

Advances

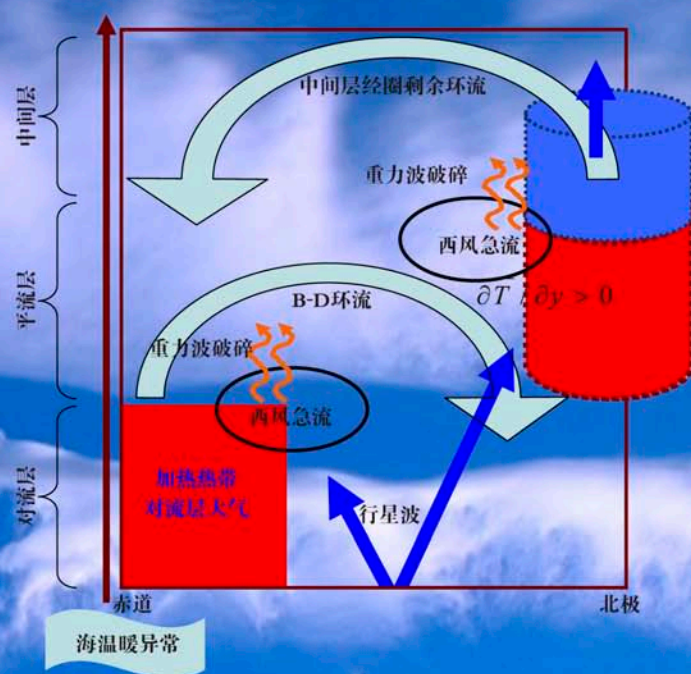
in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

No.2

2013年4月
第3卷 第2期

平流层与对流层相互作用



气象科技进展
Advances in Met S&T

ISSN 2095-1973



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

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

常务编委 (按音序排名)

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

编委 (按音序排名)

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

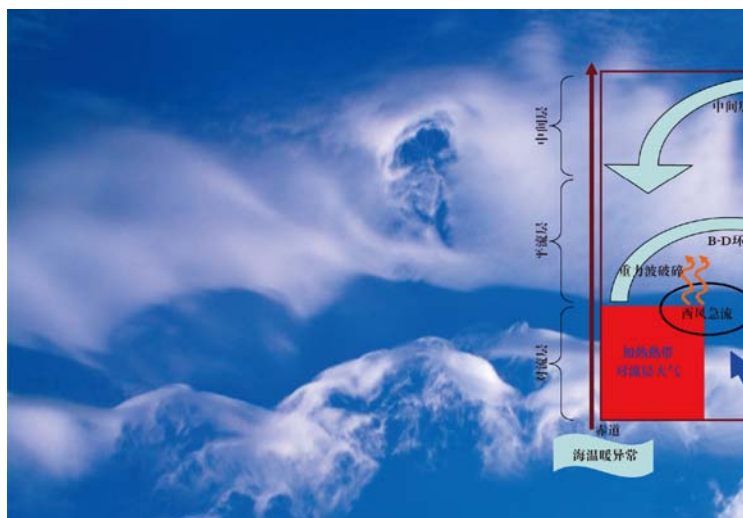
海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富中	杨 崧	张大林	张广俊	邹晓蕾

编辑部

张 萌 侯美亭 胡 英 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: 北京宝昌彩色印刷有限公司

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》及CNKI系列数据库收录, 相关著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为(除事先声明外)视为同意文章被上述数据库收录。

目 次

第3卷 第2期 2013年4月

研究论文

封面报道

6 陆春晖, 丁一汇: 平流层与对流层相互作用的研究进展

平流层和对流层大气是地球气候系统中的重要组成部分, 众多研究表明两者的动力耦合非常密切, 平流层并非仅仅被动地接受对流层扰动的影响, 强的平流层异常也会对主要发生在对流层的天气……

研究进展

22 卞建春等: 夏季青藏高原对流层—平流层交换过程及其气候效应的若干问题

29 陈葆德等: 快速更新同化预报的关键技术综述

36 钱维宏: 多时间尺度气候变化

41 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

49 田颖等: 热浪对人体健康影响的研究进展

55 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

短论

59 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

主编语

对大气垂直层结的认识,是气象科学中经典成就之一,这使得人们在研究大气活动时,可以根据不同的大气层结特性,将大气分层,探讨特定高度层大气的变化规律。如变化剧烈的天气,大都集中于大气垂直运动中,即所谓“对流”活动频发的大气层最下层10~15km的对流层。而位于对流层上部的平流层,由于温度层结发生了改变,大气呈现出了与对流层完全不同的相对稳定状态。稳定的平流层与其下方活跃的对流层会有哪些相互作用和影响,一直是大气科学界不断探索研究的问题。近年来,越来越多的研究发现,对流层的大气活动确实受到了来自平流层的显著影响,且这种影响在一定条件下会起到重要作用。

本期的封面报道(P6)全面阐述了平流层与对流层相互作用的研究进展,从引起平流层环流扰动的典型过程、平流层过程对下层大气的影 响等方面,揭示出二者之间相互作用的过程和特征,如发生在平流层的AO异常信号总是领先于对流层中的AO异常。另外一篇青藏高原对流层—平流层交换过程的研究论文(P22),则聚焦全球对流层最浅的高原,探讨那里平流层—对流层相互影响的特殊性。

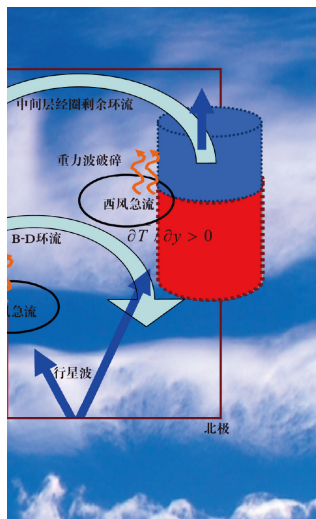
“监视天气,保护生命和财产”是今年世界气象日的主题,凸显了人类对于天气的敬畏之心以及气象人不断创新和探索的勇

气。本期刊登了介绍欧洲第二代气象卫星的文章(P67),2013年4月,Meeteosat-9和Meteosat-10将组成新的“双卫星”天基观测系统,能为天气预报中最具挑战性的临近预报业务提供支持。另一篇关于预报技术的文章是关于快速更新同化预报(RUC)关键技术发展的综述(P29),这项针对短临预报需要而发展的数值预报技术已在美国、英国、澳大利亚等国预报业务中使用多年,近年来也在我国中央气象台和不少省局得到开发和应用。

有关气候的话题,已成为近年来持续引发社会讨论的热点问题之一。越来越多的气象学家和社会科学家关注到气候变化对人类生活诸多方面的影响,由联合国发起并通过世界气象组织(WMO)实施的全球气候服务框架(GFCS)受到越来越广泛关注。本期“研究进展”栏目刊载了几篇天气/气候对民生产生影响的文章,如热浪对人体健康的影响(P49)、气候变化对中国经济系统的影响(P41),以及西北地区干旱对农业的影响(P55),阐述了天气/气候变化与人类生产、生活的相互关联。

本期“往事钩沉”栏目,介绍了在大气科学领域做出过重要贡献的黄土松先生在影响我国天气的最强大系统之一——副热带高压方面所做的研究。

许小峰



P6

封面报道: 平流层与对流层相互作用的研究进展

封面图: 平流层与对流层相互作用

论坛

62 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

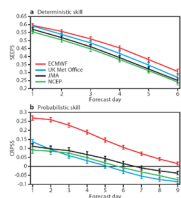
科学观察

2 读图 数字 榜单

特写

67 张蕾: 欧洲第二代气象卫星新“双卫星”结构形成

68 李婧华等: “平流层与对流层相互作用”主题文献计量指标分析



P2

阅读

书评/会评

70 贾朋群: 一本书、一个报告、一个机构和一项事业

73 杨萍: 《树木和城市热岛效应》评价

信息

21 新书架

28 会议信息

35 《气象科技进展》在宁编委读者座谈会

74 《气象科技进展》在线投稿、

审稿系统开通启事

75 文摘(中文文献)

77 文摘(英文文献)

封3 媒体扫描



封3

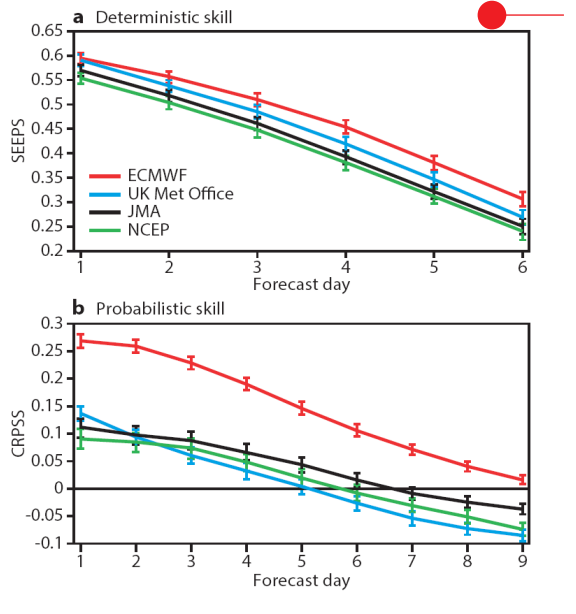
往事钩沉

人物

P79

79 陈云峰: 黄土松与副热带高压研究





2012年降水预报技巧评估结果公布

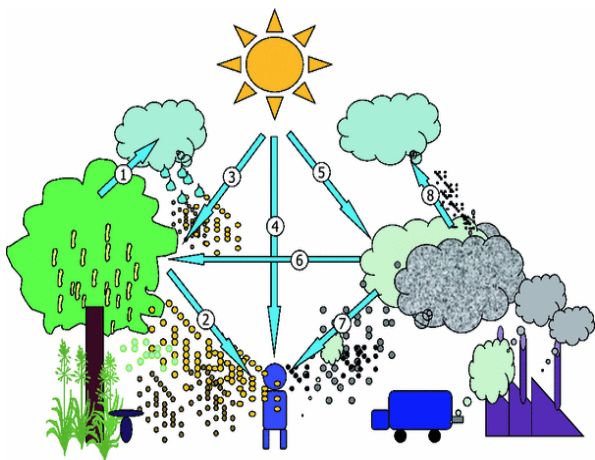
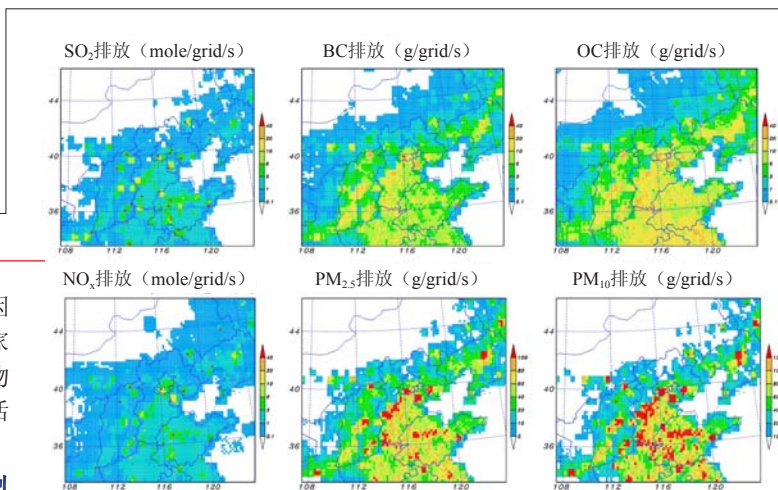
欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 最近公布了全球四个主要气象业务预报机构预报技巧对比结果。图中给出四个机构 (欧洲中心、英国气象局、日本气象厅和美国NCEP) 确定预报 (图a) 和概率预报 (图b) 预报技巧的比较, 这种例行的对比采用SEEPS (Stable Equitable Error in Probability Space, 概率空间稳定平衡误差) 评分和CRPSS (Continuous Ranked Probability Skill Score, 连续分级概率技巧得分) 评分分别对比确定预报和概率预报结果。本次评估的时间段为2011年8月到2012年7月。图中垂直线段给出95%信度区间。比较结果表明, ECMWF的两项指标均保持领先, 概率预报结果更是具有明显的优势。

来源: ECMWF

雾霾天气形成的内因: 京津冀地区排放源

在2013年2月21日中国气象局召开的“雾霾天气成因分析与预报技术研讨会”上, 中国环境科学研究院的专家介绍了华北大气灰霾形成特征, 给出了京津冀各种排放物的分布。图中显示了该地区各种工业源、农业源、生活源、机动车源、电厂源等导致的各种污染物排放的分布。

来源: 本刊



物理、化学和生物天气相互作用关系被揭示

瑞典、芬兰和希腊等国的科学家在最近的研究中, 总结了影响天气, 特别是空气质量的物理、化学和生物天气之间的相互作用。图中给出这种相互作用的主要过程: (1) 植物向大气排放气体影响空气质量并可能导致颗粒和云的形成; (2) 植物和菌类产生花粉和孢子影响人类健康; (3) 太阳光和热影响花粉量, 降水和湿度导致次花粉粒子生成, 显然物理天气影响化学和生物污染物的扩散和传播; (4) 热浪或寒冷期与高污染浓度一道影响人类健康; (5) 对流层臭氧由氮氧化合物和碳氢化合物形成, 后者部分来自生物源的光化学反应; (6) 气体污染物可能影响植物和花粉; (7) 化学和生物污染物共同影响人类健康; (8) 化学污染和生物气溶胶的颗粒物可能影响云的生成, 因此对物理天气产生影响。该研究成果在新一期AMBIO杂志上发表。

来源: AMBIO

数字

1390 人

2013年初发表的《中国气候公报》显示, 2012年属于气象灾害偏轻年, 全年因灾死亡或失踪人数1390人, 直接经济损失3358亿元。

前3

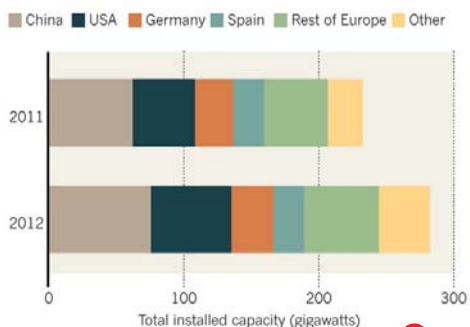
教育部学位与研究生教育发展中心近期发表的2012年学科评估结果表明, 位于大气科学学科前3位的高校分别为南京信息工程大学、南京大学和北京大学。

2%

美国化学学会出版的《环境科学与技术》发表的一项研究表明, 全球通信基础设施建设每年排放温室气体达8.3亿吨, 占全球总排放的2%, 与航空业的排放相当。

MORE POWER FROM THE WIND

Global wind-power capacity grew by 18% in 2012, with most expansion in China and the United States.



中美：领跑风能利用

根据全球风能理事会（Global Wind Energy Council, GWEC）的统计，2012年中美风电新增装机容量都在13千兆瓦左右（GW）。目前全球风电总装机容量达到282.4GW，其中中国占1/4以上，为75.6GW（尽管并非所有风力发电机都接入了电网）。2012年全球风能发电能力提高18%，其中中美两国起到了引领作用。

来源：GWEC

EUROPE'S CARBON PRICE PLUNGES

Carbon prices in the European Union's emissions-trading scheme have fallen sharply since the start of 2013.



欧洲：碳价格走低

欧洲碳贸易市场是全球最早的以市场经济手段尝试减缓温室气体排放的实践，但目前碳价格持续走低却是不争的事实。主要原因是政治家在制定机制和政策的时候，还无法预料到经济的低迷状态。据估计，到2020年仍然有大约20亿吨的过多的碳限额。

来源：Nature

国际“平流层对流层相互作用”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	Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity ozone and potential vorticity	Danielse, EF	Journal of the Atmospheric Sciences, 1968, 25(3)	550
2	A stratosphere troposphere data assimilation system	Swinbank, R	Monthly Weather Review, 1994, 122(4)	505
3	Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere	Baldwin, MP	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1999, 104(D24)	381
4	Associations between the 11-year solar-cycle, the QBO and the atmosphere .1. The troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter	Labitzke, K	Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1988, 50(3)	371
5	The effect of orographically excited gravity-wave drag on the general-circulation of the lower stratosphere and troposphere	Mcfarlane, NA	Journal of the Atmospheric Sciences, 1987, 44(14)	367
6	Turbulent mixing within tropopause folds as a mechanism for the exchange of chemical-constituents between the stratosphere and troposphere	Shapiro, MA	Journal of the Atmospheric Sciences, 1980, 37(5)	277
7	Arctic oscillation or North Atlantic oscillation?	Ambaum, MHP	Journal of Climate, 2001, 14(16)	233
8	Stratospheric ozone in 3-D models: A simple chemistry and the cross-tropopause flux	McLinden, CA	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2000, 105(D11)	194
9	Chlorine-hydrocarbon photochemistry in the marine troposphere and lower stratosphere	Singh, HB	Journal of Atmospheric Chemistry, 1988, 7(3)	188
10	Age as a diagnostic of stratospheric transport	Hall, TM	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1994, 99(D1)	179

来源：SCIE数据库，检索时间：2013年3月10日

李婧华、胡英 提供

45.8℃

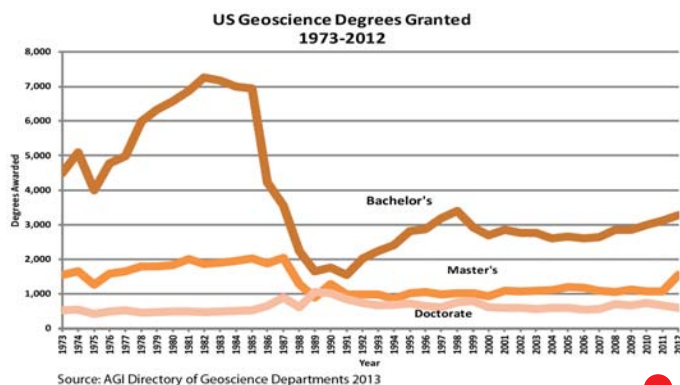
2013年1月18日，澳大利亚悉尼气温达到了45.8℃，是有记录的150年以来的最高值，超过了1939年出现的45.3℃的原纪录。

30秒

2013年3月11日，美国加州发生4.7级地震，正在测试的该州地震预警系统，在地震发生前30秒成功发出警报。

7%

澳大利亚学者基于世界各地1900年到2009年期间8000多个观测站的暴雨和气温的关系进行的一项最新研究结果表明，全球气温每上升1℃，暴雨的强度就增加7%。



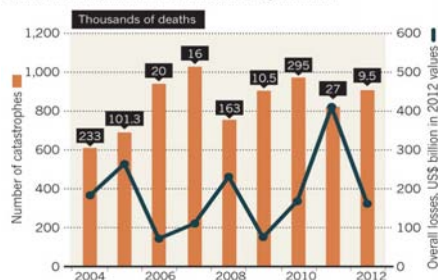
AGI: 美国地学本科入学新生数量持续增加

美国地学研究所 (AGI) 最新发表的报告给出2012学年美国高校地学入学新生的统计结果, 其中本科入学新生为26897人, 增加3%, 从而保持了持续近10年的增长。研究生新生则为10221人, 减少3%。在获得学位方面, 3281人获本科学位, 1541人 (增加44%) 和600人分获硕士和博士学位。图中给出1973年以来美国地学领域每年学位获得人数的变化。

来源: AGI

COUNTING CATASTROPHES

Deaths from natural disasters were relatively low in 2012, as few catastrophes occurred in developing countries.



2012年: 灾害“小年”

慕尼黑再保险公司 (MUNICH RE) 给出2012年全球灾情统计, 全年因自然灾害死亡人数约9500人, 少于10年均值的1/10。死亡人数的大幅度减少和发生在发展中国家的灾难数量少直接有关。全年灾害造成的损失为1600亿美元, 仅为2011年的一半, 较10年均值略低。损失中飓风桑迪的损失就达500亿美元。

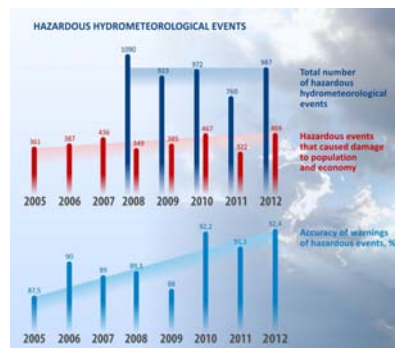
来源: MUNICH RE



南极臭氧洞: 通过改变气流干预海洋环流

人为生成的氯氟烃在每年春天制造了南极臭氧洞, 模式研究发现, 臭氧洞以及温室气体增加, 是南半球夏季观测到的南极西风带向极地移动的原因, 这也造成西风带下面环绕南极大陆的海洋环流加速。最新的资料分析表明, 南极臭氧洞在这方面的作用, 较温室气体的贡献高出50%, 西风带的变化同时也让海洋深层向北的洋流速度更快。

来源: Science



俄罗斯: 水文气象灾害预报水平稳步提高

在中俄纪念气象科技合作备忘录签署20周年的活动中, 俄方提供的信息表明, 俄罗斯近年来水文气象灾害的数量虽然没有明显增加, 但是影响却在加大。2005—2012年俄罗斯气象部门对水文气象灾害的预报准确率保持了持续提高的势头, 最近3年准确率均超过了90%。

来源: 本刊

0.4% 美国桑迪飓风灾害发生后, 美国众议院核准拨款约500亿美元用于东海岸救济, 其中大约1.945亿美元将支持NOAA改进天气预报和监测, 占总款项的0.4%。

9348起 来自国土资源部的消息表明, 2003—2012年的10年间, 我国共成功预报地质灾害9348起, 避免了37.1万人伤亡。同期我国年均发生地质灾害2.7万起, 死亡、失踪868人, 直接经济损失40.1亿元。

44.5% 2012年中国国民海洋意识调查报告显示, 被调查的民众仅有44.5%的人能够正确说出“洋流”不属于海洋灾害, 表明国民对海洋灾害概念的认识有待深入。

DATA DELUGE

The billions of terabytes (TB) produced in one year by the SKA telescope (grey) will dwarf today's data sets in genomics and climate science.

Encyclopedia of DNA Elements (ENCODE), 2012

15 TB

US National Climate Assessment (NASA projects), 2013

1,000 TB

Fifth assessment report by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), due 2014

2,500 TB

Square Kilometre Array (SKA), first light due 2020

22,000,000,000 TB per year

地球科学数据的未来

大数据时代的来临，造就了地球和空间科学、物理和基因组学等领域兆兆字节 (TB) 大数据流的产生 (图中给出美国气候评估和IPCC评估报告依据的数据量)。要用好这些数据，开发共享数据的工具是数据组织获取机构应该做的，只有这样大数据才会发挥应有的作用。

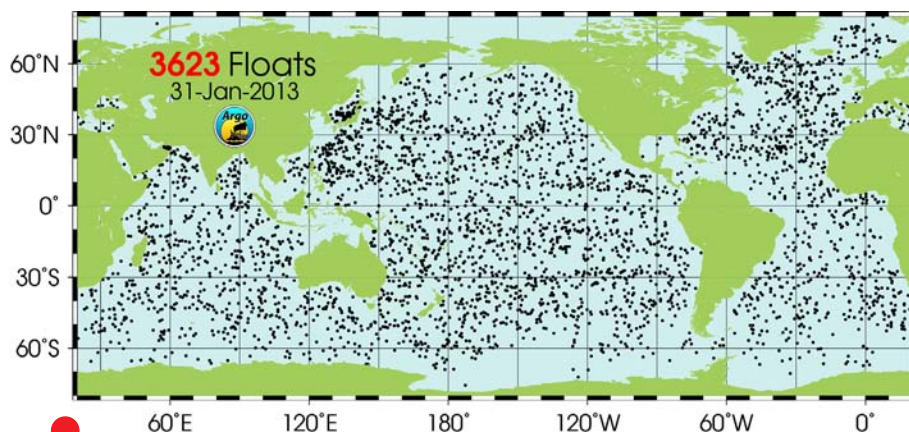
来源: Nature

中国“平流层对流层相互作用”主题被引频次最高的前12篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	青藏高原及其邻近地区上空平流层—对流层之间大气的质量交换	丛春华	科学通报, 2001/22	46
2	上对流层—下平流层交换过程研究的进展与展望	陈洪滨	大气科学, 2006/05	42
3	北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用	陈文	大气科学, 2006/05	39
4	大地形和热源的动力控制与超长波活动关系的初步研究	朱抱真	气象学报, 1964/03	37
5	平流层—对流层交换研究进展	杨健	地球科学进展, 2003/03	35
6	40~50天的纬向基流低频振荡及其失稳效应	张可苏	大气科学, 1987/03	32
7	夏季亚洲—太平洋涛动与大气环流和季风降水	赵平	气象学报, 2008/05	30
7	论大气环流的季节划分与季节突变 III. 气候平均情况	薛峰	大气科学, 2002/03	30
9	2008年中国南方雪灾与平流层极涡异常的等熵位涡分析	易明建	高原气象, 2009/04	27
9	东亚2005年和2006年冬季风异常及其与准定常行星波活动的关系	黄荣辉	大气科学, 2007/06	27
9	平流层—对流层相互作用的多尺度过程特征及其与天气气候关系——研究进展	吕达仁	大气科学, 2008/04	27
12	2000年北半球平流层、对流层质量交换的季节变化	杨健	大气科学, 2004/02	25

来源: CNKI中国学术期刊总库, 检索时间: 2013年3月10日

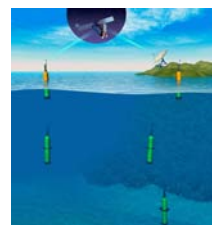
李靖华、胡英 提供



Argo: 进入后百万条廓线时代

2012年11月, 世界气象组织编号为2901287号的Argo浮标站, 收集到第100万条Argo廓线, 从而将Argo项目推进到后百万条廓线时代。2013年初, 全球海洋上分布着3623个Argo浮标站, 这些站大约在海洋上相隔3个经纬度, 每10天完成一次在海面和海洋2000米处之间的上下移动, 在上升时获取大约1000个温度、盐度和深度观测数据。

来源: Argo



80%

2013年3月28日斯坦福大学发表的一项气候变化民意调查结果显示, 美国80%的人相信地球在变暖, 沿海社区应该更好地应对海平面上升和强风暴增加, 调查还发现民众并不希望政府为适应气候变化而投入, 而是认为要由居住在高风险区域的人群来买单。

2687亿美元

2012年全球在清洁能源上的投入下降了11%, 为2687亿美元, 其中大约有300亿美元用于研发。中国的投入达到677亿美元, 增加了20%。

28年

美国Landsat 5卫星创造了“最长业务地球观测卫星”吉尼斯世界纪录。1984年3月1日升空的Landsat 5卫星设计寿命仅3年, 但是已经业务运转了28年10个月。

平流层与对流层相互作用的研究进展

陆春晖 丁一汇

(国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 平流层和对流层大气是地球气候系统中的重要组成部分, 众多研究表明两者的动力耦合非常密切, 平流层并非仅被动地接受对流层扰动的影响, 强的平流层异常也会对主要发生在对流层的天气、气候现象产生影响。主要介绍了平流层和对流层大气相互作用方面的一些研究工作, 从引起平流层环流变化的扰动因子出发, 总结了对流层大气波动、赤道纬向风准两年振荡、ENSO海温异常和太阳11年周期活动对平流层大气的影响。平流层环流发生改变后, 会有环流异常信号从平流层向下传播至对流层, 有关北极涛动(AO)的研究很好地证明了这点: 平流层中AO异常的信号总是领先于对流层中的AO异常。伴随着平流层和对流层大气之间的动力耦合过程, 上、下层大气之间有显著的物质交换(STE)进行, 在不同的纬度存在着不同空间尺度、不同作用形式的STE过程, 而STE是控制人为和自然排放的痕量化学物质影响大气成分分布的重要过程。还介绍了中层大气模式的发展和应用情况, 改进模式中的辐射传输和重力波参数化方案, 实现大气化学过程、动力过程和微物理过程的充分耦合是发展中层大气模式的主要工作。在气候变化的背景下加强平流层-对流层大气耦合系统及其相互作用的研究具有重要的科学和现实意义。

关键词: 平流层-对流层相互作用, 平流层-对流层交换, 中层大气模式, 北极涛动, 大气波动

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.001

Progress in the Study of Stratosphere-Troposphere Interaction

Lu Chunhui, Ding Yihui

(National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Stratosphere and troposphere are both important components in the Earth's climate system, and many investigations have shown that there exists a close dynamical relationship between them. Stratosphere does not just passively receive the disturbances and wave energies from the troposphere. Strong stratospheric anomalies are able to influence the weather and climate which mainly happened in the troposphere as well. In this paper, we mainly review related researches about the interactions between stratosphere and troposphere. Starting from the disturbed factors coming from the troposphere, we have summarized the influences of the tropospheric wave actions, the QBO effects, the ENSO events and the 11-year sunspot cycle on stratospheric circulations. Then, the anomalous signals after the changes of stratospheric circulations which are propagated from the stratosphere down to the troposphere have been accounted. It is revealed that signals of the stratospheric AO anomalies are always ahead of the tropospheric ones. On the other hand, with the dynamic coupling processes between the stratosphere and troposphere, apparent stratosphere-troposphere exchanges (STE) are bound to occur, and in different latitudes areas, the STE processes have different special scales and varying characteristics. Furthermore, the STE of air mass and chemical species is a significant process influencing the effects of trace chemical species emitted from natural and anthropogenic sources on the atmospheric composition. Finally, we have also discussed the development and application of numerical models for the middle atmosphere. For the improvement of the middle atmosphere models, the radiation scheme and the gravity wave parameterization scheme are the main focuses for physical processes, while the full coupling between atmospheric chemical and dynamical as well as micro-physical processes is another aspect of model development. Against the background of climate change, exerting further efforts to investigate the stratosphere-troposphere coupling system and their interaction has an important scientific and practical significance for a better understanding of the science of climate change and improvement of the projection of the future change of the climate system.

Keywords: Stratosphere-troposphere interaction, Stratosphere-troposphere exchange, middle atmospheric model, Arctic oscillation, atmospheric wave

收稿日期: 2012年7月9日; 修回日期: 2012年8月29日
第一作者: 陆春晖(1983—), Email: alex61704@163.com
资助信息: 国家重点基础研究发展计划(2010CB428604);
中国博士后科学基金面上资助(2012M510383)

1 引言

平流层大气是指位于对流层之上、中间层之下的大气层, 其高度为15~55km。虽然平流层大气质量只占地球大气总质量的15%, 但是越来越多的事实

表明平流层过程及其与对流层的相互作用在气候系统中有着非常重要的作用,在大气环流模式和气候预测模式中,都必须包括对流层和平流层的相互作用。以往的观点认为平流层是稳定的,并且被动地接受其下方对流层内上传的波动和能量,但近期的研究表明,平流层并不是完全稳定的(由温度随高度升高造成的稳定温度层结所致),而在一定时期具有明显的大范围温度和环流扰动、变化。近年来的研究进一步揭示,平流层与对流层的关系,也不是过去认为的主要是对流层影响平流层,而是双向的,即在对流层通过大气波动的上传影响平流层后,平流层大气会将下层上传来的无序波动重新组织起来引起平流层环流的持续异常,而这些异常又反馈给对流层并影响其天气、气候。此外,平流层中包含的吸收太阳紫外辐射的大气臭氧层,使得该层大气的动力—化学—辐射过程平衡对于地球气候系统的维持、发展有着重要的作用,臭氧层的稳定存在是整个地球表层生物圈得以生存、演化的关键保护伞。因此,对平流层过程及其与对流层相互作用的进一步探索和研究对于深入认识地球气候系统、应对气候变化有着重要的科学意义。另一方面,随着高空探测手段的提高、卫星观测技术的发展以及大气环流模式的进步,有关平流层大气的观测数据和模拟结果越来越丰富。在21世纪初,Baldwin等就利用多年的观测数据和模拟结果提出平流层是大气异常系统的前兆,平流层环流的大幅低频变化首先出现在50km以上,然后逐渐向上传到平流层低层,进而出现对流层的异常。平流层的异常信号往往可以领先对流层约30d,因此研究平流层异常及其下传信号对于建立和改善区域性重大天气事件的中长期(延伸)预测预报途径与方法有着重要的现实意义。这重新复苏了停顿了近30年的从平流层获取对流层预报信号的工作。

平流层大气过程及其与对流层相互作用的研究具有很长的历史,本文从引起平流层大气环流扰动的典型过程(第二部分)出发,先对这些工作进行初步的小结,在第三、四部分分别讨论了有关平流层环流异常对下层大气的影响,以及平流层—对流层之间物质交换的研究工作,第五部分总结了中层大气模式发展和应用的相关工作,最后在第六部分给出了全文的总结和对未来工作的展望。

2 引起平流层环流扰动的一些典型过程

2.1 对流层行星波活动的影响

起初对于平流层大气的认识,大多认为平流层仅仅是被动接受下层对流层中天气系统的能量和扰动,平流层大气环流的动力、热力和化学过程受到对流层

剧烈的影响。Andrews等^[1]详细讨论了发生在中层大气特别是平流层中的动力学过程以及平流层—对流层的相互作用,指出大尺度的行星波是联系对流层异常和平流层扰动的关键因素之一,而小尺度的波动仅仅存在于对流层中。根据Charney和Drazin的行星波垂直传播理论^[2],Rossby波只能在西风气流中传播,并且满足纬向西风小于罗斯贝临界风速时行星波可以向上传播进入平流层,从而影响到中、高层大气环流系统^[3]。因此,行星波主要在冬半年极地平流层盛行西风时上传到平流层中,尤其是在北半球由于地面地形和海陆差异导致对流层中超长波活动比南半球更加活跃,在这一时期行星波对平流层的影响也更加显著。

冬季的极地平流层处于“极夜”,没有太阳紫外辐射对平流层臭氧层的加热作用,辐射的冷却效应非常强,因此这里的温度很低。但在北半球冬季,平流层中常常会出现短时间内温度的剧烈增加,增温幅度可以达到十几甚至几十摄氏度,这种急剧的增温现象被称为平流层爆发性增温(Stratospheric Sudden Warming, SSW),SSW最早由德国科学家Scherhag在1952年发现,增温过程前后平流层环流也有剧烈的调整,极涡扰动发生变形或者崩溃,高纬度地区温度增加导致经向温度梯度反向,极夜西风急流减弱甚至消失,极区出现绕极的东风环流^[4-6]。大量的观测分析和理论研究表明,平流层的爆发性增温过程与对流层中形成并上传到平流层的行星波活动有关,行星波和平流层中基本气流的相互作用是增温出现的关键。1961年,Eliassen等提出用波动的能量通量来研究行星波的传播,即E-P通量^[7],在此基础上Matsuno^[8]提出平流层爆发性增温是由于对流层行星波向上输送能量并与基本流相互作用造成的,这一理论的提出得到了广泛的认可,Holton,Quiroz和Pierce等对对流层行星波的上传在SSW过程中的重要作用从理论和观测上给予了进一步的证实^[9-11]。

行星波活动对平流层—对流层耦合系统的影响不仅存在于平流层爆发性增温过程中,即使在一般情况下,北半球高纬度地区平流层温度的观测值也是高于辐射平衡温度的值,这主要就是由对流层中行星波的向上传播及破碎造成的。行星波上传进入平流层存在两条路径,即波动向赤道和向极地传播的两支波导,陈文等^[12]研究指出行星波的这两支波导呈反相关关系,当行星波的极地波导偏强时,向上、向极传播的波动能量使得平流层中高纬地区的环流发生变化,极涡被扰动并减弱;而当行星波的向赤道波导较强时,主要的波动能量被传播到热带平流层低层,行星波在

热带外地区的平流层中、高层影响较小，平流层极涡强且稳定。同时，平流层不只是被动的接受对流层行星波上传的能量，还存在行星波的反馈机制反作用于对流层，影响对流层中行星波的活动。Limpasuvan等研究发现，无论是SSW过程中极涡崩溃或者是极涡稳定增强，都存在平流层和对流层强烈的动力耦合过程，并且平流层异常会随着波动的异常向对流层传播^[13, 14]。

2.2 赤道平流层纬向风准两年振荡的特征及影响

赤道平流层纬向风的准两年振荡（QBO）现象是平流层大气环流中最主要的特征之一，它的纬向风异常最大值出现在平流层上层的50km并且可以逐渐向下传播至平流层低层的16km，它的平均周期约为28个月。对QBO现象最早的观测记录可以追溯到1883年的Krakatau火山爆发，观测发现火山喷发产生的火山灰在两周内出现了东西振荡的现象，科学家把它称为“Krakatau easterlies”。之后随着探测手段的丰富，Reed和Ebdon应用Canton岛（2.8°S）的探空资料，发现了在30km以上的平流层中存在着纬向风的准两年周期变化^[15, 16]，并且这一现象在平流层中会以每月1km的速度向下传播，QBO的概念就这样被首次提出。随着时间的推移，探测资料的增加，QBO现象在全球的赤道地区都得到了证实^[17, 18]。

在QBO现象被发现后的初期，有关热带波动的认识很少，既没有观测事实也缺乏理论依据，因此有关QBO的形成原因只停留在推测阶段。直到1968年，Lindzen和Holton在经验二维模式中用重力波强迫再现出QBO现象^[19]，让人们认识到热带波动可能是驱动QBO形成的主要原因，之后他们又在—维模式中用Kelvin波和Rossby—重力混合波强迫得到了QBO过程^[20]，进一步证明了这样的认识。其关键是：（1）有向上的纬向动量通量，并具有所要求的量值；（2）在东西风切变区有波的吸收和纬向动量辐合；（3）存在半年振荡，它可提供交替的东风和西风切变压。进入20世纪90年代后关于QBO生成及影响机制的研究有了更大的突破，研究表明热带对流层中各种尺度的对流活动激发了大量的热带波动（重力波、惯性重力波、Kelvin波、Rossby重力混合波等）向上传播并在平流层中堆积，这些波动携带的西风、东风动量驱动了QBO东、西风异常的生成和转换，有一部分的重力波可以穿过平流层进入中间层在90km附近驱动中间层QBO的生成^[21, 22]。除了影响纬向风的分布外，QBO还可以通过改变热成风平衡来调节赤道上空不同高度平流层的温度分布，通过调节平均经圈环流的垂直运动来影响赤道外地区

平流层的温度^[17, 23]。

QBO不仅是热带平流层中的现象，它还可以通过调整风场、温度场、赤道外波动和经圈环流来影响整个平流层，并影响平流层中的物质分布和输送，进而影响臭氧的损耗。1980年时，Holton等研究^[24]指出在QBO不同的纬向风阶段，行星波在垂直和经向的传播强度不同，在东风态QBO时行星波的极地波导强、向赤道波导弱，向极、向上传播的行星波会引起平流层中、高纬地区环流的剧烈改变；而西风态QBO时行星波向赤道波导较强，波动以向赤道传播为主，这被称为“Holton-Tan关系”。QBO在平流层中还可以影响微量气体的分布和输送过程，如N₂O，CH₄等产生于对流中的长寿命气体主要是通过QBO调节的经圈环流输送到平流层中的，具体的作用过程会在第四部分中进一步介绍。

综上所述，QBO现象的存在和东、西风异常转换过程直接影响了平流层中温度场、风场和经圈环流的分布，并且它是联系平流层、对流层天气过程和气候变化的重要因子，是平流层—对流层相互作用的重要纽带，也是研究平流层大气环流的重点和难点问题。

2.3 ENSO 海温异常对平流层大气的影响

El Niño海温异常现象自被发现之后，引起了中外科学家的浓厚兴趣，就海温异常对全球对流层天气和气候影响的问题进行了大量的研究，但作为对流层大气的上边界，有关中高层大气和ENSO海温变化之间联系的研究不多，低层的海温异常如何引起中高层大气环流的变化，从而向下作用影响对流层天气、气候，仍然是一个有待解决并值得研究的问题。

20世纪80年代末，Labitzke和van Loon等^[25, 26]对海温异常引起的平流层极涡变化进行了研究，指出北半球平流层极涡扰动在El Niño年比La Niña年时更加强烈，极涡温度更高，但他们没能找到ENSO事件与极地平流层间明显的统计关系。随着资料的增加，Hamilton^[27]对34年中北半球冬季的平流层平均环流进行了分析，认为ENSO事件的影响和赤道平流层纬向风准两年振荡的作用很难区分。此后，这一方面的研究有所停滞，直到21世纪初，随着气候模式和再分析资料的进一步完善，很多学者利用全新的模式和资料取得了突破性的进展：Sassi等^[28]应用WACCM-1研究得出El Niño年时行星波活动频繁，重力波又将能量堆积在中间层顶附近，使得El Niño年时平流层极地温度偏高，暖平流层使得各类化学过程减弱，臭氧消耗较慢；而La Niña年时，极地平流层温度较低，加大了臭氧的损耗；Taguchi等^[29]则利用模式得到足够多的平流

层爆发性增温个例, 分析指出El Niño年平流层爆发性增温事件出现的频率是La Niña年的两倍, 从而建立了一个ENSO事件对极地平流层作用的影响机制; 同年Garcia-Herrera等^[30]比较了两个气候模式和再分析资料结果, 指出ENSO效应在北半球冬季趋于顶峰, El Niño年时垂直输送的波动和E-P通量的散度都会加强, 使得平流层中的剩余环流更强, 这一经圈环流使得热带地区冷却、高纬地区增温。在模拟研究取得重要成果的同时, Camp等^[31, 32]又从统计学上指出影响北半球冬季极地平流层的三个要素是东风态的QBO、强太阳活动和El Niño海温异常, 而El Niño事件对极地平流层温度分布的影响与QBO相当。

ENSO海温异常主要通过影响对流层和平流层中波动的传播对中层大气环流起作用, 图1和2给出了暖、冷海温异常出现后行星波、重力波和中层大气环流变化过程的示意图^[33]。当热带太平洋海温出现暖异常时, 会加热热带区域的对流层大气, 使得对流层中副热带地区出现负的经向温度梯度, 根据热成风原理, 这样的温度分布特征会使得200hPa高度附近的副热带急流增强, 强烈的西风急流有利于热带平流层中重力波的破碎和拖拽作用的增强, 对平流层中的Brewer-Dobson (B-D) 环流起到了加速作用^[34]。同时暖的海温异常有利于对流层中纬度地区行星波的形成和向上传播, 向上、向极传播的行星波会引起平流层极涡的扰动、极区温度的增加, 而在极涡外围的中高纬区域会出现正的经向温度梯度, 同样根据热成风原理平流层中的绕极急流强度会减小, 减弱的西风急

流不利于重力波在平流层高层、中间层中的破碎, 重力波的拖拽作用也较弱, 极地中间层有异常的绝热上升运动, 对应了这一区域的负温度异常^[35]。当热带太平洋海温出现冷异常时, 对流层中的温度梯度发生变化, 行星波的活动偏弱, 热带平流层中的重力波拖拽作用相应地减弱, 平流层中B-D环流减弱、极涡增强、极区温度偏冷。平流层中高纬地区这样的温度分布有利于中间层中重力波的破碎和拖拽作用的增强, 因此中间层中顺时针的经圈剩余环流加速, 极区为绝热下沉运动, 对应了极地中间层的暖异常。

有关ENSO事件同平流层环流异常相互关系的研究已经取得了一定的成果, 特别是它在北半球冬季中对波动、环流的影响得到了充分的研究。但之前的工作大都集中在暖ENSO事件的影响上, 而El Niño和La Niña海温异常带来的影响并不是完全相反的, 不能简单地用反El Niño效应来表示La Niña, 这一点在对流层中已经得到了证明^[36]。在平流层中, Lu等^[35]也通过对模拟结果和再分析资料的分析发现, 在北半球冬季冷、暖ENSO海温异常对平流层大气影响的时期是不同的, 在El Niño年冬季前半期的12和1月, 行星波活动频繁, 向上传播后会引起平流层环流的改变; 而在La Niña年中行星波在冬季后半期的2和3月更加活跃, 平流层及中间层环流在这一时期容易出现较强的扰动。冷、暖ENSO海温异常事件在平流层中有着各自的作用特点, 这一部分工作值得进一步探讨。

2.4 太阳 11a 周期活动引起的平流层异常

地球作为太阳系中的一员, 太阳辐射能是地球

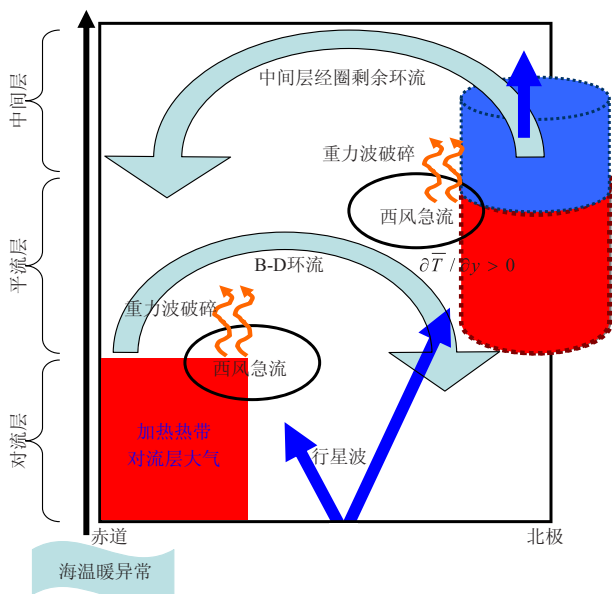


图1 ENSO暖异常海温事件后行星波、重力波和中层大气环流的变化示意图^[33]

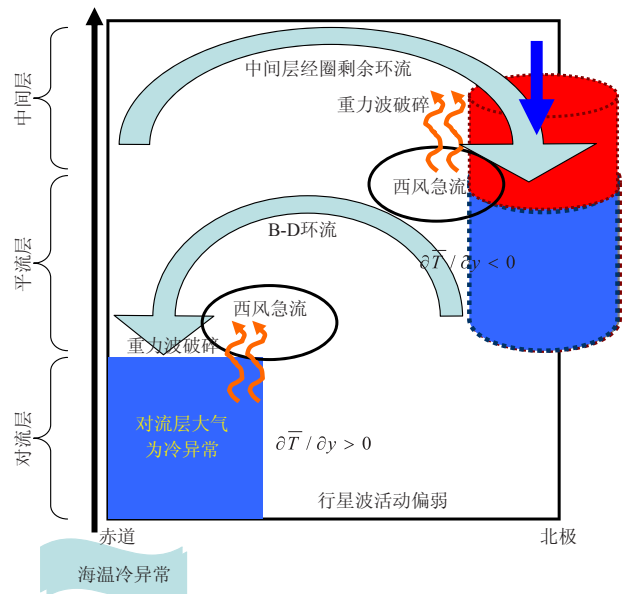


图2 ENSO冷异常海温事件后行星波、重力波和中层大气环流的变化示意图^[33]

上各个系统的主要能量来源，维持地球气候系统的能量也几乎全部来自于太阳。因此，不论是太阳的周期性活动还是极端的高能粒子活动都会给地球表面的天气、气候带来巨大的影响。

观测事实和理论研究都表明太阳活动存在一个周期为11a的循环，在这一活动周期中太阳活动强、弱造成的辐射总能量差异不大（0.1%），但是在紫外光谱波段强太阳活动时产生的能量要增加6%~8%^[37]。太阳辐射加热地球大气主要会产生两个暖区，一个是吸收长波辐射的近地面，而另一个就是吸收紫外辐射的平流层臭氧层。因此，太阳11a周期活动引起的紫外辐射差异必然会引起臭氧层中温度的分布差异，从而造成整个平流层大气环流的扰动。早在1987年时，德国科学家Labitzke^[38]应用观测资料发现北极地区50hPa高度的温度同太阳活动以及QBO存在一定的联系，但由于观察资料时间较短，很难得到具有统计意义的结论。之后随着高空探测手段的进步、卫星观测资料的丰富和再分析资料数据质量的不断提高，有关太阳活动效应的研究逐渐增多：Labitzke等^[39-41]通过计算太阳活动指数和不同等压面上位势高度、温度的相关系数，分析指出太阳活动给大气环流年际异常带来的影响受QBO过程的调节，在不同的QBO阶段太阳活动的辐射效应和波动的动力效应各不相同，特别是在热带、副热带地区，强太阳活动可以通过改变一些动力过程影响大气环流。此后又有很多研究进一步证实了QBO过程在太阳活动效应中的作用，Salby等^[42]用NCEP再分析资料统计发现太阳活动可以通过影响QBO的东、西风转化频率和纬向风的位置来影响平流层环流，配合E-P通量和剩余环流的扰动可以调节平流层中经圈环流的强度，从而改变平流层中的经向温度梯度和环流结构；Camp等^[32]应用线性判别分析方法对太阳活动、QBO给北半球冬季平流层极涡带来的影响进行了统计分析，指出强太阳活动和东风态的QBO都会造成平流层极涡的增温，两者的作用相互独立又相互促进。

除了辐射效应，太阳活动引起的地球磁场改变也可以间接地影响平、对流层的大气环流^[43-45]，另外宇宙线也会在太阳活动影响下进入大气层影响云层的形成，从而影响地球气候的异常，但这个问题尚无确定的结果。

3 平流层过程对下层大气的影响

3.1 波动过程引起的平流层—对流层相互作用

平流层环流扰动过程对对流层大气的影响是平流层—对流层耦合系统中的重要问题之一，Andrews等在

1987年详细讨论了平流层的动力学问题以及对流层对平流层的动力影响，但受到当时研究条件的限制，有关平流层对对流层作用的问题涉及的不多，只是简单地提出行星波活动是平流层—对流层动力耦合的主要途径之一。

行星波在对流层中生成后向上传播进入平流层，由于大气的密度随着高度的增加而呈指数递减，因此行星波的振幅会随着高度的增加而逐渐增大，当波动传播到平流层中某一高度时会由于振幅过大而破碎。根据波流相互作用的理论，行星波破碎后释放的能量会导致平流层中西风气流的减小，如果波动作用的能量足够强，其破碎后甚至可以使得平流层中一般情况下的西风气流转变为东风。行星波破碎后引起的平流层纬向风变化会向下传播，例如平流层发生爆发性增温时，平流层高层高纬地区的纬向风会转换为东风，在东、西风转换的区域即0层风速线附近会形成一个纬向风的转换区，这一区域对于行星波来说是一个临界层，当波动传播到0层附近后破碎会导致东风带向下扩展，使得东风区随时间不断向下传播。同样当行星波破碎或爆发性增温之后，平流层高层的西风气流会由于辐射作用而逐渐恢复，这一西风重新建立的过程也会从高层逐渐向下传播。当平流层环流发生异常时，它会影响大气行星波向上的发展和传播，由于行星波在垂直方向上有着深厚的分布，因此平流层扰动引起的行星波变化必然会进一步地影响对流层。

除了行星波之外，重力波在平流层大气环流中也扮演了非常重要的角色。通常认为中层大气中的重力波是来自于对流层，主要存在三种方式：一种是由于地形作用产生，它常常发生在北半球冬季的中纬度地区，这种波动引起的动量通量在对流层顶高度可以达到 $0.3\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[46]；第二种是由穿越对流层顶的深对流活动激发形成，Chen等^[47]使用了一个耦合云微物理过程的非静力平衡模式研究提出深对流激发重力波形成的三个敏感区，波动生成区、激发区和持续区，这种类型的重力波主要出现在深对流频发的夏季东亚中纬度地区；第三种是由平流层大气中的非地转运动激发产生，如平流层发生爆发性增温时，平流层大气受到行星波的影响出现非地转运动，大气的地转适应作用会引起重力波的形成^[48]。在平流层大气中，热带地区纬向风的QBO是最突出的环流扰动现象，而重力波活动是驱动QBO形成和维持的重要能量来源，研究表明，热带区域强烈的积云对流活动激发了重力波和其他一些热带波动的形成，波动破碎后释放的能量驱动了QBO^[49]。由于QBO具有准两年的变化周期，因此对于

它的预测可以提前1a左右,通过对重力波作用过程的深入研究,可以进一步认识QBO的变化规律,从而可以应用QBO的扰动信息更好地提高气候预测能力。

3.2 平流层北极涛动 (AO) 异常和对流层环流

有关平流层环流异常对对流层的影响最早是由 Quiroz^[50]提出的,他在分析1977年1月的一次平流层爆发性增温过程时发现,在增温过程中,平流层的中高纬度区域纬向环流会出现反气旋性异常(西风急流减速甚至反转为东风),并且这样的反气旋异常会从平流层一直向下延伸到近地面并影响对流层中的天气系统。针对这一问题的系统性研究和分析集中在近几年关于北极涛动(Arctic Oscillation, AO)的研究。当北极地区的气压偏低时,中纬度区域存在着一个环状的高压区,这种分布型被称为AO的正位相,反之为负位相^[51],而且这样的空间结构不仅仅存在于近地面,可以一直向上延伸到平流层中。在平流层中这样的分布形态也被描述为北半球环状模(Northern Hemisphere Annular Mode, NAM),这是因为在近地面AO位于中纬度区域的两个高压中心分别位于北大西洋和北太平洋,而随着高度的升高,AO的中纬度部分逐渐趋近于一个环状的空间分布模态。虽然有关AO是一个物理模态还是统计模态仍存在着很多争论^[52],但大量的研究表明这一分布型确实可以有效地用来描述和表征中高纬地区平、对流层环流的重要特征,Thompson等就指出北半球AO可以有效地解释对流层环流变化方差的25%和平流层方差的50%。

Baldwin等^[53]计算了不同高度的AO指数发现无论是正位相或负位相的AO扰动,总是先发生在平流层

上层,然后逐渐向下传播,经历大约3周的时间可以到达近地面。但是并不是所有的AO扰动都可以传播到对流层中,只有达到一定强度的平流层AO异常才能够向下传播进入对流层甚至地面。有一些平流层AO异常向下传播至平流层低层时会在那里维持,可以持续近2个月的时间,之后对流层AO也会出现明显异常。大部分的AO异常信号在平流层和对流层中是相同的,但也并不是都是这样,如1998年12月发生的一次SSW事件。为了得到更有说服力的统计结果,Baldwin等^[54]合成了18个弱极涡事件(发生爆发性增温,AO指数小于-3.0)和30个强极涡事件(AO指数大于1.5)的AO扰动指数,图3即是AO指数在强、弱极涡事件中的合成分布情况,可以看出AO指数异常的符号在平流层和对流层中是相同的,异常信号从平流层中一直向下延伸到对流层和近地面。此外,还可以看出AO异常在平流层和对流层中的时间尺度不同,平流层中的AO异常为1~2个月的低频扰动过程,而传播到对流层后的扰动时间尺度大约是10d左右的天天气尺度过程。有关上、下层大气这种变频的变化特征还没有很好的解释,值得做进一步的研究分析。

在发现AO异常具有这样的下传特征后,Baldwin等^[55]又分析了平流层AO异常向下传播后与北大西洋和欧洲大陆天气系统之间的垂直对应关系,他们发现当有负的平流层AO异常向下传播时,欧洲大陆被低压所控制、盛行偏西北气流,会将极地高纬地区的冷空气带到欧洲大陆的中部和北部,使得这些区域多寒冷、风暴天气,同时北美大陆的东北部地区也同样受偏西北气流的影响而较寒冷。与此相反,当正的平流

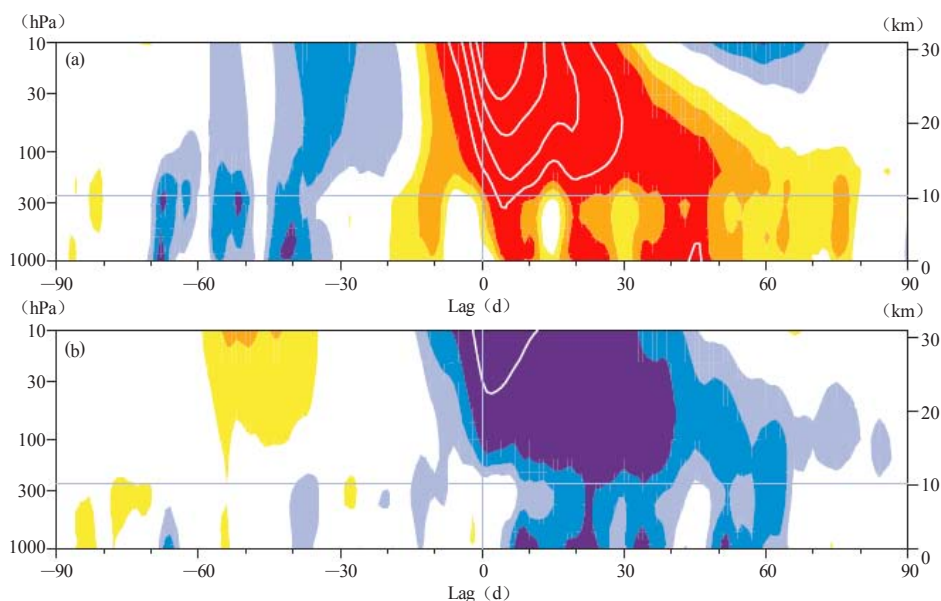


图3 18个弱极涡事件(a)和30个强极涡事件(b)中AO指数的合成分布情况^[54]

层AO异常下传进入对流层时,北大西洋区域通常会伴随着较强的偏南气流,这样的流场会把温暖的海洋空气吹到欧洲大陆中南部,此时该地区又被高压系统所控制,因此这些区域温暖、晴朗;而欧洲北部却多风暴和寒冷天气^[56, 57]。此外,Thompson等^[58]通过统计分析发现平流层和对流层中AO所处的位相与对流层中阻塞系统的发展有很好的对应关系,当平流层AO处于正位相时,平流层极涡较强,绕极的西风急流也较强,对流层的中高纬地区盛行平直的风西气流,北美和欧亚大陆的阻塞事件较少;反之则对流层中的阻塞事件明显增多,阻塞高压将极地的冷空气带往下游的中纬度地区,引起这些区域温度的显著下降。2008年冬季,我国南方出现的雪灾过程就是由于平流层AO负异常的下传,引起西伯利亚阻塞高压持续增强、东亚大槽加深并向南伸展^[59, 60],更详细的研究表明,AO活动与东亚地区冬季的气候、天气有着密切的联系^[61, 62],值得进一步讨论研究。

AO在垂直方向上连续的空间结构使得它成为联系平流层和对流层中高纬大气的重要因素。AO的异常信号首先在平流层上层出现,经过3周左右的时间可以传播至近地面,这样的传播特征使得很多科学家建议平流层的AO异常信号可以作为指标将对流层的天气预报时效提高到3周以上^[54, 58, 63],目前已经有一些气象预报中心进行了这种预报试验。

3.3 存在的争论和需要解决的问题

众多研究已经表明平流层环流异常确实会对对流层大气产生重要的影响,但有关平流层过程影响对流层天气系统的物理机制还存在着较大的争议。目前主要存在两种观点解释这一问题:一种是平流层环流的扰动首先作用于行星波,在改变了行星波的强度、传播方向后,再通过行星波和对流层中的天气尺度波动(如斜压波)之间的相互作用来影响对流层的天气系统;另一种是当平流层异常向下传播到平流层低层时,平流层的扰动直接作用于对流层上层的天气系统或天气尺度波动,从而影响对流层中的大气环流。不论是直接作用还是间接影响,这两种观点都有着各自的合理性,但又都缺乏足够的证据。

Kushner等^[64]对数值模式的模拟结果进行分析后指出平流层中的环流变化主要通过对行星波活动的影响来影响对流层,而对流层中的天气尺度波动和西风气流之间的正反馈作用会加强平流层扰动对对流层环流的动力影响。Hu等^[65, 66]也认为平流层异常影响对流层主要是通过影响行星波的垂直传播,他们计算和分析了行星波的折射指数,发现行星波从对流层向平流层的传播对对流层顶附近的纬向风速十分敏感,纬向

风的强弱可以直接影响波动的垂直传播,从而影响对流层中的环流发展。另一方面,Baldwin等^[55, 63]则认为平流层中的AO扰动对对流层天气系统的影响是平流层环流(风场)的变化直接作用于对流层中的天气尺度波动造成的。和现有的观点不同,他们认为天气尺度的波动可以延伸到对流层顶以上几千千米的地方,这些天气尺度的波动可以直接接受到平流层低层环流的变化,而以往的研究认为即使是大气第3波能够传播到平流层低层的已经相当微弱^[67],天气尺度的波动应该更难进入平流层并对平流层中的环流变化有明显的响应。因此,虽然平流层环流中的扰动是有可能直接作用在对流层中的天气尺度波动上的,但它是否是平流层异常影响对流层的主要形式还值得商榷,需要进一步的研究。

尽管从Baldwin等^[54]给出的合成分析结果中可以看到相当强的AO异常从平流层上层向下传播,并且对流层的AO也对平流层的AO异常有很好的响应,但仍然存在着一些不同的观点。Polvani等^[68]认为平流层AO的异常源于对流层中行星波上传的作用,他们分析了对流层上层中高纬度地区E-P通量的平均垂直分量(代表进入平流层中行星波的强弱),发现它与平流层极涡的负相关系数达到-0.8,并且它的异常通常会领先于对流层中天气系统的异常60d左右,因此他们认为使用对流层高层E-P通量的垂直分量作为先行指标要优于平流层中的AO异常信号。Black等^[69]也指出并不是所有的平流层AO异常都可以传播到对流层中,并且诱发对流层环流的扰动,只有那些足够强且能够传播到平流层底部的AO扰动,在对流层有合适条件的配合下才能够对对流层天气系统产生影响,而那些较弱的AO异常只能存在于平流层中。

以上的讨论表明,平流层环流的异常会对对流层大气产生重要的影响,但这方面的研究工作只取得了初步的新成果,还存在着不少的问题。在今后的工作中,可以充分应用越来越丰富的观测资料,加强诊断分析工作,进一步揭示更加详细、全面的平流层异常影响对流层天气系统的事实。此外,在加强观测分析的基础上,还可以进一步应用数值模式,通过不同的数值实验更好地揭示平流层异常影响对流层的物理机制。

4 平流层和对流层之间的物质交换

4.1 不同尺度的平流层—对流层物质交换

平流层和对流层之间的物质交换和混合(Stratosphere-Troposphere Exchange, STE)是中层大气及平流层—对流层相互作用相关研究中的另一主要内容,它是控制自然事件和人为活动带来的化学痕量

物质对大气成分影响的一个主要过程^[70]。例如平流层低层和对流层上层之间的质量交换可以将臭氧含量丰富的平流层空气向下输送到对流层中,同时也可以将引起臭氧损耗的气体送入平流层。平流层—对流层之间的物质交换不仅会带来重要的化学效应,还有可能影响到上对流层—下平流层区域的辐射通量平衡^[71]。

Brewer-Dobson (B-D) 环流是平流层中一个全球尺度的经圈物质输送环流,它的上升支位于平流层热带地区,在中纬度区域向极、向下输送,在平流层高纬地区下沉。这样一支顺时针的经圈环流对于平流层热带和极地区域之间的物质交换有着非常重要的作用。B-D环流的发现是由于Brewer在观测平流层水汽时发现在平流层低层水汽的混合比较低,他提出在热带区域强烈的积云对流活动会使得空气穿过对流层顶进入平流层,气团在低温的对流层顶经过脱水,水汽混合比显著降低,随后在平流层中向极、向下移动^[72]。之后,Dobson等^[73]在远离臭氧光化学生成区的极地平流层低层观测到明显的高臭氧浓度分布,进一步证实了这种在热带地区上升,向极、向下输送的环流,即B-D环流。1979年开始的卫星观测数据也进一步充分肯定了这个经典的全球尺度的物质交换和输送图像,此后的臭氧及其他大气成分的观测结果,以及理论和数值试验的模拟结果也都证实了这一结论^[74, 75]。

Holton等^[76]认为位于热带外区域的平流层波动是驱动全球尺度经圈环流的主要机制,波动的强迫作用使得气团在热带区域被向上、向极推动,然后从“the overworld”区域向下推入到热带外的平流层低层,“the overworld”是指380K等熵面以上的区域,在这一范围内的等熵面完全处于平流层中。图4给出了全球尺度平流层—对流层物质交换的物理概念模型,在平流层的热带外区域存在一个由波动作用强迫驱动的全球尺度的流体动力学“抽吸泵”,它从热带平流层低层向上、向极方向抽吸空气,然后向极、向下将气团推送到热带外的对流层中。形成这个“泵”的机制是由对流层向上传播到平流层以上高度的行星波和重力波在破碎后产生的动量通量辐散作用造成的。同时,波动引起的强迫作用是非局地控制的,在热带外区域主要是向下控制(downward control),即穿过某一等压面的质量交换是由该等压面上的大尺度涡旋和动量辐合、辐散作用所控制,并通过穿越平流层低层等熵面的质量输送到达热带地区。由于北半球冬季的波动活动更加活跃、引起的强迫最强,因此最大的交换率也出现在冬季。这种全球范围环流的泵机制是测试全球尺度STE,特别是季节和长时间尺度STE的有

效手段之一,被动力学家广泛认可。

B-D环流这种简单的全球物质输送图像主要适用于380K等熵面以上的“the overworld”区域,只有在时间平均和纬向平均的意义上它才可能是精确的,但并不能完全地描述交换过程的物理机制,其中涡旋过程在平流层—对流层交换过程中也起着重要的作用,很多穿越对流层顶的物质交换是通过中尺度的混合作用完成的,下文将详细讨论中纬度和热带地区的STE过程。针对中尺度的STE过程,科学家们进行了一些数值模拟研究,但在STE的量化上还存在着很大的不确定性,不同的个例用不同的方法计算出的交换通量差别很大,因此这一部分的工作今后还需要进一步的探索、研究。

4.2 中纬度地区的 STE 过程

对流层顶折叠是中纬度地区平流层和对流层之间进行物质交换的最主要形式。在20世纪五六十年代,Reed等就提出在中纬度地区的高空,中尺度的气旋生成过程会使得对流层顶发生折叠,引起平流层中物质的向下输送,并且折叠过程的结构和动力学特征都与高空的锋生有关。之后,Hoskins^[78]提出引起对流层顶折叠的物理概念模型,他认为西风带急流中斜压不稳定的发展和伴随着地面气旋的高层对流层锋生作用是引起折叠的主要原因,这两个过程的出现破坏了热成风的平衡,会出现一个横向的次级非地转环流,次级环流的平流作用会使得温度梯度增强,导致锋面的快速加强,伴随的平流层作用使气团从平流层低层向下、向赤道方向运动并进入对流层,这样的下沉作用使得等熵面向下倾斜,具有平流层特征的高PV(位势涡度)值气团沿等熵面平流,造成对流层顶的折叠,同时长舌状的冷空气沿锋面进入对流层。来自于平流层的通过折叠作用进入对流层的气团PV值高且较干,通过小尺度过程和对流层空气进行不可逆的混合。此外,在折叠过程中一些气团随时间的衰退也有可能会

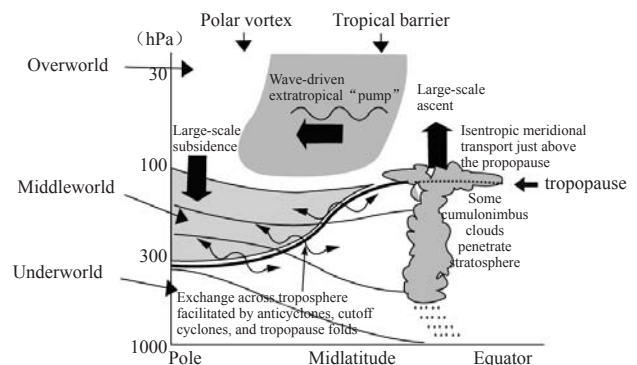


图4 全球尺度平流层—对流层物质交换的物理概念模型^[77]

回到平流层中。对流层顶折叠大多发生在冬季和春季，常常出现在对流层高层的急流附近，通过折叠过程平流层中的臭氧会进入到对流层，这一过程贡献了全球对流层臭氧的10%。

中纬度对流层中的一些大尺度天气系统也会对STE产生影响，如出现后可以维持几天，甚至几周的阻塞高压和切断低压系统。当对流层中纬度地区出现阻塞高压时，会造成该区域臭氧含量的显著减少，这一过程主要通过两种方式进行：首先，高压中心的外围流场会将低纬度的空气带到高纬度地区，这些源自于热带或副热带的空气中臭氧的含量较低，经向的输送使得低臭氧含量的空气进入高纬地区，造成阻塞高压分布的区域臭氧含量的降低；其次，向北倾入的阻塞高压系统会将低纬度中温度较高的空气送入高纬地区，温度的暖异常会造成等熵面的上倾，对应了对流层顶的抬升，由于对流层中的臭氧含量较低，因此上升的对流层顶会使得这一高度的臭氧含量明显减少。通过影响环流的经向输送和改变对流层顶的高度，阻塞高压系统在北半球中对STE过程做出了很大的贡献。

切断低压引起的STE主要通过对流层顶异常降低（切断低压的特征）引起的对流层入侵产生，也可以通过与切断低压相关的急流附近的湍流混合产生，或是通过沿切断低压边缘的对流层顶折叠产生^[79, 80]。因此，切断低压所在的区域是平流层、对流层混合的活跃区，对STE有着很大的贡献。切断低压所包含的空气通常来自于高纬度地区，并且中纬度切断低压的存在往往会引起极高PV值的分布区向低纬地区移动，正的PV距平实际上包含了闭合的平流层空气，因此切断低压所在的区域对流层顶高度比周围要低，它所包含的空气温度通常也比周围空气的低。低压中的冷空气通过增强层结不稳定性可以诱发深对流的生成，特别是在夏季和海洋上空，深对流过程中积雨云的云砧可以穿越对流层顶，使平流层中富含臭氧的空气进入对流层上层，这一结论从理论到观测都得到了很好的验证^[81, 82]。

4.3 热带地区的STE过程

热带地区平流层与对流层之间的物质交换包括了平流层空气和其他微量成分的向下输送，还包括对流层水汽、气溶胶、冰云粒子以及对臭氧光化学反应起重要作用的微量气体的向上输送，进而通过辐射、化学以及动力过程的相互作用对平流层和对流层的天气、气候产生影响。受Hadley环流在热带地区上升支的影响，热带对流层空气向上输送，穿越对流层顶进入平流层，这是热带空气进入平流层的主要方式^[76]；

热带积云对流穿越对流层顶把空气直接送入平流层是热带地区STE的另一种过程；此外，湍流混合和重力波的破碎是STE的又一种物理过程^[83]。早期的研究指出西太平洋的深对流能将空气从边界层输送到对流层顶甚至以上区域，对流系统在热带对流层顶附近产生的毛卷云对进入平流层空气的脱水过程有重要的影响^[84]，尽管热带西太平洋地区的对流层顶温度比热带平均温度低，并且经常能观测到卷云，但这一区域的STE是净向下的通量^[85]。Holton等^[86]通过二维模式模拟研究提出水平输送使得在其他地区已经达到对流层顶的气团被输送到热带西太平洋区域。总的来说，在全球平均的角度上，热带STE是对流层物质向平流层的净向上输送，但是热带气旋的作用以及热带地区的对流活动产生的开尔文波的破碎导致的湍流活动，可以将平流层内的物质在热带地区向下输送到对流层，而副热带地区Rossby波的破碎也可以将平流层的空气直接输送到热带对流层上层^[87]。

QBO作为热带平流层大气的强信号，它在热带平流层和对流层的物质交换中扮演了重要的角色，它对大气中化学成分的空间分布具有显著的影响，进而通过化学—辐射—动力耦合相互作用影响平流层和对流层的大气过程。早在1982年Plumb等^[88]就指出与经向环流有关的经向输送同赤道纬向风的QBO有着密切的联系。之后Trepte等^[89]又发现气溶胶在热带下平流层向中纬度输送的机制依赖于赤道的纬向风位相，当QBO向西风位相变化时示踪物向高纬度输送更强。Carr等^[75]则用微波临边遥感探测出22hPa等压面上的水汽混合比与QBO指数引起的垂直速度异常有关。Liu等^[90]则应用最新的GOMOS资料发现不同QBO位相中剩余环流垂直速度的输送作用使热带地区的臭氧和 NO_2 也表现出准两年周期变化的特征，而 NO_3 则由于分布在平流层高层，因此主要受纬向风准半年振荡过程的影响。除了这些观测结果，Marco等^[91]用GCM模式进行了一系列的数值试验研究QBO对赤道平流层低层的温度、垂直输送及比湿的影响，指出QBO的温度信号会改变向上输送的空气中的比湿，且QBO的次级环流会改变向上输送的速率。但由于以往的大气环流模式大多不包括完整的平流层和大气化学过程，因此对发生在平流层内的化学—辐射—动力过程的反馈无法进行详细的研究。近年来随着中层大气模式的发展、卫星观测资料的丰富，这方面的研究越来越受到重视，并取得了不小的进步。

此外，最新的研究表明，亚洲季风环流在平流层—对流层物质交换中也有着非常重要的作用，亚洲

季风区是对流层向平流层输送的一个重要通道, 对流层的水汽、化学成分等都可以通过这个通道进入下平流层, 从而影响平流层中的化学和辐射平衡^[92], Randel等^[93]的研究发现亚洲季风环流对STE的贡献比平流层B-D环流的贡献还大。

5 中层大气模式的发展及应用

5.1 中层大气模式的发展现状

中层大气的科学问题中包含了复杂的大气动力、热力、化学和微物理过程, 研究它们之间的相互作用和反馈仅靠有限的中层大气观测资料是远远不够的, 无法对其进行全面、深入的理解和认识, 需要借助合适且完备的中层大气模式进行模拟分析和诊断。在中层大气模式发展的初期, 受到计算机条件的约束和对中层大气基本过程认识的限制, 通常使用的是比较简单的机制型大气动力模式, 这类模式设计简单、计算省时, 有其独特的优点, 但局限性也非常明显, 首先, 机制型模式中不涉及平流层和对流层的相互作用, 只包含了简单的平流层过程; 其次, 模式中只描述一些简单的物理、化学过程, 对于不同物理过程相互之间, 以及与大气动力、化学过程的相互作用, 模式不能进行真实的反映和再现。

要进行中层大气中动力、化学和物理等过程之间相互作用的研究, 理想的模式是基于大气环流模式的框架下耦合了中层大气全过程的完备的大气模式, 这类模式对描述行星大气运动的原始方程组进行计算, 其中包括了各类大气过程, 如化学过程、辐射过程、对流和云的物理过程, 甚至大气行星边界层内的物理过程等。但是这一类中层大气模式由于设计复杂、计算量大, 受到了计算机发展水平很大的制约, 同时也很大地依赖于现有大气环流模式的性能和水平, 因此发展速度相对缓慢。随着计算机计算能力的不断提高, 在过去的几十年内一系列的二维和三维的基于大气环流模式的中层大气模式得以发展^[94, 95], 这些模式大多是模拟了平流层中的动力和化学过程, 少数的包括了热层中的大气过程。尽管中层大气模式在近些年中得到了迅速的发展, 但在模拟中层大气中的动力、化学过程时仍然存在着显著的差异和很多的不确定性^[96]。表1给出了一些不同研究机构开发的三维大气化学—气候模式的基本框架以及模式中相关的背景信息, 从中可以看出这些模式除了水平和垂直的分辨率存在着显著的差异, 模式层顶的高度也各不相同, 最高的可以达到 10^{-6} hPa, 而最低的只能延伸到平流层的高层10hPa。这些现有的含有平流层化学过程的中层大气模式各自都存在着一些缺点, 有的不能很好模

拟出南极上空的臭氧空洞和平流层痕量气体的空间分布、时间演变特征, 有的不能模拟出平流层赤道上空纬向风的准两年振荡和极地平流层的爆发性增温过程, 一部分模式甚至不能合理地模拟出平流层上层以上大气层的温度分布。

图5给出了一组最新的大气化学—气候模式模拟的气候平均(1980—1999年)温度在南北半球高纬地区相对于ERA-40和NCEP再分析资料的偏差, 从中可以看出温度偏差在垂直方向上的分布在不同高度有着不同的变化特征, 从对流层高层到平流层中低层模式的结果相互差异不大, 并且和再分析资料的结果相差也只有3~4K; 但到了中、高层大气, 模拟结果相互之间以及和NCEP资料的偏差随着高度的增加越来越大。不同的中层大气模式模拟结果之间的差异除了与模式的数值方案设计、模式的分辨率以及模式顶高度的选取有关外, 最主要的原因是模式对于中层大气中各种物理和化学过程处理的不够完善。更加值得注意的是一些模式中虽然包括了平流层中的大气化学过程, 但这些化学过程并没有完全和大气环流模式实现双向的耦合, 因此不能很好地再现中层大气内辐射—动力—化学过程的相互反馈和作用。

5.2 中层大气模式的主要应用

经过近十几年的快速发展, 中层大气模式虽然仍存在不足, 但它已经受到了越来越多大气科学工作者的重视, 并且在中层大气研究领域得到了较广泛的应用。早期受到观测资料缺乏、理论依据不完善的限制, 对中层大气自身变化特征和扰动规律的认识还不够具体、深入, 中层大气模式首先可以用来从事这一方面的工作。到目前为止, 对于“平流层大气的扰动是由哪些大气过程驱动”这一问题仍然没有完全理解, 平流层大气内的赤道纬向风准两年振荡和准半年振荡(SAO)、平流层顶附近的两天波扰动以及冬季极地平流层的爆发性增温等一些突出的物理现象的内在机制、变率及其对整个大气环流的影响还不是非常清楚, 可以结合越来越丰富的气象再分析资料、卫星观测数据等, 应用模式对这些问题进行深入、详细的探讨。现在已经有一些工作应用中层大气模式研究了赤道海温异常(ENSO)对北半球冬季平流层中高纬地区环流的影响^[28, 30, 34]; Tian等^[98]也应用中层大气模式较好地模拟出赤道平流层纬向风的准两年振荡和准半年振荡。

中层大气模式另一个重要的作用是模拟研究大气中的痕量化学物质和气溶胶粒子的分布及传输特征, 其中对平流层中痕量化学物质的模拟已经取得了很好

的进展,图6给出了一组大气化学—气候模式模拟得到的在不同纬度地区纬向平均的臭氧混合比气候态分布及其同HALOE卫星观测结果的比较。可以看出在热带平流层低层,大部分的模式模拟结果都和观测事实接近(13个模式中有9个符合),与卫星观测到的平均值相差1ppmv(1ppmv=10⁻⁶)左右;而在平流层的高层只有4个模式的模拟结果和卫星观测相差不到1ppmv,在热带区域,模式中重力波的参数化方案非常重要,模式中的动力过程对臭氧等痕量气体的分布影响很大。在南、北半球的中高纬地区大部分的化学—气候模式也都可以较好地模拟出臭氧的垂直分布特征,有利于进一步认识卫星观测缺测区域臭氧的分布情况。此外,这些大气化学—气候模式还能够很好的模拟出甲烷、水汽等温室气体,以及氯化氢等对平

流层臭氧有直接影响的化学物质的分布特征^[96]。

近些年来,对流层以上大气已经逐渐成为天气预报和气候预测模式的一部分,但是平流层大气通过怎样的方式和机制影响对流层的天气、气候仍然存在很多疑问。一些研究表明对流和平流层的联系主要集中在季节尺度、年际尺度和十年以上的时间尺度上。Thompson等^[99]应用中层大气模式研究发现在平流层的低层长期存在的一个热力异常会增加对流层中的风速;Chanin^[100]则通过研究近45年来热层到平流层大气的热力结构得到了确信的证据表明太阳11a的周期活动会对中层大气,甚至对流层大气产生显著的影响。因此,中层大气特别是平流层大气的变化和变率对于季节内、年际尺度的天气预报以及气候预测具有非常重要的指示意义。要深入全面地研究平流层—对流层

表1 现有的大气化学—气候模式的基本框架和背景信息

模式	研究运用者	大气环流模式	模式区域/分辨率	辐射反馈	平流方案	O—GWD	NonO—GWD	参考文献
AMTRAC	J. Austin, R. J. Wilson	AM2 (Anderson 等, 2004)	2°×2.5°, 48层, 0.0017hPa	O ₃ , H ₂ O	Finite-volume (Lin, 2004)	Sterm等, 1988	Alexander等, 1999	Austin等, 2006; Austin等, 2006
CCSRNIES	H. Akiyoshi, T. Nagashina, M. Yoshiki	CCSRNIES (Numaguti, 1993)	2.8°×2.8° (T42), 34层, 0.01hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, CFCs	Spectral in the hori- zontal, finite difference for the vertical	McFarlane, 1987	Hines, 1997	Akiyoshi等, 2004; Kurokawa等, 2005
CMAM	J. McConnel, N. McFarlane, D. Plummer, J. Scinocca, T. Shepherd	CCCma AGCM3 (Scinocca 等, 2004)	3.75°×3.75° (T32), 71层, 0.0006hPa	O ₃ , H ₂ O	Spectral in the hori- zontal, finite elements in the vertical	Sinocca等, 2000	Sinocca, 2003	Beagley等, 1997; de Grandpre等, 2000
E39C	M. Dameris, V. Eyring, P. Grewe, M. Ponater	ECHAM4 (Roeckner等, 1996)	3.75°×3.75° (T30), 39层, 10hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, CFCs	Semi-Lagrange (Williamson等, 1994)	Miller等, 1989	none	Dameris等, 2005; 2006
GEOSCCM	A. Douglass, P. Newman, S. Pawson, R. Stolarski	GEOS-4 (Bloom等, 2005)	2°×2.5° 55层, 0.01hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, CFC-11, CFC-12	Finite-volume (Lin, 2004)	Kiehl等, 1998	Adapted from Garcia 等	Bloom等, 2005; Stolarski等, 2006
LMDZrepro	S. Bekki, F. Lott, F. Lefevre, M. Marchand	LMDz4 (Lott等, 2005)	2.5°×3.75° 50层, 0.07hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, CFC-11, CFC-12	Finite-volume (Hourdin等, 2004)	Lott等, 1997	Hines, 1997	Chemistry part: Lefevre等, 1994
MAECHA M4CHEM	C. Bruhl, M. Giorgetta, E. Manzini, B. Steil	MAECHAM4 (Manzini等, 1997)	3.75°×3.75° (T30), 39层, 0.01hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄	Flux-form semi- Lagrange SPITFIRE (Steil等, 2003)	McFarlane, 1987	Hines, 1997	Manzini等, 2003; Steil等, 2003
MRI	K. Shibata, M. Deushi	MRI/JMA98 (Shibata等, 1999)	2.8°×2.8° (T42), 68层, 0.01hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄	hybrid semi- Lagrange (Shibata等, 2005)	Iwasaki等, 1989, only short GW	Hines, 1997	Shibata, 2005; Shibata等, 2005
SOCOL	E. Rozanov, M. Schraner	MAECHAM4 (Manzini等, 1997)	3.75°×3.75° (T30), 39层, 0.01hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, CFCs	Hybrid advection scheme (Zubov等, 1999)	McFarlane, 1987	Hines, 1997	Egorova等, 2005; Rozanov等 2005
ULAQ	E. Mancini, G. Pitari	ULAQ-GCM (Pitari等, 1992)	10°×22.5° 26层, 0.04hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, CFCs, HCFCs	Flux-form Eulerian Fully explicit scheme (Pitari等, 2002)		Rayleigh friction, Smith等, 1985	Pitari等, 2002
UMETRAC	N. Butchart, H. Struthers	UM (Pope等, 2000)	2.5°×3.75° 68层, 0.01hPa	O ₃ , H ₂ O	Quintic-mono (Gregory等, 2002)	Gregory等, 1998	Warner等, 1996	Austin, 2002; Struthers等, 2004
UMSLIM- CAT	M. Chipper- field, Tian	UM (Pope等, 2000)	2.5°×3.75° 68层, 0.01hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O	Quintic-mono (Gregory等, 2002)	Gregory等, 1998	Warner等, 1996	Tian, 2005
WACCM (V. 3)	B. Boville, R. Garcia, A. Gettelman D. Kinnison, D. Marsh, F. Sassi	CAM (Collins等, 2004)	4°×5°, 66层, 4.5×10 ⁻⁴ hPa	O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, CFC-11, CFC-12, NO, CO ₂ , O ₂	Finite-volume (Lin, 2004)	McFarlane, 1987	Lindzen, 1981; Holton, 1982; Garcia, 1985	Garcia等, 2006

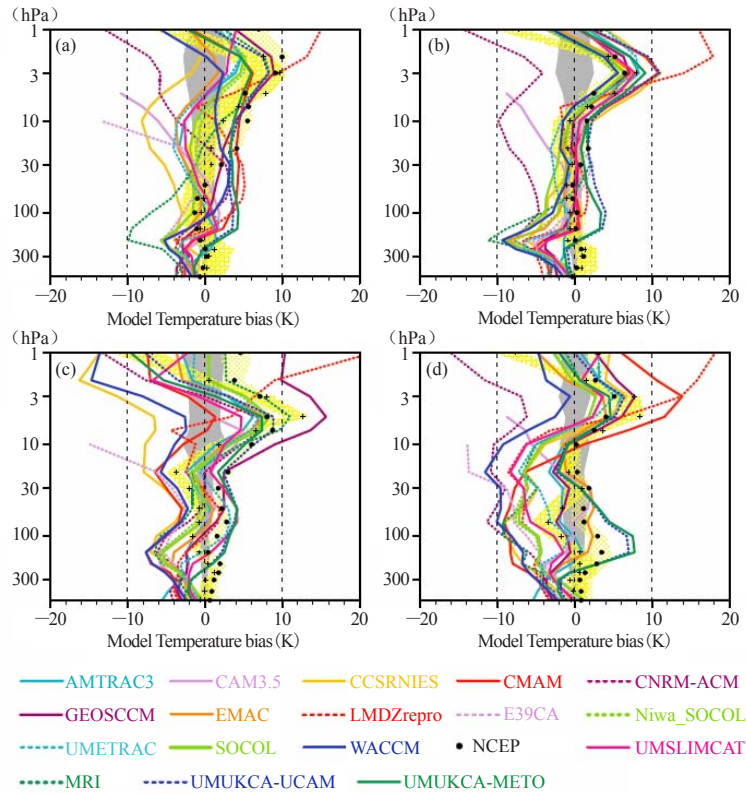


图5 不同大气化学—气候模式模拟得到的气候平均 (1980—1999年) 温度在南北半球高纬地区相对于ERA-40和NCEP再分析资料的偏差^[97]

(a) DJF, 90°—60°N; (b) MAM, 90°—60°N; (c) JJA, 60°—90°S; (d) SON, 60°—90°S

耦合大气系统的变化规律和相互作用, 提高中长期预报和气候预测的能力, 一个包括动力过程、辐射过程、大气化学甚至微物理过程的全面的中层大气环流模式是必不可少的。另外值得指出的是, 近些年来, 用于数值天气预报的大气环流模式也逐渐将模式层顶高度向上扩展到中层大气, 与此相对应的是应用中层大气模式进行资

料同化的工作也成为一个新的研究热点。

5.3 发展中层大气模式的主要工作

关于中层大气模式未来的发展还有很多工作需要做, 和欧美发达国家相比我国有关中层大气模式的研究工作起步的较晚, 虽然也取得了一些可喜的进展^[101], 但仍存在着一定的差距。近些年来, WMO的

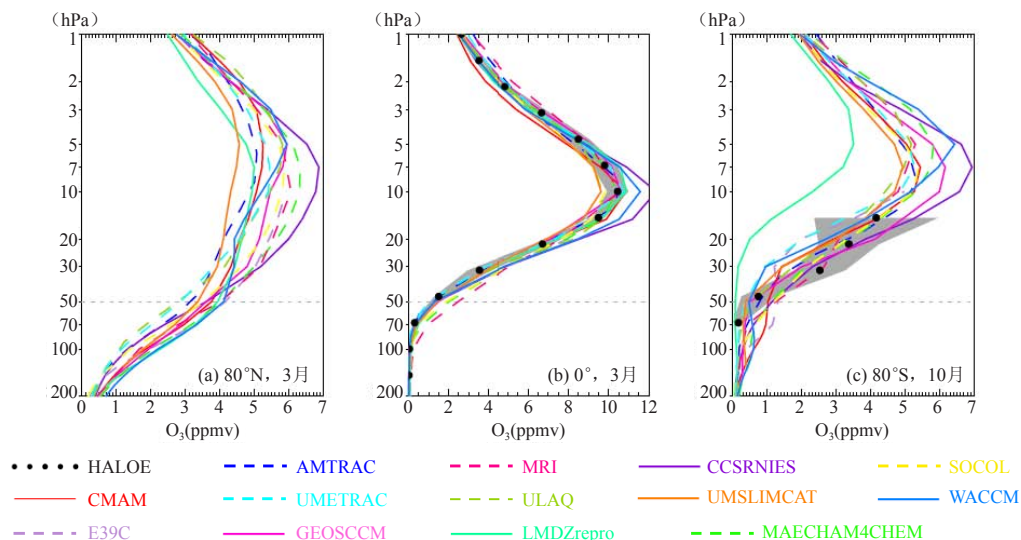


图6 大气化学—气候模式模拟得到的不同纬度纬向平均的臭氧混合比气候态分布及其同HALOE卫星观测结果的比较^[96]

CCMVAL^[96]、GRIPS^[102]计划, WCRP建立的SPARC核心计划, 以及IPCC的AR4、AR5模拟计划的实施, 让我们对中层大气模式的现状有了更加全面、完整的认识, 也进一步明确了它存在的不足和未来的发展方向。

发展中层大气模式首先要做的工作就是进一步完善现有模式中的动力学框架, 即基本的大气环流模式。目前的中层大气模式大多是在对流层大气环流模式的基础上向上延伸至平流层、中间层, 虽然对流层的大气环流模式已经发展得比较成熟, 但这部分工作无论是技术上还是理论上都是一件十分具有挑战性的事。Butchart等^[97]详细比较了CCMVAL计划中各个中层大气模式对平流层气候及环流变化的模拟结果, 这些包含了中层大气变化过程的大气环流模式大都能较好地模拟出大气一些主要的平均特征, 并且对21世纪平流层中温室气体的增加和臭氧的恢复给中层大气带来的影响有很好的模拟再现能力。但是模式的模拟结果在一些细节上和实际观测相比还存在一些较明显的差异, 如平流层急流区的位置、强度以及对流层顶的温度和高度等。

重力波是中高层大气中最主要的波动形式之一, 因此发展中层大气模式的另一个重要工作就是进一步完善模式中重力波的参数化方案, 这一工作对提高模式对中层大气动力过程的模拟性能至关重要。之前的研究工作已经证明重力波在所有高度上对大气环流都有非常重要的影响, 如何在模式中对重力波进行参数化是一件非常困难的工作, 特别是这些参数化方案中有一些重要的参数目前还没有找到很好的物理约束条件, 因此这些参数会随着模式中空间分辨率的改变而调整, 带来很多的不确定性。改善中层大气模式中的重力波参数化方案需要大量的观测资料进行支持。

同对流层大气相比, 大气化学过程在中层大气特别是平流层大气中是不能被忽视的, 进一步完善中层大气模式中的化学过程, 并实现化学与大气环流模式的双向耦合是发展中层大气模式的又一重要工作, 也是未来大气模式发展的方向, 在今后的研究中需要重点关注。最后, 中层大气中的动力学和一些物理过程, 尤其是辐射过程与以往以对流层为主的大气环流模式中的描述相比在某种程度上是存在一些差异的。因此改善中层大气模式中的辐射传输方案也是一个非常重要的工作, 目前用于中层大气的辐射传输方案的光谱分辨率(特别是紫外光谱区)通常较低, 所考虑的吸收气体的种类也不够完备, 从而导致了模式模拟的全球平均温度存在一定的偏差, 并且如何更好地表征大气臭氧层和温室气体增加对长波辐射的作用是改

进气候变化模拟的一个可能途径, 它们可以作为对流层大气和地球表层气候变化的上边界条件考虑。另外, 中层大气中的火山气溶胶作用、云和气溶胶粒子的微物理过程等都还没有得到很好的处理, 都需要开展进一步的研究工作。

6 结语与展望

平流层和对流层大气的相互作用是当前大气科学领域中的一个前沿和热点问题, 本文主要介绍了其中几个典型的并且已经有一定研究基础的方面。首先讨论了会引起平流层环流扰动的一些外部作用过程, 对流层生成并向上传播的大气波动、海表面温度的异常(ENSO)和太阳活动引起的辐射变化都会造成平流层环流结构的改变。当平流层环流出现异常后, 会有平流层异常信号从上往下传播进入对流层, 平流层中的扰动可以通过大气波动、北极涛动等影响低层的对流层大气。在平流层—对流层大气进行动力耦合的同时, 上、下层大气之间会有明显的物质交换(STE)过程, 而平流层—对流层大气之间的物质混合和交换过程是控制自然和人为排放的化学痕量物质对大气成分影响的重要过程。这里主要介绍了发生在不同纬度的, 不同尺度和不同形式的STE过程, 而定量分析发生在不同区域的STE过程是当前中层大气研究中的难点和重点问题之一。此外, 还总结了中层大气模式的发展现状和应用前景, 目前比较完备的基于大气环流模式的中层大气模式还不多, 同时包含了对流层、平流层、中间层和热层的模式则更少, 我们要在现有模式的基础上, 充分利用模拟性能较好地对流层大气环流模块、中层大气环流模块、化学模块等进行耦合和衔接构建更加完善的中层大气模式。进一步发展包含中层大气过程的全大气环流模式不仅对深入认识平流层—对流层耦合大气系统有很大的帮助, 对发展和提高天气、气候预测水平也有重要的意义。

越来越多的研究表明平流层和对流层的动力耦合是非常密切的, 平流层并非仅仅是被动的接受对流层变化的影响, 平流层中强的环流扰动可以对对流层中的天气、气候产生影响, 平流层异常的信号可以作为对流层环流变化的指示因子。然而由于这方面的工作刚起步不久, 还存在一些问题有待解决, 特别是平流层异常影响对流层环流的物理机制问题, 还需要进一步发展观测分析、理论研究和模式模拟的工作。此外, 多大强度的平流层异常能够将对流层环流产生重要影响, 平流层中的异常信号如何作为预报对流层天气系统的先兆指标, 怎样将平流层异常信号的统计预报指标与数值预报相结合来延长天气预报的时

效, 这些问题都还需要更详细和定量的研究。另一方面, STE的研究工作这里只做了简单的介绍, 在今后的工作中需要发展更好的定量分析STE交换量的诊断框架, 可以对观测资料进行解释并与模式结果进行比较; 另外我们可以将我国所处的东亚地区的STE过程作为研究重点, 结合青藏高原为代表的强地形作用, 深入分析研究该区域不同季节、不同尺度、不同形式的平流层—对流层物质交换过程, 对全球的STE研究也具有一定的帮助。在气候变化的背景下进一步研究平流层—对流层耦合系统及其相互作用的发展、变化特征, 对深入认识全球气候系统、改善气候预测途径与方法有着重要的科学意义和现实意义。

参考文献

- [1] Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. Middle Atmospheric Dynamics. Int Geophys Ser, 40: 489. New York: Elsevier, 1987.
- [2] Charney J G, Drazin P G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. J Geophys Res, 1961, 66: 83-109.
- [3] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 2005.
- [4] Manney G, Kruger K, Sabutis J, et al. The remarkable 2003—2004 winter and other recent warm winters in the Arctic stratosphere since the late 1990s. J Geophys Res, 2005, 110: D04107, doi: 10.1029/2004JD005367.
- [5] 陆春晖, 刘毅, 陈月娟, 等. 2003—2004年冬季平流层爆发性增温动力诊断分析. 大气科学, 2009, 33(4): 726-736.
- [6] 刘毅, 陆春晖, 管兆勇, 等. 2003—2004年冬季北半球平流层极涡在等熵位涡坐标下的动力分析. 气象学报, 2010, 68(3): 376-386.
- [7] Eliassen A, Palm E. On the transfer of energy in stationary mountains waves. Geophys Publikasjoner, 1961, 22: 1-23.
- [8] Matsuno T. Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere. J Atmos Sci, 1971, 27(6): 871-883.
- [9] Holton J R. A semi-spectral model for wave-mean flow interactions in the stratosphere: application to sudden warming. J Atmos Sci, 1976, 33: 1639-1649.
- [10] Quiroz R S. The association of stratospheric warming with tropospheric blocking. J Geophys Res, 1986, 91(D4): 5277-5285.
- [11] Pierce R B, Fairlie T D. Observational evidences of preferred flow regimes in the Northern Hemisphere winter stratosphere. J Atmos Sci, 1993, 50(13): 1936-1949.
- [12] 陈文, 黄荣辉. 北半球冬季准定常行星波的三维传播及其年际变化. 大气科学, 2005, 29(1): 137-146.
- [13] Limpasuvan V, Thompson D W, Hartmann D L. The life cycle of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warming. J Clim, 2004, 17(13): 2584-2596.
- [14] Limpasuvan V, Hartmann D L, Thompson D W. Stratosphere-troposphere evolution during polar vortex intensification. J Geophys Res, 2005, 110: D24101.
- [15] Reed R J, Campbell W J, Rasmussen L A, et al. Evidence of a downward propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere. J Geophys Res, 1961, 66: 813-818.
- [16] Ebdon R A. Notes on the wind flow at 50 mb in tropical and subtropical regions in January 1957 and in 1958. Q J R Meteorol Soc, 1960, 86: 540-542.
- [17] Angell J K, Korshover J. Quasi-biennial variations in temperature, total ozone, and tropopause height. J Atmos Sci, 1964, 21: 479-492.
- [18] Belmont A D, Dartt D G. Variation with longitude of the Quasi-Biennial Oscillation. Mon Wea Rev, 1968, 96: 767-777.
- [19] Lindzen R S, Holton J R. A theory of the quasi-biennial oscillation. J Atmos Sci, 1968, 25: 1095-1107.
- [20] Holton J R, Lindzen R S. An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere. J Atmos Sci, 1972, 29: 1076-1080.
- [21] Lindzen R S. On the development of the theory of the QBO. Bull. Am Meteorol Soc, 1987, 68: 329-337.
- [22] Dunkerton T J. Nonlinear propagation of zonal winds in an atmosphere with Newtonian cooling and equatorial wave driving. J Atmos Sci, 1991, 48: 236-263.
- [23] Randel W J, Wu F, Swinbank R, et al. Global QBO circulation derived from UKMO stratospheric analyses. J Atmos Sci, 1999, 56: 457-474.
- [24] Holton J R, Tan H-C. The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 hPa. J Atmos Sci, 1980, 37: 2200-2208.
- [25] Labitzke K, Van Loon H. The Southern Oscillation Part IX: The influence of volcanic eruptions on the Southern Oscillation in the stratosphere. J Clim, 1989, 2(10): 1223-1226.
- [26] van Loon H, Labitzke K. The Southern Oscillation Part V: The anomalies in the lower stratosphere of the Northern-Hemisphere in winter and a comparison with the Quasi-Biennial Oscillation. Mon Wea Rev, 1987, 115(2): 357-369.
- [27] Hamilton K. An examination of the observed Southern Oscillation effects in the Northern Hemisphere stratosphere. J Atmos Sci, 1993, 50(20): 3468-3473.
- [28] Sassi F, Kinnison D, Boville B, et al. The effect of ENSO on the dynamical thermal and chemical structure of the middle atmosphere. J Geophys Res, 2004, 109(D17), doi: 10.1029/2003jd004434.
- [29] Taguchi M, Hartmann D L. Increased occurrence of stratospheric sudden warming during El Niño as simulated by WACCM. J Clim, 2006, 19(3): 324-332.
- [30] Garcia-Herrera R, Calvo N, Garcia R R, et al. Propagation of ENSO temperature signals into the middle atmosphere: A comparison of two general circulation models and ERA-40 reanalysis data. J Geophys Res, 2006, 111: D06101, doi: 10.1029/2005JD006061.
- [31] Camp C D, Tung K K. Stratospheric polar warming by ENSO in winter: A statistical study. Geophys Res Lett, 2007, 34: L04809, doi: 10.1029/2006GL028521.
- [32] Camp C D, Tung K K. The influence of the solar cycle and QBO on the late-winter stratosphere polar vortex. J Atmos Sci, 2007, 64: 1267-1283.
- [33] 陆春晖. 平流层环流的变化特征及其对ENSO海温异常和太阳周期活动的响应. 北京: 中国科学院大气物理研究所博士论文, 2011.
- [34] Calvo N, Garcia R R, Randel W J, et al. Dynamical mechanism for the increase in tropical upwelling in the lowermost tropical stratosphere during warm ENSO events. J Atmos Sci, 2010, 67: 2331-2340.
- [35] Lu C H, Liu Y, Liu C X. Middle atmosphere response to ENSO events in Northern Hemisphere winter by the whole atmosphere community climate model. Atmosphere-Ocean, 2011, 49(2): 95-111.
- [36] An S I, Ham Y G, Kug J S, et al. El Niño/La Niña asymmetry in the Coupled Model Inter-comparison Project Simulations. J Clim, 2005, 18: 2617-2627.
- [37] Chandra S, McPeters R D. The solar cycle variation of ozone in the stratosphere inferred from Nimbus 7 and NOAA 11 satellites. J Geophys Res, 1994, 99: 20665-20671.
- [38] Labitzke K. Sunspots, the QBO and the stratospheric temperatures in the north polar regions. Geophys Res Lett, 1987, 14: 535-537.
- [39] Labitzke K. The global signal of the 11-year sunspot cycle in the stratosphere: difference between solar maxima and minima. Meteor Z, 2001, 10: 83-90.
- [40] Labitzke K. The global signal of the 11-year sunspot cycle in the atmosphere: when do we need the QBO. Meteor Z, 2003, 12: 209-216.
- [41] Labitzke K. On the solar cycle-QBO relationship: A summary. J Atmos Sol Terr Phys, 2005, 67: 45-54.
- [42] Salby M, Callaghan P. Evidence of the solar cycle in the general circulation of the stratosphere. J Clim, 2004, 17: 34-36.

- [43] 李崇银, 翁衡毅, 高晓清, 等. 全球变暖的另一可能原因初探. 大气科学, 2003, 27(5): 789-797.
- [44] Lu H, Jarvis M J, Graf H-F, et al. Atmospheric temperature responses to solar irradiance and geomagnetic activity. *J Geophys Res*, 2007, 112: D11109, doi: 10.1029/2006JD007864.
- [45] Lu H, Gray L J, Baldwin M P, et al. Life cycle of the QBO-modulated 11-year solar cycle signals in the Northern Hemispheric winter. *Q J R Meteorol Soc*, 2009, 135: 1030-1043.
- [46] Kim Y J, Eckermann S D, Chun H Y. An overview of the past, present and future gravity wave drag parameterization for numerical climate and weather prediction models. *Atmosphere Ocean*, 2003, 41: 65-98.
- [47] Chen Z, Lu D. Numerical simulation on stratospheric gravity waves above mid-latitude deep convection. *Adv Space Res*, 2001, 27(10): 1659-1666.
- [48] Huang R, Chen J. Geotropic adaptation processes and excitement of inertia-gravity waves in the stratospheric spherical atmosphere. *Chinese J Atmos Sci*, 2002, 26(3): 289-303.
- [49] Baldwin M P, Gray L J, Dunkerton T J, et al. The Quasi-Biennial Oscillation. *Rev Geophys*, 39: 2001, 179-229.
- [50] Quiroz R S. Tropospheric-stratospheric polar vortex breakdown of January 1977. *Geophys Res Lett*, 1977, 4: 151-154.
- [51] Thompson D W, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 1297-1300.
- [52] Wallace J M. North Atlantic Oscillation/Northern Hemisphere annular mode, one phenomenon, two paradigms. *Royal Meteorological Society*, 2000, 126: 791-805.
- [53] Baldwin M P, Dunkerton T J. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J Geophys Res*, 1999, 104: 30937230946.
- [54] Baldwin M P, Dunkerton T J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, 2001, 294: 581-584.
- [55] Baldwin M P, Thompson D J, et al. Weather from the stratosphere. *Science*, 2003, 301: 317-318.
- [56] Thompson D J, Wallace J W. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode. *Science*, 2001, 293: 85-89.
- [57] Wang L, Chen W. Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009. *Geophys Res Lett*, 2010, 37(9): L09707.
- [58] Thompson D J, Baldwin M P, Wallace J M. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. *J Clim*, 2002, 15: 1421-1428.
- [59] 陈月娟, 周任君, 邓淑梅, 等. 2008年雪灾同平流层环流异常的关系. 中国科学技术大学学报, 2009, (1): 15-22.
- [60] 刘毅, 赵燕华, 管兆勇. 平流层环流异常对2008年1月雪灾过程的影响. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 548-555.
- [61] 陈文, 康丽华. 北半球涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用. 大气科学, 2006, 30(5): 863-870.
- [62] Deng S M, Chen Y J, Luo T, et al. The possible influence of Stratospheric sudden warming on East Asian weather. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25(5): 841-846.
- [63] Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D J, et al. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts. *Science*, 2003, 301: 636-640.
- [64] Kushner P, Polvani L. Stratosphere-troposphere coupling in a relatively simple AGCM: The role of eddies. *J Clim*, 2004, 17: 629-639.
- [65] Hu Y, Tung K K. Inter-annual and decadal variations of planetary wave activity, stratospheric cooling, and Northern Hemisphere annular mode. *J Clim*, 2002, 15: 1659-1673.
- [66] Hu Y, Tung K K. Possible ozone induced long term changes in planetary wave activity in late winter. *J Clim*, 2003, 16: 3027-3038.
- [67] Chen W, Takahashi M, Graf H F. Inter-annual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST. *J Geophys Res*, 2003, 108, doi: 10.1029/2003JD003834.
- [68] Polvani L M, Waugh D W. Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes. *J Clim*, 2004, 15: 3548-3553.
- [69] Black R X, McDaniel B A. Diagnostic case studies of the northern annular mode. *J Clim*, 2004, 17: 3990-4004.
- [70] 杨健, 吕达仁. 平流层-对流层交换研究进展. 地球科学进展, 2003, 18(3): 380-385.
- [71] 陈洪滨, 卞建春, 吕达仁. 上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望. 大气科学, 2006, 30(5): 813-820.
- [72] Brewer A M. Evidence for a world circulation provided by the measurement of helium and water vapor distribution in the stratosphere. *Q J R Meteorol Soc*, 1949, 75: 351-363.
- [73] Dobson A E, Hintsa E J, Weinstock E M, et al. Origin and distribution of polyatomic molecules in the atmosphere. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1956, A236: 187-193.
- [74] Holton J R. On the global exchange of mass between the stratosphere and troposphere. *J Atmos Sci*, 1990, 47: 392-395.
- [75] Carr E S, Harwood R S, Mote P W, et al. Tropical stratospheric water vapor measured by the microwave limb sounder (MLS). *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 691-694.
- [76] Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev Geophys*, 1995, 33: 403-439.
- [77] Mohanakumar K. Stratosphere Troposphere Interaction: An Introduction. Springer, 2008.
- [78] Hoskins B J. The mathematical theory of front genesis. *Annual of Reviews Fluid Mechanics*, 1982, 14:131-151.
- [79] Price J D, Vaughan G. On the potential for stratosphere-troposphere exchange in cut-off low systems. *Q J R Meteorol Soc*, 1993, 119: 343-365.
- [80] Wirth V. Diabatic heating in an axisymmetric cut-off cyclone and related stratosphere troposphere exchange. *Q J R Meteorol Soc*, 1995, 121: 127-147.
- [81] Bamber D J. Vertical profiles of tropospheric gases: Chemical consequences of stratospheric intrusions. *Atmospheric Environment*, 1984, 18: 1759-1766.
- [82] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Q J R Meteorol Soc*, 1985, 3: 887-946.
- [83] Rao T N, Radhakrishna B, Mohan T, et al. The exchange across the tropical tropopause in overshooting convective cores. *Ann Geophys*, 2010, 28(1): 113-122.
- [84] Kley D, Crutzen P J, Smith G J, et al. Observations of near-zero ozone concentrations over the convective Pacific: Effects on air chemistry. *Science*, 1996, 274(5285): 230-233.
- [85] Gettelman A, Holton J R. Simulations of water vapor in the lower stratosphere and upper troposphere. *J Geophys Res*, 2000, 105(D7): 9003-9023.
- [86] Holton J R, Gettelman A. Horizontal transport and the dehydration of the stratosphere. *Geophys Res Lett*, 2001, 14: 2799-2802.
- [87] Scott R K, Cammas J P, et al. Stratospheric fulmination into the upper tropical troposphere. *J Geophys Res*, 2001, 106(D11): 11835-11848.
- [88] Plumb R A, Bell R C. A model of the quasi-biennial oscillation on an equatorial beta-plane. *Q J R Meteorol Soc*, 1982, 108: 335-352.
- [89] Trepte C R, Hitchman M H. Tropical stratospheric circulation deduced from satellite aerosol data. *Nature*, 1992, 355: 626-628.
- [90] Liu Y., Lu C H, Wang Y, et al. The quasi-biennial and semi-annual oscillation features of tropical O₃, NO₂ and NO₃ revealed by GOMOS satellite observations for 2002-2008. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(18): 1921-1929.
- [91] Marco A G, Bengtsson L. Potential role of the Quasi-Biennial Oscillation in the stratosphere-troposphere exchange as found in water vapor in general circulation model experiments. *J Geophys Res*, 1999, 104: 6003-6019.
- [92] Randel W J, Park M. Deep convective influence on the Asian summer monsoon anticyclone and associated tracer variability observed with Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *J Geophys Res*, 2006, 111: D12314, doi: 10.1029/2005JD006490.
- [93] Randel W J, Park M, Emmons L, et al. Asian monsoon transport of pollution to the stratosphere. *Science*, 2010, 328(5978): 611-633.
- [94] Brasseur G, Hitchman M H, Walters S, et al. An interactive

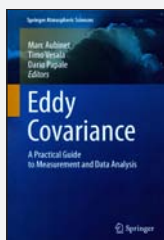
chemical dynamical radiative two-dimensional model of the middle atmosphere. J Geophys Res, 1990, 95: 5639-5655.

- [95] Summers M F, Siskind D E, et al. Seasonal variation of middle atmospheric CH₄ and H₂O with a new chemical dynamical model. J Geophys Res, 1997, 102: 3503-3526.
- [96] Eyring V., N. Butchart, D. W. Waugh, et al. Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past. J Geophys Res, 2006, 111: D22308, doi: 10.1029/2006JD007327.
- [97] Butchart N, Charlton-Perez A J, Cionni I, et al. Multi-model climate and variability of the stratosphere. J Geophys Res, 2011, 116: D05102, doi: 10.1029/2010JD014995.
- [98] Tian W, Chipperfield M P, Gray L J, et al. Quasi-Biennial Oscillation and tracer distributions in a coupled chemistry-climate model. J Geophys Res, 2006, 111: D20301, doi: 10.1029/2005JD006871.
- [99] Thompson D W J, Furtado J C, Shepherd T G, et al. On the tropospheric response to anomalous stratospheric wave drag and radiative heating. J Atmos Sci, 2006, 63: 2616-2629.
- [100] Chanin M L. Signature of the 11-year cycle in the upper atmosphere. Space Science Reviews, 2006, 125: 261-272.
- [101] 吕达仁, 王英玺. 中国中层大气研究的近期进展. 地球物理学报, 1994, 37: 72-84.
- [102] Pawson S, Kodera K, Hamilton K, et al. GCM-reality inter-comparison project for SPARC (GRIPS): Scientific issues and initial results. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81: 781-796.

新书架

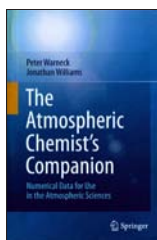
NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



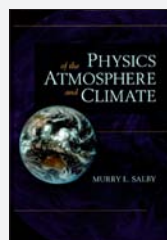
Eddy Covariance-A Practical Guide to Measurement and Data Analysis
《涡动协方差: 测量和数据分
析实用指南》

编著者: Marc Aubinet等
出版者: Springer
出版年: 2012



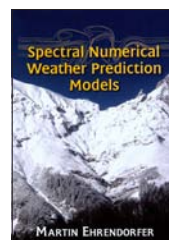
The Atmospheric Chemist's Companion-Numerical Data for Use in the Atmospheric Sciences
《大气化学家手册: 大气科学中的数值数据》

编著者: Peter Warneck等
出版者: Springer
出版年: 2012



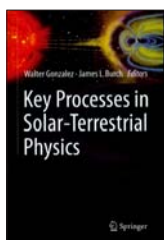
Physics of the Atmosphere and Climate
《大气与气候物理学》

编著者: Murry L. Salby
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012



Spectral Numerical Weather Prediction Models
《数值天气预报谱模式》

编著者: Martin Ehrendorfer
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012



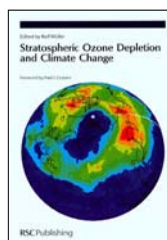
Key Processes in Solar-Terrestrial Physics
《日地物理学中的关键过程》

编著者: Walter Gonzalez 等
出版者: Springer
出版年: 2011



Mountain Weather Research and Forecasting-Recent Progress and Current Challenges
《山地天气研究和预报: 最新进展和当前面临的挑战》

编著者: Fotini Katopodes Chow等
出版者: Springer
出版年: 2012



Stratospheric Ozone Depletion and Climate Change
《平流层臭氧耗损与气候变化》

编著者: Rolf Müller
出版者: RSC Publishing
出版年: 2012



《台风业务和服务规定》
(第四次修订版)

编著者: 中国气象局
出版者: 气象出版社
出版年: 2012

夏季青藏高原对流层—平流层交换过程及其气候效应的若干问题

卞建春¹ 范秋君^{1, 2} 严仁嫦^{1, 2}

(1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室 (LAGEO), 北京 100029;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 亚洲是目前世界上经济发展最快的地区, 其所带来的区域气候环境问题以及对全球气候环境的可能影响成为当前科学界关注的一个重要课题。一些研究表明, 夏季亚洲季风区是边界层大气成分 (包括污染物) 进入全球平流层的一个重要通道, 其中青藏高原由于高大地形的作用而具有重要的地位。从以下几个方面介绍了研究进展及存在的问题: 夏季亚洲季风区上对流层/下平流层 (UTLS) 大气成分及对流层顶气溶胶层的分布特征、卷云及深对流活动特征、夏季南亚高压反气旋环流特征及其对大气成分分布的作用。指出南亚高压反气旋控制区不仅是对流层示踪物的高值区和平流层示踪物的低值区, 同时也是气溶胶和卷云覆盖率的大值区, 因而是全球比较特殊的地区, 从而可以进一步通过大气辐射、微物理、异相化学等过程对区域甚至全球气候环境产生重要影响。比较了亚洲季风区与北美季风区大气成分在UTLS区域分布的异同, 讨论了深对流快速输送和大尺度缓慢输送这两种不同尺度过程在大气成分分布的可能作用, 尤其对于不同大气成分输送作用的差异, 并讨论了南亚高压两种不同模态对UTLS区域大气成分分布的重要作用。最后提出了未来青藏高原对流层—平流层相互作用及其气候效应研究中需要关注的一些关键科学问题。

关键词: 平流层—对流层交换, 青藏高原, 亚洲夏季风, 南亚高压, 深对流, 大气化学

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.002

Summertime Stratosphere–Troposphere Exchange over the Tibetan Plateau and Its Climatic Impact

Bian Jianchun¹, Fan Qiujun^{1,2}, Yan Renchang^{1,2}

(1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Currently, Asia is the world's fastest growing economic region, which will lead to regional and even global climatic and environmental issues, and these issues are becoming an important topic of concern for the scientific community. Some studies indicate that the Asian summer monsoon region provides a key pathway for the boundary layer species transport into the global stratosphere, in which the Tibetan Plateau plays an important role due to its tall and huge terrain. In this review, a few key scientific aspects and related issues are discussed as follows: atmospheric composition distribution in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS), tropopause aerosol layer, cirrus and deep convection activity over the Asian summer monsoon region, and variation of South Asia high and its impact on UTLS species distribution. It is pointed out that the region controlled by the Asian summer monsoon anticyclone is special in the boreal summer for its enhanced tropospheric tracers, aerosol, and cirrus fraction, and enhanced stratospheric tracers, which will have an important impact on regional and even global climate and environment through atmospheric radiation, microphysical and out-of-phase chemical processes. Inter-comparison is conducted between the Asian summer monsoon and the North American summer monsoon on the distribution of various species in the UTLS region, and the respective transportation roles of deep convection activity and large-scale circulation are discussed in determining the distribution of atmospheric species, particularly the variance on different species. Finally, a few critical scientific topics are put forward for future investigation on the stratosphere-troposphere interaction over the Tibetan Plateau and its impact on climate and environment.

Keywords: stratosphere-troposphere exchange, Tibetan Plateau, Asian summer monsoon, South Asia high, deep convection, atmospheric chemistry

收稿日期: 2012年1月10日; 修回日期: 2012年6月11日

第一作者: 卞建春 (1969—), Email: bjc@mail.iap.ac.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (2010CB428602);

国家自然科学基金资助项目 (40830102, 41175040)

1 引言

夏季亚洲季风环流是边界层水汽和大气成分进入全球平流层的一个重要途径, 自然或人为污染物通过该通道进入平流层后, 通过大气化学、微物理、

辐射等过程对臭氧层和全球气候产生重要影响,这已经成为目前国际科学界关注的热点问题。卞建春等^[1]对亚洲夏季风是低层污染物进入全球平流层的重要途径做了比较全面的综述。文中指出,周秀骥等^[2]根据卫星观测资料发现夏季青藏高原上空一直维持臭氧总量低谷,后来一系列研究围绕这样一个观点,即夏季青藏高原是对流层低空物质向平流层输送的一个重要渠道^[3]。但是,后来的分析研究表明,夏季青藏高原臭氧低谷现象的形成有两个方面的原因:一是青藏高原高大地形使得高原上空空气柱比平原地区少45%左右,相应地臭氧总量少约20DU;二是整个南亚高压控制区的上对流层/下平流层(UTLS)臭氧浓度低于同纬度其他地区^[4],同样造成臭氧总量偏少约20DU。因此,目前出现了一个新观点,即夏季整个亚洲季风区是对流层污染物进入全球平流层的一个重要通道^[5],而不仅仅局限于青藏高原地区^[1]。

为避免重复,本文将重点介绍以下几个方面的国内外进展及相关问题。

2 夏季亚洲季风区上对流层/下平流层大气成分分布特征

许多卫星观测资料分析研究表明:在UTLS区域,南亚高压系统内部的反气旋中心对应于大气成分极值中心。图1a是100hPa高度臭氧浓度分布,反气旋区是臭氧浓度的“低谷”,这也是夏季青藏高原臭氧低谷形成的一个重要因素^[4]。在UTLS区域,源于对流层的大气成分(如水汽、CO、CH₄、HCN)浓度明显高于其他地区^[5-7],图1b和图1c分别给出了100hPa高度

上CO和水汽的分布,可见南亚高压反气旋区是高浓度CO的“污池”和高浓度水汽的“湿池”;相反,平流层示踪物(如O₃、HNO₃、HCl)浓度明显偏低^[8]。

这里首先比较亚洲季风区与北美季风区的异同,其实这个问题早在2004年Gettelman等^[9]和Dessler等^[10]就已经指出。由MLS观测到的2005—2009年北半球夏季(6—8月)100hPa高度全球水汽分布(图1c)来看,全球存在两个水汽高浓度区,分别位于亚洲季风区与北美季风区上空,且两者浓度接近,分别为5.6和5.4ppmv(1ppmv=10⁻⁶)。但是其他大气成分并不存在这样的分布,例如CO,全球只存在一个高浓度区,即位于亚洲季风区上空(图1b);相类似,100hPa高度上的臭氧分布也只出现了亚洲季风区上空的低浓度区,北美季风区上空不存在大气成分极值中心(图1c)。亚洲季风区上空高浓度水汽、高浓度CO和低浓度O₃,这与该区域深对流系统中近地层空气向上输送的理论分析是一致的。但是在北美上空,我们只看到了高浓度水汽闭合中心,而没有看到季风系统输送的低浓度臭氧和高浓度CO的闭合区域。

Gettelman等^[9]和Dessler等^[10]都认同Randel等^[11]提出的观点,即北美与亚洲季风区上空的大值水汽中心都是低层水汽通过季风区深对流向上输送而造成的。但是对于其他成分的分布,Gettelman等^[9]认为由于亚洲季风环流更加强大、更加深厚^[12],UTLS区域强大的反气旋环流抑制了反气旋核心内部与外界空气的混合,从而导致该区域水汽和CO浓度比较高而臭氧浓度较低;而北美季风区,由于季风环流比较弱,平流

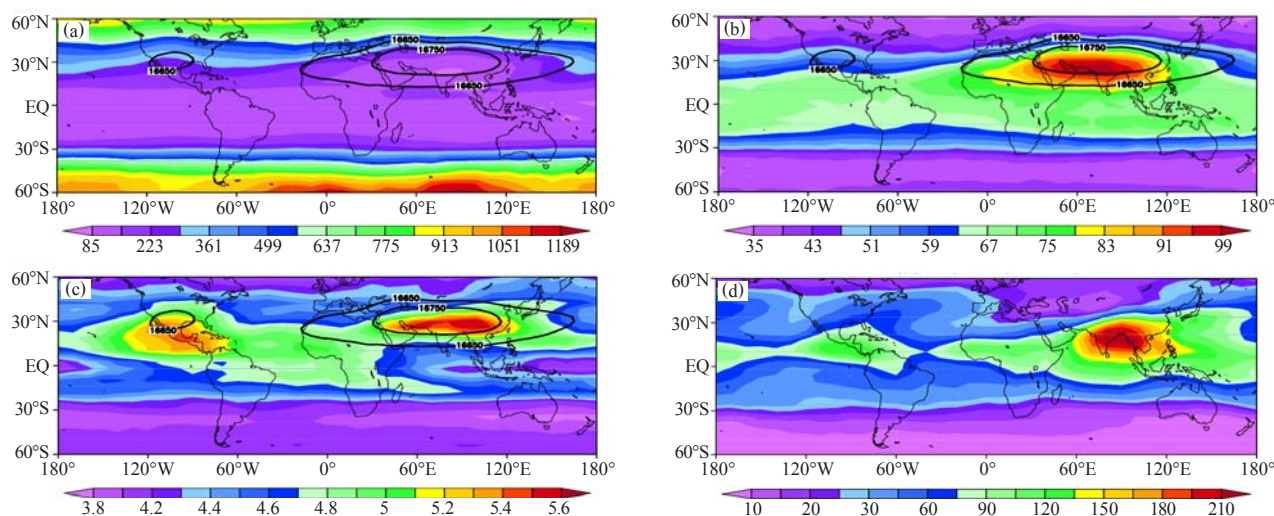


图1 北半球夏季(6—8月)平均UTLS区域大气成分分布:
(a—c)分别为100hPa高度的臭氧、CO和水汽分布;(d)为215hPa高度的水汽分布;
(a—c)中的黑色等值线为夏季100hPa高度的位势高度(2005—2009年6—8月的平均);
资料来源于Aura星载MLS探测仪(2005—2009年)

层侵入现象比较频繁,从而与对流输送上来的空气混合更为频繁,冲淡了对流输送的效果,因而在北美上空并未形成极值闭合中心。而Dessler等^[10]则认为,深对流活动对大气成分的影响决定于该大气成分的“对流比照差”,即该成分在对流出流处与周边环境的浓度差异。由于在UTLS区域水汽“对流比照差”非常大,因此对流效应比较显著,即水汽浓度主要决定于深对流输送作用;而臭氧、CO等“对流比照差”较小,因此对流活动的效果比较弱,它们的浓度主要决定于水平平流以及Brewer-Dobson环流输送。

在继续探讨这个问题之前,再来看看水汽分布在垂直方向上的差异。图1d显示全球水汽浓度在215hPa高度上存在三个大值区,分别是非洲季风区、北美季风区以及亚洲季风区,其中亚洲季风区上空水汽浓度明显大于其他区域,大值中心位于孟加拉湾上空(15°—22°N, 75°—105°E),中心浓度超过200ppmv,差不多是另两个大值区中心浓度的2倍。很多研究表明,这是季风区深对流活动向上输送水汽造成的。Park等^[13]分析该高度上亚洲季风区水汽浓度变化与对流强度变化的相关关系时,发现它们之间有非常明显的一致性,相关系数达到0.86。

再向上看,在100hPa高度,尽管水汽总体分布特征大致相似,但是出现了一些明显的变化,主要有两个方面。一是尽管亚洲季风区仍然是水汽浓度最高的区域,但是优势明显下降了,北美季风区水汽浓度大值区范围与亚洲季风区相当,中心浓度值(5.4ppmv)也仅比与亚洲季风区(5.5~5.6ppmv)略小一些。二是水汽浓度大值区中心明显北抬,其中亚洲季风区大值区具有明显的纬向扩展,中心位置北移至30°N附近;北美季风区水汽浓度大值区则有经向扩展,中心位置也向北移动了5°~10°。很显然,100hPa高度水汽浓度高值区偏离了深对流活动区域,受到了大尺度环流的影响。Park等^[13]的分析也表明,100hPa高度上的亚洲季风区水汽浓度与对流强度的相关关系明显减弱;但是该高度CO浓度与对流活动仍然保持很高的相关。这些反映了在上对流层随着高度的抬升,由于深对流活动出现频数的显著减少,其对水汽的直接输送作用明显减弱,大尺度环流(以及温度分布)尤其是大尺度抬升冷却引起的脱水过程等开始占据主导作用。

接下来再讨论一下UTLS区域水汽同位素的分布结构。Randel等^[14]分析ACE-FTS观测水汽中的氢同位素(HDO)资料,看到北美夏季季风区UTLS区域HDO浓度存在一个大值中心,而季风系统更强大且深厚的

亚洲季风区则没有任何体现。我们知道,在UTLS区域HDO浓度的增大意味着深对流活动对水汽的强烈垂直输送作用,因为在缓慢的大尺度抬升冷却造成的脱水过程中,水汽中的HDO会首先凝结成液态水滴或冰相粒子而降落,从而到达UTLS区域的HDO浓度会明显减少;而深对流系统中的上升气流会将云中的冰相粒子(HDO含量较高)输送至UTLS区域,部分细小冰晶粒子会停留在该区域或蒸发,从而提高了该区域水汽中的HDO含量。但是不能据此就认为,亚洲季风区深对流对水汽的输送比北美季风区弱。我们注意到,在UTLS区域,亚洲季风区大气温度比北美季风区要低一些,而卷云覆盖率要明显高于北美季风区^[15],一种可能就是亚洲季风区这些冰晶粒子含有较多的HDO(因为H₂O比HDO更易蒸发,而HDO比H₂O更易凝结),但由于温度低而未能蒸发出来,因而卫星遥感观测不能看到这些固态的HDO。

3 夏季亚洲季风区对流层顶气溶胶层的分布

前面已经看到,CO、HCN等不可溶性气相污染物可以通过夏季亚洲季风对流系统输送到上对流层甚至下平流层。那么是否也有大量细微气溶胶粒子进入上对流层呢?

李维亮等^[16]利用1985—1993年的SAGE II资料,发现北半球夏季在100hPa高度以孟加拉湾为中心延伸至青藏高原东南部为一气溶胶大值区。后来,周任君等^[17]利用1991—2005年HALOE资料分析了青藏高原上空气溶胶数密度、体积密度和面积密度的垂直分布及变化特征,发现一年四季高原上空气溶胶在对流层顶附近都存在一个极大值区,但是夏季浓度明显大于其他几个季节;与同纬度带中国东部地区和北太平洋上空相比较,青藏高原上空气溶胶数密度要大一些,差异主要出现在140~60hPa,其中夏季差异最突出,120hPa附近数密度约为中国东部的1.8倍,约为海洋上的5.5倍。Kim等^[18]利用1999年夏季在拉萨开展的地基激光雷达观测看到在14~19km高度范围气溶胶浓度明显高于背景气溶胶。Tobo等^[19]分析探空气球球载光学粒子计数器观测资料看到,该气溶胶层主要是由于有效半径小于0.6μm小粒子浓度的增强。Li等^[7]通过数值模拟,也在青藏高原上空看到气溶胶烟羽围困在150hPa高度附近的反气旋内。

最近,Vernier等^[20]利用CALIPSO星载云—气溶胶正交极化激光雷达(CALIOP)4年的观测资料发现,每年夏季亚洲季风区上空对流层顶附近都存在一个气溶胶层,并称之为亚洲对流层顶气溶胶层(ATAL)。ATAL地理范围为从地中海东部(向南至

北非)至中国西部(向南至泰国),垂直高度范围为13~18km(对应于等熵面360~420K),即对应于南亚高压反气旋的西部。他们还指出,该气溶胶层不同于平流层气溶胶层(Junge气溶胶层),后者主要受到火山喷发(尤其是热带火山活动)的影响,而ATAL显然与火山活动没有关系。一些初步分析显示,ATAL的存在似乎与亚洲季风区一级气溶胶及其前体物向上对流层的输送以及微物理与气粒转换过程有密切联系^[20, 21]。但是目前对于ATAL的来源及其形成过程尚不清楚。例如,卫星观测无法区分不同类型的气溶胶以及粒子大小分布。要获取这些信息,需要通过气球探空或者高空飞机开展现场采样观测。

每年夏季大范围ATAL的存在会有多方面的效应。与低层气溶胶粒子一样,高空气溶胶层也会通过散射和吸收太阳辐射和地表辐射而影响大气能量收支,进而影响气候。气溶胶还会影响卷云的形成和特性,从而影响气候。例如, Solomon等^[22]的计算表明,过去10年(2000—2010年)平流层气溶胶增加产生的辐射强迫为 $-0.1\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,减弱了温室气体引起的全球变暖。在亚洲地区,由于人口众多以及经济快速增长,地面气溶胶及其前体物排放也快速增长,因而ATAL在将来有望进一步加强。ATAL的存在有可能通过南亚高压反气旋东沿向赤道气流输送到热带低平流层,进而通过全球Brewer-Dobson环流影响全球平流层气溶胶含量。过去十来年,由于没有强的火山喷发活动, Hofmann等^[23]曾把过去十年Mauna Loa和Boulder两站上空观测到(地基激光雷达)的平流层气溶胶(20~30km)增长归因于中国及南亚等煤炭燃烧产生的硫排放增加。不过, Vernier等^[24]则将此变化主要归因于热带地区几次中小型火山喷发。

4 夏季亚洲季风区卷云及深对流活动特征

深对流活动对于平流层—对流层交换很重要,因为深对流在穿越对流层顶的大气成分输送中起着重要

作用。例如,有研究认为1990年代全球平流层水汽增加可能与深对流活动(尤其是中纬地区)有关^[25]。此外,由于深对流能够在半个小时至数小时内将边界层污染物输送到对流主出流(main outflow)高度,这对于短寿命化学成分的输送尤其重要。但是,目前对于亚洲季风区对流活动的分布尤其是主出流高度的认识,具有很大的不确定性,尤其是对流输送在对流层顶附近的作用具有很大争议。在上对流层,主出流高度即使仅相差1~3km也会产生重要差异。因为在此高度大尺度垂直速度非常小,仅为mm/s量级,缓慢爬升1~3km需要数天时间,而对于深对流输送来说仅需要几分钟至几十分钟,这对于短寿命成分以及水汽的输送会有很大差异。

近期卫星观测分析表明:亚洲季风区也是夏季全球卷云出现频率高值区^[15],尤其在15km高度以上,该地区卷云出现频率仍达到50%左右(图2),远大于其他几个主要大值区,例如北美季风区以及非洲季风区。由图可见,卷云频率大值中心位置与南亚高压中心位置有一定的偏移,卷云频率大值中心不在青藏高原上空,而是位于其南面的孟加拉湾上空,并向中印半岛和南海方向扩展。Pan等^[15]分析了热力对流层顶上方云顶出现的频率,结果表明,在孟加拉湾上空云顶出现在对流层顶上方0.5km之上的频率超过20%。这与该地区夏季旺盛的对流活动是一致的。

但是在夏季亚洲季风区,关于深对流活动特征有不同的观点。例如, Fu等^[26]利用TRMM资料,把TRMM PR降雨强度大于0.5mm/h(这也是TRMM PR能够探测的最小值)所处的最高高度定义为对流顶高,他们统计分析了2004年8月和2005年8月的对流顶高随高度的分布,表明青藏高原及其南坡上空深对流(尤其是对流顶大于14km)发生频数比南亚季风区要高。他们认为,这是青藏高原抬升地表加热驱动的结果。相反, Park等^[13]认为最强对流活动发生在南亚季风区,而不是青藏高原及其南坡。不过, Park等^[13]

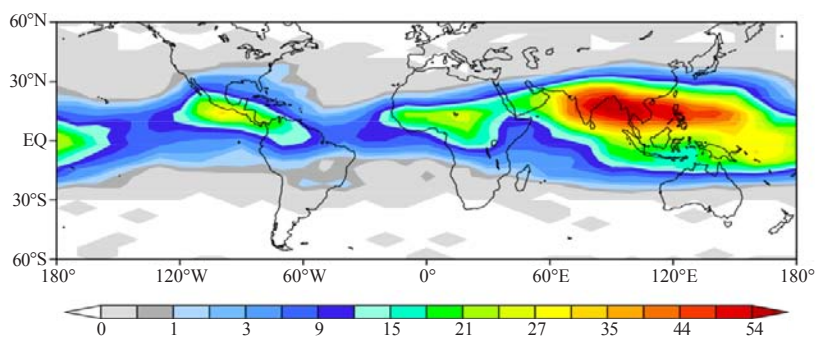


图2 北半球夏季(6—8月)15.5km高度上卷云出现概率分布, 资料来源于CALIPSO星载CALIOP(2006—2009年)

用来表征对流强度的信息是向外长波辐射（OLR），因此这种深对流可能包含了一些与深对流不直接相关的高云。例如，Luo等^[27]认为热带卷云大约一半与对流卷出的云砧无直接关系。Houze等^[28]与Romatschke等^[29, 30]利用TRMM PR资料分析喜马拉雅山及南亚区域对流系统，也发现青藏高原上空对流活动明显弱于高原南坡以及南亚季风区；深厚强对流活动主要出现在陆地上空，主要分布在喜马拉雅山南侧的恒河流域（季风前）和喜马拉雅山西侧的低洼区域（季风期），在洋面上空出现频数要小得多，仅为陆地上空的1%~6%。此外，陆地上空深对流活动具有显著的日变化，最大频数出现在夜间；而洋面上空对流活动日变化不显著，只是在中午出现频数略微大一些。

由于TRMM PR仅能探测降水性粒子，无法探测云粒子，因此不能全面获取对流活动的结构。而CloudSat卫星携带的一个94GHz云廓线雷达（CPR）对云粒子和降水粒子都很敏感，以及CALIPSO卫星携带的云—气溶胶正交极化激光雷达还能探测很薄的云和云顶，因此综合利用CloudSat和CALIPSO观测可以用来分析亚洲季风区深对流云顶及其内部垂直结构^[31]。Luo等^[31]的分析表明，与南亚季风区以及青藏高原南坡相比较，青藏高原上空深对流活动要浅得多、频率少得多、水平尺度小得多，而青藏高原南坡与南亚季风区深对流出现频率与强度都差不多，只是南亚季风区水平尺度更大一些。需要注意的是，CloudSat与CALIPSO卫星无法提供对流活动的日变化，因为一天只有两次过境时刻（跨越赤道当地时间1:30和13:30）。

上述这些研究已经给出了亚洲季风区夏季深对流活动的一些基本特征，但是在对流主出流高度分布方面的分析尚没有。因此，要弄清楚夏季亚洲季风区对流活动特征，包括地理分布、日变化、对流主出流高度随高度的分布等，可能需要利用包括地球静止卫星在内的等多源云参数观测资料，甚至需要新的卫星云探测器，以及发展恰当的分析方法来估计深对流活动的垂直输送作用。

5 夏季南亚高压反气旋环流特征及其作用

根据夏季亚洲季风区UTLS大气成分的分布特征，目前提出两个关键过程^[32]。第一个关键过程就是前面讨论的湿对流活动，深对流能够在数小时内将边界层污染物输送到对流主出流高度，这对于短寿命化学成分输送尤其重要。另一个关键过程是南亚高压内大尺度反气旋的缓慢垂直输送和快速水平混合过程。Li等^[7]在分析亚洲季风区UTLS区域存在CO浓度

大值闭合区时，提出南亚高压反气旋具有“围困”作用（trapping），即强大的南亚高压使得UTLS区域内的空气在较长时间内停留在反气旋控制中，无法扩散到反气旋外面。Randel等^[32]的轨迹模式计算表明，反气旋内部的空气块在20d之后有60%以上空气块仍停留在反气旋内。很显然，南亚高压反气旋的这种“围困”作用也是该区域许多其他大气成分极值中心存在的主要原因^[8]。

Zhang等^[33]分析南亚高压中心位置分布时，发现其具有两个主要区域，分别位于伊朗高原和青藏高原上空，并将南亚高压划分为伊朗模态和青藏模态，与这两个模态相对应的热力场结构和环流场结构都有明显不同的特征。这两种模态对应的对流层顶分布也有明显区别：在伊朗模态下，伊朗高原上空对流层顶抬升而青藏高原上空对流层顶下降；相反，在青藏模态下，伊朗高原上空对流层顶下降而青藏高原上空对流层顶抬升^[34]。相应地，这两种模态对臭氧总量以及UTLS区域大气成分也有显著影响^[34-36]。在伊朗模态下，对流层示踪物（例如H₂O、CO等）在伊朗高原上空含量增加而平流层示踪物（例如臭氧）浓度则减少，但在青藏高原上空对流层示踪物浓度减小而平流层示踪物增大；相反，在青藏模态下，在伊朗高原上空对流层（平流层）示踪物含量减小（增多），而在青藏高原上空对流层（平流层）示踪物浓度增加（减小）^[34]。

南亚高压的东缘是一支较强的向赤道气流，该气流将中高纬度大气成分输送至热带下平流层，因而对于平流层大气成分收支具有重要作用^[9, 12, 37-39]。目前看来，南亚高压反气旋环流的东西振荡以及其外缘环流结构的变化对于来自亚洲地区污染物通过反气旋向全球平流层的输送是一个重要的研究课题，目前这方面的研究尚不多，未来需要加强。

6 结语与讨论

根据经典的全球对流层—平流层质量交换图像，对流层空气由热带地区跨越对流层顶进入平流层，然后在Brewer-Dobson全球环流控制下，向极地方向和向中纬度对流层输送^[40]；也就是说热带地区是对流层空气进入全球平流层的主要通道。但是由于热带地区下垫面主要是海洋，对流层空气比较清洁，由此进入全球平流层的对流层污染物贡献较小；而在亚洲季风区，由于中国、印度以及东南亚国家工农业发展比较迅速，对流层污染物比较严重，由此进入全球平流层的对流层污染物贡献显著。因此，在对流层污染物进入全球平流层大气过程中，亚洲夏季风可能是一个极

为重要的途径。

过去的研究主要依赖于卫星观测和数值模拟,而缺乏亚洲季风区的野外观测数据。而且,卫星产品在该地区的测量性能也缺乏现场观测数据的验证^[41]。为了进一步认识亚洲夏季风的大气成分分布变化特征及其全球气候环境效应,需要更多开展亚洲季风区UTLS区域大气成分的现场观测,包括气球探空甚至飞机观测。由于常规探空仪主要关注对流层天气,其测量精度有限,尤其是对流层中上层湿度测量误差很大^[42],因此需要采用高精度的感应探头。近两年,我们利用国际上精度比较高的水汽探空仪配合其他探空仪,在昆明和拉萨初步开展的水汽/臭氧/卷云联合探空试验发现了一些具有重要价值的新事实,值得进一步关注和深入分析。

最后,我们列出未来夏季亚洲季风区平流层—对流层相互作用需要关注的一些关键科学问题:

(1) 深对流活动。前面我们已经指出,深对流是低层大气成分进入UTLS区域的快速有效机制,尤其对于短寿命成分非常关键。我们需要了解深对流活动特征(包括地理分布、日变化、强度分布)和动力结构特征是什么,如何计算深对流的输送作用、深对流输送与大尺度输送的贡献。

(2) UTLS区域卷云—气溶胶。对流云和卷云的精细特征是什么?气溶胶的分布特征是什么,有什么光学特性和化学特性?卷云和气溶胶在对流层顶附近的辐射收支如何?

(3) 微物理过程。UTLS区域气溶胶核化和增长过程以及卷云的形成机制是什么?水汽脱水过程如何?气溶胶输送以及气粒转化过程如何?如何刻画湿沉降过程?卷云—对流—气溶胶之间的相互作用如何?

(4) 大气化学过程。前面已经指出夏季亚洲季风区UTLS区域存在大量卷云和气溶胶层,那么这些对于该区域异相化学反应的贡献如何?发生哪些活跃的化学过程?

(5) 大尺度环流结构。前面提到南亚高压反气旋具有“围困”作用,把反气旋内部及外界空气相对隔离开来,对于UTLS区域大气成分分布具有很大影响;此外反气旋的外缘也是热带空气与中高纬空气交换的重要路径。我们需要了解反气旋边缘的精细结构以及跨越边缘的重要交换机制是什么。

(6) 气候变率和长期变化。什么因素控制夏季亚洲季风区UTLS区域的年际变化?在全球变化背景下反气旋如何演变?亚洲季风区变率对全球气候环境的影响如何?

参考文献

- [1] 卞建春, 严仁娉, 陈洪滨. 亚洲夏季风是低层污染物进入平流层的重要途径. 大气科学, 2011, 35(5): 897-902.
- [2] 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. 科学通报, 1995, 40: 1396-1398.
- [3] 周秀骥, 李维亮, 陈隆勋, 等. 青藏高原地区大气臭氧变化的研究. 气象学报, 2004, 62: 513-527.
- [4] Bian J, Yan R, Chen H, et al. Formation of the summertime ozone-valley over the Tibetan Plateau: The Asian summer monsoon and air column variations. Adv Atmos Sci, 2011, 28(6): 1318-1325, doi:10.1007/s00376-011-0174-9.
- [5] Randel W J, Park M, Emmons L, et al. Asian monsoon transport of pollution to the stratosphere. Science, 2010, 328: 611-613, doi:10.1126/science.1182274.
- [6] Park M, Randel W J, Kinnison D E, et al. Seasonal variation of methane, water vapor, and nitrogen oxides near the tropopause: Satellite observations and model simulations. J Geophys Res, 2004, 109: D03302, doi:10.1029/2003JD003706.
- [7] Li Q, Jiang J H, Wu D L, et al. Trapping of Asian pollution by the Tibetan anticyclone: A global CTM simulation compared with EOS MLS observations. Geophys Res Lett, 2005, 32: L14826, doi:10.1029/2005GL022762.
- [8] Park M, Randel W J, Emmons L K, et al. Chemical isolation in the Asian monsoon anticyclone observed in Atmospheric Chemistry Experiment (ACE-FTS) data. Atmos Chem Phys, 2008, 8: 757-764, doi:10.5194/acp-8-757-2008.
- [9] Gettelman A, Kinnison D E, Dunkerton T J, et al. Impact of monsoon circulations on the upper troposphere and lower stratosphere. J Geophys Res, 2004, 109: D22101, doi:10.1029/2004JD004878.
- [10] Dessler A E, Sherwood S C. Effect of convection on the summertime extratropical lower stratosphere. J Geophys Res, 2004, 109: D23301, doi:10.1029/2004JD005209.
- [11] Randel W J, Wu F, Gettelman A, et al. Seasonal variation of water vapor in the lower stratosphere observed in Halogen occultation experiment data. J Geophys Res, 2001, 106: 14313-14325.
- [12] Dunkerton T. Evidence of meridional motion in the summer lower stratosphere adjacent to monsoon regions. J Geophys Res, 1995, 100(D8): 16675-16688, doi:10.1029/95JD01263.
- [13] Park M, Randel W J, Gettelman A, et al. Transport above the Asian summer monsoon anticyclone inferred from Aura Microwave Limb Sounder tracers. J Geophys Res, 2007, 112, D16309, doi:10.1029/2006JD008294.
- [14] Randel W J, Moyer E, Park M, et al. Global variations of HDO and HDO/H₂O ratios in the UTLS derived from ACE-FTS satellite measurements. J Geophys Res, 2012, doi:10.1029/2011JD016632, in press.
- [15] Pan L L, Munchak L A. The Relationship of cloud top to the tropopause/jet structure from CALIPSO data. J Geophys Res, 2011, 116: D12201, doi:10.1029/2010JD015462.
- [16] 李维亮, 于胜民. 青藏高原地区气溶胶的时空分布特征及其辐射强迫和气候效应的数值模拟. 中国科学D辑: 地球科学, 2001, 31(S1): 300-307.
- [17] 周任君, 陈月娟, 毕云, 等. 青藏高原上空气溶胶含量的分布特征及其与臭氧的关系. 高原气象, 2008, 27(3): 500-508.
- [18] Kim Y S, Shibata T, Iwasaka Y, et al. Enhancements of aerosols near the cold tropopause in summer over Tibetan Plateau: Lidar and balloon borne measurements in 1999 at Lhasa, Tibet, China. Proc SPIE, 2003, 4893: 496-503, doi:10.1117/12.466090.
- [19] Tobo Y, Iwasaka Y, Shi G, et al. Balloon-borne observations of high aerosol concentrations near the summertime tropopause over the Tibetan Plateau. Atmos Res, 2007, 84: 233-241, doi:10.1016/j.atmosres.2006.08.003.
- [20] Vernier J P, Thomason L W, Kar J. CALIPSO detection of an Asian tropopause aerosol layer. Geophys Res Lett, 2011, 38: L07804, doi:10.1029/2010GL046614.
- [21] Lawrence M G. Asia under a high-level brown cloud. Nature Geoscience, 2011, 4: 252-253.

- [22] Solomon S, Daniel J S, Neely III R R, et al. The persistently variable background stratospheric aerosol layer and global climate change. *Science*, 2011, 333: 866-870, doi:10.1126/science.1206027.
- [23] Hofmann D, Barnes J, O'Neill M, et al. Increase in background stratospheric aerosol observed with lidar at Mauna Loa Observatory and Boulder, Colorado. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L15808, doi:10.1029/2009GL039008.
- [24] Vernier J P, Thomason L W, Pommerehne J P, et al. Major influence of tropical volcanic eruptions on the stratospheric aerosol layer during the last decade. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L12807, doi:10.1029/2011GL047563.
- [25] Oltmans S J, Hofmann D J. Increase in lower stratospheric water vapour at a mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981 to 1994. *Nature*, 2002, 374: 146-149, doi:10.1038/374146a0.
- [26] Fu R, Hu Y, Wright J S, et al. Short circuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere by convective transport over the Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103: 5664-5669, doi:10.1073/pnas.0601584103.
- [27] Luo Z, Rossow W B. Characterizing tropical cirrus life cycle, evolution, and interaction with upper-tropospheric water vapor using Lagrangian trajectory analysis of satellite observations. *J Climate*, 2004, 17: 4541-4563.
- [28] Houze R A, Wilton D C, Smull B F. Monsoon convection in the Himalayan region as seen by the TRMM precipitation radar. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2007, 133: 1389-1411, doi:10.1002/qj.106.
- [29] Romatschke U, Houze R A Jr. Characteristics of precipitating convective systems in the South Asian monsoon. *J Hydrometeorol*, 2011, 12: 157-180.
- [30] Romatschke U, Medina S, Houze R A Jr. Regional, seasonal, and diurnal variations of extreme convection in the South Asian region. *J Climate*, 2010, 23: 419-439.
- [31] Luo Y, Zhang R, Qian W, et al. Intercomparison of deep convection over the Tibetan Plateau-Asian monsoon region and subtropical North America in boreal summer using CloudSat/CALIPSO data. *J Climate*, 2011, 24: 2164-2177, doi:10.1175/2010JCLI4032.1.
- [32] Randel W J, Park M. Deep convective influence on the Asian summer monsoon anticyclone and associated tracer variability observed with Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *J Geophys Res*, 2006, 111: D12314, doi:10.1029/2005JD006490.
- [33] Zhang Q, Wu G, Qian Y. The bimodality of the 100 hPa South Asia high and its relationship to the climate anomaly over East Asia in summer. *J Meteor Soc Japan*, 2002, 20: 733-744.
- [34] Yan R, Bian J, Fan Q. The impact of the South Asia high bimodality on the chemical composition of the upper troposphere and lower stratosphere. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2011, 4: 229-234.
- [35] 周任君, 陈月娟. 青藏高原和伊朗高原上空臭氧变化特征及其与南亚高压的关系. *中国科学技术大学学报*, 2005, 35: 899-908.
- [36] 舒斯, 何金海, 刘毅, 等. 夏季青藏高原O₃低值与南亚高压东西振荡的关系. *气候与环境研究*, 2011, 16(1): 39-46, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.01.04.
- [37] Chen P. Isentropic cross-tropopause mass exchange in the extratropics. *J Geophys Res*, 1995, 100(D8): 16661-16673, doi:10.1029/95JD01264.
- [38] Bannister R N, O'Neill A, Gregory A R, et al. The role of the South-East Asian monsoon and other seasonal features in creating the 'tape-recorder' signal in the Unified Model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2004, 130: 1531-1554.
- [39] Wright J S, Fu R, Fueglistaler S, et al. The influence of summertime convection over Southeast Asia on water vapor in the tropical stratosphere. *J Geophys Res*, 2011, 116: D12302, doi:10.1029/2010JD015416.
- [40] Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev Geophys*, 1995, 33: 403-440, doi:10.1029/95RG02097.
- [41] Bian J, Gettelman A, Chen H, et al. Validation of satellite ozone profile retrievals using Beijing ozonesonde data. *J Geophys Res*, 2007, 112: D06305, doi:10.1029/2006JD007502.
- [42] Bian J, Chen H, Vomel H, et al. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(1): 139-146, doi: 10.1007/s00376-010-9170-8.

会议信息

- ◆ 2013年农业和自然资源工程国际研讨会 (ICANRE 2013), 2013年5月1—2日, 新加坡 (<http://www.icanreconf.org>)
- ◆ 2013年新能源与材料研究国际学术研讨会 (MREE 2013), 2013年5月15—16日, 南京 (<http://www.mree-conf.org/>)
- ◆ 第6届国际雾、雾采集和露水学术会议 (Sixth International Conference on Fog, Fog collection and Dew), 2013年5月19—24日, 日本, 横滨 (<http://www.fogconference.org/>)
- ◆ 第12届国际空气质量大气科学与应用会议 (12th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality), 2013年6月3—5日, 韩国, 首尔 (<http://asaaq12.kr>)
- ◆ 第一届气候经济应用国际学术会议 (First International Workshop on Econometric Applications in Climatology), 2013年6月5—7日, 加拿大 (<http://econapps-in-climatology.webs.com/>)
- ◆ 第8届南极气象观测、模拟和预报学术会 (The 8th Antarctic Meteorological Observation, Modeling, and Forecasting Workshop), 2013年6月9—12日, 美国, 威斯康星 (<http://amrc.ssec.wisc.edu/meetings/meeting2013/program.shtml>)
- ◆ ECMWF-WWRP/THORPEX极地预报学术会 (ECMWF-WWRP/THORPEX workshop on polar prediction), 2013年6月24—27日, 法国, 图卢兹 (http://www.ecmwf.int/newsevents/meetings/workshops/2013/Polar_prediction/)
- ◆ 第二届能源和气象国际会议: 能源业的天气和气候 (2nd International Conference Energy & Meteorology: Weather & Climate for the Energy Industry), 2013年6月25—28日, 法国, 图卢兹 (<http://www.icem2013.org>)
- ◆ 气候变化、相关自然灾害和风险的数学学术会议 (Mathematics of Climate Change, Related Natural Hazards and Risks), 2013年7月29—8月2日, 墨西哥, 瓜纳华托 (<http://mpe2013.org/>)
- ◆ 洪水弹性国际会议 (International Conference on Flood Resilience, ICFR), 2013年9月5—7日, 英国, 埃克塞特 (<http://www.icfr2013.org>)
- ◆ 2013年EUMETSAT气象卫星会议暨第19届美国气象、海洋和气候会议 (2013 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference & 19th American Meteorology, Oceanography and Climatology Conference), 2013年9月16—20日, 奥地利, 维也纳 (http://www.eumetsat.int/Home/Main/News/Conferences_and_Events/820209?l=en)
- ◆ 2013年ISEM会议——全球变化背景下生态系统可持续性生态模拟 (The 19th biennial ISEM Conference - Ecological Modelling for Ecosystem Sustainability in the context of Global Change), 2013年10月28—31日, 法国, 图卢兹 (<http://www.meteo.fr/cic/meetings/2013/ISEM/>)
- ◆ 云计算与信息安全国际研讨会 (The International Workshop on Cloud Computing and Information Security), 2013年11月9—11日, 中国, 上海 (<http://www.ccisconf.org/>)

快速更新同化预报的关键技术综述

陈葆德 王晓峰 李泓 张蕾

(中国气象局上海台风研究所, 上海 200030)

摘要: 快速更新同化预报技术(简称RUC或RR)是近来针对短时临近预报应用发展的数值预报技术。回顾了国内外的发展历程及现状,介绍了关键的相关技术,主要包括:(1)绝热与非绝热数字初始化;(2)冷、暖和热启动技术与循环同化;(3)云分析技术;(4)近地面资料同化等,并阐述了快速更新同化预报技术未来的发展。

关键词: 快速更新同化预报, 短时临近预报, 数值天气预报, 资料同化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.003

An Overview of the Key Techniques in Rapid Refresh Assimilation and Forecast

Chen Baode, Wang Xiaofeng, Li Hong, Zhang Lei

(Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030)

Abstract: High-frequency assimilation and forecast (Rapid Update Cycle, RUC or Rapid Refresh, RR) have been developed for numerical weather prediction of short-range forecasting in recent years. In this paper, the history and status of RUC (or RR) are reviewed. Several relevant key issues are addressed, including: 1) adiabatic digital filter initialization (DFI) and diabatic digital filter initialization (DDFI); 2) cold start, warm start and hot start initialization techniques; 3) cloud analysis technique; 4) issues for assimilating near-surface observations. Finally, the challenges, opportunities and future directions for rapid refresh systems are discussed.

Keywords: rapid refresh assimilation and forecast, nowcasting, numerical weather prediction, data assimilation

1 引言

自1994年业务化以来,美国NCEP(National Centers of Environmental Prediction)的快速更新同化预报系统(Rapid Update Cycle, 简称RUC)^[1,2]所提供的0~12h预报已成为航空气象、强对流灾害天气等主要的中尺度预报指导产品。RUC由同化和预报两部分构成,通过高频次的资料同化吸收最新的观测信息,不断更新模式背景场,形成更准确的初始场并进行短期预报。自业务运行以来,RUC系统进行了多次改进与升级^[3-5],新一代的快速更新同化预报系统(Rapid Refresh, 简称RR)于2012年正式业务化并取代原来的RUC系统(<http://rapidrefresh.noaa.gov>)。

随着我国数值预报、计算机能力和探测技术的发展进步,近些年也开展了快速更新同化预报系统的研制和业务化应用^[6-8],然而与先进国家水平相比,无论是多种高频观测资料的应用还是同化系统与模式的发展,都有较大差距。在我国经济高速发展的背景下,

社会对高影响天气越来越敏感,公众及高敏感行业对灾害天气的精细化滚动预报的要求也越来越高。为提高对天气系统的短时临近数值预报能力,本文回顾了国内外快速更新同化预报系统的发展历程及现状,总结其中的关键技术和难点,分析未来的发展方向,以期对我国发展和完善基于快速更新同化的短时临近数值预报系统有所帮助。

2 为什么要发展快速更新同化预报系统

针对强对流天气系统的0~6h预报,各大气象研究和业务中心主要基于雷达回波与卫星图像的简单外推以及实践经验,发展了各种类型的短时临近预报(NOWCASTING)系统,业务应用表明它们在0~1h的预报中相当有效。然而由于缺乏对强对流系统的发生、发展和消亡的物理机制描述,其预报能力随预报时效增加迅速降低^[9]。如图1中的蓝线所示,一般而言时效超过1h以上的预报可信度大大降低,尤其是对强对流系统发展、演变的预报。采用数值模式预报强对流系统,虽然对动力与物理过程的描述存在着各种各样的不足,但对强对流系统活动的预报在原理上应该远优于简单的外推方法。鉴于强对流系统水平尺度较小、生命史较短的特点,模式初始时刻对当前对流

收稿日期: 2012年4月6日; 修回日期: 2012年4月22日

第一作者: 陈葆德(1964—), Email: baode@mail.typhoon.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(41175094); 上海科委科研项目(10231203700)

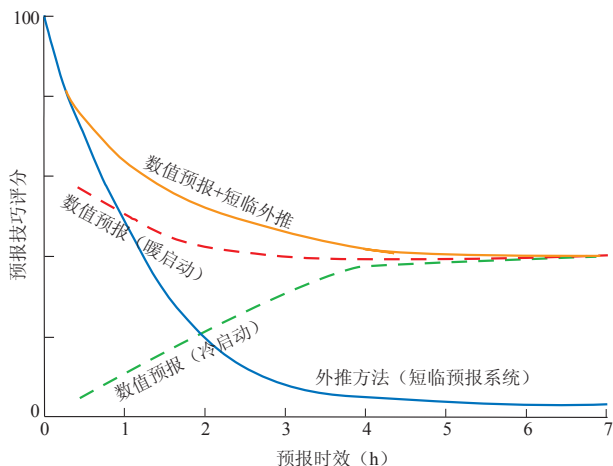


图1 数值预报技术、短时临近预报技术预报技巧比较示意图

系统的准确把握是关键。传统的每6h或更长时间更新一次模式初值的数值预报系统显然不适合于短临时间尺度的预报，因此进行较短时间间隔的高频资料同化以便初始场尽可能包含对流系统的信息就显得十分必要。美国在1991年开始研究快速更新同化技术，并于1994年开始业务化运行。但是高频资料同化存在着模式初始变量不协调而引发的较长时间（>1h）的初始平衡问题与误差积累等问题，它们可以大大削弱模式1~2h的预报能力，为此所谓的热启动技术就应运而生（见下节）。需要指出的是，对于强对流天气系统的短时临近预报，基于快速更新同化的数值预报系统与基于外推和经验的短临系统相结合（blending）是提高短时临近预报准确率的重要方向（图1）。

3 快速更新同化预报系统的关键技术

3.1 绝热与非绝热数字初始化

由于模式本身和初始场均不是完全准确的，模式预报不可避免地存在误差，且预报误差随预报时效非线性增长，资料同化的目的即是利用观测资料修正模式预报。一般天气尺度模式系统同化的频率是每6h一次，而对流系统因其发展迅猛、生命史短、预报误差增长快等特点，需要高频次观测资料对模式初值不断同化更新，以得到更精准的模式初值，继而提高预报准确率，因此高频资料同化对强对流系统预报的好处是显而易见的。

然而，高频资料同化也会带来一些问题。由于观测类型的不完整性及资料本身的误差，同化后的变量之间不可避免地存在物理不平衡性，由此激发的重力波将会导致预报误差的异常增长，这些虚假重力波的影响在模式积分一段时间后会通过平衡调整逐渐消失，一般将此过程称为平衡调整过程（spin-up），所需时间称为spin-up时间。模式的预报只有在调整

期后才是可信的。然而，高频同化会不断累加、放大这种重力波的噪音效应，使预报结果甚至差于一般同化频率的模式预报。为控制重力波噪音，在高频同化系统中需要使用数字滤波初始化技术（digital filter initialization, DFI）来过滤掉初始场中的高频噪音（重力波）。早期的系统使用绝热的DFI即在模式预报之前对初值场进行向前和向后一段时间的绝热积分^[1]。近年来快速更新同化预报系统开始使用基于雷达反射率的非绝热DFI技术（diabatic digital filter initialization, DDFI）^[10]。DDFI与DFI的差别在于DDFI在向后一段时间积分时，引入了由雷达反射率通过云分析（见3.3节）所确定的潜热加热率。它的主要作用在于其可以修正初始风场，以使得风场与初始对流活动大体上相匹配。

3.2 冷启动、暖启动和热启动技术与循环同化设计

尽量缩短spin-up时间是提高快速更新同化预报系统性能和效率的关键之一，模式的冷启动（Cold Start）、暖启动（Warm Start）和热启动（Hot Start）技术与循环同化方案中对各种启动技术的合理配置，都是针对如何尽量缩短spin-up时间的。

模式冷启动指区域模式背景场由其他低分辨率模式（如全球模式）提供，以此为背景场做同化或直接当作初始分析场进行预报，它的好处是可以保证模式预报不偏离大尺度背景或环境场，但由于初始场中缺乏中尺度信息，特别是云和水物质的特征量一般而言为零，模式需要较长的spin-up时间。模式暖启动与热启动时，同化背景场来自系统模式自身上一时刻的预报，这时的背景场已包括云和水物质的特征量，如果在同化时不进行云和水物质的调整（通常初始垂直速度也取为零），直接进入模式的下次预报，称为暖启动；如果在同化时通过雷达资料直接同化或使用复杂云分析对与对流系统相关的云和水物质也进行调整，并且也调整相应的垂直速度，使用这种初始场启动模式，称为热启动。

将各种启动方式按时间合理组合，进行连续各时段预报就构成了循环同化预报。这里需要指出循环同化预报技术对中尺度天气的短时临近预报十分必要，因其：1）允许高分辨模式保留模式上一循环中所发展的小尺度特征，特别是当前观测中没有的相关垂直运动；2）维持初始场与模式物理参数化的平衡，例如，如果初始相对湿度与云参数化方案需要的初始云场不匹配，模式前几小时的积分会生成过多的云和降水或者使云和降水消失。但是循环同化预报时，高分辨预报模式会产生虚假的小尺度特征，由于观测网通

常无法解析这些小尺度特征,也就无法在同化中使用观测来订正。这些误差有时将会被一直代入下一循环的预报,最终使得预报大幅度偏离大尺度环境场而导致预报完全失败。为保证模式预报不偏离大尺度背景或环境场,一段时间后模式必须进行冷启动,而预报系统何时或多长时间进行冷启动,依赖于实际应用经验和对大气系统的理解,为体现完整的日变化特征,一个冷启动到下个冷启动通常取为24h。以上海区域中心的SMB-WARR(见第4节)为例,考虑到通常夜间对流活动不活跃,边界层相对稳定,其选择当地的凌晨2时为冷启动时间,每24h系统冷启动一次。

3.3 云分析技术

在快速更新同化预报系统中,每次模式启动时,需要对模式初始变量(包括云、水物质含量和地表变量等)进行更新,使模式不断吸收反映天气系统时间演变的观测信息从而达到使模式初始场更加接近实际天气状况的目的。要快速获得有关对流的信息(如云和降水),并同化进入模式初始场中,云分析方法(cloud analysis)是个不错的选择。国外目前在业务中使用的云分析系统包括美国空军的CDFS-II(Cloud Depiction and Forecast System),英国气象局的Nimrod(Nowcasting and Initialization for Modeling Using Regional Observation Data Scheme),美国俄克拉荷马大学CAPS(Center for Analysis and Prediction of Storms)的ARPS,NOAA的LAPS(Local Analysis and Prediction System)和RUC/RR(Rapid Update Cycling/Rapid Refresh)。云分析方法的基本原理大体上一致,即首先根据地面、雷达和卫星等观测资料所提供的有关云与降水信息,结合数值预报模式结果得到云的几何特征(如云顶和云底高度,云类型等),然后通过对云内的温度和水汽场进行调整(如基于绝热上升的热力调整)得到云水物质参数的混合率和分布^[10-15]。以ARPS中ADAS云分析为例,它首先通过地面、雷达和卫星等观测资料得到模式格点上的云量和云顶高度;然后根据三维雷达反射率资料通过Smith-Feddes模型,并考虑干空气夹卷过程及凝结过程对云水量的损耗,得到云水、云冰混合比;而雨水、雪、冰雹等降水粒子场则是由模式格点上的温度场和雷达反射率通过雷达反射率方程诊断分析获得;最后根据与云水、云冰对应的潜热释放,基于湿绝热假定对云内温度场进行调整。云分析通过综合使用卫星、雷达和地面观测资料逐步完善和实现了对模式初始场的三维云特征量场的构造和修正,同时现在的云分析方案在对云的云水、云冰特征量的分析时还分别考虑了层

云与积云的不同特征,在物理机制上的设计也更为合理。研究表明使用该方法可以缩短模式spin-up时间和提高模式中小尺度对流降水的预报效果^[12]。但是需要指出的是,通过云分析方法得到的云水物质的混合比与模式的初始预报量(温度、湿度或者垂直速度)不平衡,有时会造成模式的积分不稳定等问题,这些可以通过非绝热DFI技术来解决。

3.4 近地面资料同化技术

近地面资料由于有较高的时空分辨率(如每小时的地面自动站2m温度和10m风观测),它自然成为快速更新同化预报系统中,对背景场进行快速更新同化时重要的观测资料来源。尽管各种近地面观测可以较容易得到,但是实际上将其同化入系统并不容易,主要原因如下:1)缺乏好的或合理的方法将近地面观测与大气的三维结构相关联,因此近地面观测的作用在模式积分过程中很快就会消失;2)如果不进行严格的质量控制和大量的试验,近地面观测的引入可能会破坏模式预报的边界层结构;3)模式地形与观测站的地形高度不一致,可能对近地面变量特别是气温和风产生严重影响;4)近地面观测在某些地区分布太密集以至于观测资料的水平分辨率大于模式的分辨率,这时可能产生模式和观测的代表性差异,且过密的资料分布有时可能使分析太接近于观测,如果观测质量不高且又低估了观测误差时会使得分析精度下降;5)同化系统中对近地面资料的观测误差取值有待改进;6)同化方案中的观测算子(如基于相似理论)尚存在较大误差。

有许多研究工作致力于解决上述问题,如美国的RUC系统利用模式背景场提供的局地温度递减率将近地面观测资料外插到模式地表高度,其中外插精度很大程度上取决于背景场对近地层热力稳定度的把握程度^[16]。

3.5 同化频率与资料空间分辨率

快速更新同化预报系统初值的准确性还取决于资料的密度、资料质量及同化方法。时间上过高的同化频率会导致资料在空间分布上的不足,继而可能对那些时空分辨率不足的观测资料同化造成负面影响。以飞机报资料为例,其时空分辨率取决于非常不规则的飞行线路。如果同化间隔为6h,则正负3h同化窗口内的资料空间分辨率较高,但存在的问题是窗口内很多资料的观测时间与实际的同化时间并不一致,对快速移动的风暴系统而言这种时间代表性误差会导致同化的失败;而当同化间隔缩小至1h,正负半小时同化窗口内的资料时间差问题减弱,但资料的空间分

分辨率也大大降低。Benjamin等^[1]指出,在相同的资料量条件下,连续高频次的低密度资料同化效果可能劣于低频次的高密度资料同化。这种时、空分辨率上的两难取舍取决于风暴的移速,当风暴准静止时,同化频率可取的非常低以获得空间上高密度的资料;当风暴移速较快时,要适当增加同化频率以降低时间代表性误差,但太高的频率又会造成资料空间代表性上的不足,影响同化效果^[1]。

4 快速更新同化预报系统发展的历史沿革

4.1 美国快速更新同化预报系统发展的历史沿革

美国首先在1991年开始了快速更新同化预报技术的研究开发,并于1994年开始在NCEP业务运行(RUC1)。RUC1采用静力平衡原始方程模式,水平分辨率60km,垂直方向25层,使用最优插值(Optimal Interpolation, OI)技术每3h进行一次资料同化更新^[1];之后经过几次更新和升级^[1-5](表1),2005年系统水平分辨率已提升至13km,垂直方向50层,采用3维变分(3DVAR)技术,进行1h同化更新。为得到更准确的云和水物质初始场,从2002年(RUC20)起,系统开始使用云分析技术利用卫星观测云顶资料对云和水物质进行调整^[13],之后通过逐步补充更多的观测资料(包括雷达反射率),对云的描述更加完善^[14, 15]。云分析技术在RUC系统初始化过程中起着至关重要的作用。

虽然RUC系统经历了多次升级,但其模式动力框架还是静力模式。随着非静力模式的发展,NOAA/NCEP(RUC系统业务应用部门)和NOAA/ESRL/GSD(RUC系统研发机构)于2002年决定发展以非静力模式WRF为基础的新一代快速更新同化预报系统,除模式替换外,同化系统也将换成GSI(Gridpoint Statistical Interpolation)以增加系统对卫星辐射率的直接同化功能。自2003年以来,在经过了WRF-RUC测试(以RUC初始场驱动WRF, Weather Research and Forecasting)、WRF动力框架比较测试^[17](在WRF-ARW和WRF-NMM两种动力框架中选择了WRF-ARW)、GSI系统功能拓展^[3, 4](移植RUC已有的云分析、雷达反射率资料同化、非绝热DFI、地表资料

同化等技术)、云分析模块升级^[12](增加深对流云分析方案)等一系列研发之后,基于WRF-ARW模式(水平分辨率仍为13km)和GSI同化系统的RR系统于2007年底开始快速同化循环试验^[18],经过几年的测试运行,计划于2012年正式取代RUC业务系统。与此同时,更高分辨率(3km)的RR系统(High-Resolution Rapid Refresh, 简称HRRR)于2011年4月开始在NOAA/ESRL/GSD测试。与13km RR相比, HRRR不使用对流参数化方案,模式直接解析对流系统,初始场和侧边界由同步运行的RR提供。

4.2 国内快速更新同化预报系统发展现状

近几年,我国加大了针对中小尺度天气系统观测的布网力度,观测手段及自动化水平逐步接近国际先进水平,具备了发展快速同化系统的观测基础。在我国东部地区已建成包括自动气象站、单双频地基GPS(Global Position System)站、风廓线仪、多普勒雷达和微波辐射计在内的局地中小尺度观测网,观测资料在时间和空间分辨率上都得到了极大的提高。通常一个时次的常规地面观测超过1000个,自动站资料可达2万个以上,雷达等非常规探测在硬件建设和布网上发展非常迅速。目前,长三角地区已有13部多普勒天气雷达(徐州、连云港、盐城、南京、南通、上海南汇及青浦、杭州、金华、宁波、舟山、温州、衢州),在建4部(江苏常州、浙江湖州、杭州及丽水)。计划建设25部风廓线仪,其中江苏新建6部,浙江新建5部(已建成湖州、义乌、嘉兴),上海新建11部(已建成10部),并完成长三角风廓线组网。长三角区域将有79个GPS站可参与加密观测,其中参与中国气象局业务考核的有江苏62个、上海9个、浙江1个。这些观测在日常业务预报与科学研究中起着举足轻重的作用。如何有效利用各种常规和非常规气象资料,充分发挥先进探测手段的作用,提高突发性天气的预报能力,提供时间上更密集、空间和量级上更准确的精细数值预报服务,已成为日益突出的问题。在国内,虽然对快速更新同化和预报技术的研究和应用起步较晚,但近年来发展迅速。以上海、北京及广州为代表,基于本地特色,分别建立了不同技术路线的快速更新同化预报系统。

2009年1月,上海建立了基于ADAS资料同化系统和区域中尺度数值模式WRF的快速更新同化预报系统(SMB-WARR, Shanghai Meteorological Bureau-WRF ADAS Rapid Refresh System),同年7月准业务运行,2009年底实现业务运行至今。该系统的水平分辨率为3km,垂直分辨率为51层,预报区域覆盖华东

表1 RUC业务系统模式分辨率、动力框架、同化频率、同化方法发展历史沿革

RUC系统	NCEP业务化时间	水平分辨率	垂直层数	同化频率	同化方法	模式动力框架
RUC1	1994年9月	60km	25	3h	OI	静力平衡 原始方程 isentropic- sigma 混合坐标
RUC2	1998年4月	40km	40	1h	OI	
RUC20	2002年4月	20km	50	1h	OI	
	2003年5月	20km	50	1h	3DVAR	
RUC13	2005年6月	13km	50	1h	3DVAR	

及其周边地区,系统采用逐小时循环同化的方式对观测资料进行同化,每日02时冷启动,冷启动的背景场和侧边界条件由NCEP GFS 6h的全球预报场提供,其他时刻同化的背景场则由SMB-WARR系统上一时次的1h预报场提供。系统每小时启动一次预报,预报时效为12h,并提供逐小时高分辨率中尺度分析场。实时业务的同化观测资料包括常规天气观测、机场地面报、船舶、浮标、自动站、飞机报、探空、雷达反射率和FY-2E红外和可见光辐射率资料,如图2所示。其中,雷达反射率和FY-2E红外和可见光辐射率资料主要采用云分析技术进行同化,雷达反射率资料主要用于改进和修正云和降水的垂直结构特征,而FY-2E红外和可见光辐射率观测则主要用于修正初始场中有关云顶高度和云量的特征,关于云分析技术的具体叙述见3.3节。其他观测资料则是通过ADAS的逐步订正方法实现同化。通过3年来的测试及优化,该系统在短时临近天气预报中发挥了越来越重要的作用;上海地区2011年汛期强对流预报检验表明,其对午后强对流天气的预报明显优于同时次起报的华东区域中尺度预报模式(SMB-WARMS)和欧洲中心的高分辨模式的预报结果^①。

北京同化预报系统(BJ-RUC)亦采用WRF模式,与SMB-WARR不同之处在于其同化系统采用三维变分技术。区域配置采用三重嵌套 $27\times 9\times 3\text{km}$,3km分辨率的预报区域主要覆盖北京及其周边地区,垂直

分辨率均为37层。每日20时冷启动,冷启动的背景场和侧边界条件由NCEP GFS 6h的全球预报场提供,每隔3h同化一次探空、地面、船舶观测资料以及北京地区的自动站和地基GPS PW可降水量观测资料,预报时效为18h。其业务运行结果表明,3km分辨率无论是降水时段、落区和雨量均较9km分辨率有更好的预报效果,尤其是大量级降水的预报,但系统对局地对流降水的预报能力仍然有限^⑥。

广州在GRAPES_meso及三维变分同化基础上发展了快速更新同化预报系统(GRAPES-CHAF)。模式分辨率为 0.12° ,预报区域主要覆盖华南地区。采用三维变分同化方法对卫星反演的云迹风、雷达径向风、VAD风、飞机报、地面、船舶和探空观测资料进行同化,通过云分析技术和nudging方法对雷达回波进行同化。该系统采用逐小时循环同化和每3h间隔的滚动预报,预报时效为24h。多种测试和汛期连续试验表明,系统运行稳定可靠。通过1个月的滚动预报综合分析和个例预报分析均表明,预报稳定有效,与观测分布基本一致,初步具备开展短时临近预报的能力^⑦。在原广州热带海洋气象研究所GRAPES-CHAF基础上,国家气象中心采用新版的GRAPES-Meso模式与区域GRAPES-3DVAR,建立了优化后的RUC同化预报系统。其模式分辨率为 0.15° ,预报区域覆盖全国,其同化的观测资料类型与GRAPES-CHAF类似。每3h启动一次预报,预报时效为24h^⑧。

对比国内各家快速更新同化预报系统,北京和广州均采用3DVAR而上海使用ADAS方案;从同化资料的种类看,广州的系统资料种类相对较多(如云导风、雷达径向风等)。然而和美国的RUC/RR系统相比,国内系统可同化的高空资料种类和数量严重不足,尤其是飞机报资料。飞机报是美国RUC/RR系统高频资料的重要来源,每小时的资料量为数千个(参见文献1中表2),而国内使用的飞机报不到上述资料量的十分之一。此外,国内卫星、雷达及其反演资料的质量也一定程度上影响了快速更新同化预报系统的发展。

5 快速更新同化预报系统的未来发展与挑战

快速更新同化系统的研发已进行了20多年,其在美国已逐步成为强对流短临预报的重要工具且在许多领域得到了应用。近年来世界上不少国家(如英国、澳大利亚等)也开始研发或已建立了自己的快速更新同化系统。但是从整体来看,它还处于研究、试验和业务应用不断改进的阶段,其预报的准确性、时效性

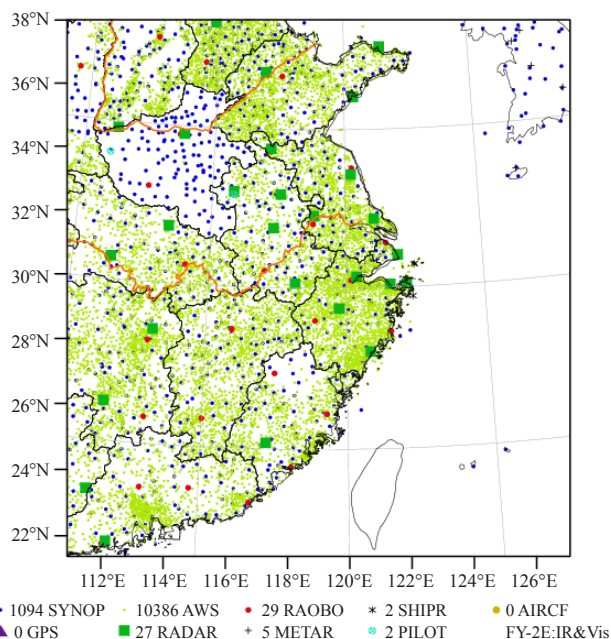


图2 2012年3月22日20时SMB-WARR同化的观测资料种类及分布

① 上海台风所汛期会商材料重要天气过程数值预报应用分析第5和第6期。

还不能完全满足要求^①。

基于外推的短时临近预报系统可以很好地描述系统的“线性”发展，如日变化和平流为主的过程等，但当遇到“非线性”为主的系统与影响时，如对流的发生发展、下垫面过程（海陆风、地形）、云的覆盖及其变化等，它们就无能为力。而高分辨数值模式对短临预报的价值正是在于预报系统“非线性”发展变化的“潜在”能力。随着资料来源的多源化，站网布局的科学化和观测获取的自动化以及超级计算机的突破性进展，目前短时临近天气预报正处于一场重大的转变之中。这对快速更新同化预报系统既是一个机遇也是一个挑战，它的未来发展仍将主要依赖于高分辨数值预报模式和同化技术的发展。

模式中许多物理过程影响着短临预报，其中主要涉及到微物理过程（对流与强降水）、下垫面与复杂地形过程（弱强迫条件下的对流发生发展、边界层变化）、湿度的初始化以及云与辐射的相互作用（大尺度云与降水）。目前高分辨数值预报模式特别是对物理过程的描述还无法完全满足短时临近预报的要求，特别是与对流与强降水密切相关的微物理过程。一般说来，云解析（cloud-resolving，1~3km水平分辨率）模式可以成功地模拟超级单体的实际结构和运动，但是云模式的成功并不意味着其能够正确地预报对流系统的发生发展，主要由于：1）如何在同化把握天气系统大尺度特征（如CAPE，shear）的同时，得到正确的初始对流系统结构（同化中远没有解决的问题）；2）目前的云微物理参数化方案，由于受计算能力限制，需假定云雾粒子的尺寸分布服从某种特定函数。在这种“总体（bulk）”的云雾微物理参数化框架下，即使有“完美”的初始条件，也无法或不能够精确描述对流系统的演变。可以预见在未来的20年，即便有计算能力的飞速发展，业务高分辨数值预报模式中使用“总体”云微物理参数化架构也无法改变，因此对微物理参数化中所产生的“非确定性”将主要依靠针对具体的应用/季节/地区的“调节（tuning）”来减少。

未来同化技术的发展要使系统能够进行各种精细的初始化，包括对流（风暴）的初始化，陆面初始化，地形（气）流初始化与云的初始化。在快速更新同化中对流（风暴）的初始化比其他过程的初始化更为重要。而对于风暴初始化，雷达资料的作用至关重要。未来雷达同化技术的发展面临着几个方面的挑战。对于反射率资料同化包括：1）改进简单技术

（如Z-R）中潜热和相对湿度的精度，2）保证与动力过程的平衡，3）精确的误差统计等。对于雷达径向风资料同化包括：1）合理有效的切向风反演，2）晴空杂波（clear air returns）的处理，3）保证与热力和微物理过程的平衡，4）速度退模糊。此外，随着计算能力的飞速发展，未来20年内风暴尺度模式的水平分辨率可能达到250m，现有的同化技术（变分方法、集合卡尔曼滤波、二者的混合同化方法等）哪个更合适高分辨率模式需要深入研究；对各种资料处理和质量控制的技术需要提高，对其误差的统计特征需要明确。

鉴于高分辨数值模式和资料同化的“不完美性”，许多中尺度天气系统本质上是不可进行“确定性”预报的，因此发展基于集合预报的短时临近概率预报是未来一个重要方向。美国已开始着手研发和试验以HRRR为基础的时间滞后集合预报系统（High-Resolution Rapid Refresh Ensemble，简称HRRRE），我国上海也开始了相关的业务试验。

如何评价快速更新同化系统对短临系统的预报能力亦是一个当前需要面对的难题。传统的模式评价方法难以对高分辨、高频次的快速同化系统做出客观评价，发展科学的、标准的检验技术对正确认识快速更新同化系统的能力具有重要意义。开发针对快速更新同化的标准检验技术并进行统一检验，这对我国未来发展和完善快速更新同化系统是十分有益的。

我国地域辽阔，地形复杂，决定了气候复杂多变，天气气候灾害频发，发展短时临近数值预报的能力十分必要。然而目前我国观测网资料的时空分布十分不均、关键观测仪器的类型不一致（西部C波段雷达、中东部S波段雷达）和观测资料误差的系统统计缺乏等，再加上地形、下垫面、海岸线等分布极为复杂等，都极大地增加了快速更新同化预报系统的发展难度。因此在我国短临预报业务发展规划中，应综合考虑发展覆盖全国的快速更新同化预报系统的必要性与可行性，在业务研究发展上要向相关领域倾斜；要考虑如何根据观测网资料条件和业务需要选择同化方法、模式分辨率和同化更新策略的问题。我国已明确了“科学调整站网布局、提升观测自动化水平、增强观测能力、确保观测系统稳定运行、发挥观测系统效益”的观测网发展方针，在未来观测网建设中，要进一步发挥数值预报技术的指导作用，如开展O S S E（Observing System Simulation Experiments）等，要充分考虑观测在数值预报尤其是快速更新同化系统中的

^① 2011年，WMO/WWRP Workshop on Use of NWP for Nowcasting，<http://wmo-workshop-on-the-use-of-nwp-for-nowcasting.wikispaces.com>。

应用和需要,以便最大程度地发挥观测网的社会及经济效益。

致谢:本文是在许小峰研究员和汤绪研究员的启发与鼓励下完成的,特此感谢。

参考文献

- [1] Benjamin S G, Devenyi D, Weygandt S, et al. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. Mon Wea Rev, 2004, 132: 495-518.
- [2] Benjamin S G, Grell G, Brown J M, et al. Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model. Mon Wea Rev, 2004, 132: 473-494.
- [3] Benjamin S G, Brown J M, Brundage K J, et al. From the 13-km RUC to the Rapid Refresh, AMS 12th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology (ARAM). Atlanta, GA, 2006.
- [4] Benjamin S G, Brown J M, Brundage K J, et al. From the radar-enhanced RUC to the WRF-based Rapid Refresh, AMS 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting. Park City, Utah, 2007.
- [5] Benjamin S G, Weygandt S S, Alexander C R, et al. NOAA's hourly-updated 3km HRRR and RUC/Rapid Refresh-recent (2010) and upcoming changes toward improving weather guidance for air-traffic management. 2011.
- [6] 范子勇, 陈敏, 仲跻芹, 等. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估. 暴雨灾害, 2009, 28(2): 119-125.
- [7] 陈子通, 黄燕燕, 万齐林, 等. 快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析. 热带气象学报, 2010, 26(1): 49-54.
- [8] 郝民, 徐枝芳, 陶士伟, 等. GRAPES RUC系统模拟研究及应用试验. 高原气象, 2011, 30(6): 1573-1583.
- [9] Wilson J W. Precipitation Nowcasting: Past, Present and Future. 6th International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, 2011.
- [10] Weygandt S, Benjamin S G. Radar reflectivity-based initialization of precipitation systems using a diabatic digital filter within the rapid update cycle. 18th Conf Num Wea Pred, Park City, UT, 2007.
- [11] Hu M, Xue M, Brewster K. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, Tornadoic Thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. Mon Wea Rev, 2006, 134: 675-698.
- [12] Hu M, Weygandt S, Benjamin S G, et al. Ongoing development and testing of generalized cloud analysis package within GSI for initializing Rapid Refresh, Preprints, 13th Conf on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. New Orleans, LA, 2008.
- [13] Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. Assimilation of METAR cloud and visibility observations in the RUC. 11th Conference on Aviation, Range, Aerospace and 22nd Conference on Severe Local Storms. Hyannis, MA, 2004.
- [14] Weygandt S, Benjamin S G, Dévényi D, et al. Cloud and hydrometeor analysis using metar, radar, and satellite data within the RUC/Rapid-Refresh model. 12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology. Atlanta, GA, 2006.
- [15] Weygandt S S, Benjamin S G, Brown J M, et al. Assimilation of lightning data into RUC model forecasting. 2nd Intl Lightning Meteorology Conf. Tucson, AZ, 2006.
- [16] Devenyi D, Benjamin S G. A variational assimilation technique in a hybrid isentropic-sigma coordinate. Meteor Atmos Phys, 2003, 82: 245-257.
- [17] Brown J M, Benjamin S G, Smirnova T, et al. Rapid-Refresh Core Test: Aspects of WRF-NMM and WRF-ARW forecast performance relevant to the Rapid-Refresh application. 18th Conf Num Wea Pred. Park City, UT, 2007.
- [18] Brown J M, Smirnova T G, Benjamin S G, et al. Rapid-Refresh testing: Example of forecast performance. 13th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology. New Orleans, LA, 2008.

《气象科技进展》在宁编委、读者座谈会

本刊编辑部

2013年3月15日,由南京大学大气科学学院和《气象科技进展》编辑部联合举办的“《气象科技进展》在宁编委、读者座谈会”在南京大学东南楼会议室召开,伍荣生院士,主编许小峰,副主编肖子牛,在宁副主编谈哲敏、管兆勇、费建芳,常务编委杨修群,编委王元、吴立广、翟武全以及在宁读者代表等近30人与会。

会上,许小峰主编向来自南京大学、南京信息工程大学、解放军理工大学、江苏省气象局的编委颁发聘书,肖子牛副主编代表本刊主办单位向各机构



本刊主办单位气象干部培训学院向在宁的气象教学和科研业务机构赠送《进展》合订本(摄影 王欢)

代表赠送了2011和2012年合订本。许小峰主编首先向与会者介绍了《气象科技进展》创刊以来逐渐形成的办刊理念和风格,对南京的专家学者给予的关心表示感谢,并希望得到更多支持。

编委和读者对《气象科技进展》的特色栏目给予了充分肯定,并希望《进展》将办刊宗旨一直坚持下去,使其成为

一本可读性高、具有资料性、可供读者反复查阅的刊物。与会代表还对《进展》未来的选题方向及约稿途径提出了很多宝贵的意见和建议。

多时间尺度气候变化

钱维宏

(北京大学大气与海洋科学系, 北京 100871)

摘要: 区域气候变化受到了滞后于规则和非规则强迫的日循环、年循环、年际、十年际、年代际和世纪等多时间尺度气候自然变化分量的影响。在20世纪, 全球平均气温变化大部分属于自然的气候变化, 还有一小部分属于人类活动对区域和城市气候变化的影响。21世纪之交的一个暖平台形成于多个时间尺度自然气候变化中暖位相的叠加。对年代际全球平均气温起调节作用的分量可能来自季风范围的变化。

关键词: 气候变化, 时间尺度, 人类活动, 自然气候变率, 季风范围

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.004

Climate Change of Multiple Timescales

Qian Weihong

(Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: A regional climate change consists of many components of the regular (periodic) and irregular forcing from diurnal cycle, annual cycle, inter-annual, decadal, inter-decadal and centennial timescales while every component is phase-lagged in its force. In the twentieth century, most of the global temperature increase belongs to the natural climate variability, and there is a small part of human activity impacts on regional and urban climate changes. Early in this century, a warm flat was the overlap of several temperature components. On the inter-decadal timescale, regulating global-mean temperature variation is associated with the expansion of monsoon domain.

keywords: climate change, time scale, human activity, natural climate variability, monsoon domain

1 引言

现代气候描述的是一段时期内气象要素和天气现象的平均或统计状态, 一段时期为月、季、年、数年到数百年以上的尺度。气候以气温(冷、暖)和降水(干、湿)两个基本的要素表示, 通常用某一时段的平均值和离差值表征。气候是某一时段内热平衡下的大气多要素状态分布。

依照现代气候描述, 气候的最短时间尺度为月。不同月、不同季、不同年、不同的十年、不同的百年, 这些时间段上的气候是不同的, 所以就出现了气候变化。在这些时段上, 当气候变化的幅度较大并且出现了灾害时, 这样的气候称为异常气候事件。

现代气候的描述与欧洲古代气候的描述完全不同。气候(climate)一词源自希腊语中的klima, 意思是倾斜, 指的是地平线上太阳光线倾斜的角度。古希腊人早已知道气候的冷暖与太阳的入射倾角有关, 极地入射倾角小则冷, 赤道上入射倾角大则暖。

现代人有了比古代人更精确的气象观测数据。本文试图用古希腊人的思想, 还气候及其变化一个合理的描述与认识, 因为只有把气候及其变化客观地认识了, 对极端天气事件和异常气候事件的预报才有可能。

2 规则外源强迫引起的气候变化

依照古希腊人的气候(冷暖)与太阳入射倾角有关的描述, 我们可以得到下列循环的气候变化。每天, 从日出、正午到日落, 太阳高度角随时间有周日变化, 地球上各地气温有日循环变化。正常(无天气系统影响)的日最高气温在正午太阳辐射最大值之后, 在下午14~15时, 而日最低气温出现在日出前。一地24h内的气温日较差可以达到10℃以上, 平均每小时的温度变化在1℃左右, 有些地区和时段甚至大于1℃/h。一地气温随时间的24h变化也导致了相邻地区的温差, 最高温度随地理位置的移动就像潮汐。这是由于地球自转周日太阳辐射循环引起的气候周日气温循环变化和区域温差变化(温度潮), 其因果关系和变化的幅度都是清楚的。日最高气温滞后太阳辐射最大值的气候响应数学描述是^[1]:

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} = F(t) - (L + D)\bar{S} \quad (1)$$

收稿日期: 2012年1月13日; 修回日期: 2012年3月12日

第一作者: (1957-), Email: qianwh@pku.edu.cn

资助信息: 中国科学院战略性先导科技专项

(XDA05090400)

其中, $\bar{S}$ 是大气系统中所有大气变量构成的气候部分; $F(t)$ 是外界对大气系统的强迫 (如太阳辐射), 也是时间的函数; L 为线性作用关系; D 为耗散作用。气候随时间的变化 $\bar{S}$ 与强迫 $F(t)$ 之间在时间上不是同时的对应关系^[1], 而有一个时间上的滞后 $-(L+D)\bar{S}$ 。在大气中, L 和 D 与大气流体的热力学性质有关, 如扩散过程等。地球上, 一地气候的日气温逐小时变化, 是地球自转太阳辐射量变化的结果。描述大气热力、动力性质的观测变量有多个, 它们的变化既有天气部分的扰动, 也有气候部分的规则变化和观测误差。在一个地方, 这些变量的日循环随时间的变化需要有所认识, 因为这样的认识事关当地逐时相对日循环气候的偏差 (或局地极端) 天气的预报。

地球绕太阳存在周年的公转循环。太阳直射北回归线的时间是在每年的6月22日, 这时北半球接受到的太阳辐射量是全年最多的。可是, 北半球大气温度、湿度、降水和风等量都是在7月底至8月初达到最大值^[2]。南半球的大气变量最大值也是在太阳直射南回归线之后一个月。在年循环上, 不同纬度的大气变量变化与太阳辐射驱动的滞后关系也遵循式 (1) 描述的动力学特性。地球上, 温度年循环依纬度和地形而变, 可以有 $10\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化幅度。如果按照年循环温度变化 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分配到每个小时上, 则变化速率是 $6.8\times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。显然, 太阳辐射强迫的温度年循环变化速率远小于日循环的温度变化速率。相邻地区年循环的温差驱动了大气环流和气候的年进程。

海气相互作用具有非规则的年际变化, 表现为赤道太平洋海温和气温在年际尺度上有 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化幅度, 其变化速率是 $1.4\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。相邻地区的年际异常温差形成了大气环流和气候的异常。

为什么要分析这些周期性强迫下的大气变量变化速率? 这是因为大气是一个耗散的非线性系统, 规则强迫下的大气有线性的气候响应, 也会出现非线性的天气尺度扰动。越大的温度变化速率, 它们的非线性效应会越大。从这个角度看, 日循环的强迫对极端天气的作用最大。这就是夏季对流性天气具有强烈的日变化的原因。

太阳活动有一个准11a的周期。太阳活动的这一周期性变化也会影响地球气温的变化。这个周期强迫改变的全球平均温度幅度约为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3], 变化的速率为 $1.0\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。全球平均气温的准11a循环变化的位相滞后太阳辐射准11a周期的位相 $1\sim 2\text{a}$ 。此外, 太阳活动和全球平均气温也都有准22a的位相循环周期变化, 气温变化的每小时速率大约是准11a变化的

一半。在全球气温变化的准11a、22a和海气耦合形成的准60a周期中, 准60a周期的气温变化幅度最大, 为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[4], 变化的速率为 $3.8\times 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。

地球上, 一地的气温变化, 受到地球自转日循环太阳辐射量变化、地球公转年循环太阳辐射量变化、年际海气非规则变化、太阳活动准11a和准22a周期变化的影响。全球平均气温变化还有准100a和准200a的周期变化^[3], 它们的变化幅度分别为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。太阳辐射可能还存在年代际尺度和百年尺度的变化, 但缺少太阳辐射观测序列, 尚不能描述与气温变化的关系。地球相对太阳运行的轨道三参数具有几万年到几十万年的变化, 决定着地球气候的冰期和间冰期的旋回, 称为Milankovich或冰期轨道理论。这些规则的气温变化是规则性外强迫的结果, 多与太阳辐射变化有关。每一个气温分量的变化都是滞后太阳辐射的, 也就是太阳辐射每个分量的变化是气温每个分量变化的前期信号。每个分量的气温是规则变化的, 但不同规则分量叠加后常常出现非规则的变化, 甚至很大的非规则突变。21世纪初的全球平均气温暖平台就是多个周期峰值位相叠加的结果^[3, 4]。

表1中给出了能够定量表征的几种最大气温变幅及其变率。大气是一部热机, 根据热力学第二定律, 相邻地区的温差决定了大气热机的效率。单位时间内的温度变率越大, 可能对应着相邻地区的温差也越大, 热机效应形成的环流异常和天气气候异常也会越明显。所以, 气温变化的速率是形成大气变量异常波动和异常天气现象 (如强降水等极端事件) 出现的根本原因。由表1, 我们很容易解释日循环的温度变率最大, 能够解释较多的强对流极端事件。其次是年循环的温度变化速率, 暴雨等极端天气和异常气候事件就有年循环的周期。第三位的是年际温度异常, 赤道太平洋海温异常下的大气环流异常和天气、气候异常是人们关注的课题。再其次是11a的温度变化速率, 中国近50a的区域暴雨事件数就有准11a的周期^[5]。22a、60a和百年尺度的温度变化的速率都比较小了, 也缺少可分析的极端天气和异常气候事件的具体资料。在表1的8个时间尺度中, 温度日循环变率是年循环变率的100倍, 年循环温度变率是年际温度变率的10倍以上, 而其他尺度温度循环变率比年循环变率小1000~1万倍。因此, 日循环的逐时气候和年循环的逐日气候是需要倍加认识的。

3 百年气温趋势分解

气候变化受制于外源强迫, 并且在变化位相上滞后于外源。利用近千年和近百年全球平均气温序列,

表1 气温的多时间尺度循环及其变率

时间尺度	日	年	年际	11a	22a	60a	100a	200a
变幅 (°C)	10.0	60	5	0.1	0.1	0.2	0.09	0.13
速率 (°C/h)	1.0×10^0	6.8×10^{-3}	1.4×10^{-4}	1.0×10^{-6}	5×10^{-7}	3.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}

20世纪全球平均气温的增幅是 1°C ^[3, 4]。在 1°C 中, 有 0.56°C 属于自然的规则外强迫结果。需要确认的是: 20世纪百年气温增加的另外 0.44°C 的原因(外强迫)有哪些。引起这一气温趋势的可能原因包括: 来自自然的太阳辐射强迫和全球季风降水变化, 以及人类活动的影响。我们可以对它们逐一分析。

18世纪, 人们普遍认为将温度计放在一个没有炉火的朝北房间里测量室温就足够了, 后来放在太阳直射不到的墙体北侧。到19世纪, 温度计才进驻到了百叶箱里。用塑料百叶箱代替木质百叶箱和用电子温度计代替酒精温度计后, 气温可降低 0.4°C 。志愿船舶测量海水温度, 木质吊桶与帆布吊桶取水和在船的不同部位取水, 测量到的海温也可相差 $0.4 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 。随着城市的发展, 原来在郊区的那些气象观测仪器现在已经在城市中心区了。气温升高也受到城市发展的影响, 但自然温度的量值难以确定。

同样在一个城市, 在水体附近(或公园里)的近几十年气温趋势大约是其他观测气温趋势的一半^[5]。全球(或北半球)的平均气温趋势应该是所有地球表面上气温趋势的面积平均值。一个比较客观的做法是在地球表面用经纬网格点的气温计算得到全球平均气温。然而, 那些观测站几乎都不在网格点上。于是, 网格点上的气温值是由那些城镇观测站外推(插值)得到的。20世纪早期, 大部分陆地上缺少观测站。近年来在高山、荒漠、极地和海岛上增加了一些观测站, 但大部分原始气象资料主要还是来自城镇观测。

要得到一条去除城镇发展影响、能够代表百年全球面积平均气温自然变化的序列, 仍然是有待探索的课题。

选择美国9个特大城市(纽约、洛杉矶、芝加哥、圣安东尼奥、圣地亚哥、费城、达拉斯、休斯顿、菲尼克斯), 以城市中心径向的延长线画圈, 得到距离城市中心不同宽度带上的110a(1900—2009年)气温趋势^[5]。在距离9大城市中心平均50km范围内, 百年增温趋势为 $1.0 \sim 1.8^{\circ}\text{C}$ (图1a)。在距离9大城市中心平均100~500km之间, 百年增温趋势是 $0.6 \sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 。后者代表了美国中小城镇的平均百年气温趋势, 而真正的百年自然温度变化并不知道。

同样, 选择中国9个特大城市(上海、北京、重庆、武汉、天津、广州、沈阳、成都、西安), 以城市中心径向延长线画圈, 得到距离城市中心不同宽度带上的49a(1960—2008年)气温趋势^[5]。在距离9大城市中心平均50km范围内, 每10a增温趋势为 $0.30 \sim 0.35^{\circ}\text{C}$ (图1b)。在距离9大城市中心平均100~500km之间, 每10a平均增温趋势是 0.23°C 。近50年的特大城市增温速率是 $1.5 \sim 1.8^{\circ}\text{C}$, 而后者的增暖趋势是 1.15°C 。显然, 大城市的增暖趋势总是大于中小城市的增暖趋势, 然而真正的近50a中国自然温度变化并不知道。

百年全球经纬网格点上的自然温度观测数据是没有的。百年全球观测站点上的自然温度资料也是较少的。所以, 要得到一条代表全球平均的百年

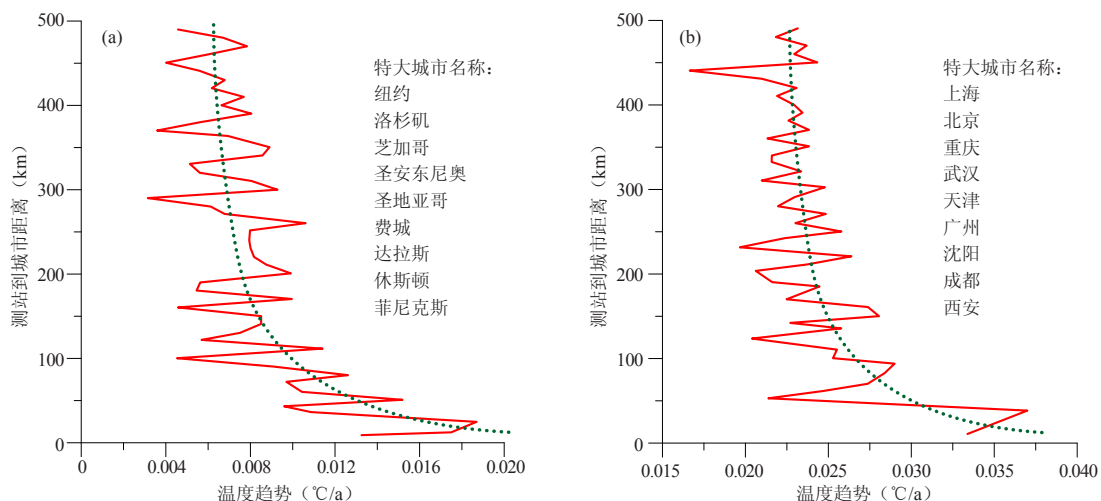


图1 美国 (a) 和中国 (b) 站点温度趋势 (°C/a) 相对9个特大城市中心距离的关系
美国9个特大城市人口>100万; 中国9个特大城市人口>400万

自然气温序列的难度还很大。北京地区20个站有1978—2008年间的观测气温,其中有一半的站位于市区,另外的站在山区和郊区。市区的年平均气温在12~13℃之间,山区和远郊的年平均气温在6~11℃之间^[5]。1978—1998年,北京地区的平均气温趋势为每10a增暖1℃左右,城区每10a增暖达到1.2~1.3℃。1998—2008年期间,北京地区的平均气温趋势是-0.05℃/10a,与1998—2008年全球平均气温的趋势相当^[4]。在空间分布上,1998—2008年期间,北京城区仍然有0.1~0.24℃/10a的增暖趋势,其中朝阳站、顺义站、大兴站和北京站的近10年增温趋势分别为0.24, 0.23, 0.12和0.11℃,而远郊山区有4个站(斋堂、霞云岭、汤河口和上甸子)的降温趋势达到-0.30~-0.40℃/10a^[6]。其他研究者对中国的城市气温变化有基本相同的估计。Jones等^[7]得到1951—2004年中国城市化引起的区域增暖大约为0.1℃/10a,而这期间中国区域的增暖为0.81℃。Ren等^[8]发现,由城市化引起的城市热岛对区域增暖趋势的影响,大城市和小城市分别为0.16℃/10a和0.07℃/10a。Yan等^[9]得到北京地区1977—2006年的增暖趋势为0.78℃/10a,而与城市热岛相关的偏差为0.20~0.54℃/10a。这些趋势的年份都较短,也只反映了区域性的城市化影响。

20世纪全球平均气温百年增暖的0.44℃趋势中,有多少来自城市发展的影响,是需要进一步研究的课题。另外,近千年的全球平均气温序列中,从中世纪暖期到小冰期,平均气温下降了0.24℃,反映的是300~400a的外强迫气温变化。这种时间尺度的外强迫和全球气温变化还会继续存在,即会出现0.2~0.3℃的自然增温。如此估计,20世纪全球增暖0.44℃中仍然存在几百年长时间尺度自然气温变化的上升支贡献,也有20世纪百年人类活动(包括城镇化)对增暖的贡献。

4 东亚季风与全球气温的变化关系

20世纪百年增暖1℃中有0.56℃属于多源强迫的自然变化,它们由准10a、准20a、准60a和百年尺度的变化组成^[3, 4]。其中准10a、准20a和百年尺度的气温变化与太阳辐射变化有关,只有准60a的气温变化是海气相互作用的结果。

对全球平均气温有影响的一个重要方面是全球雨日的多少。已有的分析认识到在年代际尺度上,中国的雨日数与高温日数呈反比关系^[10]。近几十年来,我国东部地区南方雨日数和年雨量趋于增多,而北方雨日数和雨量是减少的,这种南北方相反的变化趋势归因为东亚夏季风的减弱^[11]。全球平均气温与全球季风强度(范围)的年代际自然变化可能是气候变化中的两个主要方面。根据全球季风是“热带大气(三大)水汽中心随赤道气流流向赤道外季节扩展”的定义^[12],全球季风向副热带地区的范围扩展,对应降水范围也扩大,全球平均气温会偏低。但是,目前要证实这一定义下的关系还缺少全球百年尺度季风范围变化和全球降水的观测资料。

在东亚地区,夏季风推进与当地和全球平均气温变化之间存在一些位相上的对应关系。图2给出近千年来中国东部夏季干湿型指数与去长期冷暖气候态平均和趋势后的全球平均温度距平序列^[13]。中国东部干湿型指数^[14]是根据当地政府历史文献记录整编的公元950—1980年中国东部夏季(5—9月)逐年干湿模态和1951年以来的观测降水换算的干湿模态。站点上的干湿程度分为5级:干旱,干,正常,湿和洪涝,分布于中国东部的华北、长江和华南地区。器测资料反映出,十年尺度上中国东部干湿型指数高(低)值期,对应北方降水偏多(少),南方降水偏少(多),对应的季风环流表现为来自热带印度洋、热带太平洋和南半球的夏季低层大气气流偏强(弱),到达东亚的水汽输送量多(少)。这1000a干湿分布型序列中主要有年际、十年际和年代际变化的信号,

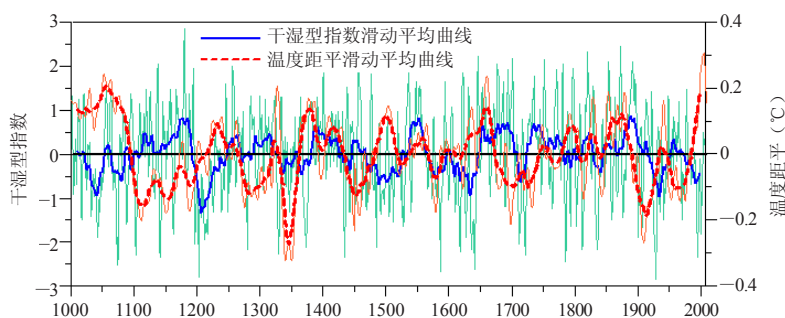


图2 公元1000—2008年东亚夏季风干湿型指数7点(细线)和21点(粗蓝实线)滑动平均序列与去长期冷暖气候态平均和趋势后的全球平均温度距平(红细线)及其21点滑动平均序列(虚粗线,单位:℃)

而难以包含几百年时间尺度的变化信号。这是因为，人的记载可以分辨出年与年和年代与年代之间的气候差异，但难以分辨出几代人之间的气候差异。

为了在时间尺度上与中国东部干湿型指数的变化一致起来，近千年的全球平均温度序列取用了去除中世纪暖期（MWP）、小冰期（LIA）和近代全球增暖期（GWP）期间气候态温度变化后的序列^[3]。图2中，两条序列之间存在着十年际、年代际和百年尺度的变化，它们之间的变化位相是相反的，同期相关系数值为 -0.11 （ $P < 0.01$ ）。它们之间的相反变化关系需要分下列几步进行理解。首先，在强（弱）的全球季风期间，来自热带印度洋、热带太平洋和南半球的夏季低层大气气流偏强（弱），输送到达中国华北的水汽量多（少），对应中国东部干湿型指数高（低），中国北方降水多（少）和南方降水少（多）。其次，中国北方降水多（少）和南方降水少（多），即中国东部干湿型高（低）指数期间，中国气温偏低（高），而中国年代际温度变化与全球平均温度变化是基本同步的^[15]。中国或东亚位于副热带季风区中，这里季风范围变率是全球最明显的。

5 结束语

气候是热平衡下的大气多要素状态分布。表征气候的两个基本量是气温（冷暖）和降水（干湿）。一地的气候及其要素具有日循环、年循环、十年际、年代际、世纪和地球地质时期尺度的连续变化。这些规则的气候及其变化是太阳辐射多时间尺度变化以及地球轨道参数变化的结果。时间尺度越短，单位时间的气候变化速率越大。气候还存在非规则变化，与非规则的外强迫，如年际海气相互作用、人类活动等有关。世纪之交，被认识的几个时间尺度自然气温变化都达到了暖位相，它们的叠加形成了一个暖平台。人类活动对城市化和城镇化的影响也达到了历史最高。自然和人类活动累加的气温必然成为历史新高。

20世纪，全球气温增暖了 1°C ，其中有 0.56°C 属于十年际、年代际和世纪尺度自然气候变化的叠加。另外的 0.44°C 是人们需要进一步认识的部分。人们很难得到覆盖全球的20世纪百年自然气温，得到的气温中已经包含了城镇化发展的影响。从中世纪暖期到小冰

期的降温幅度为 $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 。由此预估，几百年的自然气温变化也会出现在近百年的气候变化中。这样，20世纪的百年增暖 0.44°C 中，有部分（ $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ ）属于人类活动（包括城镇化）的影响。

在十年际、年代际和百年尺度上，中国东部干湿型指数序列与全球平均温度序列之间存在着明显的反相关关系。中国东部干湿型指数与东亚副热带季风推进，与全球季风范围扩展，与全球平均温度变化，它们之间的关系和它们之间的影响机理都需要加以研究。全球季风区主体位于热带和副热带地区，而全球温度变化最敏感的地区是在中高纬度地区。全球季风范围与全球平均温度，它们应该成为描述全球气候变化的两个主要方面。当前的气候变化研究中需要加强全球季风方面的研究。

参考文献

- [1] 钱维宏. 如何提高天气预报和气候预测的技巧? 地球物理学报, 2012,55(5): 1532-1540.
- [2] Qian W H, Tang S Q. Identifying global monsoon troughs and global atmospheric centers of action on a pentad scale. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2010, 3(1): 1-6.
- [3] 钱维宏, 陆波. 千年全球气温中的周期性变化及其成因. 科学通报, 2010, 55(32): 3116-3127.
- [4] 钱维宏, 陆波, 祝从文. 全球平均温度在21世纪将怎样变化? 科学通报, 2010, 55(16): 1532-1537.
- [5] 钱维宏. 气候变化与中国极端气候事件图集. 北京: 气象出版社, 2011.
- [6] 钱维宏, 李进. 北京地区长期增暖中的一个减缓期. 气候变化研究进展, 2012,8(3): 178-182.
- [7] Jones P D, Lister D H, Li Q X. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. J Geophys Res, 2008, 113, D16122, doi: 10.1029/2008JD009916.
- [8] Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. J Climate, 2008, 21: 1333-1348.
- [9] Yan Z W, Li Z, Li Q X, et al. Effects of site change and urbanization in the Beijing temperature series 1977—2006. Int J Climatol, 2010, 30: 1226-1234.
- [10] Ding T, Qian W H, Yan Z W. Changes in hot days and heat waves in China during 1961—2007. Int J Climatol, 2009, doi: 10.1002/joc. 1989.
- [11] Fu J L, Qian W H, et al. Trends in graded precipitation in China from 1961 to 2000. Adv Atm Sci, 2008, 25(2): 267-278.
- [12] Qian W H. Dry/wet alternation and global monsoon. Geophysical Research Letters, 2000, 27(22): 3679-3682.
- [13] 钱维宏, 林祥, 朱亚芬. 东亚夏季风年代际进退与中国和全球温度变化的联系. 科学通报, 2012, 57(26): 2516-2522.
- [14] 钱维宏, 朱亚芬, 汤帅奇. 重建千年东亚夏季风干湿分布型指数. 科学通报, 2011, 56(25): 2075-2086.
- [15] 李学勇, 秦大河, 李家洋, 等. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007.

气候变化对中国经济系统的影响及评估方法评述

付雨晴 丑洁明 董文杰

(北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室/全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘要: 基于经济学的视角, 通过搜集气候变化对经济系统各方面的影响与评估方法研究的相关文献, 发现我国气候显著的区域特征、经济系统的复杂性, 导致我国不同地区、不同行业受到气候变化影响的因素和程度皆有所不同。目前研究气候变化经济影响的方法主要有以模型为依据的经验统计法、自然机理法和经济机理法以及其他非模型法。经济机理法是本文研究方法的分析重点, 主要有成本效益法、生产函数法和均衡分析法。通过评价发现, 经济机理法研究气候变化经济影响的局限性在于模型的动态模拟和对气候变化的长期预估能力, 这两方面亟需改进。

关键词: 气候变化, 经济系统, 经济影响, 评估方法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.005

Impact and Its Assessment Methods of Climate Change on the Economic System of China

Fu Yuqing, Chou Jieming, Dong Wenjie

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology/College of Global Change and Earth System, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Against the background of global climate change, we use the thinking pattern of economic analysis with large numbers of literature about the impact of climate change on the economic system and their assessment methods, only to find that the influences of climate change on different regions and different trades are different, because of our country's climate geographical characters and economic complexity. Nowadays, assessment methods of climate change on the economic system could be divided into Model Analysis such as Empirical Statistical Analysis (ESA), Natural Mechanism Analysis (NMA) and Economic Mechanism Analysis (EMA) and Model-independent analysis. EMA is the key point to be analyzed in this paper, which is combined with Cost-benefit Approach, Production Function Method and Equilibrium Analysis Method. Finally, we find that what we need to do next with the assessment research is to improve the dynamic analysis and long-term estimate ability of our models.

Keywords: climate change, economic system, economic impact, assessment method

1 引言

研究表明^[1], 除非采取重大的行动, 否则到2100年, 大气中CO₂的浓度水平将达到工业化以前的两倍, 全球平均气温将比1900年升高1.4~5.8℃。值得注意的是, 气候变化不仅仅是全球平均气温增加的问题, 它存在温度、湿度、光照、气候事件等在区域上的复杂差异性^[2]。这种以变暖为主要特征的气候变化状况对世界各国的社会经济系统都会有不同程度的影响。1991—2000年间, 气象灾害造成全球财产损失达500~1000亿美元/a, 预测21世纪该数字将达到约3000

多亿美元/a^[3]。中国作为发展中的大国, 气候变化对其经济带来的影响不容忽视。Fankhauser^[4]计算出气候变化对中国社会经济系统的影响达到GDP的4.7%; 罗慧^[5]利用带一阶自回归变量分析得到中国1984—2006年的中国GDP总值对气象条件变化的敏感性影响约为12.36%; 而作为我国主要行业的农业, 农作物产量受气候变化影响导致的粮食安全问题日益突出, 2030年我国粮食生产将存在7%~8%的缺口^[6]。预计到2050年, 中国人均GDP约为1万美元, 总人口为15.4~15.8亿, 气候变化对中国经济的影响将更为严峻^[7]。因此, 研究气候变化对中国等发展中国家经济系统的影响是极具价值与意义的^[8, 9]。经济本身是一个非常复杂的系统^[10], 气候变化对经济系统的影响包括直接经济影响和包括政策在内的适应与减排带来的间接经济影响两个方面^[11]。因而, 探究气候变化对经济系统影响的科学评估方法亦是该领域的难点和热点问题。

收稿日期: 2012年9月27日; 修回日期: 2013年2月26日
第一作者: 付雨晴(1988—), Email: fuyuqing7@163.com
通信作者: 丑洁明(1965—), Email: choujm@bnu.edu.cn
资助信息: 国家重大科学研究计划(2012CB955700);
国家自然科学基金项目(41175125)

2 资料选取

通过对以往相关研究的梳理,本文尝试从三个角度对经济系统进行界定。第一是理论划分法:依据理论,经济学可以划分为微观经济学和宏观经济学,因此,可以将经济系统划分为微观经济系统和宏观经济系统。第二是地域划分法:依据气候条件相似原则与行政区域完整原则,结合研究需要将中国划分为七大不同区域,进行气候变化影响的研究。其中,华北地区包括北京市、天津市、河北、山西和内蒙古;东北地区包括辽宁、吉林和黑龙江;华东地区包括上海市、江苏、浙江、安徽、江西、福建、山东和台湾;华中地区包括湖北、湖南、河南;华南地区包括广东、广西、海南、香港和澳门;西南地区包括四川、云南、贵州、重庆和西藏;西北地区包括陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆。第三是行业与部门划分法:研究气候变化对经济系统的影响应尽可能涵盖整个国民经济体系内的所有行业和部门,包括农业、林业、畜牧业、渔业、水资源、环境、基础设施、生态系统、人类健康、国家安全等。通过这些划分与界定,各研究领域的学者既可以从不同角度研究气候变化对经济系统的影响,又可以直接考虑对整个经济系统的影响。

目前有很多数学模型来评估气候变化的经济影响^[12],但多是基于政策的综合评价,本文的重点是探寻各方法的特点和优缺点,为寻求最优的气候变化影响评估方法提供思路。

本文资料主要是通过文献检索得到,所使用数据库包括中国知识资源总库(CNKI)、维普和Google学术。主要方法是:(1)以“气候变化”作为“主题”进行初次检索,在此基础上分别以“极端气候事件”“气候变暖”“气候灾害”“经济系统”“经济影响”“经济评估”“经济特征”“经济模型”“计量经济”“农业”“林业”“工业”“保险业”“旅游业”“制造业”等为“关键词”进行二次检索,循环文献检索的主要原则,剔除与经济系统影响和评估研究无关的文献;(2)通过Google学术搜索,分别输入上面对应的英文关键词进行检索,获取部分重要英文文献;(3)利用图书馆,搜索与本论文有关书目,通过阅读相关书籍获取有用信息。检索统计的截止时间为2012年5月30日。

3 气候变化对中国经济系统影响

中国气温总体增加但时空分布极不均匀,其中北方增加幅度大于南方地区,内陆地区大于沿海地区;降水量变化比温度变化复杂,西部和华南地区降水增

加,西北中部、青藏高原西南部、华中至华北和东北中部地区降水减少;极端气候事件主要表现为北方干旱、江淮流域洪涝、沿海热带气旋频发,并且这种趋势日益明显^[13,14]。未来,中国温度和降水的变化将更加突出,与1961—1990年平均温度相比,2020年我国年平均温度将可能增加0.2~3.7℃,2100年将增加到1.3~8.9℃,变暖幅度由南向北增加;不少地区降水出现增加趋势,但华北和东北南部仍缺水^[15,16]。

根据我国气候变化特征,目前气候变化对我国经济影响的研究主要侧重两个方面:一是气候变化对经济系统总的影响存在不利性,即从全球角度考虑不利影响会更加不利,有利影响会由于其后气候进一步变化变得不利^[17];二是气候变化对经济系统不同尺度的影响存在不均匀分布性,这表现为气候变化影响依据时间、区域和行业的不同而产生差异^[18,19]。表1和表2总结了前人在这两方面的主要工作成果,分别给出了气候变化对我国不同地区和行业现有影响的评估和未来趋势的预估结果。

4 气候变化对经济系统影响评估方法的研究

4.1 国内外研究进展

目前,国内外研究气候变化经济影响的方法众多,国内外研究思路大都是从单个区域和单个部门向多区域多部门发展。Adams等^[52]基于成本效益法分析了美国农业的气候经济影响情况,这种方法既无法反映其他部门受气候变化的影响,也无法反映出农业与其他行业间的联系。Tol^[53]、Nordhaus^[54]和Fankhauser^[55]尝试将不同的地区和领域采用一定的模型和方法计算气候变化带来的经济损失结果,通过一定的集合方法进行综合,得到气候变化给全球带来的整体经济影响,基本上常用的方法有简单求和、平均和加权平均三种,这样的研究方法可以在一定程度上反映出多区域多部门的气候对经济综合影响情况,但是仍然没有体现出经济系统作为一个整体,各个子系统之间的相互作用情况,也没有反映经济系统的运行机理。Mendelsohn等^[56,57]利用综合评估模型的思想对气候变化的经济影响进行分析与评估;一般均衡模型(CGE模型)是目前国外进行综合评估较为常见的经济模型,Berrittella等^[58]和Basello等^[59]利用CGE模型对世界不同经济区域的旅游业和人类健康进行了综合分析,这一模型也能将不同经济区域和部门的相互作用结合起来,反映一个相对动态的结果;Basello等^[60]将局部均衡模型与一般均衡模型进行综合,既反映了气候变化对社会经济带来的影响,同时也反映出一定的适应措施带来的经济应对状况。这种动态的综合评价模型

表1 气候变化对中国经济系统影响的区域特征

地区	影 响
华北	水资源短缺、供水不足，工业用水比重增加12%，海河流域地表径流1980—2000年比1956—1979年减少41%；农业产量与种植布局明显北移，冬小麦种植北界北移30—50km；年受灾面积基本维持530万hm ² 左右，年损失值约数百亿计。预计未来一定程度增温利于农业生产，但是作物在20世纪末普遍减产；生态系统会退化甚至消失，森林生态系统结构发生变化 ^[20] 。
东北	作物生产条件发生改变，近十多年来，水稻向北扩张，种植北界北移了4个纬度 ^[21] ，2004年玉米和大豆单产相对1978年而言，分别增长了1.1倍和1.7倍；病虫害和旱灾不利农业生产；生态环境恶化，1995—2003年牧草地总面积持续减少约254.05万hm ² 。未来干旱化加剧，水资源需求更加紧张，气候变暖导致作物生产潜力和品质下降、新的病虫害发病几率增大等问题。
华东	近30年农业旱灾面积波动较大，占播种面积的比例为3%~14%，农业水灾面积呈递增趋势，波动范围在2.5%~9%之间 ^[22] ；1949—2006年的年均粮食减产率波动在1.05%~2.51%之间 ^[23] 。基础设施受损严重，2005年麦莎台风导致1.5万间房屋倒塌，直接经济损失达13.4亿元。未来降水增加，洪涝增多，由此导致的各类传染性疾病可能增多，能源需求更加紧张，出现百年一遇甚至千年一遇洪水的可能性加大。
华中	近30年农业减产率范围在2.08%~2.51%；洪涝灾害严峻，2002年全区受灾面积直接经济损失占全国洪涝灾害损失的32%；湿地面积减少，湖北省湖泊和湿地面积近50年分别减少84%和40%。血吸虫病害占全国85%左右 ^[24] 。预计未来高温热浪天气频率和强度加大，洪旱交替频繁，后60年洪涝灾害频率明显增大；湿地物种资源减少，生物多样性降低；血吸虫病害由于“退田还湖”等政策出现一定程度的加重 ^[25] 。
华南	海平面上升加速，高出近30年来平均上升速率1.3mm/a ^[26] ，海岸生态系统严重退化，海南东寨港红树林面积锐减49%，珊瑚礁破坏率达80%；珠三角城市群热岛强度呈逐年增强趋势，≥35℃的高温日数年均均在30天以上，导致人员伤亡和气象灾害频发。预计2100年海平面上升0.6~0.74m，珠三角经济发展严重受损；水资源供需严重失衡，各种传染病肆虐；红树林北界北移，珊瑚白化范围扩大。
西南	干旱、洪涝频发，程度加重，2006年四川省受干旱影响造成经济损失79.6亿元；物种减少，林线海拔大约每年上移8.5m ^[27] ，石漠化山区森林覆盖率不及10%。预计未来山地灾害活动强度、规模、频率和范围将加大，损失更为严重；2050年的经济损失将达到20世纪80年代的8倍；生物多样性受到气候变化影响，大熊猫栖息地向西北方向转移。
西北	近50年灌养气候产量提高10%~20%，雨养产量减少10%~20% ^[28] ；畜牧业发展受益；土地沙漠化总体上得到遏制，但是局部地区呈加重趋势，西北东部植被面积减少约4.77%。未来降水增多，但仍缺水；2030年前，年缺水量约为200亿m ³ ；2050年后，农牧交错带边缘和绿洲边缘沙漠土地有所增加。半干旱地区潜在沙漠化趋势增大，单位草地生产力最大可能增加13%~23%。主要造林物种北移，森林虫害程度加重。

表2 气候变化对中国经济系统影响的行业差异

行业	影 响
第一产业	农业
	林业
	牧业
	渔业
第二产业	水资源
	能源
	制造业
	交通运输业
第三产业	保险业
	旅游业
	人类健康
过去60年，我国耕地和粮食生产重心向西北偏移 ^[29] ，全国主要作物的平均生育期延长了6.6d；1980—1993年，气象灾害造成损失达同期粮食生产的6% ^[30] ；2007年低温冻害和雪灾带来的直接经济损失达到186.5亿元 ^[31] 。CO ₂ 倍增情景下，中国作物全年生长期延长8~32d ^[32] ，2050年中国一熟制区的面积将由现在的62.3%缩小到39.2%，三熟制区的面积将由目前的13.5%扩大到35.9%，二熟制区的面积基本不变；主要作物的产量平均将可能减少5%~10% ^[33] 。	
我国森林分布北移，林线海拔上升，春季物候整体上提前，呈现北方提前、南方推迟趋势；同时病虫害危害加重，20世纪90年代以来，全国森林病虫害年均发生面积相当于年均人造林面积的80%。温度上升1℃，平均物候提前3.5d；CO ₂ 浓度倍增时，林业生产力上升12%~35% ^[34] 。据估计，红树林综合价值为1万元/(hm ² ·a)，全球红树林每年的综合价值可达16亿美元；我国红树林退缩严重，温度上升2℃，红树林北移2.5个纬度，未来直接经济损失不小 ^[35,36] 。	
我国90%的草地产量变化由降雨量造成 ^[37] ，北方草场退化后的产草量减少50%~60% ^[38] ，草地质量也会下降，20世纪90年代，青藏高原牧草高度相比80年代末下降30%~50% ^[39] ；CO ₂ 浓度倍增时，年平均温度上升4℃，降水量增加15%，改良牧场的干草产量增加约2/3，未改良的增加50%。暖干气候对家畜健康、生长和繁殖也有较大影响，高温可能使奶牛产奶量下降20%~30%，过去几十年新增30多种病毒疾病，大规模高密度集约化的养殖场受影响更加严重 ^[40] 。	
淡水渔业：CO ₂ 浓度倍增后，冷水性和暖水性鱼类等温线（25℃）分别北移1~3个纬度和3~6个纬度，西多东少；中纬度水域的鱼重增加收益最大，高/低纬度收益较少；各地鱼类性成熟提前，北多南少，相差5倍之多 ^[41] 。 沿海渔业：气候变化下传统渔业消失可能增加纠纷，鱼群繁衍受到影响，研究表明我国四大海区主要经济鱼种的产量在气候变化之后降低了5%~15%，渔获量降低幅度降低1%~8% ^[42] ；海洋生态系统破坏，珊瑚礁白化。	
东北、华中、华南及西南地区诸流域降水量减少，其余地区呈增加趋势；地表趋于旱化，黄河流域20世纪90年代后比90年代前蒸发量增加41mm；水资源供需矛盾加剧，目前正常年份全国缺水近400亿m ³ ^[43] ；水环境污染呈加重态势，20世纪90年代以来，全国有1/4的测站水质恶化。未来北方径流量减少而南方增加，各流域年平均蒸发将增大，其中黄河及内陆河地区可能增大约15%。2050年，西部冰川面积将减少27.2%，西部融水总量年增长20%~30%。	
影响能源需求和供应。冬季采暖需求变化随纬度增加而减少，需求变率范围在10%~20%，东部采暖需求大于西部，1980年代中期以来，中国取暖区北界北移，110°E以东地区北移达到2个纬度；夏季降温耗能变率总体上北方大于南方；电力负荷随气温增加而敏感性上升；水电和风电能力降低。未来，2030年能源需求相比2005年增加1.4倍，2050年增加1.9倍；2031—2040年南方地区水库上游流域降水减少可能导致水库发电能力受到影响 ^[44] 。	
研究发现，气候变化非平均态带来的短期影响强于平均态引起的长期影响。苏宁 ^[45] 以南京为例，利用协整方程和变参数模型分析得到气候变暖 and 制造业产出的关系，发现气候变化的产出弹性为0.15，占GDP的7.65%，并且产出弹性有下降趋势，未来气候变暖对制造业的负效应较大。	
影响交通运输和交通运输设施。1963年海河流域暴雨洪水导致铁路被冲毁822处，中断行车2108h，公路被淹没6700km，桥梁112座；20世纪90年代以后交通运输气候灾害更为严重，1991年江淮地区特大洪水使得65条铁路干、支线发生水害断道356次，中断行车13000h以上，直接经济损失12.76亿元 ^[46] 。预计未来气候变化、强降水引起的洪涝、泥石流灾害可能更加频繁，公路交通基础设施可能受到更大破坏，灾害性天气增加交通事故发生的频率，河流水位降低增加内河运输成本，台风等极端天气增加海运危险，大雾降低能见度，耽误航班、增加运输成本等。	
造成全球经济损失从20世纪50年代的39亿美元/a增加到20世纪90年代的400亿美元/a，发展中国家的经济损失约占1/4；同期入保部分也从每年几乎为零增加到92亿美元/a。1985—1999年间财产/意外事件保险费和天气有关的损失比率降低了3倍。气候变化可能增加风险评估中保险精算的不确定性，导致成本增加，发展中国家金融服务扩展减速，减弱保险业对各种突发事件的保障作用，增加社会对政府赔偿金额的需求，公平与发展的矛盾将会越来越突出 ^[47] 。	
气候变化带来的代价和风险相当于每年至少损失全球GDP的5%，我国旅游业受气候变化影响的损失占GDP的4%，影响旅游资源、旅游流、旅客安全及决策、旅游经济。1998年特大洪灾，我国入境旅游损失29.9×10 ⁴ 人次；2008年初冰雪灾害造成旅游直接经济损失约69.7亿元 ^[48] 。到2030年气候变化对旅游业的负面影响将更为突出：气候变化引起的自然灾害不确定性增大，冲击旅游业发展；未来50年旅游资源将受到气候变化的不利影响，观赏价值降低，旅游者对气候的暴露程度高，受气候变化影响风险增高，东中西部地区旅游业的风险也将增大 ^[49] 。	
升温、热浪和寒潮等致使疾病发病率/死亡率增加；温度升高1℃，心脏病死亡风险上升1.9%；热浪时期疾病死亡风险增加13%~23%，寒潮造成疾病死亡风险增加50%~91% ^[50] 。气候变化带来传染病感染严重，中国地区血吸虫病对人类健康影响最为严重，过去30年里，中国已有41335km ² 的区域成为钉螺潜在孳生地，间接导致的受血吸虫病威胁的人口增加2100万人，预计2050年，会增加783883km ² 新的孳生地，占中国土地面积的8%左右 ^[51] 。	

是目前国际发展的趋势, Hassler等^[61]利用综合评估模型对世界多区域模式进行了经济评估, 但是只是从化石燃料交易市场进行动态分析, 这种市场的不完备性并不能完全地模拟出市场的真实变化情况。因此, 气候变化经济影响评估的经济系统复杂性既是这一领域发展完善的限制, 又是方法不断改进的动力, 全球研究趋势正向着动态、长期的经济评估模型的设定与开发前进。

相对国外综合评估模型的发展, 我国研究气候变化经济影响的方法稍显不足。李克让等^[62]总结了21世纪之前国内研究气候变化经济影响的方法, 主要包括: 实验室、农田和野外观测试验, 冰芯、树木年轮和历史文献方法, 数值模式研究等, 这些方法基本是基于自然机理与自然现象进行气候变化的经济评估, 几乎没有考虑气候变化所导致的经济系统和经济市场的作用情况。进入21世纪以来, 这方面的研究得到了我国研究者的更多重视。陈迎^[63]利用统计方法对能源需求的影响进行了分析, 这种方法直接从经济数据出发, 通过研究不同数据之间的关系探讨气候变化的经济作用情况, 但仍然不能反映经济系统的变化机理。张永勤等^[64]通过经济学投入—产出模型分析气候对区域经济的影响, 这是均衡分析的一种, 为一般均衡分析在我国的发展奠定了基础。我国学者对于CGE模型的研究也有一定的进展, 王灿^[65]基于动态CGE模型对我国政策进行了模拟分析, 但是利用此模型分析气候变化对我国经济损失影响的评估工作还处在理论研究阶段, 这一点相对于国外来说还存在一段距离。丑洁明等^[66]为我国气候变化经济评估提供了一种新的思路, 利用改进的C-D-C模型分析气候变化对我国农业粮食产量的经济影响, 并且从理论上确认这一模型对其他领域和部门的适用性, 自此, 这一模型从研究领域的变更与扩充、研究要素的复杂化和研究方法的精准化上得到了比较快速的发展, 广泛地应用到我国各经济部门和区域上。丑洁明等^[67]进一步提出基于C-D-C模型的气候变化经济影响预测理论, 为后续的研究提供了良好思路。

4.2 综合评估方法分类

目前, 比较简单的方式就是通过对历史^[68]、问卷调查^[69]、查阅文献^[70]等非模型基础的研究方法, 这些方法相对简单易上手, 数据直接, 在一定范围内现实性较强, 具有直观意义; 但是主观性比较大, 前期需要很多准备工作, 且结果不一定准确。而模型分析法虽然研究起来较难, 不易实现; 但这类方法种类繁多, 选择性较强, 评估精度高, 因而更多的研究都尽可能利用可生成的模型来进行影响分析。在基于模型进行气候变化经济影响研究时, 研究者又站在不同的学科角度、利用不同的知识方法探究了全球气候变化对经济系统造成的影响, 具体可分为表3所示的三种模型评估方法。

从强调气候变化对社会经济系统的影响评估方面来看, 这不仅是一个多学科综合的复杂评价问题, 更是一个经济问题, 我们需站在经济学的角度开展这种经济机理的分析, 了解气候变化影响了经济系统的什么方面, 以及如何影响经济活动和经济部门的市场分配等。同时, 对于前两种方法的探究, 目前很多气象学家已经开展了很多的工作, 所得到的结果也比较成熟。但是, 由于自然科学家们所建立的模型没有考虑经济现实的影响因子和互动因素, 而经济学家在分析经济问题时又鲜少考虑气候变化的影响^[75]。因而, 总结这一研究领域已经开展的工作, 对于之后进一步深入和拓宽研究起到至关重要的作用, 这也是本文基于经济学角度研究并总结气候变化影响及方法的根本意义所在。

4.3 经济评估方法分类

与自然机理模型不同, 经济机理模型是通过真实地反映气候变化对整个经济系统包括经济活动和部门的影响, 站在经济学的角度, 体现整个经济系统受气候变化影响的运作情况。目前最常用的经济模型包括成本效益法、生产函数法和均衡分析法。

(1) 成本效益法(CBA)。成本效益法的理论基础主要是所谓的“帕累托潜在改善”这一经济理

表3 气候变化对经济系统影响的模型评估方法比较

方法	原理	优点	缺点	代表文章
经验统计模型	按照最小误差原则, 进行数理分析, 不考虑过程机理	输入参数少, 相对简单, 易操作	无法反应气候变化经济影响的内在机制; 基于当前气候条件建立的经验模型研究未来变化情况的外推可信度低; 区分气候变化和非气候变化的经济影响的难度大	王新华等 ^[71] 、汤小槽等 ^[72]
自然机理模型	模拟气候变化对经济系统造成影响的自然过程	基于自然科学试验、模型和数据, 反映自然机理过程	输入参数多, 数据获取困难; 结果受参数和模型限制; 不考虑经济行为; 评估经济系统整体的影响时, 没有考虑部门间的相互作用	温美丽等 ^[73] 、赵俊芳等 ^[74]
经济机理模型	真实反应气候变化带来的经济行为的变化	从经济的角度分析气候变化的经济影响, 反映经济行为变化机制	输入输出参数多; 理论本身反映现实经济行为的能力受限	Adams等 ^[52] 、丑洁明等 ^[75] 、杜文献 ^[76] 、王灿等 ^[77]

论。该理论认为,任何项目或政策,如果其整体增加的效益能够补偿总的成本或损失,那么就认为该项目或政策的实施在经济上是有效益的^[78]。由于气候变化对经济系统的影响有正有负,对经济影响进行成本效益分析理论上是可行的。杜文献^[76]基于李嘉图模型视角对整个区域农业生态系统的效益进行了度量。但是,从我国目前研究情况来看,气候变化经济效益评价这一思路在国内并不成熟。秦大河^[3]指出气候变化对我国经济系统可能为负面影响,同时这一方面的影响评价多是气候变化的损失评估,多数学者忽略了气候变化可能带来的正面效益。相反,陈迎^[63]提出成本效益分析可作为对气候变化进行损失评估、适应分析和减排成本分析之后的综合评估方法。

(2) 生产函数法。生产函数是指在一定时期内,在技术水平不变的情况下,生产中所使用的各种生产要素的数量与所能生产的最大产量之间的关系。学者多用到的生产函数是由美国经济学家Douglas和Cobb根据1899—1922年的工业统计资料提出的C-D生产函数,它是唯一能使均方估计误差达到最小的生产函数^[79]。目前人们对C-D模型的研究十分关注,也取得了很大的进展,其中最为突出的是丑洁明等^[75]率先构建了一个气候—经济新模型;将气候因子加入了C-D模型之中,并将之应用到粮食产量之中。有学者在此基础上对其进行了改进,扩大了C-D-C模型的应用范围。符琳等^[80]又构建了一个综合气候因子替代单个气候因子,使得研究更加合理真实。之后,丑洁明等^[67]进一步引入“气候变化影响量”概念,对未来气候变化对经济产出的影响给予了定量的评估。

(3) 均衡分析法。这种方法的思想是生产者根据利润最大化或成本最小化原则,在技术约束下,进行最优投入决策,确定最优的供给产量;消费者根据效用最大化原则,在预算约束条件下,进行最优支出决策,确定最优的需求量;均衡价格使最优供给量与需求量相等,资源得到最合理的使用,消费者得到最大的满足,经济达到稳定的均衡状态^[77]。通常,均衡分为局部均衡与一般均衡。局部均衡分析是假定在其他条件不变的情况下来分析某一时间、某一市场的某种商品(或生产要素)供给与需求达到均衡时的价格如何被决定。一般均衡法在分析某种商品的价格如何被决定时,则在各种商品和生产要素的供给、需求、价格相互影响的条件下来分析所有商品和生产要素的供给和需求同时达到均衡时所有商品的价格如何被决定。局部均衡方法虽然局限于某一个部门的供需平衡,但是它也可以用于反映整个经济系

统的状况,Tol^[18,19]就是利用这种方式,使用荟萃分析对一个国家或地区的综合影响进行了评估。陈迎^[63]认为这种利用局部均衡反映整个经济系统状况的方式无法考虑到各部门之间的相互作用,且无法反映整个经济部门的市场运作,一般均衡法则弥补了这一不足。常用的一般均衡分析方法有投入产出(IO)模型和可计算一般均衡(CGE)模型。

① IO模型。投入产出法产生于20世纪30年代,是由Leontief^[81]首先提出的,其于1931年开始研究“投入产出分析法”,来分析研究美国的经济结构。该方法主要用途是用于研究与分析国民经济各个部门在产品的生产与消耗之间的数量依存关系,反映各个部门之间的直接与间接的经济联系和各个部门之间的综合平衡问题。目前,已拓展到研究与分析各个地区各个行业内部及之间的各种经济联系,并取得了一定的创新。张永勤等^[82]利用该模型分析了气候变化对江苏省各经济行业部门的影响。胡爱军等^[83]则利用非正常投入—产出模型分析了极端气候事件的间接经济损失。丁先军等^[84]在利用该模型进行灾害经济影响评估时,利用ARID(Adaptive Regional Input-Output)这一改进模型,克服了传统投入—产出模型生产结构不变的约束,提高了模型的模拟结果。

② CGE模型。CGE模型用三组方程分别描述供给、需求以及市场供求关系,方程中的所有因素都是变量,这些变量通过一系列优化条件来求解,得到在各个市场都达到均衡时的一组数量与价格^[85]。利用CGE模型进行经济评估有多种方式,比如Parry等^[86]、Berrittella等^[58]和Bosello等^[59]利用CGE模型分别对农业、旅游业和人类健康状况进行了一般均衡分析,考虑单个部门对整体行业的相互作用力;Bosello^[60]以气候变化对各部门经济影响的局部均衡分析结果为资料来源,对总体经济影响进行了一般均衡分析。目前CGE模型用于气候变化分析时关注最多的问题是:气候变化的经济成本、延缓气候变化的政策措施选择、不同的政策措施对气候和社会经济结构等方面的影响^[87]这些方面。

IO模型和CGE模型展现了十分清楚的供求关系,把各部门及各区域用这种投入—产出关系联系了起来。但是由于IO模型最终需求外生决定、生产能力无限、投入要素无法替代、无约束条件的最大化等原因,其在应用上存在限制。相比而言,CGE则解决了这些问题,它将模型方程中所有的因素都考虑成变量,在约束条件下实现效用最大化、市场均衡和普遍相关,最终得到完整的一般均衡分析,即各个市场达

到均衡时的一组数量与价格。但是CGE模型也存在不足：首先，大部分模型是静态的，对于长期动态地经济系统的模拟并不完整；其次，模型中参数“校准法”值得商榷，很多计量经济学家对这种以基准年数据进行参数校正的方法进行了批评，表现在基准年随机现象不恰当传递体现在模型中^[88]、校准参数没有可信度度量^[89]、模型初始条件敏感^[90]等方面；第三，CGE考虑了市场均衡，但是往往忽略了非市场的影响，而未来气候变化对经济系统的影响恰恰是市场影响降低而非市场影响上升的趋势^[91]，Bosello^[60]已经指出市场导向的影响和适应已无法在满足目前的影响评估工作；第四，经济评估模型在面对气候变化影响分析时面临困境。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文从狭义的经济系统角度探讨了气候变化对我国经济系统的影响，并总结了目前应用于这种研究的各种方法。气候变化对经济的影响虽然存在全球性和外部性，但是影响程度在区域上有明显的差异。发达国家所受影响相对其他国家要弱，高纬度地区比低纬度地区所受气候变化影响小，与气候变化直接相关的农业部门相比其他部门受影响要大得多^[92]。我国的经济系统受气候变化的影响也存在区域差异，重点表现在海岸带区、北方缺水农区和西部生态脆弱区对气候变化的敏感度最大。气候变化对经济系统影响的评估方法很多，在使用基于模型的方法时，为了使得评估精度得以提高，可以将不同的分析方法进行组合加权；其中，经验统计模型和自然机理模型是气象学家常用的分析手段，但是它们都无法反映气候变化带来的经济活动和市场变动，对于气候保护政策的提出局限性很大，因而从经济学角度探讨气候变化的经济影响问题十分必要。但是，总体来说，这些分析方法都缺乏一定的动态性和主动性，对于长期的经济影响和复杂的市场响应模拟能力还需提高。

5.2 讨论

目前，气候变化经济影响评估方法很多，并且应用广泛，很大程度上真实反映了气候变化对经济系统造成影响的实际情况，但是仍然存在一些急需解决的问题。

(1) 气候变化的影响是长期的，这也导致气候变化影响评估方法存在不确定性^[93]。一方面，气候变化的经济影响是跨时代的，带来成本收益的代际分配公平性问题。目前人们对改善环境的支付意愿低于对

削弱环境的补偿意愿，即为了自身经济的发展，在气候变化问题上倾向于将损失转移至下一代。代际分配采用的贴现理论与方法是基于未来的气候变化情况及其对经济系统的可能影响进行设定的，也存在很大的不确定性^[94]。另一方面，由于气候变化对经济系统的影响存在长期性，因而技术变化将会成为经济变化的内生变量，原本将技术作为外生变量的模型需要考虑技术变化给经济带来的影响^[95]。

(2) 气候变化经济影响评估模型目前多是静态的。正如前面所说，气候变化的影响是长期的，因而静态的模型不再适合于远期的影响模拟和保护政策的评价。静态模型向动态模型发展成为气候变化经济影响评估研究的新思路，但是动态模型的构建需要更多的参数和条件的设定，存在很大的困难。

(3) 关于气候变化对经济系统的影响，存在“市场价值”和“非市场价值”两种模式；目前的评估模型往往会忽略非市场的影响。对于市场可以定价的影响比较好获取，但是对于那些没有市场价值的商品，就需要进行货币化，比如环境舒适度、健康和娱乐等。目前对于市场上不出售的商品估价方法包括间接市场法和直接询问法，虽然这些方法存在很多争议，但是忽略这部分损失的价值便不会全面^[96]。

(4) 气候变化经济影响的评价存在不确定性。这除了模型结构、参数选择和设定存在不确定性之外，还包括模型评价过程的不确定。它们都可能因为无法真实反映气候变化经济影响的现实本身而导致结果存在偏差^[97]。评估气候变化对经济系统的影响时存在很多需要改进之处：

第一，它需要人们对其进行可持续发展的经济分析，充分考虑公平性原则、可持续性原则和共同性原则。

第二，气候变化经济影响评估研究的主流是分析气候变化的经济影响、气候变化的保护政策、气候变化的国际政治经济形势，这些都是从宏观的角度来分析气候变化给全球社会经济格局带来的变化和影响；但是，由于气候变化经济问题本身存在全球性、长期性、外部性和不确定性，这些问题严重影响了学者对气候变化问题的研究进度和分析结果。因而，从气候变化问题的这几个特征方面着手进行经济分析，可以成为经济学家新的思路^[98]。

第三，进一步改进气候变化经济影响评估的模型和方法，一方面将被动的、静态的分析向主动的、动态的分析改进，构建适用于我国经济评估的气候变化综合评估模型^[99]，另一方面改善并找寻新的研究理论，不断克服气候变化预测与影响评估的不确定性，

从更广泛的角度来考虑气候变化的经济影响。

致谢：本文在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室/全球变化与地球系统科学研究院的延晓冬和韦志刚老师的协助下完成，研究生杨赓永和张轶鸿予以帮助，在此表示感谢。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Schelling T C. Some economics of global warming. *The American Economic Review*, 1992, 82(1): 1-14.
- [3] 秦大河. 进入21世纪的气候变化科学——气候变化的事实、影响与对策. *科技导报*, 2004, (7): 4-7.
- [4] Fankhauser S. Valuing Climate Change—The Economics of the Greenhouse. London: Earth Scan, 1995.
- [5] 罗慧, 许小峰, 章国材, 等. 中国经济行业产出对气象条件变化的敏感性影响分析. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 113-117.
- [6] 王铮, 郑一萍. 全球气候变化对中国粮食安全的影响分析. *地理研究*, 2011, 20(3): 282-289.
- [7] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II)中国应对气候的影响与适应. *气候变化研究进展*, 2006, 2(2): 51-56.
- [8] Stern N. What is the economics of climate change. *World Economics*, 2006, 7(2): 1-10.
- [9] Treasury H M. Stern review: The economics of climate change. <http://www.the-eans.de/Presse/PMitt/2006/061030c76.pdf>, 2006-12-20.
- [10] 卢晓媚. 简论经济系统及经济结构. *广东社会科学*, 2011, (5): 84-87.
- [11] 孙宁. 气候变化对制造业的经济影响研究. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [12] 王灿, 陈吉宁. 气候政策研究中的数学模型评述. *上海环境科学*, 2002, 21(7): 435-458.
- [13] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征. *地理研究*, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [14] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951~2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. *气候变化研究进展*, 2005, 1(1): 16-18.
- [15] 罗勇, 江澄, 董文杰, 等. 气候变化与海平面上升及其对海啸灾害的影响. *科技导报*, 2005, 23(3): 41-43.
- [16] 秦大河. 气候变化的事实与影响及对策. *中国科学基金*, 2003, (1): 1-3.
- [17] Tol R S J, Fankhauser S, Richels R G, et al. How much damage will climate change do? Recent estimates. *World Economics*, 2000, 1(4): 179-206.
- [18] Tol R S J. Estimates of the damage costs of climate change—Part I: benchmark estimates. *Environmental and Resource Economics*, 2002, 21(1): 47-73.
- [19] Tol R S J. Estimates of the damage costs of climate change—Part II: dynamic estimates. *Environmental and Resource Economics*, 2002, 21(2): 135-160.
- [20] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011.
- [21] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1686-1706.
- [22] 吕军, 孙嗣明, 陈丁江. 气候变化对我国农业旱涝灾害的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1713-1719.
- [23] 程琨, 潘根兴, 邹建文. 1949—2006年间中国粮食产量变化影响风险评价. *南京大学学报*, 2011, 34(3): 83-88.
- [24] Zhou X N, et al. Epidemiology of schistosomiasis in the people's republic of China. *Emerging Infectious Diseases*, 2007, 13(10): 1470-1476.
- [25] 张建波, 田琪. 洞庭湖湿地生态保护现状及对策. *水资源保护*, 2005, 21(1): 52-54, 61.
- [26] 时小军, 陈特固, 余克服. 近40年来珠江口的海平面变化. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 127-134.
- [27] Moseley R K. Historical landscape change in northwestern Yunnan, China. *Mountain Research and Development*, 2006, 26(3): 214-219.
- [28] 张强, 邓振镛, 赵映东. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [29] 唐国平, 李秀彬. 气候变化对中国农业生产的影响. *地理学报*, 2000, 55(2): 129-137.
- [30] 史培军. 中国自然灾害、减灾建设与可持续发展. *自然资源学报*, 1995, 10(3): 267-278.
- [31] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 905-910.
- [32] 宁金花, 申双和. 气候变化对中国农业的影响. *现代农业科技*, 2009, (12): 252-256.
- [33] 张厚煜. 气候变化对我国种植制度的影响. *中国农业气象*, 2000, 21(1): 9-14.
- [34] 朱建华, 侯振宏, 张小全. 气候变化对中国林业的影响与应对策略. *林业经济*, 2009, 208(11): 78-82.
- [35] 陈小勇, 林鹏. 我国红树林对全球气候变化的响应及其作用. *海洋湖沼通报*, 1999, (2): 11-17.
- [36] 龚婕, 宋豫秦, 陈少波. 全球气候变化对浙江沿海红树林的影响. *安徽农业科学*, 2009, 37(20): 9742-9744.
- [37] 李玉娥, 董红敏, 林而达. 气候变化对畜牧业生产的影响. *农业工程学报*, 1997, 13(9): 20-23.
- [38] 赵艳霞, 裴国旺. 气候变化对北方农牧交错带的可能影响. *气象*, 2001, 27(5): 3-7.
- [39] 张秀云, 姚玉璧, 邓振镛, 等. 青藏高原东北边缘牧区气候变化及其对畜牧业的影响. *草业科学*, 2007, 24(6): 66-73.
- [40] 李晓锋, 陈明新. 全球气候变暖对我国畜牧业的影响与分析. *中国畜牧杂志*, 2008, 44(4): 50-53.
- [41] 刘乃壮, 金志凤. 气候变化对我国淡水渔业的可能影响. *水产养殖*, 1993, (5): 24-27.
- [42] 刘允芬. 气候变化对我国沿海渔业生产影响的评价. *中国农业气象*, 2000, 21(4): 2-5.
- [43] 李佳澍. 气候变化对我国相关产业的影响及对策研究. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2011.
- [44] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国2050年的能源需求与CO₂排放情景. *气候变化研究进展*, 2008, 4(5): 296-302.
- [45] 孙宁. 气候变暖对我国制造业创新发展的影响. *第四届中国科学与科技政策研究会学术年会论文集(II)*, 2008: 684-691.
- [46] 张清, 黄朝迎. 我国交通运输气候灾害的初步研究. *灾害学*, 1998, 13(3): 43-46.
- [47] 国家气候变化对策协调小组办公室. 全球气候变化——人类面临的挑战. 北京: 商务印书馆, 2004.
- [48] 刘亚玲. 极端气候事件频发下中国旅游业发展思考. *科技创业*, 2011, 24(7): 41-43.
- [49] 吴普. 气候变化情景下的中国旅游业及其对策. *中国旅游报*, 2009, 1(16): 10.
- [50] 马文娟, 阚海东. 我国气候变化与人群健康研究进展. *中华预防医学杂志*, 2011, 45(9): 845-848.
- [51] 杨国静, 杨坤, 周晓农. 气候变化对媒介传播性疾病传播影响的评估模型. *气候变化研究进展*, 2010, 6(4): 259-264.
- [52] Adams M R, Fleming R A, Chang C C, et al. A reassessment of the economic effects of global climate change on US agriculture. *Climatic Change*, 1995, 30(2): 147-167.
- [53] Tol R S J. The damage costs of climate change toward more comprehensive calculations. *Environmental and Resource Economics*, 1995, 5(4): 353-74.
- [54] Nordhaus W D. Managing the global commons: the economics of climate change. MA: MIT Press, 1995.
- [55] Fankhauser S. The social costs of greenhouse gas emissions: an expected value approach. *Energy Journal*, 1994, 15(2): 157-184.
- [56] Mendelsohn R O, Morrison W N, Schlesinger M E, et al. Country-specific market impacts of climate change. *Climatic Change*, 2000, 45(3-4): 553-69.
- [57] Mendelsohn R O, Nordhaus W D, Daigee S. The impact of climate on agriculture: a ricardian analysis. *American Economic Review*, 1994, 84(4): 753-771.
- [58] Berritella M, Bigano A, Roson R, et al. A general equilibrium analysis of climate change impacts on tourism. *Tourism Management*, 2006, 27(5): 913-924.
- [59] Bosello F, Roson R, Tol R S J. Economy-wide estimates of

- the implications of climate change human health. *Ecological Economics*, 2006, 58(3): 579-591.
- [60] Bosello F, Eboli F, Pierfederici R. Assessing the economic impacts of climate change. An updated CGE point of view. <http://www.cmcc.it/publicazioni/publicazioni/research-papers/rp0125-cip-01-2012.pdf>, 2012-2-15.
- [61] Hassler J, Krusell P. Economics and climate change: integrated assessment in a multi-region world. *Journal of the European Economic Association*, 2012, 10: 974-1000.
- [62] 李克让, 陈育峰. 中国全球气候变化影响研究方法的进展. *地理研究*, 1999, 18(2): 214-219.
- [63] 陈迎. 气候变化的经济分析. *世界经济*, 2000, (1): 65-74.
- [64] 张永勤, 缪启龙. 气候变化对区域经济影响的投入-产出模型研究. *气象学报*, 2001, 59(5): 633-640.
- [65] 王灿. 基于动态CGE模型的中国气候政策模拟与分析. 北京: 清华大学, 2003.
- [66] 丑洁明, 封国林, 董文杰, 等. 气候变化影响下我国农业经济评价问题探讨. *气候与环境研究*, 2004, 9(2): 361-368.
- [67] 丑洁明, 董文杰, 封国林. 定量评估气候变化产量经济产出的方法. *科学通报*, 2011, 56(10): 725-727.
- [68] 王铮, 黎华群, 孔祥德, 等. 气候变暖对中国农业影响的历史借鉴. *自然科学进展*, 2005, 15(6): 706-713.
- [69] 王宝华, 付强, 谢永刚, 等. 国内外洪水灾害经济损失评估方法综述. *灾害学*, 2007, 84(3): 95-99.
- [70] 王巍荣. 近十年我国气候变暖影响研究的若干进展. *应用气象学报*, 2002, 13(6): 755-766.
- [71] 王新华, 延军平, 杨谨菲, 等. 1950—2008年汉中市气候变暖及其经济适应. *地理科学进展*, 2011, (5): 557-562.
- [72] 汤小槽, 金晓斌, 盛莉, 等. 基于小波分析的粮食产量对气候变化的响应研究——以西藏自治区为例. *地理与地理信息科学*, 2008, 24(6): 88-92.
- [73] 温美丽, 高晓飞, 谢云, 等. ALMANAC模型对大豆产量的模拟. *资源科学*, 2005, 27(4): 100-105.
- [74] 赵俊芳, 郭建平, 张艳红, 等. 气候变化对农业影响研究综述. *中国农业气象*, 2010, (2): 200-205.
- [75] 丑洁明, 叶笃正. 构建一个经济-气候新模型评价气候变化对粮食产量的影响. *气候与环境研究*, 2006, 11(3): 347-353.
- [76] 杜文献. 气候变化对农业影响的研究进展——基于李嘉图模型的视角. *经济问题探索*, 2011, (1): 154-158.
- [77] 王灿, 陈吉宁, 邹骥. 可计算一般均衡模型理论及其在气候变化研究中的应用. *上海环境科学*, 2003, 22(3): 206-212.
- [78] Tobey J A. Economic issues in global climate change. *Global Environmental Change*, 1992, 2(3): 215-228.
- [79] 成邦文, 刘树梅, 吴晓梅. C-D函数的一个重要性质. *数理经济技术经济研究*, 2001, (7): 78-80.
- [80] 符琳, 李维京, 张培群, 等. 用经济-气候模型模拟粮食单产的方
法探究. *气候变化研究进展*, 2011, 7(5): 330-335.
- [81] Leontief W. *Input-output economics*, second edition. Oxford University Press, 1986.
- [82] 张永勤, 彭补拙, 缪启龙. 气候变化对江苏省经济的影响研究. *长江流域资源与环境*, 2001, (1): 8-13.
- [83] 胡爱军, 李宁, 史培军, 等. 极端天气事件导致基础设施破坏间接经济损失评估. *经济地理*, 2009, (4): 529-533.
- [84] 丁先军, 杨翠红, 祝坤福. 基于投入-产出模型的灾害经济影响评价方法. *自然灾害学报*, 2010, (4): 113-118.
- [85] 王丽. 气候变化问题研究中的一般均衡模型. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(7): 38-41.
- [86] Parry M L, Rosenzweig C, Iglesias A, et al. Effects of climate change on global food production under SERS emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 2004, (12): 53-67.
- [87] 王灿, 陈吉宁, 邹骥. 基于CGE模型的CO₂减排对中国经济的影响. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(2): 1621-1624.
- [88] McKittrick R R. The econometric critique of computable general equilibrium modeling: the role of functional forms. *Economic Modeling*, 1998, 15(4): 543-73.
- [89] Roberts B. Calibration procedure and the robustness of CGE models. *Economics of planning*, 1994, 27(3): 189-210.
- [90] Harrison G, Jones R, Kimbell L, et al. How robust is applied general equilibrium analysis. *Journal of policy modeling*, 1993, 15(1): 99-115.
- [91] Frankhauser S, Tol R S J. The social costs of climate change: the IPCC second assessment report and beyond. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1997, (1): 385-403.
- [92] 孙宁, 李廉水, 严明良. 基于协整理论的气温变化对南京市主要行业的影响研究. *气象*, 2008, 34(9): 97-103.
- [93] 段红霞. 气候变化经济学和气候政策. *经济学家*, 2009, (8): 68-74.
- [94] Tobey J A, 胡大鹏. 全球气候变化中的经济问题. *地理译报*, 1995, 14(12): 19-25.
- [95] 王克, 王灿, 陈吉宁. 技术变化模拟及其在气候政策模型中的应用. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 31-37.
- [96] Frankhauser S, Tol R S J, Pearce D W. The aggregation of climate change damages: a welfare theoretic approach. *Environmental and Resource Economics*, 1997, (10): 249-266.
- [97] 葛全胜, 王邵武, 方修琦. 气候变化研究中若干不确定性的认识问题. *地理研究*, 2010, 29(2): 191-203.
- [98] 任力. 气候变化与经济增长的理论分析. *经济学动态*, 2011(1): 137-141.
- [99] 张雪芹, 葛全胜. 气候变化综合评估模型. *地理研究进展*, 1999, 18(3): 61-67.

热浪对人体健康影响的研究进展

田颖^{1,2} 张书余^{2,3} 罗斌¹ 马守存¹ 周骥¹

(1 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020;

3 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020)

摘要: 热浪对人体健康影响显著, 随着全球变暖, 其发生频率、强度还会继续增加。通过对国内外研究的概述, 发现热浪期间发热、中暑、心脑血管疾病、呼吸道疾病、精神病、部分传染病等疾病发病率、热相关死亡率增加, 老年人、儿童及一些慢性病患者更易受影响; 影响程度与热浪特征、社会因素、行为因素及空气污染有关, 并存在“滞后效应”和“收获效应”。另外, 简要介绍了主要的热浪研究方法。目前, 对热浪研究主要集中于统计学方法, 动物实验和人群实验研究比较少, 对此, 今后应更注重通过实验方法研究热浪对人体各类疾病的影响。

关键词: 热浪, 疾病, 死亡率, 流行病学特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.006

Research Progress in Impact of Heat Wave on Human Health

Tian Ying^{1,2}, Zhang Shuyu^{2,3}, Luo Bin¹, Ma Shoucun¹, Zhou Ji¹

(1 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Lanzhou Institute of Arid Meteorological, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020

3 Key Laboratories of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020)

Abstract: Heat wave has a significant impact on human health. The on-going climate change is predicted to yield a growing number of heat waves which will be aggravated in both intensity and frequency. In this paper, the increasing incidence of mortality and morbidity of many diseases such as fever, heat stroke, cardiovascular diseases, respiratory diseases, mental illness, some infectious diseases and others during heat wave was reviewed, especially the elderly, children and patients with some chronic diseases. This effect was also related with heat wave itself, socioeconomic factors, behavioral factors and air pollution. In addition, there were "lag effects and harvesting". The study methods were also summarized briefly. Most of the study methods focused on statistical methods, but animal experiments and crowd experimental studies were few, so more attention should be paid to influences that heat wave makes on various types of human diseases by experimental methods.

Keywords: heat wave, disease, mortality, epidemiological characteristic

1 引言

热浪是具有一定持续性的高温天气(日最高温度超过一定界限的天气过程), 可造成多种疾病发病率和死亡率增加。热浪并没有统一而明确的定义, 各国家和地区按自身情况依据夜间最低气温或日最高气温的持续时段和(或)强度定义热浪, 或根据热浪持续指数等对其定义及研究^[1]。世界气象组织建议最高气温高于32℃, 持续3d以上的天气过程为热浪。荷兰皇家气象研究所定义热浪为最高温度高于25℃并持续5d以上, 其间至少3d高于30℃的天气。我国一般把日最高气温达到或超过35℃称为高温天气, 连续3d以上的高温天气过程称为高温热浪, 国内相关研究也大

多以此标准定义热浪。同时, 中国气象局建议各省市也可根据各自气候确定界限温度, 如甘肃省气象局规定, 河西地区和河东地区高温天气的界限温度分别为34和32℃。孙立勇等^[2]通过研究安徽地区热浪对居民死亡率影响, 建议将热浪警戒温度限值为日平均气温32℃, 最高气温36℃。

大量研究表明, 高温热浪能够造成严重的健康事件, 甚至死亡。早在1743年, 北京热浪造成近11000人死亡。20世纪90年代以来, 夏季高温酷热天气频发。印度继1998年2500余人在热浪中丧生后, 2002年又造成1200人死亡; 2003年, 欧洲热浪造成人群超额死亡数达到20000人, 法国甚至引发政治冲突; 2004—2006年, 我国广州和西南地区、南非及欧美又遭受热浪袭击, 造成大量人员死亡^[-3-5]。一般初夏发生的热浪及热浪前几日更易造成死亡率增加, 中高纬度地区更明显, 这可能与人体对热浪的适应性有

收稿日期: 2011年10月10日; 修回日期: 2012年1月10日

第一作者: 田颖(1989—), Email: yngtian@163.com

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106034)

关^[3, 6-9]。持续时间长、强度大的热浪危害也越大,危害程度不仅与个体心理身体素质有关,也与环境条件联系:一般经济条件差、居住条件差、独居的人风险大,且城市热岛会加重热浪的影响,使城市及人口稠密地区更易受影响,夜间尤其明显^[10-12]。神经紊乱、体弱、认知能力受损的人,精神病人及患有慢性疾病的人群风险大,其中,黑人比白人更易受影响。服用利尿剂、一些神经类药物、麻醉毒品等药物,酒醉及进行大量体力劳动也会增大风险^[13, 14]。对此,相关机构表示^[13],随着全球气候变暖的发展,热浪发生频率将继续增加,且发生程度更严重、持续时间更长、范围更广,与其相关的死亡率相应增加。另外,随着城市化和人口老龄化,各国对热浪与人体健康关系的研究越来越重视,本文对这些研究进行综述,为推进热浪对人体健康影响的研究提供科学基础。

2 热浪对相关疾病发病率的影响

热浪对相关疾病发病率影响的研究比热相关死亡率少很多,且因资料等方面的限制和多种混杂因素的存在,结果不如后者精确^[15, 16]。研究发现,热浪期间急救车出车量、医院就诊量、入院人数都会增加,主要针对中暑、热中风、传染病、慢性病(如心脑血管疾病、呼吸道疾病)等疾病,少数人还可能出现严重昏迷、器官衰竭,但增幅不如死亡率明显^[17, 18]。行动受限的人(孕妇,瘫痪等)、老年人和慢性疾病患者的风险更大^[9, 19]。同时,高温导致大气污染物和过敏物含量增加,对人体有显著影响^[20]。

2.1 发热和中暑

热浪期间,环境温湿变化超出人体热平衡可调节适应范围,使体温升高,导致生理功能紊乱,造成气促、发热、热痉挛,甚至中暑死亡^[21, 22]。王长来等^[23]在南京发现连续高温高湿天气可引发大量人群中暑,Semenza等^[24]指出,1995年芝加哥热浪主要引发的疾病为脱水、中暑、热衰竭。另外,热浪期间的医院死者中大都伴有发热、中暑现象^[25, 26]。因发热中暑为多器官多系统疾病,能进一步对人体其他系统造成影响,可造成大量死亡,故应注意及时有效的防治。

2.2 心脑血管疾病

统计表明,高温期间,心脑血管疾病发病率仍在增加。高温刺激神经调节循环系统,使人体大量出汗,血液粘稠度和胆固醇水平增高,血管扩张、血液循环加速,心跳过速,血压变化,内脏供血不足^[21, 27]。同时,环境低气压使得人体氧分压低,血氧含量不足,引起心脏、大脑反射性痉挛,诱发心肌梗死、冠心病、缺血性脑卒等急性心脑血管疾病,环境湿度大

时,发病更明显^[28, 29]。另外,热浪期间人体心肌蛋白增加,过多时,可迫害心脏^[30]。热浪引起的大气颗粒物浓度增多也可引发急性心肌梗死等疾病^[31]。

心脑血管疾病是研究热浪对人体发病率影响中最重要的疾病之一,相关研究全面,众多统计分析研究已取得初步结果。20世纪60—70年代,美、英热浪期间心脑血管疾病发病率、死亡率增加,相似结果在90年代费城和芝加哥等地热浪期间得到证实^[24, 32]。部分研究者通过实验小鼠和志愿者的研究证明,高温利于冠心病和脑血管疾病发生,对心血管疾病比脑血管疾病影响更严重^[29]。有研究指出,心脑血管疾病的发病风险还与年龄有关,老人更易受影响。Mastrangelo等^[33]认为,这可能是因为老人身体水分更少、血管扩张能力差^[29];而Loughnan等^[34]研究发现,对于某些心脏类疾病,65岁以下人群发病率也明显增加。在已有结果基础上,研究者们近来开始关注相关机理研究,这也对今后其他类疾病的研究方法有所启示。

2.3 呼吸道疾病

热浪可刺激人体呼吸系统,增加呼吸道疾病的发病与死亡率。Huang等^[35]指出,热浪使肺气肿、急性呼吸道感染等呼吸系统疾病发病死亡数增加。也有研究表明,呼吸道疾病对高温致死最敏感^[36]。同时,热浪发生时,花粉、孢子、霉菌等更活跃,易引发过敏性呼吸道疾病;臭氧增多,易引发呼吸道疾病,尤其是慢性阻塞性气管疾病和哮喘;空气污染加重,可吸入颗粒物、二氧化硫、二氧化氮等会增强支气管敏感度,影响肺功能,损害呼吸系统,加大对人体慢性呼吸道疾病影响,这在实验性研究和流行病学研究中都得到了证实^[37]。另外,Robine等^[38]、Mastrangelo等^[33]发现,64岁以上和74岁以上的老人更易受影响。所以,热浪期间,心肺功能不好的人群、老人和过敏人群应更加注意防治,并保持良好的生活习惯。

2.4 神经系统疾病和精神病

干热天气下,太阳辐射中红外线可穿透颅骨,导致脑组织温度骤然升高,大脑皮层调节中枢的兴奋性增加,中枢神经系统运动功能受抑制,脑神经功能受损,使得反应功能迟钝、头昏、失眠、烦躁^[21, 39]。另外,高温中暑可以引起帕金森和小脑共济失调综合症,对所有脑区有不同程度的损伤,易于神经系统紊乱和癫痫等发病,老年人风险更大^[24, 40]。

高温热浪对精神疾病影响研究相对较少,意见不一,但大多研究认为热浪促发精神类疾病。Bark等^[41]研究得出,怀孕期间第2~6个月和8~9个月时发生热浪会分别增大新生男婴和女婴患精神分裂的可能性。

Naughton等^[42]指出,热浪期间精神病发病增加,且年轻人更多,不过,也研究则显示,65~74岁老人更明显。少数学者如Nitschke^[17]等则并未发现热浪对精神类疾病发病率产生明显影响。近10年来,环境危险因素与人群精神类疾病发病率和死亡率的相关研究也越来越被重视。

2.5 消化系统疾病和泌尿系统疾病

热浪期间,人体皮肤血管扩张,同时,在神经系统影响下,腹腔内脏血管收缩,胃液分泌减少,胃蠕动减弱,会引起食欲不振,消化力下降及其他肠胃疾病,且耗营养多,长时间会营养缺乏,体重减轻,乏力^[21, 22]。另外,高温可以直接作用于肝脏,同时受到缺氧、缺血、弥漫性血管内凝血、代谢性中毒的影响,出现肝细胞损伤、肝功衰竭^[40]。

若不适当补水,会使尿液浓缩,加重肾脏负担,湿度高时,还会抑制出汗,若再进行体力劳动,可导致肾脏等脏器衰竭^[22, 28]。美国一项研究证实,高温会诱发肾结石^[43]。Jossieran等^[44]、Nitschke等^[8, 17]统计分析得出,热浪期间肾绞痛、肾衰竭等发病率上升,老年人更明显,而且,肾脏疾病在热浪中的发病率有上升趋势。对此,随着热浪的多发与研究的深入,此类疾病的热相关性研究应该引起研究者注意。

2.6 皮肤病和传染病

热浪期间,多汗易出现痱子破坏皮肤保护层,同时,高环境温度利于细菌繁殖、传播,空气污染和臭氧、紫外线的增加也不利于皮肤调节平衡,促进一些皮肤病(化脓性皮肤病、霉菌病、皮炎、皮肤癌等)的传播发生^[45]。婴幼儿汗腺发育不全,抵抗力弱,更易受影响。

高温加快媒介昆虫的生长繁殖及细菌疾病的传播,并使昆虫体内病原体的致病力增强而利于某些传染病的流行^[4]。有学者指出,最高温度、平均气压和蒸发量与乙脑的传播有关。近年,不断有学者提出,气候变化可能引起疟疾、登革热、腹泻、血吸虫病、黄热病、日本脑炎等传染病频发^[5]。热浪出现时,应加强传染性疾病的预防。

2.7 其他

不同研究表明,热浪期间,人体肌肉张力、反应能力下降,易疲劳,甚至全身乏力,并且高温会抑制免疫系统,随高热时间延长,细胞免疫及液体免疫功能会受影响,同时高温加重肾脏负担,使机体对化学物质毒性作用的耐受度、免疫降低,抗病能力下降^[21, 22, 40]。高温热浪间接引起的空气污染还可影响生殖系统,甚至致癌^[46]。另有统计显示,全球高温天气增多使两性自

杀率都有提高^[47]。

3 热浪对相关死亡率的影响

自20世纪六七十年代,一些国家地区开始对热浪与死亡率关系进行研究^[32, 48]。除少数研究外,大多研究者认为热浪期间,人群总死亡率增加,日死亡人数与每日温度呈非线性相关,并存在地域性^[5]。此非线性关系一般是“V”或“U”型,也有研究得出是“J”形,当温度高于一定界限之后,死亡率随温度的上升而上升,并在较高温度有一个陡峭的变化^[49, 50]。Matzarakis等^[51]、孙立勇等^[2]、Páldy等^[52]分别对1987年雅典热浪、1987—1989年间安徽热浪和1970—2000年间布达佩斯热浪进行研究,结果表明热浪期间人群总死亡率明显上升,死亡高峰与高温曲线峰值相吻合。也有研究者指出,因相关的统计学定义难以确定,热相关死亡率应更高^[27]。

热浪可诱发多种疾病而导致死亡,对健康的影响也与个体有关,中老年人、体弱及患有心脑血管等慢性病人风险更大。对不同时期亚洲、大洋洲、欧洲一些城市发生的热浪的分析表明,呼吸系统疾病、心脑血管病是热浪期间主要致死疾病,热诱导血症、消化系统疾病等的死亡率也与热浪有关^[2, 8, 53-55]。2003年,Simón等^[56]在欧洲多国发现,热浪期间死亡率或超额死亡率上升,且多数为老人。而且,发生在夜间或常年气候较冷地区的高温,易引起更高的死亡率,但不同强度的高温主要引发的疾病有所不同^[4, 49, 57],所以在热浪相关研究中,确定合理的界限温度是一个难点问题。

大气污染因素与气象因素的交互作用对人体健康的影响不容忽视。20世纪90年代中期开始,国内外流行病学研究者用不同模型对污染物与温度的关系进行探讨,证实可吸入颗粒物、臭氧、一氧化碳、二氧化硫、光化学烟雾等污染物常在高温条件下与死亡率有关,可引发心血管疾病、心肺疾病等疾病,微颗粒物浓度越高,颗粒越细小,热相关死亡率越大,并存在地区差异^[27, 31, 46, 55, 58-60]。另外,克罗地亚、法国、澳大利亚的相关研究显示,热浪期间臭氧含量和高温协同使死亡率增加,尤其对老年人和心血管疾病等慢性病患者人群影响更大^[4, 55, 58]。近年来,随着气候和环境问题的突出,将热浪等天气现象与空气污染联合研究逐渐成为一个新的热点。

4 热浪对人体健康影响的流行病学特征

4.1 年龄特征

人体受热浪影响程度与年龄有关,尽管Vaneckova等^[55]认为不同人群风险接近,Nitschke等^[17]

发现15~64岁的人群受影响更明显,但大多研究表明,老年人和婴幼儿热调节机能较差,对热应力及相关的空气污染更敏感,所以易受影响^[19, 31, 61]。众多研究者对近30年间美国、中国、日本、欧洲的不同城市热浪研究证实,随年龄增长,热浪相关死亡率增长,64岁以上人群增加最显著^[5, 25, 36, 57, 62, 63]。Weisskopf等^[64]还指出,64岁以上人群中随年龄增长,受热浪影响程度增长更迅速,且主要引发的疾病也在变化^[32]。另有研究者分别研究得出15岁以下儿童、5岁及以下儿童、0~1岁婴儿更易受热浪影响^[27, 48]。

4.2 性别特征

国内外有关热浪对性别影响的观点尚存在分歧,不能确定男、女性对热应力敏感性有差异。Yu等^[65]认为热应力对女性影响更大,Trigo等^[66]研究得出这种性别差别在一定年龄以上的人群中才体现。也有结果显示,在受热浪影响较大人群(65岁以上)中,男女死亡率均等,但在其余人群中,男性死亡比例几乎是女性的5倍^[3]。Fouillet等^[26]对2003年热浪研究表明,在0~1岁及35~44岁人群中,仅男性受到明显影响。Conti等一些研究者则表示热浪对男女影响差异不大^[35, 67, 68]。对此,有关热浪对人体影响的性别因素仍需进行系统的研究。

4.3 “滞后效应”和“收获效应”

大多数研究证实,热浪期间人群死亡率存在“滞后效应”,即温度不仅影响当日的死亡人数,还可能影响其后几天的死亡人数,说明了热浪持续天数的累积作用^[5]。许多研究发现热浪对死亡率的影响有0~1d的滞后,还有研究者认为滞后可达1~3d或5d,且对心脑血管疾病影响更久,老年人尤甚^[16, 69, 70]。

高温热浪及空气污染与流行病学死亡率或发病率的“收获效应”已被研究证实,即热浪期间死亡人数的增加可以被随后期间内死亡人数的暂时减少而得到补偿,使一些最易感的人群提前几天死亡,所以又称“死亡位移”^[27]。

5 研究方法简介

热浪研究方法有多种,截至20世纪末,各国研究者对热浪研究方法较为简单,通常是将医学资料与气象资料进行相关分析,建立气象条件与人类疾病的统计学关系^[71]。具体采用的方法因所选用资料的类型而异。

(1) 指标法。包括仅考虑温度的单因素指标,一般以最低气温、最高气温、平均气温为依据;考虑温湿的双因素指标及综合温度、湿度、风、云量、降水、辐射、空气状况、热连续天数、人体热量平衡等因素的多因素指标。通过指标值分析热浪对人体影响

程度,各地需按局地条件选用适宜的指标。

(2) 天气分型法。由Sheridan等综合考虑多项气象因素而首次提出,即对某地逐日天气进行分类,确定对人类健康有负面影响的高危险天气类型;Kalkstein等进一步对此法进行开发,首先对天气分类,再把当日天气从资料库中选取天气类型进行相似性比较,从而确定天气类型,进行预报^[3]。

(3) 多元回归分析法(多种因子建立回归方程)。将逐日天气特点和逐日死亡率资料比较用于分析,常用来研究热浪与超额死亡率的关系。根据不同的研究要求和各地的气候特点,又常采用不同的方法。近年来,许多研究者采用的时间序列方法、病例交叉研究等均用此法进行相关分析。

6 小结

(1) 国内外很多研究表明,热浪对健康影响显著,已有研究主要针对热浪对死亡率及发热、心脑血管疾病、呼吸道疾病的发病率的影响,对其他相关疾病发病率缺少系统的研究。同时,各研究对从热浪的定义到热相关死亡率的统计学定义等方面观点尚不统一。

(2) 总体来讲,热浪期间人群总死亡率明显上升,死亡高峰与高温曲线峰值相吻合,主要造成发热中暑、心脑血管疾病、呼吸道疾病发病率增加,同时引起神经系统疾病、精神病、消化系统疾病、泌尿系统疾病、传染病等多种疾病发病增加,影响程度不仅与热浪发生特征及地理位置有关,还受社会因素影响。

(3) 热浪对婴儿儿童、老年人和本身患病人群更易造成影响,但性别因素的影响仍需进行系统研究。而且,值得注意的是,年龄和性别因素对于不同的疾病的影响程度可能不同,甚至相反,对此,应在研究热浪时详细地针对不同种疾病分别作相关研究才更有说服力。

(4) 高温热浪加剧空气污染,可对人体健康产生不利影响,尤其易引发心血管疾病和呼吸道疾病。近些年,热浪及其引发的空气污染的协同作用对人体的间接影响也吸引更多研究者做深入的研究,但相关研究大多集中于对可吸入颗粒物、臭氧、紫外线的影响,且多为统计学研究。今后,应结合流行病学研究和毒理学研究方法探讨其他污染成分在高温条件下对人体的影响。

(5) 热浪对人体的影响存在收获效应和短暂的滞后效应,一般可滞后0~1d、1~3d或5d不等,不同地区的滞后天数还有待进一步研究。了解其滞后效应对预防热浪的危害具有实际指导意义。

(6) 热浪的相关研究方法过于简单,一般指

标法、天气分型法、多元回归分析法,集中于使用气象资料和医疗资料相关分析,并且由于缺少界定标准,资料统计可能存在误差。研究热浪与健康的关系时,应综合考虑热浪发生的多气象要素特征、地理位置及其他社会因素、行为因素,运用气象学与流行病学、毒理学结合的方法,利用人群和动物实验进一步进行机理研究。对此,需进一步加强气象学和医学相关人员的合作。

参考文献

- [1] Unkašević M, Tošić I. An analysis of heat waves in Serbia. *Global and Planetary Change*, 2009, 65(1-2): 17-26.
- [2] 孙立勇,任军,徐锁兆.热浪对炎热地区居民死亡率的影响. *气象*, 1994, 20(9): 54-57.
- [3] 刘建军,郑有飞,吴荣军.热浪灾害对人体健康的影响及其方法研究. *自然灾害学报*, 2008, 17(1): 151-156.
- [4] 余兰英,刘达伟.高温干旱对人群健康影响的研究进展. *现代预防医学*, 2008, 35(4): 756-757.
- [5] 李芙蓉,李丽萍.热浪对城市居民健康影响的流行病学研究进展. *环境与健康杂志*, 2008, 25(12): 1119-1121.
- [6] Kalkstein L S, Sheridan S C, Kalkstein A J. Heat/health warning systems: Development, implementation, and intervention activities. *Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change*, 2009, 1(I): 33-48.
- [7] Muthers S, Matzarakis A, Koch E. Summer climate and mortality in Vienna—a human-biometeorological approach of heat-related mortality during the heat waves in 2003. *Wiener Klinische Wochenschrift*, 2010, 122 (17-18): 525-531.
- [8] Nitschke M, Tucker G R, Bi P. Morbidity and mortality during heatwaves in metropolitan Adelaide. *Medical Journal of Australia*, 2007, 187(11-12): 662-665.
- [9] Nicholls N, Skinner C, Loughnan M, et al. A simple heat alert system for Melbourne, Australia. *International Journal of Biometeorology*, 2008, 52(5): 375-384.
- [10] D'Ippoliti D, Michelozzi P, Marino C, et al. The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: Results from the EuroHEAT project. *Environmental Health*, 2010, 9: 37.
- [11] 张书余. *医疗气象预报*. 北京:气象出版社, 2010.
- [12] Gabriel K M, Endlicher W R. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8-9): 2044-2050.
- [13] Lubert G, McGeehin M. Climate change and extreme heat events. *American Journal of Preventive Medicine*, 2008, 35(5): 429-435.
- [14] Hajat S, O'Connor M, Kosatsky T. Health effects of hot weather from awareness of risk factors to effective health protection. *The Lancet*, 2010, 375(9717): 856-863.
- [15] Xun W W, Khan A E, Michael E, et al. Climate change epidemiology: methodological challenges. *International Journal of Public Health*, 2010, 55(2): 85-96.
- [16] Åström D O, Forsberg B, Rocklöv J. Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: a review of recent studies. *Maturitas*, 2011, 69 (2): 99-105.
- [17] Nitschke M, Tucker G R, Hansen A L, et al. Impact of two recent extreme heat episodes on morbidity and mortality in Adelaide, South Australia: a case-series analysis. *Environmental Health*, 2011, 10: 42.
- [18] Kovats R S, Hajat S, Wilkinson P. Contrasting patterns of mortality and hospital admissions during hot weather and heat waves in Greater London, UK. *Occupational and Environmental Medicine*, 2004, 61(11): 893-898.
- [19] 袁晓瑛,秦文卓,戚平.浅谈高温热浪及其健康影响. *中国科技博览*, 2010, 27: 99.
- [20] 廖妙婵,孙雅坤.论极端气候事件及其影响. *重庆科技学院学报(社会科学版)*, 2011, (3): 59-60, 66.
- [21] 刘云红.高温影响人体健康的生理机理及营养素的补充. *辽宁师专学报*, 2006, 8(2): 66-67.
- [22] 徐井芳.暑热高温对人体的危害. *中国气功*, 2002, 8: 11.
- [23] 王长来,茅志成,程极壮.气象因素与中暑发生关系的探讨. *气候与环境研究*, 1999, 4(1): 40-43.
- [24] Semenza J C, McCullough J E, Flanders W D, et al. Excess hospital admissions during the July 1995 heat wave in Chicago. *American Journal of Preventive Medicine*, 1999, 16(4): 269-277.
- [25] Henschel A, Burton L L, Margolies L, et al. An analysis of the heat deaths in St. Louis during July, 1966. *American Journal of Public Health Nations Health*, 1969, 59(12): 2232-2242.
- [26] Fouillet A, Rey G, Laurent F, et al. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *Int Arch Occup Environ Health*, 2006, 80(1): 16-24.
- [27] Basu R. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environ Health*, 2009, 8(40): 11.
- [28] 王安来.热浪袭来伤“心”损“脑”. *医药保健杂志*, 2003, 08A: 13.
- [29] Cheng X, Su H. Effects of climatic temperature stress on cardiovascular diseases. *European Journal of Internal Medicine*, 2010, 21(3): 164-167.
- [30] Hausfater P, Doumenc B, Chopin S, et al. Elevation of cardiac troponin I during non-exertional heat-related illnesses in the context of a heatwave. *Critical Care*, 2010, 14(3): R99.
- [31] Li G, Zhou M, Cai Y, et al. Does temperature enhance acute mortality effects of ambient particle pollution in Tianjin City, China. *Science of the Total Environment*. 2011, 409(10): 1811-1817.
- [32] Mastrangelo G, Hajat S, Fadda E, et al. Contrasting patterns of hospital admissions and mortality during heat waves: Are deaths from circulatory disease a real excess or an artifact. *Medical Hypotheses*, 2006, 66(5): 1025-1028.
- [33] Mastrangelo G, Fedeli U, Visentin C, et al. Pattern and determinants of hospitalization during heat waves: an ecologic study. *BMC Public Health*, 2007, 7: 200.
- [34] Loughnan M E, Nicholls N, Tapper N J. When the heat is on: Threshold temperatures for AMI admissions to hospital in Melbourne Australia. *Applied Geography*, 2010, 30(1): 63-69.
- [35] Huang W, Kan H, Kovats S. The impact of the 2003 heat wave on mortality in Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, 2010, 408 (2): 2418-2420.
- [36] Ishigami A, Hajat S, Kovats R S, et al. An ecological time-series study of heat-related mortality in three European cities. *Environ Health*, 2008, 7: 5.
- [37] Curson P. Climate and chronic respiratory disease in Sydney—The case of asthma. *Climatic Change*, 1993, 25(3-4): 405-420.
- [38] Robine J M, Cheung S L, Le Roy S, et al. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 2008, 331(2): 171-178.
- [39] 谈建国,黄家鑫.热浪对人体健康的影响及其研究方法. *气候与环境研究*, 2004, 9(4): 680-686.
- [40] 陈忠,朱剑琴.高温中暑的病理生理学研究进展. *国外医学: 生理病理科学与临床分册*, 1997, 17(4): 373-375.
- [41] Bark N M, Krivelevich I. Heatwaves during pregnancy as a risk factor for schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 1996, 18(2): 105.
- [42] Naughton M P, Henderson A, Mirabelli M C, et al. Heat-related mortality during a 1999 heat wave in Chicago. *American Journal of Preventive Medicine*, 2002, 22(4): 221-227.
- [43] 钱颖波,李石柱,王强,等.气候变化对人体健康影响的研究进展. *气候变化研究进展*, 2010, 6(4): 241-247.
- [44] Jossier L, Caillère N, Brun-Ney D, et al. Syndromic surveillance and heat wave morbidity: a pilot study based on emergency departments in France. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 2009, 9(1): 14.
- [45] Llamas-Velasco M, García-Díez A. Climatic change and skin diagnostic and therapeutic challenges. *Actas Dermo-Sifiliográficas (English Edition)*, 2010, 101(5): 401-410.
- [46] 车瑞俊,袁杨森.大气颗粒物致突变性及对人体健康的危害. *资源与产业*, 2006, 8(1): 105-109.

- [47] Preti A, Ientini G, Maugeri M. Global warming possibly linked to an enhanced risk of suicide data from Italy, 1974–2003. *Journal of Affective Disorders*, 2007, 102(1-3): 19–25.
- [48] Schuman S H. Patterns of urban heat-wave deaths and implications for prevention: Data from New York and St. Louis During July, 1996. *Environmental Research*, 1972, 5(1): 59–75.
- [49] 杨晓峰, 郑有飞, 温兴平, 等. 热浪对人体健康的影响及应对措施 [OL]. 2008, <http://www.paper.edu.cn> (中国科技论文在线): 1–6.
- [50] Patz J A, Campbell-Lendrum D, Holloway T, et al. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 2005, 438(7066): 310–317.
- [51] Matzarakis A, Mayer H. The extreme heat wave in Athens in July 1987 from the point of view of human biometeorology. *Atmospheric Environment*, 1991, 25(2): 203–211.
- [52] Páldy A, Bobvos J, Vámos A, et al. The effect of temperature and heat waves on daily mortality in Budapest, Hungary, 1970–2000. *Extreme Weather Events and Public Health Responses*, 2005, part 2: 99–107.
- [53] Liu L, Breitner S, Pan X, et al. Associations between air temperature and cardio-respiratory mortality in the urban area of Beijing, China: a time-series analysis. *Environmental Health*, 2011, 10: 51.
- [54] Flynn A, McGreevy C, Mulkerrin E C. Why do older patients die in a heat wave? *QJM*, 2005, 98(3): 227–229.
- [55] Vaneckova P, Beggs P J, de Dear R J, et al. Effect of temperature on mortality during the six warmer months in Sydney, Australia, between 1993 and 2004. *Environmental Research*, 2008, 108(3): 361–369.
- [56] Simón F, Lopez-Abente G, Ballester E, et al. Mortality in Spain during the heat waves of summer 2003. *Euro Surveillance*, 2005, 10(7): 156–161.
- [57] 何权, 何租安, 郑有清. 炎热地区热浪对人群健康影响的调查. *环境与健康杂志*, 1990, 7(5): 206–211.
- [58] Alebić-Juretić A, Cvitaš T, Kezele N, et al. Atmospheric particulate matter and ozone under heat-wave conditions: do they cause an increase of mortality in Croatia? *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*, 2007, 79(4): 468–471.
- [59] Francis X V, Chemel C, Sokhi R S, et al. Mechanisms responsible for the build-up of ozone over south east England during the August 2003 heatwave. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 6880–6890.
- [60] 周家斌, 徐永福, 王喜全, 等. 关于气象与人体健康研究的几个问题. *气候与环境研究*, 2010, 15(1): 106–112.
- [61] Ebi K L, Paulson J A. Climate change and child health in the United States. *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*, 2010, 40(1): 2–18.
- [62] Hutter H P, Moshhammer H, Wallner P, et al. Heatwaves in Vienna: effects on mortality. *Wien Klin Wochenschr*, 2007, 119(7-8): 223–227.
- [63] Nakai S, Itoh T, Morimoto T. Deaths from heat stroke in Japan: 1968–1994. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 43(3): 124–127.
- [64] Weisskopf M G, Anderson H A, Foldy S, et al. Heat wave morbidity and mortality, Milwaukee, Wis, 1999 vs 1995: an improved response? *American Journal of Public Health*, 2002, 92(5): 830–833.
- [65] Yu W, Vaneckova P, Mengersen K, et al. Is the association between temperature and mortality modified by age, gender and socio-economic status? *Science of the Total Environment*, 2010, 408 (17): 3513–3518.
- [66] Trigo R M, Ramos A M, Nogueirac P J, et al. Evaluating the impact of extreme temperature based indices in the 2003 heatwave excessive mortality in Portugal. *Environmental Science and Policy*, 2009, 12(7): 844–854.
- [67] Conti S, Meli P, Minelli G, et al. Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research*, 2005, 98 (3): 390–399.
- [68] 李永红, 陈晓东, 林萍. 高温对南京市某城区人口死亡的影响. *环境与健康杂志*, 2005, 22(1): 6–8.
- [69] Tobías A, de Olalla P G, Linares C, et al. Short-term effects of extreme hot summer temperatures on total daily mortality in Barcelona, Spain. *International Journal of Biometeorology*, 2010, 54(2): 115–117.
- [70] Ha J, Shin Y, Kim H. Distributed lag effects in the relationship between temperature and mortality in three major cities in South Korea. *Science of the Total Environment*, 2011, 409 (18): 3274–3280.
- [71] 郑有飞. 气象与人类健康及其研究. *气象科学*, 1999, 19(4): 424–428.

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

王瑜莎¹ 张钦仁² 白月明³

(1 辽宁省阜新市气象局, 阜新 123000; 2 中国气象局, 北京 100081; 3 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 在分析西北地区降水的变化特点以及干旱对玉米产量影响的基础上, 利用1985—2007年甘肃省春玉米产量资料、CI指数和相对应的降水、需水资料, 提出了干旱对玉米产量影响的定量评估方法。该方法以DI指数作为干旱评估指标, 综合考虑了相对气象减产率和DI累积指标的关系, 并进行了实证分析, 取得了比较可信的评估结果, 为科学、定量地分析西北地区干旱对农业生产的影响提供了可借鉴的评估方法。

关键词: 西北地区, 干旱, 春玉米, 影响, 评估方法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.007

The Research of the Assessment Method of Drought for the Impact on Agriculture in the Northwest

——The Spring Corn in Gansu Province

Wang Yusha¹, Zhang Tairen², Bai Yueming³

(1 Fuxin Meteorological Bureau of Liaoning Province, Fuxin 123000 2 China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The changing characteristics and trends of the precipitation of the Northwest Territories, as well as the impact of drought on agriculture was analyzed. Based on these, using the data of spring corn yield, CI index and corresponding to the precipitation, water demand from 1985 to 2007 in Gansu Province, the quantitative evaluation method of the influence of drought on corn yield was discussed in the paper. With the help of this method, DI index as drought assessment indicators was proposed. The relationship between the relative meteorological production rate and cumulate DI index were comprehensively considered, of which was made a positive analysis, so as to obtain a more reliable evaluation result. Therefore, the paper put forward a reference assessment method, in order to make a scientific analysis and a quantitative assessment of the influence of drought on agricultural production.

Keywords: the Northwest, drought, spring corn, influence, evaluation method

1 引言

西北地区深居内陆, 来自海洋的湿润气流难以到达, 降水稀少, 气候干旱。全球气候变暖背景下, 西北地区气温升高、蒸发加大, 气候变得更加干旱, 农业生产可持续发展受到的负面影响逐渐显露且变得越来越严重^[1]。

王大钧等^[2]对中国西部近40年的降水研究表明, 西部年降水量的空间分布极不均匀, 局地差异大, 特别是农业比较发达的地区, 出现了降水减少、干旱加剧的情况。刘德祥等^[1]认为甘肃东部降水持续偏少, 干旱大面积频发, 暖干化已成为西北现代气候变化的总

体特征, 甘肃东部是人口密集的重要农作区域, 暖干化趋势影响到了当地作物的产量, 影响了社会经济的全面发展。居辉等^[3]认为, 热量资源增加可能会由于水资源的匮乏而无法得到充分利用, 最终使农作物生长加快, 发育期提前, 全生育期缩短, 引起减产。西北地区降水的总体变化特点是降水总量减少, 时空分布不均匀, 年际变化大, 加剧了干旱发生程度, 对农作物熟制、布局、结构产生了严重影响。

玉米是我国北方旱作区主要栽培作物之一, 也是甘肃的主要粮食作物, 生长季节在4—9月, 期间的热量条件基本满足玉米正常生长, 除病虫害外, 降水几乎成为制约玉米产量的唯一因素^[4]。姚晓红等^[5]对1985—2004年实测气象和粮食产量资料的分析表明, 暖干化的趋势导致西北春旱、初夏旱、伏旱加剧。春旱造成玉米出苗不齐, 亩茎数不足; 初夏旱影响发育

收稿日期: 2012年3月13日; 修回日期: 2012年10月22日

第一作者: 王瑜莎(1984—), Email: wangyusha46@163.com

通信作者: 张钦仁(1957—), Email: zhtr@cma.gov.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106021)

期玉米授粉；伏旱会影响作物灌浆乳熟，对玉米产量影响较大^[6]，最终造成玉米减产。因农业生产具有很强的季节性，当干旱出现在农作物水分敏感期时，对农业危害最为严重^[7]，特别是在生殖生长初期，如遇到干旱，即使后期条件转好，作物长势也很难恢复或弥补，最终会对产量造成很大的影响，甚至绝收^[8]。

针对不同区域农业生产特点，综合考虑降水、热量和作物生育阶段定量分析评估干旱对农作物的影响，对提高防灾减灾的能力，趋利避害，保障农业增产，促进农业的可持续发展具有十分重要的现实意义，同时也可开展多时效、定量化的干旱灾害监测分析、影响评估提供技术支持。

2 干旱对西北地区农业影响评估方法

灾害评估是灾害研究的核心内容，作物干旱灾害损失评估是中国西北地区旱作农业的一个研究热点。近年来，量化评估灾害所造成的产量损失开始受到人们的关注^[9]。

刘静等^[10]利用正交多项式将各县单产序列进行产量趋势分离，建立气象产量与各月旱灾累积指数的关系，估算各县作物单产；根据各县作物单产与历史同期最高产量（即期望产量）或同期历史平均产量的比较，核算干旱减产幅度或减产产量，再根据当年粮食价格，可估算减产损失，实现灾损评估。刘静等^[11]利用小麦干热风观测资料和产量统计年鉴，结合民政部门灾害历史资料，运用产量逐级分离模拟和给定初始聚类中心的逐步筛选聚类分析方法，分别确定了宁夏引黄灌区春小麦两类干热风灾害等级判别指标，并建立了各自的等级判别方程；通过小麦抽穗扬花前的气候模拟，分离出灌浆期间两类干热风影响的产量损失评估。

可见，进行灾损评估，必须要有相应的干旱指标、等级标准和评估方法。本文以甘肃省春玉米生产为例，着重介绍了干旱导致农作物损失的评估方法。

2.1 资料与方法原理

产量资料：收集甘肃省主要市（县）1985—2007年的玉米产量资料，产量资料是由《甘肃省年鉴》和有关文献整理得到，通过对产量资料进行社会经济产量和气象产量的分离，模拟相对气象产量（负值的部分）。

表1 张掖发育期内的需水量^[12]

发育期	时间	蓄水总量 (mm)	每天的需水量 (mm · d ⁻¹)
播种—出苗	4月11日—5月10日	18	0.6
出苗—拔节	5月11—31日	51	2.6
拔节—吐丝	6月1日—7月10日	266	6.5
吐丝—成熟	7月11日—9月30日	247	2.8

气象资料：利用气温和降水实测资料，计算CI和降水需水比，需水量资料如表1，然后反演代表站逐日玉米干旱指标DI。用靖远的相对气象产量对DI作为干旱指标的可行性进行验证发现，相对气象产量（负值部分）与DI指数有弱的相关（图1），虽然相关性并不显著，但只要有一定相关性，而且成正相关就符合本研究的需求，因为本研究旨在提供一种思路。由图1可见，相对气象产量的值越小，DI指数的值越小，而DI指数值越小，表明产量越低，干旱越重。

对玉米干旱指标分别建立灾害累积指数，累积指数的研究是利用历史农业气象灾害数值化反演数据库，研究西北地区玉米全生育期干旱灾害的累积指数，在此基础上以减产百分率为评估量，以发育阶段DI指数为评估要素进行分析和研究，从而实现灾损评估。

2.2 干旱损失的分离

该方法是评估方法中重要的一个环节，具体是将气候产量采用趋势法从社会产量中分离。很多研究表明，评估干旱对作物产量造成的损失，应将干旱对农作物产量的影响与其他因素对产量的影响分离开^[13]。

陈家金等^[14]认为，农业技术水平的提升等因素引起粮食单产增加，气象条件的变化引起粮食单产的年际波动，粮食单产和趋势产量、气象产量有着密切的关系，于是在福建省粮食产量气象灾害风险评估中运用三者之间的关系进行了产量处理：

$$Y=Y_t+Y_w+\varepsilon \quad (1)$$

式中， Y 为粮食实际单产， Y_t 为趋势产量（作物在正常天气条件下，农技措施没有明显变化时的基本产量特征，代表着气象变化之外的所有自然和非自然因素对产量的影响）， Y_w 为气象产量（代表气象因素对产量的影响，也包括了某些气象灾害的影响）， ε 为随机噪声，由于所占比例小，忽略不计。

甘肃省春玉米实际产量 Y 为农业技术对玉米产量的贡献 Y_t 和气象产量（负值即为气象灾害损失产量） Y_w 之和。农业技术产量一般用5年滑动平均求得，气象影响产量即为实际产量与农业技术产量之差。为了

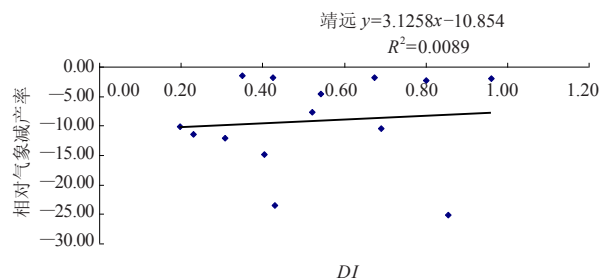


图1 相对气象产量和DI指数的关系

消除地区间的农业生产水平差异,用气象产量除以趋势产量,得到相对气象产量以表示气象条件对产量的影响,这样变量不受时间和空间影响,具有可比性,公式为:

$$Y_{wi} = (Y_i - Y_{ti}) / Y_{ti} \times 100\% \quad (2)$$

式中, Y_{wi} 为第 i 年的气象影响产量, Y_{ti} 为第 i 年的农业技术产量, Y_i 为第 i 年实际产量。表2和表3是运用上述方法后得出的结果。

2.3 干旱指标的确立

降水是旱地农田水分的主要来源,也是影响干旱的主要因素。张叶等^[15]在农业气象干旱指标研究中使用了降水距平百分率,它可以直观地反映出某一时段内降水量与多年平均值的相对多少,还能反映出干旱的发生趋势,但是它不能直接表示农作物遭受干旱影响的程度。甘肃不仅降水量少且时空分布极不均匀,年降水量极不稳定,在甘肃仅用降水距平百分率的指标方法评价干旱并不科学。而一些多因子综合指标,如相对湿度指数、综合气象干旱指数等,都是以降水量为主,兼顾其他诸气象要素构建的,能全面反应农业干旱的发生及其影响。

江远安等^[16]指出,单一干旱指数很难满足既适合不同季节、又适合不同区域的要求,而以标准化降水指数、相对湿度指数和降水量为基础的气象干旱综合指数 CI ^[17] 具有更多的优势, CI 指数中包含90d、30d降水和30d温度的影响,适合较长时间尺度(季度、月)的干旱监测。考虑到甘肃干旱区春玉米受发育期干旱影响较大,所以,在应用 CI 作为玉米干旱指数时,可以加上发育期降水/需水比值,即水分适宜度^[18]。这样构建的干旱指标 DI 既考虑了降水、热量的中、长期(30d与90d)影响,也考虑了生育期降水和需水的作用,不但具有气候意义,更具有生物学意义。可表述为: $DI = CI + \text{逐日 } R / (\text{该日所在发育阶段的需水量 } Q / \text{该日所在发育阶段的日数})$, 即

$$DI = CI + P \quad (3)$$

表2 代表站趋势产量模型(以2007年为例)

站点名称	趋势产量模型	R^2
西峰	$Y_t = 13.49x - 26551$	0.5281
武都	$Y_t = 1.9532x - 3742.9$	0.1121
永昌	$Y_t = 11.945x - 23256$	0.3249
靖远	$Y_t = 1.8375x - 3271.1$	0.0404

表3 代表站趋势产量、气象产量、相对气象产量(以2007年为例)

站点名称	趋势产量(kg)	气象产量(kg)	相对气象产量
西峰	523.4300	2.6559	0.51
武都	177.1724	24.0115	13.55
永昌	717.615	-68.6104	-9.56
靖远	416.7625	-7.3300	-1.76

$$P = R/Q \quad (4)$$

式中, DI 为玉米干旱指数, 无量纲, 主要适用于西北地区春玉米逐日的旱情评估。 CI 为综合气象干旱指数, 代表中、长期气象干旱状况, 无量纲。 P 为发育阶段降水需水比(即发育阶段水分适宜程度)。 R 为降水量(mm)。 Q 为生理需水量(mm)。其中, $Q = A/D$, A 为发育阶段内总生理需水量, D 为发育阶段天数。

2.4 干旱等级的划分

对旱灾进行分级, 能够有效地评定作物受损状况、产量损失程度。朱自玺等^[19]研究小麦干旱风险评估技术和方法时, 从降水资料出发, 按降水负距平绝对值的大小不同划分不同的干旱等级。刘小艳^[20]在陕西省干旱灾害风险评估及规划中, 采用 CI 划分整个陕西省的干旱等级。本研究只探讨由降水减少所引起的减产。

利用灾害年中由干旱造成的减产率(相对气象减产率)、播种—出苗期降水总量和播种—出苗期 DI 累积指标的关系, 确定出西北地区春玉米播种—出苗期干旱 DI 指标的划分等级, 如表4。

3 评估方法应用实例

图2给出了六个典型站点的播种—出苗期 DI 指数的逐年变化特征。从播种—出苗期的 DI 指数变化来看, 可将这些站点分为三组: 西峰和临洮波动最大, 线很陡, 趋势最为明显, 例如, 西峰在1998年的值为7.07, 2005年的值为-0.12; 武都次之, 波动趋势相对比较大, DI 指数的大小居中, 最大值在2002年, 最小值在2005年; 榆中、永昌、靖远波动情况相似, 波动最平缓, 数值整体偏小, 说明干旱程度比较大, 干旱年份比较多。六个站在1998年左右的数值都比较大,

表4 播种—出苗期 DI 指数等级划分表

干旱等级	DI 指数等级	划分依据
轻旱	$DI \geq 5$	降水量 $\geq 70\text{mm}$ 且减产率 $\geq -15\%$
中旱	$3 \leq DI < 5$	$40\text{mm} \leq \text{降水量} < 70\text{mm}$ 且 $-40\% \leq \text{减产率} < -15\%$
重旱	$1.5 \leq DI < 3$	$20\text{mm} \leq \text{降水量} < 40\text{mm}$ 且 $-55\% \leq \text{减产率} < -40\%$
特旱	$DI < 1.5$	降水量 $< 20\text{mm}$ 且减产率 $< -55\%$

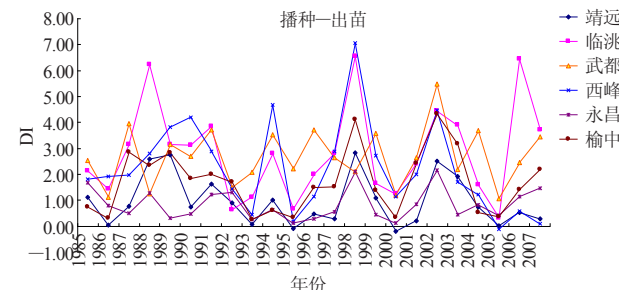


图2 播种—出苗期 DI 指数逐年变化图

表明1998年左右相对无旱,2005年数值都较小,表明2005年六个站点相对较早。

4 结论与讨论

4.1 评估指标

评估指标是灾损评估的关键,评估指标的确定是灾损评估研究中的难点。目前在评估中几乎都用降水距平作为干旱灾害评估指标,但是对于短期干旱或干旱期间采取了灌溉措施的情形,用降水距平作为作物干旱评估指标,评估的结果准确性较低,缺乏科学性。

对农业气象灾害评估时,最关心的是旱灾发生范围和程度、作物受损状况和减产成数。针对甘肃省的气候条件,本研究构建了以综合气象干旱指数CI为基础的干旱灾损评估指标DI,涵盖了长中短期气象影响和发育阶段气象影响,具有生物学意义,可用于评估干旱发生时空变化和规律,也可作灾损评估模型中的参数。

4.2 等级划分

在灾损评估方面,目前所采用的方法虽然简单、实用,对气象资料的需求少,便于推广,但是这些都不能准确地反映出农作物的受旱程度。

根据DI指数来划分时段干旱灾害影响的轻重,是比较合理的。还需注意,气象条件达到农业气象灾害指标后并不意味着作物遭受灾害,当地作物实际受灾等级应为用农业气象灾害指标划定的灾害等级与当地抗灾能力的叠加。由于不同作物的抗灾能力不同,同一作物不同时期抗灾和恢复能力不同,所以作物产量受损的程度不同^[21]。

4.3 评估方法

通过反演历史农业气象灾害,建立甘肃省春玉米干旱数据库,数据库中包括甘肃各玉米生产县、市的站点历年资料,玉米单产、总产、播种面积,春玉米发育期资料,逐日降水量,逐日气温,逐日CI指数、逐日降水需水比。利用该数据库研究玉米整个生长季同类灾害的累积指数,在此基础上开展干旱的数值化定量分析,研究干旱对玉米产量的影响以及近几十年来甘肃省春玉米干旱的时空变化规律。

总之,农业生产是在自然的、多变的气候环境条件下进行的自然再生产和社会再生产过程,生产的每

个环节都与天气、气候条件密切相关^[22]。气候变化会使农业的脆弱性更加明显,农业气象灾害的困扰也日益上升。所以掌握灾损的评估方法,努力做到减轻或避免灾害对农业生产的影响,改善农业生态环境,适应气候变化,对保证高效农业和农业的可持续发展具有重要意义^[23]。

参考文献

- [1] 刘德祥,董安祥,陆登荣.中国西北地区近43年气候变化及其对农业生产的影响.干旱地区农业研究,2005,23(2): 195-201.
- [2] 王大钧,陈列,丁裕国.近40年来中国降水量、雨日变化趋势及与全球温度变化的关系.热带气象学报,2006,22(3): 283-289.
- [3] 居辉,熊伟,许吟隆,等.气候变化对我国小麦产量的影响.作物学报,2005,31(10): 1340-1343.
- [4] 蒲金涌,张存杰,赵红岩,等.干旱对陇东及陇东南地区粮食产量的影响评估.华北农学报,2008,23(增刊): 163-166.
- [5] 姚晓红,许彦平,王润元,等.天水市农业气象灾害对主要粮食作物产量的影响.中国农业气象,2008,29(2): 221-223.
- [6] 蒲金涌,张存杰,姚小英,等.干旱气候对陇东南主要农作物产量影响的评估.干旱地区农业研究,2007,25(1): 167-171.
- [7] 何爱平.我国西部农业灾害的特点及减灾对策研究.经济地理,2001,21(1): 19-22.
- [8] 王春乙,娄秀荣,王建林.中国农业气象灾害对作物产量的影响.自然灾害学报,2007,16(5): 37-43.
- [9] 刘静,王连喜,马力文,等.中国西北旱作小麦干旱灾害损失评估方法研究.中国农业科学,2004,37(2): 201-207.
- [10] 刘静,武万里,孙银川,等.干旱累积指数在宁夏干旱灾害监测及损失评估中的应用.新世纪气象科技创新与大气科学发展——中国气象学会2003年年会“农业气象与生态环境”分会论文集,2003.
- [11] 刘静,马力文,张晓煜.春小麦干热风灾害监测指标与损失评估模型方法探讨——以宁夏引黄灌区为例.应用气象学报,2004,15(2): 217-225.
- [12] 李金华,杨晓光,曹诗瑜,等.甘肃张掖地区不同种植模式需水特征及作物系数分析.江西农业学报,2009,21(4): 17-20.
- [13] 官德吉,陈素华.农业气象灾害损失评估方法及其在产量预报中的应用.应用气象学报,1999,10(1): 66-71.
- [14] 陈家金,张春桂,王加义,等.福建省粮食产量气象灾害风险评估.中国农学通报,2009,25(10): 277-281.
- [15] 张叶,罗怀良.农业气象干旱指标研究综述.资源开发与市场,2006,22(1): 50-52.
- [16] 江远安,赵逸舟,陈颖,等.干旱指数CI的确定及其在新疆的应用.沙漠与绿洲气象,2010,4(2): 18-20.
- [17] 张强,邹旭恺,肖风劲,等.GB/T20481-2006,气象干旱等级.中华人民共和国国家标准.北京:中国标准出版社,2006.
- [18] 姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等.气候暖干化背景下甘肃旱作区玉米气候适宜性变化.地理学报,2011,66(1): 59-67.
- [19] 朱自玺,刘荣花,方文松,等.华北地区冬小麦干旱评估指标研究.自然灾害学报,2003,12(1): 145-151.
- [20] 刘小艳.陕西省干旱灾害风险评估及区划.西安:陕西师范大学,2010.
- [21] 魏瑞江,姚树然,王云秀.河北省主要农作物农业气象灾害灾损评估方法.中国农业气象,2000,21(1): 27-31.
- [22] 贺宇.农业气象服务现状与发展趋势.现代农业科学,2009,16(2): 129-131.
- [23] 成兆金,赵再全,靳会敏,等.气候变化对莒县农业气象灾害的影响及对策.中国农学通报,2007,8(123): 540-543.

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

马志强¹ 孟燕军¹ 林伟立²

(1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2 中国气象局大气成分观测与服务中心, 北京 100081)

摘要: 2012年6月16—22日, 北京及周边地区出现了一次霾及光化学烟雾复合重污染事件。在这次污染事件中, 首先由特定的气象条件引发光化学污染, 主要表现为臭氧严重超标, 进而通过气粒转化等作用导致PM_{2.5}快速积累, 并引起能见度下降。

关键词: 光化学烟雾, 霾

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.008

Influence of Meteorological Factors on an Episode of Photochemical Fog and Haze in Beijing

Ma Zhiqiang¹, Meng Yanjun¹, Lin Weili²

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

2 Centre for Atmosphere Watch and Services, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: There was a combination of photochemical fog and haze during 16–22 June 2012 around Beijing. In the episode, meteorological conditions played an important role in photochemical pollution, which showed high ozone concentration. PM_{2.5} was accumulated by gas-particles conversion and led to low visibility.

Keywords: photochemical fog, haze

1 引言

北京作为我国的首都, 拥有2000多万常驻人口和超过500万辆机动车, 城市化发展对空气质量造成了诸多负面影响。多年来的观测和研究表明^[1-6], 北京地区首要污染物为可吸入颗粒物(PM₁₀), 而随着社会经济发展结构的转型和能源结构调整, 北京的大气污染类型已经从煤烟型污染转为复合型大气污染, 复合型大气污染的代表性污染物为臭氧(O₃)和细颗粒物(PM_{2.5}), 根据目前的研究结果^[7-13], 这两种污染物之间存在密切联系。本文针对2012年6月北京出现的一次大范围的空气污染事件进行了综合分析, 着重探讨了气象条件在这次污染过程的作用。

2 大气成分监测结果

光化学污染是大气中氮氧化物和挥发性有机物在太阳光的照射下发生一系列化学反应, 产生对人体

有害的二次污染物的过程。这些二次污染物以臭氧(O₃)最为重要, 它可危及人体健康, 损害植物生长, 缩短橡胶等材料的使用寿命。严重的光化学污染过程还会直接或间接地改变大气中PM_{2.5}的浓度, 进而能对天气产生影响, 例如大气能见度降低等。

根据北京城区及周边地区7个地面站点(海淀宝联体育公园、中国气象局、顺义区气象局、昌平区气象局、朝阳区气象局、上甸子区域大气本底站和位于河北的固城农业生态站)地面臭氧的观测结果(图1), 臭氧监测仪器采用的是EC9810和TE49C, 自6月16日起北京城区开始出现O₃小时浓度值超过《环境空气质量标准》(GB3095—2012)二级标准的现象, 一直持续到6月22日。整个污染过程中O₃浓度最高值出现在上甸子, 17日16时O₃浓度达到375 μg/m³, 接近国家二级标准的两倍。

图2列出了4个观测站点的PM_{2.5}浓度(其中车公庄数据来自北京市环境保护监测中心网站)和南郊观象台监测的大气能见度水平, PM_{2.5}监测仪器采用美国R&P公司RP1400a, 时间分辨率为5min。18—24日期间, 除22日凌晨PM_{2.5}浓度有所下降, 其余时段PM_{2.5}

收稿日期: 2013年1月4日; 修回日期: 2013年2月20日

第一作者: 马志强(1981—), Email: zqma@ium.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(41105092); 北京市自然科学基金重点项目(812100)

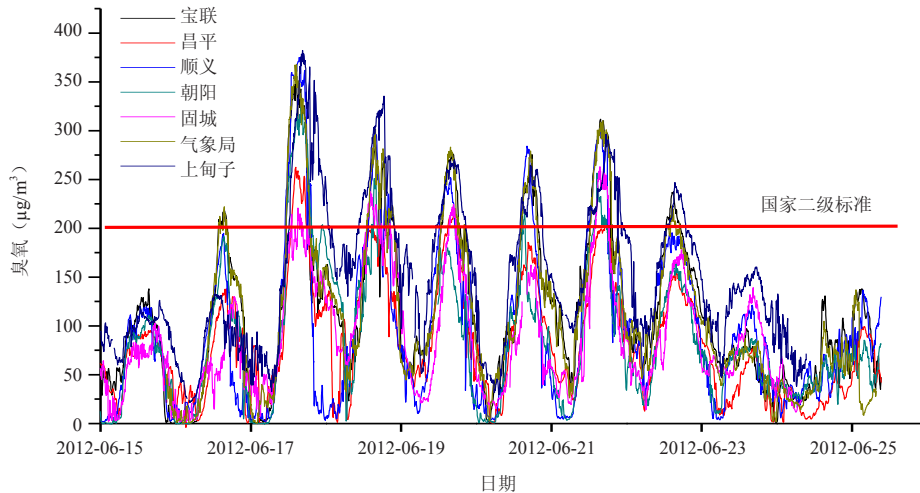


图1 2012年6月15—25日北京及周边地区的O₃浓度变化

均维持在较高浓度，特别是海淀宝联站PM_{2.5}日均浓度持续高于150μg/m³，最高小时浓度甚至达到350μg/m³，而《环境空气质量标准》（GB3095—2012）中PM_{2.5}二级标准日平均浓度阈值为75μg/m³。能见度与PM_{2.5}存在明显的负相关，PM_{2.5}超标期间能见度持续小于10km，并且南郊观象台观测的日均相对湿度都在90%以下。根据《霾的预报和观测等级》（QX/T113—2010），能见度小于10km时，PM_{2.5}浓度高于75μg/m³是霾的大气成分判别指标之一。随着PM_{2.5}浓度增加，大气能见度快速下降，很快就达到霾的标准，并且持续时间与PM_{2.5}污染时间相对应。

3 气象条件分析

6月16—17日受暖高压脊控制，北京上空出现明显的下沉气流，且天空晴朗少云，有利于辐射增温，北京地面出现大范围的干热高温天气，根据图3显示15、16和17日逐时气温最高值分别为29.8、35.3和37.8℃，而相对湿度基本维持在60%以下。据自动站

监测资料分析，17日高温范围覆盖了北京昌平、顺义及以南地区，城区和部分区县站均出现了35℃以上的高温（图4），最大直接辐射甚至达到877W/m²，高温和强烈的辐射为光化学反应提供了有利条件，提高了光化学反应速率，风速持续低于2m/s的偏南风不利于污染的扩散，促进光化学产物的积累，导致O₃浓度达到最高。

随着暖高压脊逐渐减弱，18日开始至23日北京地区高空受不断东移的弱低涡低槽影响，地面位于高压后部，低压前部，处于弱的辐合区。这样的天气形势下，多阵性降水，雨量不大，对污染物的清除作用不明显，反而提高空气湿度，使得大气相对湿度保持在60%以上（图3），这样的湿度环境为PM_{2.5}中亲水性颗粒物的增长提供了有利条件，二者作用相叠加造成19日开始北京城区PM_{2.5}浓度达到最高。PM_{2.5}的增加略滞后于O₃峰值，这与光化学污染导致的二次粒子增加存在紧密联系，持续的O₃高浓度污染会使一次污染物

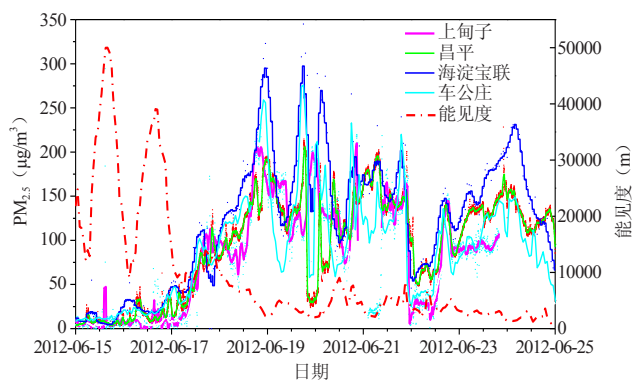


图2 2012年6月15—25日北京地区4个站点PM_{2.5}和能见度变化

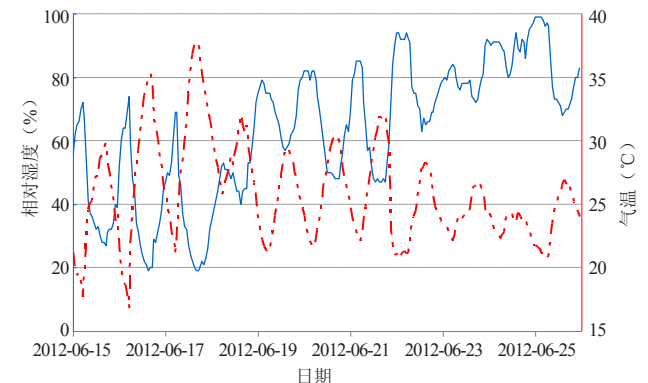
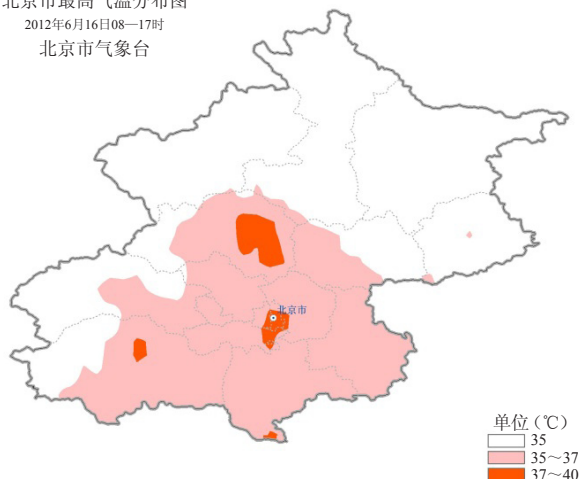


图3 2012年6月15—25日南郊观象台气温和相对湿度逐时变化

北京市最高气温分布图
2012年6月16日08—17时
北京市气象台



北京市最高气温分布图
2012年6月17日08—16时
北京市气象台

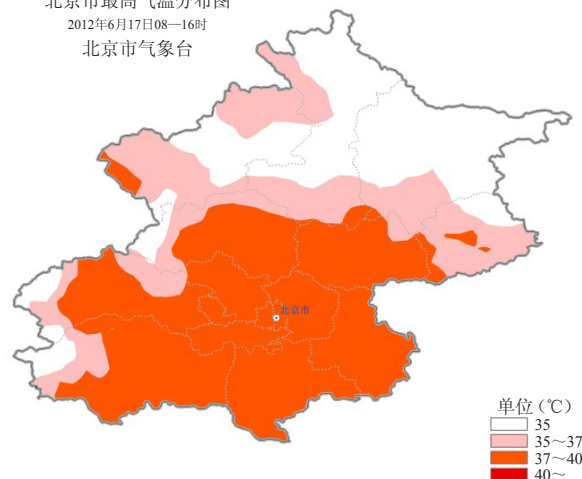


图4 2012年6月16—17日最高气温分布图

(NO_x 、 SO_2 等)迅速氧化为二次气溶胶,这与图2中 $\text{PM}_{2.5}$ 的积累过程完全对应。尽管21日傍晚开始自西南向东北方向先后出现了小雷阵雨伴有局地短时大风,造成22日凌晨观测到的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降,但是22日白天的高温高湿条件又为污染物的迅速积累提供了有利条件。24日受东移的高空槽降雨云带影响,北京地区普降大到暴雨,受到全市连续性降水的影响,此次大范围的霾污染彻底结束。

4 小结与讨论

根据观测结果发现,短时间内大气污染物排放源没有发生明显变化,但空气污染物浓度出现较大波动,唯一的解释就是气象条件在污染过程中起到了决定性的作用。结合北京及周边地区日益突出的大气复合污染特征,可以发现下面一条连锁反应关系:

特殊气象条件→光化学烟雾(高浓度 O_3)→霾污染(高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ +能见度下降)

尽管此类气象条件一般不会造成大的气象灾害,但是其导致的空气污染不容忽视。第一阶段的光化学烟雾对人体健康的影响非常严重,却不易察觉,直到进入霾污染阶段,公众才直观地感受到大气环境的恶化。因此,除了深入研究夏季光化学污染与霾污染形成关系外,还应加强对此类天气过程的预报和预警。考虑在特殊的气象背景下,且排放暂时或长期一段时间内不能得到有效削减的情况,人工降雨或可成为一种直接有效降低污染风险和保护健康的手段。

参考文献

- [1] 宋宇,唐孝炎,张远航,等.北京市大气能见度规律及下降原因.环境科学研究,2003,16(2): 10-12.
- [2] 宋宇,唐孝炎,方晨,等.北京市能见度下降与颗粒物污染的关系.环境科学学报,2003,23(4): 468-471.
- [3] 王京丽,刘旭林.北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探.气象学报,2006,64(2): 221-227.
- [4] 颜鹏,潘小乐,汤洁,等.北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究.气象学报,2008,66(1):111-119.
- [5] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, et al. Chemical characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in haze-fog episodes in Beijing. Environ Sci Technol, 2006, 40: 3148-3155.
- [6] Bergin M, Cass G, Xu J, et al. Measurement of aerosol light scattering and absorption coefficient in Beijing during June, 1999. J Geophys Res, 2001, 106(16): 17969-17980.
- [7] Volkamer R, Jimenez J L, Dzepina K, et al. Secondary organic aerosol formation from anthropogenic air pollution: Rapid and higher than expected. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L17811.
- [8] Li G, Zhang R, Fan J, et al. Impacts of black carbon aerosol on photolysis frequencies and ozone in the Houston area. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: D23206.
- [9] Sillman S. The use of NO_x , H_2O_2 , and HNO_3 as indicators for ozone- NO_x -hydrocarbon sensitivity in urban locations. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 14175-14188.
- [10] Blando J D, Turpin B J. Secondary organic aerosol formation in cloud and fog droplets: A literature evaluation of plausibility. Atmos Environ, 2000, 34: 1623-1632.
- [11] Kleindienst T E, Smith D F, Edney E O, et al. Secondary organic aerosol formation from the oxidation of aromatic hydrocarbons in the presence of dry submicron ammonium sulfate aerosol. Atmospheric Environment, 1999, 33: 3669-3681.
- [12] Sillman S, Logan J A, Wofsy S C. The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in regional ozone episodes. Geophys Res, 1990, 95: 1837-1851.
- [13] 薛莲,孙杰,林云,等.深圳冬季霾日的大气污染特征.环境科学研究,2011,24(5): 505-511.

气象信息传播模式的三个演进阶段及其特点分析

■ 尹仔锋 马雷凯 尚华明

气象信息的有效传播是关系到广大社会公众基本生活与安全需求的大事，对社会生产生活均有重要影响。根据央视的调查结果：我国超过4/5（81.71%）的受众认为天气预报对百姓生活“非常重要”或“比较重要”。电视天气预报在电视节目中收视率和接触程度均排名第一，每天收看气象节目的观众超10亿。气象信息传播的渠道主要有电视、广播、报纸、网络、手机、电话、平面媒体。随着新媒介的发展，电子显示屏等户外媒体、IPTV等移动新媒体也进入了气象服务传播领域。传统媒体结合新媒体的跨媒体传播情境要求气象信息整合传播。随着先进而庞大的广电网络、通信网、互联网“三网合一”，互联网、手机，特别是两者的结合体“微博”等新的互动媒体对现有气象传播提供了新的媒介技术和传播渠道，也进一步影响到现有气象传播的理念与实践。本文分析了气象传播的传播模式由单向度传播向双向互动性传播的嬗变，并根据我国三网融合的发展趋势，构想了未来气象传播模型。

一、传统气象传播：单向度、层级性

传统气象传播的传播者：全国及其他各级气象信息制作机构；媒介渠道：广播、电视、报纸、电话（传真）等传统媒体；对象和受众：各级政府部门，广大社会公众；传播内容：气象服务产品，主要是天气预报预警信息。该传播模式如图1。其中，意见领袖是指人群中比较活跃的群体，他们接触大众媒体较多，他们把自己获知的信息，在经过自己头脑加工后，传递给那些接触大众媒体较少或没有接触大众媒体的人群，实现“大众媒体—意见领袖—一般受众”这样的“两级传播”。

传统气象传播的优点是传播范围广、影响力大，其最大特点是单向度、层级性。单向度指的是传统气象传播不注重受众研究，缺少受众反馈。层级性就是气象部门生产的信息产品经过大众媒介的中转，广播

给广大受众，大众中又有一部分气象信息灵通人士较多地接触大众传媒或气象部门，他们将信息加工再传给其他熟人，就这样由占有媒介资源较多的“精英”群体流向缺乏气象信息的广大公众。自有媒介以来，气象部门就一直在沿用这种模式进行气象传播。

这种模式基于对广大公众普遍需要天气预报信息的认知，认为做好天气预报内容，就能满足公众需求。由于传播者与受众之间缺乏有效的沟通反馈机制，导致传播者力图提高自己的服务能力时具有盲目性，可能提供了受众急需但不喜闻乐见的内容以及不需要的内容。单方面开发出花样繁多的天气预报指数就是一个例子，调查显示有很多指数是受众不关注的，有些指数是受众不理解的，而且不同地区不同季节受众关注的天气预报指数都会有所不同。目前寥寥可数的农业气象服务节目形式单一、内容雷同、讲解生僻、专业性太强等现象非常普遍，且有明显的“城市化”倾向，致使节目达不到满意的传播效果。

从传播模式角度来看，单向度的传播对受众的了解建立在想象与理论层面上，是造成传播障碍的一个重要原因。此外，传播过程中舆论领袖、意见领袖角色存在气象专业素养欠缺问题，对于气象信息的解释与再分析均存在偏差，无法完成“两级传播”，也是一个影响气象传播效果的重要因素。据央视的调查：受众的整体受教育程度低，现阶段初中及以下文化程度的受众占85%，这就决定了我国气象节目表达方式上要尽量通俗、浅显易懂。气象有效传播首要的就是做好内容的贴近性、通俗化，这就需要对受众的需求类型、需求程度、认知能力等进行全方位了解。近十年来，气象事业的服务性受到前所未有的重视，对气象信息受众的调查研究也日渐增多。随着我国气象服务对象的多样化、差异化，传受双方间需要建立常规化的有效互动机制。

二、现代气象传播

1. 传统媒体结合新媒体的跨媒体情境

传统媒体与新媒体，一般以媒介的介质作为区分。一切不同于传统大众媒介介质（报纸、广播、电视等）的媒体，都被称为新媒体，网络被称为第四媒体，手机被称为第五媒体。新媒体的媒介特性即信

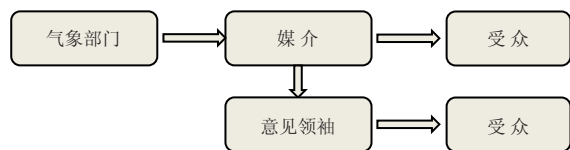


图1 传统气象传播模式

息双向交流互动（交互性），网络论坛、聊天室、博客等均是信息交互的渠道。互联网结合手机、笔记本电脑等移动终端形成的新型互动媒体，具有信息双向互动、反馈及时的特点，是跨媒体的特色。景东等认为，新媒体是所有人向大众实时交互地传递个性化数字复合信息（图文声像）的传播介质。在电子媒介新起之时，为了便于大家认识与理解新生媒介，将新生媒介与传统媒介一分为二。电子媒介蓬勃发展的今天，媒体已进入新的时代——传统媒体结合新媒体进行传播，新媒体以传统媒体的信息传播方式进行传播，有人称之为“全媒体”时代。

2. 跨媒体情境下的气象传播流程分析

在国内外媒体竞争压力和跨媒体形势下，气象部门纷纷尝试拓展新媒体平台的经营，出现了大量气象网站，在传统媒体、气象信息网站、手机报、多媒体数字终端都能看到气象信息。其实自有互联网以来，气象部门就开始利用互联网收集原始气象资料，而在互联网不能到达的地方，手机也成为重要的气象资料收集方式。除了加强气象频道建设，深入与传统媒体、新媒体的合作以外，气象部门还自主自觉地开发新媒体资源，并把互联网、手机等新媒体纳入气象传播的业务流程。

跨媒体情境下，气象信息传播流程可概括为图2。本流程基于德国学者马莱兹克系统论的传播模式，这个系统要讨论的问题太多，本文重点关注气象部门为传播者的传播流程以及受众为接受者的反馈过程。

气象部门的不同气象信息产品（决策服务产品、专业气象产品、公共气象产品）具有不同的传播路径。决策服务产品经过气象部门编码后直接通过政务网传送给政府相应的决策中心，之后以文件、新闻发布会等形式发布；公共气象产品中，天气预报信息及时通过大众传媒发布，预警信息通过政府紧急专用通道及时、准确地传播给目标受众。

气象部门是气象产品的权威生产者，一次编码，

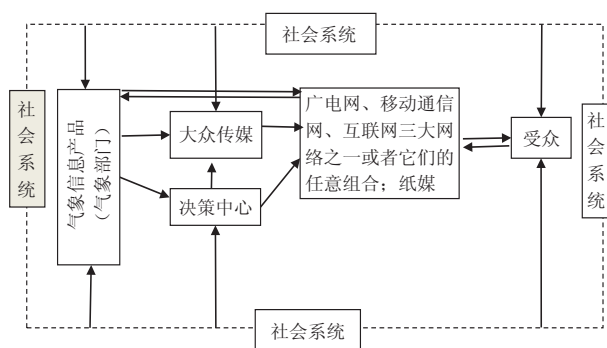


图2 跨媒体传播情境下气象信息传播流程

决策中心（政府）二次编码，气象信息进入政府传播渠道。公共气象产品直接进入大众传媒，大众传媒或进行二次编码或直接通过媒介传给受众。专业气象产品是气象部门根据具体某一行业用户（群体）的需求开发出的特殊产品，通过一定的传播渠道直接传给受众。

受众受到了媒介信息与社会正反多方面信息的影响，对传播内容、传播媒介均具有选择性接触、选择性理解的特点。受众也可以通过传播媒介把信息反馈给气象部门。互联网、手机，特别是两者结合，提供了传受双方沟通的便捷渠道。

3. 现代气象传播特点

由于新媒体具有知识与技术门槛高、花费高、受众人群较少等特点，导致其传播范围比广播、电视等传统媒体要小得多。传统媒体依然是气象传播的主角，其中电视是第一大媒体，电视结合新的媒介发展了IPTV、手机电视、楼宇电视、公交电视等；广播结合新的媒介（手机、互联网等）也具有了手机广播、小区广播、网络广播、移动广播等新的形式；报纸也上了网，发展了手机报，天气预报是其重要内容之一。现代气象传播活动呈现如下特点：重点打造中国气象频道，深入与传统媒体合作，积极利用新媒体，产品与服务差异化、多样化。

（1）积极利用新媒体，覆盖度更高

对于新媒体的运用，包括收集原始气象资料，传递气象信息，利用论坛、QQ群、手机短信与受众互动等等。除手机短信群发、小区广播外，气象网站、论坛、博客等也是利用新媒体的探索方式。2006—2009年，中国气象视频网博客、中国气象影视信息网博客以及部分气象人的新浪博客遍地开花，但气象内容专业且晦涩难懂，导致传播效果受影响。然而，网站主办的一些主题活动传播效果较好。如《气象博客》网络征集、“征集旅游地天气事件图片/视频短片”等，不仅跟帖量大，而且网上带动网下，活动开展得比较成功。由此可见，网络互动依然需要由权威部门或意见领袖进行议程设置，有计划有步骤进行信息传播，内容上要讲究通俗、易懂、贴近大众生活，才能产生较好的效果。这种模式可以简称为互联网+博客+论坛+线下俱乐部的传播模式。

跨媒体情境下，结合新媒体特性的现代气象传播模式，与传统气象传播模式相比，相同的是气象信息生产者依然是气象部门，大众传媒依然是最主要的传播渠道。不同的是经过应用新媒介，受众→媒介组织，受众→气象部门，气象部门→受众的传播模式建立起来。同时，气象部门具有气象专业知识的众多气

象人作为“意见领袖”参与到气象传播中来，实现气象“两级传播”，取得更好的传播效果。

(2) 气象产品与服务差异化，更符合受众需求

在跨媒体传播情境下，广大受众的媒介消费呈现出多元化特点，互联网时代受众阅读习惯与需求也发生了巨大变化。CSM进行的“360跨媒体受众研究”表明，受众在不同媒介接触行为上的重叠度很高，近40%的人同时接触5种及以上的媒体，58%的受众同时接触电视、广播和互联网。气象信息受众群具有地区差异性、年龄差异性、城乡差异性特征，与广播电视受众群体老龄化趋势相反，年轻群体倾向于利用互联网、移动新媒体获取气象信息。

气象信息产品与服务也呈现出差异化、多样化特点，不同的信息面向不同的受众群，内容上密切结合各地的生产生活。根据受众群的特点和具体的气象传播需求选择最佳的媒介组合，如：在城市采用跨媒体传播时，除主要选用核心传统媒体外，结合手机电视、IPTV、微博等新媒体进行气象信息传播是非常重要的发展战略。而针对媒介接触类型主要为广电媒体的农村群体传播时，广电媒体+兴农网+手机短信+意见领袖传播则成为主要传播模式。

(3) 重点打造中国气象频道与多种媒体的合作

中国气象频道是由华风影视集团倾力打造的气象局自建电视频道，属有线数字频道，其影响力和覆盖面都不能满足气象传播需求。因此，气象信息传播需要运用更多的媒体。气象部门与单一媒体的合作，信息的受众到达率低，取得的传播效果越来越小，需要同时发展与多种媒体的合作方能取得较好的传播效果，因此开展了与广播、电视、报纸等传统媒体的合作。

同时，媒体对气象信息的需求也呈现新特点：不仅要求内容准确率高、及时性强、预报时效强，而且要求用语通俗、提醒实用；此外，不同媒体要求不同的内容和呈现形式。媒体的需求一定程度上就是相应受众的需求。因而制作了符合不同媒体需求的气象信息。

4. 存在的问题分析

虽然气象部门综合运用多种媒体传播，覆盖度更高，影响力更广，内容上也更符合受众的多元化消费需求，取得了更好的传播效果。但是，气象“最后一公里”问题依然没有很好解决。随着社会经济的发展、人们需求的升级以及新媒体技术的发展，气象部门将面临不断增长的用户需求与怎样应对新一轮气象信息整合的问题。

三、微博气象传播：双向性、去中心、碎片化

1. 微博传播模式

微博即微博客（MicroBlog）的简称，是一个基于用户人际圈子的信息分享、传播以及获取的平台，通过互联网、手机等移动终端传播。微博的字数一般限制在140字以内；对所有注册用户开放，以用户为中心；发布便捷，内容丰富；信息具有公开性，陌生人也可以访问。2009年以来，随着新浪、网易、腾讯等国内门户网站强力推出微博服务，微博迅速发展起来，2011年被称为“微博发展年”。

微博的传播模式（图3）是“多点→多点”。处于中心的X是“微博”网站，微博网站首先是一个信息交流平台和窗口。A，B，C，…，N代表互联网上微博的博友，他们通过互联网建立圈子，获取信息并自由发布信息。D₁—D_n是代表“博主”D（仅举例说明，实际微博传播中，D可以是A—N中的任何人）的跟随者，是信息传播的传播者和接受者，他们不仅通过圈子获取信息，也可以将感兴趣的信息转发给他的博友，如此呈核裂变式传播。D₁—D_n也可直接到微博网站窗口获取信息，这表示微博传播不局限于熟人圈子，有微博的人群都能自由获取信息和发布信息。网络和手机是“微博”的传播介质。在“微博”传播过程中，“微博”使用者通过手机或者电脑将信息上传到网站，其跟随者可以通过网络在第一时间收到“博主”的信息，同时发表自己的评论。这一传播过程充分体现了互动性、能动性、多向性与时效性。它建立了一个人人都能发声，人人都可能被关注的传播模式。X微博网站提供给大众的不仅仅是每一个人上传的信息，而且进行信息整合，俨然一份报纸、一个电台……，确切地说是一个新兴的媒体。

2. 微博传播特点

(1) 微博传播，在内容上具有碎片化特点，字数限制，强调短而精。

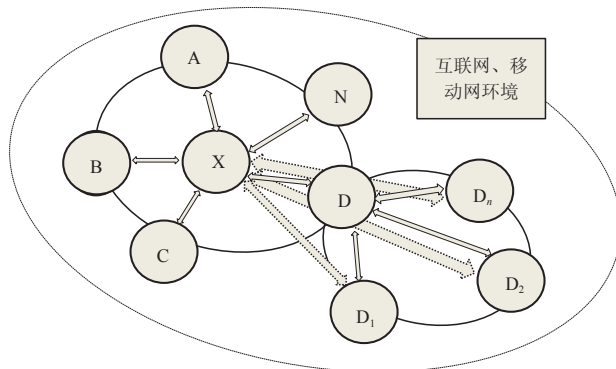


图3 微博传播示意图

(2) 微博传播具有双向性、去中心、平民化特点,传受双方趋于平等。无论是“博主”还是跟随者都既是传者也是受者,传者与受者之间没有明确不变的界限,地位趋于平等。微博核心特点就是普通民众利用微博平台随时随地发布自己的所见所闻所感,自由表达观点,引起关注。微博中的意见领袖与传统媒体传播相比,也具有非层级性、不一定是权威人物的特点。因而微博传播具有“去中心”的特点,人人都是媒体(即“个人媒体”“自媒体”)。

(3) 与其他网络社交媒体相比,具有大众传播的特性。微博是集人际传播、群体传播、大众传播于一体的新媒体。基于网状的多个“人际圈子”中心向外以核裂变的形式爆炸式传播开来,具有很强的传播效果。利用微博发布大众关注的内容,非常切合用户需求的内容能得到大众传播,引起转发、回帖乃至再转发……,完成大众传播过程。短期来看,微博能产生焦点效果;长期来看,增加了大众接触和使用媒介的机会,让大众都具有“传媒接近权”,从中也培养了大众的媒介素养,公众围绕社会热点话题形成“有效的、可以习得的行为和问题解决办法”。

(4) 内容为王,需求为王。微博传播中,能够聚集人气的是那些经常发布重要信息的博主,此外只有切合用户需求的内容才能得到转发,并产生焦点效果。

(5) 受众即内容,受众即效果。在传播过程中,微博互动,就是吸纳了受众进行内容生产,也就组织了受众参与消费活动,即刻产生效果,更进一步对消费活动进行口碑传播。微博的传播效果符合梅特卡夫定律,即传播效用递增—需求创造了新的需求规律。网络传播意义上的“受众”都是个体的相加,每个新上网的用户都因别人的联网而获得了更多的信息交流机会,联网的用户越多,联网的需求越大,传播的影响力也就越大。微博作为一种新的网络传播方式,由于互联网与移动通信网的融合,而具有更加卓越的传播效果。

具有以上特点的微博传播迅速成长成为一种新的媒体形式,打破了传统社会只有精英才能拥有大众媒介的神话,标志着以个人为中心的新媒体正从边缘走向主流,将与其他网络媒介一起进一步改变人们的时空感、思维方式与价值观念乃至社会结构,可谓人类传播史上一次伟大的革命。微博的传播模式将展现媒介融合的新图景,促成网络媒体与手机移动媒体的多媒体协作与网状互动联结,推动社会的信息整合与传媒变革,也正在引起气象传播的革命。

3. 微博气象传播模式分析

微博这一基于“人际圈子”的新媒体具有双向互动的特点,与专业气象服务的双向性相契合。“人际影响能使群体内部意见和行动高度一致”,因此与各行业的特定受众群体建立微博圈子,能及时与受众进行互动,了解群体需求,从而改进气象产品与服务。同时,气象信息通过大众传媒的传播活动,也能通过微博圈子得到反馈,大大缩短了与受众的沟通距离,扩大了与受众沟通的内容与范围,从而创新了气象部门与大众之间的沟通方式。以微博为代表的基于三网融合的新型互动媒体正改变着现代气象信息传播模式。

各地气象部门先后申请了官方微博,很多天气预报工作者也申请了微博,每天最权威的天气预报可从官方微博发出。博友对感兴趣的信息可以转帖、回帖,也可以利用微博把自己发现的气象新闻及时发布到微博,传递给气象部门,提供信息源的同时,也参与气象新闻传播。微博开辟了气象传播的新天地。微博气象传播模式如图4。其中,气象部门对气象信息进行编码形成各种气象产品,通过官方微博传递给受众。

从“广东天气”官方微博在台风“杜苏芮”“启德”的微博传播活动中,可以看到很多可供广大气象官博借鉴的亮点:

(1) 官博是气象局的“自有”媒体,其采、写、编与发布具有流程细化的特点,采编与发布分离,气象服务中心领导或气象局办公室有关负责人签发,保证了官博的内容质量。

(2) 平时的微博演练,为极端灾害事件发生时官博的联动效应奠定基础。编辑改变来料加工的工作模式(从气象台得到天气预报,编写短信),平时根据网上和日常生活与工作中搜集的素材,精心设置议题进行气象科普,注重完善微博流程,并与传媒、网络传媒、QQ媒体、其他官博等通过“加关注”建立粉丝关系,礼尚往来。

(3) 灾害事件过程中,编辑团队兼职采写与编辑,图文并茂,语句注意通俗易懂。如“风力8级”可以说成“约20米每秒”。广东省的官方微博共22个,随着台风路径的发展,他们的群体接力,让350万以上的粉丝群体能随时跟踪台风的动态。

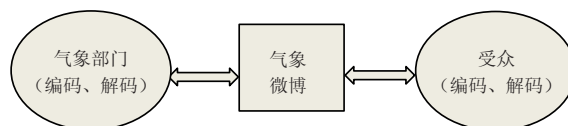


图4 微博气象传播模式

(4) 粉丝的转发活动扩大了传播效果,特别是其中的重要人物如交通、水利等官博及其他气象官博。气象官博在与粉丝的互动中,了解民众需求,有助于设置议题,及时解疑释惑,送温馨提示,能引导粉丝荐言献策,形成前呼后应的传播局面。

(5) 气象官博的操作与管理是一个不断摸索的过程。定期召开总结与策划会,能不断产生新议题,有序不紊地开展灾害预警与防范传播活动。

4. 微博气象传播效果分析

以微博为代表的新媒体,为大众主动参与气象信息传播活动提供了新的空间。在微博这一公共平台上,大众能发布气象新闻信息,表达意愿与要求,也可以起到监督气象服务工作的作用。另一方面,紧缺的、能满足受众心理与需求的气象信息可以得到迅速传播。微博传播的特点决定微博传播模式非常契合气象服务需要,运用得当,可以加快气象部门提高公共服务能力与水平的步伐。

微博气象传播是对传统传播模式的重要补充,对气象服务的好处不可限量。在小尺度天气发生时,气象小编们可以通过它及时发布信息,信息的到达率高;在灾害性天气事件或自然灾害发生时,微博等新兴互动媒体对传媒的补充作用将更加明显,能高效率地动员社会力量参与传播、服务,对完善气象防灾减灾体系具有极大助推作用。

根据微博的受众即效果的特点,通过最佳化的气象服务黏住网民,赢得博友,获得粉丝忠诚,引导舆论、传播知识,提高网民的参与能力与气象信息传播能力,实际上就是创造了社会价值。

同时,微博还可以通过与传统媒体结合达到盈利。目前气象微博主要应用是文字为主,图文结合。气象影视集团可以图文声像结合,为博友提供气象频道、气象网站等传统媒体上的新节目新内容的导读窗口,并与新兴社会媒体窗口合作,形成一个与传统媒体并驾齐驱的气象信息传播与互动的平台。运用微博来发展线下活动、建立俱乐部等形式将建立和巩固意见领袖圈子,进而通过知名度和传播到达率凸显其商业价值,进而与更多的商家合作,并以给网友带来更

多实惠吸引更多网民,形成良性循环。

四、小结

微博作为一种最具参与性、最具互动性和及时性的新媒体,集人际传播、群体传播、大众传播于一体,具有去中心、碎片化、平民化等特点,架起气象部门与受众之间的桥梁,是未来气象传播应重点开发应用的新渠道。对于改进气象传播理念与气象信息整合传播模式,提高气象信息质量与服务亲和力,提高防灾减灾能力和公共气象服务水平均具有重要意义。

未来气象传播,主体仍然是以气象服务机构为传播者的气象信息整合传播。需进一步办好中国气象频道,并深入与传统媒体的合作。与传统媒体的合作需从天气预报“内容提供商”深入到合办节目或频道、交流人才与经验、广告经营等多种资源合作,寻求与更多核心的传统媒体合作,从简单的形式上的合作,转向内容上或经营上的深度合作,方能取得更好的传播效果。

未来气象传播,核心是与受众无障碍互动,应完美结合以受众为传播者的、“微博”为代表的新型互动媒体,了解受众需求,提高服务的针对性,这直接影响气象信息传播的效果。为此尚需在把关人素质、改变“官本位”思想、提高气象信息质量与服务亲和力等方面进一步努力。

(作者单位:尹仔锋,马雷凯,《沙漠与绿洲气象》编辑部;尚华明,中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所)

深入阅读

- 陈细如,赵军. 2011. 要做节目 先做农民——谈农业气象节目制作. 中国传媒科技, (12): 123-125.
- 景东,苏宝华. 2008. 新媒体定义新论. 新闻界, (6): 57-59.
- 石静. 2011. 从“微博热”探寻受众表达权在网络时代勃发的原因. 编辑之友, (12): 85-87.
- 石永怡. 2007. 气象信息的新媒体传播. 广播与电视技术, (10): 109-111.
- 沃纳·赛佛林,小詹姆斯·坦卡德,著. 郭镇之,译. 2000. 传播理论:起源、方法与应用. 北京:华夏出版社.
- 朱尉. 2010. 跨媒体传播与国民阅读方式变革. 编辑之友, (9): 23-24.

欧洲第二代气象卫星新“双卫星”结构形成

■ 张蕾 编译

欧洲航天局（欧空局，ESA）是欧洲探索太空的门户。30多年来，欧空局研究并制造了欧洲的轨道气象卫星——Meteosat系列地球静止轨道航天器。Meteosat系列气象卫星给欧洲的气象预报员和研究人员提供了极大的帮助，它不仅发送高级的数据和图像给地球，还为天气预报以及其他应用程序，如水文、农业、环境研究以及风险防范和灾难等的预警提供关键的信息和图像。最早的Meteosat气象卫星发射于1977年。

欧空局和欧洲气象卫星组织一直致力于第二代气象卫星（Meteosat Second Generation，简称MSG）的开发，旨在在现有基础上为欧洲气象预报员提供连续的天气图像。多年来，气象卫星已经成为天气预报中至关重要的部分，哪怕是一小段监测的空白都会给气象学家带来无法预知的难题。MSG卫星每15分钟一次把欧洲、北大西洋和非洲的图像返回地球，



图1 MSG-3 发射



2013年4月Meteosat-9和Meteosat-10将组成新的第二代气象卫星系统的“双卫星”结构，适用于天气预报员最具挑战性的任务之一——临近预报

如此的高频监测正是为了保证监测服务的连续性。

2012年7月5日，欧洲阿丽亚娜5型火箭从法属圭亚那库鲁航天中心发射升空，将欧洲气象卫星应用组织第三颗第二代气象卫星MSG-3送入轨道（图1）。

欧洲气象卫星应用组织的总干事阿兰强调，Meteosat系列气象卫星是欧洲气象卫星应用组织、欧空局和欧洲航天业25年成功合作的结果，他指出：“MSG-3的升空确保了这项重要的国家技术服务的连续性，也标志着这一伙伴关系走向一个新的里程碑。”

2012年12月，MSG-3气象卫星不负众望，通过了轨道试验，成为一颗可用于气象业务服务的卫星，并被重新命名为Meteosat-10。

欧洲气象卫星应用组织发射的前两颗第二代气象卫星Meteosat-8和Meteosat-9分别于2002和2005年升空，Meteosat-10升空后无疑成为第二代气象卫星系列里最年轻的一颗新星，将逐渐成为在欧洲和非洲上空提供实时天气数据和气候监测服务的主力军。

2013年4月，Meteosat-9将接管Meteosat-8的快速扫描服务系统（RSS）。届时，Meteosat-9和Meteosat-10将组成新的第二代气象卫星系统的“双卫星”结构，即欧洲气象卫星应用组织认为的卫星观测最佳运作模式。“双卫星”结构卫星适用于天气预报员最具挑战性的任务之一——临近预报，它可以

非常频繁地获取包含大量信息的大气图像，由此探测和监测快速发展的雷暴、雾等高冲击强度的天气现象在未来几小时的发展并发出报警信息。

“双卫星”组成的第二代气象卫星系统对于临近预报优势在于：Meteosat-10提供欧洲和非洲大陆及邻海每15分钟一次的全盘图像，而Meteosat-9用RSS系统每5分钟一次更加频繁地传递欧洲和北美洲上空的图像。Meteosat-10还专门提供了一个可以用于数值预报模式的观测输入，弥补了MetOp等极轨气象卫星观测提供的数值预报输入方面的不足（图2），以此继续扩充由Meteosat系列气象卫星自1977年以来已积累了35年的气候数据记录。

MSG-4计划将在2014年发射。新的MSG航天器的体积是前几代Meteosat系列气象卫星的两倍半，同时保留了鼓形的设计，成像能力大大加强，荷载力达到了两吨。

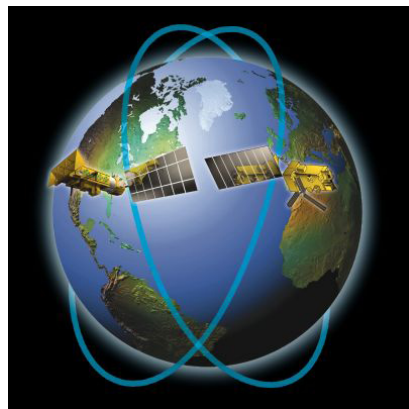


图2 MetOp 联合极轨系统

（下转74页）

“平流层与对流层相互作用”主题文献 计量指标分析

■ 李婧华 胡英

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CNKI）和ISI Web of Science平台SCI-E数据库，检索统计国内外“平流层与对流层相互作用”相关主题文章。采用的检索式分别为主题=（平流层AND对流层）OR主题=（平流层对流层）和TS=“stratosphere-troposphere” or（“stratosphe* and troposphere*”），学科类别限定为大气科学类。检索命中国际和国内文献分别为4725篇和466篇（检索日期为2013年3月10日）。

二、统计结果及分析

1. 论文产出的年际变化

早期研究认为平流层是稳定的，被动的接受对流层上传的波动和能量。随着研究的深入，人们发现平流层并不是完全稳定的，平流层与对流层的关系不是单向的，而是双向的，关于“平流层与对流层相互作用”的文章也不断涌现。

SCI-E数据库能够检索到最早关于“平流层与对流层相互作用”的科技论文为发表在1938年《皇家气象学会季刊》杂志上的“The amount of water vapour in the stratosphere and upper troposphere”一文。CNKI数据库能够检索到最早的该主题文章是1962年发表在《气象学报》上的“平流层与对流层之间动力扰动的上下影响”一文。

20世纪30—70年代，SCI-E和CNKI数据库中以“平流层与对流层相互作用”为主题的文献数量每年均不超过5篇。从20世纪90年代



SCI-E和CNKI数据库中最早的“平流层与对流层相互作用”论文分别于1938和1962年发表在《皇家气象学会季刊》和《气象学报》上。

开始，国际上关于“平流层与对流层相互作用”的研究开始显著增多，文献数量总体呈现稳步增长的趋势（图1）。SCI-E数据库在1991年收录“平流层与对流层相互作用”主题文献86篇，到2012年收录该主题文献294篇，数量翻了三倍多。

从CNKI数据库收录情况可以看出，我国关于“平流层与对流层相互作用”的研究，20世纪80—90年代之间，收录的文献数量少且无明显变化，主要是从2000年开始，呈现增加趋势。SCI-E收录中国关于该主题文献呈现缓慢增加的趋势，且在2012年达到最多，收录了29篇。

2. 国家和机构的产出和影响力分析

一个国家或机构在某一领域的研究水平可以通过文献产出量和引用率来客观展示。表1给出了SCI-E收录“平流层与对流层相互作用”主题文献产出量前15国家/地区的产出、总被引次数、篇均被引次

数和h指数。美国的文献产出量为2373篇，高于第二名德国一倍多，充分说明了美国在这一领域的研究主导地位，美国高达111的h指数，也进一步说明在该主题研究的影响力。在前15名国家中，来自欧洲的国家有9个，德国产出文献量远领先于其他欧洲国家。在亚洲，该主题文献产出最多的是日本，其次是印度，中国产出论文144篇，排名亚洲第三，总排名第12。但是，相对于其他排位相近的国家，中国和印度的篇均引用次数较少。

表2给出中国和国际在“平流层与对流层相互作用”领域主题文献产出量排名前10的机构。CNKI收录国内产出前10的机构中有3个研究院所、2个国家级业务单位和5所大学。排名第一的是中国科学院大气物理研究所，其论文产出量远高于国内其他机构，共发文142篇（占35.0%）。中国气象局直属机构共发文95篇（占23.5%），南京

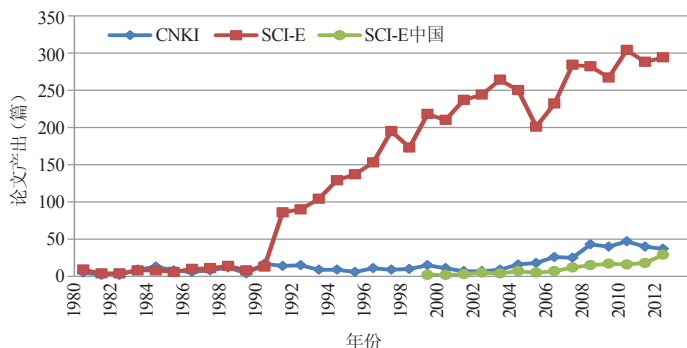


图1 SCI-E和CNKI收录“平流层与对流层相互作用”主题文献数量的年际变化

信息工程大学等5所大学共发文147篇（占36.3%）。国际排名前10的机构中，前三名均是来自美国的业务机构，其中，中国科学院产出文献70篇，排名第27。

3. 论文高产期刊和学者分析

国内和国际在“平流层与对流层相互作用”领域文献产出量排名前10的期刊如表3所示，排名第一的分别是《大气科学》和 *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*，值得一提的是 *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*，其刊载数量是排名第二期刊刊载数量的三倍多。

CNKI收录的国内发表“平流层与对流层相互作用”主题文献5篇以上的作者共有39人，SCI-E收录的国际发表该主题文献5篇以上的作者共有1227人。表4给出的是“平流层与对流层相互作用”主题文献前8名高产作者的排序。

三、结论

针对“平流层与对流层相互作用”为主题进行检索统计，本文分析了该领域的发展趋势和现状：

（1）SCI-E数据库收录“平流层与对流层相互作用”主题文献始于1938年，而CNKI数据库收录的该主题相关中文文献始于1962年。国外在“平流层与对流层相互

表1 国际“平流层与对流层相互作用”主题文献排名前15的国家/地区影响力 (SCI-E)

序号	国家/地区	产出 (篇)	总被引次数	篇均被引次数	h指数
1	美国	2373	84803	35.74	111
2	德国	1007	25723	25.54	69
3	英国	665	17907	26.93	66
4	法国	453	9335	20.61	48
5	日本	450	9251	20.56	49
6	加拿大	325	8145	25.06	48
7	荷兰	215	5994	27.88	40
8	俄罗斯	205	2105	10.27	23
9	印度	192	1316	6.85	17
10	瑞士	189	4546	20.45	39
11	意大利	146	3434	23.52	36
12	中国	144	1107	7.69	17
13	挪威	131	2850	21.76	30
14	澳大利亚	109	3068	28.15	29
15	瑞典	107	1459	13.64	22

表2 中国和国际“平流层与对流层相互作用”主题文献产出量排序前10个机构

CNKI			SCI-E	
序号	机构	产出 (篇)	机构	产出 (篇)
1	中国科学院大气物理研究所	142	美国国家航空航天局	632
2	南京信息工程大学	57	美国国家大气研究中心	421
3	中国气象科学研究院	51	美国国家海洋和大气管理局	414
4	北京大学	34	科罗拉多大学	299
5	中国气象局国家气候中心	26	加州理工学院	241
6	云南大学	21	马克斯普朗克化学研究所	181
7	中国科学院研究生院	21	剑桥大学	164
8	中国科学技术大学	21	京都大学	155
9	中国气象局国家气象信息中心	18	哈佛大学	144
10	解放军理工大学	14	雷丁大学	138

作用”领域文献产出量在20世纪90年代开始迅速增加，国内该领域文献产出量在2000年后有小幅增长。

（2）无论国家和机构的产出量还是影响力，美国都是遥遥领先，表明了美国在这一研究领域的绝对优势。此外，国内和国外在该

领域产出量前10的机构中，大学都占到半壁江山，高校在该领域的研究实力不容小觑。进一步加强高校与业务机构的合作，将有利于研究与业务的发展。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

表3 中国和国际“平流层与对流层相互作用”主题文献刊载数量排名前10的期刊

CNKI			SCI-E	
序号	期刊	刊载数量 (篇)	期刊	刊载数量 (篇)
1	大气科学	66	<i>Journal of Geophysical Research-Atmospheres</i>	1781
2	气象学报	56	<i>Atmospheric Chemistry and Physics</i>	532
3	气象科技	53	<i>Journal of the Atmospheric Sciences</i>	387
4	高原气象	27	<i>Journal of Climate</i>	245
5	应用气象学报	26	<i>Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society</i>	198
6	<i>Advances in Atmospheric Sciences</i>	25	<i>Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics</i>	137
7	地球物理学报	23	<i>Atmospheric Environment</i>	135
8	地球科学进展	20	<i>Annales Geophysicae</i>	98
9	大气科学学报	19	<i>Advances in Space Research</i>	89
10	气象	18	<i>Radio Science</i>	87

表4 中国和国际“平流层与对流层相互作用”主题文献高产出版排名前8的作者

CNKI			SCI-E	
序号	作者	产出 (篇)	作者	产出 (篇)
1	黄荣辉	17	Lelieveld J	54
2	卞建春	17	Oltmans S J	54
3	陈月娟	16	Thompson A M	54
4	王国卫	13	Stohl A	52
5	陈文	12	Fukao S	51
6	吕达仁	12	Schlager H	50
7	刘毅	11	Blake D R	49
8	李崇银	10	Tsuda T	49

一本书、一个报告、一个机构和一项事业

■ 贾朋群

一首很多人熟知的歌中唱到：一句话、一辈子、一生情、一杯酒，……。岁末年初，在气象学界这样的情怀似乎在应验着，尽管这些元素的循环、含义和相互关系，可能不像歌的曲调那样委婉和动情。

一本书。2012年美国大选揭晓的晚上，美国一家电视台的主播高兴地说到：“今晚的赢家是谁？是内特·希尔沃（Nate Silver）”。为什么在这个时候，成功连任总统的奥巴马的名字，被换成了希尔沃？原来这位替代者，是在大学里学经济学、来自《纽约时报》的34岁的分析员，他借助一个模型对各种民测结果进行综合分析后，给出大选日前最后的预测：奥巴马连任概率为92%。正是这一借助模型的准确预测，一扫大选前对结果的迷茫，也让事实说明预测这件事情，无论在什么领域都是有其之道的。希尔沃堪称完美的预测，也带动了其处女作——《信号和噪音》（图1）的销量，使其排到了畅销榜第二位。美国媒体盛赞希尔沃用数学模型打败了其他所有时政记者、政党媒体顾问和政治评论员的预测。

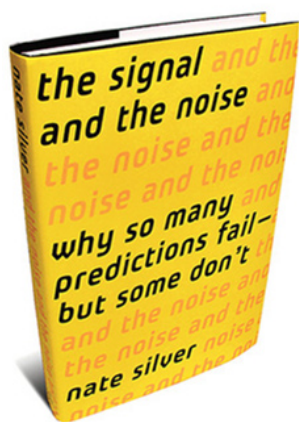


图1 《信号和噪音》



《信号和噪音》的作者用自问自答的方式点出了主题：为什么天气预报取得了成功而其他预测归于失败？这是因为长期以来气象学者一直承认自身知识的不完美性。

如果事情到此为止，似乎和气象并不怎么搭界，最多是让人们知道了气象界耳熟能详的数学模型又在大选结果预测中得到了成功应用，仅此而已。然而，很多人这时候想起前面提到的那本书在2012年9月28日瞄准当年的美国大选正式推出前，《纽约时报》的周末杂志就提前用该书作者的一篇文章介绍了这本书，文章的题目也很有味道：气象人不是蠢货。

希尔沃曾表示，他的处女作实际上就说了三件事情：评述了我们擅长的预报（天气）、不擅长的预报（股票价格）和可以做但被忽视的预报（恐怖袭击）。杂志的文章显然是在说第一件事情。文章一开始，作者用自问自答的方式点出了主题：为什么天气预报取得了成功而其他预测归于失败？这是因为长期以来他们一直承认自身知识的不完美性。这位气象界的外行，对气象预报的成功在赞许有加的同时，也给出了自己的独特视角。他在描述了对经济危机、地震灾害预测整体上失败的事实后，着重分析了天气预报这一最不可能的预报的成功之路。天气预报悠久历史的前期，有太多的事例说明它仅仅是人们嘲笑的对象。即使是今天，有人统计，当堪萨斯市电视天气预报员说有100%可能性下雨的时候，有1/3的可能一点雨水都见不到。但是，他话锋一转，告知读者，媒体的报道并非真正认识气象预报进步的

好去处，长时间审视预报部门的预报才能获得真相。他用美国气象局最高温度和飓风路径预报误差的长时间变化——前者从1972年的6℃下降了一半到目前的3℃；后者从25年前的350英里下降到目前大约100英里——来说明天气预报的进步。正是这样的进步，让希尔沃给出了专著副标题：为什么很多预测不果而有些则不？可以说，最近几十年天气预报的成功，是让各领域的预报员能够感到欣慰的不多例子。

然而，希尔沃也注意到了“不确定性”这一所有预报制作人必须面对的恶魔。他还善意性地提到，1997年4月北达科他州的大福克斯市，面临横穿市区的红河洪水泛滥的威胁，发生溃坝的警戒线为52英尺，而这时气象局预报的水位是创纪录的49英尺。遗憾的是，实际水位为54英尺，尽管在气象局的预测误差范围之内，但因为关键预报中并未提供预测的误差范围而导致数十亿美元的损失和全市75%的居民住房损坏或被摧毁。希尔沃在提示所有的预测人员传达不确定性的重要性的同时，指出没有不确定性的描述，预报就没有完成。应该说，这既是忠告，更是预报人要守护的一个重要的预报原则。

一个报告。2013年1月，在美国德克萨斯州奥斯汀市，美国气象学会年会如期召开。时任美国气象局最大的预报业务中心NCEP主任的Uccellini博士，在其“把预报带入

新阶段——推进预报事业为决策支撑服务”的演讲中，将前面《纽约时报》杂志的文章作为开场白，并且给出了气象人对预报这件事情的看法和视角。他先用一张NCEP的工作场景照片说明，现代天气预报中心，至少在外观上与先进的潜艇指挥中心或高盛投资公司的贸易大厅别无二致。近年来天气预报的进步，是在前述著作作者所言的，很多其他领域预测失败的背景下取得的，弥足珍贵。他强调指出，这种“进步”是可以量化的方式进行“测量”或验证的。Uccellini博士还认可希尔沃的提示，表示预报能力中就包括了给出确定的“不确定性”，并且该信息已经成为决策支撑的组成部分。他自信地指出，美国气象局在传达预报产品的不确定性方面已经做到了最好。

美国天气预报的历史，可以回溯到1880年代。借助电报的发明，美国陆军信号集团从1887年10月28日开始提供天气“指数”。然而，Uccellini博士认为，从1880年代到1940年代，美国的天气预报还是一种“艺术”而非科学，直到完成从主观预报向基于模式的客观预报的转化，天气预报才走上科学的



为了集中全国优势，美国天气气候预报界下一步将建立国家统一业务预报能力（National Unified Operational Prediction Capability, NUOPC）平台，并通过该平台形成国家预报的合力。

轨道。这位美国多种大气、海洋模式的管理者认为，今天任何有关天气、气候和海洋的预报都是基于数值预报模式做出的。虽然模式预报在面对龙卷风、飓风等激烈天气时获得了一系列很好的预报结果，但是在谈到实现建立天气有序国家的目标气象部门的差距时，Uccellini博士认为，基于影响的预报和将社会科学成果融于天气气候预警过程之中是当务之急。此外，预报向“非传统”要素的转化，例如，用多学科地球系统模式，预报空气和水的质量、生态系统以及最佳航线等。他还透露，为了集中全国优势，美国天气气候预报界下一步将建立国家统一业务预报能力（National Unified Operational Prediction Capability, NUOPC）平台，并通过该平台形成国家预报的合力。这一类似科研业务联合体的平台，其着眼于业务预报的本质也许是一种跨越机构界限的尝试。

一个机构。2013年2月，NOAA宣布前面提及的报告人Uccellini博士将出任新的美国气象局局长。因此，Uccellini博士在报告中提到的一些思路和设想应该更有机会在实践中加以落实。然而，令博士感到骄傲的预报技巧进步的“量化”统计和国际对比结果却可能让他的自信打折扣。在同一个会议上，来自华盛顿大学的Mass教授给出了美国气象局乃至NOAA整体在Uccellini博士从事的最主要的数值预报领域地位的分析，同时表达了很多美国气象人的看法和担忧，即NCEP落后的态势，无论是在天气形势分析方面（图2）还是在降水（见本期“科学观察”，P2）等要素预报上，都非常明显。实际上，Mass早在2012年初，就开始关注美国在数值预报领域里出现的问题，并且陆续将自己的数据、分析、结论和建议通过自己的博客发表，获得了很多科学家和组织的呼应。他首先分析了美国

Verification to WMO standards

geopotential 500hPa

Root mean square error

NHem Extratropics (lat 20.0 to 90.0, lon -180.0 to 180.0)

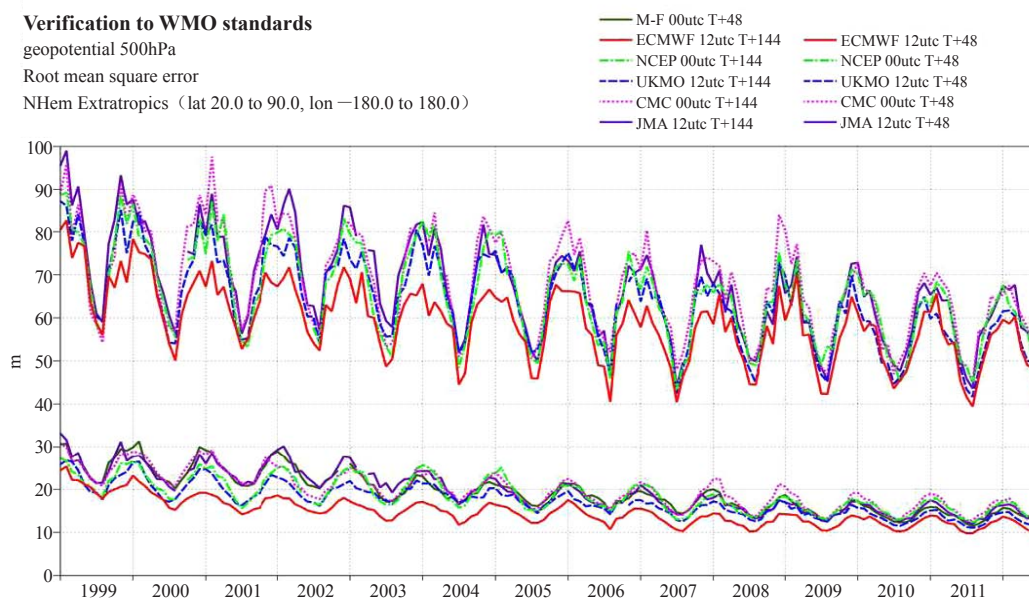


图2 全球最重要的6个数值预报中心预报误差变化对比
(参见: ECMWF tm688, 2012年11月)

气象在数值预报方面具有最先成功的巨大优势，这不仅是指数值天气预报最先在美国试验成功，还包括很多数值预报决定性的突破，无论是过去还是现在，很多都发生在美国。此外，美国拥有世界上最大的大气科学研究团队、世界上最大的政府天气预报机构以及世界上最大的政府（例如NOAA）和准政府（例如NCAR）研究实验室。美国的天气预报服务企业也在促进数值预报进步方面表现得非常活跃。这些都促成了数值天气预报在美国具有多元、有效的传播途径。特别重要的是，在美国执行的很好的开放资料政策，给予数值天气预报研究和业务最坚实的支撑。

然而，具有讽刺意义的是，美国气象局在数值预报方面并非世界最佳。大多数业内人士认为，无论是确定性预报还是集合预报，美国都落后于欧洲中期天气预报中心，在某些方面美国勉强与英国气象局排在世界第二的位置。这样的局面还导致很多美国国内企业每年花费几十万美元从欧洲中期天气预报中心购买格式预报产品。虽然对Mass的分析还存在不尽一致的看法，但是他对NWS乃至NOAA的直言虽然不顺耳，却可以肯定是良言。

一项事业。前面的话题，都是集中在美国。然而大气没有国界，气象事业是一项典型的全球共同的事业。2013年世界气象日同时迎来了世界天气监视网建立50周年。全球气象界在世界气象组织（WMO）精心编织的这张巨大、不断发展和容纳更多内容、覆盖整个星球的网下，获取越来越精准的信息，支持人们更好地趋利避害。

借助世界天气监视网50年华诞和今年世界气象日，WMO对全球化的气象事业进行了很好的回顾，认为天气观测和预报在过去50年里已经取得了巨大进步。这样的进步在整个科学界也是最令人难忘的成就之一。展望今后的50年，WMO认为，气象事业的继续进步，如果不

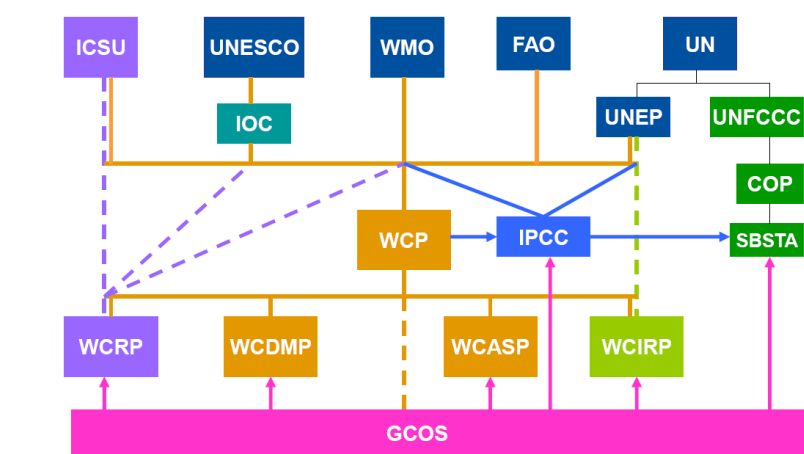


图3 世界气候计划活动框架

是更辉煌的话也一定会和前50年一样令人振奋。气象学家将持续改进信息产品，使得产品更加准确地瞄准各领域的特殊需求，例如农业、水资源、公共健康和城市管理。这些未来的进步将由不断增长的更加安全和安定的需求驱动。气候变化的影响也将带动提高天气和气候弹性的研究。

WMO认为，气象预报事业的下一个前沿，将是更长时间的预报。在科学上，预报10天以内的天气，需要获得今天的大气压力、温度、风向和湿度，以及陆地和海洋表面状况。模式利用这些“初始条件”计算它们的未来值。但是，下一个季节的预报则需要模拟地球系统所有部分之间的动力相互作用，例如海洋和陆地温度如何影响上方空气的温度。季节内预报面对的是上述两个时间框架之间的缺口，即10天到3个月之间。无论是只用初始条件还是地表状况，对季节内预报都是不够的。填补季节内预报的空白对提供真正的无缝隙天气和气候预报至关重要。

未来的预报，其针对性和可靠性都将走向完美，这样的预报信息，能够让所有领域的资源管理人和决策者更好地制定短期决策和长期战略。改进的天气预报能让农民更快地适应即将到来的更多或更少的降雨，而更好的气候预测将指导他们耕种适合下一个季节条件的最

佳农作物。灾害管理人员将能够在洪水或风暴可能发生前，更加精细化地提前部署应急资源的储备。公共健康团队将更及时增援和为人群有效接种疫苗，应对与天气和气候相关的疾病。

城市化的趋势让人类面对灾害的脆弱性在增加，气象部门能够通过开发综合了天气气候数据和社会经济数据的定制预报产品，寻求增加城市的弹性。这些产品将用于管理复杂的疏散过程和受到天气影响的系统，例如给排水、地下交通和能源。

为了让更多非凡的能力成为现实，从而成就气象事业对社会发展更大的贡献，WMO号召全球政府和研究者在天气、气候、水相关的问题和体系上比以往更加紧密地合作，包括投入新设备改进对目前监测的变量的观测，探索尚没有进行观测的变量，例如从海洋到森林的碳通量等。

气象事业无疑在很大程度上是一项全球的使命。例如，世界气候计划已经涉及众多国际机构和组织的参与（图3）。但是，各国在气象现代化方面的竞争进程，无疑是这项事业不可或缺的内容。对预报能力的领先者和对最佳预报能力的追求，即是气象人不变的梦想，更是事业前进的第一推动力。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

《树木和城市热岛效应》评价

■ 杨萍

早在1833年英国人Lake Howard就对伦敦城市中心的温度比郊区高的现象进行了文字记载,但直到1958年Manley提出了城市热岛(Urban Heat Island, UHI)的概念后, UHI才引起了相关学者的重视和研究, UHI效应也逐渐成为科学界、管理者以至民众关注的焦点。目前普遍认为, UHI形成的因素通常包含可控制因素和不可控制因素两种,前者包括人为热、大气污染、城市天际线、建筑材料和城市绿地等因素,后者包括气压、季节、昼夜、风速、云层和太阳辐射等因素。通过加强绿化以增加城市绿地的途径来缓解UHI效应是国内外最常用的措施,该措施可普遍降温至少1℃,节能10%。

为了更充分地了解城市绿化对热岛效应的缓解,美国布朗大学环境研究中心2011年出版的《树木和城市热岛效应》(*Trees and the Urban Heat Island Effect*)一书选择了城市中的树木作为研究对象对此问题进行了深入的案例研究和讨论。本书的作者为布朗大学环境研究中心的研究人员,他们以美国罗德岛州普罗维登斯市为例,开展了城市树木与城市热岛效应的关系研究和相关的调查分析,并在该书中概述了树木和热岛效应研究的一系列成果,主要包括以下几个方面:

(1) 普罗维登斯市树木和植被分布情况以及热岛效应的影响;(2) 怎样测量普罗维登斯市的热岛效应;(3) 树木如何减少大气污染和人为热,对人类健康有何种好处;(4) 公众对于树木态度的调查;(5) 普罗维登斯市的林业政策。

从综合经济效益出发,阐明植树在城市中的作用,是该书的一个



作者利用树林的结构和形状明显不同于绿地的特征,提出了利用Google地图来区分和提取树木的覆盖。

鲜明特色。研究表明,生长良好的树木可以普遍节约8%~10%的能量消耗,带来平均每月10~25美元的开销收缩。对于国家而言,树木所带来的节能收益达到了10亿美元,可以使国民收入增加3.5~20个百分点。本书给出了普罗维登斯地区植被和树木覆盖率的情况,进一步计算了树木为当地带来的净收益,除去政府种植和维护方面的费用,平均每棵树可以带来3.33美元的经济效益。为了最大化地利用好树木所产生的经济效益,作者认为普罗维登斯政府除鼓励市民节能外,还应该组织相关人员进行不同地区树木收益变化情况的研究,更有效地开展植树等城市绿化的工作。

为了更深入地研究树木种植对城市热岛的影响,本书基于卫星和气象台站资料,研究了当地城市热岛的影响范围和强度,主要利用两种卫星资料数据集(Landsat 5 TM和ASTER)和气象观测资料进行树木与地表和大气温度关系的研究。利用已有数据,建立了地表温度的日间(夜间)影像和植被覆盖指标的图形。书中还分析了各种类型的植被对城市热岛产生的不同影响。虽然NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)可以将植被从其他类型的地面覆盖中分离出来,并且可以直接比较其与地表温度的关系。但是,NDVI不能将树木的覆盖率从其他类型的植被覆盖中提取出来,本书作者利用树林的结构和形

状明显不同于绿地的特征,提出了比较简单和变通的一种方式,即利用Google地图来区分和提取树木的覆盖。

很多研究表明,气候变暖带来的日益增加的极端高温事件导致城市中老人的死亡率呈现明显的升高趋势,这是因为过量的热应力会给人体的生理系统产生影响,会给儿童、老人和心血管患者等人群增加中暑甚至死亡的危险。对这一现象,本书重点讨论了树木给人类健康带来的各种益处。树木不仅可以提供荫蔽和减小水汽蒸发来降低气温,而且可以有效降低城市中的大气污染,对大气中臭氧、二氧化碳、硫化物、颗粒物这四种类型污染物的抑制效果非常明显。尽管树木不能很好地清除对流层污染物,不能改变国家层面的大气污染和气候变化,但对于某个地区而言,种植树木显然是保持大气洁净和维护人体健康最为有效的途径。

本书中,研究人员将调查范围锁定在树木覆盖率仅为16.3%的爱姆伍德区,通过与民众的访谈和调查问卷等方式来调查民众对种植树木的态度。调查结果显示,大多数居民对他们的居住环境都表示不满,很多居民怀念过去枝繁叶茂的街道环境。问及树木减少的原因,大多数人认为人为毁坏、疏于保养和维护等是导致树木大幅度减少的重要原因。对于PNPP(Providence Neighborhood Planting Program)项



美国布朗大学环境研究中心, 2011年出版

目,仅有24%的居民听说过,但居民得知这个项目后,79%的人员表示对此项目感兴趣。

在普罗维登斯城市林业政策这一节中,作者重点介绍了1988年确定了PNPP项目以及另外一项改善树木种植的项目“tree2020”。PNPP项目给市民提供免费种植树木的机会,并帮助市民进行树木的管理和维护,该项目平均每年可以种植400~500棵树木,可以极大改善城市的绿化环境。与PNPP项目相比,

“tree2020”项目主要是为个人提供有偿绿化的帮助,每棵树以45~85美元的价格卖给个人来种植,在购买和种植过程中,该项目组会根据购买人的不同情况提供种植何种树木以及如何种植等多种帮助。通过组织多种项目来鼓励种植树木,普罗维登斯市的空气质量有了大幅度的提升,树木平均每年会吸收和阻止的污染物达到40吨以上,所带来的经历收益达到近20万美元。由于树木强大的节能功效,很多组织也

投入到了城市绿化的队伍中来。可以看到,种植树木、改善环境将是未来城市发展的必然趋势。

《树木和城市热岛效应》是一本针对热岛问题且融合了自然科学和社会科学的著作,其研究具有新颖独特的科学视角、经济视角和人文社会视角,值得广大读者一阅。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

(上接67页)

第三代静止轨道气象卫星(Meteosat Third Generation,简称MTG)将于2017年接过最后一颗第二代气象卫星MSG-4(Meteosat-11)业务服务的接力棒,并将保持超高分辨率气象数据的连续性直至2037年甚至更远。

MTG系列设计了六颗卫星:四个MTG-I成像卫星以及两个

MTG-S探测卫星。这两种类型的卫星将被放置在地球同步轨道相同的经度上。探测卫星承载着一个为全球环境与安全监测计划应用的负载,成为MTG卫星一个关键的创新。MTG系列卫星使欧洲气象卫星第一次实现了不仅可以为天气系统呈像,还能通过对大气化学成分的复杂性进行分层和更深入的洞

察,从而对大气层进行分析。第一颗MTG-I卫星预计在2017年底发射,第一颗MTG-S卫星随后于2019年初发射。MTG系列地球同步气象卫星将会显著改善MSG气象卫星的功能,迈出气象卫星发展历史性的一步。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

《气象科技进展》在线投稿、审稿系统开通启事

为了适应网络时代期刊出版需求,缩短本刊投稿、审稿、编辑、排版、出版流程,扩大传播效应,《气象科技进展》在线投稿、审稿系统将于近期开通试运行。试运行期间欢迎作者和审稿专家试用。正式运行后,作者投稿、专家审稿、稿件处理等程序将全部通过系统在线完成。

敬请作者、审稿专家、读者注意以下的操作程序:

1. 登录本刊编辑部网站 <http://library.cma.gov.cn/amst>;
2. 点击用户登录区的作者(投稿)、审稿人(审稿)登录链接进入登录页面,根据系统提示完成用户注册;
3. 用户登录后即进入稿件在线管理平台,根据导航栏提示即可实现在线投稿、审稿。

用户在系统使用过程中遇到任何疑问或操作困难,请咨询本刊编辑部。

文摘 (中文文献)

“人工增雨研究”专辑——《气候与环境研究》2012年第17卷第6期

我国人工增雨研究有很好的成果,有大规模作业的丰富经验。本期《气候与环境研究》组织了“人工增雨研究”专辑,选登其中一些具有普遍意义的成果和经验,以及近期内可以使该领域再进一步提高的一些思考和建议。曾庆存等在前言中对这些经验和问题进行归纳概述和分析讨论。大体上说,这些成功的研究成果和作业经验有:选择有利于增雨的历史天气—气候背景条件、临近作业时对作业云的判断、机理的数值模拟、凝结核和雨滴及它们的谱分布规律和新催化剂的研制等。未来近期内应该做,而且可以有结果的使作业进一步科学化的工作,除结合经验介绍而指出的一些外,关键是:1)尽量做到观测—预报—作业—效果检验一体化;直接面对增雨作业效果本身进行检验,这样才能使作业和效果检验科学化。为此应用控制论的观点和方法(尤其是工程控制论和自然控制论)是可行的;2)要开展暖性对流云催化作业的研究;3)一定要对已有的工作经验进行系统总结,并一定要将研究工作和作业实践密切结合起来;4)只有将气象和水利部门协调起来,才能充分有效地解决四度空间的水资源利用问题。

平流层爆发性增温对阻塞高压的响应及其对对流层反馈的观测——《科学通报》2013年第58卷第8期

平流层爆发性增温(SSW)是北半球冬季平流层中最突出的天气现象。陆春晖等研究了对流层阻塞高压活动对SSW的影响,以及增温发生后平流层异常对下层大气的

反馈。对21个强SSW事件的动力诊断与合成分析表明:在增温过程中平流层极涡会表现出不同的分布特征,并且极涡的这些扰动受到对流层中分布在不同区域的阻塞高压活动影响,因此根据极涡和阻塞的位置将SSW事件分为2种类型,即极涡分裂型和偏心型。还研究了平流层爆发性增温后环流异常的信号能否向下传播到低层大气,这取决于极涡扰动的强度、位置和持续的时间。根据逐年的个例分析,在强SSW事件中位势高度异常可以向下传播至对流层,引起对流层高度场和温度场的变化,其传播时间从10hPa到500hPa大约需要10~15d。

关于中国西北干旱区陆—气相互作用及其对气候影响研究的最近进展——《大气科学》2013年第37卷第2期

从20世纪70年代中期开始,大气科学家对气候的认识有一个飞跃,认识到气候不仅仅是大气中动力、热力过程所形成,而且是地球系统中大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈相互作用的结果,甚至与人类活动也有一定关系。黄荣辉等综述了中国西北干旱区陆—气相互作用及其对气候影响研究的最近进展。文中不仅回顾了“中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验”经过连续12年的观测和多次加强期观测所取得的干旱区陆面过程参数的分析以及边界层和陆—气相互作用特征等的分析和研究,而且综述了应用这些参数来优化有关陆面过程模式的参数化方案和改进有关陆面过程模式的研究;并且本文还综述了关于中国西北干旱区感热输送特征以及西北干旱区陆—气相互作用对中国东部气候的影响及其机理,并揭示了中国西北干旱区春、夏季具有高感热输送特征,此高感热对中国东部夏季气候变异有重要影响。此外,还指出今后在此方面应进一步观测和深入研究的科学问题。

条件非线性最优扰动在可预报性问题研究中的应用——《大气科学》2013年第37卷第2期

可预报性是数值天气预报和气候预测研究的基本问题之一。在可预报性问题研究中,关于预报结果不确定性的估计是可预报性研究的重要问题之一。穆穆等总结了近年来条件非线性最优扰动方法的应用研究的主要进展。主要包括四个方面:1)将条件非线性最优扰动(CNOP)方法拓展到既考虑初始扰动又考虑模式参数扰动,形成了拓展的CNOP方法。拓展的CNOP方法不仅能够应用于研究分别由初始误差和模式参数误差导致的可预报性问题,而且能够用于探讨初始误差和模式参数误差同时存在的情形;2)将拓展的CNOP方法分别应用于ENSO和黑潮可预报性研究,考察了初始误差和模式参数误差对其可预报性的影响,揭示了初始误差在导致ENSO和黑潮大弯曲路径预报不确定性中的重要作用;3)考察了阻塞事件发生的最优前期征兆(OPR)以及导致其预报不确定性的最优增长初始误差(OGR),揭示了OPR和OGR空间模态及其演变机制的相似性及其局地性特征;4)研究了台风预报的目标观测问题,用CNOP方法确定了台风预报的目标观测敏感区,通过观测系统模拟试验(OSSEs)和/或观测系统试验(OSEs),表明了CNOP敏感区在改进台风预报中的有效性。

MJO研究新进展——《大气科学》2013年第37卷第2期

李崇银等综合介绍了国内有关MJO对天气气候的影响以及MJO的数值模拟(预报)方面的近期研究进展,并指出,用数值模式对MJO进行数值模拟(预报)是尚未很好解决的困难问题,原因也没有完全搞清楚。一系列数值模拟清楚表明,MJO的模拟(预报)效果对模式所用对流参数化方案有很强的

依赖关系；模式能否很好描写（再现）热带大气非绝热加热廓线，是极其关键的问题，只有当加热廓线在对流层中低层有最大加热时，模式才能得到同实际观测大体一致的MJO及其活动特征。这些数值模拟结果与过去从理论研究得到的结论相吻合，彼此得到印证。

近年来灾害天气机理和预测研究的进展——《大气科学》2013年第37卷第2期

进入21世纪以来，气象灾害频发，造成严重的生命和财产损失。赵思雄等对近年来灾害天气机理和预测的研究成果作了简要的概述，涉及致洪暴雨、登陆台风、寒潮暴雪、强沙尘暴、高温酷暑等，紧密结合一些重大的极端天气事件展开分析。近年灾害天气频发，影响依旧十分严重。灾害天气多涉及各种尺度的系统以及它们之间的相互作用，加上气候变化，环流异常，中尺度系统活跃，使灾害天气的情况更趋复杂。本文对此作了探讨，并提出了一些需要面对和思考的问题。

近几年中尺度动力学研究进展——《大气科学》2013年第37卷第2期

高守亭等总结了2007年以来我国在中尺度研究中取得的显著性成果。包括：波动、涡旋、锋面、稳定性、 Q 矢量和不变量。在波动方面包括重力波的形成和传播的研究，包含旋转Rossby波、混合低频旋转Rossby波和高频惯性重力波在内的台风波动以及考虑水汽作用的中尺度波作用守恒。涡旋部分主要介绍了青藏高原低涡（TPV）和热带气旋内部的涡旋问题。除了涡旋之外，锋面在中国也是一个关键系统。在锋面方面的进展有：梅雨锋中的 β 中尺度双雨带机制的产生和维持的实验性研究，以及基于广义位温的锋生函数的提出，这些成果使得对锋

生过程的描述更接近于实际大气状况。在不稳定问题上，主要介绍了采用Energy-Casimir方法建立的拟能量波作用方程和基本气流具有线性和非线性切变时的横波扰动的不稳定。关于 Q 矢量，介绍了从地转 Q 矢量，半地转 Q 矢量到非地转 Q 矢量，非地转湿 Q 矢量的发展，以及由湿地转 Q 矢量和垂直风切变耦合得到的新型散度方程。

风云二号03批卫星空间环境监测器——《地球物理学报》2013年第56卷第1期

风云二号卫星以自旋稳定方式工作于地球静止轨道，自1997年以来，01批与02批卫星空间环境监测器成功的业务运行获得了大量重要探测成果；在继承01批与02批产品研制技术的基础上，提高了03批空间环境监测器的探测性能指标和技术设计，更好地满足空间天气预警业务发展的新需求。韦飞等对风云二号03批卫星空间环境监测器的新设计、关键技术研制和发射前的定标试验结果进行分析和讨论：风云二号03批空间环境监测器在02批产品的成功经验和探测成果基础上进行了重大技术改进，应用了SDD传感器探测X射线的新方法，太阳X射线探测器能谱分辨率本领可达到185eV@5.9keV；对地球静止轨道空间环境高能带电粒子的探测能量范围覆盖了200keV以上的高能电子和4MeV以上的高能质子和重离子，并且进行了精细的能道划分，可以进一步提高我国当前的空间天气预警业务能力。风云二号03批空间环境监测器的太阳X射线探测器、高能质子重离子探测器和高能电子探测器通过放射源定标、同步辐射定标和同步加速器定标试验，试验数据表明探测器的能道划分与设计值一致性良好，可以满足空间环境监测业务的需求。

决定北半球冬季哈得来环流年际变率的三维大气环流图像——《中国科学：地球科学》2013年第43卷第2期

孙咏等分析了1979—2008年北半球冬季哈得来（Hadley）环流年际变化的特征，在此基础上，讨论了在观测海温驱动下大气环流模式的模拟结果。观测分析表明，近30年北半球冬季哈得来环流年际变率的主导模态呈现出空间上的非均匀变化，哈得来环流圈位于热带部分与其位于副热带部分的强度变化符号相反，这在表征其年际变化特征的另一指标——经向风垂直切变中亦有显著体现。大气环流模式AMIP积分试验结果表明，北半球冬季哈得来环流强度的上述年际变化源于海温强迫。分析发现，热带中东太平洋和南印度洋暖海温距平强迫导致了哈得来环流强度年际变化的主导模态呈现出空间上的非均匀变化。El Niño的局地作用和大气桥作用激发的太平洋局地哈得来环流和大西洋局地哈得来环流并非呈现出整体一致的变化，尽管二者纬向平均后分别使气候平均的哈得来环流圈强度加强和减弱。El Niño遥强迫作用激发的西北太平洋反气旋使北半球Hadley环流圈强度减弱，El Niño和南印度洋暖海温距平共同强迫出的南印度洋反气旋使南半球Hadley环流圈的强度亦减弱。上述局地哈得来环流的变化叠加后，因纬向平均的太平洋局地哈得来环流强度在（副）热带部分的增强（小）于纬向平均的大西洋局地哈得来环流和西北太平洋、南印度洋局地哈得来环流在（副）热带地区的减弱，结果使得哈得来环流圈的强度在（副）热带部分偏强（弱）；较之南半球，北半球强度变化稍强。

文摘 (英文文献)

飓风降水导致洪水威胁的高分辨率、快速概率预报的实现

——Towards high resolution, rapid, probabilistic forecasting of the inundation threat from land-falling hurricanes. *Monthly Weather Review*, 2012, doi:10.1175/MWR-D-12-00149.1, in press.

当前最先进的水文动力和波浪耦合模型能够以较高的分辨率和精度预测正在逼近的飓风所带来的淹没威胁。然而，在6小时预报周期内，这些模型的运行往往不够迅速，无法提前两小时输出结果以确保一定的应对时间，因此其效率需要进一步改进。佛罗里达大学的Condon等介绍了一种有效的预测方法，该方法通过对一个预定义的、优化的风暴数据库应用多维插值技术，可以输出基于风暴自身登陆特征的浪涌对不同风暴的响应。这项技术提供了一个“数字查找表”来预测区域洪水威胁，通过在佛罗里达州西南海岸的飓风Charley（2004年）和飓风Wilma（2005年）中的应用，发现其预测效果较好且输出较为迅速。由于可以快速输出风暴下的洪水淹没胁迫，因此可以在一个预报周期内确定数以千计的风暴参数组合的响应。根据历史预测误差，这些风暴参数组合具有一定的概率分布特征，进而可给出和观测较为一致的洪水概率估计。

HadCM3模拟的中国夏季降水的自然变率——Natural variability of summer rainfall over China in HadCM3. *Climate Dynamics*, 2013, doi: 10.1007/s00382-013-1726-8, in press.

过去的半个世纪里，中国夏季降水呈现出明显的年代际变率，具有降水南北转变的主要格局，这对防洪和水资源管理具有重要意义。

为解决围绕近年来中国夏季降水变化带来的问题，以及探讨人为因素是否在气候系统变化中扮演了重要角色，中科院遥感与数字地球研究所的Lei等利用恒定的工业化前的外部强迫下HadCM3输出的1000年模拟结果，分析了中国夏季降水总的和年代际自然变率的主要模态。结果显示，20世纪后期的模拟结果具有和观测较为类似的变化幅度和时空特征。然而，尽管有长达1000年的模拟，但这并不足以说明观测到的全球的环境变化和模拟具有共同点。首先，模式的系统误差可能阻碍了全球范围的观测和模拟相似格局的出现；第二，千年模拟结果的不同取样时段（相同的时间跨度）具有明显不同的气候变化特征，这说明了自然变率本身的复杂性，取样时段的选择可能会对模拟和观测的相似性产生一定影响；第三，真实世界的外在强迫（如温室气体和气溶胶）可能正在对中国夏季降水产生影响，例如，以往研究显示日降水的变化特征，特别是强降水事件的强度增加，和全球变暖是一致的。从而，中国近年来夏季降水空间格局的变化不能单独归因于自然变率，人为影响可能和自然变率一起对降水产生影响。

大气加热和温度的季节循环——The seasonal cycle of atmospheric heating and temperature. *Journal of Climate*, 2013, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00713.1, in press.

大气加热的来源可分为两个部分：一是来自于直接的太阳辐射吸收，另一部分来自于地表通过潜热、感热和辐射热通量过程向大气释放的热量。麻省理工学院的Donohoe等通过分析观测和气候模式两种数据，发现北半球高纬地区大气季节加热大部分（观测的78%，平均模拟值的67%）来自于大气短波吸收，其余部分来自于向上的地表能量传输；在南半球高纬地区，无论观测还是模拟，都发现大气的季节

加热基本全部来自大气短波吸收，而地表热通量抵消了大气的季节加热。另外，利用11个CMIP3模式，检测了大气二氧化碳加倍（相比工业化前）造成的大气加热季节循环的变化，发现对流层季节加热被增加的水汽短波吸收所加强。而在海冰融化的一些区域，由于海水增加了气候系统的有效热容量，从而减少了地表和大气间的能量传输幅度。因此，温度季节变化幅度在对流层上层（大气短波吸收增加区域）有所增加，而在表层（海冰融化区域）有所下降。

气候、河网和植被覆盖的关系及其预测年代际尺度气候变化影响的潜力——Climate, river network, and vegetation cover relationships across a climate gradient and their potential for predicting effects of decadal-scale climate change. *Journal of Hydrology*, 2013, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.02.050, in press.

河网、植被等景观要素对气候变化的响应尤为敏感，为分析气候变化对这些景观的潜在影响，德克萨斯大学奥斯汀分校的Smith等使用饱和增长模型（类似于基于过程的静力景观模型）和线性方法，分别研究了1981—2000年间德克萨斯墨西哥湾沿岸地区的河网水系密度（ D_d ）和径流（ R ）之间、植被覆盖（ V ）和降水（ P ）之间的关系。利用分析得到的 $D_d(R)$ 和 $V(P)$ 关系模型，评价了河网水系密度和植被覆盖对年代际尺度上径流和降水异常的可能响应，径流和降水异常的年代际变化（2041—2060与1981—2000年间）由SRES A2排放情景驱动区域气候模式CRCM模拟得到。研究发现，由于未来径流的减少，约57500km长的现有河道将会变干，这占了目前河道总长度的9.9%，而降水减少将导致8150km²的植被覆盖丧失。本研究将观测和过程模型联系在了一起，较以往气候和景观特征的关系研究有所深化。

极端降水格局降低了陆地不同生物群系的生态系统生产力——Extreme precipitation patterns reduced terrestrial ecosystem production across biomes. *Journal of Geophysical Research*, 2012, doi:10.1029/2012JG002136, in press.

降水正向以更多强降水事件、更长干旱时段间隔为特征的极端格局转变，目前并不确定这种变化对不同生物群系的植被生产力会有怎样的影响。柏林自由大学的Zhang等使用位于不同生物群系和气候条件下的11个站点2000—2009年的地上净初级生产力（ANPP）和气候观测数据，结合基于遥感的绿度指数，分析了气候条件对生态系统生产力的影响。结果显示，极端降水格局降低了ANPP对年总降水量（PT）的敏感性，降水利用效率平均下降了20%。研究发展了一个预测模型，使用PT和极端降水指数改进了ANPP对降水格局变化敏感性的预测。研究认为，极端降水格局对陆地不同生物群系的植被生产力产生了显著的负面影响，预测生态系统生产力时应更多地考虑其对极端降水的非线性响应。

使用多元回归方法分析年代际人为全球变暖趋势——Deducing multi-decadal anthropogenic global warming trends using multiple regression analysis. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, doi: 10.1175/JAS-D-12-0208.1, in press.

为了确定全球变暖趋势中的人为影响部分，以往研究常使用多元线性回归分析滤掉由ENSO、火山气溶胶、太阳强迫等原因造成的短期波动。这些因素对年代际人为趋势的影响并不重要，因为ENSO和

火山气溶胶几乎不存在年代际变化趋势，而尽管太阳辐射变化存在长期趋势，但它非常小且并不确定。如此，全球气候变暖多元回归分析剩下的所有解释变量中，除了人为变暖趋势以外，华盛顿大学的Zhou等认为还包括一个重要的变量，即一个长周期（70年左右）的称为大西洋年代际振荡（AMO）的因子，但以往的类似研究并没有考虑AMO的影响。Zhou等在进一步去除了AMO的影响后认为，在过去的100年中，人为全球变暖趋势基本稳定在 $0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ （通过了统计学的显著检验），而不像一些研究认为的人为变暖趋势自20世纪中期以来有所减慢或者加速。

北方陆地温度和植被季节性的消失——Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nature Climate Change*, 2013, doi:10.1038/nclimate1836, in press.

全球气候变暖基本已是不争的事实。其中，由于正反馈过程的影响，北方高纬度陆地区域的增温尤为明显。随着冬季的显著增温，温度的季节特征（一般定义为冬夏温度差异）正在逐渐减小。由于植被生长的开始、终止和中间的生长过程本身都与阈值温度有关，气候变暖下这些阈值温度出现时间和积温的改变可能会导致植被活动或植被的季节性特征发生变化。波士顿大学的Xu等基于最新的地面和卫星观测数据，分析温度和植被季节性的变化，发现过去30年 65°N 以北的北极区域（ 45°N 和 65°N 之间的北方地区）的温度和植被趋向于向南漂移了4~7（5~6）个纬度。基于17个目前最先进的气候模式的模拟，发

现21世纪温度季节性的消失可能等同于向南漂移了20个纬度。而植被如何响应于如此大幅度的温度季节性的消失，以及这将对生态系统服务功能产生怎样的影响，依然是个未知数，需要进一步的探索。

城市化对京津冀城市群区域极端高温事件的贡献和潜在减缓对策——The contribution of urbanization to recent extreme heat events and a potential mitigation strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, doi: 10.1007/s00704-013-0852-x, in press.

随着城市化的加速，“城市热岛”问题成为目前研究的热点之一。中科院大气物理研究所的王明娜等使用最新的城市覆盖数据和耦合了单层城市冠层模型的WRF模式，模拟了京津冀区域城市扩张对2000年前后的区域极端高温事件的贡献和城市白色屋顶对城市热岛的减缓效应。模拟发现，过去20年京津冀城市扩张对区域高温热浪有着显著的影响。1990—2005年间，城市扩张使得极端高温天气的强度增强、范围扩大；新扩张的城市地区城市热岛效应增强，最大增加约 2.58°C ，所有城市格点的平均温度升高约 0.60°C ；升温在晚上最为明显，同比增长了 0.95°C ，人为热的总贡献为34%。研究还发现，增加城市屋顶反照率等地球工程策略是减缓城市热岛的有效方法，在夏季极端高温过程中，白色屋顶反射部分太阳辐射，使得冠层内净辐射减小，可以降低城市表面温度约 0.51°C ，可抵消80%的过去20年城市扩张引起的热岛效应增温。

黄士松与副热带高压研究

■ 陈云峰

黄士松先生在南京大学大气科学学院（前身为南京大学气象学系）任教40余年，为祖国培养了众多的气象人才，桃李满天下。他长期从事中、低纬度大气环流与灾害性天气气候问题的研究，探索天气变化的机理和预测途径。他在大气环流、副热带高压、夏季风、暴雨和台风以及长期天气预报等领域做了大量的、卓有成效的研究工作，取得了一批令人瞩目的研究成果，在国内外发表了大量很有学术价值的论著。

1942年，黄士松在毕业论文导师朱炳海的推荐下，与著名气象学家涂长望先生结缘并就此追随。1943年，经涂长望先生介绍，黄士松到位于重庆北碚的中央研究院气象研究所任研究助理员，从此真正迈进了气象研究的大门。1944年12月，国民政府考试院组织公开考试，招考留美实习生。1945年6月25日，黄士松告别恩师涂长望以及赵九章所长和所内各位同仁，赴美国芝加哥大学学习。这里是世界第一颗原子弹诞生的地方，有“诺贝尔奖摇篮”的美誉，而对于年轻的黄士松来说，最吸引他的是当时在世界气象界声名鹊起的罗斯贝教授和他的“芝加哥学派”团队。公费留学一年后，他向国民政府中国物资供应委员会申请暂缓回国，自费留下来继续深造。1949年7月黄士松顺利获得UCLA（加州大学洛杉矶分校）的候补博士资格，并于此正式成为J.Bjerknes的入门弟子。

新中国成立后，得知南京大学气象系紧缺师资，在祖国、亲人的召唤下，黄士松放弃了只要写完论文就可以取得的博士学位，义无反顾地踏上了归国之途。回国后，他把主要精力放在教学上，忙于备课、编写讲义。但他还是尽可能抽出时间来考虑一些科学问题。在他的脑海里一直有一个问题，那就是在UCLA博士口试时J.Bjerknes问他的关于决定大气环流的几个因子的问题：假设地球是不转动的，那么受太阳辐射的影响就只产生南北环流，地球一转动呢，就有了东西向环流波动了，但环流波动的情况每年每季都有不同，又是什么原因？这个问题给了他很大启发。后来在潜心研究下，1955年，黄士松在《气象

“黄士松对副热带高压详细结构的分析中最激动人心的发现，在于青藏高原对西风急流的分支作用问题。他的发现一举推翻了“冬季西藏高原南北侧各出现一支西风急流是完全由于山脉动力作用使某一西风急流分支的结果”的结论。

学报》第26卷发表了“决定大气环流的基本因子”，对大气环流形成的原因做了全景性的描述，震动学术界。

黄士松在研究决定大气环流的基本因子时注意到中纬度西风急流位置，一年之中向北移动振荡两次，但副热带高压脊线平均位置向北移动仅有一次，而且两者位移的位相并没有任何一致性，副热带高压脊到达最北时间为7—8月间，是在西风急流两次到达最北时的中间，较急流第二次到达最北早一个月左右。这和通常副热带高压与西风急流位移同位相的概念是全然不同的。西风急流和副热带高压之间到底是什么样的关系呢？那时学术界对副热带高压的研究并不多，对副热带高压的认识不清楚。黄士松带着他的第一个研究生余志豪在这方面开展研究。

1959年8月15—23日，一个强大的副热带高压罕见地、长时间地位于大陆上空，这给全面研究它提供了一个绝佳的机会。黄士松首先分析了副热带高压脊线的纬度位置随高度的变化情况，他发现：副热带高压脊线的纬度位置随高度的变化情况在大陆上与海洋上有很大差别，位于海洋上的高压脊轴首先随高度向南倾斜，之后往北倾斜；在大陆上则截然不同，高压脊轴基本上首先都随高度呈垂直上伸，抵850hPa高度后向北倾斜，之后约呈垂直，最后又稍呈向南倾斜的形状。这种高压脊轴的变化特征不但在个别时间如此，在平均情况亦如此。原因是什么呢？黄士松分析了北半球7月份对流圈下半部的热源和热汇的分布和海平面平均气温分布的情况，发现在大洋上热源或最暖区位于副热带高压的南方，而在亚非大陆上热源或最暖区却位于副热带高压的北方。在低空大陆上副热带高压位置随高度往北偏移，而海洋上副热带高压的位置随高度往南偏移者，概系热源高温作用使该区等压面上凸，导致副热带高压在对流圈下半部随高度向热源或



1946年秋，黄士松在美国UCLA



1974年，黄士松与青年教师探讨问题
(左起伍荣生、黄士松、包澄澜、余志豪)

高温区移动之故，这显示了热力因子对副热带高压结构的影响。

黄士松对副热带高压详细结构的分析中最激动人心的发现，在于青藏高原对西风急流的分支作用问题。他的发现一举推翻了“冬季青藏高原南北侧各出现一支西风急流是完全由于山脉动力作用使某一西风急流分支的结果”的结论。

他发现在副热带高压脊轴南北两侧各存在一个强风区，北侧的西风最大风速区出现在200hPa左右的高度，位于热带对流圈顶与温带对流圈顶间的断裂处，是为副热带西风急流，不同于极锋急流。这支副热带急流在北半球平均图上表现得非常明显。而位于高压脊轴南侧出现在130hPa左右高度的强东风，通常称为东风急流。这种强东风在夏季普遍存在于亚非大陆南部，亦见于北美，但出现的高度各地不同。

但值得注意的是，在副热带西风急流中心以下各高度上均存在两支强西风气流，它们均位于青藏高原所在纬度的北方。同时，南支强西风自低层上达急流中心的连线自南向北随高度倾斜，约与高压脊轴平行，乃纯粹是副热带急流；北支强西风乃是与低层南移弱锋相结合的强西风。副热带急流有一明显的急流中心，而与锋系结合的强西风因在夏季锋的强度弱，并不一定有急流中心，但是，两支强西风在200hPa左右高度会合，亦可增强副热带急流中心的强度。因此，乃可以认为两支强西风的出现，并不一定是山脉对某一西风气流的强迫分支的结果。夏季副热带高压北面强西风的这种分布形状不但出现在一些个别时间的南北剖面图上，而且在平均图上也可同样明显地见到。这一现象陶诗言和陈隆勋也有所发现。

青藏高原北侧为什么会有两支西风急流呢？黄士松觉得这一现象不是偶然的，难道本来就存两支西风急流，和青藏高原对急流的分支没有关系？经过进一步分析，他认为冬季青藏高原南侧的西风急流为副热带急流；北侧的西风急流主要为极锋急流或者为槽涡



1992年，黄士松与学生在一起

南缘的强西风，两者属于根本不同的性质。夏季极锋弱，与之结合的强西风多不具有显著的急流中心，而副热带西风急流中心则极为明显。冬季极锋强，极锋急流和副热带急流一样亦具有明显的急流中心，故南北剖面上常反映出两个或两个以上的急流中心。因冬季时东亚大陆上副热带高压脊（500hPa面上）平均位于 12° — 15° N。副热带西风急流乃位于高原之南侧，强而稳定；极锋急流多活动于高原之北，变动较大，两支急流恒为高原所隔，故冬季青藏高原南北两侧各出现强西风急流中心的现象最为显著突出。至于分支作用，只是当极锋急流南移至较低纬度或副热带急流摆动到较高纬度时，则高原可对急流的下部分起分支作用。但是，分支作用亦主要限于低层，高原对急流中心的分支作用是值得怀疑的。

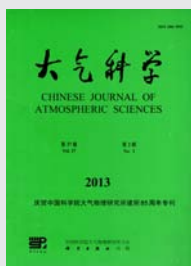
黄士松还根据对多年的副热带高压南北移动特征的研究指出，冬季在 130° — 160° E间的副热带高压脊平均纬度位置要较 70° — 100° E间高压脊纬度位置偏北，而且在自冬至夏向北移动过程中在6月中有跃进阶段，这一个跃进阶段开始时间在海洋上较在陆上要早一些或者同时发生。此外，他又指出：高压脊位置南北变动的位相在夏季中显著地要较同区域内的西风急流的南北变动位相为早。这一切都足以说明冬季东亚上空的南支急流为副热带急流，6月间其向北移动时在西部的要较在东部的稍迟，所谓南支急流的突然消失并非是因为某一西风急流北撤到高原之北，脱离了山脉分支影响，而显然是副热带高压的急速向北推进的结果。总之，南支急流的出现与消失，并不是青藏高原分支作用的表现。

虽经理论探讨指出地形对西风气流有分支作用，但对冬季青藏高原南北侧各出现一支西风急流，就认为完全是由于山脉动力作用使某一西风急流分支的结果，显然不是很恰当的。黄士松的这一发现引起了学术界的争论，他再一次震惊了气象界。

(作者单位：中国气象局气象宣传与科普中心)

《大气科学》 2013年第2期

这本在中国气象界很有影响力的期刊，近些年来借助主办机构每5年或10年的成立庆典推出专辑，全面评述各相关领域的研究进展，展望未来的发展，获得很多学者认可。最新出版的杂志如期推出“庆祝中国科学院大气物理研究所建所85周年专刊”，22 篇论文回顾和综述了最近5年来在全球变化、地球/气候系统动力学及其数值模拟、大气环流理论、中小尺度天气系统及台风动力学、气象灾害的发生机理和预测理论、陆—气和海—气相互作用、大气边界层物理和环境动力学、大气化学、大气物理和探测理论、大气遥感和中层大气物理、非线性大气动力学等领域的最新研究进展。

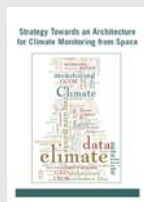


《自然》 2013年2月7日

本期封面文章讨论了一个耐人寻味的生态问题——草原林火的作用。当草原长时间受到人为保护而不发生林火时，就像高产的农业系统，具有较高的抵抗物种入侵和气候变化的能力，但却失去了物种。而一旦草地被烧荒，其恢复的关键却是生物多样性。今天全球陆地系统已经被人类活动所均化，面对环境变化，其脆弱性不可忽视。

《空间气候监测基础设施战略》 2013年

这份WMO空间项目最新发表的报告，聚焦空间气候监测中的卫星观测问题，探讨如何确保提供满足地球气候分析所需的卫星观测各种时间分辨率资料所涉及的国际基础设施。报告给出了这种基础设施的发展战略，即着眼高层、概念和包容，以达到更广泛意义上的一致，以及所有的相关实体都能够确认其潜在的贡献。然而，这本分10个部分的战略文件，其本身并非充分的，因而仅是给出逻辑基础设施，它是物理基础设施开发的起步，后者是一个端到端系统，能够发布空间气候监测所需的观测数据。关注的读者可以在网上下载 (http://www.wmo.int/pages/prog/sat/documents/ARCH_strategy-climate-architecture-s)



《气候政策》 2013年 增刊

2013年初始，该刊推出主题为“世界变化背景下的气候政策：模型需要一个改变吗？（Climate policies in a changing world context: is a paradigm shift needed?）”的增刊，这是该刊在去年底推出的“气候变化的国际维度（International dimensions of climate change）”主题增刊后又一本由众多科学家结合研究的进展，向政策制定者建言献策的汇集。增刊将金融危机以及低碳等气候变化问题作为一个整体思考，提出很多有建设性的观点和做法建议。

媒体扫描

MEDIA SCAN

《澳大利亚气象局 2011—2012年年报》 2013年

2011—2012年是拉尼娜年，位于南半球的澳大利亚经历了“多事之夏”，多项降水和洪水纪录被打破，全年对气象服务提出了很高的要求。在2月和3月多地发生重大洪水过程中，澳气象局经受住了考验，得到了联邦政府的肯定。澳总理还因此发起了对气象局能力评估的项目，以应对未来极端天气和自然灾害事件，提供季节预报服务。评估结果去年12月上报政府，包括了29个优先行动和选择建议。报告还对气象局的组织和员工给予了高度评价，特别是气象局具有国际水准的培训项目起到了很好的作用。作为这份评估



报告的反馈，在2012—2013年预算中，政府增加了对员工能力的拨款，很多报告内容也在全年工作中得到体现和落实。

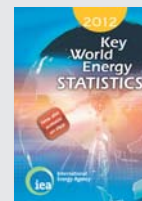


《科学通报》 2013年3月

本期推出“中国极端气候变化”专辑。20世纪以来，中国气候总体上在变暖且幅度略高于全球平均值。此外，中国东部旱涝格局改变、中国西部高原冰川退缩、极端天气和气候事件频发等方面对国民经济和人民生产生活的影 响日益凸显。专辑的16篇论文，分别从平均气候、极端天气和气候事件、东亚季风环流和降水、2℃ 阈值情景下中国气候变化、城市化气候效应变化等方面出发，汇集了中国气候变化事实和机理以及预估部分研究工作，以期有关气候和生态环境变化的科学评估工作提供参考信息。

《监视天气、保护生命 和财产》 2013年2月

2013年是世界气象组织“世界天气监视网”项目50周年，配合这一庆典，世界气象日的主题定为“监视天气、保护生命和财产”，这也是世界气象组织的宗旨。这份出版物（世界气象组织WMO第1107号出版物）回顾了历史，同时展望了未来气象在科技进步的促进下，会为人类更加美好的生活和可持续的发展提供更完美的服务。



《2012世界能源关键统计》 2012年12月

1974年11月成立的国际能源署（IEA），是多年来给出各国能源统计的最权威机构之一。IEA的统计年报给出石油、天然气、煤炭、电力和可再生能源等全方位数据，是能源政策制定者、能源领域的企业和学者不可多得的工具。从1997年开始，IEA配合年报出版这样的图文并茂的关键统计数据，让人一目了然。这本口袋书包括了IEA获得的及时更新的各种数据以及对这些数据的分析结果。

Advances in Meteorological Science and Technology (Bimonthly)

Vol.3 No.2, April, 2013

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

Honorary Editor Chou Jifan

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng

Associate Editors

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

Managing Editors

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

Editors

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

Overseas Editors

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

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Hu Ying, 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 Baochang Color Printing Limited Corporation

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

Main Contents

Message from the Editor-in-Chief

Article

- 6 Lu Chunhui et al/ Progress in the Study of Stratosphere-Troposphere Interaction
- 22 Bian Jianchun et al/ Summertime Stratosphere-Troposphere Exchange over the Tibetan Plateau and Its Climatic Impact
- 29 Chen Baode et al/ An Overview of the Key Techniques in Rapid Refresh Assimilation and Forecast
- 36 Qian Weihong/ Climate Change of Multiple Timescales
- 41 Fu Yuqing et al/ Impact and Its Assessment Methods of Climate Change on the Economic System of China
- 49 Tian Ying et al/ Research Progress in Impact of Heat Wave on Human Health
- 55 Wang Yusha et al/ The Research of the Assessment Method of Drought for the Impact on Agriculture in the Northwest—The Spring Corn in Gansu Province
- 59 Ma Zhiqiang et al/ Influence of Meteorological Factors on an Episode of Photochemical Fog and Haze in Beijing

Forum

- 62 Yin Zaifeng et al/ Three Evolution Stages and Their Characteristics of the Propagation Model of Meteorological Information

Reading

Book/Meeting Review

- 70 Jia Pengqun/ On a Book, a Meeting, an Agency, and an Enterprise
- 73 Yang Ping/ Trees and the Urban Heat Island Effect
- Information
- 21 New Publication
- 35 A Meeting Focusing on AMST in Nanjing
- 75 Selected Papers

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

- 67 Zhang Lei/ Meteosat Second Generation: Form of a New Two-Satellite Configuration
- 68 Li Jinghua et al/ Bibliometric Analyses on the Theme Literature of Stratosphere-Troposphere Interaction

History

People

- 79 Chen Yunfeng/Prof. Huang Shisong