T R, et al. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D24101.

① <http://www.mpsep.jp/english/index.html>

② <http://www.extreme-weather-impacts.net/twiki/bin/view>

国际生物气象学研究的新动态

——第十九届国际生物气象学年会综述

张书余¹ 罗斌²

(1 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020; 2 兰州大学, 兰州 730000)

摘要: 着重介绍国际生物气象学会第十九届年会人类生物气象学研讨的主要内容, 包括冷、热极端天气导致人类产生疾病, 甚至死亡的统计流行病学及机理, 环境气象指数及评估, 气象条件与健康及适应, 气源性过敏源与过敏性疾病等研究成果。对植物、动物生物气象学代表性报告做了一些介绍, 对人类生物气象学发展进行了展望。

关键词: 生物气象学, 冷暖空气, 环境气象指数, 死亡率, 评价

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.006

Recent Trends in International Biometeorology Study

——19th International Congress Summarization of Biometeorology

Zhang Shuyu¹, Luo Bin²

(1 Key Laboratories of Arid climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020 2 Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: The International Society of Biometeorology that hosts an international congress of biometeorology every 3 years was set up about 60 years ago. This paper introduced the major content of the 19th congress of biometeorology-human biometeorology. In that congress, human biometeorologists mainly discussed the epidemiological results and impacting mechanism of extreme cold and hot weather on human diseases and death, environmental meteorological indexes and their assessment, the relationship between meteorological condition and human health and weather adaption, air-borne allergens and allergic diseases, and so on. In addition, this paper also made a simple introduction of representative reports on plant and animal biometeorology. In the end, the development of human biometeorology was prospected.

Keywords: biometeorology, cold air and hot wave, environmental meteorological index, mortality, assessment

1 引言

第19届国际生物气象学年会于2011年12月4—8日在新西兰奥克兰大学举行, 由国际生物气象学会、世界气象组织、奥克兰理事会、Springer、新西兰国家农业气象中心及奥克兰大学主办和协办, 有超过200位来自于全球40多个国家的科学家参加并提交了218份研究论文。会议主题为“气候与社会”, 主要由3个专题研讨会(生物气候学、气候变化与适应; 炎热气候中气候对职业人群的影响; 气候变化、气源性致敏原与人类健康)和若干个涵括许多生物气象学范畴的墙报交流组成, 包括了全体参加及分会的形式组成。论文主要包括了天气气候、气候变化对人类、

动物及植物的影响研究。本文着重介绍年会中人类生物气象学的研讨内容。会议以澳大利亚国立大学教授 Tony McMichael关于两个科学“能或者应该, 两者相遇?”的故事开幕。McMichael教授也是2011年IPCC极端事件特别报告的首要作者, 他谈及了生物气象学的发展领域及前景。

2 往届国际生物气象学年会简介

1955年, Tromp博士在荷兰建立了生物气象研究中心^[1], 同年Tromp博士发起, 并于1956年1月正式成立了国际生物气象学会, 并获得国际上从事这门学科的100多位科学家的支持。目前, 国际生物气象学会涵盖了5个专业委员会, 分别是人类生物气象学、动物生物气象学、植物生物气象学、古生物气象学和宇宙生物气象学。每3年举行1次年会。1957年, 在维也纳召开了第一届国际生物气象年会, 主要研讨了生物气候人才培养方法, 生物气候学、生物气象学的试

收稿日期: 2013年6月24日; 修回日期: 2013年8月8日
第一作者: 张书余(1958—), Email: zhangsy@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY06034)

验与研究方法,人对热的适应及气候医疗等方面的问题。1960年,在伦敦召开了第二届国际生物气象年会,主要讨论了高山生物气候学,高山对人体的影响,热带生物气候学,皮肤、血管及心脏对热的反应,世界疾病的流行分布与生物气候分类的关系,人类生物气候区划及医疗气象预报等。第三届生物气象学年会是1963年在法国举行的,中心议题是生物气象学的近代进展及将来的研究方向,生物节奏和周期分析方法的探讨;第四届会议于1966年在美国召开,会议主要讨论了大气环境对人体的影响,包括空气负离子,大气电磁及磁场对人类的生物效应;1969年,在瑞士召开了第五届会议,会议讨论了特殊气象条件的防护,气象条件对生殖的影响,人类对气象应激反应耐受的种族差异,老年人对气象的应激反应等;第六届会议1972年在荷兰召开,在会上报告了环境舒适度的改善对工作能力的影响,城市大气气候、大气污染对人类行为的影响,重力场及地球外电磁和微粒辐射对人类生物效应的影响,自然及人工负离子的生物作用等;第七届会议于1975年在美国举行,讨论了热浪与死亡及发病的关系,生物气象学的系统分析,天气气候与人体健康及药物反应的关系,干热环境对人的影响等;第八届会议于1978年在以色列召开,讨论了未来天气气候变迁对人的影响,干热环境对人的影响等等;1981年,在西德召开了第九届会议,内容有疗养地及气候治疗,离子及带电颗粒的生物效应,城市生物气象学等;1984年,在日本召开了第10届会议,研讨了医疗气象预报、进展及将来的业务开展形式等问题;1987年,在美国召开了第11届会议,就气压对人类生育的影响及生育的季节变化,气温对人体免疫系统、天气对呼吸系统疾病、远红外线对睡眠影响的动物试验以及动量平衡模型在预测人体舒适方面的运用等方面进行了研讨;1990年,第12届会议在奥地利召开,多方位地探讨了气象与生命现象的奥秘;1993年,在加拿大举行了第13届国际生物气象学年会,重点讨论了高温热浪对人类的影响;1996年,第14届年会在斯洛文尼亚召开,探讨了人类生物气象发展方向,对气象指数应用的适宜性进行了分析;1999年,在澳大利亚悉尼举行了第15届国际生物气象学会议,会议探讨了高温天气干燥、噪音对人体健康的影响及冷刺激对人体生理特征和心血管疾病死亡的影响;2002年,在美国举行了第16届会议,重点关注了热环境对人类的影响;2005年,在德国召开了第17届国际生物气象学年会,会议重点探讨了气候变化对人类健康的影响;2008年,在日本东京举行第18届会议,会议概括了近年来生物气象研究的进展与动向,探讨了人类

生物气象学领域的热浪与健康预警系统、医疗气象、室外工作热环境评价及医疗天气预报的研究与应用。

地区性讨论会在英国、美国、联邦德国、荷兰、罗马尼亚、捷克、意大利、波兰等国家都先后举行过。一些国家也举行定期学术会议,如德国自1953年起,每3年举行一次,日本自1961年开始每年召开一次,美国自1969年开始,每3年召开一次,随后瑞典、澳大利亚也召开了学术研讨会。中国气象学会2008年成立了医疗气象专业委员会,每年召开一次学术会议。

在美国,19所大学设有生物气象课程,其中10所可授予硕士学位。有些国家还成立了独立的研究所,这些极大地推动了生物气象这门学科的迅速发展。原德意志联邦共和国自1952年起至今,每周星期一到星期五发布全国医疗气象预报,匈牙利于1958年也开始了这方面工作,日本、苏联也做过这方面的试验,医疗气象预报在国际上虽是一个古老学科,但亟待开垦。

20世纪70年代以来,国外人类生物气象学研究主要包括以下一些内容:(1)气象与生理,研究气象对人体的影响,关键是研究气象要素引起人体的生理变化。目前,研究方法有两种,一是直接观察对人体的影响,另一个是以动物进行试验研究。随着科学的发展,试验方法的进步,在研究中也采用了一些新的手段,着重研究了气象要素对人的内分泌、血液理化状态、大脑皮层活动、心血管、电解质平衡、生殖及肝、脾、胰脏生理功能的影响,还研究了气象要素与免疫学的关系,老年人对气象的适应等。(2)气象与疾病,近年来气象病的研究较多地集中于哮喘、感冒、冠心病、关节炎、传染病、眼病、高山病、牙病、糖尿病、胃溃疡、老年病等,初步建立了医疗气象预报方法。

3 天气气候对人的影响

3.1 热与人的健康

由于气候变暖不断加剧,所以本届年会有13篇报告集中探讨热对人的影响。许多研究发现热能使死亡率增加。Hondula^[2]分析了热致死亡率在美国7大城市的时空分布。Hartz^[3]认为全球变暖将会增加热浪的发生频率,从而导致热致死亡率的增加。Bambrick^[4]研究了澳大利亚老年人对热的适应性和易感性。Zanninovic^[5]研究了克罗地亚气候变化和热致死亡,预测该地区温度的升高将会增加热致死的趋势。Tonouchi^[6]也发现老年人对热更为敏感,尤其是短期的热浪。澳大利亚研究者Lynch^[7]也做了气候变化对热致死未来变化趋势的研究。Honda^[8]研究发现日本儿童在炎热天气里的死亡更多。Gosling^[9]用气候模式评估了气候变化对热相关死亡率中的不确定因素。

Muthers^[10]利用气候数据和局地气候模式分析了热生物气候和死亡率，当生理平衡温度 $\geq 41^{\circ}\text{C}$ 时，这种影响更加明显。Tawatsupa^[11]研究指出在高温环境作业与作业人群中肾脏疾病发病率明显增加。澳大利亚Vaneckova^[12]发现热能使医院入院人群增加，尤其是老年人因呼吸道疾病更易增加。Ono等^[13]报告了日本夏季老年人中暑有较高的发病率（图1），不论什么年龄段的老年人，中暑发病率均随时间的变化呈上升趋势。

3.2 冷空气对人体健康的影响

本届年会，仅有两篇报告关注了冷空气对人体健康的影响。Allen^[14]比较了美国5大城市冬季高死亡日的气象条件，发现与高死亡日之前相比，高死亡日的温度更高、气压更低、降雨机会更多。Zhang^[15]指出日平均气温和极端气温下降、气压上升时，对脑出血、脑梗塞不利，发病人数明显增加。

3.3 冷热空气对健康影响的综合研究

会上有9个报告综合研究了冷暖空气对人体健康的影响。Sedorovich^[16]研究了纽约市天气类型对慢性支气管炎入院率的影响。Davis^[17]研究了美国城市中人死亡的空间和时间分布。Bryce^[18]利用天气空间尺度做了天气型分类研究，1860—2000年天气类型与死亡的关系研究发现，死亡更易发生在极干和极湿的天气类型条件下。Kysely^[19]研究指出捷克寒潮和热浪都明显增加了心血管疾病死亡。Li^[20]研究发现奥克兰气候变化使得气温增加，使得由寒潮引起的死亡减少。Wanka^[21]利用时间序列分析，发现1995—2009年奥地利格拉茨气象因子急剧变化与急诊数量增加有明显的关系，他还报告了德国慕尼黑气象参数和空气质量对呼吸道疾病和呼吸困难有显著的影响。

以美国Davis^[17]的研究为例做介绍，他系统研究了主要城市平均气温与死亡率的关系，给出了它们之

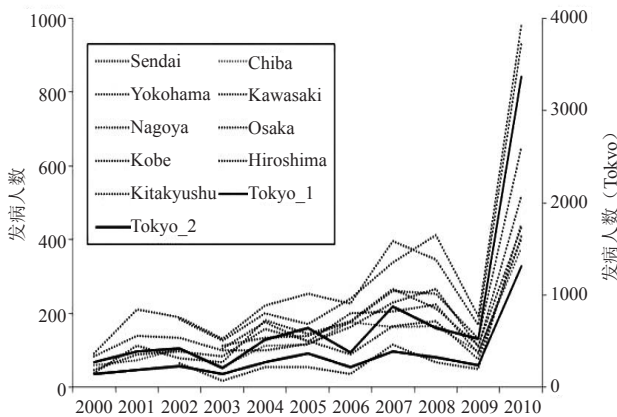


图1 日本10个城市中暑发病率随时间变化趋势^[13]

间的时空分布。其中，纽约、波士顿、华盛顿、芝加哥、明尼阿波利斯等为多循环分布，如图2是纽约的多循环分布图；休斯顿、西雅图、菲尼克斯等为单循环分布；仅有洛杉矶一个城市为线性分布。总体分析，表明美国冬季死亡率大于夏季，其中纽约、华盛顿、芝加哥、明尼阿波利斯等城市秋季死亡率大于春季，波士顿、休斯顿、西雅图、菲尼克斯等城市春季死亡率大于秋季。

3.4 机理研究

本次会议机理研究的报告仅有4篇。Kakitsuba^[22]发现人体中心温度在早上有升高的趋势（图3），随着环境温度的上升，人体中心温度也随之上升，人体更易在午后发生中暑。Vanos^[23]研究了人在热房间内和室外热环境中的出汗率和能量收支。Park等^[24]评估了韩国高温对人体皮肤温度和心率的影响。Zhang等^[25]指出低温天气能够引起心血管疾病发生的增加，并随着气温的降低而增加的幅度加大，低温刺激能够引起交感神经系统等兴奋造成血压升高等心血管系统反应，并探讨了低温过程导致的心血管疾病危险及相关机理。

3.5 环境气象指数

Bakhtiari^[26]报告了伊朗克尔曼省旅游气候指数（TCI）的分类。Mader^[27]综述了人综合舒适指数（CCIH）的使用结果，并指出涵盖了综合气候指数（CCI）的算法，包括了热指数、温湿指数和风寒指数。Lemke等^[28]研究认为综合温湿指数（WBGT）在众多包含温度、湿度、风速及太阳辐射在内的指数中更能评价热暴露对热作业人群生产效率的影响。Otto等^[29]介绍了一个能利用来自美国国家海洋和大气局收集的全球18500个气象站数据的软件，它能计算普遍热气候指数（UTCI）和WBGT两种指数，能更快更

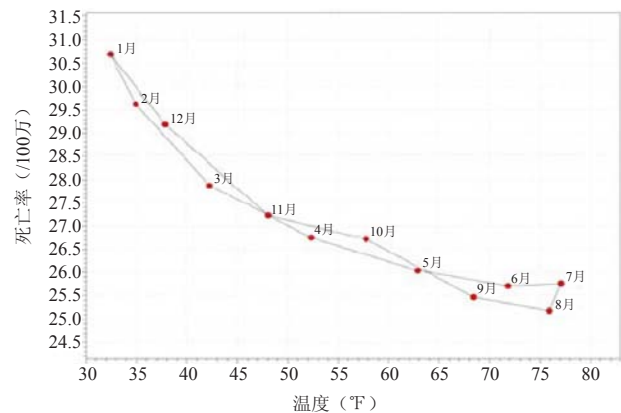


图2 美国纽约1975—2001年月平均死亡率与平均气温的关系^[17]

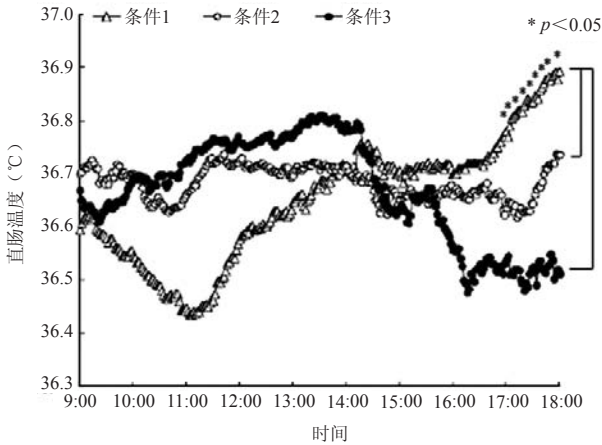


图3 日间直肠温度在3种条件下的变化^[22] (条件1: 环境温度从26℃上升到30℃; 条件2: 环境温度保持在26℃; 条件3: 环境温度从30℃下降到26℃)

准确地分析各气象站数据信息。Pascal^[30]介绍了法国热浪预警系统的生物气象阈值。Jendritzky等^[31]介绍了UTCI (图4), 它包含了风、辐射、湿度和气温等参数, 能够较好的评价人体对气象环境的舒适度, 但考虑到不同区域生物气象的差异, 其应用还应该做一定的修正。Segnalini等^[32]研究了温湿指数 (THI) 在地中海盆地的变化, 认为THI在地中海的变化可能会增加热天气对动物行为、健康及生存的影响。韩国研究者Lee^[33]报告了热天气健康预警系统 (HHWS) 的运用, 评估发现它能基于城市具体的气候和弱点为最易受影响的人群提供可靠的信息。基于这个系统, 目前他们正在为两个大城市研发寒冷健康预警系统。Petit^[34]介绍了医学天气预报在美国的应用及评估。

3.6 环境与健康、适应

Hanna^[35]介绍了一种自我评价的方法, 让热暴露工人利用MultiStix (尿液测定试纸) 测定他们的尿液

并评估脱水水平, 这种自我评价的方法得到了良好的作用, 使得研究对象参与率增加。Kim等^[36]介绍了首尔热健康预警系统, 利用市区区域的气象资料, 这种预警系统预测能够精细达到街区水平。Martinez^[37]研究了温暖亚湿地区带空调办公室内的平均温度和热舒适温度, 发现其平均温度为24.2℃, 而舒适温度为22.3~25.8℃。Tanaka^[38]评估了日本东北区域福岛房屋内热环境, 发现在冬季时温度较低, 指出建房时应考虑到气温和湿度。墨西哥研究者研究了在湿热天气中人的适应行为。Balogun^[39]认为为适应气候变化导致的气温上升, 应增加绿化面积, 尤其是种树能大大降低热的负面影响。改变城市规模、增加绿色空间、减少能源使用和空气污染都能减少城市热岛效应。Unger^[40]研究了对城市公共空间热环境的主观感受, 发现市民对风速和太阳光的变化最为敏感。极差的房屋质量能使儿童暴露于更高的温湿变化, 导致更差的热舒适。Yamamoto^[41]报告了用含CO₂丰富的水沐浴能够改善人体身体灵活性和肌肉僵硬。Lee等发现雾桑拿能使皮肤血量增加氧合血红蛋白含量从而更能缓解疲劳。Kurazumi^[42]发现有树、草丛等绿色植被的空间可以增加人体舒适度。

3.7 气源性过敏源与过敏性疾病

过敏花粉分布与气象条件密切相关。Newnham^[43]论述了在新西兰监测空气传播花粉的必要性。城市热岛的作用使市区花期在每年会早于郊区, 不断的气候变化将会影响过敏花粉对人群健康的影响。Sheffield^[44]研究了纽约花粉浓度高峰与花粉过敏治疗药物销售的关系, 发现高峰后花粉过敏治疗药物销售增加。Holt^[45]介绍了一种气源性致敏原自动计数和分类系统, 这更能加强气源性致敏原分析。为了适应气候变化对气源致敏原及过敏性呼吸疾病的影响, 除了

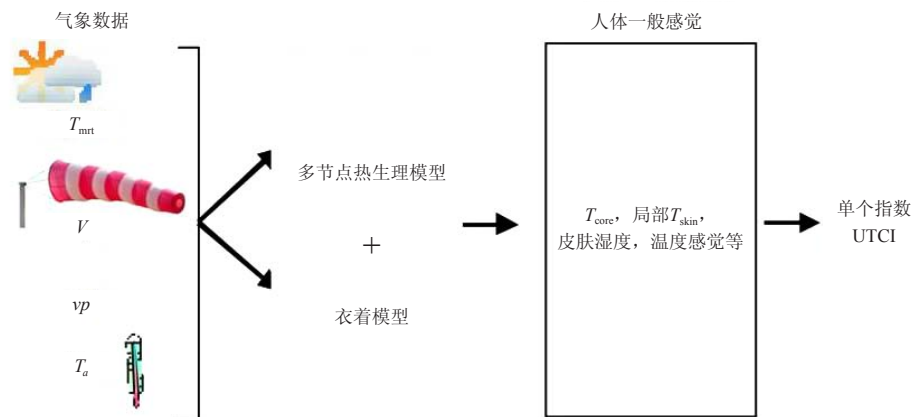


图4 UTCI指数^[31] (其中, T_{mrt} 代表平均辐射温度; V 代表风速; vp 代表湿度; T_a 代表大气温度; T_{core} 代表中心温度; T_{skin} 代表皮肤温度)

加强对气源过敏原的监测和预报，还应加强其对人体健康影响的宣传及医疗设施的改善等。Bambrick^[46]研究了厄尔尼诺现象与急性哮喘发病的关系。

4 植物生物气象学

Schwartz^[47]介绍了生物气候学在美国的发展，美国国家生物气候学网络(USA-NPN)在过去的5年里成型，这对于生物气候学研究在美国的发展起着很重要的推动作用。Chen^[48]介绍了树生物气候在中国温带的温度空间模型，发现冬春季节的气候变暖可能会增加春季生物气候对气温的空间敏感性。Chambers^[49]以新西兰和澳大利亚南部温带物候为例，认为由于降水量等的差异，物候在南半球和北半球对气候变化的反应会不一样。Min^[50]介绍了气象因素对加拿大一枝黄花在中国短距离散布的影响。Tripathi^[51]报告了气候变化对印度东部作物产量的影响，气候变化导致干旱、洪水等自然灾害的发生频率增加，致使作物产量减少。Bernard研究了多瑙河低地冬小麦和春大麦产量在气候变化背景下的空间变化。Cornelius^[52]研究了草本植物对高度梯度的物候反应，没有发现其对全花期有明显的影

5 动物生物气象学

Davis^[53]指出天气和气候对非洲大象移动的规律有影响，在干旱季节中移动的速率高，与雷暴也有一定的关系。Khalifa^[54]研究了兔性激素的季节变化及其与生殖活动的关系，发现冬季孕酮水平较高，这促进了兔的生殖效率，使得冬季的存活率高于夏季。此外，他还研究了鸡的体温调节机制。Maia^[55]介绍了半干旱地区山羊的体温调节机制，通过增加皮肤散热和减少体内产热来适应高温高辐射的半干旱气候。MacLean^[56]研究了日夜间补光对Jersy小牛和杂交Jersy小牛饮水和摄食的影响。

6 总结与展望

生物气象学作为研究天气气候对生物界影响的一门学科，正越来越受到人们的重视。气候对人体健康影响的关注已有许多年的历史，这也是本届会议的主要内容。随着气候变化，全球气温上升，更多的研究者关注了热对人群造成的不利影响。为了减少这些影响，各国学者也在不断尝试利用各种方法，例如，各种指数对人热暴露的评估及各种热预警系统的使用，来减少热暴露对人群健康的影响。虽然热暴露会引起许多不利的影响，但是寒冷天气对人体健康的影响也不容忽视。冬季，高发的呼吸道和心血管疾病发病率和死亡率，更需要这方面的研究尤其是机制的研究。参会的所有研究中，大部分以统计流行病学研究为

主，对于气候天气影响人体健康的机理方面，仍还需进一步研究。

在我国，生物气象研究也有一定的发展，本届会议也有少数的研究者参加，但与美国、澳大利亚、日本等国家相比，仍然处于初步阶段，尤其是在医疗气象预报方面仍然还需要大量的研究和投入。目前我国人类生物气象学发展主要存在7方面的问题：首先是生物气象专业人才短缺，国内设置应用气象学专业的院校只有10所左右，而生物气象学这个专业设置还没有；其次是生物气象观测资料欠缺，极大地影响了生物气象研究及业务开展，疾病发病情况资料由卫生系统掌握，而气象资料为气象部门所有，实现两方面的资料共享十分困难，实际工作中存在着严重的信息不对称性和不完全性；三是从当前研究的情况看，应用技术研究多，基础理论研究少，经验总结多，机理分析少，这在一定程度上影响了生物气象学研究的水平，目前全国只有甘肃省气象局和上海市浦东新区气象局成立了人类生物气象实验室，专门投入人力、物力开展多项研究，获得了较好的成果；四是气象对人体健康的影响研究本身具有不确定性。由于人体是一个有机整体，气象条件并不是对人体健康产生影响的唯一因素，其他诸如遗传、自身素质、饮食、地域、生活习惯等因素均会对人体健康产生影响。因此，在进行健康气象学研究中，关键在于从影响健康的诸多其他因素中分离出气象因素的影响。另一方面，人类疾病的发病原因往往十分复杂，很多疾病至今发病机理尚未搞清。这些都会给检测和定量评估气象因素对人类健康的影响带来一定的困难和不确定性；五是人类生物气象的研究存在着空间和时间跨度的局限性。如研究气候变暖这种环境问题，时间和空间尺度都需要扩大，但研究这种大尺度问题对人体健康的影响目前比较困难。在今后的研究中，应尽可能采用长时间、大样本的资料，以使研究结果更为可信；六是动物暴露试验研究致病机理的标准还不规范，表征受试物的生物学毒性效应，尚存在一些需要解决的问题，如关于环境污染物的允许浓度的测定，各种污染物之间可能存在的协同、拮抗、加和作用，不同剂量下的毒理作用机制，动物试验结果与污染物对人体影响的关系等；七是人类生物气象学研究成果的实际应用还需要进一步加强。目前中国的人类生物气象学研究大多仍然停留在理论阶段，实际应用还远远不够。全国仅有上海、广西、甘肃、吉林等少数几个省市开展了健康气象服务系统的开发与研制。人体疾病与天气之间的联系还没能引起全社会足够的重视。有关生物气象的研究还远远没有深入展开，更没有在实际生活中

进行更好地应用。

未来生物气象学研究发展方向主要集中在4个方面：首先，侧重于天气、气候变化对人体影响的机理研究，从生理学和病理学方面入手，加大实验室研究的力度，以推动天气气候与多种疾病发生机理的研究向纵深发展；二是应用数值模式开展天气气候与健康研究，这在国外发展较快，我国这方面的研究刚刚开始，是一个非常重要的研究方向，是开展天气气候与各种疾病发生机理研究的重要方式，也是疾病预测研究的重要方面，需要引起更多关注；三是开展疾病预测和预警研究，此项研究与机理研究是相辅相成的两个方面，我国虽已开展，但仍与发达国家有一定差距，需要大力发展。这项研究也是把已有科研成果用于实际的重要途径。加快尝试开展医疗气象预报服务，开发天气气候诱发疾病预警系统。通过预报使人类在日常活动中避开不良气象条件的影响，利用有利的大气环境来增强体质，预防疾病，合理开展生产活动，提高工作效率；四是开展气象条件对人体健康有利的方面研究。目前人们更多地关注了气象条件对健康的负面影响，而对某些气象条件（如山区、海滨、森林、瀑布等）对健康益处的研究不够深入。加强此项研究对促进气象疗养、气象保健、老年医学的发展将会很有益。

参考文献

- [1] 张书余. 医疗气象预报. 北京: 气象出版社, 2010.
- [2] Hondula D M. Geographic dimensions of high-resolution heat-related mortality in seven United States cities. 19th ICB Papers, 102.
- [3] Hartz D A. Heat, morbidity, and adaptation: A case study of Chicago, Illinois and Phoenix, Arizona, USA. 19th ICB Papers, 245.
- [4] Bambrick H. Resilience and vulnerability among older Australians: adaptive responses to heat. 19th ICB Papers, 119.
- [5] Zanninovic K. Climate change and heat related mortality in Croatia. 19th ICB Papers, 148.
- [6] Tonouchi M. Heat stroke in Japan, 2010. 19th ICB Papers, 279.
- [7] Lynch K. The impact of climate Monash University Australia. 19th ICB Papers, 138.
- [8] Honda Y. Relation between ambient temperature and mortality among children in Tokyo, Japan. 19th ICB Papers, 264.
- [9] Gosling S N. Quantifying climate model uncertainty in estimates of the impact of climate change on heat-related mortality. 19th ICB Papers, 154.
- [10] Muthers S. Analysis of thermal bioclimate and mortality based on climate data and regional climate models. 19th ICB Papers, 31.
- [11] Tawatupa B. The association between workplace heat stress and kidney disease among more than 30000 men and women in the Thai Cohort Study (TCS). 19th ICB Papers, 196.
- [12] Vaneckova P. The effects of high environmental temperature on hospital admissions in Sydney, Australia. 19th ICB Papers, 260.
- [13] Ono M, Tonouchi M. Heat stroke in Japan, 2010. 19th ICB Papers, 318.
- [14] Allen M J. High-mortality days during the winter season: Comparing meteorological conditions across five USA cities. 19th ICB Papers, 80.
- [15] Zhang S Y. Study and analysis of relationship between CVD and weather conditions and the establishment of medical forecast in Jilin Provinc. 19th ICB Papers, 335.
- [16] Sedorovich A. Chronic bronchitis hospital admissions in New York State. 19th ICB Papers, 82.
- [17] Davis R E. Seasonal mortality: Temporal and spatial patterns of human mortality in U.S. cities. 19th ICB Papers, 94.
- [18] Bryce E K. A model of the relationship between synoptic weather type and timing of death in Gibraltar, 1860-2000. 19th ICB Papers, 235.
- [19] Kysely J. Comparison of the effects of hot and cold spells on cardiovascular mortality in individual population groups. 19th ICB Papers, 83.
- [20] Li N. Associations between synoptic weather types and winter mortality in Auckland and speculation of future climate influence on mortality. 19th ICB Papers, 266.
- [21] Wanka E R. Significant association between the daily number of emergency calls in Graz (Austria) and meteorological parameters-a time series analysis of a broad panel of disorders from 1995 to 2009. 19th ICB Papers, 276.
- [22] Kakitsuba N. Optimal thermal conditions during daytime in consideration of circadian rhythm of core temperature. 19th ICB Papers, 38.
- [23] Vanos J K. Validation of predictive sweat rate and core temperature equations during intense exercise through application of the COMFA outdoor energy budget model. 19th ICB Papers, 76.
- [24] Park J K, Jung W S. Study on the evaluation of the impact of high temperatures on skin temperatures and heart rate among Korean. 19th ICB Papers, 193.
- [25] Zhang S Y, Luo B. Cold air models of Northwestern China and their impacts on blood pressure, whole blood viscosity and other thrombin factors in SHR rats. 19th ICB Papers, 336.
- [26] Bakhtiari B. Classification of tourism climate index in Kerman Province. 19th ICB Papers, 14.
- [27] Mader T L. Comprehensive comfort index for humans. 19th ICB Papers, 33.
- [28] Lemke B, Tord K. The estimated global and regional impact of climate change on occupational heat stress and related work capacity and productivity effects. 19th ICB Papers, 258.
- [29] Otto M, Lemke B. A software tool to estimate heat exposures from weather station data. 19th ICB Papers, 339.
- [30] Pascal M. Evaluating the biometeorological thresholds for the heatwave alert system in France. 19th ICB Papers, 20.
- [31] Jendritzky G, Dear R. The universal thermal climate index (UTCI)-achievements of the ISB Commission 6. 19th ICB Papers, 184.
- [32] Segnalini M, Vitali A. Temperature humidity index welfare categories in the Mediterranean basin: A scenario approach. 19th ICB Papers, 181.
- [33] Lee D G. The development of heat-health warning systems for Seoul: is it feasible to divide the city into partitions? 19th ICB Papers, 212.
- [34] Petit N J. Med-weather: a follow-up report on user response to how weather affects your health. 19th ICB Papers, 323.
- [35] Hanna L. Sslf-assessment: a methodological tool to measure and minimize health harm from occupational heat exposure. 19th ICB Papers, 204.
- [36] Kim K R, Lee D G. Implementation of synoptic-based heat health warning systems for seven large cities in South Korea. 19th ICB Papers, 211.
- [37] Martinez K. Neutral temperature and thermal comfort ranges for air conditioned offices in a warm sub-humid climate. 19th ICB Papers, 286.
- [38] Tanaka M. Thermal Environments in a house in winter in Fukushima, in the North-East region of Japan. 19th ICB Papers, 317.
- [39] Balogun A A. Towards adapting the federal university of technology, Akure campus to climate change. 19th ICB Papers, 372.
- [40] Unger J. Visitors' subjective estimations on thermal environment in public. 19th ICB Papers, 368.
- [41] Yamamoto N. Bathing with CO₂-rich water improved physical flexibility and muscle stiffness in male college students. 19th ICB Papers, 141.
- [42] Kurazumi Y. Influence of the combined environment of the landscape stimuli upon the human responses in outdoor spaces. 19th ICB Papers, 108.
- [43] Newnham R M. The end of a trend to earlier birch pollen seasons

- in the UK? 19th ICB Papers, 166.
- [44] Sheffield P. The association of tree pollen concentration peaks and allergy medication sales in New York City:2003-2008. 19th ICB Papers, 325.
- [45] Holt K. Routine airborne pollen monitoring in New Zealand: Do we need it? 19th ICB Papers, 319.
- [46] Bambrick H. Can El Niño predict acute asthma morbidity? Ambulance call-outs in New South Wales, Australia. 19th ICB Papers, 118.
- [47] Schwartz M. Phenological research in the USA: National-scale to stand-level and back. 19th ICB Papers, 103.
- [48] Chen X Q. Temperature-based spatial modeling of tree phenology in China's temperate zone. 19th ICB Papers, 39.
- [49] Chambers L E. Southern temperate phenology. 19th ICB Papers, 34.
- [50] Min Z. Weather factors to influence the short distance dispersal of Solidago canadensis seeds in China. 19th ICB Papers, 346.
- [51] Tripathi P. Climatic variability and its impact on crop production in Eastern India. 19th ICB Papers, 377.
- [52] Cornelius C. Phenological response of herbs to manipulative experiments along an altitudinal gradient. 19th ICB Papers, 146.
- [53] Davis R E. Weather and climate influences on the movement patterns of the African elephant (*Loxodonta Africana*) and the role of infrasound. 19th ICB Papers, 93.
- [54] Khalifa H. Seasonal variation in sex hormones and its relation to the reproductive and productive activities in rabbits. 19th ICB Papers, 220.
- [55] Maia A S C. Thermoregulation in goats managed in semiarid region: a study of production, gain and loss of heat. 19th ICB Papers, 237.
- [56] Mac-Lean P. Influence of lighting supplement program in concentrate and water feeding intake of suckling calves. 19th ICB Papers, 343.

第十届长三角气象科技论坛在浙江安吉召开

■ 徐虹

2013年12月12—13日，为期2天的第十届长三角气象科技论坛在浙江安吉召开。来自江浙沪二省一市的140余位气象科技人员齐聚一堂，紧紧围绕“服务经济，提升能力，推进科技创新和公共气象服务”主题，就长三角地区的防灾减灾、应对气候变化及相关领域的新技术、新思路、新方法、新观念展开新一轮的交流与探讨。原中国气象局副局长王守荣，中国气象科学研究院副院长、中国气象学会秘书长翟盘茂，上海市气象局党组成员、总工程师、上海市台风研究所所长雷小途，浙江大学地球科学系教授翟国庆、副教授贾晓静等专家，《气象科技进展》编辑部贾朋群和张萌两位编辑应邀出席论坛，指导并分别做了题《未来科学计划与气象发展》、《我国东部持续性强水形成机理与预报方法》、《近年来亚太地区台风研究进展》、《北半球大气环流主模态的预报技巧》的大会报告；《气象科技进展》编辑简要介绍了期刊的办刊宗旨、内容设置以及征文的相关情况。

这些报告不仅传递出近期国内外最前沿的信息和最新的科研动态、科研动向，更显露出这些专家对这些信息和动向的精准解读，着实让在场的科技人员拓宽了视野，增强了科研动力。

长三角地区是全国经济最发达的地区之一，台风、暴雨等灾害性天气发生频繁，造成的经济和人文损失不可计数。加强地区间的科技沟通、合作与交流



图 第十届长三角气象科技论坛主会场

显得尤为重要。长三角气象科技论坛自2004年创办至今，已历时10年，论坛的综合性特质，充满朝气的学术氛围，吸引着大批专家学者来论坛讲学，更吸引着一大批基层科技人员投入论坛，展示才华，寻求共同进步。历届组委会也一直将论坛打造成为学术活动有热度、交流范围有广度、学术水平有高度、学术研究有深度、学术成果有亮度、活动主角有锋度的高水平大型学术交流平台为己任作着不懈的努力。

(浙江省气象学会)

湖北一次飚线天气过程对流发展机制分析

尹恒¹ 沈定成¹ 夏金^{1,2} 李易¹ 杨占婷^{1,3} 廖小华¹

(1 湖北省十堰市气象局, 十堰 442000; 2 湖北省气象局, 武汉 430074; 3 湖北省气象服务中心, 武汉 430074)

摘要: 利用常规气象观测、区域加密自动站、FY-2E卫星、多普勒天气雷达及组网产品等资料, 对2011年7月下旬发生在湖北省的一次大范围雷雨大风天气过程进行分析, 探讨了强对流天气产生的天气学条件和物理机制。结果表明: 雷雨大风是高空槽、切变线、低空急流与河套南下冷空气相互作用的结果, 西太平洋副热带高压西侧的偏南气流为雷雨大风提供了水汽和能量输送, 卫星和雷达监测反映出中尺度对流体生消发展中有多个较小尺度对流体新生和发展, 雷雨大风出现在中尺度云团前端及强回波地区。

关键词: 雷雨大风, 天气学条件, 稳定度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.007

Analysis on Ambient Condition and Initialization Mechanism of Convection in a Severe Squall Line Storm Event in Hubei

Yin Heng¹, Shen Dingcheng¹, Xia Jin^{1,2}, Li Yi¹, Yang Zhanting^{1,3}, Liao Xiaohua¹

(1 Shiyan Meteorological Bureau of Hubei Province, Shiyan 442000 2 Hubei Meteorological Service, Wuhan 430074

3 Hubei Provincial Meteorological Service Center, Wuhan 430074)

Abstract: By using the conventional meteorological observation, regional automatic station, FY-2E satellites, Doppler radar and networking products such as data, the thunderstorm weather process which occurred in Hubei Province on a large scale is analyzed, and the causes of convective weather conditions and physical mechanism are discussed. The results show that the thunderstorm gale is due to the upper trough, shear line, low-level jet and the cold air southward interaction results. The southerly airflow on the west side of West Pacific subtropical high provided the water vapor and energy transport for thunderstorm gale. Satellite and radar monitoring reflects a plurality of a small scale on the generation. The development of mesoscale convective fluid body dissipation development, in effect, is a thunderstorm. The thunderstorm appears in the mesoscale-cloud-cluster front end and the strong echo area, strong weather of deep convective index and convective inhibition energy high value area, located in the upstream of strong convective weather which occurred.

Keywords: thunderstorms, weather conditions, stability

1 引言

2011年7月26日湖北省出现了一次大范围雷雨大风强对流天气, 强度之强、范围之大为近年少有, 而湖北省西北门户十堰市更是10年没有遇过。雷雨大风天气使得供电通信、襄渝铁路等一度中断。本文利用常规气象观测、区域加密自动站观测、卫星等资料, 以及短时临近预报系统(SWAN)和雷达组网产品等信息, 结合局地天气气候特点, 探讨了雷雨大风天气发生的天气学条件和机理, 为强对流天气预报预警提供参考。

2 天气实况与灾害

受副高外围偏南气流及四川盆地东部对流云团东移影响, 2011年7月26日中午到夜间, 湖北省大部

分地区出现雷雨大风强对流天气(图1), 7月26日08时—27日08时(北京时, 下同)国家气象站中19县市出现暴雨, 主要分布在江汉平原、鄂东北、鄂西南地区。日降水量最大的测站为应城, 为87.0mm; 最大小时降水量出现在潜江, 为43.9mm。乡镇加密自动站显示有241个乡镇降暴雨、24个乡镇达到大暴雨, 其中日最大降水量出现在潜江总口农场, 为187.2mm, 小时最大降水量出现在宜昌夷陵区秀水, 为80.2mm。10分钟平均风速的最大值出现在26日午后及27日凌晨前后, 有24个站达到 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 郧县、老河口、秭归、谷城、兴山和金沙6站在 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 其中最大值出现在鄂东南的金沙, 为 $19.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 瞬时风速的最大值有14站在 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 其中金沙、秭归、巴东、老河口、咸宁、兴山、谷城、郧县8站在 $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 最大值出现在鄂西北的郧县, 为 $32.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。据统计, 此

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2014年1月10日
第一作者: 尹恒(1963—), Email: cnyinh@163.com

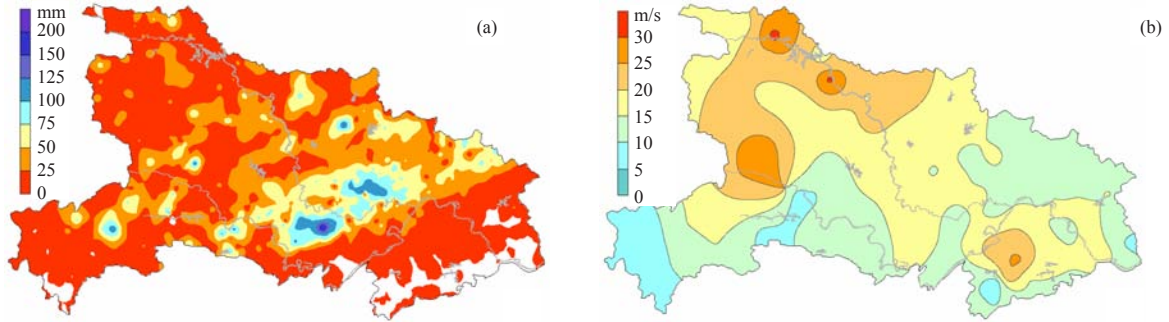


图1 2011年7月26日08时—27日08时湖北省降水量 (a, 单位: mm) 与极大风速分布 (b, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

次雷雨大风灾害造成9县(区) 58.1万人受灾, 其中郧县14人受伤, 农作物受灾20.9千公顷, 倒塌房屋99户260间, 损坏房屋3345间, 直接经济损失9703万元。

3 天气尺度环流系统

3.1 环流形势

2011年7月, 北半球极涡呈多极型分布, 有三个中心, 分别位于中西伯利亚以北、阿拉斯加地区和加拿大东北部^[1]。在距平图上鄂霍次克海阻塞高压, 为正距平, 500hPa距平值达+80gpm, 有利于中西伯利亚北部极涡中的冷空气沿极涡左侧高压脊前的偏北气流南下, 冷空气经贝加尔湖西侧由河套南侵到汉水上游, 它是造成鄂西北乃至全省出现强对流天气的主要环流因素。7月下旬亚欧地区环流形势出现调整, 远东地区的阻塞高压依然维持但略有东移, 其上游的高空槽进一步东移, 同时其底部不断分裂弱的短波槽东移南压, 青藏高原上空也不断有高空槽东移, 7月26日两者在我国中北部地区叠加, 副高的西伸加强有利于其西侧暖湿气流向湖北西北部输送(图2)。

3.2 系统演变

7月24—25日我国华北大部分地区出现强降水,

强降水是由高空槽后不断东移南压的冷空气与副高西侧偏南气流交汇所造成的。从24日08时500hPa形势和850hPa风场(图略)中可以看到, 蒙古国以北存在一个宽广的低涡系统, 冷空气沿涡后偏北气流南下, 使得河套地区500hPa低槽向南加深。此时副高西脊线伸至华南西部, 西风带高压与副高打通, 同时850hPa存在一条明显的西南急流带, 强度达 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。冷暖空气在河套地区交汇, 华北出现强降雨天气。24日20时蒙古国北部的低涡系统东移缓慢, 依然有冷空气由低涡南部向东南方向输送, 由于远东地区南部的阻塞高压强盛, 河套地区高空槽缓慢东移至华北西部, 槽前高压脊与副高叠加加强, 四川盆地低涡开始生成并发展, 850hPa西南急流呈加强趋势, 最大风速达 $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。25日08时新疆北部浅槽的主体位于蒙古国以西, 华北低槽减弱。25日20时新疆北部的小槽进一步东移, 华北地区高空槽前高压脊开始崩溃, 26日08时陕西中部到川东北低槽形成(图2), 700hPa在陕南地区有一若东北—西南向切变存在, 在500hPa引导气流带动下向东南方向移动, 850hPa低涡发展, 川东北对流旺盛, 中尺度对流云团沿副高外围气流向东北方向移动, 从26日上午至夜间四川盆地东北部、湖北大部出现雷雨大风天气。

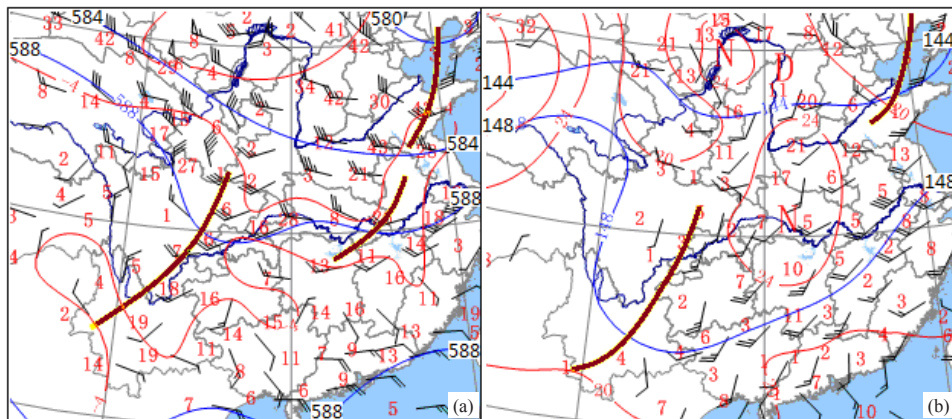


图2 2011年7月26日08时500hPa (a)、850hPa (b) 高度和风场

在地面图上, 24日08时我国东北地区到河套南部为地面冷锋前的低压带(图略), 南疆盆地到青藏高原东部为暖低压控制, 冷空气中心位于贝加尔湖南部, 锋面向中蒙边境移动。25日02时位于河套地区, 其后冷空气扩散南侵, 08时抵达黄河中游河南西北部, 这时地面图上已经没有闭合高压环流。26日08时冷空气该地区堆积形成1002.5hPa闭合环流, 冷锋已达秦岭, 此时湖北大部分地区正处于锋前的热低压控制之中, 当河套地区南下的冷空气与前期增暖的暖空气相遇时, 就形成了强烈的对流性雷雨大风天气。

4 中小尺度(环流)系统

4.1 近地层中小尺度风场

低层流场对雷雨大风的发生发展有重要的作用。从实况流场看, 26日08时925hPa四川盆地东部—鄂西北—河南西南部从南到北有一西南风和偏西风形成的辐合线, 对应在地面上这种辐合明显, 鄂西北以南地区为一反环流, 江汉平原为一气旋性环流, 鄂西北辐合线宽度较窄, 而江汉平原气旋性环流场的水平尺度较前者大2~3倍, 反映出强风区辐合带窄, 强降水区的辐合区水平尺度相对要宽一些(图3)。26日02时辐合线位于鄂西北西侧的陕南地区, 地面偏南气流最强盛并延伸至四川北部到陕西南部, 08时辐合线东移在湖北西部与陕西、重庆交界地带形成南北向辐合带, 11时辐合线西侧西北气流加强, 河南西北部冷空气主体南下, 辐合带东移, 这种南北流场形成的辐合线一直维持到20时, 雷雨大风发生在近地层中尺度辐合线上。

4.2 云图的中小尺度特征

7月24日08时地面冷锋从蒙古东部经由河套地区延伸至四川西北一带, 云图上冷锋云带清晰, 从孟加拉湾到四川盆地有对流云北移, 鄂西北地区为弱的中低云覆盖。26日08时从内蒙古中部经河套到四川盆地的主云带上有2个对流云团(MCC), 分别位于陕西南部 and 重庆中北部, 二者迅速靠近加强。11时锋面云带断裂, 随着冷锋的东移, 地面冷暖空气交绥于陕西南部、河南西南部—鄂西北地区, 陕南—四川盆地

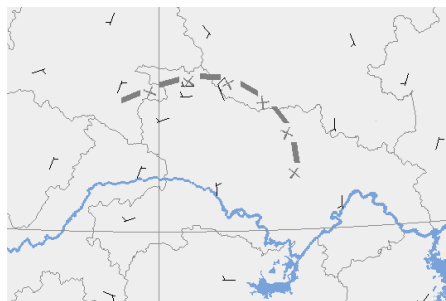


图3 2011年7月26日08时地面风场及辐合线

东部云团合并加强, 形成边界整齐的圆状云团(图4)。

由于副高南托作用, 锋面云带少动, 云带上不断有新单体生成, 这种对流单体的生成、发展、消亡一直维持到27日02时, 对流云团是26日下午到夜间造成湖北省雷雨大风天气的始作俑者, 其结构呈边界较整齐的椭圆状云团。从云图动画上看, 26日15时整个湖北西部被其笼罩, 17时当鄂西北对流减弱时, 对流云团覆盖了湖北省大部分地区, MCC在冷锋云带上不断从西南方生成发展并向东北移动, 形成“列车效应”, 是造成湖北多地短时间强对流天气持续发生的主要原因。一般认为云顶温度 $\leq -48^{\circ}\text{C}$, 则表示云顶已抵达对流层上部, 对流发展非常旺盛, 伴随的强对流天气现象比较严重^[2], 而26日16时强中心达到 -124°C , 可见对流之强盛。

4.3 多普勒雷达分析

十堰天气雷达 2.4° 仰角的基本反射率图上显示, 7月26日10:25在重庆东北部出现两个回波体, 其与卫星云图相对应。10:37在神农架西南部、湖北郧西西北部和陕西南部有回波单体出现, 在向东北方向移动过程中发展迅速; 11:01重庆和陕南的回波单体发展合并为两个单体; 11:19两单体逐渐向湖北竹溪西部发展东移; 12:08形成带(线)状回波, 水平尺度约75km, 最大回波强度55dBz, 在向东北方向移动的过程中范围继续扩大。12:51(图5a)与神农架处的回波单体连接, 水平尺度加大到150km, 同时郧西西北部的单体在发展过程中分裂成三个单体向西南方向移动, 并与东移的带状回波趋于合并。13:03回波带50dBz长度达160km, 从这条回波带上可以清楚地看到多个对流单体(图5b)呈弓形分布, 形成明显的前侧宽广的入流槽口区和后侧下沉气流区, 并逐渐形成西北—东南向的飚线回波, 自西南向东北方向快速经过十堰地区, 其后部形成大片混合型降水回波(图5c)。

飚线上最大垂直累积液态含水量达 $60\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 回波顶高达18km。15:48飚线已过十堰到达河南南部, 之后右转向东南方向移动, 在移动过程中仍保持旺盛的势头, 且继续在湖北中东部和南部地区造成强风暴雨等灾害。从径向速度图可以看到, 高层风速明显大于低层, 回波向东北移动过程中低层风速逐渐加大, 低层存在风速辐合, 还可以看到有明显的中层径向辐合存在(图5d), 弓形回波后部入流槽口急流区强盛, 为雷雨大风典型的径向速度特征^[3]。

从雷达回波基本反射率拼图可以看出, 26日12时高空槽回波带位于河南西侧到陕西南部, 四川盆地对流体回波位于川渝交界地的北部, 回波强度达50dBz, 水平尺度超过50km(图6a)。这时湖北境内

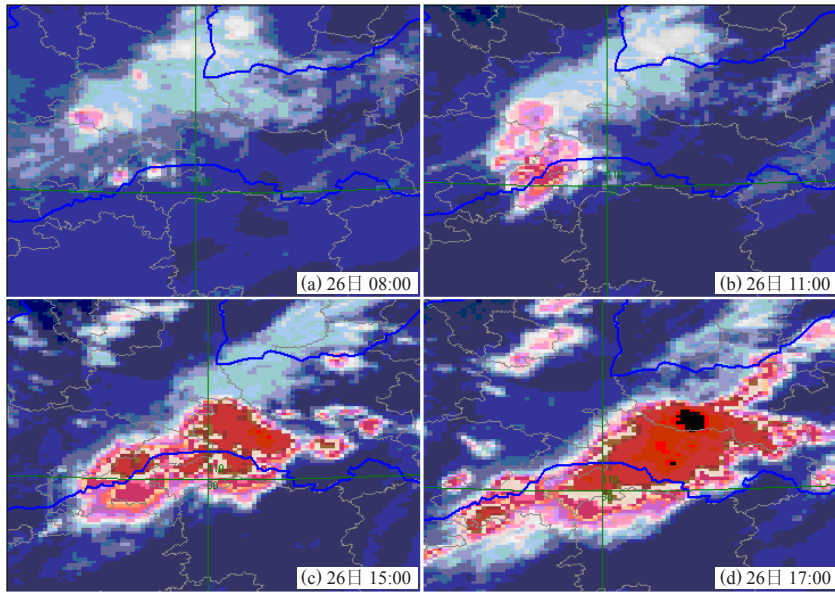


图4 2011年7月26日FY-2E红外云图

雷雨大风天气开始，14时开始雷雨大风区迅速向东扩展，襄阳及以东地区风力加大，从SWAN监测产品来看，影响范围随之扩大，与近地层冷空气快速扩散相一致。15时鄂西北为强对流所覆盖（图6b），18时强回波区位于河南南部到湖北中部地区，雷雨大风回波带的前沿回波强度明显高于中后部，有6个大小不等的强对流中心相伴（图6c），比较相同时刻卫星云图，红外云图上为一中尺度云团，云团前沿较雷达回波前沿要偏东50~80km，21时鄂北地区回波减弱，强中心断裂开来，江汉平原东部的两个强对流中心对应

了这次雷雨大风过程的强降雨中心（图6d）。

5 稳定度条件

深对流指数（DCI）指的是伸展高度具有或大于均质大气高度（约为7991m）的对流系统。李耀东等^[4]指出深对流指数和对流有效位能可反映对流上升运动的潜势和强度，对流有效位能还隐含地反映了对流层大气总体垂直热力结构。利用26日08时高空资料进行计算：安康DCI=47.9℃，南阳DCI=39.2℃，恩施DCI=47.9℃，宜昌DCI=47.3℃，武汉DCI=47.4℃，均表征为指数的高值区，该数值超过了姚建群等^[5]研究

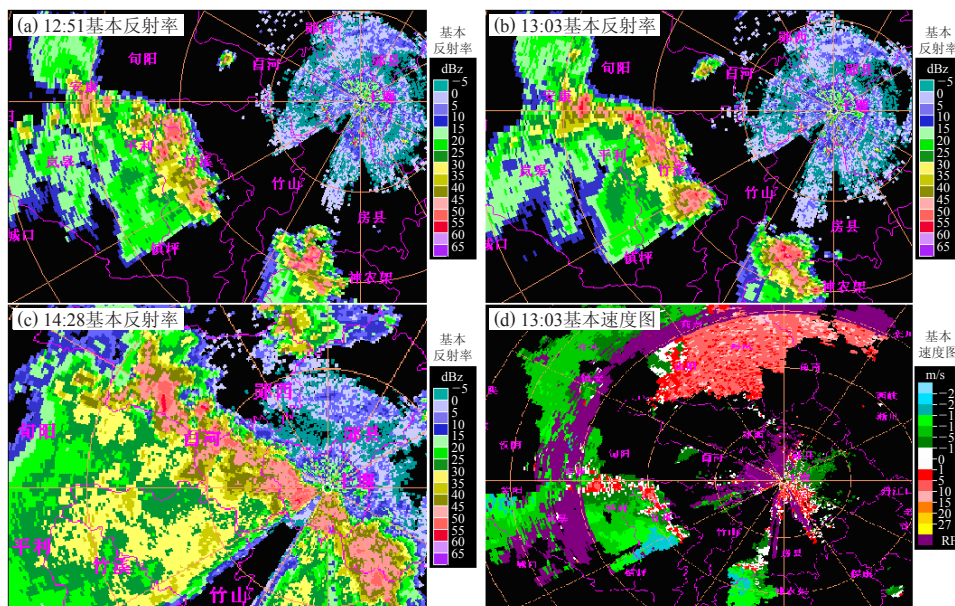


图5 2011年7月26日十堰多普勒雷达回波图

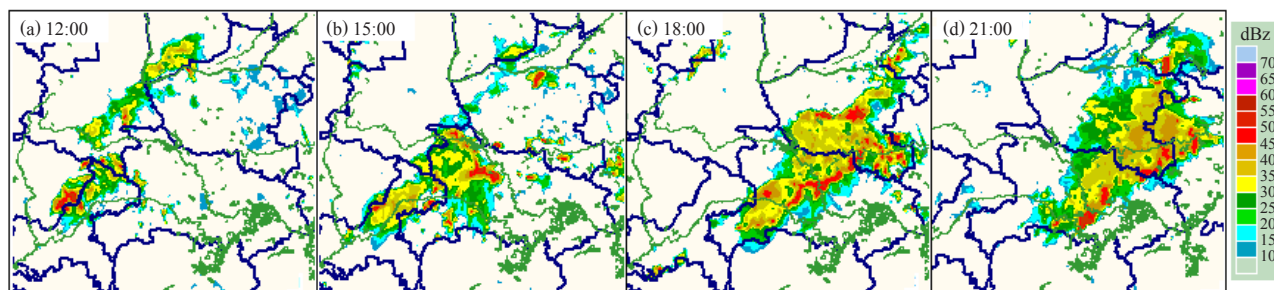


图6 2011年7月26日12—21时华中区域雷达基本反射率拼图

长三角地区一次强飚线的情形，深对流指数越大预示条件不稳定越强，提示存在发生强对流的潜在可能性越大。

这次雷雨大风天气出现在湖北中北部到河南南部，计算了安康、南阳两个测站的对流有效位能（CAPE）和对流抑制能量（CIN）。统计看到在雷雨大风发生之前CAPE有一个升高过程，主要表现为从25日08时—26日08时安康和南阳CAPE数值分别升高了 $1014.7\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1003.1\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，能量升高聚集，表明强对流天气触发条件极为有利。26日随着雷雨大风天气的产生和不稳定能量的释放，CAPE急剧降低，安康从08时 $1105.5\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到20时的 $378.6\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，南阳由 $1602.4\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降到 $205.4\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，较好地揭示了雷雨大风发生前后能量变化机理（表1），地处湖北西部的恩施、宜昌两站CAPE和CIN的时间变化与前者一致，而位于湖北东部的武汉站变化要滞后一些，在26日20时CAPE达到 $5999.6\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，27日08时回落到 $835.5\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

对流天气可以探空资料上CIN的大小来评估雷雨大风发生的可能。当CIN随时间变小时应引起注意。安康和南阳7月25日08时的CIN比26日08时的CIN大，即CIN随时间变小（表1），因此，当有抬升力时，由于CIN变小气块易抬升，形成了强对流天气，即7月26日午后出现强雷雨及大风。

6 小结与讨论

通过对这次大范围雷雨大风的分析可以看出，500hPa引导气流和地面冷空气在短期预报中的提示作用，近地面风场辐合线（带）对于雷雨大风移动路径的短时预警有明确指示意义，同时也要关注其他相关

表1 雷雨大风区探空测站CAPE和CIN变化比较(单位: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)

测站	CAPE / CIN			
	25日08时	26日08时	26日20时	27日08时
安康	90.8/464.3	1105.5/126.8	378.6/167.2	5.7/656.7
南阳	599.3/328.3	1602.4/258.1	205.4/1.3	144.9/261.9
恩施	792.2/71.6	1690.9/111.1	177.8/385.6	202.6/0.8
宜昌	825.0/281.7	2011.4/257.7	112.0/296.1	139.8/7.0
武汉	2593.7/148.6	1833.0/231.4	5999.6/43.2	835.5/0.0

因素时空分布及变化。

(1) 高空槽、低涡切变线、低空急流与经由河套南侵冷空气为雷雨大风提供了好的背景条件，西太平洋副高西侧的偏南气流为对流云团东移提供了水汽和能量，使盆地低压系统沿东北路径移动。

(2) 低层辐合、高层辐散造成的强烈上升运动为大量水汽持续输送、雷雨云的发展和维持提供了有利的环境条件，散度垂直分布促进了动力抬升，低空急流有利于地面锋生发展，对中小尺度系统的加速移动起关键作用，对飚线系统的发展和维持起到积极作用，使得天气过程维持较长的生命史。

(3) 卫星和雷达监测反映出中尺度对流体生消发展中有多个较小尺度对流体新生和发展，是雷雨大风的始作俑者，前沿雷达监测对流高度（18km）及液态含水量（ $60\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ）反映出雷雨大风对流强盛，云图与回波落区提示雷雨大风出现在中尺度云团前部的强回波区。

(4) 雷雨大风多普勒雷达回波对雷雨大风临近预报指示性强。多雷达拼图在MCS移动发展判定上较卫星云图更为直接明确，强回波区的移向移速是雷雨大风短时临近预报的关键依据。

(5) 不稳定层结是雷雨大风产生的重要条件，深对流指数（DCI）、对流有效位能（CAPE）和对流抑制能量（CIN）等物理量的分布显示雷雨大风区上游在强对流天气发生前存在着不稳定层结，CAPE明显增大及与CIN减少的过程在雷雨大风预报预警中有明显的提示作用。

参考文献

- [1] 于超. 2011年7月大气环流和天气分析. 气象, 2011, 37(10): 1314-1319.
- [2] 纪玲玲, 孔余寿, 谭永强, 等. 东南沿海地区中尺度雷暴云团卫星云图特征分析. 气象科学, 2005, 25(2): 158-164.
- [3] 崔讲学, 张家国, 王仁乔, 等. 武汉一次下击暴流天气的成因分析. 暴雨灾害, 2007, 26(4): 369-371.
- [4] 李耀东, 刘健文, 高守亭. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究. 气象学报, 2004, 62(4): 401-409.
- [5] 姚建群, 戴建华, 姚祖庆. 一次强飚线的成因及维持和加强机制分析. 应用气象学报, 2005, 16(6): 743-753.

天气预报中不确定性问题的调查分析

杜钧¹ 康志明²

(1 美国国家海洋大气局国家环境预报中心, 华盛顿, 美国; 2 中国气象局国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 围绕天气预报中的不确定性问题, 对中国18个省(市、区)229名代表了国家、省和地市三级以及不同岗龄的预报员进行了问卷调查。具体调查内容包括了以下3个方面: (1) 应用数值预报的情况; (2) 对天气预报准确率的想法; (3) 对天气预报(数值预报)中不确定性、集合预报产品以及预报发布形式等问题的看法。结果表明, 数值预报产品目前已经成为预报员们制作日常天气预报的主要工具。因此, 数值预报所固有的可预报性(不确定性)问题已是预报员不得不面对的一个科学问题。最后, 介绍了一项新近关于美国预报员在日常天气预报中应用集合预报信息所遇到的一些挑战, 这包括“资料不全面、分析工具不足、培训教育不够、缺乏检验、工作负荷重、模式分辨率低以及预报规范格式的限制”7方面。这些可供气象学科带头人和业务管理决策者思考和计划。

关键词: 集合数值预报和产品, 天气预报准确率和不确定性, 完全预报和不完全预报, 预报员和问卷调查

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.008

A Survey on Forecasters' View about Uncertainty in Weather Forecasts

Du Jun¹, Kang Zhiming²

(1 National Centers for Environmental Prediction/NOAA, Washington, D.C., USA 2 National Meteorological Centre/CMA, Beijing 100081)

Abstract: A nation-wide survey was conducted to 229 forecasters who came from 18 provinces representing both senior and junior forecasters at all three levels (national, provincial and regional) in China. Three issues are surveyed: (1) usage of numerical weather prediction (NWP) in daily operational weather forecasting; (2) opinion about weather forecast accuracy; and (3) view about uncertainty in forecasts including ensemble products and methods to convey forecast confidence. The result shows that NWP has been applied by all forecasters to their daily preparations of weather forecasting. Therefore, forecast uncertainty or predictability issue associated with highly nonlinear NWP models is a reality which forecasters have to face day by day. Long-term education is needed to train forecasters in effectively using and correctly interpreting forecast uncertainty information. Regarding weather forecast accuracy, all forecasters admit that any forecast has errors and believe that it will never be perfect no matter how advanced meteorological sciences are, given chaotic nature of the atmospheric system. With imperfect forecasts, most forecasters believe that specialized forecast products particularly tailored to a certain type of customer as well as frequent updates of forecast information are important to maximize the economical and societal values of weather forecasts. In spite of the variation in forecast accuracy, most forecasters have, however, an idea about their confidence or difficulty level of a forecast he or she is issuing beforehand. Being asked if such forecast confidence information should be released to the public and users, most forecasters responded with a positive “yes” answer although a few of them worried that the public and users might be confused and do not know how to use these information correctly. To fully accomplish this, forecasters acknowledge that forecast-issuing format/context must also need to be reformed accordingly. Furthermore, the majority of forecasters welcome the National NWP Center to provide ensemble-based quantitative forecast uncertainty products for them to use although the “single-solution” type of ensemble products is currently more preferred to “multi-solution” type. Therefore, the “complete forecast” concept of including quantitative uncertainty information as part of a forecast instead of the current single-valued deterministic “incomplete forecast” is generally an acceptable one to forecasters. Various formats are also voted to better convey forecast uncertainty information to the public. To let the public and users be aware of the fact that a forecast always has a certain degree of uncertainty and it is necessary and valuable to take such uncertainty into account in their decision-making process, forecasters agreed that a combination of popular scientific education, training and collaboration is a way forward to achieve the goal.

Finally, a survey recently done by Stony Brook University about the challenges faced by U.S. forecasters in utilizing ensemble information in their daily forecasting activity is introduced. The seven main obstacles identified by the survey

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2014年1月10日
第一作者: 杜钧(1962—), Email: Jun.Du@noaa.gov
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006018);
中国气象局气象关键技术集成与应用项目
(CMAGJ2013Z05)

are summarized, which could be a useful reference for Chinese forecasters, scientists and managers in making their long-term plans. The seven challenges are “unavailability of full ensemble data, lack of ensemble data mining/interpretation/display tool, lack of relevant training and education, lack of ensemble product verification, forecasters’ overload of their daily routine work, coarse spatial resolution of ensemble model, and limitation/restriction of forecast-issuing format/context”.

Keywords: ensemble numerical weather prediction and product, weather forecast accuracy and uncertainty, complete and incomplete forecasts, forecaster and questionnaire

1 引言

正确地处理预报中的不确定性, 对于更大地实现天气、气候预报的应用价值具有实际意义^[1]。作者认为要真正地让这一理念成为现实, 必须要经过以下3大步。第一步, 是科学上的认可。自从Lorenz发现大气运动的混沌性^[2]以及Epstein提出动力随机预报^[3]、Leith提出集合预报^[4]以来, 大气可预报性问题的存在和重要性已被逐渐认可。虽然集合预报系统目前还处于发展阶段、结果也不完全理想, 但目前它们已在世界上的主要数值预报中心成为日常业务系统的一部分^[5]。所以, 第一步目前已经基本成熟。第二步, 是让预报员认可并成为日常预报中不可或缺的一部分。这一步在美国和欧洲正在逐步实现的过程中, 特别是预报员的认可在那里已不再是问题。在中国, 这一步可能才开始不久。譬如, 2008年奥运会期间曾有中尺度集合预报产品的尝试^[6-7]。本文进行的调查研究正是为了加速这第二步的实现。这一方面需要预报员通过实践和时间来逐步体验预报不确定性信息的价值, 以致使其成为制作预报过程中必不可少的一部分(这需要时间); 另一方面需要气象业务管理者根据实际情况来修改预报规范和改变预报的发布形式, 来适应新科技的进步和用户的需要(这需要远见和胆识)。当然, 针对不同的用户, 预报发布的形式可能也不一样。第三步, 是让公众和社会接受并应用到具体的决策过程中。有些需要风险估计的用户, 如保险公司, 正开始应用气象预报的不确定性信息。但对于大多数用户和公众而言, 他们可能还不理解、不能接受或不会应用这种常常包含有几种可能性的带有不确定性的定量预报。所以, 要实现这第三步显然是任重而道远。

2011年5—6月, 我们通过电子邮件的方式对中国18个省市的省气象台和地市气象台以及中央气象台部分预报员进行了关于对天气预报中预报不确定性问题看法的调查(问卷及统计数字见附录)。调查内容包括对数值预报的应用情况、天气预报准确率、数值预报的不确定性、集合预报产品以及预报发布形式等问题的看法。希望调查结果能帮助科研人员和业务管理者了解业务预报员们对这一预报不确定性问题的基本

看法, 以便在今后行动中能有放矢。具体来说, 希望对如下3方面有所帮助: (1) 如何更好地提高和改进现有天气预报信息发布和服务, 这包括预报规范和发布形式的改革; (2) 如何更有针对性地设计集合预报产品, 使它们既能合理表达预报的可信度又能使预报员喜爱并易用; (3) 如何让公众和用户更准确地理解和吸取天气预报的有用信息并按自身的特点有选择地来应用预报信息, 更好地为经济和社会活动服务。

2 基本情况

2.1 样本

229位业务预报员参加了调查(回答了问卷), 他(她)们来自18个省(市、区)(上海、天津、重庆、江西、江苏、浙江、山东、安徽、湖北、湖南、四川、河北、广西、吉林、黑龙江、甘肃、青海和新疆)和中央台。代表了3级气象业务部门(图1a: 国家(9.6%), 省(46.3%), 地市(44.1%))以及不同岗龄(即从事预报工作的年数)的预报员(图1b: 1~3年(23.1%), 4~6年(21.8%), 7~10年(17.5%), 10年以上(37.6%))。所以, 样本应该具有代表性, 因为它包括了各级和不同资历业务预报员的群体。

2.2 使用数值预报产品的情况

图2a是预报员在他们日常制作天气预报过程中应用数值预报产品的情况。可以看出, 数值预报产品已经成为日常预报的主要工具: 有88.8%的人既在形势预报上也在要素预报上应用数值预报产品, 另有9.9%的人只在形势预报上参考数值预报, 1.3%的人只在要素预报上参考数值预报, 而已经没有人不在日常预报中运用数值预报。所以, 数值预报产品中所固有的可预报性(不确定性)问题^[8-9]已是当前预报员不得不面对的一个科学问题。关于这些预报不确定性问题, 杜钧等^[10-13]已作过一系列详细而通俗的介绍。

2.3 对预报不确定性问题的了解

问卷对预报员是否了解预报不确定性问题进行了调查(图2b)。大部分(66.9%)接受调查的预报员对此问题或多或少有一些了解: 47.2%的预报

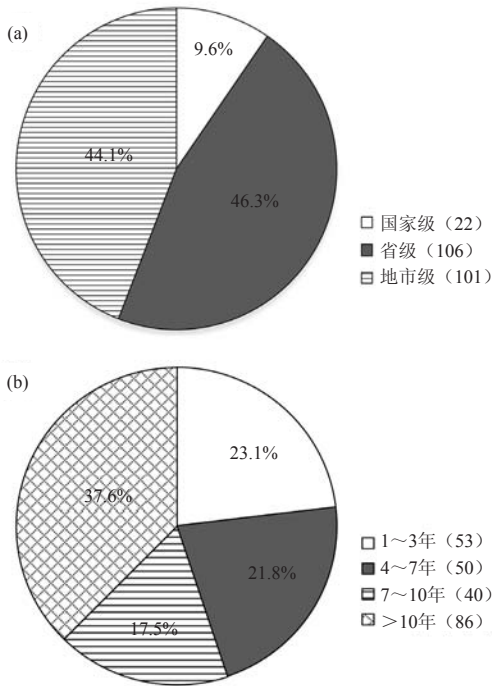


图1 调查样本分布
(a) 工作单位; (b) 岗龄 (预报服务年限)

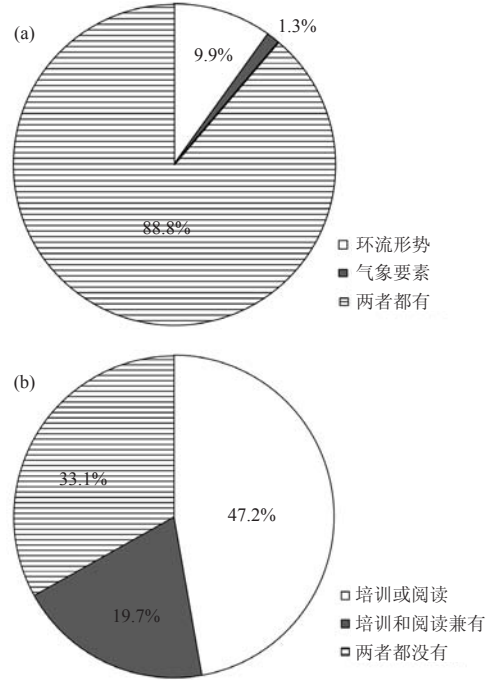


图2 数值预报产品使用情况 (a) 和对“预报不确定性问题”的接触 (b)

员或者参加过集合预报的培训或者阅读过集合预报和预报不确定性的文章, 有19.7%的预报员两者都有。当然, 也有相当数量的预报员 (33.1%) 对此问题了解不多, 既没有参加过任何培训也没有读过有关文章。如果, 再按“岗龄”和“工作单位”两组来统计, 可以发现资历深的预报员 (≥ 7 年) 比资历浅的预报员 (< 7 年), 对此问题了解的比例要高 (~76%比~57%), 中央气象台的预报员比地市级气象台的预报员的比例要高 (96.4%比55.4%), 而省台预报员介于二者之间 (73.6%)。原因是资历深的预报员 (尤其是7~10年的业务骨干) 比资历浅的预报员参加培训机会多 (~32%比~16%, 图3a) 和阅读多 (~71%比~54%, 图3a); 中央台的预报员比地市台的预报员参加培训机会多 (50%比9.9%, 图3b) 和阅读多 (86.4%比54.5%, 图3b)。从了解这一问题的来源来说, 大多数人员是通过阅读文章 (63.3%), 而只有

少部分人是参加了集合预报等培训 (23.1%)。

3 调查结果

在下面的分析中, 除了总体样本的统计外, 还按照“工作单位” (图1a)、“岗龄” (图1b) 以及“对预报不确定性问题的了解程度” (图2b) 3个子样本集进行了统计。如果子样本集的结果没有明显不同于总体样本的结果, 我们仅给了总体的结果; 否则, 我们会指出子样本集的差异。为了更好地理解调查结果, 建议读者在阅读本节前先阅读附在文后的问卷和总体统计数字而先有个大致的了解。

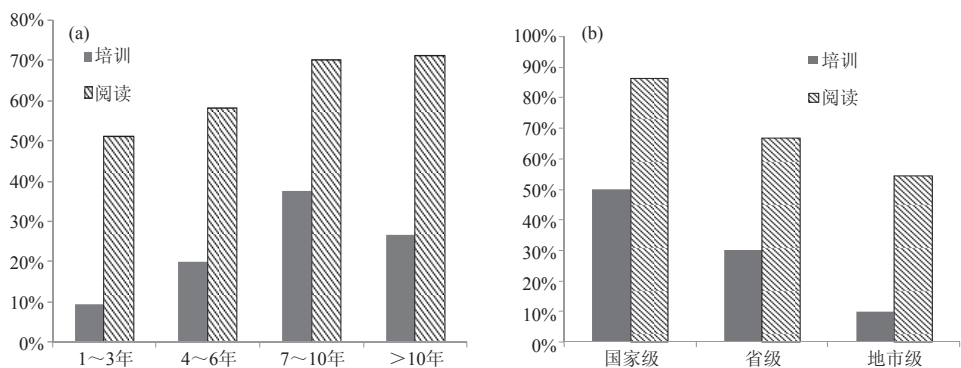


图3 了解“预报不确定性问题”的来源 (斜线柱代表“阅读”、实黑柱代表“培训”) (a) 按岗龄; (b) 按工作单位

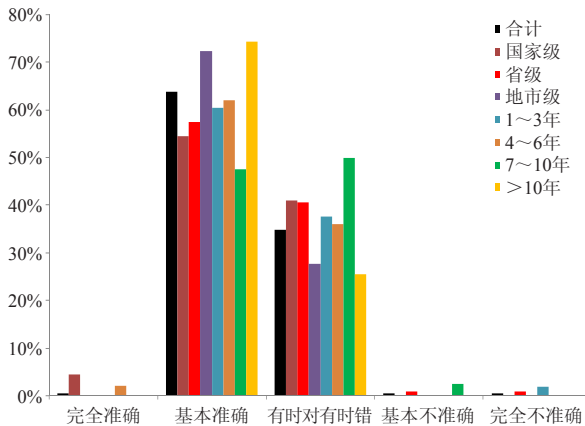


图4 预报员对当前天气预报准确性的看法

3.1 对天气预报水平和服务的看法

图4是预报员对现有天气预报准确性的看法。63.8%的人认为“基本准确”，34.9%的人认为“有时对有时错”，只有极个别的人认为“完全准确”（0.4%）或“完全不准确”（0.4%）。这说明了在承认预报不完全准确的前提下，大部分预报员对现有天气预报水平有一个比较正面和客观的看法。当然，这应当归功于目前的气象科技已经有了相当的水平 and 实用价值。值得注意的是，地市台的预报员对预报准确率比较乐观（72.3%认为“基本准确”，只有27.7%认为“有时对，有时错”），而中央台和省市台的预报员则比较不乐观（约55%认为“基本准确”，而认为“有时对，有时错”的比例增加到41%）。这原因可能是国家和省台负责的地域较大，情况较全面也比较复杂。另外，从岗龄来看，发现骨干预报员（7~10年）对此有更负面的看法（47.5%认为基本准确，50%认为“有时对，有时错”，甚至有2.5%的人认为“基本不准确”）。可能原因有：一是骨干预报员遇

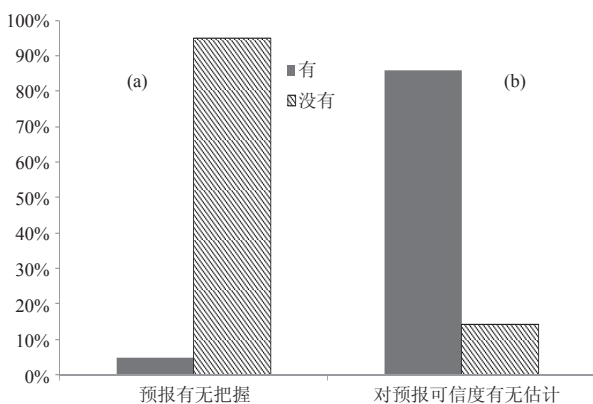


图5 预报员对自己制作发布的单值确定预报的评价 (a) 准确性的把握；(b) 可信度的估计

到的疑难过程多，报错的经历也多，而对错误的印象要更深刻；二是骨干预报员对报对报错会有更全面的认识，新预报员则仅考虑结果，对其中的技巧和内涵则认识不足；三是近年来数值预报的水平在提高，且雷达、卫星、自动站等技术手段也在提升，新预报员对数值预报和新技术的依赖性更大一些，骨干预报员则还需要有转变过程。但不解的是老预报员（>10年）则很乐观（74.4%认为“基本准确”，25.6%认为“有时对，有时错”），不知这是否是因样本局限而出现的偶然结果，还是有什么特殊的相关因素（如水平较高和比较自信）而造成的，笔者不知如何解释。

当被问及是否对自己所发布的预报有十足的把握时，绝大多数（95.2%）都承认“没有”（图5a）。虽然如此，但他们中的大部分人（86%）在心中却对所发布的预报的可信度如何有一个估计（图5b）。这一结果其实正好反映了气象预报混沌性的实质——预报存在不确定性，但并不是随机的。至于天气为何不能被完全报准（图6），绝大部分人（93.2%）认为这是由于大气运动的复杂性和混沌性，并且认为天气是永远不可能被100%报准的。只有极少数的人（7%）认为这是因为目前的气象科技还不够发达，但随着科学的进步，总有一天天气是可以被完全报准的。中央台预报员没有人持这种“总有一天会完全准确”的观点，而省台的比较多（12.3%），地市台的也有一些（3%）。预报骨干（7~10年）有很多人（15%）也持这种观点。不解的是“对预报不确定性”有些了解的人群持这种观点的比例反而偏高（15.6%），这似乎刚好同培训和教育的目的背道而驰。虽然，培训等对于预报员接受新的技术是一种很重要的途径^[14]，但似乎仅仅靠这种一两次短暂的培训和教育是远远不够的。要使人们能接受一种同传统的做法完全不同的新

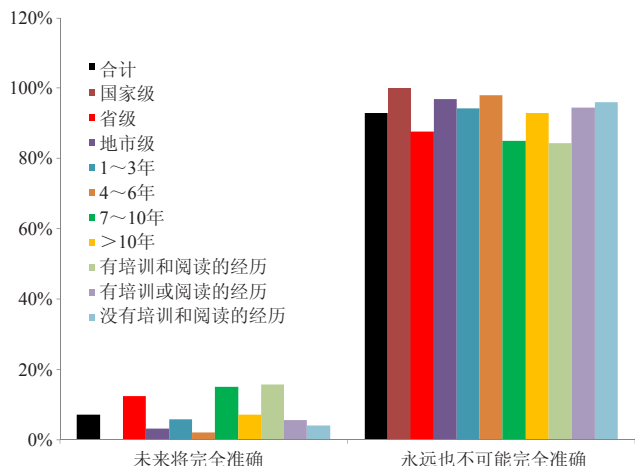


图6 预报员对将来终极天气预报准确性的看法

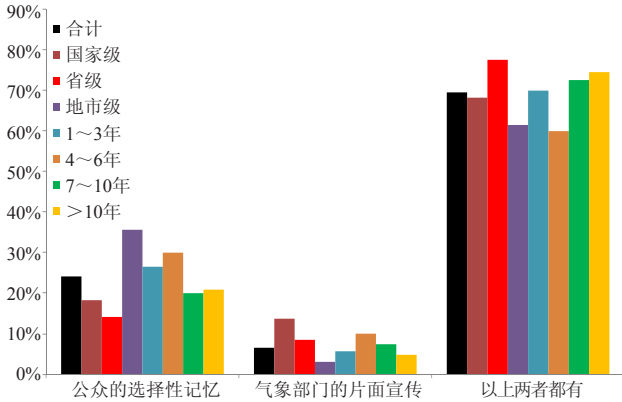


图7 预报员关于“公众对天气预报准确性有负面看法”这一现象的认识

观点和新思想，如集合预报^[11]，培训和教育是一项长期而经常性的任务。这一结果同北京奥运会的中尺度集合预报研究示范项目报告中的结论是一致的^[6]。

当被问及为何公众觉得气象部门的天气预报不太准确（如文献[10]）的原因时（图7），大多数预报员（69.4%）认为一部分原因在公众身上——即只记得少数报得不好的（但往往是影响大的复杂的天气）而忘了多数报得好的（往往是影响小的简单的晴好天气）；而另一部分原因在气象部门自身的片面宣传上（给人印象是天气是可以被精确地预报出来的）。但也有相当比例的预报员（24%）只怪公众，而仅仅只有6.6%的人只怪气象部门自己。在地市台中这一点特别明显，怪公众的有35.6%，怪自己的仅有3%。而在国家和省一级的预报员中，怪自己的明显增加（8.5%~13.6%），而怪公众的明显减少（14.2%~18.2%）。

在预报不完全准确，“有时对，有时错”的情况下，如何提高气象服务的质量呢？超过半数以上的预报员（56.3%）认为“要加强专业预报”和“增加预报发布频次”双管齐下。也有相当多的预报员（36.7%）认为只要加强专业预报就可以提高服务质量；而仅有7%的人认为只要增加预报发布频次、不断更新预报信息就可以提高服务质量。注意，这里所说的专业预报并不是泛指一般的有偿专业服务，而是指对特定行业和特别活动的特殊需求“量身定制”的专门化预报。关于针对不同用户的不同需要，应该用不同预报信息来决策以最大程度来实现预报的经济价值，这在文献^[12]中有过专门的讨论。

3.2 对预报不确定性产品的看法

首先，广大预报员（93.9%）对于国家气象中心能提供数值预报产品的可信度信息^[15-17]表示欢迎，只

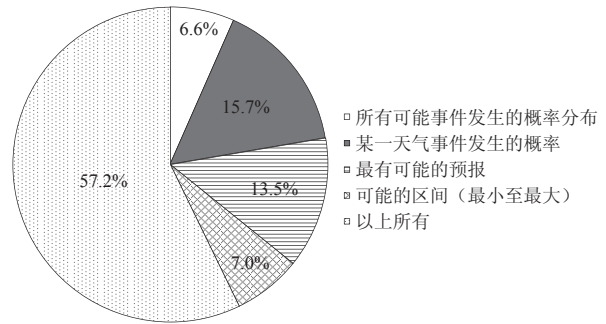


图8 预报员对集合预报产品的选择

有6.1%的预报员表示不需要。但中央台的预报员有9.1%表示不要气象中心提供的预报可信度产品，这一比例要高于省台和地市台的预报员。这可能同中央台能接触到更多的其他模式预报资讯以及目前的集合预报产品质量还不够满意有关。至于具体要什么样的预报可信度产品（图8），超过半数以上的预报员（57.2%）想要得到全面的预报不确定性信息，这包括“所有可能事件发生的概率分布”、“某一特定事件发生的概率大小”、“最有可能出现的预报”，以及“预报的可能性区间（从最小值到最大值）”。值得注意的是，在剩下的42.8%的预报员中，“某一特定事件发生的概率大小”和“最有可能出现的预报”是两类很受欢迎的产品，分别为15.7%和13.5%。而全面反映预报不确定的“分布”式产品，即“所有可能事件发生的概率分布”和“预报的可能性区间（从最大值到最小值）”，其受欢迎程度明显偏低（分别为6.6%和7.0%），这可能同预报信息是否好用、怎样用，以及是否有足够时间消化等有关，当然也有一些

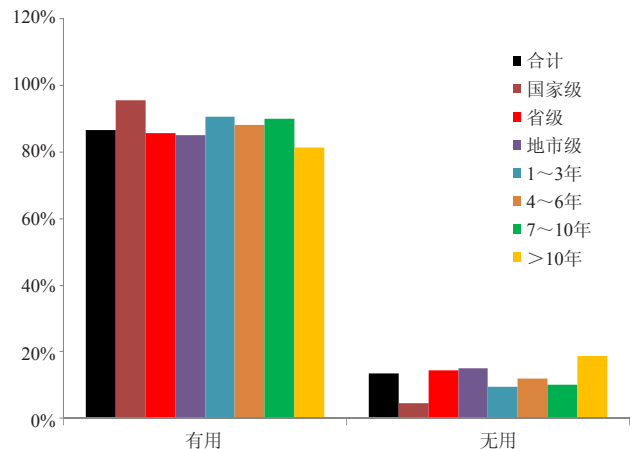


图9 预报员对国家气象中心向他们提供“预报不确定性”信息和产品的意见

人可能是受习惯性的确定论思维的影响。

对于预报员自己来说（图9），有了预报可信用度信息以后，大部分预报员（86.4%）认为他们会用来调整和修改其所做的预报，但同时也认识到在目前所要求的“单一值确定论”形式的预报实践中，并不能充分利用不确定性信息的所有价值，所以认为现行预报规范需要进行合理科学的修改，以包括不确定性信息作为预报的一部分，即所谓的“完全预报”^[1,13]。当然也有相当一部分预报员（13.6%）认为预报不确定性信息没有用处，反而造成混乱。持这一反对观点的在老预报员（>10年）和地市、省级预报员中的比例要高一些（分别为18.6%和14.5%），而中央台较低（4.5%）。

从前述中，我们已经看到预报员们虽然对自己所做的预报没有十足的把握，但对于预报的可信用度如何却有一个估计。所以，对于气象用户来说，当问到是否应该把这可信用度或预报不确定度作为预报内容的一部分（即“完全预报”），并如实地告诉公众和用户时（图10），绝大多数预报员（74.7%）认为“应该”。认为“应该”的比例在国家级预报员中比省、地市级的预报员中要高（86.4%比73%），资深预报员（≥7年）比新预报员（<7年）要高（80%比70%）。比较上面的结果，这里可以隐约地体会到老预报员（>10年）对于预报不确定性产品有一种微妙的矛盾心态：对于用户，他们持比较开放的心态（倾向把预报可信用度信息告诉用户），而对于自己，他们有不少人持比较保守的态度（认为不确定性信息没有用处，反而造成混乱）。当然，绝大多数资深预报员不管对于用户（80%）还是对于自己（86%）都持开放的态度。另外，对于“预报不确定性”有些了解的预报员认为“应该”的比例明显地高于对此问题不了解的预报员群体（84.4%比69.7%）。在这一点上，

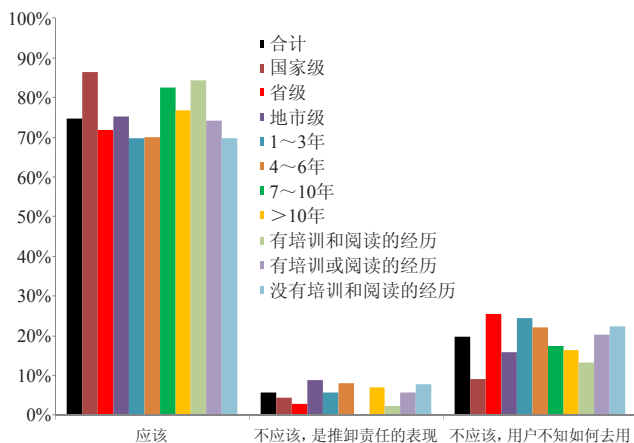


图10 预报员关于“是否应该把预报可信用度信息告知公众和用户”这一问题的看法

培训与教育似乎起到了一定的作用。值得注意的是，持反对意见的预报员其主要理由（19.7%）是担心用户不会应用预报不确定性信息因而造成混乱，而只有5.7%的人是因为“面子”问题（“报不准却把责任推给用户”）。所以那些预报员的动机是为用户着想。这与前面看到的预报员强调“加强专业预报”来提高气象服务水平的看法是一致的。这充分说明了气象界同用户之间建立关系的重要性，并且这一点已经得到了广大预报员的认可。关于用户如何应用预报不确定性的信息，以提高预报的经济价值和加强科学的决策，杜钧等^[12]对此进行了专门讨论。上面两项的调查结果，表明绝大多数预报员都表示愿意应用预报不确定性的产品（~86%），并且认为应该把预报可信用度告诉用户（~75%）。这说明，用“包含了不确定性”的“完全预报”来取代现行“确定性单一值”的“不完全预报”是一个已被广大预报员接受的概念，它在目前预报员中已有相当的思想基础。尤其是，他们对自己较对用户更加开放（~86%比~75%）。当然，针对不同的用户（如一般公众和专业用户），预报发布的形式也可有所不同，这需要进一步的探讨。其实，在下面的调查结果中也有一定反映。

那么如何向大众来表达预报中的不确定性呢（图11a）？结果发现，概率是很多预报员所推崇的

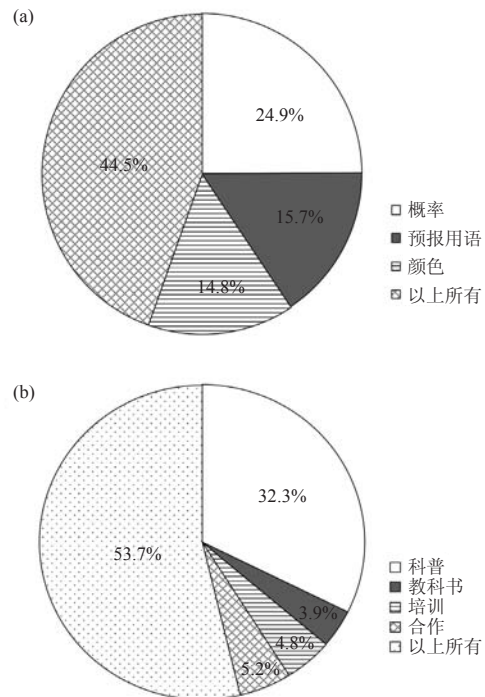


图11 预报员关于“不确定性产品的表达形式”（a）和“如何让公众和用户了解预报的不确定性”（b）问题的看法

(24.9%)，用不同的语言和颜色也受到一定程度的欢迎（分别为15.7%和14.8%）。可喜的是有约一半的预报员（44.5%）较开放，愿意接受以上各种方式，认为在不同的场合应用不同的方式来表达。这种开放态度在中央台预报员中尤其普遍（达72.7%）。为了更好地做好气象服务，如何让广大公众和用户了解气象预报有不可避免的不确定性本质以避免他们有不切实际的期望呢（图11b）？有相当数量的预报员（32.3%）认为科普是一种首选的工具。其次依次是同用户合作（5.2%），培训（4.8%）和学校科学常识类教科书（3.9%）。而超过半数的预报员（53.7%）认为以上这些都很重要，应该多管齐下。

3.3 推广应用集合预报所遇到的一些障碍

在美国，由于集合预报开展得比较早（1992年，全球中期集合预报系统上业务^[18]；2001年，区域短期集合预报系统上业务^[19]），预报员已经很习惯于应用集合预报资料，集合预报已经成为他们日常制作预报不可或缺的一部分。在这种情况下，美国预报员关于推广应用集合预报和预报不确定信息所面临的一些问题也许会对中国预报员（还处于熟悉集合预报的开始探索阶段）有一些借鉴作用。关于这个问题，美国纽约州立大学石溪分校不久前进行了一项调查（<http://dentrite.somas.stonybrook.edu/CSTAR/Sureys.html>）。该调查发现预报员还不能完全把预报不确定性信息应用在日常的天气预报实践中的主要原因有以下这一些（按得分从高到低排列）：

（1）资料。由于数据传输能力的限制，许多原始集合预报资料，如所有集合成员的预报，还不能及时传给基层气象台站，所以预报员无法得到完整的信息或根据需要自行加工成特殊的产品。

（2）工具。缺少灵活、方便、功能齐全的资料处理和显示软件。所以，预报员无法方便快速地处理（计算）和显示集合预报资料以提取有效的预报不确定性信息。

（3）培训。预报员在如何应用集合预报、正确解释集合产品等方面的知识还需要进一步培训。

（4）检验。对集合预报特别是其不确定性的度量等缺乏系统性的检验。所以，预报员们对集合预报的“好”与“坏”心中无数而缺乏信心，影响他们的有效使用。

（5）工作负荷。对现有的常规预报资料的处理与分析已使预报员们的日常工作忙于应付，因此没有时间再去消化新增加的集合预报资料。

（6）模式分辨率。由于集合预报要计算许多模式成员，受计算机资源的限制，集合预报模式的空间分辨率一般总是要比高精度的单一预报模式的空间分辨率低很多。所以，许多预报员更愿意去参考高分辨率的模式结果，而忽视低分辨率的集合预报结果。

（7）预报发布规范。因为现有的预报发布规范和内容格式仍是确定论式的（如全美数码化预报数据库，NDFD），没有给预报不确定性信息留有位置。所以，预报员虽有定量地预报不确定度或预报可信度信息但却无法表达，因为最后还是要填一个确定的预报值。这一问题在本调查结果中也有同样的反映。所以，修改预报发布规范和格式势在必行。关于这一点，美国目前正在改革中，如在预报数据库中增加预报不确定性的内容和在下一代航空预报系统中增加一维“预报不确定性”。

以上这7方面的问题，作者认为中国的预报员在这预报形式转型的过程中或早或迟都会面临。所以在这写出来供学科带头人和业务管理决策者参考应是有价值的。

4 结论与讨论

为了了解目前预报员对天气预报中不确定性的看法，我们对中国18个省（市、区）的代表国家、省和地市3级的229位业务预报员就有关问题进行了调查。具体调查内容包括对数值预报的应用情况、天气预报准确率、数值预报的不确定性、集合预报产品以及预报发布形式等问题的看法。调查结果分类总结讨论如下。

4.1 数值预报及其可预报性

首先，调查表明目前数值预报产品已经成为预报员们在制作天气预报中不可缺少的重要工具。因此，数值预报中所固有的可预报性本质是预报员们必须认真面对的一个实际问题。超过半数以上的预报员对预报不确定性问题有一些了解。了解的途径主要是通过阅读文章和培训，其中阅读文章要比培训更普遍。这说明通过写文章来传播新的思想比培训可以达到更多的人。所以，在此建议前沿的科学家们应该多写一些通俗的文章来传播新的科学思想以促进新科技尽早实现其应用价值。然而，也有相当大比例（三分之一）的预报员对此问题并没有接触过，特别是地市级的和新的预报员更是如此。因此，关于数值预报中的不确定性或可预报性问题，教育（如写文章）和培训在目前还是一个急需加强的任务，并且还是一种长期的任务，这样才能真正达到预期的效果。特别要指出的

是, 培训的对象不要忽略了如调查所显现的地市台和新的预报员们。

4.2 预报准确率和气象服务

对于现有天气预报的水平, 几乎所有预报员都承认它是不完全准确的。并且大部分人也认为即使在将来气象科学不断地完善, 天气预报也是不可能完全准确的, 因为这是由大气运动的复杂性和混沌性所决定的。可见预报员们在他们的头脑里对天气预报科学的概貌还是有一个很客观清醒的认识。在关于为何公众总是责怪气象部门预报不准确的问题时, 大部分预报员认为原因有二: 一部分在公众身上, 公众往往记住少数报得不好的(但也往往是影响大的复杂天气), 而忘了大多数预报得好的(往往是那些影响小的单一的晴好天气); 另一部分在气象部门自己身上, 气象部门往往片面地宣传和过度强调成功积极的一面, 而忽略了失败的报道和分析, 以致于留给公众“天气是应该可以被准确地预报出来”的错误印象, 在不知不觉中提高了公众对天气预报准确率的期望值。以上两点很值得我们气象工作者认真思考。一方面, 虽然总体来说, 天气预报已有一定的准确率, 但在复杂的重大天气事件中它往往有很大的不确定性。那么我们如何以科学的态度来正确地面对这一不确定性(在这里也许“少数”比“多数”更重要)? 另一方面是我们应该如何报道宣传天气事件? 笔者认为对预报事件的报道要全面客观反映真实的预报水平, 而要多利用报错的重大天气事件向公众解释气象预报的难处和不确定性等。这样, 长期下来也许会使公众理解气象预报的不准确性源自何处, 从而降低人们对天气预报的期望值。在目前预报不太准确的情况下, 大部分预报员认为通过针对性的专业预报和增加预报发布频次是提高气象服务的途径(特别是前者)。这里可以间接地看到, 气象部门走出去同气象用户建立关系是更大地发挥天气预报作用很关键的一步。

4.3 预报可信度信息的处理和集合预报产品

调查发现, 虽然几乎没有人对自己所做的预报有十分的把握, 但大部分人对自已所发布的预报的可信度如何, 却有一个大致的估计, 即有些预报把握比较大, 而有些没什么把握。并且大部分预报员同意我们应该把这个可信度作为预报的一部分, 实事求是地告诉公众和用户。他们也欢迎国家气象中心(数值预报中心)能向他们提供各种预报不确定性的产品。其中, “单一解”类的集合预报产品似乎比“多解”类

的集合预报产品至少在现阶段更受预报员们的欢迎。所有这些产品都能在一定程度上帮助预报员们来修正预报结果, 但是他们也认识到在不改变现行“确定论形式”的预报规范的情况下, 这些预报不确定性信息的用处受到很大的限制。当然, 也有一些人因为担心用户不会应用预报不确定性信息, 所以觉得不应该把预报中的不确定性信息告诉用户。可见让用户熟悉和应用预报不确定性信息的专业“气象行业服务模式”是多么的重要。总的说来, 用“包含了不确定性”的“完全预报”来取代现行“确定性单一值”的“不完全预报”是一个已经能被大多数预报员接受的概念, 它在目前的预报员中已有相当的思想基础。当然, 从思想到行动, 它还有很长的路要走。

4.4 向公众、用户表达和宣传预报的不确定性

在如何向公众和用户表达预报中的不确定性方面, 概率是很多预报员所推崇的, 用不同的语言和不同的颜色也受到一定程度的欢迎, 更多的人认为要在不同的场合应用不同的方式来表达(这一点可作进一步的探讨)。在如何让公众和用户了解气象预报存在不确定性的科学事实方面, 有相当数量的预报员认为科普是一种首选的工具, 其次依次是同用户合作、培训和各类学校的教科书。超半数以上预报员认为以上这些都很重要, 要多管齐下。笔者认为, 目前预报员们对于大众教科书的教育重要性认识可能还不足。其实, 从长远来看, 在科学常识类教科书中把气象科学的不确定性本质写进去, 这会使下一代人对气象预报有一个正确的看法, 而不至于对预报准确性有不切实际的期望。从短期看, 科普应该是一个不错的补救方法。可惜的是, 现在的气象科普基本上都是“知识型”的, 以介绍大气现象为目的。这种“知识型”的科普只授人以知识而不能改变人的思想和看法, 所以其社会价值非常有限。因此, 我们也应该写一些“观念型”的气象科普文章以帮助大众了解和正确应用气象信息。

4.5 美国预报员应用集合预报资料所遇到的障碍

最后, 文章利用不久前纽约州立大学石溪分校所进行的一项调查介绍了美国预报员在日常业务中应用集合预报资料所遭遇到的一些障碍。这包括以下7个方面: 资料不全面、分析工具缺乏、培训不够、系统性检验缺乏、工作负荷重、模式分辨率不够、预报规范格式限制。这7方面的实际问题作为气象学科带头人和业务管理决策者应该认真思考并提前合理安排和计划。

附录:

预报员应用预报不确定信息的调查表和总体统计

一、预报员的工作经验

1.1 从事预报工作的年限?

(a) 1~3年[23.1%] (b) 4~6年[21.8%] (c) 7~10年[17.5%] (d) 10年以上[37.6%]

1.2 在哪一级气象部门工作?

(a) 地市级[44.1%] (b) 省级[46.3%] (c) 国家级[9.6%]

1.3 在日常天气预报制作过程中,你在多大程度上依赖数值预报产品?

(a) 主要参考形势预报[9.9%] (b) 主要使用要素预报[1.3%]

(c) a、b两者都用[88.8%] (d) 基本不用[0%]

1.4 有否参加过关于预报不确定性(如集合预报)的培训?

(a) 有[23.1%] (b) 没有[76.9%]

1.5 有否阅读过有关预报不确定性的文章?

(a) 有[63.3%] (b) 没有[36.7%]

二、对现有天气预报的看法

2.1 你觉得现有天气预报的水平如何?

(a) 完全准确[0.4%] (b) 基本准确[63.8%] (c) 有时对,有时错[34.9%]

(d) 基本不准确[0.4%] (e) 完全不准确[0.4%]

2.2 当你发布预报时,对自己所作的预报有100%的把握吗?

(a) 有[4.8%] (b) 没有[95.2%]

2.3 你是否对自己所做预报的可信度心里有一个大致的估计呢?即认为有些预报对的可能性大,而对另一些预报却没有什么把握?

(a) 是[86%] (b) 不是[14%]

2.4 你觉得公众认为天气预报不太准确的原因是什么?

(a) 因为对人们生活有重大影响的高影响天气和转折性天气往往不易被报准,而人们往往对预报的错误印象更为深刻[24%]

(b) 气象部门的宣传和科学进步使得公众以为天气演变是可以被100%准确地预报出来的[6.6%]

(c) 以上两者都有[69.4%]

2.5 你自己认为天气预报不准的原因是什么?你相信天气预报总有一天会报得100%准确吗?

(a) 目前气象科学和技术还不够完善,但当它们完善后,总有一天天气是可以被100%准确地预报出来的[7%]

(b) 一方面是气象科学和技术还不够完善,另一方面是大气运动的复杂性。但由于大气系统的混沌性,天气演变永远都不可能100%准确地预报出来[93%]

2.6 在现有预报水平上,你认为怎样才能提高我们的预报服务质量?

(a) 细化预报产品,针对不同的用户制作专门的产品[36.7%]

(b) 增加预报发布频次,不断更新预报信息[7%]

(c) 上述两者都要[56.3%]

三、对预报不确定性量化信息应用的看法

3.1 你是否希望国家气象中心的数值预报产品也能定量地提供预报可信度(或预报不确定性)的信息?

(a) 要[93.9%] (b) 不要[6.1%]

3.2 你希望得到什么样的预报可信度信息?

(a) 所有可能事件发生的概率分布[6.6%] (b) 某一特定事件发生的概率大小[15.7%]

(c) 最有可能出现的预报[13.5%] (d) 预报的可能性区间(从最小值到最大值)[7%]

(e) 以上所有[57.2%]

3.3如果有了量化的预报可信度信息,你会如何把它们应用在日常的天气预报制作和服务上?

(a) 在现有预报规范下(即最后发布的是单一值的确定预报),预报员可以通过斟酌预报用语、调整量级等来表达对预报的把握程度,但这种方式预报可信度信息得不到最大程度的应用。要使它能得到最大程度的应用,现有的预报规范需要修改(由确定性预报变为概率预报)[86.4%]

(b) 没有用处,反而造成混乱[13.6%]

3.4你觉得应不应该把这种隐藏在预报背后的预报可信度或不确定性作为天气预报的一部分如实地告诉公众和用户,为什么?

(a) 应该。将预报不确定信息告诉用户,这才是客观、科学的态度,让用户根据预报不确定性去安排他们的行为,将有助于最大限度地发挥预报的价值。并同时要帮助用户正确理解天气预报不确定性的内容[74.7%]

(b) 不应该。因为人们会觉得气象部门预报不准,还把预报的责任推卸到用户身上[5.7%]

(c) 不应该。因为用户不会用带有不确定性的预报,只会造成混乱[19.7%]

3.5如果要求对公众和用户发布预报的可信度,你觉得什么样的形式比较合适?

(a) 预报事件的概率大小[24.9%] (b) 不同的用语(如可能性很小、中等、很大)[15.7%] (c) 用不同颜色来表达预报可信度(如红色代表可信度很低,黄色代表中等,绿色代表可信度高)[14.8%] (d) 根据不同情景,所有以上这些都[44.5%]

3.6让公众能够接受天气预报有不确定性的事实(如同治疗疾病有风险一样),并科学地运用量化的不确定性信息来决策(使社会或经济效益最优化),你认为关键因素是什么?

(a) 大众科普宣传[32.3%] (b) 学校教育(教科书)[3.9%] (c) 培训[4.8%]

(d) 气象界同用户合作[5.2%] (e) 所有以上这些[53.7%]

参考文献

- [1] U.S. National Research Council. Completing the forecast: Characterizing and communicating uncertainty for better decision using weather and climate forecasts. Washington D.C.: The National Academy Press, 2006. (中译本:王东海,等译.完善预报:表征并交流不确定性以利用天气气候预报作出更佳决策.北京:气象出版社,2009.)
- [2] Lorenz E N, 著.刘式达,刘式适,严中伟,译.混沌的本质.北京:气象出版社,1997.
- [3] Epstein E S. Stochastic-dynamic prediction. Tellus, 1969, 21: 739-759.
- [4] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. Mon Wea Rev, 1974, 102: 409-418.
- [5] 杜钧.集合预报的现状和前景.应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [6] Duan Y H, Gong J D, Du J, et al. An overview of the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project B08RDP. Bull American Meteor Soc, 2012, 93(3): 381-403.
- [7] Kang Z M. Verification of B08RDP products during "2008 Beijing Olympic Games". A talk in the 4th B08FDP/RDF Workshop, Guangzhou, China, April 21-23, 2009.
- [8] 丑纪范.大气科学中的非线性与复杂性.北京:气象出版社, 2002.
- [9] 薛纪善.和预报员谈数值预报.气象, 2007, 33(8): 3-11.
- [10] 杜钧,陈静.天气预报的公众评价与发布形式的变革.气象, 2010, 36(1): 1-6.
- [11] 杜钧,陈静.单一值预报向概率预报转变的基础:谈谈集合预报及其带来的变革.气象, 2010, 36(11): 1-11.
- [12] 杜钧,邓国.单一值预报向概率预报转变的价值:谈谈概率预报的检验和应用.气象, 2010, 36(12): 10-18.
- [13] 王东海,杜钧,柳崇健.正确认识和对待天气预报的不确定性.气象, 2011, 37(4): 385-392.
- [14] 段欲晓,王迎春,叶谦,等.影响预报员应用先进天气预报技术的因素分析.气象, 2010, 36(6): 122-127.
- [15] 杨学胜.业务集合预报系统的现状及展望.气象, 2001, 27(6): 3-9.
- [16] 李泽椿,陈德辉.国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用.应用气象学报, 2002, 13(1): 1-15.
- [17] 邓国,龚建东,邓莲堂,等.国家级区域集合预报系统研发和性能检验.应用气象学报, 2010, 21(5): 513-523.
- [18] Tracton M S, Kalnay E. Operational Ensemble Prediction at the National Meteorological Center: practical aspects. Wea Forecasting, 1993, 8: 378-398.
- [19] Du J, Tracton M S. Implementation of a real-time short-range ensemble forecasting system at NCEP: an update. Preprints, 9th Conference on Mesoscale Processes, Ft. Lauderdale, Florida, 2001. [Available online: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF/reference.html>].

“城市气象”主题文献计量指标分析

■ 吴灿 李婧华

一、数据来源及统计方法

利用中国知网学术期刊网络出版总库(以下简称CAJD)和ISI Web of Science平台SCI-E数据库,检索统计国内外“城市气象”主题文献。利用主题检索方式,分别选择检索式:主题=“城市”and“气象”,TS=(“urban*”and“meteorolog*”)or“urban climate”or“urban weather”or“city weather”or“city meteorolog*”进行检索,数据年限选择所有年,文献类型选择论文和综述,检索命中该领域SCI-E国际文献4074篇,CAJD国内文献2066篇(检索日期为2014年1月7日)。

二、统计结果与分析

1. 论文产出年代分布

国外有关“城市气象”相关研究文献的发表,始于20世纪70年代初期,SCI-E数据库检索到最早关于该主题的科技论文——*Urban climate and day of week*发表于1971年,刊载在*Atmospheric Environment*上。CAJD收录的国内该领域最早的论文则是由清华北大理工地球物理系大气湍流与扩散组1978年发表于《北京大学学报(自然科学版)》的《1978某地区多源大气污染扩散的数值模拟》一文。

图1给出1971—2013年SCI-E和CAJD数据库“城市气象”主题文献的产出时间分布。20世纪70—80年代,SCI-E收录的该主题文献甚少,仅29篇,1991年第一次明显增长,发表的论文达68篇,比1990年(4篇)增长了17倍。1991—1999年期间,国际该主题论文呈现小幅振荡增长,表明国际上该领域研究仍处在徘徊期;2000年首先实现突破,论文数达到125篇,以后逐年均维持



1980—1990年,国内在“城市气象”领域的研究比国际更早进入活跃期,且近20年振荡增长趋势与国际基本同步。

在3位数以上,2012年达到最大值(406篇)。在SCI-E数据库中,中国作者参与发表的文献最早出现于1990年,在1999年前中国作者参与的论文均维持在0~4篇之间。2000年后,中国作者参与的论文开始逐年上升,2012年达到93篇。CAJD数据显示,1980—1990年,国内在该领域的研究比国际更早进入活跃期,且近20年振荡增长趋势与国际基本同步,2007—2013年每年平均发表的论文达150篇以上。

2. 国家与机构的产出和影响力分析

SCI-E“城市气象”主题文献产出量排名前10的国家和其总被引次数、篇均被引次数及h指数见表1。由表1可知,美国在该领域拥有绝对优势,其论文产出量比位列第2的中国高出1倍,占总文献量的26.9%。

从篇均被引次数来看,发达国家优势明显,前3位的分别为美国、法国和英国。中国的篇均被引次数排名第9,说明我国在该领域的学术影响力有待提高。

表2分别给出了SCI-E和CAJD数据库中“城市气象”主题文献产出量较多的机构。在SCI-E数据库中,中国科学院是该领域文献产出量最多的机构,超过第2位美国国家海洋和大气管理局(NOAA)近一倍。在发文量前15位的国际机构中,美国机构占7所,其中5所为业务机构,分别是NOAA(第2位)、美国环保局(EPA)、美国国家大气研究中心(NCAR)和美国国家航空航天局(NASA);其余两所为高校,分别是美国科罗拉多大学和麻省理工学院(第14位)。北京大学和中国气象局分列第5和第10位。在CAJD数据库中,“城市气象”领域主题文

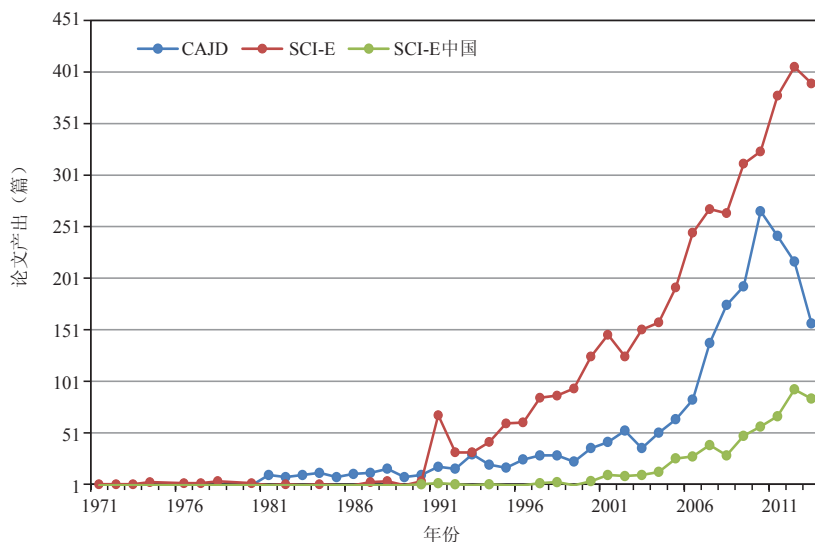


图1 1971—2013年SCI-E和CAJD“城市气象”主题文献年代分布

表1 国际“城市气象”主题文献产出量排名前10的国际及其影响力 (SCI-E)

国家/地区	产出 (篇)	总被引次数	篇均被引次数	h指数
美国	1094	26672	24.38	73
中国	527	5773	10.95	39
英国	336	6750	20.09	44
德国	290	4892	16.87	36
意大利	236	3242	13.74	29
印度	225	1982	8.81	23
法国	207	4807	23.22	33
日本	207	2994	14.46	26
希腊	204	2994	14.68	29
西班牙	203	2953	14.55	31

表2 国内外“城市气象”主题文献产出量较多的机构

机构 (SCI-E)	产出 (篇)	机构 (CAJD)	产出 (篇)
中国科学院	171	南京信息工程大学	122
NOAA	90	中国科学院大气物理研究所	81
EPA	76	南京大学	64
NCAR	66	中国气象局北京城市气象研究所	47
北京大学	60	中国气象科学研究院	46
科罗拉多大学	60	兰州大学	40
芬兰气象研究所	57	北京大学	37
意大利国家研究委员会	54	国家气候中心	30
雅典大学	52	山东省聊城市气象局	25
中国气象局	46	北京师范大学	24
NASA	46	中国气象局兰州干旱气象研究所	23
伯明翰大学	46	国家气象信息中心	21
香港理工大学	43	陕西师范大学	21

表3 国内外“城市气象”主题文献高产作者

作者 (SCI-E)	产出 (篇)	作者 (CAJD)	产出 (篇)
Grimmond CSB	30	蒋维楣	20
Kukkonen J	30	胡非	17
Devara PCS	28	何萍	14
Querol X	28	延军平	12
Alastuey A	27	周淑贞	11
Karppinen A	24	王式功	11
Zhang Y	24	陈正洪	11

表4 刊载“城市气象”主题文献较多的期刊

期刊 (SCI-E)	载文量 (篇)	期刊 (CAJD)	载文量 (篇)
Atmos Environ	715	安徽农业科学	116
Int J Climatol	174	气象科技	115
J Geophys Res	159	气象科学	107
Atmod Chem Phys	156	气象	87
Sci Total Environ	110	气象研究与应用	64
Atmos Res	94	应用气象学报	56
Environ Monit Assess	94	内蒙古气象	37
Int J Environ Pollut	88	广东气象	32
Bound.-Layer Meteor	76	山东气象	32
J Air Waste Manage Assoc	73	沙漠与绿洲气象	30

献产出最多的机构是南京信息工程大学；中国科学院大气物理研究所和南京大学分列第2和第3位。从国内相关机构的分布来看，该领域发文量较多的机构除高校外，基本来自气象局系统。

3. 高产作者与期刊分析

在SCI-E发表“城市气象”主题文献10篇及以上的作者有55人，华裔科学家、北卡罗来纳州立大学的Zhang Yang教授位列第7。在CAJD发表10篇及以上该领域主要论文的国内学者有9人，其中被CAJD收录最多的作者是南京大学的蒋维楣。部分高产作者的发文情况见表3。表4给出刊载“城市气象”主题文献最多的SCI-E收录期刊。

4. 热门文献及研究热点

SCI-E和CAJD被引频次最高的热门文献见本期“榜单” (P3和P5)。近年来，“城市气象”研究的主题范围逐渐扩大，大气污染、城市气象灾害、城市热岛和城市气候研究以及RS和GIS在城市气象方面的应用研究是近10年研究的热点。其中，在大气污染研究方面，对PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂和O₃等的探究越来越多；在城市气象灾害方面，对沙尘天气的研究日益增加；在城市气象服务方面，人体舒适度的研究开始受到重视。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

深入阅读

戴艳杰, 刘新, 孙呼声. 2011. 基于CNKI文献搜索的城市气象学领域研究热点综述. 农业图书情报学刊, 23(12): 64-68.

大道至简，气象自成

——贺恩师丑纪范院士八十寿辰

■ 黄建平

人生有许多选择，但关键的就那么几步。令我深以为幸的是，在我的人生路上，能够遇到这样一位老师，一路指导我做出最正确的选择、走过最光明的人生路。

老师既是学识渊博、具有开拓精神的学者，又是眼界开阔、具有战略思想的科学家。他就是国际上知名的气象学理论研究专家之一，中国气象界的泰斗级人物，也是兰州大学大气科学专业的创始人——中国科学院院士丑纪范先生。

1. 师恩如海 桃李深情

1986年，我跟随丑纪范院士攻读大气科学博士学位，有幸成为先生招收的第一个博士研究生。更为荣幸的是，时至今日，我也能经常聆听恩师的教诲。

还记得先生与我第一次见面，就长谈了3个小时。从个人经历、求学心得，再到写论文的方法、做学问的技巧，都无所保留地对我一一说来。至今，我还对先生第一次的谈话内容记忆犹新，这也成为日后我向学生们传授的第一课。再回想，其实先生对每一位学生都是这样真心真意爱护，全身心投入地培养。先生愿意把自己毕生的精华心得都传授给学生，引导学生运用正确的思维方法，选择正确的科学道路，树立正确的人生理想，而这也正是他培育出那么多优秀气象事业人才的原因。

在教学中，先生非常注重夯实学生的科研基本功，要求学生既有扎实的理论和实际研究的基础，又要勤动脑、勤动手，充满活跃新颖的思想。记得那时，他要我



后辈学人如相问，一片冰心在玉壶。丑纪范先生把一生都奉献给了气象事业。不论事业、功名、生活、命运、境遇逆顺坎坷，他都坚守不辍、矢志不渝。

一方面为本科生指导毕业论文，另一方面为研究生讲授部分动力气象课程。当时我并不理解先生的此番心思，只觉得自己对很多知识还“浑混沌沌”。给学生指导论文的压力迫使我努力了解专业领域的最新进展，梳理研究思路方法；而为了完成好先生提出的“上课不看讲稿，公式现场推导”的要求，我只得细心备课，研习公式推导，将大气动力学的基础知识牢固地记在心里，以免被先生当堂一针见血地指出错误。而毕业后我明白了，正是先生这种独特的培养方式，促使我充分认识自己的不足，在点滴积累中，增长了讲授能力。

20世纪90年代，我先后在加拿大和美国从事研究工作。在此期间，先生一直关心着我在国外科研事业的发展。记得有一年圣诞，我接到先生寄来的一张贺卡，及随附的一封长达六页的书信。在书信中，先生悉数近年来国内大气科学事业的发展，希望我能够“以国家需求为己任”，回国发展。2003年，我辞去了国外的工作，承师命回到母校兰州大学，参与筹建大气科学学院。在学院筹建初期，先生倾注了大量的心血与精力。先生告诉我，要一年一个台阶，一步一个脚印，除了继续数值天气预报研究外，还要“立足西北，走出自己的特色”。

依托西北地区得天独厚的自然环境，2005年，兰州大学大气科学学院率先在海拔1966米的萃英山顶上建立起了我国第一个能够对云、气溶胶和陆气相互作用同时进行观测的半干旱气候与环境观测站。时至今日，这座全球独一无二的观测站，已在研究解决我国黄土高原半干旱区气候与环境等问题的科学研究中发挥了无可比拟的作用，学院也在研究干旱半干旱气候，尤其在沙尘研究等方面，取得了一批具有创新意义和国际国内影响的标志性成果。回想起来，学院的每一步发展，每一项成绩，无不得益于先生的关怀，印刻着先生的影响。

2. 研风习雨 追沙捕尘

先生长期从事数值天气预报的基础理论和方法及有关的大气和海洋动力学研究，他将数学、物理学、气



2004年于阳台山与学生合影（前排左五为丑纪范）



2004年为兰州大学大气科学学院揭牌（左四为丑纪范）

象学等学科综合运用，对已有大气的观测资料在数值预报和数值模拟的使用方面做出了系统的创造性研究，提出了一系列令世界气象学界瞩目的新观点、新方法，并撰写了大量有重大科学价值的学术论文和专著。

在我看来，先生最杰出的贡献就是以创造性的理论开启了中国数值天气预报研究的自主创新之路。时至今日，这项研究成果依然为我国数值天气预报业务的发展发挥着巨大的指导作用。

先生曾用最浅显的语言，向我阐述了他在数值天气预报方面的构思，并指导我将统计与动力相结合的数值天气预报作为我博士论文的选题。先生说，过去的天气预报依赖于预报员的经验，在预报员的脑海中，天气形势的槽脊涨落，就是一张张连贯的天气图。而后的数值天气预报虽然取得了很大成绩，但存在一个根本性的缺陷，即所谓的初值问题。只使用一个时刻的资料，而忽略了长期历史资料的运用。如果将统计学的方法和历史天气图应用进来，不只是用当时的天气图，而是可以像预报员一样把历史上的和近期的资料都用上，不是更好吗？针对这个问题，先生下了很大功夫，专门研究并思考如何克服。

经过刻苦钻研，先生于1962年完成了题为《天气数值预报中使用过去资料的问题》的著名论文，将数值预报问题由微分方程定解问题转化为等价的泛函极值问题，提出了在数值预报中使用前期观测资料的具体实现方法。就其核心实质而言，这是世界上最早关于四维同化的理论和方法，比国际上提出同一思想的时间要早10年。

此外，先生还通过证明大气温压场的连续演变和下垫面热状况的等价性，为充分利用已有的观测资料打下了理论基础。他进一步提出将古典初值问题改变为微分方程反问题的新观点，将解反问题的理论应用到数值预报中来，提出用历史资料反求参数并使之与长期预报模式相匹配的创新型方法，率先建立了一个动力统计的季节预报模式，取得了巨大的科研成果。这些研究成果，不但具有极高的理论研究水平，而且对天气预报业务具



2006年为兰州大学半干旱气候与环境观测站揭牌（前排左二为丑纪范）

有较强的实用价值和指导意义。

1981年，先生被公派到美国麻省理工学院作访问学者，与著名气象学家Lorenz一起工作。当时，国内在数值天气预报领域的教材几近空白，非线性大气动力学在国际上刚刚起步。因此，先生一面将工作的重点放在专业教材编撰上，一面将研究的重点放在了非线性大气动力学方面。

1982年回国后，先生率先在国际上开创了非线性大气动力学期长演变的全局渐近性质的研究。论证了初始场作用的衰减，得到了大气运动的长期行为具有向外源强迫的非线性适应过程，提出了大气吸引子观，进而得到定常外源作用下大气运动的自由度缩减的结果。并将其应用于短期气候预测和新的资料同化理论中，为我国大气科学研究开辟了一个新的方向。1986年，先生出版了《长期数值天气预报》一书，不仅引起了国内外学界的巨大震动，更为教材稀缺的气象领域雪中送炭。而此后，他编写的多本非线性大气动力学研究生教材，也同



1981年在麻省理工学院做访问学者

样得到了同行专家的一致好评。

20世纪90年代，先生依然活跃在大气科学研究领域的最前沿，继续为我国数值预报业务体系的完善和发展提供高屋建瓴的思想指导，并力主开展“原创性科技成果”的研究，发展我们自己的创造性理论和方法。2007年10月，73岁高龄的丑先生撰写发表了《数值天气预报的创新之路——从初值问题到反问题》一文。在文中，他就自己对数值天气预报问题多年的钻研思考做了系统总结，并对未来中国数值天气预报的创新发展指明了道路。先生指出，目前，我国虽然已建立起了比较完整的数值预报业务体系，但是业务预报的准确率与国外先进水平还存在较大的差距，近10年差距是在扩大而不是缩小。对此，他寄语新一代气象工作者，要完成从跟踪创新向自主创新的转变，强调“我国自主知识产权”和“原创性科技成果”，实事求是地分析和考察国内外的基本理念，找到根本性的可改进的缺陷，从而提高我们自身的预报水平。

3. 智者思维 哲学深蕴

在科学研究中，先生具有一套极富哲学深蕴的思维方法。在《院士思维》这本书中，他将这种思维方法概括为“不求形似，但求神似”。

在先生看来，大气科学中蕴含着无穷无尽的复杂变化，各种矛盾、各类问题纵横交错，往往令人“乱花渐欲迷人眼”。如果什么都想抓，什么都去抓，其结果往往可能是什么都抓不好，事倍功半、成效甚微。他认为，对一个具体的科学问题，不能只求“形似”，主次不分，贪大求全；只有追求“神似”，结合实际，牵住牛鼻子，找准着力点，才能集中力量找到解决复杂问题的关键和重点。

对长期预报问题，特别是气候系统的研究。先生认为，应先简化，突出主要特征，揭示根本规律。在最大简化的前提下，揭示问题的主要机制、主要规律，再从简单到复杂建立起更完善的数学模型。

数值预报亟待解决的最主要问题，就是不能只利用物理规律，还应充分利用实况资料。针对主要问题，先生利用最大简化的气候模式进行了实验，得到了许多具有意义的研究成果，并最终提出了在数值预报中使用历史和近期资料的一整套理论和方法。

此外，先生认为，科学研究不能只见树木、不见森林，只见局部、不见全体，将眼界拘囿于狭窄的范围之中。而应正确处理局部和整体，阶段和过程的关系，大处着眼的同时，兼顾小处着手。树立全局思维，选择最佳方案，实现最优目标。

20世纪60年代，先生就采用集合论的观念，用全局思维对数值预报进行综合考虑。而从80年代开始，先生又按照此种思维方法，率先开展了同时考虑耗散、外源强迫的非线性大气动力学研究。用全局分析的观点，研

究了大气动力学方程组的性质。借助几何直观对大气动力学方程组的极限解集进行了定性分析，运用胞映射理论对大气系统的数值模型的整体特征进行了全局分析。从而给出了研究大气可预测性问题的直观图形，并对“气候”这个模糊的概念给出了严谨的数学定义。

在多年研究问题、解决问题的科学创造中，先生坚持运用尽可能考虑所有可能情况的全局形象思维，把思考的维度拓展到整个大气系统的演变和长期的过程之中。站在高屋建瓴的宏观层面上，对大气科学中的多个问题，进行了长足的探讨研究。

“简化与全面是统一的，不要简化的只要全面的，最后连全面的也丢失。要能简化得恰当，就是有所不为已达到能有所为，就是要抓住矛盾的主要方面”。在先生看来，阴晴雨雪、风沙尘土，大自然的规律往往就蕴藏在这些既简单又复杂的现象中。无法而有法，形非而神传。先生提出的这种思维方式，既是对与科学本体价值的富有哲学深蕴的辩证思考，更是他本身不激不厉、至简至纯的人格风尚的反映。

4. 逆顺坎坷 坚守不辍

对于先生的生平，我曾听到过不同侧面和角度的讲述，以下记录的只是我所了解的情况。

先生于1934年7月23日出生在湖南长沙，他的父亲早年毕业于湖南大学电机工程系，在上海英租界美商中国电气公司工作，母亲受过良好的传统文化教育。在先生7岁那年，太平洋战争爆发，日本人接管了英租界，不替日本人做事的父亲带领全家离沪返湘。返湘后，先生跟随父母相继在长沙、衡阳、祁阳、零陵、桂阳等地“逃难”。

1946年，先生12岁，光复后的长沙小学各年级同时招生。先生回忆这段经历时说，“一开始我报了上四年级，而母亲听说邻居的孩子比我小一岁报了五年级，而我落后别人这么多，就着急地哭了，我便又跑去改报了毕业班。”

虽然从小受到母亲的教育，语文成绩不错，但对于算术，先生根本就没有接触过。在接下来半年的时间里，先生将全部的精神时间花在了算术上。在一番埋头学习，夜以继日的努力后，先生从“一窍不通”到“名列前茅”。而这段特殊的经历，不仅使先生喜欢上数学这门深奥的学科，而且还培养了他的自学能力，训练了逻辑思维，为之后从事理论研究打下了基础。

1952年，先生以优异成绩考取了北京大学物理系。怀揣着科技报国的心愿，先生原来的志愿是搞原子能，从事国防工业研究，但入学后被分配到气象专业。他深知个人志愿要服从于国家需要，因此并没有在专业上闹情绪。在著名气象学家谢义炳先生的教诲和帮助下，他开始了自己研究气象的生涯。

1956年，先生从北京大学物理系毕业，被分配到中



1947年亲友合影（二排右二为丑纪范）



1953年在北京大学物理系学习

央气象局科研所工作，在著名气象学家顾震潮先生的指导下，先生走上了数值天气预报这条道路。正如先生所说，在自己的求学、研究过程中，有幸遇见了两位名师——谢义炳先生和顾震潮先生。正是两位恩师的指导和影响，使他能够取得今天的成就。

命运总是在不经意间做出改变人生轨迹的选择，若按照设定好的轨道，先生也许会一生都在北京从事他的气象研究。可是那场动荡的政治运动，让先生与兰州大学——这座西北高校结下了缘分。1972年，先生从中央气象局五七干校调到兰州大学，担任兰州大学地质地理系气象学专业教研室主任。在时任兰州大学教务长崔乃夫的支持下，他开始了长期数值天气预报的研究。

从湿润的南方到干燥的西北，从北京舒适的研究环境到兰州艰苦的科研条件，先生毅然服从组织决定，没有丝毫怨言。在最艰苦的岁月里，先生始终没有放弃对事业的追求，为大气科学学科的发展做出了卓越的贡献，成为兰州大学大气科学学院的奠基人。

1987年，兰州大学成立大气科学系，先生任第一任



2009年获兰大百年特殊贡献荣誉（右四为丑纪范）

系主任。2004年，学校为了更好更快地发展大气科学学科，成立了大气科学学院，先生任名誉院长。

从1972年到2004年，先生见证了大气科学学院从一个专业到一个系，再到一个独立学院的发展之路。这其中浸透了先生的心血，以及一代代气象人的汗水。而今，已步入耄耋之年的先生，仍心系大气科学教育事业，时刻关心着大气科学学院的发展。常来学院为晚辈报告讲学，讲授专业课程，与青年教师谈心交流，为教学和科研工作建言献策。

后辈学人如相问，一片冰心在玉壶。先生把一生都奉献给了气象事业。不论事业、功名、生活、命运、境遇逆顺坎坷，他都坚守不辍、矢志不渝，这也时刻激励着兰州大学大气科学学院的每一位教师和学生，不断进步、不断前行。

5. 结语

2013年是丑纪范先生八十大寿，他为气象事业奋斗了整整60年。一甲子的时光，中国大地风云变幻，先生一直活跃在气象领域，用他的智慧观察天地，体悟生命。先生虽然年事已高，却依然没有停止探索。大道至简，只能体悟，不可言说。先生始终将自己看作是认识自然的学生，这份对自然规律的敬畏和谦虚，也许正是先生心中的大道。或许我们能从先生学术的大成就上窥之一二吧。而即使是这一二，也足以让我们这些学生晚辈受益匪浅，成就生命的大气象了。

在此，我谨代表我个人及兰州大学大气科学学院的全体师生向先生八十华诞及在大气科学领域笔耕六十载不辍之荣，表示最真诚祝贺和最真挚的祝福，愿先生古稀重新，健康永驻，福寿绵长！

（作者单位：兰州大学）

世界气象学习创建活动

——第十届CALMet国际会议评述

■ 冀文彬 邹立尧 高婕 储凌

一、CALMet背景

CALMet (Computer-aided Learning and Distance Learning in Meteorology) 创办于1993年, 最初为“气象计算机辅助学习和远程学习”的简称。经过不断发展, 于2004年被重新定义为“气象学习创建活动”, 旨在为气象、水文专家和教育工作者提供论坛, 用来分享气象、水文教育培训相关的成果和方法。

CALMet由SCHOTI (气象水文培训机构领导人常设委员会) 资助筹办。SCHOTI的协调委员会为CO-COM, CALWG (CALMet工作组) 是CO-COM的小组委员会, 提供CALMet的活动指导并上报CO-COM/SCHOTI。SCHOTI则对WMO各成员国负责并以论坛的形式为各国在气象教育培训领域可能的合作提供服务。

目前, CALMet主要包括现场会议、在线会议、共享资源以及CALMet评估。现场会议原则上在每奇数年举办一届, 于1993—2013年已在美国、法国、澳大利亚、芬兰、巴西、中国、俄罗斯和南非共和国成功举办了10届。其中, 美国、法国各举办了两届, 第七届由中国气象局气象干部培训学院承办, 第十一届将于2015年在韩国首尔举办。在线会议一般在偶数年内举办, 已在2010、2012年举办了两届, 第三届计划于2014年举办; “共享资源”项目于2013年8月在法国图卢兹启动, 它主要依托互联网博客和社交论坛来分享气象教育培训者最好的实践与经验。

二、第十届CALMet简述

第十届CALMet会议于2013年8



第十届 CALMet 会议提供了在气象、水文教育培训领域分享新兴技术与策略的机会, 促进了 CALMet 与 Eumetcal 成员的相互学习与合作, 是“一个不断增长和蓬勃发展的实战社区”。

月26—30日在法国图卢兹由法国气象局和ENM (法国国立气象学校) 承办。本届会议首次与Eumetcal (欧洲气象培训虚拟组织) 联合举办, 同时也为2013年9月2—6日举办的WMO第十二届SYMET (教育培训研讨会) 提供参考。

会议的87名参会人员主要为培训专家、培训管理和内容资料专家, 分别来自WMO、COMET (气象业务、教育和培训合作项目)、ECMWF (欧洲中期天气预报中心)、EUMETSAT (欧洲气象卫星应用组织)、UCAR (美国大学大气研究联合会) 等38个组织及6大洲29个国家的气象机构。会议期间共举办了6场现场演示、3个专门小组讨论、5场互动性专题研讨会和42个现场报告。

本届会议继续沿用“气象学习创建活动”的主题, 包括5个子主题: (1) 网络学习资源与工具。主要探讨在线学习的理论基础、举办同步和异步活动的可用工具, 以及设计、发布和评估在线课程的策略与程序; (2) 反映当前的实践经验。主要听取可行与不可行的实践故事, 分享各机构从正在进行中的项目中学到的经验。其重点不是在于做了什么, 而是为什么选择使用该策略, 分析面临的挑战以及下一次将要实施的不同内容; (3) 学习如何开展教育培训。主要关注于如何最好地训练培训教师 (尤其是兼

职教师) 和新员工更好地工作, 如何帮助他们更快地胜任工作。2013年初, WMO发布了一组培训教师应具备的能力细则, 各机构是如何利用它来培养更具胜任力的培训人员及教师, 提供更有用的培训项目以及举办更受欢迎和更成功的学习活动; (4) 采用新策略与观念的新突破。是指当前正在使用和计划使用的新学习策略和培训观念, 依据的理论或论据以及获得了什么经验。鼓励分享、讨论和现场演示推荐的培训策略以及如何选择正确的方法来满足预期的结果。在此, “知识传递”的说法已经不适用了, 取而代之的是一种强烈的主动和非正式学习的倾向, 如知识管理、模拟仿真和社会学习网络。(5) Eumetcal第四阶段 (2013—2017年) 规划。其中, 本届会议提及最多的4个热门关键词集中于“仿真模拟培训”、“技能”、“远程教育”和“实践社团”。

三、动态及亮点

策略上, 虚拟团队是CALMet的一项挑战性新尝试。虽然可用许多技术手段追踪工作进程并使团队交流, 但最大的挑战是持续的让队员得到鼓舞和激励, 建立信任、畅所欲言的交流。当前, CALMet正在考虑创建社区化的工作模式, 并为会议的主旨赋予更宽泛和直接的含义, 即“气象学习促进社区”。在过去的几年中, ECMWF的需求发生

了翻天覆地的变化，面授培训项目是由在线学习完成的，主要原因是受到了欧洲大部分国家的经济危机影响。远程演讲和指导覆盖了更多的受众，并允许在没有资金来源限制的条件下参加培训或会议。

资源上，COMET开发启动了“CALMet共享项目”，其设计是为社区信息共享和学习服务的。COMET还发布了免费的在线热带天气尺度天气学课程包，以满足WMO关于天气尺度和中尺度气象基本课程的要求（BIP-M），包括教学目标、教学大纲、在线教学资源、教师手册、教师专用幻灯片、案例、问题研讨、学生作业、问答比赛、学习活动和在线课程辅导。COMET还利用加勒比海气象和水文研究所提供的混合式AeroCPD课程作为模板，开发了RAMDL（航空气象远程学习复习）模块，为非洲和许多国家定制了新的处理应用WRF/EMS中尺度模式、临近预报和灾害模型的课程，为航空预报员提供学习资源，来满足WMO制定的航空气象人员能力标准。此外，COMET还开发了可应用于多种天气事件和数据类型的案例研究模板。这种灵活的工具能够被用于演示特定天气预报案例的挑战性研究训练，以帮助培训人员专注于案例开发研究来满足培

训需求。

技术上，ENM利用Eumetcal项目共享的成果改编了软件及实验培训方法。当前，ENM采用Scenari和Speechi软件来制作素材，一个数据库用来存储和分发数据资源，Moodle作为学习管理系统和网络会议工具用来提供培训。Scenari可帮助交互式培训资源的可视化建立、多媒体资源的综合展示、不同形式的互动练习测试以及web网站等媒体的发布。不久的将来，ENM将减少传统课程的数量而增加学员在教师适当监督下的独立工作比重，而研发适当的在线学习工具是达到此目标的重要杠杆。已经启动和在计划的项目包括：依靠Nuxeo软件建立网络协作资源库，为方便远程工作社区的管理与合作提供存储功能，为LMS（学习管理系统）提供链接，达到清晰化组织的目标。此外，ENM计划将传统的图书馆转变为学习中心，以此来提供电子图书和各类资源的接入。

四、几点启示

首先，远程培训的方式在气象教育培训中的作用更加凸显，重视程度逐步提升。由于远程培训方式快捷实用、受众面广，国际许多机构的面授培训项目正在转向远程培训或开展混合式培训。例如，远程

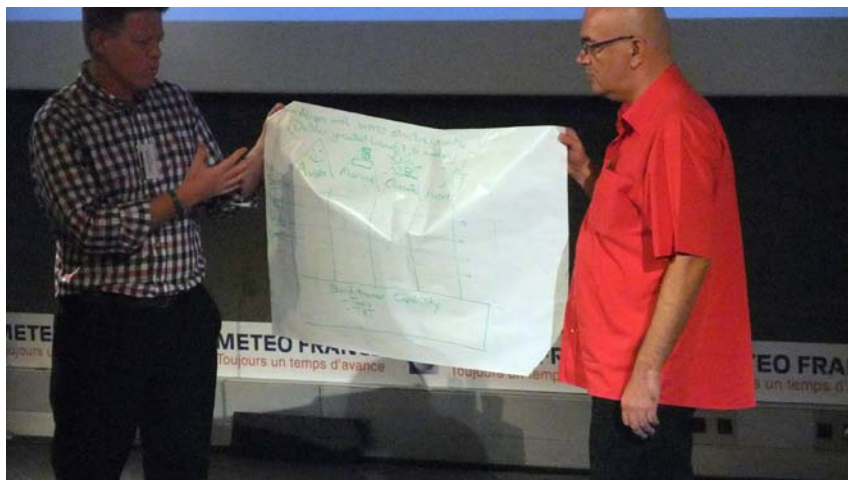
教育正在被时间短、任务重的培训项目以及特定地区的培训项目广泛采用，且效果显著。同时，许多国际气象教育培训机构进一步加大了远程教育的新技术、方法研究和教育信息化的投入力度，开展了模拟仿真教学、资源共享与学习社区、案例研究模板库等一系列实践。

其次，中国气象远程教育与世界先进、主流的气象教育培训在目标、战略、实施等方面保持了同步，在某些技术领域（如虚拟现实）已走在前列。中国的3级远程教育培训体系与WMO全球教育培训体系设想框架类似，并被借鉴于WMO全球气象虚拟学院的思想构建。中国气象远程学习示范点建设，致力于创建基层的“学习型组织”，利用学员主导模式创建全国范围内的“社区学习网络”，受到WMO教育培训官员的肯定。

再次，中国气象远程教育有待进一步加强国际合作，学习和借鉴国际上先进的理念和实践经验，主要是：遵循SCORM（共享内容对象参考模型）标准逐步使中国气象远程教育培训网络学习平台、资源与国际融合；为加强与其他CALMet成员之间的交流互动，拓展多语种的网站资源服务与交互，积极参与“CALMet共享资源”建设；借鉴先进的混合式教学技术与理念，加深面授与远程教学的结合，提高气象教育培训的效果；参与WMO全球教育培训体系建设，提升中国气象远程教育培训的能力。

总之，第十届CALMet会议不仅提供了在气象、水文教育培训领域分享新兴技术与策略的机会，还提供了分享经验、期望与新思想的机会，更进一步促进了CALMet与Eumetcal成员的相互学习与合作，是“一个不断增长和蓬勃发展的实战社区”。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）



气象团队教学互动研讨结果展示

编辑选编

太阳活动年代际变化对现代气候影响的研究进展——《地球科学进展》2013年第28卷第12期

太阳活动对现代气候变化尤其在年代际尺度的影响和贡献是亟待认识的科学问题之一。肖子牛等撰文回顾了近年在年代际尺度上太阳活动影响地球气候的新观测证据，侧重阐述了太阳总辐射、紫外辐射和宇宙射线影响气候的途径和气候系统响应机制的细节，以及对其评估验证的新进展。此外，还指出对观测资料不确定性的评估、气候系统对太阳活动效应的放大机制的数值检验以及对未来可能的太阳活动极端事件的影响预估是目前研究中面临的挑战。最后，展望了该领域可能取得突破的关键点，为未来的科学研究提供参考。

“2013年1月中国东部严重雾霾天气”专栏——《中国科学：地球科学》2014年第44卷第1期

近几十年来，随着中国经济的高速增长以及气候变化，雾霾天气的频繁发生及其强度的增强，对人民生活、人体健康以及我国经济和社会的可持续发展带来了越来越多的负面影响，因此雾霾备受关注。《中国科学：地球科学》组织了专栏，针对2013年1月发生在我国东部的强雾霾天气进行了研究，从气象角度提出了应对雾霾天气的对策和措施。

穆穆等分析了气象条件对雾霾的影响，提出气象科学与技术应对雾霾天气方面的对策。指出，对于雾霾天气的观测、形成机理、数值模拟乃至预测与防控，都需要发挥气象科学与技术的作用，更需要环保和气象领域的科学技术工作者与行业部门的密切合作。并对专栏中4篇论文的主要结论进行了简要介绍。

其中，王自发等介绍利用自主研发的嵌套网格空气质量数值预报

模式（NAQPMS）模拟研究2013年1月我国中东部的持续强灰霾天气，初步评估灰霾天气下大气细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）时空分布特征、传输规律和防控力度。结果表明：这一模式能够合理反映灰霾天气下中东部 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征和演变规律。发现静稳天气京津冀地区仍旧存在显著的区域输送，并直接造成京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度的累积，来自区域外的跨城市群输送对京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度贡献为20%~35%，区域内输送的贡献为26%~35%，两者之和与局地污染源贡献相当。针对这次强霾的控制试验表明，当京津冀周边区域省份污染源不控制，河北、天津和北京的污染物排放需要消减90%，90%和60%以上才能实现京津冀区域 $PM_{2.5}$ 达标（二级标准），表明京津冀灰霾污染防治不仅需要重视区域内的联防联控，同时也需要其他城市群的协同控制。气象—大气污染双向反馈机制对强霾的形成也有非常重要影响，可使京津冀部分地区细颗粒物月均浓度增加30%，忽视这种耦合作用会导致模式对重污染期间污染物浓度的低估。

王跃思等介绍了中国科学院“大气灰霾追因与控制”专项组利用其建立的“中国气溶胶观测研究网”（CARE-China）对整个强霾污染过程进行了全程追踪观测，并对其成因进行了分析研究。本次强霾污染涉及我国整个中东部地区，污染最严重的京津冀地区共计发生5次强霾污染过程，其中两次超强过程发生在9—15日和25—31日，北京 $PM_{2.5}$ 小时浓度最高值分别达到680和 $530\mu\cdot\text{gm}^{-3}$ ，石家庄和天津等重要城市强霾污染状况与北京相似。天气系统弱、强冷空气活动少和极不利于污染物扩散的局地气象条件及地理位置，是造成本次强霾污染形成的外部条件；一次排放的气态污染物向颗粒态的快速转化，是本次强霾污染“爆发性”和“持续性”的内部促发因子，特别是大气中燃油排放为主的大量 NO_x 促发了燃煤

排放气态 SO_2 向颗粒态硫酸盐的快速转化。通过 NO_x/SO_2 协同转化途径分析，发现气态污染物在细颗粒表面的非均相反应可改变大气颗粒物的粒径及化学组分，促使颗粒物中的二次无机盐（如硫酸盐和硝酸盐等）的比例逐渐增大，导致颗粒物吸湿性显著增强，从而对强霾污染形成起到了促进作用。

张人禾等利用资料诊断，从大气环流背景场和雾霾天气演变过程两个方面，分析了气象条件在这次持续性强雾霾天气发生中的作用。结果表明，2013年1月东亚冬季风异常偏弱，在中国东部区域，对流层中低层的异常南风有利于水汽向中国东部地区输送，500hPa的高压异常抑制了对流的发展，而表面风速的减弱不利于近地面附近的雾霾向区域外输送，水平风垂直梯度的减小减弱了天气尺度扰动的的发展和大气垂直混合，对流层低层异常逆温层的存在使得大气近地层变得更加稳定。这些气象背景场为雾霾天气的维持和发展提供了有利的气象条件。对雾霾天气演变过程的分析表明，雾霾天气区域内的表面风速及其上空对流层中低层的水平风垂直切变对雾霾天气过程具有动力影响，二者偏小（大）时雾霾天气偏强（弱），对流层中低层的层结不稳定性以及近地面层的逆温状况和温度露点差对雾霾天气的演变可以产生热力影响，层结不稳定性逆温偏大（小）以及温度露点差偏小（大）时雾霾天气偏强（弱）。多元线性回归分析的结果表明，热力和动力因子对这次雾霾天气过程具有大致相同的作用，气象因子可以解释超过2/3的雾霾天气逐日变化的方差，方差贡献达到0.68。

丁一汇等则用近50年（1961—2011年）我国雾和霾台站长期观测资料进行分析，得到雾日发生的频率呈先增（1980年之前）后减（1990年后）的变化，尤其是1990年以后明显减少，这与气候变暖引起的近地面相对湿度减小的趋势一致，而霾日发生的频率总体上

呈增加的趋势。据此,文章进一步讨论了大气湿度减少在雾—霾转变中的作用,结果表明霾日的平均相对湿度在69%左右,比以前得到的值低,这意味着霾粒子更不易向雾滴转换,这可能是导致雾日减少的主要环境因子之一;雾和霾转换的相对湿度阈值平均为82%左右;这个值也低于以前得到的值,因而在气候变暖条件下,主要由于温度和饱和比湿增加导致的中国近地面相对湿度减少对雾和霾形成的环境条件可能产生了明显的影响。也研究了霾与能见度的关系,结果表明随着霾日发生频率的增加,能见度有明显的下降,从1961年至今平均能见度从4~10km减小到2~4km,下降一半左右。

1958—2005年中国高空大气比湿变化——《大气科学》2014年第38卷第1期

郭艳君等利用经过质量控制和均一化的92站探空露点温度序列,研究了中国高空大气比湿气候学特征和1958—2005年比湿时间、空间演变以及不同时段线性变化趋势地区和季节差异。中国比湿气候场特征显示,垂直方向上90%以上的水汽集中在对流层中低层,空间呈南高北低的纬向分布。通过累积距平、滑动平均和突变点分析等方法研究了中国平均高空比湿的年代际变化,得到1958—2005年中国对流层中低层大气比湿经历“湿”、“干”、“湿”阶段性变化。不同时段线性变化趋势分析表明,1958—2005年对流层低层比湿呈上升趋势,对流层中层、高层和平流层下层为下降趋势;1979—2005年对流层低层上升趋势和对流层高层下降趋势均较整个时段明显增强。近50年来中国高空各层温度与比湿变化基本同步,统计达到显著相关,说明温度是影响比湿变化的重要因子。趋势的空间分布显示对流层下层全国大部比湿为上升趋势,且1979年以来上升趋势更加明显,对流层中层趋势呈北升南降分布,

对流层高层多为下降趋势。中国五个分区中西北地区对流层低层比湿上升趋势最明显,长江和华南地区升幅较小。1958—2005年对流层下层各季节比湿变化趋势差异较明显,上升趋势发生在夏、冬两季,1979—2005年四季比湿均呈上升趋势,其中夏季上升趋势最为明显。

不同观测分辨率强台风云系的遥感特征——《应用气象学报》2014年第25卷第1期

静止气象卫星的快速区域扫描是监测不同天气过程的有利手段。刘健等撰文以获取的风云静止气象卫星快速区域扫描数据为基础,选取2011年台风梅花(1109)及2012年台风海葵(1211)的观测数据,采用Hovmoller分析图、变异系数等参数,研究不同时空分辨率观测数据对台风云系结构特征参数监测的敏感性影响。分析结果表明:可见光通道10min观测时间间隔配以1.25km空间分辨率可以很好地反映云系演变特征,在相同观测时间分辨率条件下,降低空间分辨率会对云系结构特征的提取有较大影响;在相同空间分辨率条件下,观测时间分辨率的降低对云系结构及演变特征的分析影响较小;基于变异系数的分析说明云像元特性在60min的观测时间间隔下发生了较大变化,如果以60min为观测时间间隔将会失去较多的云像元变化特征。水汽通道不同观测时间的变异系数差值小于红外通道1,说明云像元在红外通道1的特性演变对观测时间的敏感性高于水汽通道,提高观测频率可获取更多的云像元红外通道1的辐射特性。

近30年城市化对北京极端温度的影响——《科学通报》2013年第58卷第33期

王君等撰文基于1978—2008年北京地区20站均一化逐日气温资料,评估了城市化对温度和极端温度变化的影响。与以往研究不同,此研究采用聚类分析,客观地将

观测站点分为4类(城市站、近郊站、乡村站和山地站),并利用遥感夜晚灯光数据验证了分类结果的合理性。近30年来,城市化所致城市热岛增强的效应对城市站点平均气温增温趋势的贡献为10.9%(影响最大的站点该贡献达18.4%或0.12°C/10a),对最低气温增温趋势的贡献为12.7%(影响最大的站点该贡献达20.8%或0.19°C/10a),对温度日较差下降趋势的贡献为24%(影响最大的站点该贡献达37.4%或0.15°C/10a)。城市化效应对城市站点最高温度影响较小,但对极端暖夜(冷夜)的增加(减少)趋势贡献为12.7%或2.07d/10a(29.0%或5.06d/10a)。

1998年夏季西北太平洋副热带地区30~60天季节内振荡特征——

Advances in Atmospheric Sciences, 2014, Vol. 31, No. 1.

Lu Riyu等研究了1998年夏季西北太平洋副热带地区30~60天对流振荡特征以及西北太平洋热带与副热带振荡之间的关联程度。分析表明,1998年夏季在西北太平洋的热带及副热带地区30~60天振荡都表现得异常强烈,为研究副热带振荡及其与热带振荡之间的关系提供了机会。进一步研究表明,30~60天振荡从西北太平洋副热带地区向西传播,到达中国东部;并且,副热带30~60天振荡受到南海和西北太平洋热带地区的两种机制影响:(1)从热带地区直接向副热带地区传播;(2)热带和副热带地区之间的跷跷板型。而后者是主要影响机制。

NOAA全球温度时间序列年度排名的不确定性——Uncertainty in annual rankings from NOAA's global temperature time series. *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, No. 22.

全球温度年度排名是气候监测重要的组成部分。然而,每年全球温度时间序列的值存在一定的不确定性,这也导致了排名的不确

定性。美国国家海洋和大气管理局（NOAA）国家气候数据中心的Arguez等采用Monte Carlo方法对该中心发布的全球陆-海表面温度（NOAATMP）时间序列进行了不确定性分析。结果表明，年与年之间的持续性对结果和假设的统计独立性影响不大。对1880—2012年温度时间序列的分析显示，最暖年的最高概率出现在2010年（约36%）、2005年（约28%）、1998年（约11%）。与NOAATMP时间序列的标准误差相比，基于观测数据得到的几个最暖年之间的差异相对较小。不过，1997—2012年间的每一年的温度都要比1880年以来的大多数其他年份更高（置信水平为95%）。

城市土地利用影响下的鹿特丹城市热岛的空间变异——Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, in press.

瓦赫宁根大学的Heusinkveld等利用一种新颖的骑自行车观测（如图所示）方法，评价了鹿特丹一天内的温度空间变异，在当地时间2009年8月6日的中午和傍晚分别进行了两次观测，每次观测都在两个小时内完成，当天最高气温达到30.4℃。观测发现，由于城市不同区域地表覆盖特征的不同，导致夜间城市温度的空间差异可达7K。中午的观测结果显示，城市公园的温度要比市中心低4.0K，而市中心温度比周边郊区高1.2K。但位于鹿特丹机场的一个WMO气象站的温度信号受到了来自机场跑道和城市方向的城市热岛（UHI）效应的影响。总体上，不论白天还是夜晚，植被覆盖好、建筑物密度低的区域都具有最



低的温度。回归分析也显示，夜间UHI现象与土地利用有关，植被覆盖良好的居民区能够明显减缓夜间的UHI效应。利用自行车观测数据，构建了一个多元线性回归模型，并使用4个城市固定气象站3年的夏季UHI统计数据对其进行了独立验证。回归模型再现了城市热岛夜间空间变异中的4.3%的偏差，利用该模型生成了鹿特丹及周边区域的热岛地图。这张地图表明，缺乏绿化或接近大型水体的高密度城市结构在夜间很容易受到高温热浪的影响。分析一个位于海港区的城市气象站的数据，也发现水体的升温效应相当明显，其夜间UHI的频率分布与市中心的气象站类似。该热岛地图可以作为一种有价值的规划工具，以减轻夜间城市热胁迫或识别热浪期间的住宅区高温风险。

基于非城市气象站数据的伊比利亚半岛的夏季极端温度趋势——Trends in summer extreme temperatures over the Iberian Peninsula using non-urban station data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, in press.

基于20个远离城市影响并规则分布的气象站1961—2010年间的夏季（6—8月）日温度数据，西班牙Extremadura大学的Acero等使用极值理论（EVT），特别是阈值顶点（peaks-over-threshold, POT）方法，研究了伊比利亚半岛的热浪事件趋势。首先，将所使用的整个研究时段的夏季温度数据按最大值（ T_{max} ）到最小值（ T_{min} ）进行排列，超过95百分位定义为热浪事件。然后，使用一种“滑动拆分”方法选取了超出阈值的独立极端温度事件，并将这些事件的出现日期拟合成一个泊松过程。通过分析POT方法的尺度参数、泊松强度、平均值、低值（25百分位）、高值（75百分位）等参数的变化趋势，发现，当出现热浪时，泊松强度的最优趋势显著增加。对 T_{min} 和 T_{max} 值的

分析表明，低值区比高值区的增长趋势更为显著，特别是 T_{max} ，其方差反而出现了下降。研究认为，在伊比利亚半岛，极端温度事件预期正在增加，但达不到平均值的增加幅度，因为方差呈现出减小趋势，这也表明方差在极端气候的描述上具有重要作用。

迅速城市化下的植被覆盖和地表反照率变化：以华南区域为例——Modifications in vegetation cover and surface albedo during rapid urbanization: a case study from South China. *Environmental Earth Sciences*, 2014, in press.

植被覆盖和地表反照率是气候和陆面模式中的两个重要参数。中国气象局气象干部培训学院的侯美亭等以华南广州地区为例，使用高分辨率的Landsat TM/ETM+数据和中等分辨率的MODIS数据，分析了迅速城市化对植被覆盖度（GVF）和地表反照率的影响。研究发现，在1990年，从广州市中心至远郊，GVF逐渐升高，短波反照率出现了明显的下降趋势。而在2000年，沿城市—乡村的空间梯度上，反照率并没有出现明显变化，这与低反照率城市建筑的增多和土地覆盖格局的异质化增高有关。而MODIS反照率尽管不能捕捉到Landsat数据所反映的异质化细节，但二者之间存在明显相关。在不需高分辨率反照率数据的情况下，更易利用的MODIS数据是一种较好的选择。

陆面模式、遥感和GRACE卫星蒸散产品的不确定性——Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 2014, in press.

目前，蒸散（ET）产品正在逐渐增多，评价它们的不确定性具有重用意义。德克萨斯大学奥斯汀分校的Long等使用不需要真实ET先验信息的Grubbs估算方法，评价了4种

陆面模式 (Noah, Mosaic, VIC, SAC) 输出的ET产品, 两种遥感数据 (MODIS, AVHRR) 反演的ET, 以及源于水分收支平衡的GRACE蒸散产品的不确定性。研究区域为美国中南部的3个流域, 涵盖了干旱到湿润的不同气候特征。研究发现, 陆面模式输出的ET具有最低的不确定性 (大约5mm/month), MODIS或AVHRR反演的ET产品具有中度不确定性 (10~15mm/month), GRACE蒸散产品的不确定性最高 (20~30mm/month)。空间分辨率和不确定性之间存在折衷关系, 例如, 不确定性较低的陆面模式也具有较低分辨率 (约14km), 而较高分辨率的MODIS或AVHRR蒸散产品 (约1~8km) 具有较高的不确定性。未来估算ET时, 应考虑将陆面模式和卫星遥感产品相结合, 以发挥二者的优点。

有关气候振荡的讨论: CMIP5大气环流模式与基于天文周期的半经验谐波模式之间的对比——Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles. *Earth-Science Reviews*, 2013, Vol. 126.

全球地表温度 (GST) 记录的功率谱显示出9.1年、10~11年、19~22年和59~62年几种主要的周期。在许多长期的古气候记录中, 也发现了相似的振荡。然而, 美国ACRIM实验室的Scafetta对IPCC第5次评估报告 (AR5) 使用的国际耦合模式比较计划5 (CMIP5) 大气环流模式 (GCMs) 进行分析, 发现这些模式不能重建上述的这些变率。特别是从2000年到2013年上半年, 尽管观测数据显示GST基本保持稳定, 然而GCM预测的变暖速率达到了2°C/100a。相比, “气候由特定的自然振荡所调节”的假说在多种时间尺度上可能更适合于GST记录。例如, 准60年的自然振荡同时解释了1850—1880年、

1910—1940年和1970—2000年的变暖期, 1880—1910年和1940—1970年的变冷期, 以及2000年以来的GST稳定期。这个假说暗示了观测到的1970—2000年全球地表增暖 (0.5°C) 的50%可归因于气候系统的自然振荡, 而不是归因于如CMIP3和CMIP5 GCMs模拟的人为强迫。从而, CO₂加倍的气候敏感效应应该减少一半, 例如, 从2.0~4.5°C (IPCC, 2007) 减少到1.0~2.3°C, 而且中值由3.0°C减至1.5°C。近代的古气候温度重建也显示了比2000年初建立的曲棍球温度重建更大的工业化前的变率, 这暗示了太阳活动对气候变化的较强贡献和人为因素对气候变化的较弱影响。观测到的自然振荡可能是由天文强迫所驱动。9.1年振荡好像是长期的太阳一月亮潮汐振荡的一个结合, 尽管准10~11年、20年和60年振荡典型地存在于主要由木星和土星驱动的太阳和日球振荡之中。基于日球振荡的太阳模式也预测到准长期 (例如, 115年) 和千年 (例如, 983年) 的太阳振荡, 其可用于回报全新世的气候振荡。该研究推荐使用一个由6个特别的天文振荡所组成的半经验气候模式来构建年代至千年尺度的自然气候变异, 再加上一个由GCM平均模拟推断出的辐射变暖组分 (其效应需减少50%) 来估算人为和火山活动对气候变化的贡献。这个半经验模式重建的1850—2013年的GST格局明显好于任何一个CMIP5 GCM模拟的结果。在相同的CMIP5人为释放情景下, 该模式预测2000—2100年平均变暖可能达到0.3~1.8°C, 这个范围显著低于原始CMIP5 GCM集合预报的增温范围 (大约1~4°C)。下一步的研究需要寻找太空—气候的耦合机制, 以发展更先进的解析和半经验气候模式。

流域尺度的土壤湿度: 遥感技术——Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. *Journal of Hydrology*, 2014, in press.

许多有关陆面过程的研究需要

高空间分辨率的土壤湿度数据。然而, 被动微波遥感反演的土壤湿度的分辨率目前比较低 (约25km)。南卡罗来纳大学的Fang等提出了解决这个问题的两种不同的方法。第一种, 基于日温度变化和由植被条件调节的平均土壤湿度之间的热惯性关系, 建立了一种土壤湿度降尺度算法。以俄克拉荷马的一个小流域为例, 将本算法应用到AMSR-E和SMOS土壤湿度产品, 生成了2010和2011年生长季的1km土壤湿度降尺度数据。第二种, 利用不同时间获取的主动雷达数据之间的差异, 对被动微波遥感反演的土壤湿度进行降尺度。同实地观测获取的土壤湿度相比, 这两种方法都具有较好的效果。

失控和潮湿的地球温室气候的延迟开始——Delayed onset of runaway and moist greenhouse climates for Earth. *Geophysical Research Letters*, 2014, in press.

在目前太阳的主序星阶段内, 太阳正在缓慢地变亮, 这将威胁到地球表面的可居住性, 因为变亮的太阳将会导致地球湿度加大, 最终形成失控的温室气候。一维气候模式预测, 当太阳常数在目前水平上增加6%时, 灾难性的热失控将会被触发。然而, 科罗拉多大学Boulder分校的Wolf等使用一个三维气候模式 (NCAR CAM3) 研究太阳变亮下的地球命运, 发现在CO₂和CH₄浓度不变的情形下, 地表的可居住性可能被维持在较大的太阳常数下。研究指出, 太阳常数增加15.5%时, 全球平均地表温度将稳定在312.9K, 而此时, 尽管地球的气候非常炎热, 但水散失和热失控也达到了极限, 从而地球将保持安全。当太阳常数增加16%时, 对流和垂直扩散框架出现了数值不稳定性, 这限制了进一步的模拟。尽管如此, 本研究结果意味着地球气候可能在至少15亿年或更长时间内保持安全。

《气象科技进展》2013年主要内容回顾

第3卷第1期 (延伸期预报专辑)

孙国武等: 用低频天气图方法进行延伸期预报的探索
何金海等: 延伸期预报的思考及其应用研究进展
康志明等: 我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势
郑志海: 月动力延伸预报研究进展回顾
梁萍等: MJO在延伸期预报中的应用进展
高建芸等: 2010年福建前汛期典型持续性暴雨过程的低频特征分析
陈伯民等: 月内重要天气过程与气候趋势预测系统及应用进展
信飞等: 经验正交函数分解在上海地区低频天气图方法中的应用
胡明辉等: 利用MJO活动规律进行云南雨季开始期的延伸期预测试验
柯春丽等: 低频天气图方法在辽宁夏季延伸期强降水预报中的应用
钟琦等: 极锋理论—长波理论—数值预报的发展和内在联系

第3卷第2期

陆春晖等: 平流层与对流层相互作用的研究进展
卞建春等: 夏季青藏高原对对流层—平流层交换过程及其气候效应的若干问题
陈葆德等: 快速更新同化预报的关键技术综述
钱维宏: 多时间尺度气候变化
付雨晴等: 气候变化对中国经济系统的影响及评估方法评述
田颖等: 热浪对人体健康影响的研究进展
王瑜莎等: 西北地区干旱对农业影响的评估方法——以甘肃省春玉米为例
马志强等: 气象条件对北京地区一次光化学烟雾与霾复合污染事件的影响
尹仔锋等: 气象信息传播模式的三个演进阶段及其特点分析

第3卷第3期

龚建东: 同化技术: 数值天气预报突破的关键——以欧洲中期天气预报中心同化技术演进为例
魏文寿等: 气候研究中不同时期的资料获取与重建方法综述
刘舸等: 1990年代中国东部NCEP再分析高空资料的问题探讨
卢乃锰等: 卫星遥感在青藏高原大气科学研究中的应用前景
布和朝鲁等: 东北冷涡环流及其动力学特征
戴建华等: 强对流天气预报检验新方法在上海的应用尝试
何洁琳等: 西北太平洋热带气旋群发与MJO的联系
张锦泉等: 临夏地区局地突发强降水天气的综合分析
胡宜昌: 中国不同强度降水时空变化特征
陶祖钰: 和预报员谈谈气象中的哲学和逻辑问题

第3卷第4期 (风云三号卫星仪器校准与应用专辑)

杨忠东等: 风云三号卫星有效载荷与地面应用系统概述
游然等: 风云三号卫星微波温度计的在轨性能长期稳定性分析
王祥等: 用数值天气预报模式评估风云三号A星微波温度计资料的质量
王祥等: 风云三号B星微波温度探测仪观测资料的质量评估
谷松岩等: 风云三号A星微波湿度计探测通道定标分析
邹晓蕾等: 运用主成分分析方法诊断和消除风云三号B星微波湿度计观测数据中的噪声
漆成莉等: 风云三号B星红外分光计的定标和验证
胡秀清等: 风云三号A星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射定标
孙凌等: 风云三号A星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段的多场定标跟踪

王维和等: 臭氧总量探测仪(TOU)与臭氧监测仪(OMI)和SBUV/2的交叉定标及其在环境中的应用
黄富祥等: 紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)辐射定标和反演臭氧垂直廓线验证
邱红等: 风云三号B星(FY-3B)上地球辐射探测仪的绝对辐射定标及其与Aqua卫星上云和地球辐射能量系统(CERES)数据之间的对比
黄聪等: 风云三号A/B星空间环境监测器对空间天气事件监测能力评估及其应用研究
杨虎等: 风云三号微波成像仪定标精度评价及业务产品介绍
邹晓蕾等: 风云三号B星微波成像仪资料在陆地上的无线电频率干扰信号的识别

第3卷第5期

蔡鸣等: 从牛顿力学认识罗斯贝波的振荡机理及其回复力
胡永红等: 基于干旱/半干旱区协同观测网络的GLASS下行短波辐射产品精度验证及影响因素评估
孙健等: 我国气象预警信息覆盖率的初步分析
宋巧云等: 风廓线雷达在北京市气象局的业务应用
杨妍辰等: WOFOST作物模型机理及使用介绍
李娇等: 浅淡极端天气事件研究中阈值确定方法
朱智慧等: 光流法对2011年“梅花”台风期间500hPa高度场预报的检验释用
林纾等: 150天韵律方法月内过程预测系统简介及应用检验
郑东旗等: 福州市百余年气温资料处理及变化特征分析
沈文海: 对气象信息化的理解和再认识
杨惜春等: 我国气象灾害风险评估立法环境与需求

第3卷第6期

郭强等: 风云二号卫星在轨辐射定标技术进展
毛夏等: 深圳城市气象综合探测系统简介
兰红平等: 精细化预报预警平台在深圳的试验应用
杨萍等: 北京地区加密自动气象站数据的质量分析
屈芳: 环境气象因素对呼吸系统疾病影响的研究进展
马原等: 气象卫星微波湿度计资料简介
宝乐尔其木格等: 海温观测方法及常用海温资料数据集比较
陈官燕等: 基于气象资料的林芝地区空气质量动态预报方法研究
孙雪婷等: 气象行业官方微博管理方法浅谈——以“气象北京”微博为例
周莉等: 气象灾害中专业群体的信息支持研究——基于“中国气象论坛”的社会网络分析

第3卷增刊 (气象与地质灾害研究专辑)

贾朋群等: 气象与滑坡研究国际进展评介
张健: 国外降水型滑坡事件个案研究
刘芸芸: 国外滑坡活动与气候变化关系研究进展评述
张蕾: 卫星遥感资料在滑坡灾害防御中的应用
侯美亭: 遥感技术在提取影响滑坡的环境变量上的应用
李婧华: 美国NOAA-USGS泥石流预警系统及预警预防业务简介
戴洋等: 亚欧部分国家/地区山洪地质灾害预警工作进展
王卓妮: USGS滑坡研究和服务进展及启示
赵亚南: 美国地质调查局山洪地质灾害培训与科普介绍

《2013粮食及农业状况》 2013年

这份由联合国粮农组织最新出版的针对2013年粮食和农业状况的报告指出，营养不良会给全世界带来难以想象的巨大社会、经济成本，可能高达每年3.5万亿美元，相当于人均500美元。妇幼营养不良比起超重及肥胖，仍是更严重的问题，虽然后者即便在发展中国家也呈上升趋势。报告认为，改善营养首先要从粮食及农业入手。世界各地的粮食体系不尽相同，且正在快速变化。粮食体系正不断趋向工业化、商业化、全球化，推动了全球范围内的生产力增长、经济发展和变革进程，给饮食结构和营养成果带来了深刻的影响。

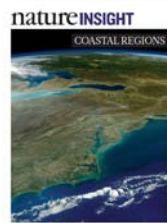
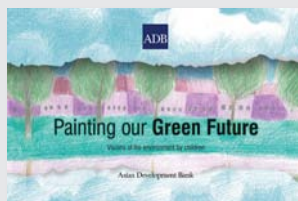


《JGR: 海洋》——IOOS专辑 2013年12月

这份地学领域的重要期刊，刊发了美国IOOS (Integrated Ocean Observing System, 综合海洋观测系统) 专栏。IOOS将学术界、联邦业务中心和企业合作到一起，共同打造IOOS沿海和海洋试验平台——COMT (Coastal and Ocean Modeling Testbed)，这是美国机构间密切和战略性的合作。COMT的提出，旨在加快沿海和海洋模拟研究领域的科学和技术进展的转化，以改进业务海洋产品和服务。COMT最初的内容，是面对沿海和海洋预报的三个有社会影响的挑战：入海口氧不足、大陆架低氧和沿海洪水。项目将致力于第四个挑战，即集中在提供并优化基础设施和计算工具，支持模拟研究，从而推进COMT档案的交互性和可获取性。

《描绘我们绿色的未来》 2013年12月

亚洲开发银行 (ADB) 出版的这本画册，汇集了来自中国新疆5个县学生的手工艺品的图案画，从这些图画中可以看到学生们对环境的关注，以及他们对未来美好的愿望：3R环境实践——减少 (reduce)、再利用 (reuse) 和再循环 (recycle)。在这本画册中，学生们用他们的画作提醒读者，人类是我们生活的星球的守护者，我们有责任建设更绿色和更适宜居住的环境。



《Nature观察》: 沿海地区 2013年12月5日

地球上的海岸线仅仅是内大陆与开放海洋间的一条细线而已，然而，其对人类的重要性，特别是环境和经济价值，非其所在区域面积所能代表。本期《Nature观察》瞄准沿海地区。全球沿海区域是数亿人口的家园，但是对沿海的过渡开采已经将该区域置于重压之下。专栏通过5篇评述文章和2篇特写，探讨了塑造沿海体系的一些因子，包括热带气旋带来的洪水、格陵兰冰的消失、湿地的稳定性、沿岸海洋碳循环、漂浮的海藻、近海地下水储备和面对全球变化的沿海防御等。

媒体扫描

MEDIA SCAN

地球实验室 2014年

Koshland科学博物馆在网开上开始的地球实验室展示项目，其副标题，“变化的度 (Degrees of Change)” 揭示了其意义所在：全球变暖、热浪时间更长和更极端、冰雪圈缩小等，到底变化的范围有多大？展示分变化、趋势、过程、原因、影响、模拟和反应等几个专栏，探讨地球环境到底发生了什么，参观者应该怎样做等问题。

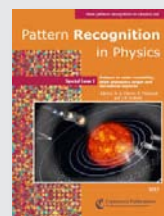
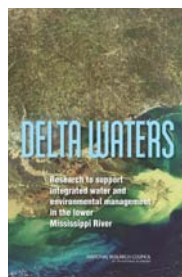


《东亚气候变化经济学》 2013年10月

亚洲开发银行发表的这份报告，包括对中国、日本、韩国和蒙古等东亚国家/地区的研究成果，探讨到2050年适应气候变化的战略如何制定，同时确定减少该地区的温室气体排放的措施。报告用气候模式的结果讨论了在基础设施、沿海保护和农业等方面的适应成本，还估计了各领域不同的减排措施带来的投入成本以及到2020和2030年减缓的潜力。

《三角洲水环境》 2013年12月

这本由美国科学院出版社出版的报告副标题是：从研究到支持密西西比河下游综合水和环境管理。报告的出版者，是美国国家研究委员会地球和生命研究部 (DELS) 水科学与技术分会 (WSTB) 所属的综合水资源管理战略研究委员会。三角洲环境可以说是世界上生物学意义上最丰富、地学意义上最具活力，以及社会意义上最为危险的特别区域。在这里，沉降、腐蚀、沉陷和盐分通量持续发生，并不时因洪水、沿海风暴潮和其他环境灾害而引人注目。报告集中研究发生在密西西比河三角洲的状况，这里河道时常因洪水而改道，成就了面积更加广阔的三角洲区域。



《物理模式识别》 2014年1月

2013年3月开始，哥白尼出版公司开始出版的这本杂志，仅仅一年不到，即宣布停止出版。实际上，期刊的倾向从一开始就特别受到出版人的关注，原因是该刊的主编与气候怀疑论有染，尤其是在该刊发表了题为“太阳变率及行星起源和陆地影响”的专辑，编辑最终得出质疑IPCC得到的“持续，有可能加速变暖”观点的结论。此外，该刊在编辑中所选定的审稿人也难言公平，出版公司据此做出严厉反应，于2014年1月17日决定终止出版该刊。

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

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors

Xiao Ziniu
Zhai Panmao
Luo Yunfeng
Wang Huijun
Li Weijing
Hu Yongyun
Tan Zhemin
Fei Jianfang
Guan Zhaoyong
He Jianxin
Huang Jianping
Liao Xiaohan
Lü Shihua
Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

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

Editors

Bi Baogui, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Feng Guolin, Guo Hu, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yurong, Hu Yuewen, Jiang Tong, Lei Xiaotu, Li Hui, Li Jiming, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Shi, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Li, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Mao Hengqing, Peng Yinghui, Pu Yifen, Shi Guangyu, Song Yan, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Xiaoyun, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zaizhi, Wang Zifa, Wen Min, Wen Hongtao, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Hua, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yande, Zou Liyao

Overseas Editors

Chen Jingming, Li Jun, Liu Zhengyu, Jin Feifei, Wang Bin, Weng Fuzhong, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Chen Zhongmei

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China
Tel: +86-10-68409927/68409933
Email: amst@cma.gov.cn
<http://library.cma.gov.cn/amst>
<http://weibo.com/2115232930/profile>

Printed by

Beijing Mingcheng Printing Co., Ltd.

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

Main Contents

- 1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief
Article
6 Miao Shiguang, Wang Yingchun/ Advances and Prospects
of Urban Meteorology Research: Meeting Users' Needs
15 Sun Jisong/ The Essential Theory and Technology on
Accurate Urban Weather Forecast
22 Wu Meng, Wu Dui, Fan Shaojiao, et al/ Research Progress
in the study of Air Pollution and Atmospheric Boundary
Layer over the Pearl River Delta City Cluster
29 Shen Xiaojing, Sun Junying, Zhang Yangmei, et al/ The
Characteristics of Particle Number Size Distribution
under Typical Meteorological Conditions at Shangdianzi
Regional Station in Beijing
36 Li Ju, Dou Junxia/ Progress in Urban Meteorological
Experiments in Beijing
46 Zhang Shuyu, Lou Bin/ Recent Trends in International
Biometeorology Study—19th International Congress
Summarization of Biometeorology
53 Yin Heng, Shen Dingcheng, Xia Jin, et al/ Analysis on
Ambient Condition and Initialization Mechanism of
Convection in a Severe Squall Line Storm Event in Hubei
58 DuJun, Kang Zhiming/ A Survey on Forecasters' View
about Uncertainty in Weather Forecasts

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

- 68 Wu Can, Li Jinghua/ Bibliometrical Analysis of the Scientific
Literature in the Field of Urban Meteorology Research

History

People

- 70 Huang Jianping/ Prof. Chou Jifan

Reading

Meeting Review

- 74 Ji Wenbin, Zou Liyao, Gao Jie, et al/ The World Creating
Activities for Learning in Meteorology—Review of the
10th CALMet International Conference

Information

- 76 Selected Papers