

Advances

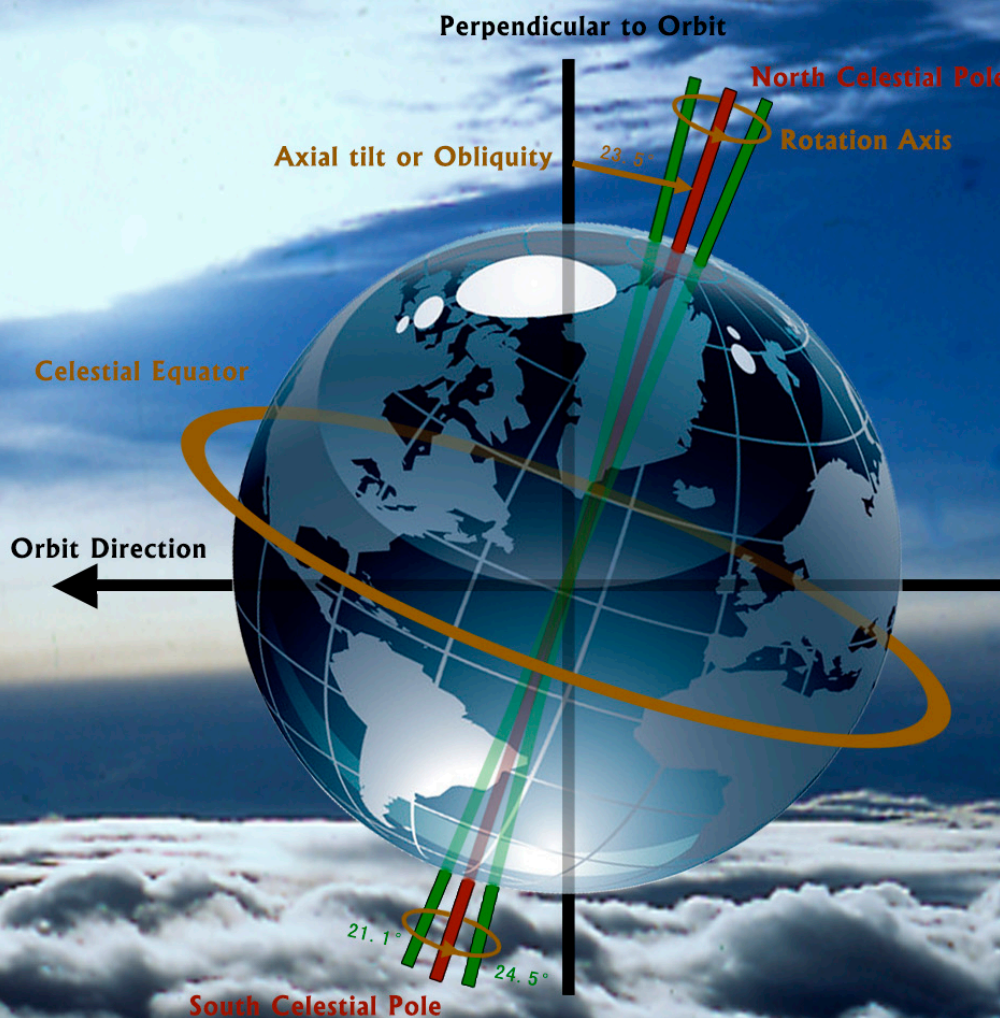
in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

No.3

2014年6月
第4卷 第3期

地球运动对气候影响



气象科技 **进展**
Advances in Met S&T

ISSN 2095-1973



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

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

常务编委 (按音序排名)

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

编委 (按音序排名)

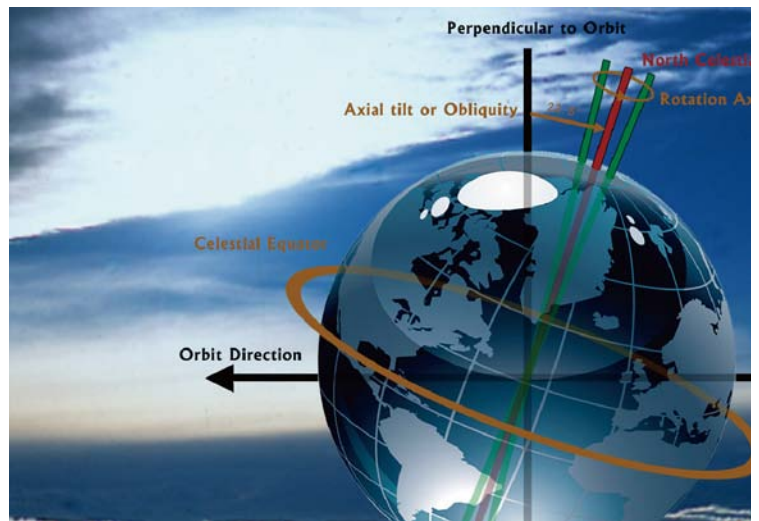
毕宝贵	陈云峰	陈振林	崔春光	崔讲学
董文杰	封国林	郭 虎	何金海	何 清
胡 欣	胡玉蓉	胡跃文	姜 彤	雷小途
李 慧	李集明	李良福	李耀辉	李跃清
梁旭东	刘晶森	刘黎平	刘 实	卢乃锰
陆日宇	罗 兵	罗亚丽	马 力	马舒庆
马耀明	毛恒青	彭莹辉	浦一芬	石广玉
宋 燕	汤 绪	田 红	万齐林	王 斌
王东海	王建林	王晓云	王延青	王迎春
王 元	王在志	王自发	温 敏	文洪涛
吴立广	谢志辉	闫冠华	杨 崧	杨昭明
姚学祥	伊 兰	翟武全	张 华	张立祥
张小玲	张跃堂	赵广忠	周定文	周凌晔
周显信	朱定真	朱小祥	祝燕德	邹立尧

海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

编辑部

张 萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 陈忠美
地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081
电话: (010) 68409927/68409933
邮箱: amst@cma.gov.cn
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA
网址: <http://library.cma.gov.cn/amst>
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>
印刷: 北京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》和CNKI系列数据库以及《中文科技期刊》(维普网)全文收录, 相关著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为(除事先声明外)视为同意文章被上述数据库收录。

目 次

第4卷 第3期 2014年6月

1 许小峰: 主编语

研究论文

专题 地球运动对气候影响

- 6 刘苏峡, 王盛, 王月玲, 等: 地极移动与河川径流的关系研究
- 13 石文静, 杨萍, 肖子牛: 大气角动量的研究进展
- 20 闫昊明: 基于地球自转变化和时变重力场研究全球气候变化
- 26 王勇, 刘苏峡, 邵亚平, 等: 简单地球模型的研究进展
- 32 朱琳, 黄玫, 巩贺, 等: 全球山脉力矩时空变化及其与地球自转的关系
- 36 朱玉祥, 赵亮: 中国近百年地面温度变化自然因子的因果链分析

专题 城市气象

- 41 严中伟, 王君, 李珍, 等: 基于均一化观测序列评估城市化的气候效应
- 49 周凌晔, 姚波, 方双喜, 等: 城市排放与输送对北京上甸子站温室气体

研究进展

- 53 唐慧强, 李超, 李全月: 物联网自动气象站的试制
- 57 黄彬, 阎丽凤, 杨超, 等: 我国海洋气象数值预报业务发展与思考

主编语

1543年,哥白尼的《天体运行论》正式出版,这部六卷巨著奠定了“日心说”这一革命性思想的理论基础,引起了人类宇宙观的重大变革。5月24日,虚弱的哥白尼在病榻上见到了从纽伦堡寄来的样书,欣慰地摸了摸书的封面,几小时后便与世长辞了。然而,“日心说”真正替代“地心说”还是经历了长期磨难,除了因与当时处于统治地位的教会神学产生冲突而遭受封杀外,人们的认识也需要一个过程。直到17世纪,伽利略用更多的观测事实和更加准确的科学定律阐释了星球运动的规律之后,“日心说”才逐渐被广泛接受。毫无疑问,正确地认识地球与太阳的关系,才有可能进一步探索研究因太阳和地球轨道变化而主导形成的复杂地球气候问题。然而,在受人类活动和自然因子双重影响而使得全球气候呈现整体趋暖的背景下,其变化在多大程度上和怎样的时空尺度上与太阳和地球轨道因子相联系,搞清楚这样的科学问题就显得格外重要。在国家重大科学研究计划项目“天文与地球运动因子对气候变化的影响研究”的支持下,本刊于本期及下一期相继推出从地球轨道和天文角度,阐述二者与全球气候变化关系的专栏系列文章,以期为深入理解天文和地球运动因子在气候变化中的作用提供科学参考。

地球运动涉及到地球很多要素,例如,自转速率、极移、章动、岁差、黄赤交角、偏率(偏心率)、磁场、重力场等,这些因子的变化尽管具有一定的周期性规律,但由于各自运动的复杂性,如何甄别在不同时间尺度下影响气候变化的关键因子,寻找有效的因子识别方法则存在相当难度。最先由诺贝尔经济学奖得主克莱夫·格兰杰提出并发展的格兰杰因果检验方法或许是一种值得尝试的因子识别方法。格兰杰方法最早用于经济学领域,是从统计学角度探索两组时间序列之间的因果关系的方法,目前在气象学领域也开始应用。本期文章利用此方法分别探讨了可能影响径流(P6)、温度(P36)变化的地球和天文因子。而针对该方法本身的介绍和跨领域的文献计量分析结果(P70)

则可以帮助读者更好地理解上述文章和方法的意义。

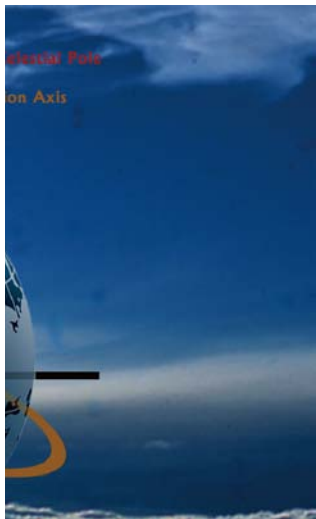
地球系统由固体地球、大气和海洋等流体层组成的圈层共同组成。作为一个描述大气环流的基本变量,大气角动量反映了大气活动与固体地球、海洋在多时空尺度上的耦合过程,对其相关研究的回顾(P13),将为未来有关大气与地球运动关系的深入研究提供参考。地球又是一个复杂的、相互激发和反馈的系统(P20),地球系统模式(P26)涵盖了地球系统的大多数组成部分,能够描述各部分之间的反馈和过程,是气候变化归因研究的重要模拟工具。

本期继续推出的“城市气象”专栏推出了两篇文章,分别从均一化气候序列在评估城市化气候效应中的重要性(P41)、城市排放与输送对温室气体本底观测的影响(P49)两个方面阐述了城市化在气候变化中的作用。现代信息技术的飞速发展也为气象信息处理不断带来新的冲击,例如,物联网自动气象站的试制(P53),基于GIS的实时雨情分析系统的开发(P62),无不受益于信息技术的进步。

2014年2月,世界天气研究计划(WWRP)/全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)——世界气候研究计划(WCRP)联合举办了次季节—季节预测研究研讨会(P74)。会议的结果表明,需求不断增加的次季节尺度的预测目前仍处于发展初期,对次季节尺度的预测是全球气象界必须面对的一项亟待发展且具挑战性的任务。

自评刊工作开展以来,已相继收到不少读者发来的评论信息,这是对办好本刊最有价值的督促,只是由于篇幅所限,被高度浓缩后部分刊登在了“第80页评刊”栏目中。“@中国气象爱好者”提出了一个我们在办刊中一直纠结的问题,即如何把握好各类文章的平衡,尽管从创刊开始算起,已是第四个年头了,但如何把握好刊物的定位,仍然处于不断调整之中,也希望听到各方面意见。

许小峰



专题/封面图: 地球运动对气候影响

专题 基层气象现代化

- 62 杨铁钢,孙令东,白秀芳,等: 基于GIS的实时雨情分析系统开发与应用

论坛

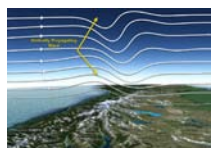
- 66 张庆龄: 面向气象学的计量学
——欧洲MeteoMet计划简介

科学观察

- 2 读图 数字 榜单

特写

- 70 郑秋红,李婧华,吴灿: “格兰杰因果检验”及其应用
——基于文献计量的分析



P4

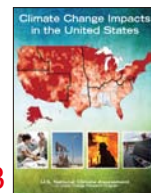
阅读

会评

- 74 齐艳军,容新尧: 次季节—季节预测的应用前景与展望——“次季节—季节预测(S2S)”会议评述

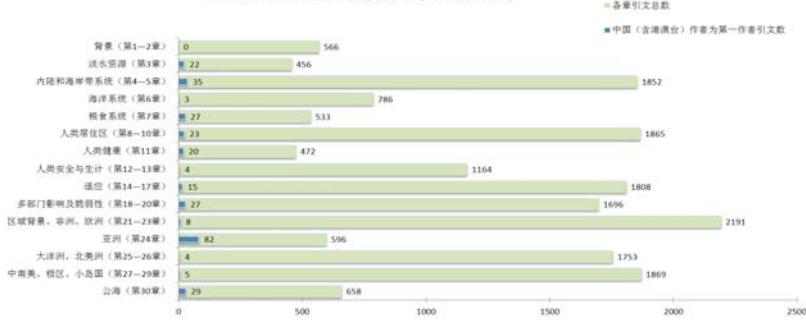
信息

- 19 会议信息
25 新书架
48 张鹏在国际组织任职
76 编辑选编
80 第80页评刊
封3 媒体扫描

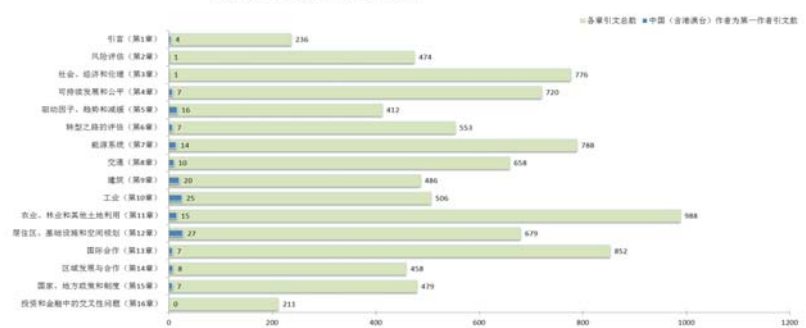


封3

IPCC AR5 WG2报告各领域(章)引文分布



IPCC AR5 WG3报告各章引文分布



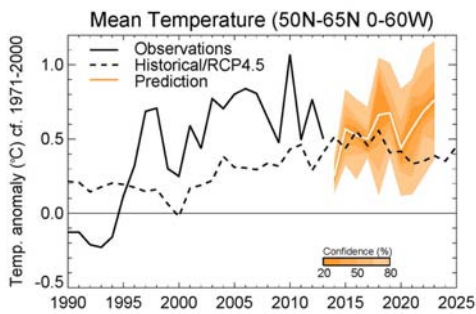
IPCC AR5 评估: 影响和减缓报告

IPCC第五次全球变化评估 (AR5) 继2013年发表第一工作组关于气候变化的科学基础报告后, 第二工作组 (WG2) 关于气候变化影响、第三工作组 (WG3) 关于气候变化减缓报告陆续发表。对2份报告的文献计量分析表明, WG2和WG3报告的总引文量分别达到18265和9276篇次, 其中中国(含港澳台)作者作为第一作者的引文分别为304和169篇次, 分别占1.66%和1.82%。图中分别给出两份报告的引文(按照领域或章节的分布), 可以看出中国引文在亚洲区域、淡水资源、粮食系统、人类健康和公海(WG2报告), 以及工业、驱动因子、建筑和居住区等领域(WG3报告)具有一定的优势, 但也在将近20个章节中, 引文的绝对数量少于5篇。

来源: 本刊

10年气候预测: MPI-M迎接挑战

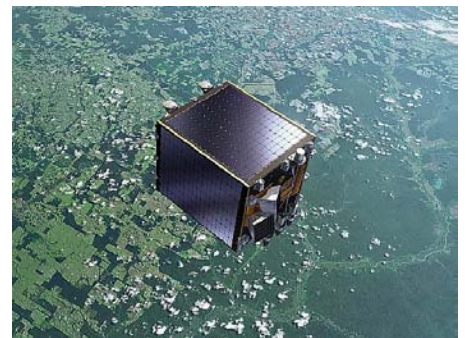
德国马普学会气象研究所 (MPI-M) 近年来一直利用其地球系统模式对全球气候进行预测, 2014年针对决策者对今后10~30年气候变化的关注, 该所在MiKlip (10年气候预测) 项目的支持下, 率先对北大西洋区域今后10年的地表温度变化进行了预测。图中给出预测的集合均值 (白色线) 和预测的信度范围 (橙色区域)。观测值来自HadCRU数据库 (黑色线) 和非初始化的模拟 (黑色虚线)。



来源: MPI-M

PROBA-V: 填补SPOT-5和Sentinel-3之间的缝隙

2013年5月7日, 欧空局 (ESA) 的微型地球观测卫星 PROBA-V在法属圭亚那克鲁宇航中心发射升空。PROBA-V的使命在于填补SPOT-5和Sentinel-3计划之间的缝隙。从SPOT-4到SPOT-5, 成功运行16年后, SPOT-VEGETATION传感器的使命于2014年5月结束, 它为全球用户提供了5880天的全球植被图像。接替SPOT-VEGETATION的Sentinel-3仍然蓄势待发, 作为二者之间的桥梁, PROBA-V具有重要意义。



来源: ESA

数字

1小时

加拿大气象部门最新推出各主要城市24小时逐小时预报服务。逐时预报的温度、天气、降水、风和湿度等要素的预报结果每1个小时更新, 保证给出今后24小时结果。

4600年

中英学者共同建立了青藏高原东北部自公元前2637年到公元2011年, 共4600多年祁连圆柏树轮宽度表, 可用于揭示年际、年代际和百年及百年以上时间尺度气候变化的规律。

40篇

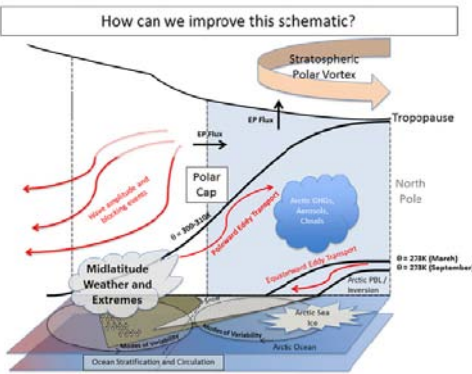
美国AGU主办的GRL (《地球科学研究通讯》) 杂志, 为了庆祝创刊40周年, 该刊新老编辑从1974—2013年间发表的1000篇候选论文中选出了40篇论文, 作为该刊40年间发表的地球科学领域众多学科的代表论文。

国际“格兰杰因果检验”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	Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems	Bullmore, E	Nature Reviews Neuroscience, 2009, 10(3)	1159
2	Partial directed coherence: a new concept in neural structure determination	Baccala, LA	Biological Cybernetics, 2001, 84(6)	413
3	A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks	Sridharan, D	PNAS, 2008, 105(34)	352
4	Evaluating causal relations in neural systems: Granger causality, directed transfer function and statistical assessment of significance	Kaminski, M	Biological Cybernetics, 2001, 85(2)	344
5	Mapping directed influence over the brain using Granger causality and fmri	Roebroeck, A	Neuroimage, 2005, 25(1)	336
6	Beta oscillations in a large-scale sensorimotor cortical network: Directional influences revealed by Granger causality	Brovelli, A	PNAS, 2004, 101(26)	308
7	Saliency, switching, attention and control: a network model of insula function	Menon, V	Brain Structure & Function, 2010, 214(5-6)	304
8	Investigating directed cortical interactions in time-resolved fmri data using vector autoregressive modeling and Granger causality mapping	Goebel, R	Magnetic Resonance Imaging, 2003, 21(10)	240
9	Vector autoregressions and causality	Toda, HY	Econometrica, 1993, 61(6)	224
10	Identifying true brain interaction from EEG data using the imaginary part of coherency	Nolte, G	Clinical Neurophysiology, 2004, 115(10)	221

来源: SCI-E和SSCI数据库, 检索时间: 2014年5月5日

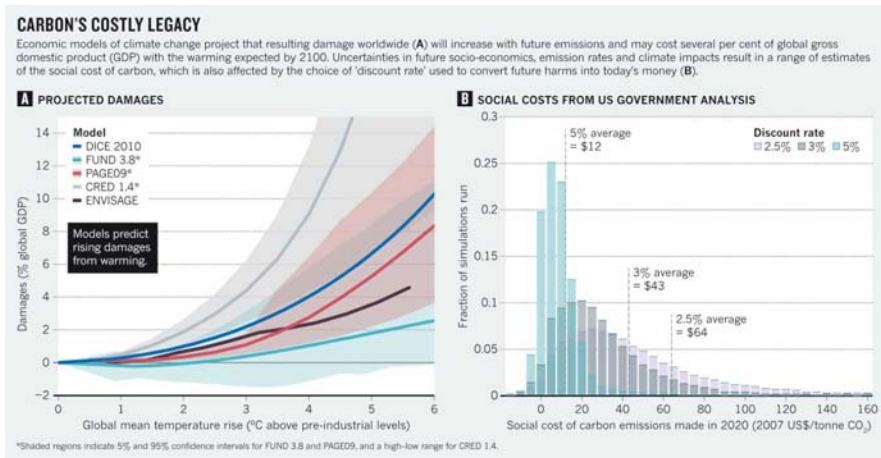
李婧华 提供



北极变暖与中纬度天气的改变

2013年9月, 美国科学院 (NAS) 召开了关于北极变暖和与中纬度天气形态可能改变之间联系的学术会议, 在日前出版的基于该次会议的报告《北极变暖和与中纬度天气形态之间联系》中, 给出了贯穿这一问题的总体图像: 北极与中纬度天气之间可能的作用机制。如图中所示, 会议认为科学界要回答的主要问题是: 北极以及中纬度环流对什么变化更敏感, 是地冰冠边界层还是其他边界层 (地表、对流层顶、气柱成分)?

来源: NAS



气候变化经济模式: 告诉你今天减排带给未来的效益

各种气候变化经济学模式, 估计了到2100年因CO₂排放导致变暖给全球带来的以GDP衡量的损害 (图A), 这种损害的不确定性, 不仅源于未来的社会—经济、排放率和气候影响等要素的不确定性, 也和我们选择的“折扣率”, 即今天投入多少钱用于减少未来的损害 (图B) 有关。

来源: Nature

554幅 希腊科学家分析了16世纪以来554幅描绘日落景象的名画中红绿两色的使用频率, 指出这些画作无论属于何种画派, 都忠实反映出500年间全球50多次大型火山喷发后大气污染的状况。

50% WMO农业气象委员会近期在土耳其召开的会议上指出, 全球人口预计到2030年增长超过80亿, 2050年超过90亿, 全球粮食生产必须在2030年前增加50%, 在2050年前加倍才能养活增长的人口。

8个 IPCC最新的气候变化评估报告首次尝试对气候变化产生的威胁进行排名, 列举了8个“关键风险”: 沿海洪灾、内陆洪灾、极端天气、酷暑对贫困地区的影响、气候变暖威胁粮食安全、水短缺、海洋生态损失和内陆水域生态系统损失。

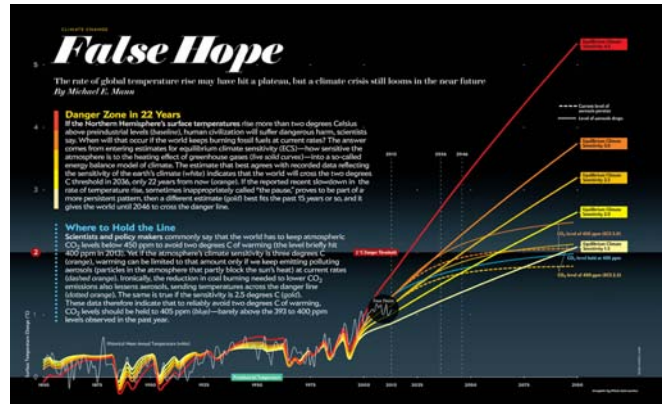
读图



未来欧洲第二代静止天气卫星计划步入轨道

在德国总理默克尔的见证下，欧洲第二代天气卫星 (MetOp-SG) 的第一份文件，2014年5月20日在德国航空展上签署。MetOp-SG是欧空局 (ESA) 和欧洲气象卫星组织 (Eumetsat) 之间的合作项目。据悉，第一代MetOp系列卫星的首颗卫星MetOp-A，已经在2006年升空，2012年MetOp-B发射，MetOp-C将在2018年发射。MetOp-C星也将是MetOp-SG登场前，MetOp第一代卫星的最后一颗。本次文件的签署，为能力获得极大提升的MetOp-SG的前两颗，预计分别在2021和2022年发射升空提供了极大保障。

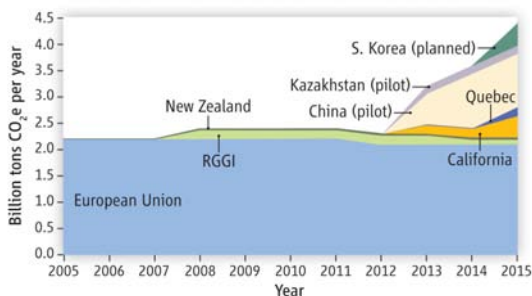
来源: ESA



全球温度升高出现“停滞”是真的吗?

一些媒体近来告知大众，全球温度进入所谓平稳期已经有15年甚至更长的时间了。《科学美国人》(Scientific American) 杂志刊发的文章认为，这是在误导大众。实际上，地球温度一直上升的速率只是在过去10年略有放缓 (图中黑色圆圈标注)，将这种减速称为“停滞”无疑是一个错误。新的计算表明，如果继续以目前的速率燃烧化石燃料，那么在22年以后，即2036年地球气温就将越过升温2°C的危险线，这将给人类文明造成极大的伤害。

来源: <http://www.scientificamerican.com>



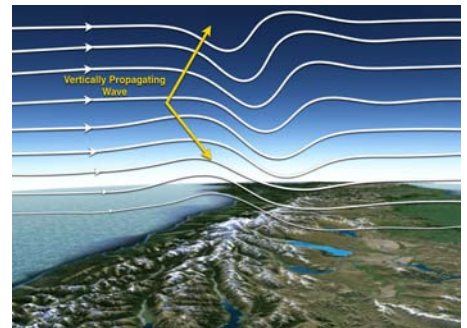
全球碳市场：强化和多元化发展

全球碳排放的市场机制建立10年以来，从前期欧盟几乎一枝独秀，到近年来包括中国在内的5~6种新的区域碳市场建立，从而走向多元化和该市场的力度几乎加倍。图中给出2005年以来已有、示范和计划中的全球区域碳市场逐年控制的碳排放量的变化。

来源: Science

目标：新西兰上空，揭示大气高层重力波

地球大气中的重力波，在急速气流遇到山脉或雷暴等障碍物时形成，是大气环流运动的重要组成部分，但其作用至今仍然没有被科学家很好地掌握。世界上最著名的形成大气重力波的地方之一，是强烈的东风和西风汇合处的新西兰南岛上空。今年夏天美国国家大气研究中心 (NCAR) 的科学家在该区域布设了新的探测设备，希望揭示大约100km高空地球重力波的奥秘。



来源: NCAR

数字

3.6 亿美元

美国众议院4月初通过了美国《2014年天气预报改进法》，如果该法案能够在参议院通过并得到美国总统签字批准，国会预估NOAA将在2015—2017年间获得3.6亿美元的专门拨款。

8 万亿美元

国际能源署最新发表的报告指出，转化为绿色电力能源要比保持主要以化石燃料为主发电的现状多花费44亿美元，这一数字较2012年估计的36万亿美元多出了8万亿美元。

14.47 °C

NOAA称，2014年4月全球地表平均气温为14.47°C，比20世纪同期平均值高出0.77°C，与2010年4月并列自1880年有气温记录以来最热的4月。

足迹：GRL庆祝创刊40周年

1974年5月，经过大约一年的筹划，《地球物理研究通讯》（GRL）在美国地球物理联合会（AGU）创刊。在GRL迎来创刊40周年的时候，期刊的足迹被制作出来：利用过去40年里被引用最多的1000篇论文所涉及的关键词拼接而成，其中出现越频繁的词，其显示度也越高。这个“足迹”，几乎涵盖了地球和空间科学领域所有的活跃词汇，而“观测”、“测量”和“模拟”等词汇，无疑是这个学科的“必须品”。

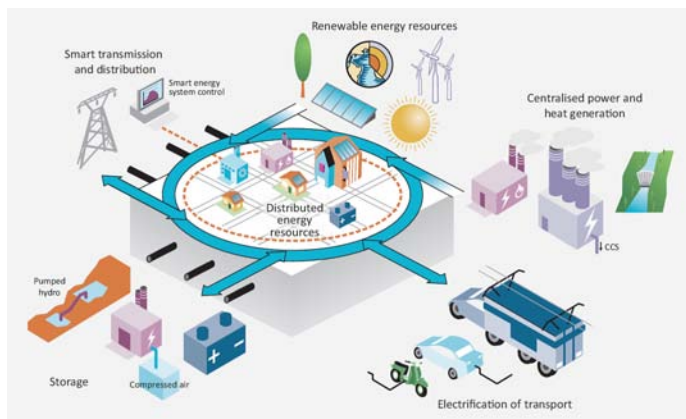
来源：GRL

中国“格兰杰因果检验”主题被引频次最高的前20篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	外国直接投资在中国经济增长中的作用机制	江锦凡	世界经济, 2004/01	559
2	中国金融发展规模、结构、效率与经济增长关系的经验分析	王志强	管理世界, 2003/07	547
3	货币渠道、信用渠道与货币政策有效性——中国1993—2001年的实证分析和政策含义	周英章	金融研究, 2002/09	543
4	我国货币政策传导途径的实证研究	王振山	财经问题研究, 2000/12	374
5	财政支农政策与中国农业增长:因果与结构分析	李焕彰	中国农村经济, 2004/08	370
6	中国货币政策分析:1998—2002	谢平	金融研究, 2004/08	342
7	我国金融发展与经济增长关系的格兰杰检验和特征分析	曹啸	财贸经济, 2002/05	324
8	金融发展与城乡收入差距关系的经验分析	姚耀军	财经研究, 2005/02	293
9	经济增长与能源消费内在依从关系的实证研究	赵进文	经济研究, 2007/08	290
10	我国货币政策传导机制的实证分析	孙明华	财经研究, 2004/03	287
10	中国出口导向型经济增长的经验分析	赵陵	世界经济, 2001/08	287
12	中国出口与外商在华直接投资——1983—2000年数据的计量研究	冼国明	南开经济研究, 2003/01	268
12	房地产市场发展和经济增长间的因果关系——对我国的实证分析	皮舜	管理评论, 2004/03	268
14	房价与地价关系研究:模型及中国数据检验	况伟大	财贸经济, 2005/11	259
14	对我国期货市场价格发现功能的实证分析	华仁海	南开管理评论, 2002/05	259
16	房价与地价关系的实证检验:1999—2002	高波	产业经济研究, 2003/03	238
17	中国的房价与地价:理论、实证和政策分析	严金海	数量经济技术经济研究, 2006/01	228
18	税收竞争、地区博弈及其增长绩效	沈坤荣	经济研究, 2006/06	226
19	我国金融发展与经济增长关系的实证分析	史永东	预测, 2003/04	224
20	中国农村金融发展与经济增长关系的实证分析	姚耀军	经济科学, 2004/05	216

来源：CAJD数据库，检索时间：2014年5月8日

李婧华提供



值得期待的未来综合和智能电力系统

国际能源署（IEA）最近发表的《2014能源技术展望》中，描述了未来电力系统中，包括可再生能源、水利发电和碳捕捉以及存储（CCS）计算等所有要素，更好地综合成为一体和智能化的情景，这样的电力系统固然更为复杂，但是得到的是改进的运行、效率和应变能力以及能源资源和投入的优化。

来源：IEA

第31位

2013年中国科学院科学出版基金科技期刊排行榜近日发布，中科院大气物理研究所出版的*Advances in Atmospheric Sciences*（《大气科学进展》）杂志以43分的分值，位列第31位。

1000万英镑

英国将在近期通过公众投票，从知名科学家挑选出的“如何发展接近零排放的航空技术”等6个候选项目中，确定一个作为“悬赏”课题，在今后5年内选出的提出最佳方案的团队将获得1000万英镑奖金。

1600个

世界卫生组织开始发布全球90多个国家的1600个城市的空气质量数据库数据，覆盖面较2011年版本有大幅提高，首次包括了众多中小城市。

地极移动与河川径流的关系研究

刘苏峡¹ 王盛^{1,2} 王月玲¹ 李明新³ 黄玫¹ 彭公炳¹ 肖子牛⁴

(1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 长江水利委员会水文局, 武汉 430010; 4 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 在总结地极移动(以下简称极移)和径流之间可能存在的相互作用机制的基础上, 利用受人类活动影响较少的青藏高原雅鲁藏布江的月径流资料和极移资料以及格兰杰因果关系检验方法, 从统计学角度探索了在月、季和年尺度上, 极移变化与径流变化之间可能存在的联系。结果显示, 在月尺度上, 极移 X 分量变化量在滞后1~8个月和10~21个月是径流变化量的格兰杰原因; 极移 Y 分量变化量在滞后1~9个月和17~24个月是径流变化量的格兰杰原因。在季尺度上, 极移 X 分量变化量只有在滞后2个季的情况下是径流变化量的格兰杰原因; 而极移 Y 分量变化量在滞后4~6个季的情况下是径流变化量的格兰杰原因。在年尺度上, 未检测出格兰杰因果关系。从径流到极移的检测中发现, 月尺度上, 径流变化量在滞后3~25个月为极移 X 分量变化量的格兰杰原因; 径流变化量在滞后1个月和3~25个月为极移 Y 分量变化量的格兰杰原因。在季尺度上, 径流变化量在滞后2~8个季的情况下是极移 X 分量变化量的格兰杰原因; 径流变化量在滞后1~8个季后是极移 Y 分量变化量的格兰杰原因。在年尺度上, 未发现径流变化量和极移变化量存在格兰杰因果关系。在月、季和年尺度上, 极移变化量和径流变化量的不同格兰杰因果关系表明, 利用极移资料可能在月和季尺度上提高资料稀缺区域的水文预测精度。

关键词: 地极移动(极移), 径流, 格兰杰因果关系, 雅鲁藏布江

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.001

Exploring the Relationship between Polar Motion and Runoff

Liu Suxia¹, Wang Sheng^{1,2}, Wang Yueling¹, Li Mingxin³, Huang Mei¹, Peng Gongbing¹, Xiao Ziniu⁴

(1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 3 Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010 4 China Meteorological Administration (CMA) Training Centre, Beijing 100081)

Abstract: The evidence of the relationship between polar motion and runoff is reviewed. The relationship between the runoff of Yarlung Zangbo, a primitive river in Tibet, China and polar motion with data records from about 1846 to present is explored. First, the action path framework was structured based on geophysical principles. In order to make time series stationary, the initial time series of polar motion X component, Y component and runoff were transformed into their corresponding first order difference time series ΔX , ΔY , and ΔQ . The Granger causality test between ΔX , ΔY and ΔQ was conducted on monthly, seasonal and annual time scales. It is found that on a monthly scale ΔX influences ΔQ at the lag being from the 1st to the 21st month, with the 9th month being an exception. ΔY influences ΔQ at the lag from the 1st to the 9th month and from the 17th to the 24th month. On a seasonal scale, the influence of ΔX on ΔQ can be seen in the 2nd season (i.e. from the 4th to the 6th month). The influence of ΔY on ΔQ can be seen on a seasonal scale from the 4th to the 6th season (i.e. from the 10th to 18th month). We cannot see evident Granger causality from ΔX , ΔY to ΔQ , on annual scales. For the Granger influence of ΔQ to ΔX , ΔY , it is found that on a monthly scale the influences are prominent at the lag being from the 3rd to the 25th months for the ΔX , for the ΔY it is the 1st and the 3rd to the 25th months. On a seasonal scale these influences can be seen at the lag from the 2nd to the 8th season (corresponding to the 4th to the 24th month) for ΔX and at the lag from the 1st to the 8th season (corresponding to from the 1st to the 24th month) for ΔY . Again, on an annual scale no evident granger causality can be found from runoff to polar motion. The different behaviours on monthly, seasonal and annual scales suggest that using the monthly data of polar motion to obtain the monthly runoff data is more practicable than borrowing the data from polar motion for river runoff on seasonal and annual scales.

Keywords: polar motion, runoff, Granger causality, Yarlung Zangbo River

收稿日期: 2013年11月28日; 修回日期: 2014年4月7日
第一作者: 刘苏峡(1965—), Email: liusx@igsrr.ac.cn
资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB957802);
国家自然科学基金资助项目(41071024); 长江水利委员会水文局委托项目“长江流域水中长期供水规划——典型流域冰川径流计算及径流组成分析”

1 引言

地极移动 (polar motion), 简称极移, 是指地球自转轴相对于地球本体的位置变化。影响地球自转轴变化的力包括外力和内力。因作用机制的不同, 地轴运动的表现形式也不同, 可分为两类。第一类是被称为岁差 (precession) 和章动 (nutation) 的地轴的方向变动。它们由不涉及机械能消长 (如日月潮) 的外力所驱动。展现在太空, 岁差相当于转轴方向在地球头上画圆的运动, 周期约2.5万年 (常被称为柏拉图年, 或者大年)。章动相当于转轴方向沿着岁差的轨迹的微小颤动, 周期约为18.6年。另一类即为极移, 主要由内力驱动, 是三维物体转动时自发的摆动 (wobble)。目前已观测到的1年和14个月的钱德勒 (Chandler) 周期。驱动极移的内力可能是大气环流、雨雪消长、洋流和地下水等, 但一直还没有定论^[1]。不过Chen等^[2]最新的研究成果展示了北极海冰的消融对近10年的地轴向东移动的驱动联系。

从机理上讲, 极移和径流之间可能存在两种内在联系。一方面如图1所示, 极移可以通过变形力的作用影响地球表层的大气运动, 进而影响陆地水文循环过程^[3-4]。彭公炳等^[3]基于1900—1977年的极移资料 and 我国一些地区的气温、降水、气压、少数水位和流量资料以及北半球内的一些大气环流和大气活动中心指标, 采用滑动分析、方差分析和能谱分析, 发现极移的12个月、14个月、6~7年和35年的周期在气候上都有明显反映。年周期一致不言而喻, 而北京、沈阳、长春、哈尔滨、郑州、重庆、昆明、汕头8个站10年逐月平均气温、500hPa副高指数、亚洲经向环流指数以及武汉、九江、岳阳逐月平均降水都具有11.4

和13.3个月的周期, 即接近极移的12和14个月周期。而东北3站 (哈尔滨、长春、沈阳) 1—2月平均气温和年绝对最低气温, 长江中下游5站 (上海、南京、九江、芜湖、武汉) 1—2月绝对最低气温、6—8月绝对最低气温和年绝对气温, 华南4站 (广州、南宁、贵阳、昆明) 年绝对最低气温, 长江中下游5站5—8月降水, 华北5站 (北京、天津、保定、石家庄、营口) 7—8月降水, 汉口站6—9月平均流量, 太平洋副高西界和南界, 赤道低压位置, 都有6~7年的周期。长江中下游5站5—8月降水和年降水、华北5站年降水、东北3站年绝对最低气温、华南5站1—2月绝对最低气温、长江5站6—8月平均气温、赤道低压东界和西伯利亚高压北界、7月印度低压东界位置都有约30~36年的周期。

另一方面, 如图2所示, 径流变化反映了区域水储量信息, 而水储量的变化引起地球质量再分配, 对极移具有重要的激发作用^[4-10]。

在极移与径流之间存在的上述可能的紧密联系基础上, 本文运用格兰杰 (Granger) 因果关系检验方法, 从统计学角度进一步探索了径流和极移之间的关系。

2 方法与数据

2.1 格兰杰方法

格兰杰因果关系^[11]是从统计学角度探索两组时间序列之间的因果关系的方法, 起初被用于经济学, 目前已开始被用于气象和水文科学研究中^[13-16]。对于变量Y的预测, 如果在加入变量X的信息后能够显著地提高单独运用Y的信息进行预测的效果, 则称变量X是变量Y的格兰杰原因。定义k阶自回归模型 (AR) 和k阶

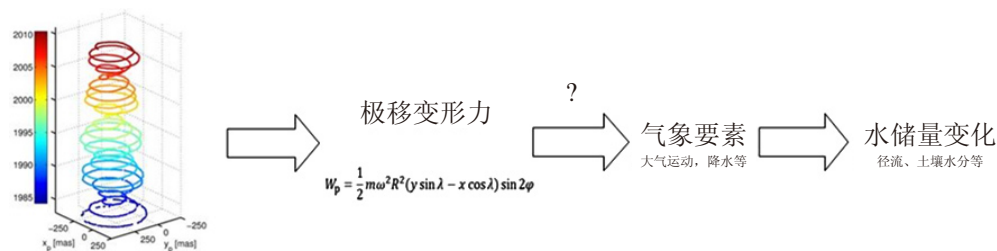


图1 极移对径流影响的可能物理机制
(图中问号表示从极移变性力到大气环流的机制迄今还不甚明了, 极移变化曲线引自文献[11])

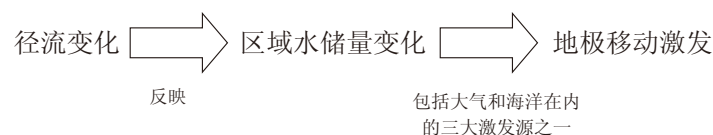


图2 径流对极移影响的可能物理机制

的向量自回归模型 (VAR) 分别为:

$$y_t = C_1 + \sum_{i=1}^k \alpha_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_{t0} \quad (1)$$

$$y_t = C_2 + \sum_{i=1}^k \beta_i \Delta y_{t-i} + \sum_{i=1}^k \gamma_i \Delta x_{t-i} + \varepsilon_{t1} \quad (2)$$

式中, C_1 和 C_2 为常量, α 、 β 、 γ 是模型的系数, ε_{t0} 和 ε_{t1} 是模型的残差。格兰杰检验的原假设 (二者之间不存在因果关系):

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_k = 0 \quad (3)$$

通过最小二乘法计算AR和VAR模型的参数, 然后用F检验判定两个模型之间是否存在显著差异。

$$F = \frac{(RSS_{AR} - RSS_{VAR}) / q}{RSS_{VAR} / (n - m)} \quad (4)$$

式中, RSS_{AR} 是AR模型的残差平方和, RSS_{VAR} 是VAR模型的残差平方和, q 是AR模型的系数的个数 ($q=k$), m 是VAR模型的系数的个数 ($m=2k+1$), n 是观测数据样本数。

格兰杰因果关系检验的前提是序列必须是平稳的, 否则将出现假的因果关系^[17-18]。如果序列不平稳, 可通过进行一阶差分甚至是二阶差分计算, 把序列转化为平稳序列。单位根检验 (Augmented Dickey Fuller, ADF)^[19]常被用来进行序列平稳性检验^[15]。

2.2 数据

极移资料来自国际地球自转和参考系服务 (International Earth Rotation and Reference Systems Service) 的地球定位参数 (The Earth Orientation Parameters) 计划。相对于国际协议原点 (Conventional International Origin, CIO), 地极用坐标 X 和 Y 来记录, 单位为毫弧秒 (mas)。 X 方向为Greenwich子午线方向, 从北极向南为正; Y 方向为西经 90° 方向, 从北极向南为正。资料起始年限为1846年, 原始资料时间间隔包括0.1年和0.5年。

鉴于全球大部分河流受人类活动影响, 因此选取位于青藏高原的受人类活动影响小、区域水循环变化主要较多地受控于自然因素的雅鲁藏布江 (图3), 进行极移与径流之间的关系探索。径流序列是1978年1月—2006年12月的奴下水文站的月径流资料 (Q), 单位为 $m^3 \cdot s^{-1}$ 。奴下水文站流域控制面积为 $191235 km^2$ 。在径流的组成成分里, 冰川积雪融水占38%^[20], 径流变化中包含了大量的冰川积雪变化和土壤水分变化信息。

2.3 分析方法

首先对时间序列 X 、 Y 和 Q 进行平稳性检验, 以 $p=0.05$ 为显著性水平。然后从月、季和年3个不同尺度进行格兰杰因果检验, 探索不同时间尺度上, 极移和径流之间可能存在的关系。为了跟径流资料匹配, 检



图3 雅鲁藏布江及奴下水文站示意图

验所用资料年限统一为1978年1月—2006年12月, 极移资料统一处理为月尺度间隔。为了探索极移和径流二者之间的关系, 分别进行从极移到径流 (径流预测中加极移) 和从径流到极移 (极移预测中加径流) 的格兰杰因果关系检验。为了兼顾模型的预测效率和自由度, 在选取滞后项的时候, 月尺度上进行了1~36个滞后项检验, 季尺度上进行了1~12个滞后项检验, 年尺度上进行了1~3个滞后项检验。

3 结果

3.1 极移和径流的时间变化趋势

图4为极移 X 分量、 Y 分量和雅鲁藏布江奴下站径流在1978—2006年的变化趋势。可以看出, 在29年间, 极移 X 分量沿Greenwich子午线方向相对于CIO南北来回摆动, 变幅在 $-250 \sim 300 mas$ 之间, $1 mas$ 约为 $3 cm$, 故变程大约为 $16 m$ 。极移 Y 分量沿西经 90° 向南方向摆动式漂移, 变幅在 $0 \sim 600 mas$ 之间, 变程合约 $18 m$ 。

雅鲁藏布江奴下站径流29年间变化表现为前20年平稳, 后9年水量增大。在明显的年内季节变化的基础上, 每年的月径流峰值相差 $8000 m^3 \cdot s^{-1}$, 折合成径流深, 峰值相差 $0.108 m$ 。

29年间, 相对于径流的29个峰值, 极移 X 分量有24个峰值, 极移 Y 分量有25个峰值。极移 X 和 Y 分量为正弦式脉冲, 径流 Q 是蛙跳式脉冲。

从上述直观分析可见, 极移和径流之间存在一定的联系, 下面详细探讨存在的联系。

3.2 平稳性检验

对3个时间尺度序列进行ADF单位根平稳性检验 (表1—3)。在进行ADF检验时, 需要确定所构建的统计量的一阶滞后差分项的项数 p^* 。根据AIC准则 (Akaike information criteria)^[21], 月、季和年尺度上

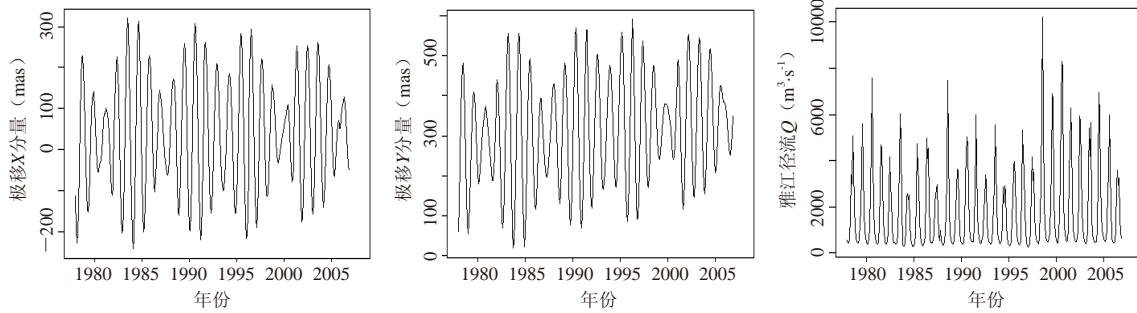


图4 1978年1月—2006年12月的极移X分量、Y分量和雅鲁藏布江奴下站径流

表1 月尺度序列ADF检验结果 (p^* 的最大值取为30, 显著性水平为0.05)

序列名称	ADF统计检验	实际 p^*	概率 (%)
X	-1.68	29	44.04
Y	-1.58	26	48.97
Q	-2.27	22	18.12
ΔX	-6.35	28	0.00
ΔY	-6.82	25	0.00
ΔQ	-7.40	25	0.00

表2 季尺度序列ADF检验结果 (p^* 的最大值取为12, 显著性水平为0.05)

序列名称	ADF统计检验	实际 p^*	概率 (%)
X	-1.85	9	35.47
Y	-1.21	9	66.63
Q	-2.04	7	26.81
ΔX	-7.38	8	0.00
ΔY	-7.31	8	0.00
ΔQ	-8.34	6	0.00

表3 年尺度序列ADF检验结果 (p^* 的最大值取为6, 显著性水平为0.05)

序列名称	ADF统计检验	实际 p^*	概率 (%)
X	-0.64	5	84.18
Y	-1.18	5	66.49
Q	-2.43	3	14.31
ΔX	-5.00	4	0.06
ΔY	-6.30	4	0.00
ΔQ	-9.70	0	0.00

p^* 的最大值分别取30、12和6。

由表1—3可知, 在置信度为0.05的水平上, 系列X、Y和Q均是不平稳的(概率大于5%)。对X、Y和Q分别求一阶差分, 得到序列 ΔX 、 ΔY 和 ΔQ , 即极移X、Y分量和径流的变化量, 再进行平稳性检验(表1—3), 3个序列均转化为了平稳序列, 因此可以对它们进行格兰杰因果关系检验。

3.3 径流预测中加极移因子对其预测精度提高的效果检验

图5显示了径流变化预测中加极移因子的变化量对预测精度提高的效果。根据格兰杰检验原理, 若拒

绝原假设的概率比显著性水平(0.05)还小, 则拒绝原假设。具体到图5a, 也就是说, 若建立滞后分别为1~8个月、10~21个月的径流变化量的AR和VAR模型, 在加入 ΔX (极移X分量的变化量)后, 两模型之间存在显著差异, 径流预测精度可能提高。同理, 若建立滞后为1~9个月、17~24个月的径流变化的AR和VAR模型, 在加入极移Y分量的变化量后, 两模型之间存在显著差异, 径流预测精度可能提高(图5b)。

在季尺度上, 仅仅在建立滞后为2个季度的径流变化的AR和VAR模型中, 在加入极移X分量的变化量后, 两模型之间存在显著差异, 径流预测精度可能提高(图5c)。而在建立滞后为1、4到6个季度的径

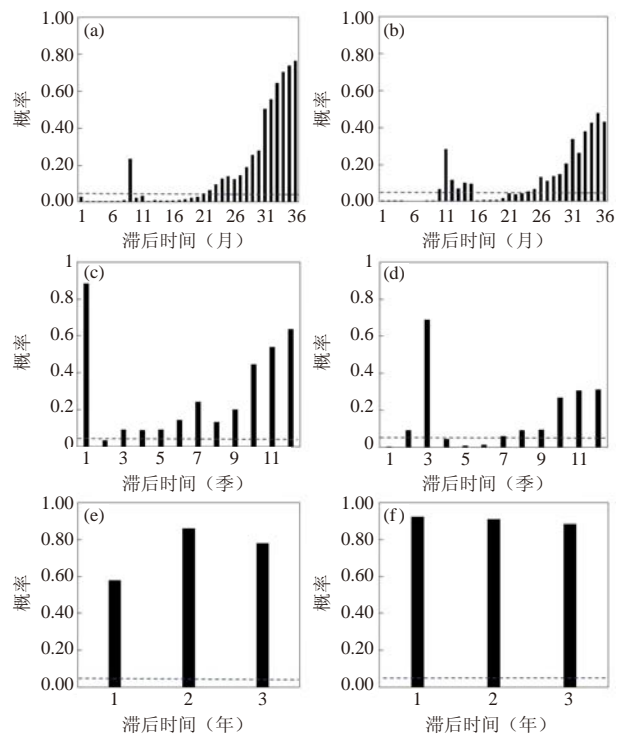


图5 极移影响径流的因果关系检验结果(a, c, e对应加入极移X分量的变化量结果; b, d, f对应加入极移Y分量的变化量结果; 每个图的y轴是拒绝原假设的概率, 虚线对应显著性水平 $p=0.05$)

流变化的AR和VAR模型，在加入极移Y分量的变化量后，两模型之间存在显著差异，径流预测精度可能提高（图5d）。

在年尺度上，不论是滞后多少年，加入极移X或者Y分量的变化量，径流变化的AR和VAR模型之间不存在显著差异，径流预测精度不可能提高。

3.4 极移预测中加入径流因子对其预测精度提高的效果检验

图6显示了极移变化预测中加径流变化量对预测精度提高的效果。对于月尺度，若建立滞后为3~25个月的极移X分量变化量的AR和VAR模型，在加入径流变化量后，两模型之间存在显著差异，极移预测精度可能提高（图6a）。

若建立滞后分别为1个月和3~25个月的极移Y分量变化量的AR和VAR模型，在加入径流变化量后，两模型之间存在显著差异，极移变化量预测精度可能提高（图6b）。

在季尺度上，在建立滞后为2~8个季度的极移X分量变化量的AR和VAR模型中，在加入径流变化量后，两模型之间存在显著差异，极移变化量预测精度可能提高（图6c）。在建立滞后为1~8个季度的极移Y分量变化量的AR和VAR模型中，在加入径流变化量

后，两模型之间存在显著差异，极移预测精度可能提高（图6d）。

在年尺度上，不论滞后多少年，加入径流变化量，不论是对极移X还是Y分量的变化量，其AR和VAR模型之间不存在显著差异，极移预测精度不可能提高。

4 结果讨论

4.1 径流和极移究竟在哪个尺度更可能存在联系

从以上的月、季和年尺度上分别进行的极移与径流之间的格兰杰因果关系探索中可知，在月和季节尺度上，径流和极移在0.05显著性水平上显著地互为格兰杰因果。也就是说，总能找到一个滞后时间并在该时间上建立AR和VAR模型，使得两模型呈显著差异，从而能提供改进预测精度的契机。而在年尺度上，尚未检测出因果关系。这验证了本文总结的极移和径流之间可能存在联系，并和Chen等^[6]认为陆地水储量变化对极移具有很强的季节激发结论相一致。而这暗示了利用长序列的极移，可能在月和季尺度上提高水文预报。

4.2 是极移影响径流还是径流影响极移

如前所述，极移和径流谁是因，谁是果，尚不明确。从上述的月、季和年尺度上分别进行的极移与径流之间的格兰杰因果关系探索中也可看出，径流变化和极移变化互为影响。有意思的是不同的滞后尺度影响不一样。在相同的滞后项选取的前提下，统计了径流变化预测加入极移变化量和极移变化量预测加入径流变化量，发生拒绝原假设的滞后模型的个数（表4）。发现，单纯从这个意义上，似乎是极移变化的加入对径流变化预测精度的影响范围要比径流变化的加入对极移变化预测精度的影响范围大（滞后模型个数多）。这暗示，极移对径流的影响作用大于径流对极移的影响作用。如果把径流作为地球气候系统的一个组成单元，也许这是地球运动因子影响气候变化的一个潜在信号。

如图5—6以及表4所示，极移X和Y分量的变化量与径流变化之间的关系在时间上并不完全同步：在同一滞后时间下拒绝原假设的统计概率有所差异，拒绝原假设的滞后模型的个数也不相同。总体上来说，径流变化与极移Y分量变化量的统计关系要强于径流变化与极移X分量变化量的关系。这可能与雅鲁藏布江所在的位置和该区域的水循环特点有着紧密联系。如图7所示，雅鲁藏布江所在区域位于90°E附近，即极移Y分量的负方向，该区域的水文循环过程主要是印度洋季风沿着经向北上形成降水，降水再主要通过径

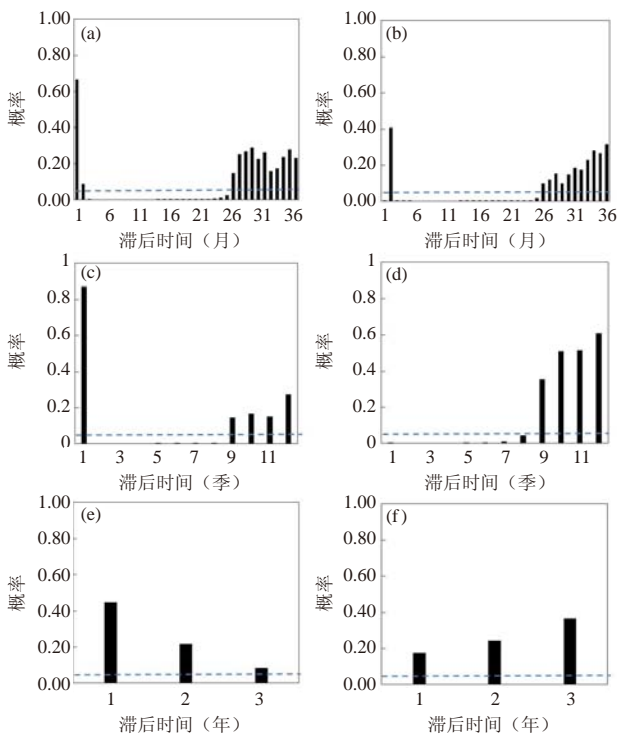


图6 径流影响极移的因果关系检验结果（a, c, e对应极移X分量变化量的结果；b, d, f对应极移Y分量变化量的结果；每个图的y轴是拒绝原假设的概率，虚线对应显著性水平 $p=0.05$ ）

表4 拒绝原假设的滞后模型的个数

模型	月尺度		季尺度	
	X	Y	X	Y
径流变化预测加入极移变化量	19	17	1	4
极移变化预测加入径流变化量	21	24	7	8

流的形式又回到印度洋，这个水文循环过程主要是经向上的，所以在统计关系上该区域的径流变化与极移Y分量的变化统计关系更显著。

4.3 雅鲁藏布江径流与极移

和整个地球相比，雅鲁藏布江流域面积不是很大，为何本文的统计结果显示其径流的变化在一定程度上竟能对极移可能有影响？朱琳等^[22]的研究表明，在从1948—2011年的64年间，全球山脉力矩变化最为显著的地区集中在欧亚大陆的中南部和南美洲安第斯山脉，尤其以青藏高原区域变化最为剧烈。本文统计得到的雅鲁藏布江径流对极移的影响是因为其位置处于敏感区的特殊性？还是一种统计的必然（即抑或任何河川径流都存在关系）？下一步我们将选择世界大河进行深入研究，进一步揭示径流对极移的影响机制。

4.4 研究的引申意义

陆地水储量变化是极移激发的一个重要源，而极移反过来又可能通过离心力的变化来改变陆地水文循环过程。鉴于极移具有较长时间序列，弄清楚极移与径流之间的关系，可为借用极移资料提高资料稀少地区的水文预测精度提供宝贵的资料支持。资料稀缺区域的水文预报（Predictions in Ungauged Basins, PUB）是国际水文科学协会（IAHS）于2002年启动的一个十年水文计划。通过类比，刘苏峡等^[23-24]总结出PUB研究的“借”、“替”、“种”方法三元论。循此方法论，若能厘清极移和径流的关系，就可“借”

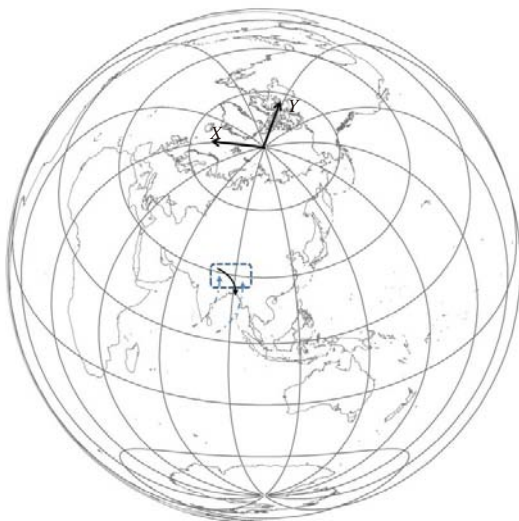


图7 雅鲁藏布江水文循环过程示意图

用有较长时间系列的极移资料的优势，展延水文资料，加强寒区水文研究^[25]，提高水文预测的精度。

4.5 研究的局限

格兰杰检验的一个局限是它只能检测出加入某个因子后是否与不加因子的预测效果是否一样，但它尚不能展示，加入某个因子后，是否就会提高预测精度。很显然，不一样的后果也可能是降低预测精度。所以径流和极移关系的探索任重而道远。

在空间尺度上，极移运动和激发涉及到整个地球系统，所以严格意义上，完全的研究应选取全世界大型河流进行研究。这将是下一步工作目标。

另外，我们只做了有限的滞后时间的比较，对于其他滞后时间，是否会带来不同的结论，还需要更多探索。

最后要强调的是，即使统计方法能做得尽善尽美，欲真正弄清极移与径流的关系还需要走“统计——统计推断——动力机制”相结合的路径。彭公炳等^[3]在统计事实基础上推断，极移振幅增大时，极移与气候的联系的可能性增强。极移振幅的高值年，亚欧中纬地区经向环流指数增强，纬向环流指数减弱，副高偏南，中纬度地区海洋向大陆输送的水汽减少，因为降水减少，冬半年气温也降低，而地处副热带的我国长江中下游降水有所增加，反之亦然。更深入的统计推断和动力机制将是下一步工作的方向。

5 结论

本文采用格兰杰因果检验方法，基于国际地球自转和参考系服务地球定位参数计划的极移数据和位于青藏高原的受人类活动影响小的雅鲁藏布江奴下站1978—2006年的月径流资料，在月、季和年尺度上分别进行了从极移到径流（径流变化预测中加极移变化）和从径流到极移（极移变化预测中加径流变化）的格兰杰因果关系检验。

在月和季节尺度上，径流和极移在0.05显著性水平上显著地互为格兰杰因果。也就是说总能找到一个滞后时间并在该时间上建立自回归（AR）和向量自回归（VAR）模型，使得两模型呈显著差异，从而能提供改进预测精度的契机。而在年尺度上，尚未检测出因果关系。

比较发生拒绝原假设的滞后模型的个数，发现极移加入径流对径流预测精度的影响范围要比径流加入极移对极移预测精度的影响范围大，也即滞后模型个数多，暗示极移对径流的影响大于径流对极移的影响。

研究成果将可能用极移资料提高资料稀缺地区的

水文预测精度。

极移和径流关系的深入的研究，将是对格兰杰方法的改进、采用全世界大河进行全面研究、讨论更多的滞后时间，特别是，采用“统计——统计推断——动力机制”相结合的方法进行。

参考文献

- [1] 赵丰. 见微知著——话地球自转. 科学月刊, 1990, 21(11): 866-876.
- [2] Chen J L, Wilson C R, Ries J C, et al. Rapid ice melting drives Earth's pole to the east. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(11): 2625-2630.
- [3] 彭公炳, 陆巍, 殷延珍. 地极移动与气候的几个问题. *大气科学*, 1980, 4(4): 369-378.
- [4] Wahr J M. Deformation induced by polar motion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1985, 90(B11): 9363-9368.
- [5] 闫昊明, 钟敏, 朱耀仲, 等. 极移半年振荡的年际变化与北大西洋涛动. *自然科学进展*, 2002, 12(1): 104-107.
- [6] Chen J L, Wilson C R. Hydrological excitations of polar motion, 1993-2002. *Geophysical Journal International*, 2005, 160(3): 833-839.
- [7] Nastula J, Ponte R M, Salstein D A. Comparison of polar motion excitation series derived from GRACE and from analyses of geophysical fluids. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L11306, doi:10.1029/2006GL028983.
- [8] Jin S, Chambers D P, Tapley B D. Hydrological and oceanic effects on polar motion from GRACE and models. *J Geophys Res*, 2010, 115, B02.
- [9] Jin S G, Hassana A A, Feng G P. Assessment of terrestrial water contributions to polar motion from GRACE and hydrological models. *Journal of Geodynamics*, 2012, 62: 40-48.
- [10] Chen J L, Wilson C R, Zhou Y H. Seasonal excitation of polar motion. *Journal of Geodynamics*, 2012, 62: 8-15.
- [11] Schuh H, Böhm S. Earth rotation - In: Gupta H K (Ed), *Encyclopedia of solid Earth geophysics (Encyclopedia of Earth Sciences Series 1)*. Springer, 2011.
- [12] Granger C W J. Investigating causal relations by econometric methods and cross-spectral methods. *Econometrica*, 1969, 37: 424-438.
- [13] Elsner J B. Granger causality and Atlantic hurricanes. *Tellus*, 2007, 59: 476-485.
- [14] He D, Ren J, Fu K, et al. Sediment change under climate changes and human activities in the Yuanjiang-Red River Basin. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52: 164-171.
- [15] Attanasio A. Testing for linear Granger causality from natural/anthropogenic forcings to global temperature anomalies. *Theoretical Appl Climatol*, 2012, 110: 281-289.
- [16] Attanasio A, Pasini A, Triacca U. A contribution to attribution of recent global warming by out-of-sample Granger causality analysis. *Atmos Sci Lett*, 2012, 13: 67-72.
- [17] Stock J H, Watson M W. Interpreting the evidence on money-income causality. *Journal of Econometrics*, 1989, 40: 161-181.
- [18] Sims C A, Stock J H, Watson M W. Inference in linear time series models with some unit roots. *Econometrica*, 1990, 58: 113-144.
- [19] Dickey D, Fuller W A. Likelihood ratio statistic for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica*, 1981, 49: 427-431.
- [20] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征. *地理学报*, 1999, 54(s): 157-164.
- [21] Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(6): 716-723.
- [22] 朱琳, 黄玫, 巩贺, 等. 全球山脉力矩时空变化及其与地球自转的关系. *气象科技进展*, 2014, 4(3): 32-35.
- [23] 刘苏峡, 刘昌明, 赵卫民. 无测站流域水文预测 (PUB) 的研究方法. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1333-1339.
- [24] Liu S, Mo X, Liu C, et al. On Pub methodology from Chinese lessons. *Hydrological Science Journal*, 2014, doi: 10.1080/02626667.2014.899702.
- [25] Wang S, Liu S. Exploring the relationship between polar motion and a primitive river's runoff based on Granger causality. *IAHS Publ.* 360, 2013.

大气角动量的研究进展

石文静^{1,2} 杨萍¹ 肖子牛^{1,2}

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

摘要: 地球系统由固体地球、大气和海洋等流体层组成。在自转的地球上相对于地球表面运动的空气, 因受到摩擦和山脉的作用, 与转动地球之间产生转动力矩, 即为大气角动量 (Atmospheric angular momentum, AAM)。早期有关AAM的研究主要用于解释大气环流中信风和盛行西风得以维持的原因, 而近些年来研究者更注重研究AAM的变化问题, 包括山脉和摩擦力矩、角动量及其输送的季节、年际和年代际等多时间尺度的变化问题, 并将其与日长 (Long of day, LOD) 变化、厄尔尼诺和南方涛动等地球、海洋和大气现象联系起来。作为一个描述大气环流的基本变量, AAM的平衡和异常反映了大气活动与固体地球、海洋在多时空尺度上的耦合过程。比如, 大气的季节性质量重新分布 (大气压) 和运动 (纬向风) 的驱动 (也就意味着AAM发生了变化) 可导致LOD随之发生相应的季节性变化; 从角动量守恒的角度来讲, 当大气自西向东的角动量增加时, 固体地球的角动量必然减小, 地球自转速度减慢, LOD增大, 反之亦然。因此, AAM的研究一直以来都受到气象学家、天文学家和地球科学家等的青睐。主要总结了20世纪80年代以来在地球系统角动量交换和平衡、AAM的变化及其与大气、海洋活动、地球自转的联系等方面的相关研究进展, 并指出了当前研究中所存在的一些问题, 为未来的科学研究提供参考。

关键词: 大气角动量, 收支平衡, ENSO, 研究进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.002

Progress in Studies on the Atmospheric Angular Momentum

Shi Wenjing^{1,2}, Yang Ping¹, Xiao Ziniu^{1,2}

(1 China Meteorological Administration (CMA) Training Centre, Beijing 100081

2 Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology (NUIST), Nanjing 210044)

Abstract: The earth system is composed of solid Earth, Atmosphere, Oceans and other fluid layers. On the Earth, the atmospheric angular momentum (AAM) is produced between the Earth and the air moving on its surface due to the friction and the mountains. Early studies on AAM are mainly used to explain why the trade winds and the prevailing westerlies maintain in the atmospheric circulation, but recently scientists have paid more attention to researches on the variation of AAM, including mountains and friction torque, angular momentum and its transportation variations on seasonal, interannual, decadal and multi-time scales, and connected these variations with length of day (LOD), ENSO and other Earth, Atmosphere and Oceans activities. As a basic variable to describe the atmospheric circulation, the balance of AAM and its anomalies reflects the coupling process between solid Earth, Atmosphere and Oceans on multi-temporal and spatial scales, for example, the seasonal atmospheric mass redistribution (atmospheric pressure) and the driven atmospheric motion (zonal wind) (which means AAM changes) can cause LOD seasonal changes. From the perspective of the law of the angular momentum conservation, when the AAM increases, the angular momentum of the solid Earth inevitably decreases with the Earth's rotation speed slowing down and LOD increases, and vice versa. Therefore, the research on AAM has always been favored by meteorologists, astronomers and Earth scientists. This paper mainly summarizes the research progress about the exchange of momentum in the Earth-Atmosphere system and its balance, the AAM's changes and its relation to the Atmosphere, Ocean activities, and Earth's rotation since the 1980s, and points out some problems existing in current researches in order to provide references for future studies.

Keywords: atmospheric angular momentum (AAM), budget and equilibrium, ENSO, research progress

收稿日期: 2013年12月12日; 修回日期: 2014年4月22日
 第一作者: 石文静 (1986—), Email: shiwenjing_005@163.com
 通信作者: 肖子牛 (1965—), Email: xiaozn@cma.gov.cn
 资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB957804);
 国家自然科学基金资助项目 (41375069,
 41175051); 江苏省普通高校研究生科研创新
 计划 (CXZZ13_0517)

1 引言

早期的大气角动量 (atmospheric angular momentum, AAM) 作为研究大气环流的主要工具之一而被人们熟知, 它将大气与地球相联系, 用以阐明大气环流中的机制问题。以Ferrel^[1]于1856年引进一个在他以前不为任何气象工作者所认识的“新”的力 (即科氏力的南北分量) 为界, 在这之前, 人们更多

地认为大气在运动中是角速度在守恒，而没有认识到角动量这个概念。早在17世纪30年代，Hadley在绝对速度而不是绝对角动量守恒的假设下就得出结论：如果一空气质点开始流向赤道时没有向东或向西的相对运动，由于低纬地区地球向东运动得快，要保持质点的绝对速度，在到达较低纬度时质点就会具有相对于地球的向西运动。但他发现，当空气向南运动了很大一段距离后所应有的向西的风速要比实际观测到的大得多。这里明显的一个错误就是在没有东西向力存在的条件下，向赤道或极地运动的空气不保持其绝对速度，而保持其绝对角动量。之后，Thomson^[2]和Oberbeck^[3]等气象学家在研究大气环流图案时，陆续开始关注了角动量平衡的问题。直到1926年，Jeffreys^[4]在研究气旋的作用时，才真正把角动量的观念应用起来。

由于地球自转，相对地球表面运动的空气受到摩擦和山脉作用，与转动地球之间产生转动力矩（即角动量）。因而，绕地轴旋转的单位质量空气的绝对角动量可表示为^[5]：

$$M = M_r + M_\Omega$$

式中，相对角动量 $M_r = a \cos \varphi u$ ，地球角动量 $M_\Omega = a^2 \Omega \cos^2 \varphi$ ， u 为空气的纬向风速， Ω 为地球自转角速度， a 是地球半径， φ 是纬度。

单位体积气块的绝对角动量的个别变化又取决于沿纬圈的压力差（由于山脉作用产生的压力矩）和摩擦力矩：

$$\frac{dM}{dt} = T_m + T_f$$

式中，山脉力矩 $T_m = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$ ，摩擦力矩 $T_f = a \cos \varphi \cdot F_\lambda$ ， λ 是经度， ρ 是大气密度， p 是气压， F_λ 是摩擦力纬向分量。

山脉力矩的物理意义又是怎样的呢？比如，在西风带的某一纬圈上有一座山，在西风气流的作用下，山脉西侧迎风坡处气压值比东侧背风坡处气压值高（即存在向东的气压梯度力），气压力矩将使地球加速向东转动，因而大气损耗了西风角动量，绝对AAM将减弱。对于摩擦力矩，东风的情况下， $F_\lambda > 0$ ，摩擦力矩是正的，使得绝对AAM增加。

长期以来，地球表面上不停环绕地球做相对运动的东西风带平均而言维持不变的事实，说明在没有外力矩和不考虑海洋的作用下，地球和大气闭合系统中绝对角动量是守恒的。到20世纪50年代，有关地气系统角动量交换和平衡及其物理机制等问题已出现大量研究^[6-9]。对角动量平衡的研究经常涉及到山脉力矩、摩擦力矩以及大气自身对大气内部角动量的水平和垂

直输送^[6,9]。早在20世纪60年代，Bjerknes^[10]就把太平洋上发生的增温现象看成是大尺度海气相互作用的结果。到20世纪80年代初，Stefanick^[11]发现AAM的年内变化与南方涛动联系密切，同时，研究者还发现了AAM的季节和季节内变化及其与一些季节内气候振荡的可能联系。从此，这一领域逐渐得到重视。随着观测仪器和观测手段的进步，长时间序列观测资料的获取成为可能，近些年研究者又开始致力于探索AAM的年代际变化及其与年代际气候振荡的联系，包括其内在的物理机制等问题。

在讨论地气系统绝对角动量平衡时，必须要清楚大气与地球之间的角动量交换，这可以由两种方式得到：一种是通过计算大气与地球之间的摩擦应力得到，另一种是间接地由昼夜长度年变化来计算。可见，AAM和地球日长（length of day, LOD）变化之间也存在密不可分的联系。20世纪80年代以来，研究者对AAM的变化与LOD的联系给予了很多关注，最具有代表性的就是Langley等^[12]给出了AAM变化与LOD变化之间的定量关系。

本文基于对已有关于AAM研究的回顾，从角动量平衡（包括大气内部角动量输送、摩擦力矩、山脉力矩）、AAM的变化（包括季节和季节内、年际、年代际甚至更长周期的变化）及其与大气、海洋活动、地球自转的联系等几个方面，梳理了近期国内外在该领域的研究成果，为更好地开展该领域的研究工作提供一定的参考。

2 角动量交换及收支平衡

2.1 角动量输送

众所周知，大气在东风带通过摩擦和山脉作用获得地球给予的西风角动量，在西风带里又通过摩擦和山脉的作用失去得到的西风角动量。长期以来，东风带并没有因获得西风角动量而使东风减弱，西风带也没有因失去西风角动量而使西风减弱，为维持东西风带，全球范围内的AAM必须是守恒的，这就意味着大气内部必须有角动量的输送，包括水平输送和垂直输送^[5]。

大气内部角动量的水平输送主要包括平均经圈环流、定常涡旋以及瞬变涡旋的相对AAM输送^[5]。通过计算大气内部角动量水平输送的各项，可以发现与瞬变涡旋相比，定常涡旋和平均经圈环流导致的AAM水平输送的总垂直积分值要小很多，尤其是北半球夏季，这说明AAM的水平输送主要依赖于瞬变涡旋来完成。瞬变涡旋对AAM输送的峰值不论冬、夏季还是南、北半球均出现在30°纬度附近。然而，冬季低纬

度平均经圈环流对AAM的输送比较显著,这说明冬季低纬地区Hadley环流很重要。

要维持大气内部角动量守恒,除了角动量水平输送以外,必须有垂直输送的协同才能完成^[5]。由于最大的AAM水平输送出现在对流层上部,而AAM的源汇分布在地面,与地表风带的分布一致,因此热带东风带里就有向上的AAM输送,中高纬西风带里就有向下的AAM输送,从而维持整个大气内部角动量的平衡^[13]。

20世纪20年代,Jeffreys^[4]就指出地球和大气之间存在系统的角动量交换,强调了角动量水平输送的必要性及输送机制。叶笃正等^[6]进一步指出AAM通过大气环流槽脊的南北输送保持绝对角动量守恒。Starr^[14]阐述了大气中大型涡旋对角动量输送的重要作用。叶笃正等^[15]认为经圈环流对AAM的输送作用也很重要,在中高纬度地区大型涡旋是角动量的主要输送者,而在低纬度地区经圈环流的作用将大大增加。吴国雄等^[16]也赞同平均经圈环流对AAM平衡有重要作用的观点。

Feldstein^[17]对季节内尺度上相对AAM的向极传播现象做了深入研究,指出相对AAM的向极传播现象在两半球冬、夏季均存在。与中纬度相比,副热带和高纬度的向极传播更快、更均一,并指出高纬度相对AAM的向赤道传播发生在向极传播之后。通过研究AAM的收支平衡,他还发现相对AAM的变化主要取决于涡旋角动量通量散度和摩擦力矩,而摩擦力矩主要起到削弱相对AAM的作用。在副热带和中纬度地区,相对AAM的向极传播受到高频涡旋($<10d$)角动量通量散度的影响;而在高纬度地区,相对AAM的传播主要受到高低频交叉涡旋和低频($>10d$)涡旋角动量通量散度之和的影响。相对AAM首先受到高频瞬变涡旋的反馈作用,向极传播并不断加强,一旦相对AAM获得最大振幅,就转换成受到高低频交叉涡旋和低频涡旋共同的反馈作用,加之摩擦力矩的作用,导致相对AAM衰减。此外,他还指出,副热带和中纬度相对AAM的向极传播主要受到高频瞬变涡旋角动量辐合的作用,而高纬度则是高低频交叉涡旋和低频瞬变涡旋角动量辐合的作用。然而,对于北半球冬季而言,由定常涡旋和瞬变涡旋相互作用而导致的涡旋角动量通量的异常对相对AAM向极传播的变化也有一定影响。James等^[18]则认为相对AAM的向极传播很可能以类似平流层爆发性增温的方式导致波一流相互作用。Huang等^[19]的研究则表明在年际变化尺度上,热带地区角动量的向极传播将热带和极区的气候变化联系起来,这种角动量的向极传播和一些气候振荡(比

如ENSO、PNA、NAO、AO、AAO和PSA等)的联系密切。

2.2 山脉力矩、摩擦力矩的作用

摩擦和山脉力矩是地球和大气之间角动量交换的两种主要途径,它的变化和异常在AAM交换中起着重要作用。早在1950年左右,摩擦和山脉力矩在天气系统角动量交换中的相对作用及与一些天气尺度系统的关系等研究已经得以重视和开展。

在气候态平均上,摩擦力矩主要来自南、北纬 60° 以内地区,极区摩擦力矩很小。具体而言,两半球中低纬度(南北纬 30° 以内)地区多为正值,表明低纬度地区大气通过摩擦力矩获得地球给予的角动量;中高纬度(南北纬 $30^\circ-60^\circ$)地区摩擦力矩为负值,表明大气通过摩擦力矩失去角动量。中低纬度和中高纬度地区摩擦力矩于半球冬季达到极值,中心分别位于 15° 和 45° 附近;而夏季最小。北半球山脉力矩主要集中在 $60^\circ N$ 以南,南半球山脉力矩主要集中在 $35^\circ S$ 以北。 $30^\circ-43^\circ N$ 、 $0^\circ-11^\circ S$ 、 $15^\circ S$ 和 $30^\circ S$ 附近山脉力矩常年为正,即大气通过山脉力矩获得角动量。 $22^\circ-30^\circ N$ 及 $15^\circ S$ 南北两侧山脉力矩常年为负,即大气通过山脉力矩失去角动量。由于地形的复杂性,山脉力矩的季节变化比摩擦力矩复杂。

早期研究中,White^[8]认为摩擦力矩和山脉力矩的贡献相当。Oort等^[20]通过计算1958年5月—1963年4月 $10^\circ S-80^\circ N$ 范围内的大型山脉力矩的逐月数据,发现山脉力矩的年际变化非常显著,尤其是冬半年。他还强调对于整个北半球而言,山脉力矩和摩擦力矩同等重要,两个力矩均是夏季为角动量汇,冬季为角动量源。Swinbank^[21]则持不同观点,认为两者的相对重要性取决于时间尺度,在不同的时间尺度上两者的贡献有所不同。基于包含地形和边界层方案的UKMO大气环流模式(GCM),Swinbank^[21]计算了全球摩擦力矩和山脉力矩的逐日资料,对数据分析发现山脉力矩是全球AAM短周期变化的主要贡献者。在AAM年际变化尺度上,山脉力矩的作用相对更为重要,AAM的变化与太平洋上大气质量相对固体地球的再分布(ENSO)息息相关^[10, 22]。而在年代际变化尺度上,摩擦力矩的贡献显著^[23]。Iskenderian等^[24]通过高频滤波处理,发现中纬度山脉(落基山、喜马拉雅山、安第斯山)力矩对AAM的高频振荡($<14d$)贡献很大,而热带和极区山脉力矩、摩擦力矩对这一高频振荡的作用要小很多。Weickmann^[25]认为在季节内尺度上,全球山脉力矩和摩擦力矩有显著超前滞后相关,摩擦力矩超前于山脉力矩。这种关系说明了两种基本

反馈机制，即山脉力矩触发全球AAM发生变化，而摩擦力矩抑制这种变化；摩擦力矩的变化与中纬度海平面气压的变化相联系，继而影响山脉力矩异常。

山脉、摩擦力矩与天气系统的变化关系在近十多年研究较多。王亚非等^[26]对1998年5—6月喜马拉雅山AAM收支与东亚天气尺度系统变化的联系进行了考察，发现喜马拉雅山山脉、摩擦力矩与梅雨锋区700hPa高度场均有显著相关，且这种相关存在6d左右的周期。山脉力矩与梅雨锋区高度场有较高的同时和滞后6d的正相关；而摩擦力矩与梅雨锋区的高度场有提前3d和滞后3~6d的显著正相关，这说明喜马拉雅山摩擦力矩可能影响着其下游的一个6d左右的天气尺度系统扰动，而下游的这种扰动很可能影响山脉力矩的大小，也就是说假设当东亚区域西风气流加大时导致了负摩擦力矩加大，从而使得相对AAM减少，3d后在梅雨区域上会出现低压系统增强。这种增强使得喜马拉雅山山脉力矩有负增长，导致相对AAM继续减少，而这种负增长很可能再导致西风气流的加强，造成负摩擦力矩增强。如果没有正角动量的平流输送，这种正反馈效应可能会导致梅雨锋附近的低压持续增强。Egger等^[27]研究指出，当北大西洋系统东移经过地中海地区的群山时，该地区的山脉力矩会发生相应变化，进而影响经过山脉的气流的角动量。对于东移的大尺度系统（系统的水平尺度大于山脉），当系统等压线呈西南—东北走向时，这种作用主要体现在山脉力矩的纬向分量上；当系统等压线呈西北—东南走向时，这种作用主要体现在山脉力矩的经向分量上。在这种系统气压场上的配置下，由于山脉作用，将产生低层（4000m以下）气压场上的扭曲，使得经过山脉的气流的角动量减少。这种低层气压场上的扭曲与阿尔卑斯山山脉力矩有滞后 $t \leq 0d$ （ t 为滞后时间）的正相关，与小亚细亚山脉力矩有滞后 $-2d < t < d$ 天的正相关，与阿特拉斯山脉力矩只存在同期相关。Czarnetzki^[28]也曾指出落基山山脉力矩、摩擦力矩与落基山东面的天气尺度气旋活动相关密切。

此外，山脉力矩（喜马拉雅山、落基山）的变化和ENSO及大气的低频振荡（AO、NAO、PNA）也有着密不可分的关系^[29-30]。

3 AAM的变化与ENSO等热带活动的联系

3.1 AAM的年（代）际变化与ENSO

实际大气的变化主要体现在相对AAM的变化上，对AAM的研究多涉及到相对AAM。20世纪80年代，人们开始注意到ENSO与AAM的密切联系。强的厄尔尼诺（1982—1993年，1997—1998年）发生

时，AAM和LOD均出现极大值^[31]。Stefanick^[11]在研究1963—1973年AAM的年际变化及南方涛动时指出，厄尔尼诺事件发生时，南方涛动指数（SOI）达到负的极大值，在西太平洋存在正的气压异常，东太平洋存在负的气压异常，从而导致正的向东的气压梯度异常，使得东风减弱，相对AAM增加。钱维宏等^[32]研究表明地气系统中的角动量交换是通过地气（或海气）界面上的摩擦力矩、山脉力矩来同ENSO相联系的，地球自转速率、赤道东太平洋海温、不同纬带及全球AAM之间存在着协同变化关系。Dickey等^[33]在分析1997—1998年强ENSO事件对地气系统角动量交换的影响时，指出相对AAM存在自赤道向高纬的向极传播现象，这种向极传播在低频（4.7a）和准两年（2.4a）周期上最为显著。del Rio等^[34]的研究也曾揭示，AAM准两年振荡（QBO）可分为平流层的向下传播和对流层的向上传播，当两种QBO信号处于同位相时，就会产生强的厄尔尼诺现象（比如1982—1983年，1997—1998年）。AAM 3~4年的周期振荡仅存在对流层自下而上的传播型，在这一时间尺度上，相对AAM不仅存在赤道的向极传播，还有极地的向赤道传播。相对AAM的向赤道传播对ENSO也有一定影响，比如在1982—1983年和1972—1973年的厄尔尼诺事件发生时，相对AAM出现向赤道传播。在年际变化上，相对AAM显著的向极传播与ENSO息息相关^[35]。Chen等^[36]探索了年际变化尺度上，引起相对AAM向极传播的原因。他指出ENSO冷位相期间，西风异常出现在热带或者较高纬度，全球相对AAM异常达到最小值；相反，ENSO暖事件期间，副热带地区出现西风异常，全球相对AAM异常达到最大值，角动量的向极传播就是由这种冷、暖事件过渡期间异常环流的突变所引起的。

Paek等^[37]借助于CMIP3和CMIP5模式分析了AAM（包括 M_{Ω} 和 M_r ）的百年际和多年代际变化趋势。他在研究中指出，AAM的变化趋势主要由相对AAM贡献，在20世纪和21世纪，AAM均存在显著增加趋势，但是21世纪的增加趋势明显强于20世纪，导致AAM增加的诱因是温室气体。在多年代际时间尺度上，相对AAM的变化趋势并不显著，由此，温室气体对AAM多年代际上的影响并不显著。del Rio等^[38]利用20世纪139年（1870—2008年）的再分析资料研究了AAM的长时间尺度（20a以上周期成分）的变化特征。他的研究表明1950—1985年期间全球AAM有增加趋势，20世纪80年代中期以后开始减弱。在年际至十年时间尺度上（25a以下），AAM与ENSO之间存在很高的

相关性,而在更长时间尺度上(30~50a,甚至80a以上),AAM可能对LOD的变化起一定作用。30~50a的时间尺度上,AAM与PDO同步变化,更长时间尺度上(80a以上)AAM滞后于PDO、ENSO。Yang等^[39]在对比研究全球、热带、副热带AAM的变化特征时,发现在AAM从热带向副热带传播的过程中存在一个2a左右的循环周期:当热带AAM增加时,在随后的10个月伴随副热带AAM亦增加;而当副热带AAM增加时,会伴随随后的4~14个月热带AAM的减少。这种AAM从热带到副热带的传播活动在ENSO事件发生时表现的尤为显著,比如1982—1983、1997—1998年的厄尔尼诺事件,对应强的热带AAM的向副热带传播。

3.2 AAM的季节内振荡与热带对流

全球AAM的季节内振荡主要通过两种方式来激发,一种是副热带山脉力矩,另一种是热带对流活动^[39]。Dickey等^[40]发现在40d左右时间尺度上,热带外AAM有向赤道传播的现象,并通过对比研究中纬度和热带AAM季节内振荡的可能的不同激发源,认为热带地区50d振荡与MJ波的对流驱动有关联,而热带外40d振荡与非纬向流和地形的相互作用有关。Marcus等^[41]也表示北半球热带外地区的AAM存在40d振荡,这种振荡由山脉力矩及其与纬向对称环流的相互作用所激发。AAM与热带地区40~50d振荡(MJO)活动的联系也很密切。20世纪80年代初期,Langley等^[112]就发现LOD和全球AAM均存在50d左右的振荡。Anderson等^[42]将这种AAM季节内尺度的变化与MJO联系起来,分析了纬向平均纬向风的向极和向下传播。他表示当纬向平均纬向风到达副热带时,全球AAM达到峰值。Madden^[43]的研究则表明当MJO对流异常减弱至日界线附近时,全球AAM增至最大值。Weickmann等^[44]运用全球尺度的风场和OLR资料研究了热带MJO中的AAM循环,指出AAM输送对AAM-MJO关系而言是很重要的,AAM-MJO联系的媒介在于热带对流加热所激发的行星罗斯贝波与环境气流纬向变化、山脉力矩的相互作用。Gutzler等^[45]普查了热带纬向风、总AAM、LOD及赤道附近海平面之间的关系,发现它们均存在季节内振荡。热带AAM和纬向平均 u 风与西太平洋(此处的MJO信号很强)对流层上层纬向风40~50d的振荡的关系很弱,但是与对流层低层的关系很强。与MJO相联系的太平洋表面风应力振荡是动量累积进入和耗散离开大气的主要媒介。

4 AAM与LOD的联系

LOD的长周期变化源自于潮汐能量耗散和核幔电磁耦合,而其年际时间尺度上(周年、半年及高频的

飞潮汐变化)可归因于地球、大气和海洋之间的角动量交换。LOD变化与AAM变化之间存在定量关系: $\Delta LOD = 1.68 \times 10^{-26} \Delta M^{[12]}$ 。

Rosen等^[46]基于1976—1981年纬向风资料,通过谱分析分析了相对AAM和观测的固体地球的旋转速率的时间序列,结果发现AAM和LOD均有明显的年循环及年以下信号,在周年及以下周期上,AAM在LOD的变化中起到很重要的驱动作用。彭公炳^[47]也表示地球自转角速度的季节变化与全球相对AAM以及两半球间的大气温差有密切联系,当两半球温差加大时,AAM减小,相应地地转角速度加快,反之亦然。郑大伟等^[48]分析LOD、赤道海温和AAM之间的相关关系时发现,AAM的年际变化超前于LOD和ENSO 2~3个月,由此他认为地球自转的年际变化和厄尔尼诺事件可能是固体地球和海洋各自对大气环流变异的响应。周永宏等^[49]运用小波转换等方法研究了1970年1月—1999年6月期间LOD变化序列、AAM和南方涛动指数的关系,结果表明LOD变化和AAM的年际变化与ENSO具有相似的时变谱结构,从LOD变化和AAM资料中可以检测到1997—1998年厄尔尼诺和1998—1999年拉尼娜事件的信号。Gross^[50]则认为在年代际或更长的时间尺度上,由于幔核角动量的交换逐渐占据主导地位,AAM与LOD之间的同时相关性逐渐消失。杨虎等^[51]将表征地球自转速度变化的日长(LOD)数据分解为多个尺度的波动,包括以13.6d、27.3d、0.5a、1a为周期的波动以及年际变化和年代际变化。通过对LOD与相对AAM的小波相干分析证明,地球自转速度变化中40d~5a周期(包括0.5a、1a、年际变化)的波动主要受AAM的变化激发,且二者在1~5a尺度的变化相位一致。Yang等^[39]研究指出相对AAM与LOD的关系存在多时间尺度变化特征。在去掉LOD线性趋势之前,全球和热带AAM与LOD的相关没有通过信度检验,而在去掉LOD趋势之后,全球和热带AAM与LOD表现出显著的正相关(相关系数分别为0.365、0.396),超过了95%的信度检验。这说明在短时间(年际)尺度上,AAM与LOD有显著正相关;但在长时间尺度上,二者不存在显著相关性;但在副热带具有不同的表现,去趋势之前相关显著,去趋势之后相关大大减少。

5 结束语

不难发现,在过去的几十年里,人们对AAM的应用研究越来越广泛,包括研究相对AAM及其输送、摩擦和山脉力矩的多时间尺度变化特征,并将这些变化与ENSO、QBO及地球日长等的变化联系起来,来揭示大气、海洋活动与固体地球之间的耦合过程,以期

望更好地理解地球动力学系统中角动量的交换过程。因此,对这一领域的研究具有很重要的科学意义和价值。

一方面,随着观测仪器、研究手段以及多学科交叉知识的不断发展,使AAM的应用研究得到广泛而深入的发展,已取得丰富的研究成果,主要有以下几方面进展:对地气系统角动量交换及角动量输送过程的理解已形成一个比较完整和系统性的理论框架:固体地球、大气和海洋作为一个封闭系统,其总的角动量守恒,当大气自西向东的角动量增加时,固体地球的角动量必然减小,反之亦然,这种交换过程通常是通过摩擦和山脉力矩来完成的;对AAM与ENSO联系的物理机制亦有较为统一的认识:通常来讲,在El Niño事件期间,中太平洋低纬地区的低层大气由向西流动转为向东运动,大气得到了与地球自转同向的角动量。同时,由于信风减弱,海洋上表面层洋流的自东向西运动也减弱,并且,随着时间的推移,洋流开始向东流动,太平洋中的洋流也得到了一个与地球自转方向一致的角动量。这样,大气和洋流获得角动量,固体地球则失去角动量,从而也导致了日长的增加;在AAM与地球自转变化之间的关系方面也已有突破性进展:在不同时间尺度上二者的因果关系存在较大差异,年际尺度上引起地球自转异常的激发源来自大气和海洋的作用,包括相对AAM的变化以及反映海气相互作用的ENSO,而长时间尺度上(年代际甚至更长)引起地球自转异常的激发源主要是核幔耦合机制。

另一方面,由于资料所限或其他原因,还有很多基本问题仍未解决,如:(1)对AAM的变化规律尤其是输送方面的研究还不够深入和系统,对其变化机理以及对大气环流异常的影响过程尚不十分清楚;

(2)对山脉和摩擦力矩精确地定量计算还存在一定的困难,这给地气系统角动量的交换和角动量输送过程的准确理解带来一定的局限性;(3)如何建立全球大气、海洋和固体地球耦合的综合模式,通过考虑山脉力矩和摩擦力矩的作用来揭示地球动力学系统中角动量交换的过程还不是很清楚;(4)从AAM的视角去分析气候异常和气候变化的研究工作依然亟待加强。这些因素均影响着对AAM更加全面而深入的认识,还需要通过更多深入和细致的研究来推动该领域的发展。

参考文献

- [1] Ferrel W. An essay on the Winds and the Currents of the Ocean. Nashville Journal of Medicine and Surgery, 1856, 11: 287-301. Reprinted in Popular essays on the movements of the atmosphere. Prof Pap Signal Serv, 1882, 12: 7-19.
- [2] Thomson J. Bakerian Lecture: On the Grand Currents of Atmospheric Circulation. Proceedings of the Royal Society of London, 1892, 51(308-314): 42-46.
- [3] Oberbeck A. über die Bewegungerscheinungen der Atmosphäre. Sita.-Ber. Akad. Wiss. Berlin, 1888(383-395): 1129-1138. English trans: Abbe C. The mechanics of the Earth's atmosphere. Washington: Smithsonian Inst, 1893.
- [4] Jeffreys H. On the dynamics of geostrophic winds. Quart J Roy Meteor Soc, 1926, 52: 85-104.
- [5] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法(第三版). 北京:气象出版社,2000.
- [6] 叶笃正,朱抱真. 大气环流的若干基本问题. 北京:科学出版社,1958.
- [7] 叶笃正,杨大升. 北半球大气中角动量的年变化和它的输送机构. 气象学报, 1955, 26(4): 281-294.
- [8] White R M. The role of mountains in the angular momentum balance of the atmosphere. J Meteo, 1949, 6(5): 353-355.
- [9] 洛伦茨, E N. 大气环流的性质和理论. 北京大学地球物理系气象专业译. 北京:科学出版社,1976.
- [10] Bjercknes J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. Tellus, 1966, 18(4): 820-829.
- [11] Stefanick M. Interannual atmospheric angular momentum variability 1963-1973 and the Southern Oscillation. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1982, 87(C1): 428-432.
- [12] Langley R B, King R W, Shapiro I I, et al. Atmospheric angular momentum and the length of day: A common fluctuation with a period near 50 days. Nature, 1981, 294(5843): 730-732.
- [13] Oort A H, Peixoto J P. Angular momentum and energy balance requirements from observations. Advances in Geophysics, 1983, 25: 355-490.
- [14] Starr V P. Note concerning the nature of the large-scale eddies in the atmosphere. Tellus, 1953, 5(4): 494-498.
- [15] 叶笃正,邓根云. 1950年平均经圈环流与角动量的平衡. 气象学报, 1956, 27(4): 307-321.
- [16] 吴国雄, Tibaldi S. 平均经圈环流在大气角动量和感热收支中的作用. 大气科学, 1988, 12(1): 8-17.
- [17] Feldstein S B. An observational study of the intraseasonal poleward propagation of zonal mean flow anomalies. J Atmos Sci, 1998, 55(15): 2516-2529.
- [18] James I N, Dodd J P. A mechanism for the low-frequency variability of the mid-latitude troposphere. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122(533): 1197-1210.
- [19] Huang W R, Chen T C, Wang S Y. Co-variability of poleward propagating atmospheric energy with tropical and higher-latitude climate oscillations. Climate dynamics, 2012, 39(7-8): 1905-1912.
- [20] Oort A H, Bowman H D. Study of the mountain torque and its interannual variations in the Northern Hemisphere. J Atmos Sci, 1974, 31(8): 1974-1982.
- [21] Swinbank R. Global atmospheric angular momentum balance inferred from analyses made during the FGGE. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(470): 977-992.
- [22] Rosen R D, Salstein D A. An El Niño signal in atmospheric angular momentum and Earth rotation. Science, 1984, 225(4660): 411-414.
- [23] Newton C W. Global angular momentum balance: Earth torques and atmospheric fluxes. Journal of the Atmospheric Sciences, 1971, 28(8): 1329-1341.
- [24] Iskenderian H, Salstein D A. Regional sources of mountain torque variability and high-frequency fluctuations in atmospheric angular momentum. Mon Wea Rev, 1998, 126: 1681-1694.
- [25] Weickmann K M. Mountains, the global frictional torque, and the circulation over the Pacific-North American region. Mon Wea Rev, 2003, 131(1): 2608-2622.
- [26] 王亚非,魏东,李琰. 1998年5-6月区域大气角动量收支与东亚天气尺度系统变化. 高原气象, 2011, 30(5): 1189-1194.
- [27] Egger J, Hoinka K P. Mountain torques and synoptic systems in the Mediterranean. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008, 134(634): 1067-1081.
- [28] Czarnetzki A. Regional mountain torque estimate over the Rocky Mountains in lee cyclones. J Atmos Sci, 1997, 54(15): 1986-1997.

- [29] Wolf W L, Smith R B. Length-of-day changes and mountain torque during El Nino. *J Atmos Sci*, 1987, 44: 3656-3660.
- [30] Lott F. Mountain torques and Northern Hemisphere low-frequency variability. Part I: Hemispheric aspects. *J Atmos Sci*, 2004, 62(11): 1259-1271.
- [31] Chao B F. Interannual length-of-day variation with relation of southern oscillation/El Nino. *Geophys Res Lett*, 1984, 11: 541-544.
- [32] 钱维宏, 丑纪范. 地气角动量交换与 ENSO 循环. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(1): 80-86.
- [33] Dickey J O, Gegout P, Marcus S L. Earth-atmosphere angular momentum exchange and ENSO: The rotational signature of the 1997-98 Event. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(16): 2477-2480.
- [34] del Rio R A, Gambis D, Salstein D A. Interannual signals in length of day and atmospheric angular momentum. *Annales Geophysicae*, 2000, 18(3): 347-364.
- [35] Dickey J O, Marcus S L, Hide R. Global propagation of interannual fluctuations in atmospheric angular momentum. *Nature*, 1992, 357: 484-488.
- [36] Chen T C, Tribbia J J, Yen M C. Interannual variation of global atmospheric angular momentum. *J Atmos Sci*, 1996, 53(19): 2852-2857.
- [37] Paek H, Huang H P. Centennial Trend and Decadal-to-Interdecadal Variability of Atmospheric Angular Momentum in CMIP3 and CMIP5 Simulations. *J Climate*, 2013, 26(11): 3846-3864.
- [38] del Rio R A, Gambis D, Salstein D. Interdecadal oscillations in Atmospheric Angular Momentum variations. *Journal of Geodetic Science*, 2012, 2(1): 42-52.
- [39] Yang P, Shi W J, Xiao Z N, et al. Spatial and temporal variation of atmospheric angular momentum and its relation to the earth length of day. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 28: 150-161.
- [40] Dickey J O, Ghil M, Marcus S L. Extratropical aspects of the 40-50 day oscillation in length-of-day and atmospheric angular momentum. *J Geophys Res*, 1991, 96(22): 643-658.
- [41] Marcus S L, Ghil M, Dickey J O. The extratropical 40-day oscillation in the UCLA general circulation model, II, Spatial structure. *J Atmos Sci*, 1996, 53: 1993-2014.
- [42] Anderson J D, Rosen R D. The latitude-height structure of 40-50 day variations in atmospheric angular momentum. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 1584-1591.
- [43] Madden R A. Relationships between changes in the length of day and the 40- to 50-day oscillation in the tropics. *J Geophys Res*, 1987, 92: 8391-8399.
- [44] Weickmann K M, Khalsa S J S, Eischeid J. The atmospheric angular momentum cycle during the tropical Madden-Julian oscillation. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 2252-2263.
- [45] Gutzler D S, Ponte R M. Exchange of momentum among atmosphere, ocean, and solid earth associated with the Madden-Julian oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D11): 18679-18686.
- [46] Rosen R D, Salstein D A. Variations in atmospheric angular momentum on global and regional scales and the length of day. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C9): 5451-5470.
- [47] 彭公炳. 大气热力状况在地球自转速度季节变化中的作用. *天体物理学报*, 1983, 39(4): 303-311.
- [48] 郑大伟, 罗时芳, 宋国玄. 地球自转年际变化、El Niño事件和大气角动量. *中国科学(B 辑)*, 1988(3): 332-337.
- [49] 周永宏, 郑大伟, 廖新浩. 地球日长变化, 大气角动量和 ENSO: 1997-1998 厄尔尼诺和 1998-1999 拉尼娜信号. *测绘学报*, 2001, 30(4): 288-292.
- [50] Gross R S. Earth rotation variations-long period. *Treatise on Geophysics*, 2007, 3: 239-294.
- [51] 杨虎, 刘玉光, 张晓琳, 等. 地球自转速度变化的分解及其与 ENSO 的关系. *海洋环境科学*, 2013, 3(32): 424-427.

会议信息

- ◆ 卫星土壤湿度验证和应用学术会 (Satellite soil moisture validation & application workshop), 2014年7月10—11日, 阿姆斯特丹, 荷兰 (http://www.hydrology-amsterdam.nl/SoilMoistureWS_Adam14/Home.html)
- ◆ 第7届全球能量和水循环国际科学大会 (The 7th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle), 2014年7月14—17日, 海牙, 荷兰 (<http://gewex.org/2014conf/info.html>)
- ◆ 第7届青年学者地学会议 (VII GeoSymposium of Young Researchers), 2014年9月17—19日, 日维茨, 波兰 (<http://geosymp.wnoz.us.edu.pl/index.html>)
- ◆ EUMETSAT 气象卫星年会 (The annual EUMETSAT Meteorological Satellite Conference), 2014年9月22—26日, 日内瓦, 瑞士 (https://www.eumetsat.int/website/home/News/ConferencesandEvents/DAT_2076129.html)
- ◆ 气候研究和天基地球观测: 决策所需的气候信息 (Climate Research and Earth Observations from Space: Climate Information for Decision Making), 2014年10月13—17日, 达姆施塔特, 德国 (<https://www.eumetsat.int/>)
- ◆ 测高技术前沿 (New frontiers of altimetry), 2014年10月27—31日, 康斯坦茨湖, 德国 (<http://www.ostst-altimetry-2014.com/>)
- ◆ 第3届国际 ENSO 会议 (III International Conference on ENSO), 2014年11月12—14日, 瓜亚基尔, 厄瓜多尔 (<http://www.ciifen-int.org>)
- ◆ 第2届国际海洋研究大会 (2nd International Ocean Research Conference), 2014年11月17—21日, 巴塞罗那, 西班牙 (<http://www.iocunesco-oneplanetoneocean.fnob.org/>)
- ◆ 第7届 IPWG 会议 (7th IPWG Workshop), 2014年11月17—21日, 筑波, 日本 (<http://www.isac.cnr.it/~ipwg/meetings/tsukuba-2014/Tsukuba2014.html>)
- ◆ 联合国降低灾害风险世界大会 (UN World Conference on Disaster Risk Reduction), 2015年3月14—18日, 仙台, 日本 (<http://www.wcdrr.org/>)

基于地球自转变化和时变重力场研究全球气候变化

闫昊明

(中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077)

摘要: 全球气候变化引起大气、海洋、陆地水、冰川等地表流体质量在地球表面的重新分布, 并引起地球自转变化和地球重力场变化。通过空间大地测量技术, 可以高精度获取地球自转变化数据和地球重力场时变数据, 反演地表流体质量在全球和区域的变化情况, 揭示地表流体质量变化与全球气候变化的关系。地球自转变化也和厄尔尼诺、北大西洋涛动等气候涛动密切相关, 并与地表流体质量的长期变化相关。因此, 利用地球自转变化和时变重力场变化观测数据, 可以更好地研究全球气候变化。

关键词: 地球自转变化, 时变重力场, 气候变化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.003

Global Climate Change Detected from Earth's Rotation and Time-Variable Gravity Field

Yan Haoming

(State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077)

Abstract: The geophysical fluids, such as the atmosphere, the ocean, the land-water and the ice-sheet etc. are constantly changing on the Earth's surface, under the condition of global climate change. These geophysical fluid changes cause the variations of the Earth's rotation and the Earth's gravity field. Using the space-geodesy techniques, we can acquire high precision variation data of the Earth's rotation and the Earth's gravity field, and then invert the geophysical fluid changes in the Earth's surface to explore the relationship between either the Earth's rotation or the Earth's gravity fields and the global climate change. Otherwise, the Earth's rotation variations are correlated with the climate oscillation, such as El Niño, North Atlantic Oscillation, and also correlated with the long-term change of geophysical fluid changes on the Earth's surface. Thus, observing variation data from the Earth's rotation and the Earth's gravity fields, will help us have a deeper understanding of the global climate change.

Keywords: Earth's rotation, time-variable gravity field, global climate change

1 引言

近年来, 全球气温升高、极端气候灾害频发、臭氧层破坏、南极和格陵兰岛冰川融化、山岳冰川冻土变化等全球气候变化现象, 引起了科学界和社会界的极大关注。全球气候变化自20世纪80年代作为一个科学问题已然出现, 目前更是成为影响当今世界发展的重大问题。在全球气候变化中, 全球气候变暖是目前最迫切的问题。

引起气候系统变化的原因有多种, 概括起来可分成自然气候变化与人类活动影响两大类。前者包括太

阳辐射的变化、地球轨道变化、火山爆发等; 后者包括人类燃烧化石燃料以及毁林引起的大气中温室气体浓度的增加, 硫化物气溶胶浓度的变化, 陆面覆盖和土地利用变化等。

气候系统所有的能量基本上来自太阳, 所以太阳能量输出的变化被认为是导致气候变化的原因之一, 也可以说太阳辐射的变化是引起气候系统变化的外因。在非常长的时间周期上, 引起太阳辐射变化的主要原因是地球轨道的变化, 也被称为米兰科维奇周期 (Milankovitch cycles), 主要包括椭圆形地球轨道的偏心率 (长轴与短轴之比)、地球自转轴相对于地球轨道的倾角变化以及地球轨道的进动变化。这3种地球轨道变化引起太阳辐射变化, 导致地球气候变化, 并被第四纪冰川时期的岩芯观测数据 (约50万年) 所

收稿日期: 2013年11月20日; 修回日期: 2014年4月3日
第一作者: 闫昊明 (1974—), Email: yhm@whigg.ac.cn
资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB957802);
国家自然科学基金资助项目(41174065, 41374087)

记录。因地球轨道偏心率的变化,出现了以10万年为周期的冰期变化,其对整个气候变化的影响可以占到50%;地球自转轴和轨道平面的夹角在 $22.1^{\circ}\sim 24.5^{\circ}$ 间(目前此值为 23.44° ,并在不断减小)来回变化,产生了一个41000年的周期,其对整个气候变化的影响可以占到25%;而地球轨道的进动,产生了周期约为21000年的变化,其对整个气候变化的影响可以占到10%^[1]。另一个影响气候变化的自然因素是火山爆发。火山爆发之后,向高空喷放出大量硫化物气溶胶和尘埃,可以到达平流层高度,它们可以显著反射太阳辐射,从而使其下层的大气冷却,进而影响气候变化。此外,人类活动引起的全球气候变化进程加速,主要体现在二氧化碳的排放上,并引起全球变暖。全球变暖的最直接表现就是南极和格陵兰岛甚至北极的冰川迅速融化,从而引起全球海平面上升。

由于近几十年的全球气候变暖是目前全球气候变化的主要特征,也是我们主要关注的问题,其时间尺度主要从季节尺度到年际和十年际尺度。全球变暖主要影响固体地球上面的大气圈、海洋圈和冰雪圈等,引起地球各圈层之间的相互作用,从而造成全球地表流体质量的重新分布,以及全球地表流体速度场的变化,譬如风速改变、洋流改变等(图1)。近地表流体质量的运移和分布既受全球动力过程的驱动,同时也具备反馈作用,可以用来监测和研究全球变暖,如海平面上升、陆地冰川和极地冰盖冰雪融化、大范围的干旱和洪灾等气候变化。对近地表流体质量的运移和分布的深入了解,在区域尺度有助于饮用水、农业用水和工业用水等水资源的规划,保护沿海经济发达地区的财产安全等,具有重要的社会、经济意义。

从科学角度看,在地球这个系统中,地球各圈层的动力学过程和耦合过程是以角动量交换的模式进行的,大气、海洋、陆地水和冰雪圈的角动量变化将引起固体地球自转的变化,反之亦然。这既是一个典型的守恒系统,也是一个相互激发和反馈的系统。因此,当前的全球气候变化在较短的时间尺度上(亚季节到十年际尺度)也是与地球自转变化密切相关的。同时,由于地球各圈层的质量会在角动量交换的过程中重新分布,而全球质量重新分布将引起地球重力场的变化,因此全球气候变化也与地球重力场变化密切相关(图1)。

对全球气候变化的研究,除了传统的遥感卫星、地面观测等方式,在空间大地测量领域,则有多种空间观测技术,如GPS、卫星激光测距(SLR)、卫星集成的多普勒定轨和无线电定位系统(DORIS)、

甚长基线干涉测量(VLBI)等,其中最引人注目的是2002年发射的“重力恢复和气候实验”(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)卫星。GRACE卫星通过观测两颗相距220km的共轨卫星直接的距离变化和加速度变化,反推地球的重力场变化,并进而可以转化为地表流体质量的变化情况,从而实现了对大尺度陆地水质量变化的监测^[2]。从GRACE发射到目前的十多年时间内,借助其全球首次监测地球质量变化的手段,使得我们对全球水循环有了更加深刻的理解,并成功监测到格陵兰岛、南极、北极以及山岳冰川的时变特征,为深入理解全球海平面变化、全球水资源变化,乃至全球气候变化,提供了独特的空间技术手段(图1)。

地球自转变化,时变重力场变化与全球气候变化紧密相关。为此,本文主要介绍了利用空间大地测量手段观测到的地球自转变化及时变重力场变化与全球气候变化之间关系的相关研究成果。

2 地球自转变化与气候变化

地球自转变化在地固坐标系中的变化可用3个分量来描述。前两个是极移分量,主要描述地球自转轴瞬时北极相对平均极轴在地球表面位置的变化,X轴指向格林威治子午线方向,Y轴指向西经 90° 子午线方向;另外一个分量是地球自转速率变化,即日长变化。

对地球自转变化的研究从19世纪开始兴起,到目前已有一百多年的历史。地球自转变化的研究从一开始就与气候变化和技术革命紧密相关。首先是20世纪70—80年代,新的观测技术,如SLR、GPS、VLBI等

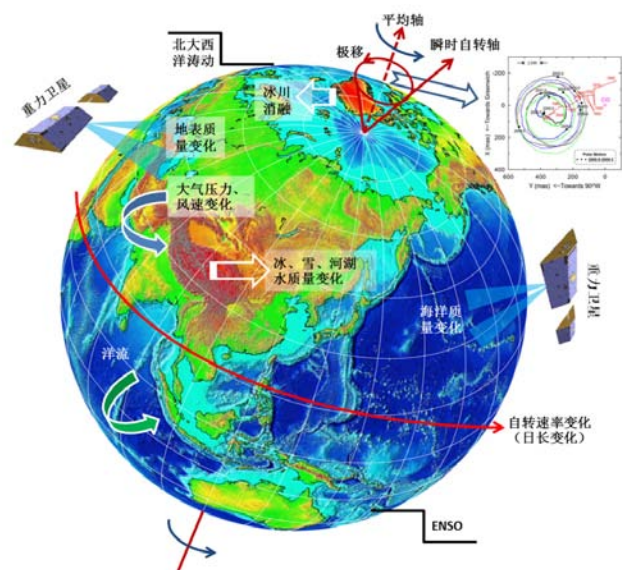


图1 全球地表质量变化与地球自转、时变重力场和气候涛动示意图

能够以cm级的精度测定地球自转和局部运动（目前已经达到了mm级精度），使得地球自转参数的观测精度达到了空前高度。这也促使我们思考，到底是什么引起了地球自转变化？在不考虑潮汐影响的前提下，最初的答案认为地球自转变化主要是全球大气变化的结果，其他诸如海洋、陆地水、地震、火山爆发等激发源也被列入，但限于当时的科技和观测水平，只有大气变化对地球自转变化的影响得到了很好的研究和认同^[3]。随着科技的进步，尤其是气候模式的不断进步和空间大地测量观测技术的不断创新，目前已经知道，在亚季节到年际尺度上，大气、海洋、陆地水和冰川消融等气候变化是引起地球自转变化的主要因素。高精度的地球自转参数变化可以很好地反映出全球的大气、海洋、冰川、陆地水等运动结果，因而可以对这些气候环流模式给出整体约束，并促进大气科学、海洋科学、水文学、冰川学以及全球气候变化的研究^[4]。

2.1 极移变化与气候变化

地表流体质量的变化（质量在地球表面重新分布）和风速、洋流变化等，都可以导致极移变化。引起极移变化的主要因素是地表流体质量的重新分布。地球上不同区域的流体质量变化，引起极移不同分量的变化。例如，经度 0° 和 180° 区域的质量重新分布（主要对应于海洋区域的质量重新分布）主要引起极移 X 分量的变化；而经度为 90° 和 270° 处的质量重新分布（主要对应于陆地区域的质量重新分布）主要引起极移 Y 分量的变化^[4]。一个例子是，随着近年来格陵兰岛和南极冰川融化的加速（接近 0° 或 180° 区域），2005年开始，极移的长期漂移从 70°W 方向（接近于 $-Y$ 方向）明显转向了 X 方向^[5]。通过应用GRACE数据进行详尽分析显示，极移的这种变化与冰川消融直接联系，因此，极移观测可以为今后更准确地解释早期气候变化（此期间，缺乏全球气候变化的实际观测数据）提供可能。

极移变化主要包括周年项和（Chandler）项（约14个月周期），此外还包括长期极移、年际极移、十年尺度的极移和亚季节快速极移等。周年极移主要是由于大气、海洋、陆地水和冰川的运动和质量再分布的季节性变化所激发的受迫运动；Chandler极移是地球的一种自由摆动，受到地球内外阻尼与激发因子交织在一起的复杂相互作用，它的激发源目前还不清楚^[6-7]；极移的长期变化可能来自第四纪冰川期后的冰后回弹^[8]，也与气候快速变化相关^[5]；对于极移中是否存在十年尺度的波动，目前还存在争议，如果存在的

话，其激发源可能与全球陆地水的储量变化有关（由于目前陆地水的全球观测数据只有GRACE观测的大尺度数据，时长较短，只有10年左右，因此还不能很好地确定极移的十年尺度波动）；年际极移是指几年尺度上的地极运动，主要有准两年分量和4~6年的周期分量，在大气角动量中不能准确解释极移中存在的年际变化；20世纪80年代末、90年代初高精度的极移资料中发现的亚季节快速变化，大部分是大气压变化和风激发的结果，部分为海潮的影响^[9-11]。

极移变化还与气候涛动存在联系，其中最可能相关的气候涛动是北大西洋涛动。北大西洋涛动与地极运动激发序列存在着非准周期性的年际波动和十年尺度的起伏，北大西洋涛动可能是地极运动年际和十年尺度上的一种新的激发源^[12-14]。最新研究显示，由GRACE观测的全球地表质量变化在2008年和2010年出现反相，在亚欧大陆上呈现明显的南北振荡，这一振荡无疑受到了北大西洋涛动的影响，也明显对极移产生影响。关于气候涛动与极移变化之间的关系，还需要进一步的深入研究和探讨。

2.2 日长变化与气候变化

日长变化即地球自转速率的变化。日长变化有极宽的频谱，包括从几小时到地质年代时间尺度的变化^[3, 15]。目前，观测日长的精度达到了 $20\mu\text{s}/\text{d}$ （等价于 $3.6\mu\text{s}/\text{月}$ ）。天文观测中通常以相对标准日长 86400s 的日长偏差来表示日长变化。古生物化石生长周期、古天象观测记载（日食、月食、掩星）、近代光学天文观测以及现代空间天文观测（VLBI、SLR、GPS等）资料表明，地球自转速率是不均匀的，存在长期减速变化（日长变长）、规则性变化和不规则性变化等多种周期成分^[3, 16]。主要包括：

（1）海潮、固体潮和大气潮汐都会引起地球角动量的变化，从而引起地球自转速率的变化，最重要的是半日潮和周日潮以及长期潮^[17]。

（2）在地球自转速率变化及大气角动量的频谱中，都存在有近50天的准周期震荡，其振幅变化不定，最大时可以达到几个ms。对地球自转速率的小波分析表明，除了近50天的周期外，在120天、75天周期附近也有频谱变化分量^[18]。气象学研究表明，地面上许多气象现象存在这种周期变化，其动力学原因仍有争论。

（3）地球自转速率的周年和半年变化，主要是由地球中纬度高空急流的变化引起的。这种高空急流的方向由西向东，与地球自转方向一致，冬季12月和1月时风速达到最大，可达 $100\text{m}/\text{s}$ 。夏季7月和

8月风速最小,此外同温层高空风的变化还有准两年震荡现象^[19]。

(4) 地球自转的年际变化主要与各种气候涛动现象,如ENSO、准两年振荡(QBO),存在比较密切的关系^[20-23]。ENSO和QBO的时变过程对日长年际变化激发具有综合效应,二者可以解释绝大部分的日长年际变化。其中,ENSO对日长年际变化的贡献较强一些,ENSO和QBO是地球自转速率年际变化的主要激发源。20世纪以来的ENSO和地极运动的相干谱研究表明,它们在不同频段上的相关性都不够显著。所以,尽管ENSO对地球自转速率的年际变化具有相当强的贡献,但是它对地极运动的影响要弱得多。近年的研究还表明,大气角动量与ENSO存在明显相关性。在厄尔尼诺出现前,往往先在中高纬度出现大气角动量增大,然后逐渐向赤道发展。

(5) 地球自转长期变化的主要原因有潮汐摩擦、冰后回弹、核幔耦合、环境和海面变化以及板块运动等^[3, 16, 19, 24]。地球自转速率不规则变化的最典型表现是其十年尺度波动现象和日长的长期变化。

日月潮汐引起的日长增加为2.3ms/cy,而从近三千年的古气象(日食、月食和行星交会等)观测记录分析表明,日长约以1.7ms/cy的速率在增加。潮汐摩擦的结果与古气象等观测结果存在0.6ms/cy的差别,这个差别应该源于非潮汐现象,且最大可能是冰川均衡调整(GIA)的影响^[8]。根据最新SLR得到的地球2阶带谐重力场系数可以预估到冰川均衡调整对日长变化的影响为-0.45ms/cy,这一数值使得长期地球自转速率的变化得以大部分很好的解释^[8]。

应用地球自转变化数据研究气候变化的好处是,其从1846年开始就有观测数据,且1980年以后达到了非常高的观测精度,至今已有近200年的历史记录。此外,关于日月食的古代记录、深海钻探获取的岩芯数据等则更加长久,从而使得我们可以研究古气候以及近代比较长时间内的气候变化。但应用地球自转变化数据研究气候变化也存在明显不足,即地球自转变化表征的是地球总的气候变化对固体地球的影响,不能给出全球各个区域气候变化的结果。这一情况在21世纪出现转机,全球高精度高时空分辨率时变重力场的出现,在一定程度上弥补了这一不足。

3 时变重力场变化与气候变化

重力卫星可以检测到全球和区域的重力场时变特征,而这些时变特征是由于地球表面和地球内部的质量变化直接引起的。所以,通过卫星时变重力场反演,就可以获取地球表面和地球内部物质的迁移,直

接获取地球区域和整体质量变化信息,从而定量研究地表流体质量变化等对气候变化的影响。这是有别于传统成像遥感的非成像手段,具有不可替代性。

国际上第一个时变重力卫星GRACE在2002年的成功运行,为定量获取全球高精度时变重力场提供了有效技术手段。目前,国际上3大卫星重力数据处理核心机构(GFZ、JPL和CSR)利用GRACE观测数据发布了完全阶次为120或60、时间分辨率约1个月(或10天)的时变重力场模型序列。GRACE时变重力场已被广泛应用于全球及局部水文循环、冰川质量变化及全球海平面变化等科学问题的研究。目前利用GRACE时变重力场模型反演质量迁移,已经成功地应用在了大尺度丰水流域的陆地水处理变化研究和比对上,如密西西比河区域地下水储量变化结果与该区域58口地下水测井观测数据十分吻合^[25];中国长江流域的水储量变化,与目前全球水文模型GLDAS和CPC计算结果均吻合^[26];在中国典型区域,华北京津冀地区、青藏高原区域、三峡库区、青川甘交界区域以及新疆阿尔金山自然保护区,重力卫星观测的中长空间尺度陆地水储量变化趋势与GLDAS水文模式结果相一致^[27-28]。卫星重力观测,还更多的被应用于南北两极及格陵兰岛冰盖变化的研究,如Chen等^[29]利用7年GRACE数据研究南极地区冰盖消融速率,发现南极部分冰盖存在明显加速消融,与InSAR研究结果一致;杨元德等^[30]利用GRGS提供的10天间隔数据采用位系数法估算了2002年4月—2009年4月南极地区冰盖质量变化,结果表明南极地区的质量变化主要由西南极质量变化引起,并发现南极冰盖可能存在加速消融趋势等。

值得注意的是,直接由卫星重力观测数据,譬如说GRACE的LEVEL 1B数据来解算时变重力场的时候,必须考虑地球潮汐等对卫星轨道的影响。也就是说,要想解算出准确的陆地水变化,必须把时变重力场中的地球潮汐信号首先去除。时变重力场中的潮汐信号,是由于日月等天体的引潮力引起地球内部质量分布发生变化,导致地球引力位的改变,进而对围绕地球运转的卫星轨道产生摄动,最终影响时变重力场。地球的潮汐信号主要为固体潮、海潮和大气潮。研究表明,海潮对时变重力场的影响比固体潮要小5~10倍,而大气潮影响比海潮还要小100倍^[31]。因此,在GRACE卫星数据的处理中,只采用了固体潮和海潮改正,忽略了大气潮汐的影响。对于固体潮改正,一般采用IERS给出的弹性地球的标准固体潮模型^[32-35];对于海洋潮汐,一般也是采用固定的海洋潮汐模型来扣除其影响^[32-35]。地球潮汐信号主要集中在

周日和半日周期上,目前很多模型也考虑了半年和周年潮汐的影响。

在GRACE数据处理中,还需要考虑极移变化引起的极潮。极潮是由于地球瞬时旋转轴相对于平均轴有微小变化,从而引起地球的离心力位产生变化,进而引起固体地球和海洋等对其响应,称为极潮^[36]。极潮对应于球谐二阶展开系数,因此,只对二阶球谐系数有显著影响;对其他球谐系数的影响,可以忽略不计^[33]。对于固体地球极潮来讲,其引起的固体地球最大的垂直形变为25mm,水平形变为7mm;对于海洋极潮来讲,其引起的海洋垂直形变最大为1.8mm,水平形变为0.5mm,只有固体地球极潮的1/10;但这一影响已经可以被现代空间大地测量技术检测到,因此必须考虑^[33, 37]。例如,在GRACE数据初期处理时,只考虑了固体地球极潮,而没有考虑到海洋极潮的影响,从而引起了2阶球谐系数存在误差,与地球自转观测数据存在差别^[38]。极潮的频段主要是Chandler周期(433天)和周年信号。

通过上述论述可以看到,时变重力场中,不仅仅包含陆地水变化信号,还包括地球潮汐,极潮,大气、海洋乃至地球深内部质量变化的影响。地球深内部质量变化的影响一般为长周期变化,在季节和年际尺度上可以忽略。而大气和海洋的信号与陆地水的信号周期是类似的,目前采用观测和模拟的大气和海洋数据来扣除。只有去除这些已知信号,才能获得准确的陆地水变化信号,进而进行气候变化的相关研究。

对于我国而言,气候变化引起的水资源变化情况,必须非常重视。我国水资源的科学、合理规划与利用,对民生和社会经济发展,也是一个非常紧迫的问题。我国的长江、黄河、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江等河流均发源于被称为亚洲水塔的青藏高原地区。该地区的水资源,滋润着东亚和南亚30亿(约占世界43%)人口。近几十年来,在全球气候变化背景下,青藏高原山岳冰川不断退缩,变化与迁移明显。这一变化除了对全球气候变化的影响外,还对该区域的区域气候、水资源、生态环境产生了重大影响,进而制约我国的经济和社会发展。此外,对于青藏高原区域的多个国家而言,水资源利用更是重中之重。为此,必须对该区域的水资源情况进行详细的观测,并掌握其变迁规律。但该区域自然条件十分恶劣,人工观测等不具备实施条件(或非常难以实施)。因此,这一区域的水资源情况,大部分只能通过空间卫星来观测。遥感卫星很难获取水体质量变化信息,但可以通过先进的空间大地测量观测技术手段,如GRACE时变

重力卫星,高精度动态监测该区域地表流体质量分布和变化,并研究其质量变化和迁移规律,从而建立其与全球变化的响应关系,为我国制定气候变化和水资源利用的长期战略,确保国家的水资源安全、社会和经济可持续发展,提供科学依据。

在科学的意义上,国内外学者普遍认为,青藏区域的能量和水循环过程是全球能量和水循环的主要部分之一,是全球气候变化的重要响应区域,该区域冰水等物质的质量迁移与区域陆地水变化及地壳运动和变形、地震活动、气候变化等密切相关。因此,定量揭示该区域冰水等物质质量迁移的时空变化特征与地球物理过程,不仅对水资源合理利用、生态环境保护及防灾减灾等具有重要的科学意义和应用价值,而且有助于认识全球气候变化,并有效推动我国全球化、水资源利用领域乃至地球系统科学的发展。

4 结论

本文从空间大地测量学的角度,主要介绍了地球自转变化和时变重力场变化与全球气候变化之间的联系。指出地球自转变化不但可以表征近期从亚季节到年际尺度的全球气候变化特征,对于近200年乃至上万年尺度的气候变化,也有其独特作用。2002年开始的GRACE时变重力卫星监测,第一次以非成像遥感的手段,监测地表流体的质量变化与迁移,尤其是可以监测到地表大尺度的陆地水、冰川消融等近年区域气候变化的重要特征,为研究全球气候变化提供了新的技术手段。

全球气候变化是目前科学界和大众都十分关心的问题,与人类的发展息息相关。只有综合多种科技手段,展开广泛的多学科合作,才可能对这一问题进行更加深入的研究和理解,也才能提出更合理的应对方法。

参考文献

- [1] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 1976, 194: 1121-1132.
- [2] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results. *Geophys Res Lett*, 2004, doi: 10.1029/2004GL019920.
- [3] Lambeck K. The Earth's variable rotation: geophysical caused and consequences. New York: Cambridge Univ Press, 1980.
- [4] 闫昊明. 海洋在地球自转和重力场变化中的作用. 武汉: 中国科学院测地所博士学位论文, 2006.
- [5] Chen J L, Wilson C R, Ries J C, et al. Rapid ice melting drives Earth's pole to the east. *Geophys Res Lett*, 2013, doi: 10.1002/grl.50552.
- [6] Smith M L, Dahlen F A. The period and Q of the Chandler wobble. *Geophys J R astr Soc*, 1981, 64: 223-281.
- [7] Furuya M, Chao B F. Estimation of period and Q of the Chandler wobble. *Geophys J Int*, 1996, 127: 693-702.
- [8] Stephenson F R. Historical eclipses and Earth's rotation. *Astronomy and Geophysics*, 2003, 44: 2.22-2.27.
- [9] Dickman S R. Dynamic ocean-tide effects on Earth's rotation. *Geophys J Int*, 1993, 112: 448-470.

- [10] Chao B F, Ray R D, Gipson J M, et al. Diurnal/semidiurnal polar motion excited by oceanic tidal angular momentum. *J Geophys Res*, 1996, 101: 20,151–20,163.
- [11] Gross R S, Hamdan K H, Boggs D H. Evidence for excitation of polar motion by fortnightly ocean tides. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 1809–1812.
- [12] Zhou Y, Zheng D, Zhao M, et al. Interannual polar motion with relation to the North Atlantic Oscillation. *Global and Planetary Change*, 1998, 18: 79–84.
- [13] Chao B F, Zhou Y H. Meteorological excitation of interannual polar motion by the North Atlantic Oscillation. *J Geodyn*, 1999, 27: 61–73.
- [14] 闫昊明, 钟敏, 朱耀仲, 等. 极移半年振荡的年际变化与北大西洋涛动. *自然科学进展*, 2002, 12: 104–107.
- [15] Hide R, Dickey J O. Earth's variable rotation. *Science*, 1991, 253: 629–637.
- [16] Munck W H, MacDonald G J F. *The rotation of the Earth*. London: Cambridge Univ Press, 1960.
- [17] Dickman S R. Revised predictions of long-period ocean tidal effects on Earth's rotation rate. *J Geophys Res*, 1995, 100: 8233–8243.
- [18] 钟敏, 高布锡. 地球自转极移120天准周期变化的小波分析及其大气激发机制. *天文学报*, 1996, 37: 361–367.
- [19] 高布锡. *天文地球动力学原理*. 北京: 科学出版社, 1997.
- [20] Chao B F. Length-of-day variations caused by El Niño-Southern Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation. *Science*, 1989, 243: 923–925.
- [21] 周永宏. 气象涛动对地球自转变化激发的分析与研究. 上海: 中国科学院上海天文台博士学位论文, 1997.
- [22] 闫昊明, 钟敏, 朱耀仲. 日长季节振荡的振幅变化与南方涛动现象. *测绘学报*, 2000, 29: 103–106.
- [23] Gross R S, Fukumori I, Menemenlis D, et al. Atmospheric and oceanic excitation of length-of-day variations during 1980–2000. *J Geophys Res*, 2004, 109: B01460.
- [24] 吴斌. 日长和地球引力场参数J2的长期和长周期变化. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2003, 28: 83–86.
- [25] Rodell M, Chen J L, Kato H, et al. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *J Hydro*, 2007, 15: 159–166.
- [26] 胡小工, 陈剑利, 周永宏. 利用GRACE空间重力测量监测长江流域水储量的季节性变化. *中国科学D辑*, 2006, 36: 225–232.
- [27] 钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 利用卫星重力观测研究近5年中国陆地水量中空间尺度的变化趋势. *科学通报*, 2009, 54: 1290–1294.
- [28] Feng W, Zhong M, Lemoine J M, et al. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resour Res*, 2013, 49: 2110–2118.
- [29] Chen J L, Wilson C R, Blankenship D D, et al. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nature Geosciences*, 2009, doi:10.1038/NGEO694.
- [30] 杨元德, 鄂株臣, 晁定波. 卫星重力用于南极冰盖物质消融评估. *极地研究*, 2009, 21: 109–115.
- [31] 许厚泽, 等. *固体地球潮汐*. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2010.
- [32] McCarthy D, Petit G. *IERS Conventions 2003*. IERS Technical Note 32.
- [33] *IERS Conventions 2010*. Petit G, Luzum B (eds.). IERS Technical Note 36.
- [34] Bettadpur S. Gravity recovery and climate experiment, UTCSR Level-2 Processing Standards Document For Level-2 Product Release 0004, 2007.
- [35] Christoph D, Flechtner F, Gruber C, et al. GFZ GRACE Level-2 processing standards document for level-2 product release 0005, 2012.
- [36] Wahr J M. Deformation induced by polar motion. *J Geophys Res*, 1985, 90: 9363–9368.
- [37] Desai S D. Observing the pole tide with satellite altimetry. *J Geophys Res*, 2002, 107(C11): 3186.
- [38] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. Low degree gravitational changes from GRACE: Validation and interpretation. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L22607.

新书架

NEW BOOK

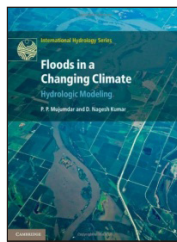
International Hydrology Series
国际水文系列丛书

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



Floods in a Changing Climate:
Extreme Precipitation
《气候变化中的洪水: 极端降水》

编著者: Ramesh S. V. Teagarapu
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012



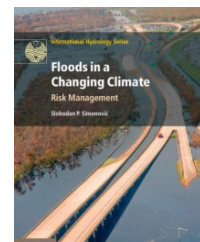
Floods in a Changing Climate:
Hydrologic Modeling
《气候变化中的洪水: 水文模拟》

编著者: P. P. Mujumdar 等
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012



Floods in a Changing Climate:
Inundation Modelling
《气候变化中的洪水: 洪水泛滥模拟》

编著者: Giuliano Di Baldassarre
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012



Floods in a Changing Climate:
Risk Management
《气候变化中的洪水: 风险管理》

编著者: Slobodan P. Simonovic
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2012

简单地球模型的研究进展

王勇^{1,2} 刘苏峡¹ 邵亚平³ 彭公炳^{1,4}

(1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044; 3 德国科隆大学地球物理与气象研究所, 科隆 50923;

4 国际欧亚科学院中国科学中心, 北京 100107)

摘要: 以简单概念性气候模式 (SCMs) 和中等复杂程度的地球系统模式 (EMICs) 为对象, 介绍了简单地球模型的研究进展。在简单地球模型中, 简单概念性气候模式已经成为了解气候理论和气候变化规律的有效工具; 中等复杂程度的地球系统模式涵盖了地球系统的大多数组成部分, 对各部分之间的反馈和过程描述比较详细, 同时计算要求比较低, 使其应用几乎覆盖了简单概念性气候模式以及耦合气候系统模式的所有研究领域。EMICs 必定会有更大的发展, 从而在地球气候模拟中起到更加重要的作用。

关键字: 简单地球模型, 简单概念性气候模式, 地球系统模式 (EMICs)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.004

Progress in Simple Earth Models

Wang Yong^{1,2}, Liu Suxia¹, Shao Yaping³, Peng Gongbing^{1,4}

(1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 3 Institute for Geophysics and Meteorology, University of Cologne, Cologne 50923; 4 China Science Center, International Eurasian Academy of Sciences, Beijing 100107)

Abstract: In this paper, by taking Simple conceptual Climate Models (SCMs) and Earth system Models of Intermediate Complexity (EMICs) as research objects, simple climate models and their application in climate modeling are introduced. Simple conceptual climate models have become effective tools to understand the theory of climate and climate-change law. Earth system Models of Intermediate Complexity (EMICs) cover most of the components in the Earth system, and describe the process and feedback among the various components in more details. Because EMICs have low computational requirements, modeling applications of EMICs cover almost all fields of simple conceptual climate models and CGCMs simulations. EMICs will surely achieve a greater development and play a more important role in the Earth's climate simulation.

Keywords: sample earth model, simple conceptual climate models, EMICs

1 引言

当今的地球, 气候变化无常, 这已为世人瞩目。人们一直不懈地从不同角度去探求其原因, 寻找合适的应对措施。在所有的归因研究方法中, 气候模式和地球系统模式等 (这里统称为地球模型) 是气候变化归因研究的重要工具。

地球模型的共性是在地球系统中的动力、物理、化学和生物过程基础上建立起来的数学方程组 (包括动力学方程组和参数化方案) 来确定其各个部分 (大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈) 的性状, 由此构成地球系统的数学物理模型, 然后用数值的方法

进行求解, 编制成一种大型综合性计算程序, 并通过计算机付诸实现对地球系统复杂行为和过程的模拟与预测的科学工具^[1-2]。

20世纪60年代末, 随着计算机技术的发展, 复杂耦合气候系统模式出现了, 这类模式包括了发展成熟的大气模式、海洋模式、陆面模式、海冰模式等模块, 用以研究包括海洋状况、冰雪过程、土壤温湿等在内的气候系统变化规律, 是目前研究大气、海洋及陆地之间复杂相互作用的主要工具^[1, 3]。这类模式基本出发点在于完善地描述气候系统的各种过程, 模型极其复杂, 计算时间和花费比较大。同时, 根据研究的实际需要, 陆续产生了大量不同种类的模式, 主要有概念模型、能量平衡模式 (EBMs)、辐射对流模式 (RCMs)、统计动力模式 (SDMs) 和地球系统模式 (EMICs) 等。目前, 依据复杂程度的不同, 广

收稿日期: 2013年12月17日; 修回日期: 2014年4月14日
第一作者: 王勇 (1979—), Email: wyong0210@igsnr.ac.cn
资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB957802)

泛得到应用的地球模式可分为3类^[4-5]：（1）简单概念性气候模式（SCMs）；（2）耦合气候系统模式（CGCMs）；（3）复杂程度介于前2类之间的中等复杂程度的地球系统模式（EMICs）。

相对于CGCMs来说，概念模型、能量平衡模式、辐射对流模式和统计动力模式属于SCMs，这些模式对气候系统高度整合，强调气候系统的主要气候特征和物理过程，空间分辨率较低，对计算机要求不高，能进行长尺度的模拟，故在地球模拟研究中得到广泛应用，在研究气候变化成因上发挥了重要的作用。在20世纪90年代末期，中等复杂程度的EMICs发展起来的，涵盖了CGCMs中的大多数过程，不过采用相对CGCMs更加简化的方法来表述，这里把这两类模式统称为简单地球模型。本文以简单概念性气候模式、中等复杂程度的地球系统模式为对象，介绍它们的应用以及存在的不足。

2 简单概念性气候模式简介

简单概念性气候模式中的能量平衡模式最先由前苏联的Budyko提出，美国的Sellers在1969年发表了类似的一维能量平衡模式，计算出的气候要素随纬度的分布与实测值吻合得很好。20世纪70年代是动力气候研究的春天，各种类型的模式相继出现，如辐射对流模式、统计动力模式、概念模型等。下文将对部分简单概念性气候模式进行详细介绍。

2.1 能量平衡模式

2.1.1 零维能量平衡模式

零维模式是最简单的能量平衡模式^[6]，把地球看成空间的一点。若 S 为太阳常数， R 为地球半径，单位时间内地球接受的太阳辐射能为 $\pi R^2 S$ 。因为地球总面积为 $4\pi R^2$ ，单位时间单位面积上的能量接收率为 $S/4$ ，不过由于地球反射，实际得到的能量为 $(1-\alpha)\frac{S}{4}$ ，这里 α 为行星反射率。同时，地球以有效平均温度 T_e 向外辐射能量 σT_e^4 ， σ 为Stefen-Boltzman常数。在全球能量平衡条件下，应有关系式：

$$(1-\alpha)\frac{S}{4} = \sigma T_e^4 \quad (1)$$

公式（1）未考虑大气中的辐射过程，如果考虑大气成分（CO₂和水汽等）不仅吸收辐射能，而且发射长波辐射，使大气气温增加，地球表面的气温 T_s 应该比有效辐射温度高。即：

$$T_s = T_e + \Delta T \quad (2)$$

如果进入大气的辐射和射出大气的辐射量不平衡，那么地球气温将发生变化，变化率 $\partial T_s / \partial t$ 可以表示为：

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{c} \left[(1-\alpha)\frac{S}{4} - \varepsilon \tau_a \sigma T_s^4 \right] \quad (3)$$

式中， c 为地球的比热容， τ_a 为大气红外传输率， ε 为比例参数。

2.1.2 一维能量平衡模式

一维模式不再将地球视为一点，引入地球气候系统的主要差异，即纬度变化特征，某一纬度带（ φ ）能量平衡公式为：

$$S_\varphi [1 - \alpha(T_\varphi)] = R^\uparrow(T_\varphi) + F(T_\varphi) \quad (4)$$

式中， $F(T_\varphi)$ 是附加项， $R^\uparrow(T_\varphi)$ 为射出大气的辐射量， S_φ 和 T_φ 都随纬度变化。显然，一维能量平衡模式是零维能量平衡模式的扩展。

将模式中附件项和射出大气的辐射量经过近似和简化，得到如下公式：

$$T_\varphi = \frac{S_\varphi (1 - \alpha_\varphi) + K_0 \bar{T} - A}{B + K_0} \quad (5)$$

再利用逐次迭代法，计算出各个纬度带的气温。

除了以上两种模式外，还可以引入二维（水平或者经向/垂直）的能量平衡模式，另外，还有盒式能量平衡模式（Box-EBM），Box-EBM将大气作为一层，陆面和海洋混合层为一层，海洋中间层和深海为另外两层，和其他EBM模式相比，Box-EBM强调深海内部的热量过程以及不同深度层上的能量交换。

2.2 辐射对流模式

辐射对流模式^[7]（RCM）把大气简化为一个铅直的大气柱，详细考虑大气柱内的辐射过程，通过对流调整来获取大气的垂直温度分布，是一种考虑时间变化的一维模式，此模式建立在以下两个原理上：

（1）在任何高度上的太阳辐射和长波辐射通量与对流热通量保持平衡；（2）因辐射差异引起的温度垂直分布的不稳定由对流调整而达到平衡。

2.2.1 无对流调整的辐射平衡模式

假定大气气温的垂直分布是由辐射收支决定的，则温度变化方程为：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_r = \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i + \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_s \quad (6)$$

式中，右边第一项、第二项分别代表长波辐射和短波辐射引起的温度变化。

2.2.2 有对流调整的辐射平衡模式

基本假定：（a）在大气层顶，净入射短波辐射等于射出长波辐射；（b）大气的净辐射冷却作用等于大气长波辐射与短波辐射之差；（c）温度垂直递减率小于规定值时，气层维持局地辐射平衡；（d）当气温直减率大于规定值 ε 时，对气温分布进行调整，以达到规定值。

模式方程为:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_n = \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_r + \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_a \quad (7)$$

式中, 右边第二项为对流调整项, 当不考虑对流调整时该项为零。在对流层质量守恒条件下有:

$$\frac{C_p}{g} \int_{p_i}^{p_h} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_n dp = \frac{C_p}{g} \int_{p_i}^{p_h} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_r dp \quad (8)$$

在地表面应满足热量平衡方程, 即:

$$\frac{C_p}{g} \int_{p_i}^{p_h} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_n dp = \frac{C_p}{g} \int_{p_i}^{p_h} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_r dp + [S_n - F_s] \quad (9)$$

同时可定义各层的短波辐射加热率和长波辐射冷却率分别为:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_s = \frac{g}{C_p} \frac{\Delta S}{\Delta p} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i = \frac{g}{C_p} \frac{\Delta S}{\Delta p} \quad (11)$$

方程的迭代求解:

$$T^{(n+1)} = T^{(n)} + \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_n^{(n)} \Delta t \quad (12)$$

当 $|T^{(n+1)} - T^{(n)}| \leq \varepsilon$ 迭代结束, 得到垂直温度廓线。

2.3 统计动力模式

将大气沿着纬度圈进行平均, 用纬度和高度组成的网格点来表示大气, 就构成了纬向平均动力模式 (ZADM), 该模式包括基本的动力和物理过程, 是介于二维大气模式和三维大气模式之间, 连接二维和三维模式的桥梁, 因此这类模式在气候模拟的研究中起着重要的作用。纬向平均模式的主要困难是涡旋输送的参数化。由于涡旋输送的处理是建立在统计近似的基础上, 所以这类模式也常称为统计动力模式^[6]。

一般是对运动方程中的涡旋输送量进行参数化, 基于经向温度梯度可以驱动大气斜压波的概念, 将涡旋热通量写成:

$$\langle v'T' \rangle = -K_r \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial y} \quad (13)$$

把涡旋动量通量写成:

$$\langle u'v' \rangle = -K_m \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} \quad (14)$$

式中, K_r 和 K_m 分别为热量和动量传输系数, 可以视为常数或为温度梯度的函数, 纬向平均量用 $\langle \rangle$ 表示。涡旋输送的重要性实际上在于通过涡旋热通量和涡旋动量通量将大气积蓄的斜压和正压不能稳定能量释放出来, 这必然对大气环流和气候变化发生重要的作用。

2.4 各模式之间的关系

通过图1来表示简化气候模式间及其与CGCMs之间的关系, 图中三角锥的3条边代表模式的3个基本要

素, 即辐射、地面过程和动力学。垂直方向表示模式的复杂程度, 越接近锥体顶端表示复杂程度越大。当到达顶端时, 模式已有了足够的分辨率, 所有因素都被正确而合理地考虑到模式里去了, 达到一个逼真的气候模式。在锥体的底部是最简单的气候模式, 它仅仅考虑一个主要的过程。同时, 锥体底部被认为是空心的, 因为在锥体的各边之间基本上没有相互作用。沿着金字塔越往上, 各主要过程之间的相互作用越大。

3 简单概念性气候模式的应用现状

简单概念性气候模式在气候模拟研究中应用广泛, 在研究气候变化成因上发挥了重要的作用。从第一、二次IPCC报告十几个气候模式参加评估, 到第三次报告34个模式被引用, 再到第四次和第五次评估报告更多模式被采用, IPCC历次报告所引用模式的数量在不断增加, 其中, 简单气候模式 (SCM) 一直未缺席 (IPCC第四次和第五次报告采用EBMs简单气候模式的结果)。利用简单气候模式能够估测由于热膨胀导致的全球平均温度的变化和海平面的上升, 此类模式以一套全球或者半球框的形式代表海洋一大气系统, 进而利用能量平衡方程预测全球地表温度, 能够与地球生物化学圈简化模式耦合, 而可以快速估测气候对各种气候情景的响应^[9-10]。Gilliland^[11]用零维能量平衡模式, 考虑在太阳辐射变化、温室气体以及火山气溶胶强迫情况下, 得出太阳活动变化、CO₂变化可以解释北半球气候变化中低频变化的93%左右。Schlesinger等^[12]也用类似的模式模拟得到温室气体、太阳活动和平流气溶胶三者可以解释1886—1985年全球气温变化的60%。毕鸣等^[13]用海气耦合的能量平衡模式研究了130年来全球气温的变化, 考虑温室气体、太阳活动、火山活动及ENSO的情况下, 模拟结

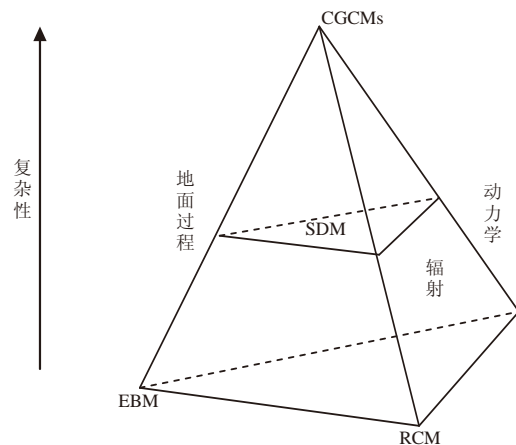


图1 气候模式的三角锥^[8]
(EBM: 能量平衡模式; RCM: 对流辐射模式; SDM: 统计动力模式; CGCMs: 耦合气候系统模式)

果与观测序列的相关系数达0.884,可解释77.8%的温度变化。Crowley^[14]利用EBM开展的研究指出,太阳辐射和火山活动可以解释工业化以前北半球气温低频变化的41%~64%,20世纪变暖主要来自温室气体的增加,自然变率的贡献只占25%。Zhao等^[15]用一维能量平衡模式研究下垫面改变对降水和温度造成的影响,取得一定的成功。王绍武等^[16]利用简化的能量平衡模式,综合考虑太阳、火山、温室气体的辐射效应,发现EBM能够较好模拟近千年的全球平均气温序列,能够成功再现中世纪暖期、小冰期和20世纪变暖等特征。Bertrand等^[17]利用二维纬向平均模式所开展的研究,同样表明太阳和火山活动可以解释小冰期和中世纪暖期,而20世纪后期的加速变暖,则只有温室气体可以解释;1850年以后气温的合理模拟,还需要考虑人为硫酸盐气溶胶强迫和森林采伐的影响。刘玉芝等^[18]利用一维辐射对流气候模式,详细研究了云量、云光学厚度以及云高等要素的变化对大气顶和地面太阳短波辐射和红外长波辐射通量以及云的辐射强迫的影响。丁仲礼等^[19]就晚更新世东亚古季风变化方面建立起一个概念模型,模型考虑了太阳辐射变化、中高纬、青藏高原、边缘海以及热带海洋等因素,得出东亚古季风主要由全球冰量通过极地冰盖扩张、边缘海变化以及青藏高原冰川作用3个过程来影响的,太阳辐射变化的直接控制作用相对较小,较合理地解释了黄土所记录的古季风变化特征。

从上述模拟来看,简单概念性气候模式涵盖了主要气候特征和主要物理过程,如热力动力过程、辐射对流过程或关键反馈过程等,同时模式对计算机要求很低,能够进行长时间的模拟试验。不过,简单概念性气候模式通常采用纬向平均,最多二维,只能反映大区域的一个平均过程,空间分辨率不高。随着当前气候变化动力机制逐渐明确、考虑更多的物理过程的情况下,这种模式存在一定的局限性,体现在难以给出气候变化的高分辨率空间特征,同时还不包含气候系统内部变率过程。如果仅考虑“简单”背景下的研究,其研究结果具有一定的借鉴意义。

4 中等复杂程度的地球系统模式简介

中等复杂程度的地球系统模式(EMICs)于20世纪90年代末期建立,它一般具有二维(两个水平维向或垂直和一个水平维向)空间分辨率,能够描述包括人类和自然相互作用的自然地球系统,EMICs涵盖了CGCMs中的大多数过程,不过采用相对CGCMs更加简化的方法去表述,与CGCMs模拟的分辨率也有差别。EMICs的复杂程度介于简单概念性气候模式和

CGCMs模式之间,整合化程度没有简单概念性气候模式高,但比CGCMs要高,所包含的过程和描述较CGCMs更加简化,过程比简单概念性气候模式要多,细节描述也较之更加丰富,兼顾了简单概念性气候模式和CGCMs的部分优点(图2)。不难看出,相对于CGCMs模式,EMICs也是一种简化气候模式。

EMICs中的大气模块主要采用的是能量水汽平衡模式、准地转模式、统计动力学模式和大气环流模式。大气模块的分辨率通常比较低,大多采用纬向平均和能量水汽平衡模式。由表1可见,EMICs在大气模块构成和简化程度方面存在明显的差异,根据这种差异,模式可以分为两类:一类是基于CGCMs进行大气或者海洋过程的简化,使其总体的复杂程度较高,对气候过程及反馈描述比较完善,对气候过程描述比较细腻,如德国汉堡大学Planet Simulator模式^[21-22];而另一类基于低分辨率且大量参数化的模式,这类EMICs在更长时间尺度(千年范围乃至冰期间冰期循环)气候变化的研究中有重要作用,如CLIMBER-2的大气模块是二维统计动力学模式。从模式的复杂程度上看,前者更像是简化了的CGCMs,而后者则更接近于简单概念性气候模式。综述所述,从整体上简化了EMICs的复杂程度,降低了对计算能力的要求,有助于在古气候资料的强迫下模拟出不同于今天的长尺度古气候状态,充分显示出了EMICs模式的优点;但EMICs的分辨率比较粗糙,对地球系统细节的描述也相当简化,因而模拟无法达到CGCMs的高度。

5 中等复杂程度的地球系统模式的应用现状

当前EMICs在气候研究中得到广泛的应用,虽然其对气候系统的描绘不如CGCMs细致,但是EMICs具有与简单概念性模式相当的计算效率,所以EMICs主要注重长期气候模拟,以足够的细节来刻画地球系统的长期演化。

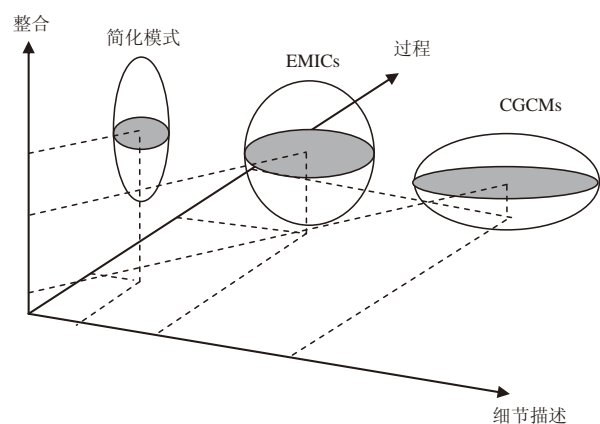


图2 EMICs的图解定义^[20]

表1 主要EMICs及相关介绍^[5]

模式名称	大气组件模式	研究机构
MoBiDiC	纬向平均准地转模式	比利时Georges Lemaitre天文与地球物理研究所
MIT IGSM	2D统计一动力	美国麻省理工学院
Bern 2.5D	纬向平均、能量水气平衡	瑞士伯尔尼大学
Bremen	能量平衡	德国Bremen大学海洋环境科学中心
Climber-2	统计一动力	德国波茨坦气候影响研究所
ECBilt-CLIO	准地转谱模式	荷兰大气研究所
C-Goldstein	简单能量水气平衡	英国南安普敦国家海洋中心
IAP RAS	3D大尺度动力	俄罗斯科学院大气物理Obukhov研究所
ISAM-2	能量水气平衡	美国伊利诺斯大学大气科学系
Planet Simulator	三角切断谱模式	德国汉堡大学气象学院
PUMA	三角切断谱模式	德国汉堡大学气象学院
MPM-2	能量水气平衡	加拿大McGill大学大气和海洋科学系
UVic	能量水气平衡	加拿大维多利亚大学
GENIE	3D谱/2D能量水气平衡	英国布里斯托大学/东英格兰大学等
LLN 2-D	纬向平均准地转模式	比利时鲁汶大学

目前,国际古气候模拟比较计划(PMIP)已经历了PMIP1(1991—2001年)和PMIP2(2002—2007年)两个阶段,并正在开展第三阶段PMIP3(2008年至今)的研究。PMIP3阶段致力于利用地球系统模式对末次盛冰期和中全新世(距今最近的、最有代表性的寒冷和温暖的气候状态)的气候进行模拟。在古气候模拟的研究方面,产生了不少研究成果。Gallce等^[23]和Berger等^[24]的研究表明,气候模式LLN-2D在变化的太阳辐射强迫下,当指定的常量CO₂浓度低于220×10⁻⁶后,能够重现观测到的冰期—间冰期循环;而固定轨道参数,让CO₂依据Vostok重建记录变化,则LLN-2D无法再现冰期—间冰期循环^[25]。EMICs对冰期的开始和结束也进行了各种试验,Yoshimori等^[26]利用Uvic模式进行了末次冰期结束对轨道参数和CO₂强迫的敏感性试验,Meissner等^[27]使用UVic研究了植被对末次冰期开始的作用,Kageyama等^[28]使用CLIMBER-2探讨了末次冰期的开始特别是各种不同冰川的反馈作用。Wang等^[29]使用MPM-2对冰期气候突变和D-O震荡的机制进行了深入探讨,发现北大西洋经向翻转流(AMOC)状态的快速转换导致冰期气候突变,这一突变被海冰面积的扩张进一步强化。

另外,对历史、当今、未来气候模拟的应用研究,在IPCC AR4中,EMIC已较前几次评估报告被更多人使用并得到深入的评估,在海平面上升归因分析上,利用一个低分辨率CGCM和数个以气候敏感性最佳估计值3℃为基础的EMICs进行推估,得出海平面上升的促成因素是海洋热膨胀,并对未来进行了预估^[9]。在2013年出版的IPCC AR5中,EMICs在古气候模拟、未来气候预估等方面发挥了重要的作用^[10]。Loutre等^[30]使用LLN-2D对下次冰期的开始也进行了

探讨,研究了未来的气候及其对不同CO₂情景的敏感性,发现目前的气候很可能经历较长的间冰期(大约5万年),而在未来的6万年和10万年将可能出现较小和较大的冰期。Bertrand等^[31]和Bauer等^[32]分别使用MoBiDiC和CLIMBER-2对过去1000年的各种气候强迫年进行了评估,与高分辨率的重建数据进行比较,发现火山和太阳辐射作为自然强迫,是工业革命时期以前的主要气候强迫,能够很好地解释中世纪暖期和小冰期。但自然强迫不足以

产生近代以来的全球变暖,人类活动排放的温室气体是造成全球变暖的主要强迫,而且研究表明所有的气候强迫对模拟过去千年气候变化都是重要的。Petoukhov等^[33]对目前气候和CO₂加倍模拟的EMICs进行比较,充分显示EMICs对目前气候的模拟非常接近观测结果,而且EMICs模拟误差均在CGCMs误差的范围之内。Wang等^[34]和Marsh等^[35]分别使用MPM-2和GENIE对温盐环流进行研究,发现温盐环流这个洋流系统最少有两种稳定的气候状态,其中一种是目前所出现的,即环流非常强劲和向极地方向传输大量热能,从而带来温暖气候的状态;另一种则是环流非常微弱,甚至接近于停止的状态,从而带来寒冷的气候状态。数值模拟试验还显示,这两种状态之间是可能出现相互转化的。另外,利用EMICs对陆地、海洋、全球碳循环等多个方面的问题也进行了探讨。

结合当前EMICs的应用和发展,可见EMICs应用范围很广,模拟能力很强,未来如在下面几个方面取得突破,必定会有更大的发展,从而在地球系统模拟中起到更加重要的作用:(1)加入人类活动、考虑固体地球过程和太阳活动的影响,使EMICs成为真正意义上的地球模式;(2)注重气候突变机理的研究,区分自然和人为因素在突变中的相对贡献;(3)改进模式算法,提高硬件设备的运算能力,使其耗费更少的计算时间,能够进行更长时间尺度上的模拟研究。

6 结论

本文介绍了以简单概念性气候模式(SCMs)和中等复杂程度的地球系统模式(EMICs)为代表的简单地球模型,它们在气候模拟方面都有不凡表现。简单概念性气候模式将对气候变化的研究拓展到了古气

候领域, 已经成为了解气候理论和气候变化规律的有效工具。EMICs涵盖了地球系统的大多数组成部分, 对各部分之间的反馈和过程描述比较详细, 同时计算要求比较低, 使其应用几乎覆盖了SCMs以及耦合气候系统模式(CGCMs)的所有研究领域。EMICs必定会有更大的发展, 从而在地球气候模拟中起到更加重要的作用。

EMICs也有其自身的缺点, 分辨率比较低, 对地球系统细节的描述也相当的简化, 尚不能达到CGCMs的高度。但是, EMICs能够刻画出气候变化的大体特征, 更能进行CGCMs在目前计算条件下无法比拟的长期气候变化模拟。2005年, 德国汉堡大学完成了Planet Simulator模式, 此模式属于典型的EMICs模式, 由全球大气环流模式、海洋—海冰模块和陆地土壤—生物圈模块组成, 以并行计算机为硬件支撑, 支持地球和类地球行星的气候动力学数值试验, 同时还具备结构简单、可视化界面和开放源代码便于改造等特点, 依托此模式使改进模式、模拟长尺度的古气候和开展敏感性试验成为了可能。

EMICs从出现到发展到今天不过短短的十几年, 尚处于发展的初始阶段, 随着计算机硬件水平的提高、模式的不断改进和对气候系统认识的不断加深, 在未来的几十年或者更长的时期内, 对气候时间尺度(千年甚至更长)的气候变化的研究, EMICs很可能依然是比较理想的选择。今后一段时间, 如何利用EMICs就一些重要驱动因子(如天文和地球因子)进行敏感性试验, 如何采用混沌理论研究其非线性问题^[36], 如何改进对重点区域和重点过程的模拟, 将是气候数值模拟领域面临的重要课题。

参考文献

- [1] 王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869.
- [2] 《10000个科学难题》地球科学编委会. 10000个科学难题·地球科学卷. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 周天军, 王在志, 宇如聪, 等. 基于LASG/IAP大气环流谱模式的气候系统模式. 气象学报, 2005, 63(5): 702-715.
- [4] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: the scientific basis. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2001.
- [5] 张冉, 李力, 郭庆春, 等. 古气候研究中气候模式的发展与应用. 干旱区研究, 2007, 24(5): 704-711.
- [6] 李崇银. 气候动力学引论(第二版). 北京: 气象出版社, 2000.
- [7] 于革. 古气候动力模拟. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [8] 曹鸿兴. 气候模式与气候模拟. 气象, 1987, 13(11): 3-6.
- [9] IPCC. IPCC fourth assessment report (AR4). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [10] IPCC. IPCC fifth assessment report (AR5). Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [11] Gilliland R L. Solar, volcanic and CO₂ forcing of recent climatic changes. Climate Change, 1982, 4: 11-13.
- [12] Schlesinger M E, Ramalakutty N. Implication for global warming of intercycle solar irradiance variations. Nature, 1992, 360: 330-333.
- [13] 毕鸣, 王绍武, 李晓东. 130年来全球气温变化的模拟. 第四纪研究, 1997(1): 21-27.
- [14] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years. Science, 2000, 289: 270-277.
- [15] Zhao M, Zeng X. A theoretical analysis on the local climate change induced by the change of landuse. Adv Atm Sci, 2002, 19: 45-63.
- [16] 王绍武, 谢志辉, 蔡静宁, 等. 近千年全球平均气温变化的研究. 自然科学进展, 2002, 12(11): 1145-1149.
- [17] Bertrand C, Loutre M F, Crucifix M, et al. Climate of the last millennium: a sensitivity study. Tellus, 2002, 54A: 221-244.
- [18] 刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 一维辐射对流模式对云—辐射强迫的数值模拟研究. 大气科学, 2007, 21(3): 486-493.
- [19] 丁仲礼, 刘东生. 晚更新世东亚古季风变化动力机制的概念模型. 科学通报, 1998, 43(2): 122-132.
- [20] Claussen M. Earth system models // Ehlers E, Krafit T, eds. Understanding the Earth system: compartments, processes and interactions. Heidelberg, Berlin, New York: Springer, 2000.
- [21] Fraedrich K, Jansen H, Kirk E, et al. The planet simulator: Green planet and desert world. Meteorologische Zeitschrift, 2005, 14(3): 305-314.
- [22] Fraedrich K, Jansen H, Kirk E, et al. The planet simulator: towards a user friendly model. Meteorologische Zeitschrift, 2005, 14(3): 299-304.
- [23] Gallee H, Ypersele J P, Fichefet T, et al. Simulation of the last glacial cycle by a coupled, sectorially averaged climate-ice sheet model II. Response to insolation and CO₂ variation. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(15): 713-715.
- [24] Berger A, Loutre M F, Gallee H. Sensitivity of the LLN climate model to the astronomical and CO₂ forcings over the last 200kyr. Climate Dynamics, 1998, 14: 615-629.
- [25] Loutre M F, Berger A. No glacial-interglacial cycle in the ice volume simulated under a constant astronomical forcing and a variable CO₂. Geophysical Research Letters, 2000, 27(6): 783-786.
- [26] Yoshimori M, Weaver A J, Marshall J, et al. Glacial terminations: sensitivity to orbital and CO₂ forcing in a coupled climate system model. Climate Dynamics, 2001, 17: 571-588.
- [27] Meissner K J, Weaver A J, Matthews H D, et al. The role of land surface dynamics in glacial inception: a study with the Uvic Earth System Model. Climate Dynamics, 2003, 21: 515-537.
- [28] Kageyama M, Charbit S, Ritz C, et al. Quantifying ice-sheet feedbacks during the last glacial inception. Geophysical Research Letters, 2004, 31, L24203, doi: 10.1029/2004GL021339.
- [29] Wang Z, Mysak L A. Glacial abrupt climate changes and Dansgaard-Oeschger oscillations in a coupled climate model. Paleoclimatology, 2006, 21: PA2001.
- [30] Loutre M F, Berger A. Future climatic changes: Are we entering an exceptionally long Interglacial. Climatic Change, 2000, 46: 61-90.
- [31] Bertrand C, Loutre M F, Crucifix M, et al. Climate of the last millennium: a sensitivity study. Tellus, 2002, 54A: 221-244.
- [32] Bauer E, Claussen M, Brovkin V. Assessing climate forcings of the Earth system for the past millennium. Geophysical Research Letters, 2003, 30(6): 1276-1280.
- [33] Petoukhov V, Claussen M, Berger A, et al. EMIC intercomparison project (EMIP-CO₂): Comparative analysis of EMIC simulations of current climate and equilibrium and transient responses to atmospheric CO₂ doubling. Climate Dynamics, 2005, 25: 363-385.
- [34] Wang Z. Two climatic states and feedbacks on thermohaline circulation in an Earth system model of intermediate complexity. Climate Dynamics, 2005, 25: 299-314.
- [35] Marsh R, Yool A, Lenton T M, et al. Bistability of the thermohaline circulation identified through comprehensive 2-parameter sweeps of an efficient climate model. Climate Dynamics, 2004, 23: 761-777.
- [36] Shao Y, Peng G, Leslie L M. The environmental dynamic system // Peng G, Leslie LM, Shao Y. Environmental modelling and prediction. Berlin: Springer-Verlag, 2002.

全球山脉力矩时空变化及其与地球自转的关系

朱琳¹ 黄玫² 巩贺³ 李悦悦² 刘苏峡²

(1 国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 山脉力矩是大气轴向角动量变化的主要外部因子之一, 是研究地球运动和大气相互作用的关键变量。利用NCEP/NCAR第一套再分析资料计算了1948—2011年的全球山脉力矩, 定量分析了全球山脉力矩的时空变化趋势及其与地球自转速率(以日长表示)的关系。研究表明, 近64年山脉力矩变化最为显著的地区集中在青藏高原和南美的安第斯山脉, 青藏高原东西两侧的山脉力矩具有不同的变化趋势。滞后相关分析显示, 全球山脉力矩与日长的相关系数在日长滞后5年时达到最大(滞后相关系数为-0.482), 而南美安第斯山和青藏高原的山脉力矩则分别于日长滞后2年和9年时达到最大(滞后相关系数分别为-0.461和-0.689), 因此山脉力矩的变化早于日长变化。从年代际变化看, 全球积分的山脉力矩和南亚高压强度指数趋势上基本一致, 可以作为表征天气、气候变化的一个强信号。

关键词: 山脉力矩, 日长, 时空变化, 地球自转, 变化趋势

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.005

Spatial and Temporal Variations of Global Mountain Torque and Relations to Earth's Rotation

Zhu Lin¹, Huang Mei², Gong He³, Li Yueyue², Liu Suxia²

(1 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

3 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: Mountain torque is an important external factor influencing the dynamics of axial atmospheric angular momentum and it also plays a major role in the interaction between the Earth and the atmosphere. Using the data from NCEP/NCAR reanalysis I, the daily global mountain torque during the period from 1948 to 2011 is calculated. Spatial and temporal variations of mountain torque and its relations to variations of earth rotation rate (denoted as length of day, LOD) are further discussed. It is shown that Tibetan Plateau located in East Asia and the Andes located in South America are two main areas with significant mountain torque change during the past 64 years. Mountain torque at east and south sides of Tibetan Plateau has different trends. Moreover, mountain torque and LOD are lag correlated. Maximal correlation occurred respectively when global mountain torque leads LOD five years ($R=-0.482$), Andes Mountain torque leads LOD two years ($R=-0.461$) and Tibetan Plateau mountain torque leads LOD nine years ($R=-0.689$), suggesting that mountain torque forces LOD anomalies. On a decadal scale, global mountain torque has a similar trend with intensity index of South Asian High, indicating that mountain torque can be a very useful signal for climate change.

Keywords: mountain torque, length of day, spatial-temporal variation, Earth's rotation, long-term trend

1 引言

山脉力矩(mountain torque, MT)是指在地球起伏表面的东西两侧, 由于地表面气压不同而产生的转动力矩^[1-2]。山脉力矩是深入研究地球自转和大气之间的相互作用过程的关键参数之一^[1, 3-5]。在不考虑月亮和太阳等对地球一大气系统产生的外部力矩的情况

下, 地球和大气系统总体角动量守恒^[6]。地球和大气之间通过山脉力矩和摩擦力矩作用进行角动量交换, 从而对地球自转速度和大气环流产生深远影响(重力波力矩的量级相对较小, 可以忽略)^[7-8]。

早在20世纪40年代, 气象学家就开始关注地球自转变化对气候的影响, 但研究结果受观测资料精度的限制, 存在很大的不确定性^[8]。20世纪80年代后, NCEP/NCAR用同化后的全球气象资料重新归算得到了精度和分辨率更高的全球大气角动量数据, 进一步推动了大气角动量和日长变化的研究。大量的观测和统计分析表明, 全球大气的相对角动量在天、月、年

收稿日期: 2013年11月29日; 修回日期: 2014年4月10日

第一作者: 朱琳(1978—), Email: zhulin@cma.gov.cn

通信作者: 黄玫(1968—), Email: huangm@igsrr.ac.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB957802)

以及年代际时间尺度上都发生了大量变化。同时也有明确证据表明, 固体地球的角动量在日和年的尺度上对大气相对角动量的变化具有较好的补偿关系^[6, 9-11], 这一过程主要通过大气和固体地球之间轴向角动量的交换完成^[4]。

然而, 仅从统计分析的角度难以理解地球和大气的相互作用过程和机理。山脉力矩和摩擦力矩作为地球和大气交换角动量的主要作用力, 越来越受到研究者的关注。Ponte等^[12]的研究表明, 大气角动量在1982—1983年El Niño事件时达到正的极端峰值, 这一异常主要与北美和欧洲持续的总的山脉力矩作用有关。随后, 受负的摩擦力矩作用, 大气角动量逐渐衰退至正常值。Viron等^[13]研究表明, 在1989年La Niña事件鼎盛时期, 全球轴向大气角动量达到年代际尺度的最小值。大气角动量的这一异常变化主要是北美、南美和欧洲山脉力矩异常引起的^[8, 14-15]。以上研究空间区域小(局部地区)且时间尺度短(天气尺度), 同时研究对象仅限于力矩和大气角动量的关系, 针对长时间序列山脉力矩的时空变化和日长关系的研究比较少。

为了进一步研究山脉力矩的时空变化规律及其与地球自转速率的关系, 本文利用NCEP/NCAR第一套再分析资料计算了1948—2011年全球山脉力矩, 重点分析了山脉力矩的时空变化特征及其与日长的关系。本研究可为从机理上分析地球自转速度变化和大气相互作用过程及相应的气候模拟提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 使用的数据

采用NCEP第一套再分析资料T62模式输出的6h时间分辨率的地表面压力自然对数的第一光谱系数和地形高度数据转化成高斯格点数据, 计算全球山脉力矩。计算出的全球山脉力矩时间分辨率是1d, 空间分辨率是192×94高斯格点, 时间跨度为1948—2011年。

2.2 山脉力矩的计算及验证

全球积分形式的山脉力矩可用以下形式计算^[1]:

$$T_M = -a^2 \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} P_{sfc} \frac{\partial h}{\partial \lambda} \cos \varphi d\varphi d\lambda \quad (1)$$

式中, a 为地球半径, P_{sfc} 为地表面气压, h 为地形高度, λ 为经度, φ 为纬度。

为了验证计算的正确性, 将本文计算的1958—2012年月平均的全球山脉力矩积分结果和NOAA地球系统研究实验室(Earth System Research Laboratory)公布的山脉力矩的结果^[10]进行了对比。由图1a和1b对

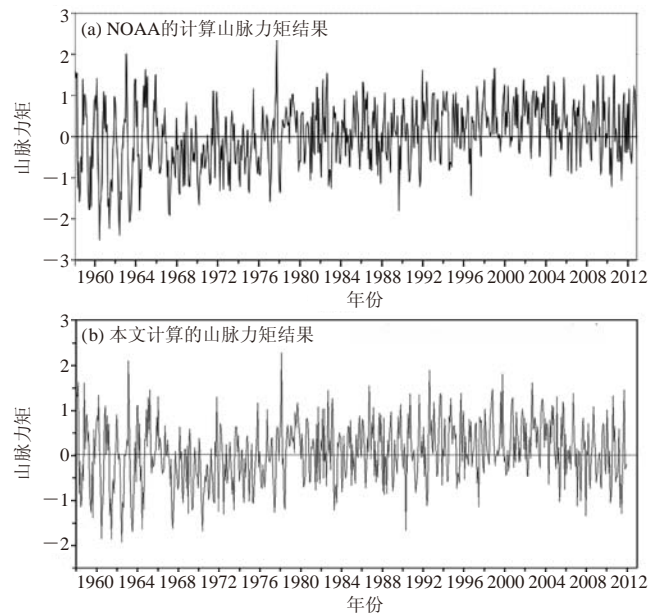


图1 NOAA计算的全球山脉力矩与本文计算的全球山脉力矩结果的对比(单位: $10^{19} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

比可见, 本文的计算结果和NOAA公布的山脉力矩在对应的时间内量级和变化趋势一致, 说明计算结果是可信的。

2.3 变化趋势分析

通过线性拟合方法($y=ax+b$)分析各个力矩的变化趋势, 即:

$$a = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right]}{\left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]} \quad (2)$$

其中, n 代表年数, 等于64, x_i 代表年份(1, 2, 3, ..., 64), y_i 为第 i 年的力矩大小。当 a 大于0时, 表示力矩呈上升趋势, 如果小于0, 则呈下降趋势。

3 研究结果

3.1 全球山脉力矩变化趋势

从空间分布看(图2), 山脉力矩的变化趋势存在明显的空间差异。山脉力矩变化最为显著的地区集中在欧亚大陆的中南部和南美洲安第斯山脉, 其中以青藏高原区域变化最为剧烈。在喜马拉雅山脉的西南侧, 山脉力矩呈现明显的降低趋势, 每年减少 $4 \times 10^{15} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 以上; 而在喜马拉雅山东部和北部局部, 山脉力矩呈现增加趋势, 部分地区每年增加的幅度大于 $6 \times 10^{15} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。青藏高原东西两侧的山脉力矩变化具有相反的趋势, 对全球积分的山脉力矩的贡献具有一定的相互抵消作用。山脉力矩在安第斯山脉中部局部呈现一定的上升趋势, 但较喜马拉雅山脉附近变化趋势较小。全球其他地区变化趋势不明显。

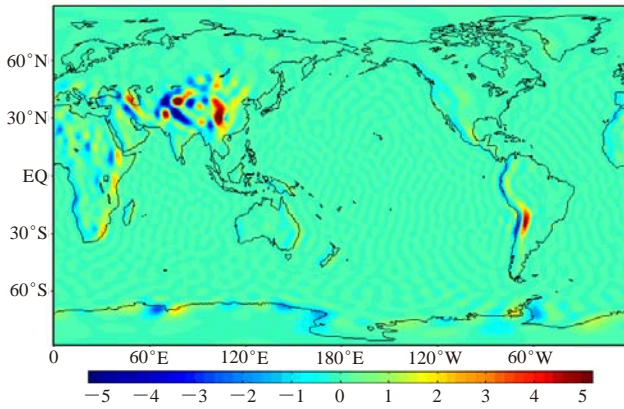


图2 NCEP第一套再分析资料计算出的1948—2011年全球山脉力矩变化趋势 (单位: $10^{15}\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)

3.2 山脉力矩的变化与日长的关系

从时间序列的变化上看, 年平均的全球山脉力矩 (图3中蓝线所示) 与日长具有相反的变化趋势, 即在日长达到峰值时, 对应山脉力矩达到低谷 (图3中红色圆圈标记区域表现最为明显), 峰值分别出现在1972年和2003年前后, 但两者之间存在一定的滞后效应。

为了进一步探讨全球不同区域山脉力矩变化和日长的关系, 选取山脉力矩变化最为剧烈的亚洲青藏高原东西两侧和南美安第斯山脉, 分区域统计了山脉力矩和日长的滞后相关关系 (图4)。

全球山脉力矩和日长在滞后0年的相关系数为-0.208, 随着日长滞后时间的增加, 负相关系数不断增加, 日长在滞后全球山脉力矩5年时两者达到最大负相关 (-0.482)。日长在超前全球山脉力矩时, 相关系数较低, 但超前5年以后相关系数变为正, 超前11年时二者达到最大正相关0.319 (图4a)。

青藏高原区域山脉力矩与日长的相关在滞后0年时为0.308, 日长在滞后9年和超前6年时达到极大值,

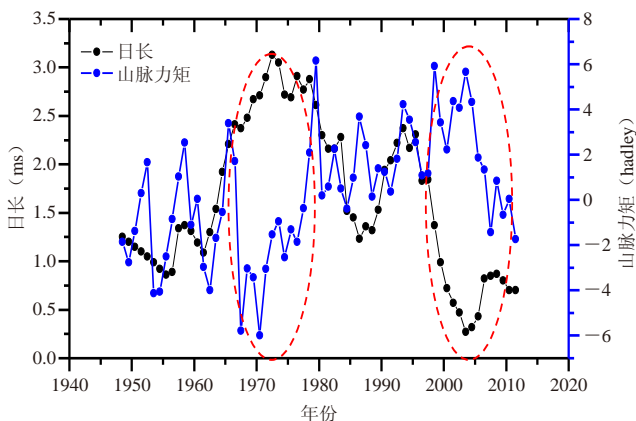


图3 日长与近65年山脉力矩的年际变化特征

分别为-0.461和0.433 (图4b)。由于青藏高原东西两部分山脉力矩的变化趋势完全相反 (图2), 因此将青藏高原分为东、西两部分考虑山脉力矩与日长的关系。研究发现, 青藏高原东、西两部分山脉力矩与日长的关系完全相反, 在日长滞后9年时, 青藏高原东西两侧山脉力矩和日长达到最大相关, 相关系数分别为-0.689和0.625 (图4c-d)。东部山脉力矩与日长的关系与整个青藏高原山脉力矩与日长的关系较为一致 (图4b-c)。

南美洲安第斯山脉附近的山脉力矩与日长的相关以负相关为主, 在日长滞后南美山脉力矩0年时为-0.413, 滞后2年时达到最大相关值-0.443 (图4f)。北美洲的洛基山脉对日长的响应较弱, 滞后相关系数普遍较低 (图4e)。

从全球山脉力矩变化剧烈区域的山脉力矩与日长的相关分析来看, 日长滞后于山脉力矩时的相关系数绝对值高于日长超前山脉力矩。说明山脉力矩在一定程度上驱动日长变化。

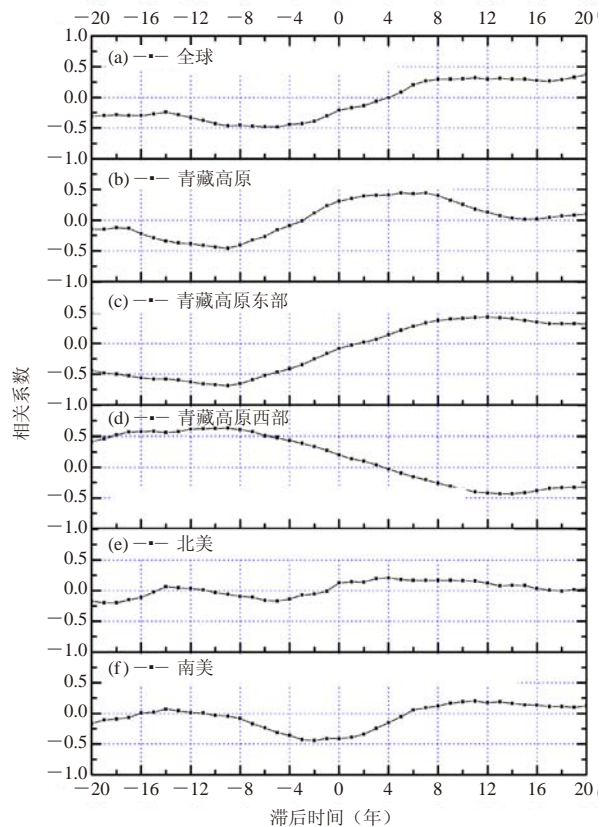


图4 日长与近65年山脉力矩的滞后相关 (其中, 青藏高原的空间范围: $26^{\circ}\text{--}39.8^{\circ}\text{N}$, $73.3^{\circ}\text{--}104.8^{\circ}\text{E}$; 青藏高原东部的空间范围: $99.4^{\circ}\text{--}112.5^{\circ}\text{E}$, $24.9^{\circ}\text{--}44^{\circ}\text{N}$; 青藏高原西部的空间范围: $63.8^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{E}$, $24.9^{\circ}\text{--}47.9^{\circ}\text{N}$; 北美的空间范围: $52.5^{\circ}\text{--}166.9^{\circ}\text{W}$, $11.5^{\circ}\text{--}72.8^{\circ}\text{N}$; 南美的空间范围: $58.1^{\circ}\text{--}73.1^{\circ}\text{W}$, $11.49^{\circ}\text{--}34.47^{\circ}\text{S}$)

3.3 山脉力矩、日长的变化与南亚高压的关系

由图3可见,全球山脉力矩与日长同时具有明显的年际和年代际变化趋势。山脉力矩作为地球和大气之间轴向角动量变化的主要驱动力,必然对年代际大气环流产生深远影响,是天气、气候变化的一个强信号。由图5可以发现,全球积分的山脉力矩和南亚高压强度指数^[17]在年代际变化趋势上基本一致,相关系数达到0.84。在20世纪60年代中期,山脉力矩超前南亚高压达到低谷;到20世纪90年代,南亚高压的变化又超前于山脉力矩的变化。上述山脉力矩和南亚高压的年代际变化表现了大气和地球之间不同的相互作用。

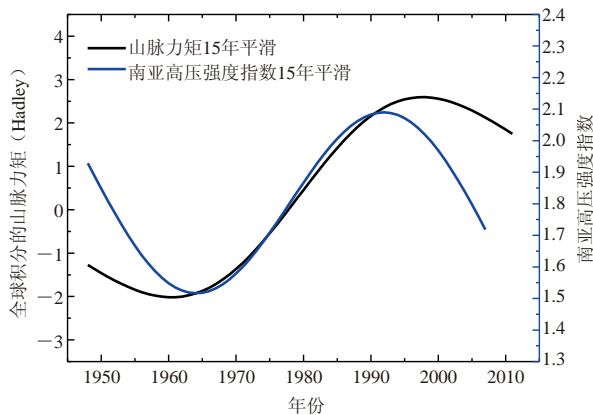


图5 全球山脉力矩与南亚高压强度指数的年代际变化趋势

4 结论

山脉力矩是地球和大气交换角动量的重要途径之一。本文利用NCEP/NCAR第一套再分析资料计算了近64年来的全球山脉力矩,定量分析了山脉力矩的时空变化趋势及其与日长的关系,得出以下结论:

(1) 近64年全球山脉力矩变化最显著的地区是欧亚大陆的中南部和南美洲安第斯山脉,其中以青藏高原区域变化最为剧烈。青藏高原东西两侧的山脉力矩变化具有相反的趋势。在喜马拉雅山脉的西南侧,山脉力矩以每年 $4 \times 10^{15} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的速度减少,而在喜马拉雅山东部和北部区域,山脉力矩则以每年 $6 \times 10^{15} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的速度增加。

(2) 全球山脉力矩与日长的相关系数在日长滞后山脉力矩5年时达到最大,且二者为负相关。青藏高原、南美洲安第斯山的山脉力矩分别在日长滞后9年和2年时达到最大负相关。青藏高原西侧山脉力矩与日长的关系与全球其余地区都不一致,在日长滞后9年时达到最大正相关,其原因还有待进一步研究。

(3) 全球积分的山脉力矩和南亚高压强度指数在年代际变化趋势上基本一致,表明山脉力矩年代际变化对大气环流产生深远影响,可以作为天气、气候变化的一个强信号。

致谢:感谢欧亚科学研究院中国科学中心彭公炳院士对本文给予的诸多有益指导和建议;感谢NOAA的Klaus M. Weickmann教授和中国气象科学研究院王亚非研究员提供山脉力矩计算程序,并对计算给予帮助;感谢审稿专家对本文提出的建设性意见和建议。

参考文献

- [1] Weickmann K M, Sardeshmukh P D. The atmospheric angular momentum cycle associated with a Madden-Julian oscillation. *J Atmos Sci*, 1994, 51(21): 3194-3208.
- [2] Driscoll S. The Earth's atmospheric angular momentum budget and its representation in reanalysis observation datasets and climate models. MS thesis of University of Reading, 2010.
- [3] White R M. The role of mountains in the angular-momentum balance of the atmosphere. *J Meteor*, 1949, 6(5): 353-355.
- [4] Wahr J M, Oort A H. Friction- and mountain-torque estimates from global atmospheric data. *J Atmos Sci*, 1984, 41: 190-204.
- [5] Weickmann K M. Mountains, the Global Frictional Torque, and the Circulation over the Pacific-North American Region. *Monthly Weather Review*, 2003, 131: 2608-2622.
- [6] Oort A H. Angular momentum cycle in the atmosphere-ocean-solid earth system. *Bulletin American Meteorological Society*, 1989, 70: 1231-1242.
- [7] De Viron O, Bizouard C, Salstein D, et al. Atmospheric torque on the earth and comparison with atmospheric angular momentum variations. *J Geophys Res*, 1999, 104(B3): 4861-4875.
- [8] Rosen R D. The axial momentum balance of Earth and its fluid envelope. *Surv Geophys*, 1993, 14: 1-29.
- [9] Starr V P. An essay on the general circulation of the Earth's atmosphere. *J Meteor*, 1948, 5: 39-43.
- [10] Munk W H, Miller R. L. Variations in the Earth's angular velocity resulting from fluctuations in atmospheric and oceanic circulation. *Tellus*, 1950, 2: 93-101.
- [11] 周永宏, 郑大伟. 日长年际变化、El Niño南方涛动和大气准两年振荡的小波分析. *天文学报*, 1997, 38: 209-214.
- [12] Ponte P R, Rosen R D. Torques Responsible for Evolution of Atmospheric Angular Momentum during the 1982-83 El Niño. *Journal of the Atmospheric Science*, 1999, 56: 3457-3462.
- [13] Viron O, Marcus S L, Dickey J O. Atmospheric torques during the winter of 1989: Impact of ENSO and NA O positive phases. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(10): 1985-1988.
- [14] Hide R, Dickey J. The earth's variable rotation. *Science*, 1991, 253: 629-637.
- [15] Oort A H, Bowman H D. A study of the mountain torque and its interannual variations in the Northern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31: 1974-1982.
- [16] Global Monthly Mountain torque, distributed by NOAA Earth System Research Laboratory, http://www.esrl.noaa.gov/psd/map/images/reanalysis/total_fields/taum.total.58-curr.reanal.gif.
- [17] 南亚高压强度指数数据,源自南京大气资料服务中心, <http://nadsc.nuist.edu.cn/zhshxz.php>.

中国近百年地面温度变化自然因子的因果链分析

朱玉祥¹ 赵亮²

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 61741部队, 北京 100094)

摘要: 采用格兰杰 (Granger) 因果检验法, 从自然因素的角度, 即从天文因子 (太阳黑子数SSN) 和地球运动因子 (地极移动X方向和Y方向) 的角度, 对我国近百年地面温度 (TC) 的变化进行了归因分析。所得结果如下: 滞后1~11年内, SSN都不是TC的Granger原因; 对于TC和极移X方向, 当滞后6年时信度最高, 此时极移X方向是TC的Granger原因 (87%信度)。研究结果可能暗示, 极移X方向的变化可能会导致6年后中国地面气温的变化。

关键词: 天文因子, 地球运动因子, 气候变化归因, 中国地面温度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.006

The Causal Chain Analysis of Natural Factors for China Surface Temperature Variation during the Recent 100 Years

Zhu Yuxiang¹, Zhao Liang²

(1 China Meteorological Administration (CMA) Training Center, Beijing 100081
2 61741 Troops of PLA, Beijing 100094)

Abstract: The attribution analysis of China surface temperature(TC) in the recent 100 years is done from the angle of the astronomical factor(sunspot number, SSN) and the earth movement factor(polar shift x direction and y direction) by using Granger causality test. The results are as follows: (1) SSN is not the Granger cause of TC in all of 1 to 11 years lags; (2) when the lag is 6 years, confidence is the highest, at this time polar shift x direction is the Granger cause of TC (87% confidence); (3) when the lag is 12 years, TC is the Granger cause of the polar shift y direction, the confidence is 86%. The research results of the paper suggest that the change of polar shift x direction possibly results in the change of TC, and the change of TC possibly influences the change of the polar shift y direction.

Keywords: astronomical factor, earth movement factor, the attribution of climate change, China surface temperature

1 引言

气候变化归因是以某种程度的显著性水平, 建立有关因子变量与气候变量之间的因果关系的过程^[1]。在气候变化归因研究中最受关注的气候变量是温度, 特别是地面温度。近百年来全球气候变暖是一个不争的事实, 但有研究称近十几年全球气候变暖趋势明显减缓^[2-5]。IPCC第五次评估报告第一工作组科学报告^[6]称, 近10多年观测的平均温度落在气候模拟5%~95%包络线之下, 并称1998年以来气候变暖减缓的原因可以被近几年的低太阳活动、气候内部变率和模式响应误差的联合作用来解释。我国的温度变化既有与全球地面温度相一致的部分, 也有其自身特点, 因此, 有

必要重点对我国近百年气温变化原因进行研究。

近年来, 关于气候变化检测和归因的研究有了很大进展。从数学原理上发展了检测、归因技术, 还发展了针对气候系统特点的检测方法, 以期寻找气候变化的指纹。这些检测、归因技术大致可分为多元分析和贝叶斯推断两大类, 前者包括回归法、模态相关法等, 后者因能容纳不同来源的资料而受到重视, 两类方法各有优缺点^[7-8]。当用这两类方法做检测归因分析时, 需同时使用观测资料和数值模拟资料。由于没有足够长的受温室气体影响的观测资料来估算气候变量以及数值模拟的不确定性, 检测归因的结果常引发争议。而且这两类方法在对两个变量进行分析时并没有同时考虑其自身变化。

天文和地球运动因子是影响气候系统的基本因素。太阳作为离地球最近的恒星, 向地球提供着光和热, 是地球气候系统最基本的能量源, 其长期 (万年以上) 变化对地球气候的形成和演变有着重要影响, 这已达成广泛共识, 但在百年和十年这样相对较短的

收稿日期: 2013年11月25日; 修回日期: 2014年4月3日

第一作者: 朱玉祥 (1976—), Email: zhuyx@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB957804);

国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406020);

国家自然科学基金资助项目(41305131, 41375105)

时间尺度上,对气候的影响,尤其是对近100年来温度的影响和贡献,却存在较大争议^[9]。地球运动因子通过地球轨道的变化和摄动、地球自转速率变化、地极移动(简称极移)、地磁变化和火山活动等多种方式也会对气候变化产生影响。由于地球轨道参数的变化比较缓慢,一般被视为不变的因子,但如果处于其长时间尺度周期变化的临界点,则有可能在百年尺度、甚至年代际尺度上对气候产生显著影响。地极移动的年际变化也不大,但极移变形力势转换成单位质点的动能,其值可能远远超过单位质量大气的动能^[10]。地转速度的变化通过与大气和海洋的角动量交换可以影响天气气候,有研究表明地球自转与大范围地区大气活动中心、降水、气温、厄尔尼诺事件有密切联系^[11-15]。

过去的研究一般认为,天文与地球运动因子在一个非常长的时间尺度上才可能发生明显变化并且影响气候。因此在考虑近百年来全球气候急剧变暖的过程和归因时,一般把这些自然因子的影响作为一个小量不予考虑^[16-18]。然而,最近的一些研究表明,天文与地球运动因子对目前全球气温和降水有重要影响,不能忽略^[19-20],其变化有可能通过气候系统响应的非线性过程而放大其效能。那么对于中国近百年来地面温度的变化,天文和地球运动因子有没有影响呢?这是一个尚待阐明的问题。

关于人类活动对气候变化的影响,已经有了很多研究^[1]。因此,本文拟采用最近几年才开始在气候变化归因研究中使用的新方法——格兰杰因果分析法^[7-8],从自然因素的角度,主要是天文因子(太阳黑子数SSN)和地球运动因子(极移 x 方向和 y 方向)的角度,对中国近百年来地面温度的变化进行归因分析。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所用的中国地面年平均温度资料(TC)由唐国利提供,时间为1880—2011年,资料建立方法可参考文献[21]。所选的因子为太阳黑子数(SSN,时间为1880—2011年)和地球极移(x 和 y 方向,时间为1893—2011年)。它们的时间序列见图1。

2.2 方法

本文采用的方法是最近几年才开始在气候变化归因研究中使用的格兰杰因果分析法^[7]。相比于其他归因方法,格兰杰因果检验(Granger causality test)既考虑变量间的相互关系又考虑其自身变化。这种对两个事件序列之间因果关系的检验是由Granger在经济学中提出的^[22],因此称为格兰杰因果分析法,格兰杰也

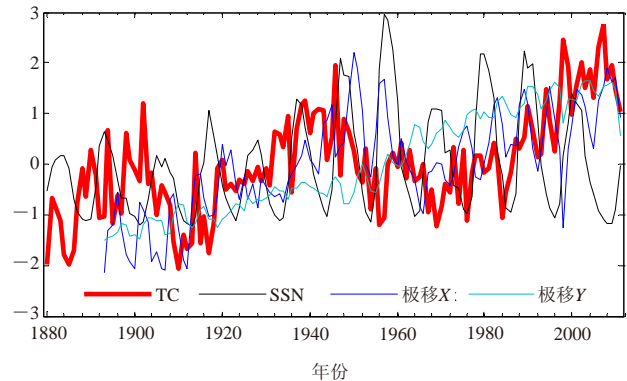


图1 中国地面年平均温度TC与SSN极移(x 方向)和极移(y 方向)标准化序列

因此或得了诺贝尔经济奖。

格兰杰检验的基本出发点是两个变量 x 与 y 高度相关,但不一定存在因果关系。它们之间可能有其它因素存在,使 x 与 y 之间表现出协同变化趋势,如小树生长与小孩长高。因此,需要对相关变量进行因果关系检验。

格兰杰因果分析法的基本原理如下:

从统计学的角度,因果关系可以用概率密度或概率分布函数来表示:在所有其他事件不变的条件下,如果一个事件A的发生或不发生对另一个事件B发生的概率有影响,并且这两个事件在时间上又有先后顺序(A前,B后),那么可以说A是B的原因。

设两个时间序列为 $X=\{x_t\}$ 和 $Y=\{y_t\}$, $t=1,2,\dots,N$, N 为所用资料的样本量。格兰杰因果分析法可以判断变量 X 是否能影响变量 Y 。若能,则认为 X 能导致 Y , X 是 Y 的原因;反之,则认为 X 不能导致 Y , X 不是 Y 的原因。检验标准是判断F统计量的计算值 P 是否大于某个显著性水平 α 下F标准分布的临界值。在统计检验中,一般来说,原假设 H_0 和备择假设 H_1 是不对等的, H_0 是受保护的假设,没有充分证据是否定不了的,或者说没有充分证据是不会接受备择假设 H_1 的。因此,往往把常规的,已存在的现象写在受保护的原假设 H_0 中,而把要研究的看法或猜想写成备择假设 H_1 。所以,在本研究中原假设为 X 不能导致 Y ,即 X 不是 Y 的格兰杰原因。若 $P<\alpha$,则拒绝原假设,即 X 不能导致 Y 的原假设不成立, X 是 Y 的格兰杰原因。

要严格确定因果关系,必须针对完整的信息集进行研究,也就是说,要得出“ A 是 B 的原因”,必须考虑论域中的所有事件。因此,格兰杰最早提出的因果关系定义,是建立在完整信息集以及发生时间的先后顺序基础上,根据条件分布函数进行判断。由于众所周知的原因,根据样本来估计分布函数是非常困难

的, 于是退而求其次, 只验证变量的数学期望是否相等, 即:

$$E(Y_{n+1} | \Omega_n) \neq E(Y_{n+1} | (\Omega_n - X_n)) \quad (1)$$

式中, E 为数学期望, Ω_n 为到 n 时刻为止能获得的所有因子集, X_n 为到 n 时刻为止所有的 X_t , 则 $\Omega_n - X_n$ 为到 n 时刻为止除 X_n 之外的所有因子。称满足(1)式的 X 和 Y 为均值因果关系。还有一种方法是考察预报误差, 其思路与Akaike信息量准则^[23]类似, 验证 X 的出现是否能减小对 Y_{n+1} 的预报误差, 即:

$$\sigma^2(Y_{n+1} | \Omega_n) < \sigma^2(Y_{n+1} | (\Omega_n - X_n)) \quad (2)$$

式中, $\sigma^2(Y | \Omega_n)$ 为在给定信息集下, 对 Y 的预测误差的方差, $\sigma^2(Y | (\Omega_n - X_n))$ 为没有 X 情况下对 Y 的预测误差。

如果式(2)成立, 变量 X_n 的存在能够显著的减少对 Y_{n+1} 预测误差的方差(或者说能够显著的改变对 Y_{n+1} 的预测精度), 那么就可以认为 X 对 Y 有因果性。

统计学上常用残差平方和来表示预报误差, 建立 X 和 Y 的回归方程, 通过假设检验(F检验)来检验 X 的回归系数为零的原假设是否成立, 这就是格兰杰因果检验的常用方法。

所建立的回归方程为:

$$y_t = \sum_{i=1}^k \alpha_i y_{t-i} + \sum_{i=1}^k \beta_i x_{t-i} + e_t \quad (3)$$

式中, k 为最大滞后阶数, e_t 为误差项, α_i 和 β_i 分别为 X 和 Y 的回归系数。上式包括自回归和多元线性回归, 而实际上只包含一个因变量和一个自变量。

原假设 H_0 为: X 不构成对 Y 的因果性, 即 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$

在原假设成立的条件下,

$$F = \frac{(SSE_r - SSE_m)/k}{SSE_m/(N-2k)} \sim F(k, N-2k) \quad (4)$$

式中, SSE_r 为不考虑 X 情况下建立 Y 的自回归时的残差平方和, SSE_m 为考虑 X 情况下建立 Y 的自回归时的残差平方和。

若 $F > F_a$, 则否定原假设, 认为 X 能导致 Y , 即 X 是 Y 的原因。其中, F_a 为显著水平取 a 时的 F 值。

其实, 格兰杰因果分析法主要看现在的 Y 能够在多大程度上被过去的 Y 解释, 然后再看加入 X 的滞后值是否能提高解释程度。如果加入 X 后能对 Y 的解释程度有显著提高, 那么就说 X 是 Y 的格兰杰原因。

需要指出的是, 随机变量只有为平稳时间序列时才能进行格兰杰因果检验。因为如果随机变量为非平稳序列, 进行格兰杰检验做回归时有可能出现伪回归, 从而可能导致错误结论。因此, 做格兰杰因果检

验之前应当先对时间序列的平稳性进行检验。如果变量是非平稳序列, 需要对变量进行差分或对数变换, 把变量变为平稳序列。

3 平稳性分析

首先必须检验被分析序列是否平稳即是否存在单位根。判别的常用方法是ADF (Augmented Dickey-Fuller) 检验。在ADF检验中, 单位根检验的回归方程为:

$$\text{模型1: } \Delta x_t = \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \varepsilon_t$$

$$\text{模型2: } \Delta x_t = \alpha + \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \varepsilon_t$$

$$\text{模型3: } \Delta x_t = \alpha + \beta t + \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \varepsilon_t$$

模型3中的 t 是时间变量, 代表了时间序列随时间变化的某种趋势(如果有的话)。原假设都是 $H_0: \delta=0$, 即存在一个单位根。模型1与另两种模型的差别在于是否包含有常数项和趋势项。

实际检验时从模型3开始, 然后是模型2, 模型1。何时检验拒绝零假设, 即原序列不存在单位根, 为平稳序列, 何时停止检验。否则, 就要继续检验, 直到检验完模型1为止。一个简单的检验是同时估计出上述三个模型的适当形式, 然后通过ADF临界值表检验原假设 $H_0: \delta=0$ 。只要其中有一个模型的检验结果拒绝了原假设, 就可以认为时间序列是平稳的。当三个模型的检验结果都不能拒绝原假设时, 则认为时间序列是非平稳的。这里所谓的模型的适当形式就是在每个模型中选取适当的滞后差分项, 以使模型的残差项是一个白噪声, 本文ADF检验的实际操作中滞后差分项个数的选择是以Durbin-Watson (DW) 值接近2为标准的。DW统计量通过确定两个相邻误差项的相关性是否为零来检验回归残差是否存在自相关, 越接近2, 说明自相关越小。

(1) TC的ADF检验: 对1880—2011年的TC进行ADF检验, 结果表明, $P=0.3218$, 所以接受原假设,

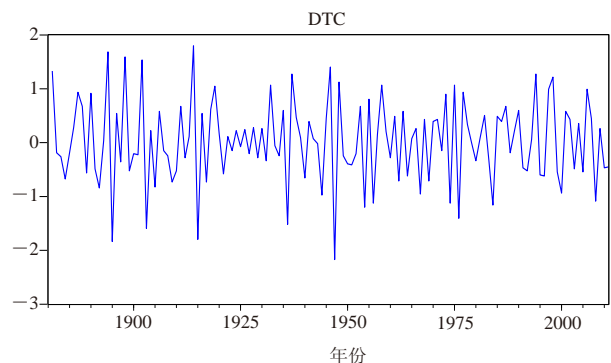


图2 TC的一阶差分(DTC)标准化序列

即序列TC有一个单位根，为非平稳序列。于是，对TC进行一阶差分（DTC），如图2所示。对DTC进行ADF检验，结果表明DTC是平稳的。

(2) SSN的ADF检验：检验结果表明，SSN是平稳的。

(3) 极移 x 方向和 y 方向的ADF检验：极移 x 方向和 y 方向都为非平稳序列，故对它们做一阶差分，再进行ADF平稳性检验，结果表明它们的一阶差分都变为平稳序列。

4 格兰杰因果检验结果分析

4.1 DTC与SSN

因为TC的一阶差分（DTC）和SSN是平稳的，所以对DTC与SSN做格兰杰因果检验。图3是它们的标准化时间序列。对格兰杰检验结果进行分析，发现滞后1~11年内， P 值都未小于0.05，所以，滞后1~11年内SSN都不是DTC的格兰杰原因。

4.2 TC与极移 x 方向和 y 方向的格兰杰因果检验结果分析

TC与极移 x 方向和极移 y 方向的Pearson相关系数分别为0.45和0.49。但这种高相关并没有考虑因子间的时序性，也并不能说明它们之间一定存在因果关系，因为不能排除有别的因素存在，使它们之间显示出协同变化趋势^[7]，况且，Pearson相关系数本身也存在很大的局限性^[24]。这种情况下，可以采用格兰杰因果检验来检测它们之间的因果关系。

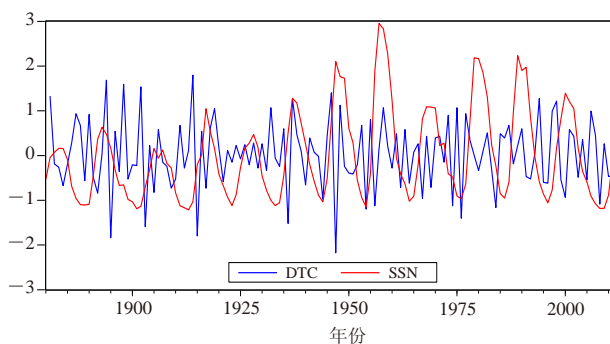


图3 DTC与SSN标准化序列

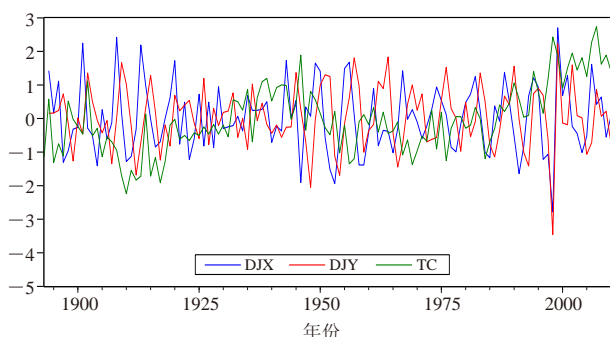


图4 极移一阶差分（DJX和DJY）和TC标准化序列

表1 极移与TC的格兰杰因果检验最优滞后期 P 值

原假设	最优滞后期/年	样本数	F统计量	P值
DJX不是TC的格兰杰原因	6	112	1.70	0.13
TC不是DJX的格兰杰原因	无通过信度检验的F统计量			
DJY不是TC的格兰杰原因	无通过信度检验的F统计量			
TC不是DJY的格兰杰原因	无通过信度检验的F统计量			

经ADF检验，1893—2011年，TC为平稳序列，极移 x 方向和 y 方向都为非平稳序列，后两者一阶差分（DJX和DJY）都变为平稳序列。图4是DJX、DJY和TC时间序列。故对DJX和DJY分别与TC做格兰杰因果检验（表1），可以看出，TC滞后极移 x 方向（DJX）6年时是最优滞后期，这时“DJX不是TC的格兰杰原因”的可能性最低（ $P=0.13$ ），即在13%的显著性水平下拒绝原假设，这表明在年际尺度上，DJX是TC的格兰杰原因（信度87%）；另一方面，TC不是DJX的格兰杰原因，因为没有通过检验的F统计量。而极移 y 方向（DJY）不是TC的格兰杰原因，因为无通过检验的F统计量；反过来，TC不是DJY的格兰杰原因，因为在DJY滞后TC 1~11年内，没有通过检验的F统计量。因此，格兰杰因果检验暗示极移 x 方向的变化在可能会导致6年后中国气温变化。

地极移动属于地球物理因素，亦称地学因素，受地球的构造及其运动的特点所制约。地极坐标总是不断变化的，围绕其“平均极”描述螺旋状的复杂曲线。综合的地极移动振幅周期为6~7年，有“极潮”之称^[25]。地极移动对天气气候变化的影响机制，目前的研究还不够成熟。一种理解是，当地极发生变化时，引起了地球离心力的变化，其积分值是相当大的，因而造成了地球上大气环流和空气质量输送的变化，于是天气气候也产生相应的变化。也有研究从地极移动引起地球变形力的角度考察其对大气运动的影响。总之，地极移动可以看作大气环流变化的外在动力因子之一，它与热力因子和其他动力因子共同作用于大气，并影响大气的变化。影响中国气温的直接因素是大气环流，地极移动如何影响大气环流，并最终影响中国气温，需要进一步深入研究。

5 结论与讨论

本文采用格兰杰因果检验法，从天文因子（太阳黑子数SSN）和地球运动因子（极移 x 方向和 y 方向）的角度，对我国近百年地面温度（TC）的变化进行了归因分析，结果如下：

(1) SSN不是中国近百年地面温度变化的格兰杰原因；

(2) 对于TC和极移 x 方向，当滞后6年时信度最高，此时极移 x 方向是TC的Granger原因（87%信

度)，而TC不是极移 x 方向的Granger原因。

本文的研究结果可能暗示，极移 x 方向的变化可能会导致6年后中国气温变化。需要指出的是， P 值是用观测值计算得到的检验统计量（本文中为 F 统计量）的特定概率，为不利于原假设 H_0 （或与原假设相反）的全部其他可能值发生的概率。给出一个假设检验的 P 值而不只是在一个特定检验水平拒绝/不拒绝的决策包含更多的信息，因为 P 值传递了原假设被拒绝或不被拒绝的信心^[24]。本文中在13%的显著性水平上拒绝原假设（DJX不是TC的格兰杰原因），意指拒绝这个原假设犯错误的可能性为13%。

已经有不少研究证实了格兰杰因果分析法用于气候变化归因的有效性^[1, 7, 26]。本研究从天文和地球运动因子的角度，采用格兰杰分析法对中国近百年温度变化的原因进行了分析，也得到了创新性结论。但需要指出的是，为了满足实际计算的可行性，目前实际使用的格兰杰因果检验的计算操作与Granger最初的定义已有所偏离，实际观测资料也不可能完全满足所要求的统计条件，因此得到的结果可能存在一定程度的不确定性。换言之，本文所得到的格兰杰因果关系还需从物理机理角度进行深入分析，将来还需要进行数值模拟研究。另外，影响我国地面温度变化的原因是极为复杂的，还有很多其他因子对我国地面温度变化产生影响，比如人类活动（CO₂、气溶胶等）、火山爆发等，本文的分析中没有涉及这些因子。但无论如何，本文用格兰杰因果分析法，从天文和地球运动因子的角度，对中国近百年地面温度变化的归因分析，对认识我国气候变化的原因提供了有益的线索。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Fyfe J C, Gillett N P, Zwiers F W. Overestimated global warming over the past 20 years. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 767-769.
- [3] Kerr R A. What happened to global warming? Scientists say just wait a bit. *Science*, 2009, 326: 28-29.
- [4] Knight J, Kennedy J J, Folland C, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? In state of the climate in 2008. *BAMS*, 2009, 90 (8): S22-S23.
- [5] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 2013, 501: 403-407.
- [6] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [7] 曹鸿兴, 郑艳, 虞海燕, 等. 气候检测与归因的格兰杰检验法. *气候变化研究进展*, 2008, 4(1): 37-41
- [8] 孙颖, 尹红, 田沁花, 等. 全球和中国区域近50年气候变化检测归因研究进展. *气候变化研究进展*, 2013, 9(4): 235-245
- [9] 赵亮, 徐影, 王劲松, 等. 太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展. *气象科技进展*, 2011, 1(4): 37-48
- [10] 彭公炳, 陆巍, 殷延珍. 气候及其环流因子对地球自转速度变化的若干响应. *气象学报*, 1982, 40(2): 209-218.
- [11] 彭公炳, 陆巍. 大气环流演变与地球转动不均匀性. *中国科学A辑*, 1981, 24(9): 1126-1136.
- [12] 彭公炳, 陆巍. 气压场和大气活动中心对地极移动的若干响应. *地理学报*, 1981, 36(1): 59-69.
- [13] 黄玫, 彭公炳, 沙万英. 地球自转速率变化影响大气环流的事实及机制探讨. *地理研究*, 1999, 18(3): 254-259.
- [14] 韩延本, 赵娟, 李志安. 地球自转速率的年际变化与厄尔尼诺事件. *科学通报*, 2001, 46(22), 1858-1861.
- [15] 钱维宏, 丑纪范. 地气角动量交换与循环. *中国科学D辑*, 1996, 26(1), 80-86.
- [16] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 2000, 289: 270-277.
- [17] Cubasch U, Voss R. The influence of total solar irradiance on climate. *Space Science Reviews*, 2000, 94(1-2): 185-198.
- [18] Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E, et al. Solar forcing of regional climate change during the maunder minimum. *Science*, 2001, 294 (5549): 2149-2152.
- [19] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar Influences on Climate. *Rev Geophys*, 2010, 48: 1-53.
- [20] Zhao L, Wang J S. Robust response of the East Asian monsoon rainband to solar variability. *J Climate*, 2014, 27(8): 3043-3051.
- [21] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析. *气候与环境研究*. 2005, 10(4): 791-798.
- [22] Granger C W. Developments in the study of co-integrated economic variables. *Oxford Bull Economics and Statistics*, 1986, 8 (3): 213-228.
- [23] Akaike H. A new look at the statistical identification model. *IEEE Trans Auto Control*, 1974, 19: 716-723.
- [24] Wilks D S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2nd Edition). Burlington, MA; London: Academic Press, Elsevier, 2006.
- [25] 彭公炳. 地极移动对气候变化的影响及其在气候预测中的应用. *气象科技资料*, 1973, 3(3): 54-58.
- [26] 郑祚芳, 张秀丽, 高华. 北京气候变暖与主要极端气温指数的归因分析. *热带气象学报*, 2012, 28(2): 277-282.

基于均一化观测序列评估城市化的气候效应

严中伟¹ 王君^{1,2} 李珍¹ 刘伟东³

(1 中国科学院东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029;
2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 北京市气象局, 北京 100089)

摘要: 介绍了从气象观测记录中分辨城市化气候效应的基本思路, 通过近年一些范例性的研究成果, 展示均一化气候序列对于评估城市化气候效应的重要性, 讨论均一化资料所反映的“城市化效应”的内涵, 总结现有有限的基于均一化气候序列的城市化效应评估结果, 并指出存在的问题, 展望进一步的研究。

关键词: 气候变化, 城市化效应, 均一化气候序列

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.007

Assessing Climatic Effects of Urbanization Based on Homogenized Daily Observations

Yan Zhongwei¹, Wang Jun^{1,2}, Li Zhen¹, Liu Weidong³

(1 Key Laboratory of Regional Climate Environment in Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 3 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089)

Abstract: This paper briefly presents ways of detecting the climatic effects of urbanization based on meteorological observations. Having reviewed various recent studies, we point out the very importance of homogenized climate series for estimating the impact of urbanization. The results of a few recent studies based on homogenized observations are discussed. Suggestions for further studies are proposed.

Keywords: climate change, climatic effects of urbanization, homogenization of climate series

城市作为人类活动和能源消耗集中区, 相对于周边乡村而言, 一般具有较高的近地面气温, 这就是广为人知的“城市热岛”(UHI)。城市化可理解为一个UHI增强和扩展的过程。当地气象站会记录下城市化造成的气候效应, 如气温序列会显示出相对于周边乡村站的一个增暖过程^[1-6]。

近代全球气候变暖, 其中一部分观测依据来自地面气象站。由于很多长期的气象站正是伴随着所在城市的发展而维持下来的, 因而就产生了关于近代变暖记录中有多大的城市化效应的争议^[7-9]。事实上, 对于近代全球变暖来说, 地面观测资料中的城市化效应几乎可以忽略^[10]。这是因为近代变暖的主要依据包括占全球地表面积2/3的海洋上的记录以及大量山地和极

地冰雪消融等事实; 而陆地上也并非所有观测站都受到严重的城市化影响^[11]。某些局地观测记录中城市化造成的额外增温对整个增温趋势贡献较大^[2,4], 是有特定时段限定的。特别是在中国, 近30年来很多气象站所处的区域都经历了快速城市化发展, 所记录的气温序列不仅包含大尺度气候变暖的信号, 也包含局地的城市化效应。评估地面气象站观测序列中的城市化效应, 有助于理解局地的城市化气候效应本身, 也是量化大尺度气候变化及其归因研究所必需的一个环节。

然而, 即使是针对特定期限、特定地点, 关于城市化效应的评估仍存在不确定性, 部分原因和研究方法有关。比如使用不同的方法去定义乡村站点, 可导致“乡村”的气温日较差变化趋势的估计从-0.41到-0.61(°C/100a)不等^[12]。另一重要原因来自观测资料序列本身存在的系统性偏差, 即由于观测站迁址、仪器更新或观测规则变更等突发性因素造成的时间序列非均一性^[13-14]。Peterson^[15]发现: 在均一化资料基础上, 美国城市站平均温度序列的增暖趋势, 与乡村站平均趋势没有显著差异。这说明气候序列均一化对于确切评估气候变化(包括判别其中的城市化效

收稿日期: 2013年5月30日; 修回日期: 2013年9月21日

第一作者: 严中伟(1963-), Email: yzw@tea.ac.cn

资助信息: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090105); 国家自然科学基金(41075063); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206013); 国家科技支撑计划项目(2012BAC22B04); 城市气象科学研究基金(2012年度)

应)非常关键。近年来,均一化的气候序列集已逐渐成为气候变化研究领域的主导资料基础,中国地区的均一化气候序列集也开始获得日益广泛的应用^①。本文简单介绍气候序列的均一化和城市化气候效应评估的基本思路,总结近年来在新的资料基础上获得的一些城市化气候效应评估结果,讨论存在的问题,展望进一步研究。

1 气候序列的均一化简介

均一化的基本概念和方法在不少著作中都有阐述,这里仅作简单介绍。长期气象观测几无例外地经历过一些系统性的变迁,如站点迁移,或仪器更新,或观测规则变更等,致使相应时段观测值相对于其他时段有系统性的偏差。这些偏差导致一个气候序列在时间上不是一致可比的,因而称之为非一致的,或非均一的(inhomogeneous)。这类系统性偏差也被称为非均一性(inhomogeneity)。为描述实际气候变化,必须校订气候序列的非均一性,即均一化(homogenization)。

均一化可通过对比分析邻近站记录来实现。设有一个气象站 x ,要素 T 的观测序列记为 $T_x(i)$, i 代表观测时间。任意时间 t 前后两个时期内的平均气候变化记为:

$$D_x(t) = \sum T_x(i) - \sum T_x(j) \quad (1)$$

式中, $i=t+1, t+2, \dots, t+n$,代表 t 后的 n 个观测时间; $j=t-m+1, t-m+2, \dots, t$,代表 t 之前直至 t 的 m 个观测时间; \sum 表示对相应 n (或 m)个观测的子序列求平均。

理想地,设有一个邻近站 y ,观测序列 $T_y(i)$,所记录的气候变化和 x 站几乎一样,即: $D_x(t) \approx D_y(t)$ 。或记为 $d(t)=D_x(t)-D_y(t)$,其与0无显著差异。然而,如果 x 站于 t_0 时发生观测系统变更(如迁址),则 $D_x(t_0)$ 除了气候变化外,还可能叠加了一个观测系统变更引起的系统性偏差(非均一性)。这时, $d(t_0)$ 就是非均一性的定量表述。在校订 x 站序列时,一般称 x 站序列为待检(candidate)序列,而 y 站序列为参考(reference)序列。国际上已发展有多种统计学方法来判别 $d(t_0)$ 的显著性进而计算待检序列的校订量。这里不再赘述。

简言之,本文讨论的是国际学术界已有确切定义(较为狭义)的非均一性,即观测系统变更导致的气候序列中相应时段的跃变性系统偏差。在一些广义的讨论中,把某些渐变因素(如观测场周边环境随城市化的变迁)所致的偏差也称为非均一性。这类非均一性目前还缺乏普适的标准和分析方法。尤其对于本文,城市化的气候效应正是所要研究的对象,是一个

气候序列反映的某种客观事实,更不应视之为“非均一性”加以校订。

2 评估城市化气候效应的基本思路

首先需要说明,本文讨论的是在气象站记录中体现的“城市化气候效应”。以温度为例,气象站的观测值是在一方草坪上的百叶箱里获得的;而很多人提到城市“热岛效应”,往往想到太阳直射城市水泥地面时温度远高于乡村田野的情景,其实夜间水泥面温度往往反而比田野还低。后者不是本文讨论的对象。利用气象记录评估城市化气候效应,最直观的办法就是对比分析城市和周边乡村气象站观测的某些气候变量序列^[1-4,8]。用如下基本公式表述:

$$dT = T(u) - T(n) \quad (2)$$

式中, $T(u)$ 和 $T(n)$ 分别代表城市和周边非城市气象站观测的长期气候趋势。城市化气候效应就由两者的趋势差 dT 来刻画。有时候也用百分数,即 $dT/T \times 100\%$,来量化城市化效应。

应用上述公式的前提是:城市化对于所研究的气候变量的影响是较为直接的。例如前面提到的UHI加强导致当地气温增高;建筑群增高增多导致城区近地面风速减弱等。不论当地大尺度的气候变化背景是增暖抑或变冷(风场是加强抑或减弱),通过对比分析城、乡气象站观测序列,都可发现城市站相对于乡村地区,记录了一个相对的气温增高(风速减小)趋势。

然而,对于另一些气候变量,如降水,城市化的影响可能随当地特有的大气环流和地理格局而有所不同。比如城市热岛有助于局地对流,从而有助于当地降水,但由于降水往往由特定的大气环流系统起主导作用,热岛效应可能体现在大气环流的下游区域,而非城区^[16-18]。不同城市所处的地理位置以及大气环流特征各有不同,“下游”何在,不是一目了然的。如果有足够高分辨的区域气候观测网,可利用主成分(PC)或经验正交函数 EOF 分析,来分辨可能的“城”、“乡”气候的主要变率分布特点,进而再采用公式(2)来刻画城市化效应^[19]。要注意的是,这里所谓的“城”、“乡”可能和地理上的城、乡不一致。

近年来还有很多研究利用对比分析地面观测和再分析资料,即所谓的OMR方法来评估城市化效应^[20-21]。再分析资料是基于部分观测资料经气象模式重新计算的、符合气象动力学原理的变量场。OMR方法的基本思路是:某些再分析系统主要是依靠大气探空观测资料来运行的,没有考虑诸如城市化所伴随的

① 严中伟,李珍,夏江江. 气候序列的均一化一定量评估气候变化的基础(在审中)

陆面性质变迁以及能较直接反映这些变迁影响的地面气象观测资料；因而从地面观测的变量序列中减去再分析资料中相应变量序列，就可能捕获隐含在地面气象观测资料里的城市化效应。然而，各种再分析资料本身存在的系统性误差，特别是有关年代际波动的偏差，会导致不同时期分析结果大相径庭^[22]，制约了该方法的可用性。

利用气候模式进行数值模拟也是评估城市化气候效应的一种手段。就中国区域开展的城市化气候效应模拟分析，近年来已取得一定的进展^[23-25]。然而，现有气候模式的空间分辨率（1~10km）较低，模拟研究中所定义的城市区域往往是夸张的；一些甚高分辨率的局部动力学模式又不适于长期气候变化过程的模拟。因而，数值模拟虽然有助于理解城市化气候效应的机理，目前还难以取得切合实际的评估结果。

回到公式（2），要获得可靠的城市化气候效应评估 dT ，需两方面的保障。其一，各站观测序列所记录的长期气候趋势 T 是可靠的，也即要求各观测序列中不存在系统性的偏差（非均一性）；其二，所谓的“城”、“乡”划分是合理的。这两方面的问题，正是导致以往研究所得结论存在不确定性的主要原因。

3 城乡站点的划分

先讨论如何区分城、乡站点。根据以往研究，划分城、乡站点的方法大致可分为3种，即城市发展指数分类、遥感观测定义和气候统计区划。

城市发展指数有很多，例如人口、建筑区面积、能源消耗、GDP等。其中最广泛采用的是人口指数。例如Jones等^[10]、Ren等^[26]、Hua等^[27]通过站点所在地区总人口进行城乡站分类；Portman^[28]利用人口密度数据对中国华北29站进行划分；周雅清等^[29]则采用城市常住人口作为分类指标。以城市发展指数判断城市规模，不无道理，尤其是人口之类的指数并不难获取，这是此方法广为应用的原因。这种方法的缺陷在于：其一，由于各地城市发展形式各有不同，不同研究者往往使用不同的阈值作为城乡站点划分的标准，结果带有主观性；其二，即使是同样规模的城市，位于市区、郊区或市内公园绿地的观测站记录所受影响也可大为不同。因此，城市发展指数分类法一般用于具有较多站点样本的情况，意味着即使有少部分站点分类有误，也不影响总体判断。

根据遥感观测定义城乡站点，优势在于其直观性。近年来被越来越多地应用于城市化气候效应的研究中。其中用得较多的指标包括：夜晚灯光强度、归一化植被指数以及地表亮温等。例如，Gallo等^[12]、

Hansen等^[32-33]、Yang等^[34]利用夜晚灯光数据将气象站点分成城市站、郊区站和乡村站；Gallo等^[35]将站点周围的归一化植被指数作为城乡站点的分类参考；Ren等^[36]提出依据遥感观测到的地表亮温空间分布挑选用来评估城市化气候效应的参考站。这类方法在应用中面临的一个难题：为量化站点所在位置的城市化程度，需要选取一个特定的空间尺度，如方圆1km或10km。选取的尺度不同，分类结果也不同。例如北京朝阳公园内的一个气象站，如果以其周边方圆1km的遥感资料来判断，该站很可能被判为乡村，因为“周边”都是绿地；但以方圆3km来看，就是高度发达的城区。更重要的是，城市化是一个动态的发展过程，而遥感观测的时间序列较短，近年观测到的“城区”如果是从乡村演变而来，抑或过去多年来一直都是城区，则有关站点记录的城市化气候效应完全不同。图1利用夜间灯光遥感指数反映了北京地区十多年来一些站点从乡村到城市的演变，而另有一些一直处于城区或乡村的情景。

鉴于城市化是个过程，为分辨观测序列中的城市化效应，一个有益的做法是：基于各站气候序列的统计分析，进行城乡区划。例如，可采用经验正交函数的方法将不同类型站点区分开^[37]；也有研究通过旋转经验正交函数方法对站点分类结果进行验证^[38]。这种做法对于研究降水之类的气候观测中的城市化效应来说，尤其是必要的，因为城市化对于降水气候的影响是较为间接的，即通过与当地特殊的降水环流相互作用后再反映到特定区域^[17, 19]。统计分类法的另一优势在于：可以根据所要关注的气候变量，来进行针对性的区划分析。例如，为研究城市化对极端温度记录的影响，Wang等^[39]选用3个温度指标：年平均气温、年炎热天数（日平均气温高于25℃）和年寒冷天数（日平均气温低于5℃），对北京20个气象站点进行聚类分析。图2表明20个气象站在三维聚类空间里被客观地分为了4类。基于各站的地理信息，可将这4类站分别命名为：城市、近郊、乡村和山地。显然，结合区域气候变化的统计分析，进而利用遥感（如图1）以及城市发展指标等辅助信息加以验证，可以为分辨城市化气候效应而获取较为客观的城乡区划结果。在资料允许的情况下，这应该成为城市化气候效应研究的一条基本途径。

在实际研究中，往往难以获得理想的所有资料。一些研究者就根据有限资料和相关物理原理，回避城乡区划问题而进行有限的推断。例如，考虑近几十年中国东部大多数气象站都可能受到城市化影响，而邻近的海洋观测资料则不受城市化影响，Jones等^[11]将

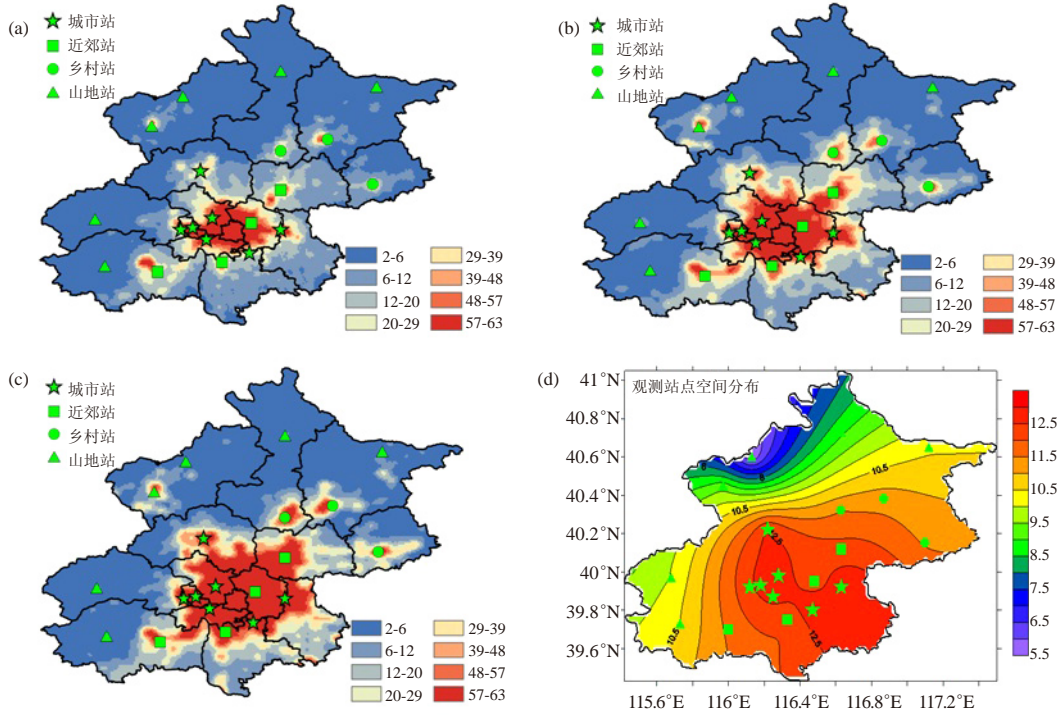


图1 北京地区1992年 (a)、2000年 (b) 和2008年 (c) 夜晚灯光值空间分布和北京地区20个气象站的地理位置以及该地区1978—2008年平均气温的空间分布 (d, 单位: $^{\circ}\text{C}$) (绿色五角星、方块、实心点和三角形分别代表城市、近郊、乡村和山地站点)^[39]

中国东部站点的平均温度序列和临近的平均海表温度序列进行对比, 推断陆地上观测序列中可能的城市化增温贡献应小于 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。Zhao等^[40]把中国东部长期观测温度序列(大都是城市站)按人口分类, 比较分析各类站点气温序列的趋势, 认为近几十年来的增暖趋势中, 与人口因素有关的不确定性范围大致在10%~20%之间。这也可从一个侧面反映城市化气候效应的大小。又如, 基于城市热岛在静风条件下最强、在大风条件下最弱的物理原理, Parker^[41-42]对比分析了全球范围内站点温度记录在大风和静风天的变化趋势, 进而推断城市化等局地因素对整个增温趋势贡献非常小。

4 基于均一化观测序列评估城市化的局地变暖效应

更普遍的一个问题来自长期气象站观测序列所具有的非均一性, 即由于观测系统变更(包括台站迁址、仪器更新或观测规则变化等)导致的相关时段特定变量观测值的系统性偏差。非均一性在各地气温观测序列中表现得尤为突出。因而, 气温观测序列的均一化, 对于判断各站气候变化趋势、进而获得确切的城市化气候效应评估, 尤其重要。早期研究大多没有注意到这个问题, 直到Peterson^[15]基于均一化的气候

观测序列发现, 美国城市站平均温度序列的变暖趋势与乡村站平均无差别。

中国地区的研究也有类似情况。基于未经均一化的观测资料所评估的城市化增暖效应结果较大^[2]; Wang等^[43]发现中国区域城市化效应对整体增暖贡献达20%。比较来看, 基于均一化观测资料分析所得的

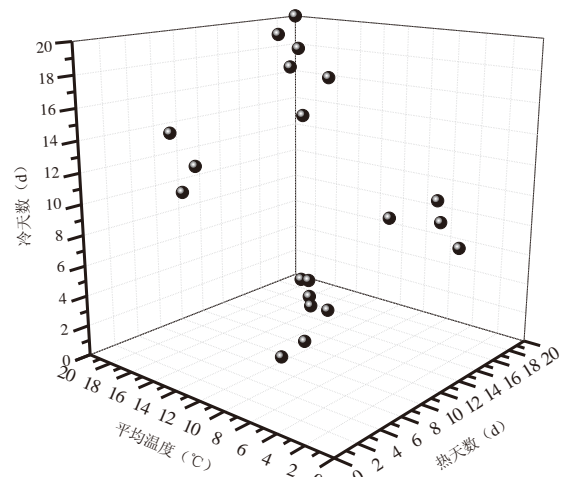


图2 三维聚类空间中的北京20个气象站散点图^[39], 采用3个温度指标(年平均气温, 年寒冷天数和年炎热天数)进行聚类分析, 客观地呈现4类站点, 即城市站、郊区站、乡村站和山地站

结论是，中国过去半个世纪的城市化增暖效应约为 $0.012^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，不到背景增暖的10%^[44]。北京观象台是一个典型例子：Ren等^[2]使用原始的台站观测数据，判断80%的增温趋势可以归因于城市化增暖效应；Yan等^[4]对该站气温序列存在的主要非均一性（即1981年和1997年两次迁址导致的系统性偏差）进行校订后，所评估的城市化效应占整个增温趋势的约40%；而基于更完整的北京地区20站均一化资料^[45]，Wang等^[39]发现近30年城市化效应对北京观象台记录的增暖趋势的贡献不到20%，对城区多站平均而言，这一贡献约为10%。注意北京的城市化发展水平高于全国平均水平，有关结果值得参考。

为何均一化的观测资料所反映的城、乡增温率之差较小呢？一个原因或许和迁址有关。一般情况下，随着城市化发展，一些气象观测站会被迁往更远的郊区。较早期的原站址温度记录相对于近年（更加乡村化的）新站址记录有一个系统的正偏差，导致这类乡村站的增暖趋势被低估。用这样的乡村站资料评估城、乡增暖趋势之差，就会高估城市化的影响。如图3a所示，北京地区乡村站点原始温度序列的增暖趋势较弱，导致城乡对比计算出的城市化效应较强；而经均一化后，各站点的温度序列更合理地反映了各自的气候趋势，基于城乡对比的城市化效应则有所减小。从图3b可见，原始记录计算的城乡温差在20世纪90年代急剧增大，有悖常理，更像是资料有问题，而其实就是部分观测序列的非均一性所致^[45]。

一个较为复杂的问题是，对于特定站点而言，城市发展的影响可以是非常局地性的跃变式的。比如，北京观象台附近早年主要为农田，2003年建成高架公路，周边环境突然变为城市，该站气温观测序列从该年开始相对于邻近台站有一个跃变性的增高^[46]。在均一化分析中，这类跃变被视为非均一性，相当于局地观测系统出现了突发性的变更。均一化的观测序列原

则上已校订这类跃变式的信号。Li等^[45]还将这个非均一性信号归咎于该时期该站进行的从人工观测到自动观测系统的调整。事实上，距离高架桥稍远的其他站也并没有记录到类似的信号。因而，上述北京观象台记录所反映的跃变式影响，至少不具有普遍意义。较严格地说，均一化的气象观测序列所反映的城市化效应，是随着城市总体逐渐发展（UHI也随之逐渐扩张和增强）导致的某种缓变过程。这个过程是较大尺度的，而非站点局地的、突发性的。

换个角度考虑，如果不把站点尺度的“非均一性”去掉，则可能看到各种局地性的“城市化效应”，导致概念混乱，不利于深入研究。比如：上述高架桥的建立确实导致某站局地的增温突变；而另一侧有个观测站刚好因被建筑物遮挡而导致日最高温度系统地偏小，这里的局部“城市化效应”是“降温”。显然，这些局地信号绝非大尺度气候变化研究所关注的“城市化效应”。而以往研究夸大城市化效应的部分原因也正是：研究者往往只选取部分结果如前者（增温，因为它符合理论预期）而忽略后者。由此亦可见均一化的重要性。

5 其他变量观测序列中的城市化效应

风速是受城市化影响较直接的另一个重要变量。近几十年来欧洲大陆地区观测的风速序列几乎一致地呈现减小趋势，位于上游的北大西洋却并无此变化。虽然有研究通过大气环流的变化来加以解释^[47]，地面观测是否普遍受到局部的城市化影响，值得疑问^[48-52]。Jiang等^[53]就中国区域的研究表明：1956—2004年城市站点风速小于乡村站点，同期前者下降趋势为 $-0.13\text{m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ，量值上比后者（ $-0.12\text{m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ）略大。

均一化的观测资料对于研究风速演变中的城市化效应或许更为重要，这是因为风速观测对于观测系统的变更十分敏感。Li等^[54]指出了经过均一化处理的北京

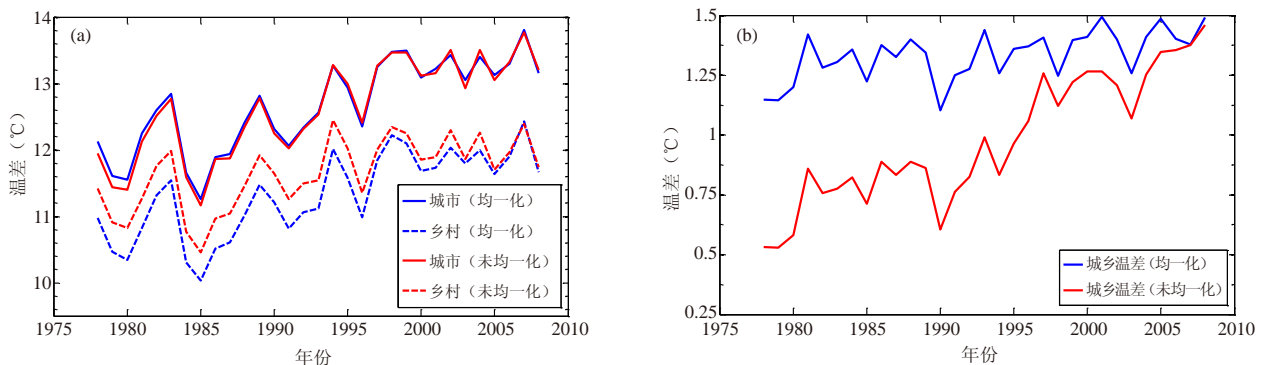


图3 (a) 均一化前后北京地区城乡站点的温度的年际变化序列（1978—2008年）；
(b) 均一化前后城乡之间温差的年际变化序列（根据Li等^[45]所用资料重绘）

风速变化的空间分布，市区风速下降趋势最大而周边趋势较缓，体现出典型的城市化影响的格局（图4），进而判断城市化加剧了市区风速的下降趋势，约20%。而基于原始观测资料所得的趋势分布格局，则难有合理解释。图4形象地说明，必须基于均一化的观测序列，才能获得合理的城市化效应评估。然而，由于风速观测序列的变率较大，目前还很少有较大区域统一处理的均一化数据集。

与风速类似，降水观测序列也具有较大的变率。更为复杂的是，降水不是连续变量。非均一性信号很容易被淹没在“变幻无常”的观测序列中，这也是降水资料较难以进行均一化处理的一个原因^[55-58]。基于均一化降水资料开展的城市化气候效应研究更不多见。有研究表明：近几十年半数以上的中国大城市极端降水强度增大和频数增加的趋势比周边观测结果大^[59]；城市化对降水的影响在中国3大城市群主要体现在极端强降水事件上^[60]。Han等^[19]首次尝试利用均一化的温度和降水观测序列，探讨北京地区城市化对于冷季低温降水气候变化的影响，结果表明近30年来北京城区及其下游方向的城东北区域低温降水强度有所增强，小降水事件则显著减少（达约-16%/10a），或许反映了该时期快速城市化对于冷季降水的特殊影响。

然而，总的看来，关于降水气候变化的城市化效应研究结果，其统计显著性大都不高。原因主要在于降水气候的变率较大，但也部分地和观测资料存在非均一性有关。发展针对这类变量的观测序列的均一化方法，并在此基础上进一步探讨城市化效应，有助于推进该领域取得实质性进展。

6 小结

本文回顾了利用地面气象观测序列分析城市化气候效应的基本思路，通过一些案例分析展示了观测序列均一化对该领域研究的重要性，总结了目前尚十分有限的基于均一化观测资料取得的一些新认识。小结如下：

（1）基于均一化观测序列评估的城市化局地增暖效应，现有结果大都要小于基于原始观测资料所得的结果。原因之一可能和观测台站迁址等造成的非均一性有关。北京观象台作为一个受城市化影响较为严重的站点，其最近30年气温观测序列中隐含的城市化增暖效应大约占总体增暖趋势的20%；北京地区多个城市站平均而言，这一贡献约为10%。结合其他相关研究判断，对于近几十年快速城市化进程中的中国区域平均而言，城市站点气温观测记录中所隐含的城市化增暖效应也应在类似的水平（10%）上下，更可能是偏下（以北京地区为参照）。近年来研发的中国区域气温观测的均一化序列集，已开始获得越来越广泛的应用，有助于推进城市化气候效应的量化研究。

（2）城市化同样直接地影响局地风速观测。基于均一化资料评估的近30年北京城区风速下降趋势中，城市化效应的贡献最大可达20%。这个结果和气温序列分析的结果貌似十分接近，但要注意受城市化影响最大的风速观测站点位于市区中心的朝阳公园，而非东南部的北京观象台。对于不同要素来说，城市化的影响对于不同站点显然可以大为不同。北京的结果或许可借鉴为中国区域观测网中城市化影响风速观测序列的某种上限水平参考。遗憾的是，风速观测序列的均一化，目前还缺乏可推广应用的基础数据产品。

（3）降水观测，同样十分缺乏均一化研究。基

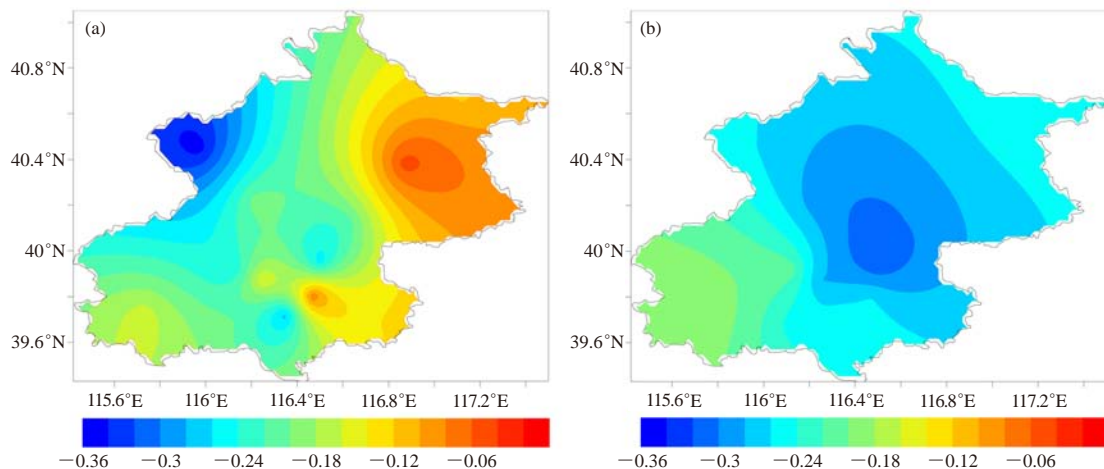


图4 1960—2008年北京地区年均风速序列中的线性趋势分布
(a) 原始序列计算结果；(b) 均一化序列计算结果（色标单位： $\text{m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ，根据Li等^[54]重绘）

于个别研究结果（北京为例）判断，城市化或可导致城区及其下游区域某些降水指标（如冷季小降水事件的发生频率）的长期（减少）趋势。还有些研究认为，城市化对降水的影响可能更多地体现在极端降水事件上。但有关降水气候变化的研究结果，还有很大不确定性。发展降水序列的均一化方法，尽快研发均一化降水数据产品，是当务之急。

城市化的气候效应是气候变化研究领域一个既古老又新鲜的难题。中国近几十年来空前的城市化发展，为研究这一话题提供了绝佳的试验场。而均一化气候观测序列，是获取合理的城市化气候效应评估的基础。近年来在中国区域均一化气候观测序列集的研发方面，正取得不断进展^[61-62]。另一方面，应结合高分辨观测基础上的气候变化统计分析和遥感等其他分析手段，发展更合理的城乡站点区划方法。通过资料和方法两方面进展，有望逐步减小城市化气候效应评估中的不确定性，获取更全面和定量的认识。

参考文献

- [1] Böhm R. Urban bias in temperature time series – A case study for the city of Vienna, Austria. *Climate Change*, 1998, 38: 113-128.
- [2] Ren G, Chu Z, Chen Z, et al. Implication of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L05711.
- [3] Gaffin S, Rosenzweig R, Khanbilvardi R, et al. Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theoretical and Applied Climatology*, 2008, 94: 1-11.
- [4] Yan Z, Li Z, Li Q, et al. Effects of site change and urbanisation in the Beijing temperature series 1977-2006. *International Journal of Climatology*, 2010, 30: 1226-1234.
- [5] Liu W, Ji C, Zhong J, et al. Temporal Characteristics of Beijing Urban Heat Island. *Theor Appl Climatol.*, 2007, 87(1): 213-221
- [6] 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69-77.
- [7] Karl T, Diaz H, Kukla G. Urbanization: Its detection and effects in the United States climate record. *Journal of Climate*, 1988, 1: 1099-1123.
- [8] Karl T, Jones P. Urban bias in area-averaged surface air temperature trends. *Bulletin American Meteorological Society*, 1989, 70(3): 265-270.
- [9] Balling R, Idso S. Historical temperature trends in the United States and the effects of urban population growth. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 3359-3363.
- [10] Jones P, Groisman P, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 1990, 347: 169-172.
- [11] Jones P, Lister D, Li Q. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D16122.
- [12] Gallo K, Owen T, Easterling D. Temperature trends of the U.S. historical climatology network based on satellite-designated land use/land cover. *Journal of Climate*, 1998, 12: 1344-1348.
- [13] Peterson T, Easterling D, Karl T, et al. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. *International Journal of Climatology*, 1998, 18: 1493-1517.
- [14] Liu W, You H, Dou J. Urban-rural humidity and temperature differences in the Beijing area. *Theor Appl Climatol*, 2009, 96 (3-4): 201-207.
- [15] Peterson T. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *Journal of Climate*, 2003, 16(18): 2941-2959.
- [16] Jauregui E, Romales E. Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 1996, 30: 3383-3389.
- [17] Shepherd J. Rainfall modification by major urban areas: observations from space borne rain radar on the TRMM satellite. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41: 689-701.
- [18] Diem J, Mote T. Interepochal changes in summer precipitation in the southeastern United States: evidence of possible urban effects near Atlanta, Georgia. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44: 717-730.
- [19] Han Z, Yan Z, Li Z, et al. Impact of urbanization on low-temperature precipitation in Beijing during 1960-2008. *Adv Atmos Sci*, 2013, doi: 10.1007/s00376-013-2211-3.
- [20] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528-531.
- [21] Zhou L, Dickinson R, Tian Y, et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *PNAS*, 2004, 101: 9540-9544.
- [22] Wang J, Yan Z, Jones P, et al. On 'Observation minus Reanalysis' method: A view from multi-decadal variability. *Journal of Geophysical Research*. doi: 10.1002/jgrd.50574.
- [23] Feng J, Wang Y, Ma Z, et al. Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China. *Journal of Climate*, 2012, 25: 7187-7203.
- [24] Wang J, Feng J, Yan Z, et al. Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D21103.
- [25] Feng J, Wang J, Yan Z. Impact of anthropogenic heat release on regional climate in three vast urban agglomerations in China. *Adv Atmos Sci*, 2013, doi: 10.1007/s00376-013-3041-z.
- [26] Ren G, Zhou Y, Chu Z, et al. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in north China. *Journal of Climate*, 2008, 21: 1333-1348.
- [27] Hua L, Ma Z, Guo W. The impact of urbanization on air temperature across China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2008, 93: 179-194.
- [28] Portman D. Identifying and correcting urban bias in regional time series: Surface temperature in China's northern plains. *Journal of Climate*, 1993, 6: 2298-2308.
- [29] 周雅清, 任国玉. 华北地区地表气温观测中城镇化影响的检测和订正. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 743-753.
- [30] Gallo K, Mcnab A, Karl T, et al. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32: 899-908.
- [31] Gallo K, Owen T. Satellite-based adjustments for the urban heat island temperature bias. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38: 806-813.
- [32] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. A closer look at United States and global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 23: 947-963.
- [33] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48: RG4004.
- [34] Yang X, Hou Y, Chen B. Observed surface warming induced by urbanization in east China. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D14113.
- [35] Gallo K, Adegoke J, Owen T, et al. Satellite-based detection of global urban heat island temperature influence. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107: D244776.
- [36] Ren Y, Ren G. A remote-sensing method of selecting reference stations for evaluating urbanization effect on surface air temperature trends. *Journal of Climate*, 2011, 24: 3179-3189.
- [37] Chu Z, Ren G. Effect of enhanced urban heat island magnitude on average surface air temperature series in Beijing region. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63: 534-540.
- [38] Wang J, Zhang R, Wang Y. Areal differences in diurnal variations in summer precipitation over Beijing metropolitan region. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 110: 395-408.

- [39] Wang J, Yan Z, Li Z, et al. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978–2008. *Chinese Science Bulletin*, 2013(36): 4679–4686.
- [40] Zhao P, Jones P, Cao L, et al. Reconstruction, climate trend, and attribution of instrumental temperature in eastern China over the last 100 years. *J Geophys Res*, under review.
- [41] Parker D. Large-scale warming is not urban. *Nature*, 2004, 432: 290.
- [42] Parker D. A demonstration that large-scale warming is not urban. *Journal of Climate*, 2005, 19: 2882–2895.
- [43] Wang F, Ge Q. Estimation of urbanization bias in observed surface temperature change in China from 1980 to 2009 using satellite land-use data. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57: 1708–1715.
- [44] Li Q, Zhang H, Liu X, et al. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 79: 165–174.
- [45] Li Z, Yan Z. Application of Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH) to Beijing daily temperature series 1960–2006. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27 (4): 777–787.
- [46] He Y, Jia G, Hu Y, et al. Detecting urban warming signals in climate records. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30: 1143–1153.
- [47] Yan Z, Bate S, Chandler R, et al. An analysis of daily maximum wind speed in northwestern Europe using Generalised Linear Modelling. *Journal of Climate*, 2002, 15(15): 2073–2088.
- [48] Chow S. The urban climate in Shanghai. *Atmospheric Environment*, 1992, 26B: 5–15.
- [49] Bornstein R, Johnson D. Urban-rural wind velocity differences. *Atmospheric Environment*, 1977, 11: 597–604.
- [50] Peng Z, Hu F. A study of the influence of urbanization of Beijing on the boundary wind structure. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49: 1608–1615.
- [51] Fortuniak K, Klysik K, Wibig J. Urban–rural contrasts of meteorological parameters in Łódź. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 84: 1434–1443.
- [52] Klaić Z, Nitis T, Kos I, et al. Modification of the local winds due to hypothetical urbanization of the Zagreb surroundings. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2002, 79: 1–12.
- [53] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z, et al. Changes in wind speed over China during 1956–2004. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99: 421–430.
- [54] Li Z, Yan Z, Tu K, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960–2008 based on homogenized observations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28: 408–420.
- [55] González-Rouco J, Jiménez J, Quesada V, et al. Quality control and homogeneity of precipitation data in the southwest of Europe. *Journal of Climate*, 2001, 14: 964–978.
- [56] Wang X, Chen H, Wu Y, et al. New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49: 2416–2436.
- [57] Lakatos M, Szentimrey T, Birszki B, et al. Changes of temperature and precipitation extremes following homogenization. *Acta Silv. Lign. Hung*, 2007, 3: 87–95.
- [58] 江志红, 黄群, 李庆祥. 近50年中国降水序列均一性检验和订正研究. *气候与环境研究*, 2008, 13(1): 67–74.
- [59] 王萃萃, 翟盘茂. 中国大城市极端强降水事件变化的初步分析. *气候与环境研究*, 2009, 14(5): 553–560.
- [60] 聂安祺, 陈星, 冯志刚. 中国三大城市带城市化气候效应的检测和对比. *气象科学*, 2011, 31(4): 372–383.
- [61] Li Q, Zhang H, Chen J, et al. A mainland China homogenized historical temperature dataset for 1951–2004. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2009, 90: 1062–1065.
- [62] Li Z, Yan Z. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960–2008. *Atmospheric and Oceanic Sciences Letters*, 2009, 2: 237–243.

张鹏在国际组织任职

■ 本刊编辑部

全球空间交叉定标系统 (GSICS) 是在世界气象组织 (WMO) 和气象卫星协调工作组 (CGMS) 共同发起下, 于2005年成立的一个国际性协调研究机构, 其主要目的是监视、改进并统一来自全球观测系统 (GOS) 中气象与环境业务卫星的观测数据。同时, GSICS旨在为气候监测、天气预报和环境应用等, 在世界空间观测范围内提供精度一致的观测结果。迄今为止, GSICS在全球范围内拥有14家成员, 1家助理成员和2家观察员, 已经成为引领国际对地观测卫星定标工作最主要的研究机构之一。

第十五届全球空间交叉定标系统执行委员会 (GSICS-EP) 会议于2014年5月16–17日在中国广州举行, 共有30位专家到会/网络参加。本次全会的一项重要议程是推选产生新一届GSICS-EP主席, 国家卫星气象中心张鹏副主任, 也是本刊编委, 成功当选。此前该职位一直被欧美气象卫星大国所垄断, 张鹏的当选体现了近年我国气象卫星定标工作的进展已经获得

了国际同行的关注和认可: 一方面, 近年来随着风云二号、风云三号卫星的稳定业务运行, 业务定标质量逐步与国际先进水平接轨; 另一方面, 中国在国际气象卫星大家庭中的地位与日俱增, 并在世界舞台上取得了实质性的话语权。



张鹏 (左2) 在广州GSICS-EP会议上

城市排放与输送对北京上甸子站温室气体本底观测的影响分析

周凌晞¹ 姚波¹ 方双喜¹ 刘立新¹ 王振发²

(1 中国气象科学研究院, 中国气象局, 北京 100081; 2 北京市密云县气象局, 北京 101500)

摘要: 以北京上甸子区域大气本底站二氧化碳(CO₂)和几种典型卤代温室气体(HFC-134a、PFC-218和HCFC-22)浓度在线观测为例, 统计分析并匹配计算了各风向浓度距平与浓度载荷, 探讨了各季节城市排放和输送对上甸子站温室气体本底观测的影响。研究期间, CO₂本底数据比例约21.2%, 受局地 and 城市排放与输送影响, 非本底浓度比本底浓度偏高 $(3.7 \pm 1.3) \times 10^{-6}$; HFC-134a和PFC-218浓度距平和浓度载荷的特征反映了两个物种源区特征的差别; HCFC-22浓度特征与空调制冷剂夏高冬低的季节排放规律相一致。

关键词: 北京上甸子站, 温室气体本底观测, 城市排放, 输送

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.008

Study on Impact of City Emission and Transportation on Greenhouse Gases Background Observation at Shangdianzi Regional Station, Beijing

Zhou Lingxi¹, Yao Bo¹, Fang Shuangxi¹, Liu Lixin¹, Wang Zhenfa²

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Miyun County Meteorological Bureau, Beijing 101500)

Abstract: In this study in-situ measurement of carbon dioxide (CO₂) and several halogenated greenhouse gases (HFC-134a, PFC-218 and HCFC-22) were chosen for the case study. We did statistical analysis and calculated concentration anomalies and loadings of each wind direction and discussed impact of city emission and transportation on greenhouse gases background observation at Shangdianzi Regional Station in different seasons. In the study period, the ratio of background concentration of CO₂ was about 21.2%. The difference of non-background concentration and background concentration was $(3.7 \pm 1.3) \times 10^{-6}$ by local and city emission and transportation. Anomalies and loadings of HFC-134a and PFC-218 reflected the difference of source characteristics of these two compounds. The seasonal trends of HCFC-22 were consistent with the emission pattern of refrigerant.

Keywords: Beijing Shangdianzi Regional Station, greenhouse gases background observation, city emission, transportation

1 引言

自1750年工业革命以来, 人类活动造成温室气体排放总量不断增加, 大气中温室气体浓度逐年上升并达到历史最高水平, 引发了全球变暖等一系列全球及区域性环境问题。迄今为止, 国际社会引用的全球温室气体浓度资料主要来自世界气象组织(WMO)全球大气观测网(GAW)。GAW由60多个国家的200多个本底站组成, 但这些站点的地理分布很不均匀, 发达

国家站点较多, 亚洲内陆地区站点尤为稀缺^[1]。国内相关部门从不同角度出发, 采用多种手段先后开展温室气体观测已取得了一系列重要成果, 各具优势和特点。中国气象局侧重于较大区域内温室气体浓度的监测, 在我国典型气候区建设7个本底站并逐步开展温室气体观测。大气温室气体浓度变化主要有在线观测和采样分析两种方式, 国际观测网的长期经验和研究结果表明, 在线观测的时间分辨率高, 可实时反映物种浓度的动态变化, 捕捉特定时期内(如1~3d)污染气团及其输送路径, 辅以多物种协同观测有助于判断物种来源一致性及相互比例关系^[1, 2]。掌握典型区域温室气体本底浓度水平、变化状况和输送影响, 才能更准确地测算温室气体排放源和吸收汇的动态变化, 服务于气候变化应对和碳减排等决策。

收稿日期: 2013年6月3日; 修回日期: 2013年7月17日
第一作者: 周凌晞(1965-), Email: zhoulx@cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41030107, 41175116); 国家重点基础研究发展计划(2010CB950601); 国际科技合作项目(2011DFA21090)

2 站址及观测方法简介

上甸子站位于北京市密云县高岭镇上甸子村(117°07'E, 40°39'N, 海拔293.9m), 下垫面主要为果树、松树、农田等植被, 位于北京市主城区东北方向, 距市中心直线距离约100km。该站2005年入选科技部“国家大气成分本底野外观测研究站”, 也是世界气象组织(WMO)全球大气观测网(GAW)的区域大气本底站之一。全年盛行风向为东北风和西南风^[9]。

大气CO₂和卤代温室气体均取自采样塔顶, 2011年10月前为位于观测场内10m采样塔, 2011年10月后为位于观测场北的80m梯度塔。CO₂在线观测系统的主机采用波长扫描光腔衰荡G1301型高精度CO₂分析仪^[4]。用KNF泵和外径10mm的Syflex1300专用进气管, 经初级和二级冷阱除去水汽, 用8口样品选择阀自动控制空气或标气周期性进样, 主机之前安装一个高精度质量流量控制器^[5, 6]。大气卤代温室气体浓度在线观测系统的主机采用自行设计组装的GC-MS系统(HFC-134a、PFC-218)和GC-ECDs系统(HCFC-22), 用GAST无油泵和KNF泵将空气抽进约100m远的实验室内, 系统原理、分析和定量方法参见本研究组已发表的论文^[7, 8]。采用美国国家海洋与大气管理局地球系统研究实验室(NOAA/ESRL)、

改进的全球大气实验网(AGAGE)、欧盟卤代温室气体观测网(SOGE)等国际通用的定量方法、数据处理方法和观测质量目标, 采用的各级标气可溯源至世界气象组织(WMO)或斯克里普斯海洋学研究所(SIO)国际标准。大气CO₂浓度处理为小时平均值, HFC-134a和PFC-218空气样品时间分辨率为2h, HCFC-22空气样品时间分辨率为80min。

3 城市排放与输送对温室气体本底观测的影响分析

3.1 大气CO₂浓度在线观测的影响分析

2009年1月—2011年12月在线观测资料统计分析结果显示, 该站大气CO₂浓度变化较大, 小时平均值的标准偏差在春夏秋冬四季分别为 9.5×10^{-6} 、 21.5×10^{-6} 、 15.9×10^{-6} 和 12.7×10^{-6} (摩尔比, 下同), 表明上甸子站观测的大气CO₂浓度较多地受到局地 and 城区排放输送影响^[9]。图1是2009年1月—2011年12月上甸子站不同季节16风向CO₂浓度载荷。

上甸子站4季CO₂浓度风玫瑰图差异较大, 表明局地源对观测浓度有复杂影响。该站年主导风向ENE和WSW, 风频分别大于10%和17%。WSW方向是北京城区, 除夏季外该扇区CO₂浓度高于季节平均, 尤其冬季燃煤供暖导致该风向CO₂浓度明显偏高(相比

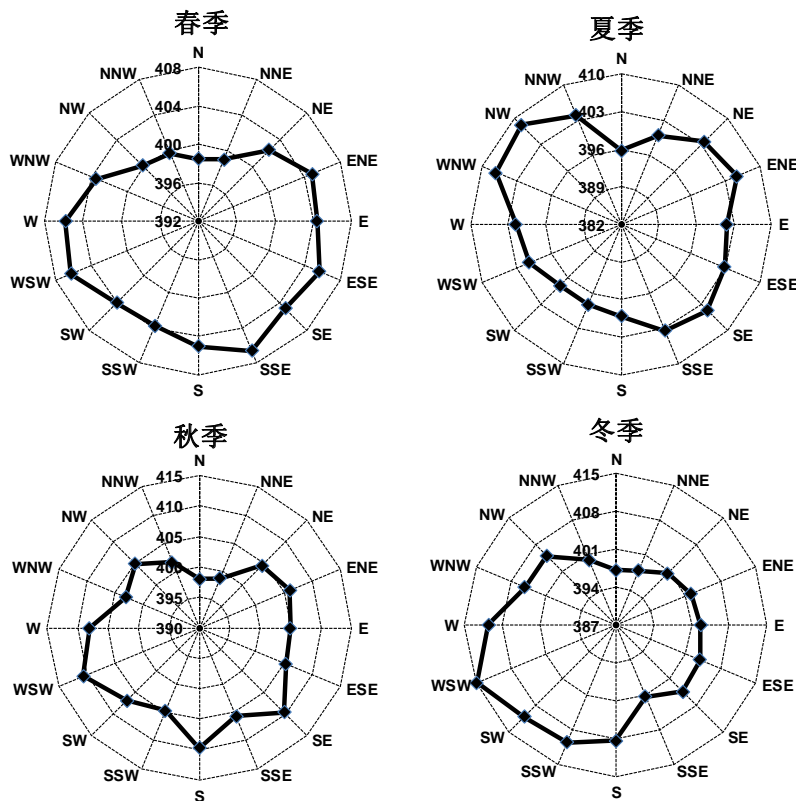


图1 上甸子站不同季节16风向CO₂浓度载荷(摩尔比(×10⁻⁶))

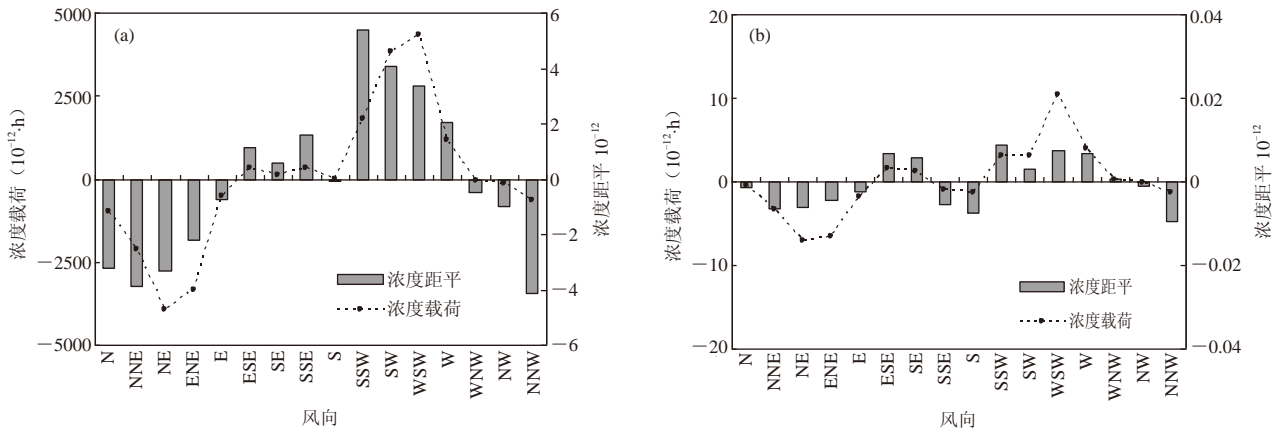


图2 2010年5月—2011年4月上旬子站HFC-134a (a) 和PFC-218 (b) 风向浓度距平和浓度载荷

季平均抬升约 $(11.7 \pm 1.7) \times 10^{-6}$ 。N方向为无人山丘，CO₂浓度明显偏低。CO₂浓度随风速增大明显降低，静风下CO₂平均浓度为 $(411.0 \pm 1.3) \times 10^{-6}$ ，5级风速CO₂浓度降低至 $(398.9 \pm 1.4) \times 10^{-6}$ ，可能是较大风速稀释了局地排放累积的CO₂^[10, 11]。选取每日混合层较高时段数据，剔除较高风向载荷及静风数据^[12]，获得上甸子站本底CO₂数据比例约21.2%，受局

地和城市排放与输送的影响，非本底浓度比本底浓度平均偏高 $(3.7 \pm 1.3) \times 10^{-6}$ 。

3.2 大气 HFC-134a 和 PFC-218 浓度在线观测的影响分析

HFC-134a主要用于车载空调，城市是其主要源区^[13]；PFC-218主要用于半导体和电子工业过程的清洗和蚀刻等，但北京城区并非其强排放源^[14]。图2是

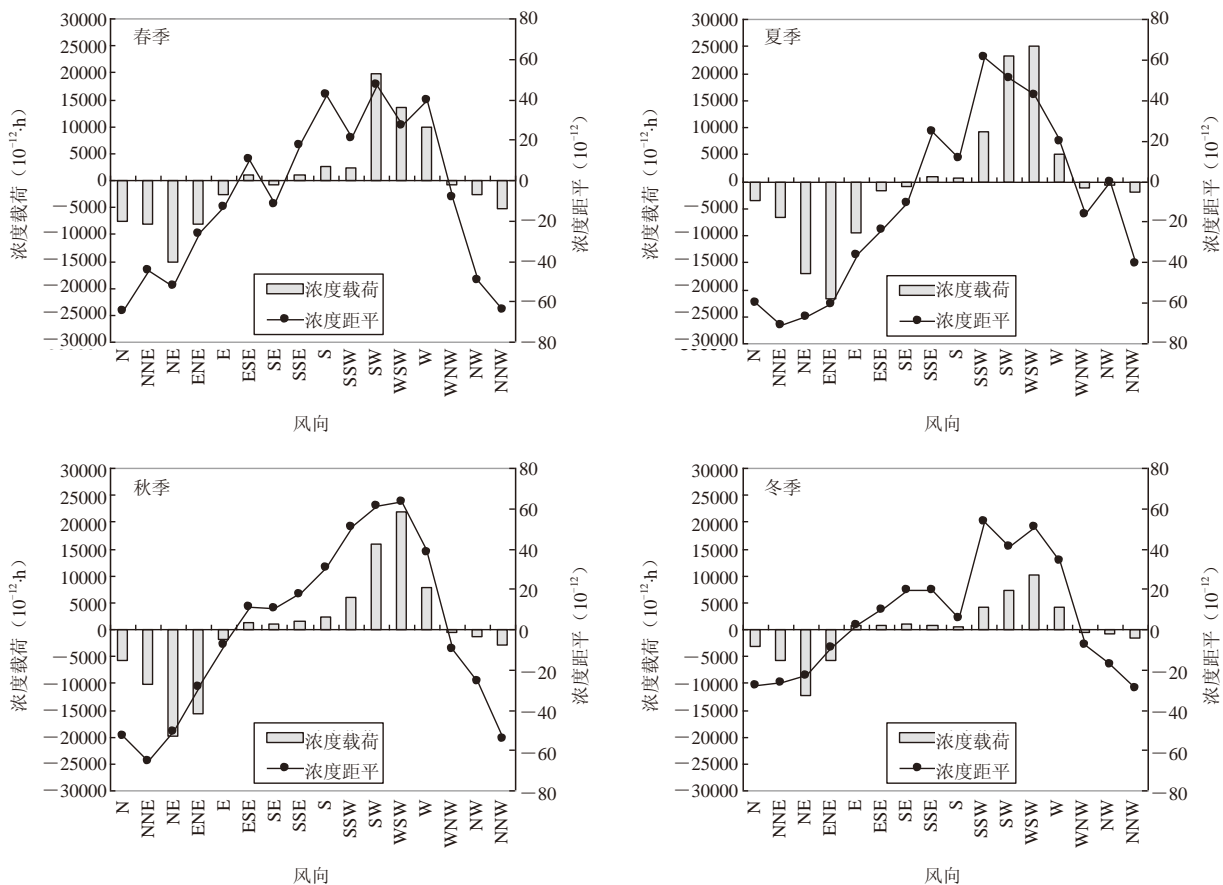


图3 2007年3月—2011年2月上旬子站HCFC-22不同季节风向浓度距平与浓度载荷

2010年5月—2011年4月上甸子站HFC-134a和PFC-218风向浓度距平和浓度载荷。HFC-134a空间变率大,部分风向浓度距平大于 5×10^{-12} 。HFC-134a高浓度水平主要由W—WSW—SW—SSW方向(北京城区方向)贡献引起,N—NNE—NE—ENE方向则造成整年HFC-134a浓度水平降低。NNW虽浓度距平较低,但风频较小,对浓度载荷的影响较小。其他扇区对HFC-134a总体浓度水平影响较小。PFC-218浓度距平没有明显规律,正距平分布在ESE、SE、SSW、SWS、WSW、W等扇区。尽管浓度载荷高低值分布与HFC-134a相似,但数值要低3个量级,即上甸子站各风向PFC-218浓度较一致,没有明显的源区。HFC-134a和PFC-218浓度距平和浓度载荷的特征反映了两个物种源区特征的差别。

3.3 大气 HCFC-22 浓度在线观测的影响分析

HCFC-22广泛用于商业制冷、商业和住宅空调及热泵中,其臭氧层损耗潜能(ODP)远小于第一代制冷剂CFC-11和CFC-12,但其ODP值仍大于0,已经有几种制冷剂如HFC-134a等作为其替代物^[13]。图3是2007年3月—2011年2月,上甸子站HCFC-22不同季节风向浓度距平与浓度载荷,HCFC-22在春夏秋冬四季的浓度变化规律基本一致,浓度距平及浓度载荷最大的前3位风向均属西南扇区(S至W,即北京城区方向),反映了来自北京城区方向的排放和输送对上甸子站HCFC-22浓度均为正的贡献。值得注意的是,冬季北京城区方向HCFC-22的浓度距平与浓度载荷均小于夏季和秋季,这与北京城区空调制冷剂HCFC-22夏高冬低季节排放规律相一致。

4 结语

不同季节风向距平及浓度载荷统计分析表明,北京上甸子站大气CO₂和几种典型卤代温室气体(HFC-134a、HCFC-22)浓度在线观测均在不同程度上受到城区排放及输送的影响。物种浓度和地面风实测数

据—时间序列匹配分析及本底浓度筛分结果表明,北京上甸子站不仅可以捕捉到城市排放及较高浓度空气团输送的信息,也能获得华北区域的物种本底浓度水平。合理筛分原始资料、分类使用是科学有效的手段。

致谢:感谢北京上甸子站技术人员日常检查及维护在线观测系统,并进行每周flask瓶采样。

参考文献

- [1] 周凌晞,刘立新,张晓春,等.中国温室气体本底浓度网络化观测的初步结果.应用气象学报,2008,19(6):641-645.
- [2] 周凌晞,周秀骥,张晓春,等.瓦里关温室气体本底研究的主要进展.气象学报,2007,65(3):458-468.
- [3] 姚波,周凌晞,张芳,等.上甸子区域大气本底站HCFC-22浓度连续观测研究.环境科学,2010,31(8):1749-1754.
- [4] Crosson E R. A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor. Applied Physics B,2008,92(3):403-408.
- [5] 臧昆鹏,周凌晞,方双喜,等.新型CO₂和CH₄混合标气标校流程及方法.环境化学,2011,30(2):511-516.
- [6] 方双喜,周凌晞,臧昆鹏,等.光腔衰荡光谱(CRDS)法观测我国4个本底站大气CO₂.环境科学学报,2011,31(30):624-629.
- [7] 姚波,周凌晞,张芳,等.气相色谱-电子捕获检测法在线观测12种卤代温室气体.环境化学,2010,29(6):1158-1162.
- [8] Yao B, Vollmer M K, Zhou L X, et al. In-situ measurements of atmospheric hydrofluorocarbons (HFCs) and perfluorocarbons (PFCs) at the Shangdianzi regional background station,China. Atmos Chem Phys,2012,12:10181-10193.
- [9] Liu L X, Zhou L X, Zhang X C, et al. The characteristics of atmospheric CO₂ concentration variation of four national background stations in China. Sci China Ser D: Earth Sci, 2009, 52(11): 1857-1863, doi: 0.1007/s11430-009-0143-7.
- [10] Haszpra L, Barcza Z, Hidy D, et al. Trends and temporal variations of major greenhouse gases at a rural site in Central Europe. Atmospheric Environment, 2008, 42: 8707-8716.
- [11] Zhou L X, Tang J, Wen Y P, et al. The impact of local winds and long-range transport on the continuous carbon dioxide record at Mount Waliguan, China. Tellus, 2003, 55B: 145-158.
- [12] Fang S X, Zhou L X, Masarie K A, et al. Study of atmospheric CH₄ mole fractions at three WMO/GAW stations in China. J Geophys Res, 2013, 118 (D10): 4874-4886, doi: 10.1002/jgrd.50284.
- [13] 万丹.中国主要ODS和HFCs物质的排放清单及其验证研究.北京大学博士论文,2010.
- [14] Mühle J, Ganesan A L, Miller B R S, et al. Perfluorocarbons in the global atmosphere: Tetrafluoromethane, hexafluoroethane, and octafluoropropane. Atmos Chem Phys, 2010, 10: 5145-5164, doi:10.5194/acp-10-5145-2010.

物联网自动气象站的试制

唐慧强¹ 李超² 李全月¹

(1 南京信息工程大学信息与控制学院, 南京 210044; 2 南京慧明仪器仪表有限公司, 南京 210032)

摘要: 为适应现代气象检测的需求, 试制了物联网自动气象站。温度、湿度、风、气压、降水等气象传感器节点以及路由器、协调器构成局域无线传感器网络, 并通过数据通信器利用3G、GPRS、Internet等与远程计算机组成广域网。远程计算机接收、解析数据, 并经质量控制后保存到网络实时数据库。实现了气象数据的管理及分发, 并可通过用户手机或互联网实现实时数据查询。

关键词: 物联网, 自动气象站, 传感器节点

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.009

Design of the Automatic Weather Station Based on IOT

Tang Huiqiang¹, Li Chao², Li Quanyue¹

(1 College of Information and Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
2 Nanjing Huiming Corp. of Instruments, Nanjing 210032)

Abstract: In order to meet the needs of modern meteorological detection, automatic weather station of the Internet of Things is developed. Local area wireless sensor networks are composed of temperature, humidity, wind, pressure, precipitation and other meteorological sensor nodes, routers, and the coordinator. Wide area networks are also composed of the data communicator and remote computer through 3G, GPRS and the Internet. Data are received, analyzed and stored to real-time network database by the remote computer after the quality control. Meteorological data management and distribution is implemented and the data can be consulted through the user's mobile phone or Internet computer.

Keywords: Internet of Things, automatic weather station, sensor nodes

1 引言

自2005年物联网概念正式提出以来, 物联网技术得到高度关注与高速发展。物联网通过信息传感设备, 把任何物品与互联网连接起来, 实现信息交换。物联网是泛在网络的重要组成部分, 向下又包容了无线传感器网络、互联网、数据库等技术, 是互联网等技术与应用延伸的延伸。本文针对气象应用, 基于无线传感器网络技术局域连接各气象传感器节点, 构建了自动气象站, 并在此基础上结合远程数据通信、数据库系统、数据分发系统等, 构建了一个典型而完整的物联网概念系统。

基于物联网技术的无线检测系统相对于传统的观测体系就像移动电话相对于固定电话的优势一样: 安装方便, 移动灵活, 维护简单, 备份容易, 数据通信可靠。而这些特性非常适合需要众多气象要素的常规

观测、应急观测、科学试验等场合。

检测系统经历了数字式、智能式、总线式到无线传感器网络为代表的物联网阶段。气象观测由于观测数据连续性、大量台站的更新代价过大等原因而相对保守, 至今仍主要采用集中式的检测方式^[1, 2], 直到近几年才推出了具有CAN总线的混合型的数据通信方式, 但存在安装维护繁琐等问题。而目前基于无线传感器网络的气象观测仪器开始进入应用阶段, 如美国的HOBO ZW系列无线数据节点等, 用于建筑物的能量和温湿度等环境条件检测。美国Vantage Pro2无线自动气象站也开始普及, 但精度较差, 如温度误差约为0.5℃, 相对湿度约为3%, 气压约1hPa。国内的南京慧明仪器仪表有限公司等已经把无线传感器网络技术应用于农业等非气象部门的气象检测。

本文在环境重金属检测网络化技术研究的基础上, 采用物联网技术, 实现无线化、网络化的自动气象观测, 并提高气象仪器的准确度, 采用移动通信网或互联网实现远程通信, 利用数据库技术进行数据管理与分发, 从而降低布站、维护等成本, 并提高集成度, 构建全天候、高精度、高可靠性的气象观测系

收稿日期: 2013年4月24日; 修回日期: 2013年6月18日

第一作者: 唐慧强(1965—), Email: thq@nuist.edu.cn

资助信息: 国家重大科学仪器设备开发专项任务

(2012YQ170003-5)

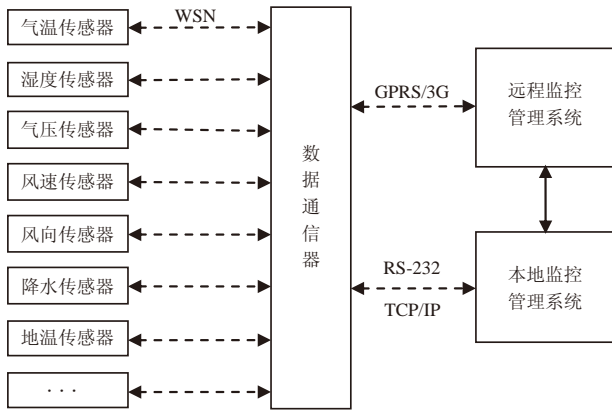


图1 物联网自动气象站的基本架构



图2 HM-DZY1型无线温湿度计

统。本文涉及基于物联网技术的自动气象站系统设计，包括无线气象传感器节点、路由器、协调器、通信器、数据接收软件、本地及远程动态数据库系统以及信息分发系统的设计。

2 气象观测系统架构

物联网自动气象观测系统架构极其简单（图1），由气象传感器节点、数据通信器、数据库等构成。利用温度、湿度、气压、风速、风向、降水、地温等气象传感器，融合无线传感器网络通信部件，构成了气象传感器节点。数据通信器一方面接收气象传感器节点发来的数据，组建局域网，另一方面，通过GPRS、3G或互联网技术，把数据传送到位于监控中心的远程数据库，构建集成气象观测系统。

3 传感器节点设计

3.1 气象传感器

气象传感器是自动气象观测系统的基础。由于气象传感器繁多，本文仅以温度传感器节点的设计要点为例来介绍。

气温是最成熟的检测参数之一，可以利用热电阻、热敏电阻、热电偶、半导体PN结等方法来进行数字化检测。铂热电阻的稳定性相对较好，但目前气象检测应用还是不够理想，误差的原因有传感器自身的准确性，以及自热效应、通风、迟滞、辐射等。

本文采用了稳定性优越的Pt1000铂电阻，并经过进一步的筛选、老化处理来保证精度。铂电阻在温度为 t 时，阻值为： $R=R_0(1+at+\beta t^2)$ ，具有二次项，因此需要进行非线性校准。极端精度需求的情况下，可以采用高次函数或神经网络等方法来提高精度。通过24位的高精度模数转换器等电路来检测铂电阻值，并利用微控制器来反演出温度值。自热效应是影响检测精度的重要因素之一，根据 $P=U^2/R$ ，在输出电压 U 不变时，由功率与电阻的反比关系说明电阻越大，则功率越小所以自热效应越小。如零度时可以确保Pt1000正常工作的 $100\mu A$ 的激励电流就可以取得 $100mV$ 的输出电压，而采用Pt100时需要 $1mA$ 的激励电流才能输出相同的电压，并且增加了自热效应。经试制，单要素的温度计精度可达到 $0.01^\circ C$ ，而试制的气象用HM-DZY1型无线温湿度计（图2），精度为 $0.02^\circ C$ ，相对单要素温度计略有下降，具体检测结果如表1所示。测试时，所采用温度发生器为FLUKE7080，温度标准器采用配备二等基准铂电阻的FLUKE1529，由于温度发生器与温度标准器之间也具有较大误差，所以测试过程中以温度标准器为基准。此外，HM-DZY1型无线温湿度计的相对湿度在 $10\% \sim 95\%$ 的量程范围内的精度达到 0.5% ，也可较好地满足气象检测的要求，在环境温度 $15^\circ C$ 时的测试结果如表2所示。

表1 HM-DZY1型无线温湿度计的温度误差（单位： $^\circ C$ ）

发生器 设定	标准器		传感器1		传感器2		传感器3		传感器4		传感器5	
	读数	偏差	读数	误差	读数	误差	读数	误差	读数	误差	读数	误差
-40	-39.928	-0.072	-39.940	-0.012	-39.916	0.012	-39.945	-0.017	-39.943	-0.015	-39.925	0.003
-10	-9.983	-0.017	-9.998	-0.015	-9.965	0.018	-10.001	-0.018	-9.969	0.014	-9.990	-0.007
-1.5	-1.498	-0.002	-1.516	-0.018	-1.484	0.014	-1.516	-0.018	-1.500	-0.002	-1.510	-0.012
20	19.979	0.021	19.968	-0.011	19.981	0.002	19.973	-0.006	19.976	-0.003	19.971	-0.008
25	24.975	0.025	24.963	-0.012	24.971	-0.004	24.964	-0.011	24.969	-0.006	24.963	-0.012
40	39.953	0.047	39.943	-0.010	39.942	-0.011	39.970	0.017	39.935	-0.018	39.941	-0.012

表2 HM-DZY1型无线温湿度计的相对湿度误差 (%)

标准值 读数	传感器1		传感器2		传感器3		传感器4		传感器5	
	读数	误差	读数	误差	读数	误差	读数	误差	读数	误差
18.00	18.28	0.28	18.11	0.11	18.12	0.12	18.15	0.15	18.14	0.14
30.00	30.07	0.07	29.92	-0.08	29.86	-0.14	29.84	-0.16	29.92	-0.08
53.00	53.04	0.04	52.89	-0.11	52.80	-0.20	52.71	-0.29	52.87	-0.13
77.00	77.07	0.07	76.81	-0.19	76.71	-0.29	76.63	-0.37	76.74	-0.26
95.00	95.15	0.15	94.96	-0.04	94.81	-0.19	94.70	-0.30	94.85	-0.15

3.2 无线传感器网络及通信系统设计

本系统中采用CC2530片上系统等电路构成无线传感器网络基础模块,并利用IEEE 802.15.4协议等构建路由器、协调器。气象数据通信器由协调器、ARM处理器、GPRS/3G模块、TCP/IP接口、液晶显示器等构成(图3)。其中,协调器用于无线传感网络的组网与数据的无线接收;液晶显示器用于显示局地的气象观测数据;利用GPRS/3G通信模块进行无线远程通信,利用TCP/IP协议的以太网接口实现互联网的接入。此外,通过路由器实现数据的转发与延长通信距离,确保在数千米以内,采用无线传感器网络实现局域通信;由于气象要素众多,网络结构复杂,因此统一了各网络层的数据通信格式,包括传感器节点与协调器、协调器与数据通信器、数据通信器与远程主机等之间的协议规范。

4 远程气象检测及数据库系统

数据采集系统采用C/S架构,以SQL Server 2005作为后台数据库,选择Delphi 7.0作为系统的开发工具,来实现系统中各模块的设计与开发。远程计算机接收自动气象站通信器发送的气象数据,包括站点编号、采集时间、气象要素等有关信息,并进行解析后取得观测数据,GPRS数据采集界面如图4所示。研制

了气象要素数据质量控制系统,发现问题时返回重发或重测命令,以取得正确的气象数据并保存到数据库中,以进一步处理。

网络服务系统采用了B/S架构,通过实时数据库系统的访问提供了数据查询功能,包括实时及历史数据的显示及时间变化曲线图、数据下载、地图显示及等值线绘制等功能。同时还提供了台站信息等的管理,实现了数据备份、下载、上传等系统维护的功能。台站设置、资源开放等管理功能见自动气象观测系统管理平台网页(图5),其中部分功能对匿名用户开放,可直接通过<http://www.chinahuiming.cn/qx.html>查询。图5显示的界面中,温湿度是放置于环境相对稳定的房间以及具有空调的房间中的一体化无线温湿度传感器所测得,整体一致性相对较好,而误差主要来源是环境中的温湿度不一致性,与恒温槽中相比明显变差。

地图显示系统可以对全国各自动站在Google Map、Google Earth等地图或系统上进行布置,并可查询各站点的实时气象数据情况(图6)。

手机端采用了C/S架构,利用Android操作系统设计了手机客户端软件,提供实时观测及预报的气象信息,并对温度、湿度、气压等气象要素进行等值线的绘制,并利用手机GPS定位功能实时更新地图及位置



图3 气象数据通信器



图4 远程实时数据采集系统



图5 自动气象观测系统的网络平台



图6 气象信息显示系统



图7 手机用户系统



图8 三传感器气温日变化的对比观测

信息的同时，能根据需要查询实时气象信息，其中实时天气界面如图7所示。

5 小结

本文试制的物联网自动气象站，相对传统的有线式观测系统具有机动性好、高精度、低功耗、可远程操作等特点。尤其是高精度特性，本系统的温度传感器与其温度二等基准达到优于 0.02°C 的一致性，其分辨率可以定制成 0.002°C ，甚至可以敏感地监测到百叶箱或室内的微弱辐射影响。图8是室温日变化观测结果，最大偏差 0.04°C ，其他如防辐射罩之间、百叶箱内等温湿度的观测比较也可以在该网站上直接查询到。联网几个月以来，观测数据稳定，各传感器之间的偏差也没有发生明显变化，除观测计算机停电外，没有出现数据故障现象。室外观测由于环境温度变化较快，一致性会略有降低，而气压观测由于响应速度快，研制的各HM-AP1无线气压传感器的一致性可以达到 0.05hPa 以内。

该物联网自动气象站安装使用简单，适合于科学研究、大型试验，也可用于实际气象业务观测中，温度、气压、湿度等传感器具有极高的精度，已经远远超出WMO的要求^[3]，可以充当观测现场或计量室计量检定的标准仪器。所研制的温湿度、气压传感器按1次/min的观测频率，其内置电池考虑自放电后还可以确保6年以上的工作时间。目前物联网自动气象站已经具有温度、湿度、气压、风速、风向、降水、多种辐射、各层地温、各层土壤水分、日照时数等多种传感器。部分功能已经在农业环境检测上应用，近一年的运行使用情况表明，系统运行稳定可靠，能够胜任长期的环境气象观测工作。

参考文献

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003.
- [2] 李黄. 自动气象站实用手册. 北京: 气象出版社, 2007.
- [3] WMO-No. 8. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (Seventh edition). 2008.

我国海洋气象数值预报业务发展与思考

黄彬¹ 阎丽凤² 杨超¹ 徐晶¹

(1 国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 山东省气象局, 济南 250000)

摘要: 近年来, 我国海洋气象数值预报业务有了一定的进展, 国家级和沿海省台建立了海雾、海浪、风暴潮等一些海洋气象数值预报模式。通过对我国沿海省台业务应用中的海洋气象数值预报模式的调查, 概述了我国现行海洋气象数值预报业务模式的发展现状, 分析了海洋气象数值预报目前存在的问题和面临的挑战, 并探讨了未来的发展方向。

关键词: 海洋气象, 数值预报, 业务发展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.010

Development of Marine Meteorological Numerical Prediction in China

Huang Bin¹, Yan Lifeng², Yang Chao¹, Xu Jing¹

(1 National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Shandong Province Meteorological Bureau, Jinan 250000)

Abstract: In recent years, China's marine meteorological numerical prediction has achieved some progress. National-level cities and coastal provinces have established a number of sea-fog, wave, storm-tide-ranging marine meteorological numerical prediction models. Through the investigation of marine meteorological numerical prediction models in China's coastal provinces and their application, this paper summarizes the development status of the Chinese marine meteorological numerical prediction model, analyses the existing marine meteorological numerical prediction problems and challenges, and discusses the future development and suggestion of marine meteorological numerical prediction.

Keywords: marine meteorological, numerical forecasting, professional development

1 引言

我国海洋气象预报业务经过近几年的发展, 取得了长足进步, 已经初步建立了国家级、海洋区域中心级、省级共3级的海洋气象预报预警服务业务体系^[1-4]。海洋气象的技术支撑体系——海洋气象数值预报模式也得到发展和应用^[5]。除大气数值预报模式外, 还有海雾、海浪、风暴潮、海洋污染物扩散等海洋气象数值模式应用于国家气象中心和沿海各省级海洋气象预报服务业务中, 为海洋服务提供技术支持和客观产品。本文旨在分析目前我国的海洋气象数值预报业务产品研发和使用现状, 为我国海洋气象数值模式高效、集约发展和未来长远规划提供思路。

2 海洋气象数值预报的业务进展

2.1 国外海洋气象数值预报发展

从20世纪70年代开始, 美国有专职的研究机构

Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB) 和 Meteorological Development Laboratory (MDL) 发展专业化的海洋气象数值预报, 并负责把模式产品转化应用到业务中, 业务单位负责评估和检验并反馈给研究机构改进模式, 形成研发→业务转化应用→评估→再研发的循环机制。

2.1.1 海雾数值预报模式

美国于1989年初步建立了能见度数值预报系统, 为预报员提供客观指导产品。系统提供4—9月的北太平洋和北大西洋的雾和能见度12h间隔的72h预报, 当时的预报产品还不适用于沿岸地区。1998年, 新的预报系统在全球预报模式(GFS)里嵌入了云模式, 并使用了Stolinga和Warner提出的一个能见度计算公式^[6]。目前版本的预报系统(NCEP MMAB Global Visibility System, 2006年)是建立在GFS模式基础上的, 输出结果为能见度, 范围为0~20000m, 预报时效为168h, 预报间隔3h, 每天起报4次。

2.1.2 海浪数值预报模式

海浪的预报方法分为人工预报方法和数值预报方法。人工预报方法包含由风资料计算海浪要素的预

收稿日期: 2013年5月13日; 修回日期: 2013年12月12日
第一作者: 黄彬(1971—), Email: hbzbj199928@163.com
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206001)

报方法、海浪经验统计预报方法和半经验半理论预报方法。20世纪50年代至今，海浪数值预报模式得到了迅速发展。目前的主要计算模型可以分为3类：第1类是基于Boussinesq方程的计算模型，是直接描述海浪波动过程水质点运动的模型；第2类是基于缓波方程的计算模型，它是基于海浪要素在海浪周期和波长的时空尺度上缓变的事实；第3类是基于能量平衡方程的计算模型，主要用于深海和陆架海的海浪计算，但是对于近岸较大范围波浪计算也有很大优势。1983—1986年，德国、荷兰、英国、法国、挪威等国的40多名海洋专家研究发展了适用于全球深水和浅水的海浪数值计算模式。它采用当今各种海浪理论研究和海浪观测新成果，应用了物理上较合理、计算上较精确的源函数，在计算时对算法进行优化，使它成为代表当今海浪预报技术世界水平的海浪数值计算模式。第3代海浪模式的特征是直接计算波波非线性相互作用，将海浪模拟归结为各源函数的计算。目前应用较为广泛的第3代海浪模式主要有WAM模式、SWAN模式和WAVEWATCH模式等。

2.1.3 风暴潮数值预报模式

风暴潮的预报方法很多，总体分为两大类：经验统计预报方法和数值预报方法。

经验统计预报方法主要是基于长期的历史资料，用数理统计的方法建立气象要素与特定地点的风暴潮之间的经验函数关系。该方法主要包含相似型预报法和单站经验统计方法。随着计算机技术的不断进步，数值预报方法已经成为世界各国进行风暴潮预报采用的主要方法，风暴潮的数值计算始于20世纪50年代，70年代达到昌盛时期。进入21世纪，风暴潮模式的研究主要集中于近岸浪—风暴潮—潮汐和洪水的多向耦合数值预报研究、风暴潮漫堤漫滩风险预报研究，以及应用这些模式进行沿海重要区域和城市的风暴潮灾害风险评估和区划工作。在美国，Jelesnianski^[7]进行了不考虑和考虑底摩擦的风暴潮数值计算，并于1972年建立了著名的SPLASH模式。进入20世纪80年代，美国在SPLASH模式的基础上又进行了SLOSH模式的研究，这个模式能预报海上、陆地以及大湖区的台风风暴潮，在风暴潮防灾减灾中发挥了较大作用，该模式在全世界广泛使用，并于20世纪80年代末由国家海洋环境预报中心引入中国。英国的自动化温带风暴潮预报模式“海模式”（Sea Model）于20世纪70年代问世，“海模式”是Bidston海洋研究所在Heaps的二维线性模式的基础上发展起来的。日本气象厅于1998年开始业务化运行台风风暴潮数值预报，并在风暴增水中

耦合了天文潮预报。近几年，日本气象厅发展了基于多台风路径的风暴潮集合预报系统并投入业务化运行。

2.2 国内海洋气象数值预报发展

国家气象中心、海洋区域气象中心（天津、上海、广东）和沿海省市气象部门建立了基于全球或区域大气模式的海洋数值预报系统，开发的海洋气象数值模式主要有海雾、海浪、风暴潮。

海洋气象数值模式在海洋气象服务方面发挥了显著效益。海洋气象数值预报不仅为精细化的海洋保障服务提供了技术支持，如2008年奥运青岛奥帆赛气象保障服务中5km分辨率黄渤海海浪模式、黄渤海海雾模式提供了大量精细化客观产品；而且，海洋气象数值预报为海洋灾害（海上大风、海雾、风暴潮）的预警提供技术支撑，模式可以提前对海洋灾害天气的发生给予警示作用；同时，模式为满足快速增长的专业化服务需要提供客观产品，海洋专业化服务需求中长期预报时效产品，目前海洋气象对外发布72h时效主观预报产品，海洋气象数值预报弥补了主观预报的不足，如海上大风、海浪模式可以提供240h长时效的全球客观数值预报产品。模式也为亚丁湾海军护航、利比亚海上撤侨、日本核泄漏海洋污染扩散等远海海域预报服务产品提供了客观技术保障。

尽管国家级、海洋区域中心、沿海省台开发了海洋气象数值预报模式，但是海洋气象数值预报模式的种类和数量不等，且采用的基础模式的版本各家不一，模式的预报区域重叠，模式产品互相不共享，没有形成高效节约的海洋气象模式发展框架结构体系。下面具体阐述每类海洋气象模式的开发状况。

2.2.1 海雾数值模式

海雾模式（表1）基本是对WRF模式加以优化，在海雾生消变化规律的基础研究上，综合考虑大气边界层、云辐射等方案，结合地表能量收支、海盐粒子、液态水重力沉降等物理因素，对海雾进行数值模拟和预报。运行海雾模式的有国家气象中心、河北省气象局、山东省气象局、上海市气象局、浙江省气象局、福建省气象局，模式分辨率从15km到30km不等，预报时效从24h到168h不等，气象背景场有T639、GFS模式输出、T213模式输出等几种背景场资料，开发单位有中国气象局台风海洋预报中心和数值预报中心、中国海洋大学、上海台风所、上海海洋气象台、浙江省气象局、福建省气象局6家单位，其中，中国海洋大学开发的同一版本海雾RAM模式在河北省气象局和山东省气象局运行。

表1 海雾（能见度）数值预报模式

模式运行单位	基础模式	区域范围	预报时效	分辨率	气象背景场	开发单位	产品
国家气象中心	WRF (WRF预报场诊断)	中国近海	72h	16.5km	WRF	中国气象局台风海洋中心与数值中心	能见度
河北省气象局	RAMS模式	渤海	48h	30km	T639	中国海洋大学	云雾要素场
山东省气象局	RAMS模式	黄渤海	72h	15km	T639	中国海洋大学	水平能见度场
上海市气象局	模式输出统计	黄海、东海	48h	9km	STI-WRF输出	上海台风所	浓雾、雾、轻雾等级预报
	WRF	华东沿海	48h	20km	GFS模式输出	上海海洋台	能见度
浙江省气象局	WRF	中国近海	168h	5km 15km 45km	GFS	浙江省气象台	能见度
福建省气象局	基于FJ-MM5的模式释用	福建及福建沿海	24h	11km	FJ-MM5分析场及预报场	福建省气象台引进	雾出现概率、雾落区
	FJ-MM5-EPS	台湾海峡及周边海域	48h	11km	探空、地面常规、T213分析场及预报场	福建省气象台引进	雾、浓雾、强浓雾概率预报

2.2.2 海浪模式

参加海浪模式（表2）研发的有中国气象局数值预报中心、中国气象局台风海洋预报中心、中国海洋大学、解放军理工大学、上海台风所、福建省气象台、广东热带所、天津气科所，海浪模式所有开发单位均采用目前应用较为广泛的WAVEWATCH III海浪模式。从运行的海浪模式范围来看，全球范围的海浪模式有3套，国家气象中心运行分别基于T213、T639两套全球海浪模式，上海海洋气象台运行一套全球海浪模式；西北太平洋区域海浪模式有4套，分别在国家气象中心、天津市气象局、上海市气象局、江苏省气象局应用；对于近海，各家海浪模式预报区域重叠较多，如国家气象中心、辽宁省气象局、天津市气象局、山东省气象局均运行黄渤海海浪模式，国家气象中心、福建省气象局、广东省气象局运行模式分辨率不等的东海和南海海域海浪模式。

2.2.3 风暴潮模式

风暴潮模式（表3）主要包含台风和温带风暴潮模式，采用三角网格，在沿岸风暴潮敏感区域的分辨率可达几百米，模式采用干湿网格判别方法，可以模拟风暴潮漫滩过程。从调查表格中可以看出有国家气象中心、辽宁省气象局、河北省气象局、天津市气象局、山东省气象局、上海市气象局、广东省气象局七家单位运行风暴潮模式，但是采用的基础模式也有7种之多，各个模式之间没有开展模式性能的比较。参加风暴潮模式研发的有中国气象局数值预报中心、中国气象局台风海洋预报中心、中国海洋大学、上海台风所、广州热带所、天津气科所。仅黄渤海风暴潮模式有国家气象中心、辽宁省气象局、河北省气象局、天津市气象局、山东省气象局、上海市气象局6家单位运行，且模式的核心版本、分辨率、气象背景场不同。

表2 海浪数值预报模式

模式运行单位	基础模式	区域范围	预报时效	分辨率	气象背景场	开发单位	主要产品
国家气象中心	WAVEWATCH III	全球	240h	55km	T213	中国气象局数值预报中心	
		全球	120h	30km	T639		
		西北太平洋	72h	11km	WRF		
		黄渤海	72h	5km	WRF	中国气象局台风海洋中心	
		东海	72h	5km	WRF		
南海	72h	5km	WRF				
辽宁省气象局	WAVEWATCH III	黄、渤海	84h	11km	WRF模式输出	德国汉堡大学 中国海洋大学	
天津市气象局	WAVEWATCH III	黄、渤海	72h	11km	WRF模式输出	天津市气科所	有效浪高 平均浪向 浪周期
	SWAN 二代新型混合型海浪模式	黄、渤海 西北太平洋	72h 168h	10km 1km 海浪11km 风场111km	WRF模式输出 GFS	天津市气科所 天津市气象台与上海台风研究所	
山东省气象局	WAVEWATCH III	黄渤海	48h	10km	MM5模式输出	中国海洋大学	
江苏省气象局	WAVEWATCH III	西北太平洋、我国近海	168h	55km 18.3km	GFS风场预报	解放军理工大学	
上海市气象局	WAVEWATCH III	全球	168h	55km	AVN	上海台风所	
		西北太平洋及我国近海	168h	11km	AVN+台风模型	上海台风所	
	SWAN	华东沿海	72h	11km	STI-WRF输出	上海海洋气象台	
福建省气象局	WAVEWATCH III	东海、南海	72h	18.3km	NCEP风场资料	福建省气象台引进	
广东省气象局	WAVEWATCH III	东海、南海	72h	25km	广州中尺度模式	广州热带所	
		东海、南海	72h	20km	广州台风模式	广州热带所	

表3 风暴潮数值模式

模式运行单位	基础模式	区域范围	预报时效	分辨率	气象背景场	开发单位	主要产品要素
国家气象中心	FVCOM	黄渤海及东海	72h	几百米	T213	中国气象局数值预报中心	风暴潮增水 表层海流分布 验潮站点增水序 列图
		黄渤海及东海	72h	几百米	ECMWF细网格	中国气象局台风海洋预报中心	
		南海区域	72h	几百米	ECMWF细网格		
辽宁省气象局	HAMOSM	渤海	84h	7.3km 1.8km	WRF模式输出	中国海洋大学	
河北省气象局	WRF模式	渤海	48h	10km	MM5	天津海洋气象台	
天津市气象局	ADI	黄、渤海	72h	10km 1km	WRF模式输出	天津市气科所	
	ECOM	黄渤海区域	72h	黄渤海7.4km×4.6km 渤海4.6km渤海湾 0.9km天津0.2km	WRF模式输出	天津市气科所	
	HAMOSM	渤海	48h	11km	MM5模式输出	天津气象台与中国海洋大学	
山东省气象局	HAMOSM	黄渤海	48h	7.5km	T639模式输出	中国海洋大学	
上海市气象局	POM	南海、东海、黄海 和渤海；长三角和 上海黄浦江	48h	20km, 50m~3km	AVN+STI-WRF	上海台风所	
广东省气象局	JMA	中国近海	48h	3.3km	广州台风模式及主 观预报	广州热带所	

我国的海洋气象数值模式总体来看技术辐射能力没有建立，国家级和海洋区域中心均没有下发海洋数值预报产品。模式研发主要以科研院所为主，同一个科研单位参与开发多种海洋气象数值预报产品。海浪模式基础模式一致，但气象背景场多，重复开发。风暴潮核心模式版本多，但是各种版本的模式没有比较。

3 问题与挑战

从海洋气象专业模式现状分析上可以看出，海洋数值模式对海洋气象业务的支撑能力有了初步体现，形成了一定的技术支撑作用。但是也可看到，海洋气象数值预报建设水平参差不齐、研究力量分散且低水平重复；海洋气象数值预报集约化程度不高、技术辐射能力低，还没有形成高效共享的海洋气象科技支撑体系。主要表现在以下方面：

(1) 海洋气象数值预报开发种类和数量不等

国家级、海洋区域气象中心和省市级海洋气象预报开发的海洋气象数值预报产品数量不等。国家级开发了海雾、海浪、风暴潮、海洋污染物扩散4种海洋气象数值预报产品，海洋区域气象中心和沿海省台运行海洋气象数值预报的数量不等，浙江、广西只有能见度模式，江苏只有海浪模式，辽宁、河北有海浪和风暴潮两种海洋气象数值预报，海南没有海洋气象数值预报。

(2) 海洋气象数值预报研究力量分散且技术辐射能力不足

省市级气象部门海洋气象数值预报基本是依托科研院所，开发海洋气象数值预报的天津气科所、上海台风所、中国海洋大学、广州热带所参与所有种类海洋气象数值预报的开发，而不是发挥自身的特长，集中力量开发一种或两种海洋气象数值预报，这样势必

造成研究力量分散。而且，海洋气象数值预报产品并没有有效地辐射到沿海省台或市级海洋气象台，国家级和海洋区域气象中心的海洋气象数值预报产品基本上是内部使用，包括国家级在内的部分海洋气象数值预报产品并没有下发。

(3) 海洋气象数值预报以引进为主，缺少后续的改进和更新

沿海省台海洋气象数值预报主要是引进科研院所的模式，或者是引入本地化运行的模式，对模式的性能没有深入的了解，伴随后期业务和服务的需求不断扩展，但却缺少对模式长远研发规划的支持和连贯性，科研院所由于没有后续科研项目的支撑也没有改进和跟踪服务的动力，因此海洋气象数值预报引进后改进和更新很少，几乎处于维持不动的状态。

(4) 缺乏对海洋气象数值预报的检验

由于海洋观测资料匮乏和科研院所资料获取的局限性，海洋气象数值预报在投放业务单位运行前，都没有做过长时间序列的检验和评估，对模式预报产品质量的好坏也没有细致地分析。

4 海洋气象数值预报发展思考和建议

(1) 加强总体设计和筹划，合理布局

为有效推进海洋气象精细化预报业务建设，应切实加强海洋气象专业模式的发展。在海洋气象数值预报发展中，应加强顶层设计和谋划，做到海洋气象数值预报业务的合理布局。国家级发展高分辨率的近海、远海全海域的海洋气象数值预报，海洋区域中心在国家级海洋气象数值预报的基础上，运行或发展近岸沿海更高分辨率的海洋气象模式向市县一级辐射的3级海洋气象数值预报的框架体系。3个区域中心拼接成覆盖中国沿岸及整个沿海的海洋数值预报产品，

拼接的中国沿海海域数值预报产品一方面下发,另一方面上传到共享平台。无论是国家级还是区域级运行的海洋气象数值预报对产品的种类和表现形式协调统一,分辨率和时效也要做统一规划。

(2) 集中研发力量,发挥科研院所在某一领域专长

目前在海洋气象方面还没有形成成熟完善的海洋气象科技支撑体系,从国外海洋气象的发展趋势来看,海洋气象数值预报以发展高分辨率海陆气耦合的海洋气象数值模式为基础,同化海洋资料再发展不同的海洋气象数值模式。国内海洋气象数值预报应集中几个重要的海洋气象研究方向,发挥科研院所对某一领域的专长,集中优势深入研究该方向的海洋气象数值模式。

(3) 积极推进模式检验和数值预报释用工作

海洋气象数值预报应用单位应联合模式研发的科研院所共同开展模式检验工作。业务单位在模式本地化运行后,应不断加强模式的检验和应用效果评估工作,并集中反馈给科研单位,为后续的模式改进和深入研发提供一手的资料。

海洋气象精细化预报业务应以数值预报(大气、海洋模式)发展为基础,积极开展模式产品解释应用工作。开展基于数值预报基础的海雾、海上大风等灾害等级使用产品,海上强对流、近岸强风等突发灾害应结合数值预报和当地预报经验,开展动力统计等解释应

用工作。结合预报员预报经验的数值预报释用方法是沿岸、沿海开展海洋气象防灾减灾的有效途径之一。

(4) 推进海洋集合预报研究和应用,丰富产品的种类和表现形式

海洋服务和陆地还是有所区别,陆地局限于固定区域,海洋服务的范围更广泛,涉及到远海乃至3大洋领域,因此发展海洋至远海的长时效海洋气象数值预报产品,可以弥补主观预报的不足。为了更好地提高海洋气象数值预报的准确率,应着力推进发展海洋集合预报,开展多模式的海上大风、海雾、海浪、海上强对流等的集合预报技术,同时不断丰富海洋气象数值预报产品的表现形式和海洋气象数值预报产品的种类。

参考文献

- [1] 崔玉玺,陆家琏,方维模,等译. 海洋气象服务手册与指南. 北京:气象出版社,1990.
- [2] 中国气象局. 中国气象现代化60年. 北京:气象出版社,2009.
- [3] 矫梅燕,章国材,曲晓波. 现代天气业务(上册). 北京:气象出版社,2010.
- [4] 矫梅燕. 关于提供天气预报准确率的几个问题. 气象, 2007, 33(11): 3-8.
- [5] 尹尽勇,徐晶,曹越男,等. 海洋气象预报业务现状与发展. 气象科技进展, 2012, 2(6): 17-26.
- [6] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(4): 385-404.
- [7] Jelensnianski CP. SPLASH (Special program to list amplitudes of surges from hurricanes) I. Landfall Storms. NOAA Technical Memorandum. NWS TDL-46, 1972.

基于GIS的实时雨情分析系统开发与应用

杨铁钢 孙令东 白秀芳 张铁栓 段心灵

(内蒙古自治区巴彦淖尔市气象局, 巴彦淖尔 015000)

摘要: 基于GIS技术, 实时雨情分析系统使雨情数据库的数据在GIS平台的电子地图相关监测点上实时显示、动态反映, 并且能够以色斑图、曲线图等直观图的形式表现出来, 为雨情动态监测信息共享提供了开放的信息空间; 同时根据模式预报做出了未来3、6、9、12、15、18、21、24h临近降水预报, 以及出现降水后根据实况降水进行后续降水的预测估计, 为降水的提前预警提供了依据; 同时还实现了任意时间段雨情的智能分析, 包括自动生成雨情分析内容和手机短信发送内容。该系统的应用, 实现了巴彦淖尔市临近降水预报业务的定时、定点、定量分析, 为预报服务人员进行决策服务提供了参考。

关键词: ArcGIS Engine, 实时雨情, 空间数据

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.011

Development and Application of the Real-time Precipitation Analysis System Based on GIS

Yang Tiegang, Sun Lingdong, Bai Xiufang, Zhang Tieshuan, Duan Xinling

(Bayannur Meteorological Bureau, Bayannur 015000)

Abstract: Based on GIS technology, the real-time precipitation analysis system enables the data of rainfall database in GIS platform on the electronic map-related monitoring point to reflect real-time precipitation dynamically and represent itself in the form of color map, chart, diagram, providing open information for the dynamic rainfall monitoring information sharing. At the same time this system makes the close-to-precipitation forecast possible in the future 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 hours according to the prediction model and the subsequent precipitation forecast easier according to the actual rainfall, truly realizing the early warning of precipitation function. It is also possible for the system to realize the intelligent analysis of any time rainfall, including automatically generating rainfall analysis content and SMS rainfall content. The application of the system will realize the timing, fixed point, quantitative analysis near the precipitation forecast business so as to assist staff to make correct and timely decisions.

Keywords: ArcGIS Engine, real-time rainfall, spatial data

1 引言

地理信息系统(GIS)具有集空间数据获取、管理、分析、建模和显示于一体的显著优势, 其在很多领域发挥了其他信息系统难以发挥的作用。GIS应用日益趋向综合, 组件式地理信息系统为新一代的GIS应用提供了全新的开发方式, 其无限扩展性、低成本、易普及、无缝集成等特点, 使其成为GIS软件发展的重要趋势^[1-4]。

GIS技术在洪水评估与防洪减灾等领域得到广泛的应用^[5-7]。气象部门防汛、防旱、防灾工作特点是实时性和实效性, 各种主要业务系统都需要通过定时获取外部系统信息, 从而针对天气情况进行分析和决

策。随着网络带宽的不断扩容和网络GIS功能的不断增强, 加上GIS技术较低的开发和管理成本、真正的信息共享、优良的跨平台性能以及方便扩展等优点, 使其成为解决雨情信息共享和多部门协作问题的首选技术方案^[8-10]。通过构建实时雨情监测分析系统, 其雨情空间信息共享平台、空间分析手段已成为地方应急部门的决策依据。本文即讨论了基于GIS的实时雨情监测分析系统的实现方法及其功能。

2 系统开发平台环境与技术流程

ArcGIS Engine是ESRI在ArcGIS9版本才开始推出的新产品, 它是一套完备的嵌入式GIS 组件库和工具库, 使用ArcGIS Engine开发的GIS应用程序可以脱离ArcGIS Desktop而运行。ArcGIS Engine面向的用户并不是最终使用者, 而是GIS项目程序开发人员。对开发人员而言, ArcGIS Engine不再是一个终端应用, 不再包括ArcGIS桌面的用户界面, 它只是一个用于开发新

收稿日期: 2013年1月14日; 修回日期: 2013年7月8日
第一作者: 杨铁钢(1982—), E-mail: ytgstudent@163.com
资助信息: 内蒙古自治区气象局青年科技创新项目(nmqnqx201209)

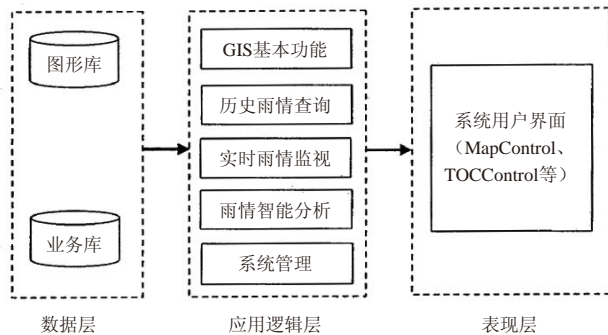


图1 系统结构

应用程序的二次开发功能组件包^[11-12]。

考虑到系统的兼容性、稳定性、响应速度、可维护性、扩展性和可升级性等要求，系统在软件配置方面尽量考虑了技术上较成熟和通用的产品，在开发模式上采纳了当前较为稳定的客户机/服务器（C/S）技术。系统的数据服务器端运行在Microsoft Windows 2000/2003 Server上，采用Microsoft SQL Server 2005数据库。客户端采用ArcGIS Engine9.3和C#编程语言开发的数据处理分析显示系统。

3 系统结构设计

系统选择C/S的3层结构模式：数据层、应用逻辑层和表现层。系统的结构如图1所示。系统数据层划分为图形数据库和业务数据库；应用逻辑层为用户提供各种基本的地图操作、历史雨情信息查询、实时雨情监测、雨情智能分析等功能。表现层由ArcGIS Engine中的MapControl、TocControl、ToolBarControl等控件来表现。

3.1 表现层

通过ArcGIS Engine的MapControl、TocControl、

ToolBarControl等控件构成系统主界面，实现与用户的交互。

3.2 应用逻辑层

应用逻辑层是由系统的功能模块构成。用户通过表现层对系统功能进行操作，应用逻辑层根据用户的操作从数据层中找到对应的数据，并进行有关的处理，最后将结果通过应用逻辑层提交到表现层。该层建立数据层与表现层之间的联系。

3.3 数据层

负责数据的存储及提供系统所需的数据。采用此结构将数据与应用分开，使数据修改和系统修改互不干扰，确保了系统的可移植性、稳定性，提高了系统的安全性，使系统更容易进一步扩充和调整。数据层包括了图形数据库和业务数据库，各自的内容为：图形数据库包括基础地理数据图、雨量站分布图和社会生产统计信息表；业务数据库包括测站数据、降水量小时数据、日降水量数据表。

4 系统功能模块设计

雨情分析系统的前提是为防洪、防汛提供决策依据，则需要在保证雨情数据的实时性和准确性的前提下，提供可视化的GIS图形操作界面，实现实时雨量数据的显示与标注、不同时段不同站点的雨量信息的查询、雨量数据的图形表达。从功能上可以分为雨情信息查询模块、实时雨情监视模块、雨情智能分析模块和系统设置模块等（图2）。

4.1 雨情信息查询模块

系统提供两种雨情信息查询方式。一种是用户在雨量表中选择雨量测站的名称，然后右击菜单进行查询，系统将给出查询站点的小时雨情变化信息和

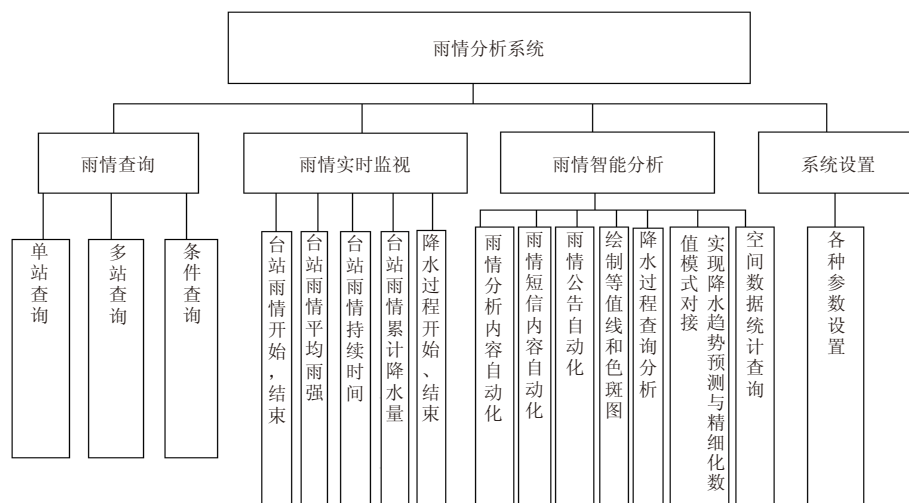


图2 系统的功能模块

累计雨量信息。另一种是利用GIS选择工具（例如点选择、矩形选择）在地图上选择查询的站点，系统将给出选中范围内所有站点的雨情信息。本系统能实现任意时段的雨情信息查询，也能查询小时数据、日数据和冬季固态降水数据。根据一次查询雨情测站点的数量，雨情查询模块又可以划分为单站查询、多站查询。另外，系统还可以对雨情测站点进行模糊条件查询和定位。用户可以输入待查站点雨量大于某个数值，系统将在地图上显示满足条件的站点，并在地图上标注站点名称和雨量信息。针对多个测站点雨情，可以用数据列表显示或图表方式显示，还可以排序显示雨情数据（大到小排序）。

4.2 雨情实时监视模块

针对数据分析，系统提供了两种状态：历史状态和实时状态。在历史状态下可以重新演绎历史雨情演变过程，在实时状态下可以进行实时雨情的监视。

针对雨情数据监视，系统提供了两种模式：常规模式和监视模式。在常规模式下可以进行雨情信息查询统计分析，在监视模式下可以进行实时雨情的监视，这样设计可以保证系统在每一时刻都处在一种状态，使系统逻辑清楚，同时也可以在全图的方式对实时雨情进行监视。

监视模块能对降雨开始时间到当前时间的单站和多站的雨情信息进行监视，用户可以监视任意台站降雨开始时间、平均小时雨强、持续时间、累计雨量。

4.2.1 单站雨情监测分析

监控（自动站和区域自动站）小时降水量：主要监控何时哪个站开始降水，或者哪个站大于预设值，即何时数据库里降水字段的数据大于预设值。

监控（自动站和区域自动站）平均雨强度：监控何时哪个站大于平均雨强度的预设值。

监控（自动站和区域自动站）累计总量：监控何时哪个站大于累计总量的预设值。

实时查看每个站点（自动站和区域自动站）小时降水的动态变化。

记录每一台站的降水记录：降水开始时间、结束时间及累计总量。

4.2.2 降水过程监测分析（过程雨量分析）

过程雨量分析：有（预设值）的站点开始降水，表示一次降水过程的开始，当所有站点的小时降水量等于0，则表示一次降水过程的结束。通过气象站点降水信息和GIS实现降水信息的再生和格点化产品（每小时画一次过程累计降水量图）。

4.3 雨情智能分析模块

逐日雨情分析自动化：自动分析巴彦淖尔市所属区域内雨情内容和短信发送方内容，通过系统设置自动生成雨情公报；

降水过程查询：即可以查询每一次降水过程的开始时间、结束时间及过程降水总量，也可以查询每一个站点的降水开始、结束时间和过程降水量；

空间统计：自定义手工绘制区域，针对绘制区域可以进行农、牧、林业社会生产信息的统计（比如人口、农田面积等）；

模式预报和降水实况无缝隙衔接：根据模式预报做出未来3、6、9、12、15、18、21、24h临近降水预报以及出现降水后根据实况降水进行后续降水的预测，真正实现了降水的提前预警功能。

4.4 系统设置模块

系统的设置主要是对系统的参数进行设置，比如：数据库连接设置、数据监视预设值设置等。

4.5 系统地图有关功能

本系统利用ArcGIS发布矢量地图，在地图上叠加各种信息对象标志，其基本功能设置如下：（1）图形的基本操作：包括对空间数据的放大、缩小、漫游、全屏显示等基本操作；（2）地图图层控制功能：可任意开关地图图层；（3）栅格图层风格化：针对不同的渲染方案，可以进行颜色模板的保存、导入、导出等功能；（4）保存图片：系统摒弃了制图排版界面，将排版制图交由后台处理，利用已经制作好的MXD文档，通过更改图名、选择图例即可出图，也可通过ArcGIS自己更改底图风格。

5 等雨量线绘制

等雨量线即降雨量等值线，是平面地图上降雨量相等的若干个点的平滑曲线，是根据有限站点提供的降雨资料，采用一定的插值方法，绘制出的连续等值点的雨量线。等雨量线图是由一系列成等差数列的等雨量线簇组成的^[13]。根据实时雨量数据绘制的雨量等值线图能够反映和表现雨量的变化和发展趋势，研究降雨的空间分布特征，得到形象的全局概念，可以直观地反映雨量空间分布和暴雨中心位置，为气象部门进行洪水预报和雨情分析提供了重要的决策依据。

由于某一区域内雨量测站地理位置分布是不均匀的，因此雨量数据可以看作是离散的数据。又因为降雨量主要受天气和地貌的影响，这又使降雨具有一定的规律性。为了能够全局地查看降雨量分布及数据，

并且大致了解降雨趋势,很有必要绘制等雨量线,正确实时的雨情形式分析是防洪防灾决策的依据。在气象部门,等雨量线是一个重要的分析手段,计算流域平均雨量和降雨总量都需要等雨量线。过去绘制等雨量线是在纸质地图上用人工绘制,一般需要2~3h,再加上计算不同地区的降雨总量,需要花费更长的时间,工作量很大,效率低并且经常出错,图形也不美观,给工作带来极大的不便,不能适应洪水预报与防洪决策中快速、准确的要求。近几年,随着GIS技术的发展,利用GIS技术实现等雨量线的绘制,可以快速地得到等雨量线。由于雨量测站的空间分布很不规则,要把这种不规则的数据转成规则的网格数据,就需要利用特定区域已知的离散观测数据来估计规则网格点上的非观测数据,这就是所谓的“空间内插”^[14]。目前空间内插的方法很多,不同的插值方法插值结果差别也比较大。

常用的空间插值方法有反距离加权插值法、样条函数插值法、克里格插值法、多项式插值法、趋势面法等。本文选取ArcEngine提供的反距离加权插值法、样条函数法和普通克里格法进行雨量插值分析比较,确定一种适合绘制本地区等雨量线的插值方法。

将反距离加权法、样条函数法和普通克里格法所得到的拟合值与实测值进行比较,计算误差均值和误差均方根^[15],发现从插值的误差均值和误差均方根总体最小而言,普通克里格法优于样条函数法,样条函数法又优于反距离加权法。因此,这3种方法中,普通克里格插值方法更适用于巴彦淖尔地区的降雨内插。

6 结论

实时雨情分析系统研发的最终目标就是要实现雨量数据自动显示分析处理、自动制作雨量等值线、色

斑图、图形报表的形成。根据模式预报做出未来3、6、9、12、15、18、21、24h临近降水预报以及出现降水后根据实况降水进行后续降水的预测,以及分析结果的自动上网。系统使用面向对象的软件工程方法,利用C#研制开发,采用GIS技术,实现以地图信息形式绘制雨量的等值线或等值面,把数据库数据的提取、分析、显示、绘制图、网页发布等功能融为一体,做到准确性、真实性、美观性与实用性的有机结合,同时实现了临近降水预报业务的定时、定点、定量预报。

参考文献

- [1] 龚晓燕,王强民,陈金水.水雨情信息空间发布技术的研究与实现. 河海大学常州分校学报,2006,20(2): 26-29.
- [2] 张毅,刘瑜.水环境空间信息管理系统的设计和实现. 地理学与国土研究,2000,16(4): 49-53.
- [3] 济南市城市防汛预警决策支持系统研究报告. 山东大学,2009.
- [4] 郇伦,刘瑜,张晶,等.地理信息系统——原理、方法和应用. 北京:科学出版社,2001.
- [5] 周成虎.地理信息系统的透视——理论与方法. 地理学报,1995(50): 1-12.
- [6] 张法.我国GIS发展的状况及前景. 测绘标准化,1995(1): 42-46.
- [7] 梁红莲,刘登忠. GIS应用现状及发展趋势探讨. 物探化探计算技术,2001,23(1): 68-73.
- [8] 郑晓阳,胡传廉.上海市防汛辅助决策系统研究. 水文,2003,23(2): 33-36.
- [9] 李青元,刘纪平,雷兵,等.基于GIS的桌面水利信息系统设计与实现. 遥感信息,1998(S1): 92-96.
- [10] 雷玲玲.数字清江空间与雨情信息发布网络平台的构建与实现. 武汉:华中科技大学硕士学位论文,2005.
- [11] 黄康. ArcIMS 原理分析及在浙江省水雨情 WebGIS 系统中的应用研究. 杭州:浙江大学硕士学位论文,2005.
- [12] 陈锡林,闻余华,董家根,等. GIS在江苏省实时水情图形显示分析系统中的应用. 水文,2002,22(6): 43-46.
- [13] 朱跃娟.实时水情信息服务系统的设计与开发. 南京:河海大学硕士学位论文,2005.
- [14] 冯锦明,赵天保,张英娟.基于台站降水资料对不同空降内插方法的比较. 气候与环境研究,2004,9(2): 261-277.
- [15] 孟庆香,刘国彬,杨勤科.黄土高原降水量的空间插值方法研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(3): 83-88.

面向气象学的计量学

—— 欧洲MeteoMet计划简介

■ 张庆龄

计量学与气象学的英文对应词看上去非常相像，一个是“metrology”，一个是“meteorology”。欧洲正在进行的MeteoMet（面向气象学的计量学）计划所有项目的核心和亮点就是计量溯源性。而计量溯源性的两个核心要素就是校准（不间断的校准链）和不确定度（校准链的每项校准均会引入测量的不确定度）。

计量学与气象学的英文对应词看上去非常相像，一个是“metrology”，一个是“meteorology”。计量学是“测量及其应用的科学”。而测量（观测）则是气象学的基础。所以，计量学与气象学有着天然的联系。尽管如此，由计量学界主导的针对气象观测需要而开展的研究计划在世界范围内并不多见。所以，欧洲目前正在进行的MeteoMet计划非比寻常。MeteoMet意即“面向气象学的计量学”（Metrology for Meteorology）。本文将对MeteoMet计划做一简要介绍。

一、MeteoMet计划的背景

气候变化是当今社会、经济和科学发展中的一个热点问题。要对气候变化做出科学评估需要有高质量和可靠的气候观测资料。从计量学或测量学的角度看，气候观测资料质量的重要表征之一就是测量不确定度。而测量不确定度又与计量溯源性密切相连。测量不确定度只有在充分考虑计量溯源性的情况下才能够被确定，并被最大程度地减小。改进气候观测（测量）资料的计量溯源性，将对气候变化的分析产生显著影响。世界气象组织（WMO）和国际计量局（BIMP）都认识到，当今气候科学面临的许多挑战实际上是测量（观测）方面的。因此，国际气象界和计量界开展了非常有意义的合作。合作的核心就是改进气候资料的计量溯源性。

2010年4月，WMO正式签署了国际计量委员会国际互认协定（CIPM-MRA），成为第二个签署此协定的政府间国际组织。同时，WMO与BIMP在WMO总部，联合举办了名为“气候变化监测全球观测系统面临的测量挑战——溯源性、稳定性和不确定度”的研讨会。

2010年5月，国际计量委员会（CIMP）温度测量

咨询委员会（CCT）^①召开了第25次会议，会上提出了“关于气候和气象观测测量”的建议，“鼓励各国国家计量院面向气候研究中有关计量溯源性、质量保证、测量校准方法等方面开展活动；支持各国国家计量院与气象机构之间的合作”。

在上述背景下，对于气候变化问题非常关注的欧洲计量界，于2011年在欧洲计量研究计划（EMRP）下，正式启动了“面向气象学的计量学”计划。该计划是欧洲计量界响应WMO-BIMP研讨会和CCT会议提出倡议的第一个正式的行动。

二、MeteoMet计划概要

MeteoMet计划是EMRP的一部分，并得到欧洲国家计量院联合会（EURAMET）的资助。参加此计划的包括受到资助的18个研究机构和3所大学，以及34个未予以资助的合作机构。该计划的执行期为3年，经费预算为4413683欧元，有6个工作组，30个子项目，计划交付65个成果，总共需要419人月的工作量。

1. 主要方向

MeteoMet计划的主要研究方向是气候变化观测所涉及的计量溯源性，以及从计量学的角度对地面和高空大气的温度、气压、湿度、风向风速、太阳辐射观测和气象要素观测量之间的相互影响的研究。

2. 科技目标

MeteoMet计划的科技目标基本上可以分为3部分，即新的计量方法，新的校准设施，以及对历时气候资料的计量学处理。具体包括5个方面：

气候观测的不确定度评估方法。研发对空气温度传感器进行精确校准的实验室设施和方法；研究建立

^① 温度测量咨询委员会（CCT）是国际计量委员会下设的十个专业咨询委员会之一。

风速观测计量溯源性的方法。

改进湿度传感器及其校准方法。研制可溯源、可自校准、可调式吸收光谱法二极管激光器 (TDLAS)，研究水分子的吸收线；研究包括基于准球面腔体微波共鸣技术的湿度计、无接触式大气测量多传感器装置、超声风速计，以及新的基于GPS和伽利略导航卫星的测量方法；研究无线电探空仪观测的计量溯源性；获取用以改进水汽公式的新资料，提出新的用于水汽压力曲线方程式。

参考探空仪的校准装置。研发创新性校准系统，包括具有高度优化的热量和物质传导特性的测量箱，建立基于探空仪观测的计量溯源性。

自动气象站的校准装置。提出新的自动气象站校准方法和协议，评估太阳辐射和元器件老化对自动气象站的影响；研制可对温度、湿度和气压传感器进行同时校准的实验室和现场校准设施；研发对自动气象站软件进行确认的协议。

历史温度资料的计量学处理。评估用旧的技术（方法和仪器）获得的历史温度数据，估计当代数据与历史数据的一致性；研究和开发具有A类和B类不确定度^①的不均一的历史观测资料的分析评估方法和软件。

3. MeteoMet计划的6个工作组

MeteoMet计划从管理和专业研究的需要出发，设立了6个工作组：

高空观测传感器和技术工作组。研究新的用于高空观测的湿度传感器，建立基于TDLAS的绝对湿度传感器的计量溯源链；研制可溯源至国家标准的可移动校准的标准湿度发生器和新的探空仪传感器校准箱；进行在接近真实高空条件和拥有国家标准环境下的传感器比对。

气候要素观测的新方法和新仪器工作组。研究用于低空和高空大气温度、湿度和气压观测的新方法和新仪器，以获取改进饱和和水汽方程准确性的新数据。该方程适用的温度范围是-80~100℃，目标不确定度^②为0.85%~0.04%。

地面气象观测测量方法和协议工作组。针对气候研究和气象学长期、大尺度观测的需要，研究地面温度、湿度、气压和风速观测的可溯源的观测方法和协议，研究超声风速计观测资料的不确定度评估和现场校准方法。

观测资料协调化工作组。主要进行历史温度观测资料评估和数据融合的工作。研究历史温度观测资料不

确定度的来源，并将这种来源的不确定纳入总的不确定计算报告中，修正气候模式的输入数据。通过这种工作，强化对气候变化的识别、预测和适应性评估。

除上述4个专业研究工作组外，MeteoMet计划还设立了“推广和传播”和“管理与协调”两个工作组。

4. MeteoMet计划的预期结果和影响

通过MeteoMet计划的实施，可以推动计量学和气象学研究的发展。预期成果包括：获得一个经过确认的用于欧洲气候指示因子的基本参数规定；获得可靠的测量协议和可溯源的传感器校准规程；推动气象机构所属自动气象站的校准直接溯源至国家标准，使得观测资料更准确并附有不确定度报告；提高对大尺度和长期温度观测资料的标准化和保证计量溯源性的方法的需求。

MeteoMet计划的实施，可以促进气候观测资料可靠性的提高和对历史数据的正确解读，降低气候影响模式的不确定度，从而提高长期和短期气候变化预测结果的可靠性。而更可靠的气候变化影响模式可以为制定有效的国际和国家应对气候变化的政策提供更好的指导和依据。

三、MeteoMet计划研究示例

MeteoMet计划所有项目的核心和亮点就是计量溯源性。而计量溯源性的两个核心要素就是校准（不间断的校准链）和不确定度（校准链的每项校准均会引入测量的不确定度）。为满足气候观测的需要，获取高质量的气候资料，进行真正符合计量学意义的校准和不确定度分析具有重要的现实意义。例如，由于不具备符合校准条件的设施，对探空仪就不能实现业务化的实验室校准。对大量布设的自动气象站也不能进行严格现场校准。再例如，气候观测业务采用新的观测方法需要研究解决校准问题。现行的业务化的校准方法也需要改善和优化。例如，目前对于温度观测仪器的校准通常是在液体槽中进行的。而实际上，气温是在空气中观测的。由于空气和液体的性质不同，它们对气温观测所引入的不确定度的贡献也是不同的。这种不同对于气候观测资料的质量也是有影响的。此外，对历史气候资料的计量学处理，主要面临的问题也是计量溯源性和不确定度。MeteoMet计划正是围绕这些实际问题开展了有非常有意义的工作。以下列举几个与我国有关工作可进行对照的MeteoMet计划的研究示例，以帮助对该计划有一个感性的了解。

① A类和B类不确定度：用统计方法进行测量不确定度分量评估得出的测量不确定度分量为A类不确定度；用不同于A类评估方法得出的测量不确定度分量为B类不确定度。

② 目标不确定度：根据测量结果的预期用途，规定作为上限的测量不确定度。

1. 研制探空仪湿度传感器快速校准系统

该项目主要针对的是对参考级探空仪进行实验室校准问题。

提高探空仪湿度观测的质量是WMO世界气候观测网参考探空网（GRUAN）的重点。要达到GRUAN要求的精度目标，获得可靠的气候观测资料，一个关键的因素就是通过科学的校准使探空资料具有良好计量溯源性。但是，目前对探空仪的实验室校准是非常困难的。由于在模拟高对流层和低平流层的实验室环境条件下进行湿度校准非常耗时，因而，对探空仪进行实验室校准在目前是难以实现的。为此，MeteoMet计划研发对探空仪湿度和温度传感器的校准方法，创建一个用于建立探空仪观测计量溯源性的参考装置。

该项目主要由芬兰计量认证中心承担，具体研发内容包括：应用热量和物质传导研究成果，结合相关的试验，设计和建造一个高效的测量箱。这种测量箱可以缩短包括在低温范围的校准时间，使一套探空仪的校准可以在一天之内完成；研发一种基于饱和器的低至 -90°C 的霜点温度参考标准；研制对测量箱的空气温度和霜点温度进行准确和有效控制的装置；对整个测量箱进行测试，并进行全面的不确定度分析。

2. 研究在空气中进行温度传感器校准的设施和方法

该项目主要针对的问题是降低温度观测的不确定度。

对全球气候变化的估计，需要的温度观测资料的不确定度要小于 0.1°C 。降低温度观测资料的不确定度，需要考虑源自传感器校准方法本身的不确定度。目前，对温度传感器的校准是在液体槽中进行的。而液体与空气的热力环境是完全不同的，由此产生的额外的不确定度经常被忽略。

该项目的研究目标是将空气温度传感器校准的不确定度，在 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内，从 0.08°C 降低到低于 0.05°C 。这项研究有助于增加对气象温度观测的误差来源和现实不确定度的认识。这将提高温度观测（特别是空基观测）的准确度。

该项目由英国国家物理实验室负责，具体研发内容是：研制一个准确的空气温度校准设施。该设施将对气流进行控制，并可随校准环境的变化对热交换进行调整。同时，对仪器和其他热源产生的误差和不确定进行研究分析。最终，在 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的温度调整范围内，使在空气中进行的温度校准的不确定度小于 0.05°C 。同时，提出如何将温度调整范围延展的建议。

3. 研制可同时对气象站温度、湿度、气压传感器进行组合校准的实验室校准设施

该项目针对的是气象观测要素之间相互影响的问题。

目前对自动气象站的校准缺乏对各要素之间的相互影响的考虑。由于传感器的校准不是在类似于野外环境的条件下进行的，所以，常规的校准可能引入系统误差。目前，在欧洲没有专用的可以同时产生和控制温度、湿度、压力、风速和太阳辐射的环境校准箱。这种能同时模拟地球表面条件的校准装置，可以更好地对气象站观测资料的不确定度进行评价，使其具有更可靠的计量溯源性。

MeteoMet计划将研制以上所述需求的校准装置。拥有了这种装置将对温度、湿度、气压单独的校准曲线之间量值的相互干扰，以及太阳辐射和风速对其他观测要素的影响进行研究。这项工作将提出自动气象站温度、湿度、气压传感器校准的新协议和流程，同时还对实验室校准与现场校准的关系进行分析。

该项目由多个欧洲科研和计量单位完成，具体研发内容包括：

由波兰低温和结构研究院等在实验室条件下，用自动气象站使用的温度（ $-50\sim 50^{\circ}\text{C}$ ）、湿度（ $10\%\text{Rh}\sim 98\%\text{Rh}$ ）和气压（ $800\sim 1100\text{hPa}$ ）传感器进行测量。用测量结果与华沙大学的自动气象站的日常观测结果进行比对分析。这种比对分析结果可为制定自动气象站校准规范提供基础。

由芬兰计量认证中心利用其压力-温度-湿度校准设施，对前述3种气象要素之间，在 $-50\sim -20^{\circ}\text{C}$ 的低温范围内相关性进行研究。在此基础上设计出一种考虑到3个要素之间相关性的优化校准规程。

由意大利国家计量院建造一个新的自动气象站参考设施，以满足用户对计量溯源性的要求。该装置为圆柱体，直径约 1.3m ，长度为 1m 。该校准装置的内部结构适合安装各种自动气象站和气象观测用传感器。温度、压力和湿度可分别单独控制，可同时实现：温度控制偏差小于 0.05°C ，温度调整范围为 $-40\sim 50^{\circ}\text{C}$ ；压力控制偏差小于 0.1hPa ，压力调整范围为 $750\sim 1100\text{hPa}$ ；在温度为 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ 条件下，湿度范围为 $5\%\sim 98\%$ ，准确度为 $0.3\%\sim 0.7\%$ 。该装置还可产生最大 30 m/s 的风速，并具有太阳辐射发生器，用以评估风速和太阳辐射对温度、压力和湿度传感器的影响。

4. 研制可溯源的自动气象站现场校准装置

该项目主要是针对自动气象站的现场校准问题。

现行的自动气象站现场校准存在许多计量学方面的弱点。首先，由于用于比对的标准器不能长期在露天状态下工作，所以校准不能覆盖传感器的整个量程，因此不能完整地确定传感器的直线性和不确定

度。同时，也无法对观测要素之间的相互影响进行评估。此外，对在高海拔和极地地区安置的自动气象站需要有明确的校准规定，以保证这些自动气象站能溯源至国家标准。

MeteoMet计划研制一种用于自动气象站现场校准的，可安放在中型汽车上的小尺寸可搬运的气候箱。通过这项工作，可以提出保证布设在遥远和高海拔地区的自动气象站的计量溯源性的方法和规程。这种可以同时产生温度、湿度和压力值的气候箱，将建在珠穆朗玛峰脚下，位于尼泊尔境内海拔5050m处的金字塔观测站。通过这种装置和专用的规程，促进高海拔地区气候监测的进步。

该项目由意大利国家计量院负责，具体研发内容包括：研究和建造一个缩小尺寸的设施，用于自动气象站的现场校准。这种装置可对温度、湿度和压力传感器进行同时校准，测量范围覆盖自动气象站可能遇到的环境条件。其温度控制偏差小于 0.05°C ，温度调整范围为 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ ；气压控制偏差小于 0.1hPa ，气压调整范围为 $500\sim 1100\text{hPa}$ ；湿度调整范围为 $5\%\sim 95\%$ ，不确定度为 1.5% 。该装置产生的温度、湿度和气压的值的仪器测量是直接测量基准进行校准的。

5. 开发考虑计量溯源性的用于历史和未来温度资料协调处理的计算模式

该项目主要针对的是历史气候资料的不均一问题。

为了改进历史资料序列，需要对不同时期由于采用新的协议对气候资料的影响进行最优估计；同时，还要在模式中考考虑不同地区的人类活动。为了获得气候评估所需的时间序列资料的修正值，必须要用最新的统计技术或新的程序进行统计均一性试验和时间序列均一化处理。

MeteoMet计划研制一套数学软件模式，用来从计量学测量和不确定度的角度，对时间序列历史资料进行模式化处理。

该项目由多个欧洲计量单位负责，具体研发内容包括：

由捷克计量院和斯洛伐克计量院负责开发克服历史观测资料地点和时间的不均一性的方法。该方法基于对历史资料的认识和MeteoMet计划其他相关部分研究结果的数学软件模式。该方法可以根据国际温标的演变，重新计算温度值，并包含B类不确定估计；依据对测量方法、观测仪器等方面现有的知识，按照历史资料的质量，对部分或整个资料集进行加权处理。将A类不确定度和B类不确定度包含在对温度趋势的评估中。

由挪威计量局负责对该模式进行测试，对取得的

进步和遇到的问题进行评估。

四、结束语

本文对欧洲MeteoMet计划进行了简要介绍。MeteoMet计划并不是一个非常庞大的计划，但它从保证气候观测资料计量溯源性的角度，在新仪器研制、校准方法、历史数据评估、观测资料质量保证等方面开展了非常有意义的创新性工作，为计量学与气象学的相互促进，特别是将计量学的关键理念、技术和方法，具体应用到相关的气象科技工作，提供了一个鲜活的实例。该计划从两方面给我们以启发。首先，MeteoMet计划显示出计量工作可以在气象科技工作中发挥更大的作用。目前，我国已形成相对完整的气象计量工作体系。但是，气象计量机构开展的工作主要是对气象观测仪器进行法定的计量检定工作。当今国际计量学已经有了长足的发展，气象界也对计量学有了新的需求。欧洲MeteoMet计划，为气象计量工作者提供了一个通过应用计量学的理论、方法和技术，促进气象科技工作发展的范例；同时，MeteoMet计划为有关气象科技工作，特别是气候资料处理等方面的工作，展示了一个可能的新途径。目前，我国气候资料分析中采用的一些统计分析方法与计量学所采用评估A类不确定的方法相类似，也有用到不确定度概念。但是，真正用到符合计量学意义的如计量溯源性、测量不确定度等的概念、技术和方法的工作不多。通过对MeteoMet计划的了解，可以发现在气候资料分析等工作中，科学地采用计量学的一些技术和方法，可能是提高工作质量和水平的一个有益途径。

(作者单位：中国气象局综合观测司)

深入阅读

García Izquierdo C, Bertiglia F, Benyon R, et al. 2012. Traceability of Ground-Based Meteorological Surface Temperature Measurements. WMO TECO-2012.

Guidance on instrumentation for Calibration Laboratories. 2010. WMO/TD-No. 1543.

Knutti R, Sedláček J. 2012. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. Nat Clim Change, 3: 369–373.

Merlone A, Lopardo G, Antonsen I, et al. 2013. A new challenge for meteorological measurements: The "MeteoMet" project - Metrology for meteorology. AIP Conf Proc 1552, 1030.

Report on the WMO-BIPM workshop on Measurement Challenges for Global Observation Systems for Climate Change Monitoring: Traceability, Stability and Uncertainty. 2010. IOM-Report No. 105 (WMO/TD-No. 1557).

李庆祥. 2011. 气候资料均一性研究导论. 北京: 气象出版社.

“格兰杰因果检验”及其应用

——基于文献计量的分析

■ 郑秋红 李婧华 吴灿

“格兰杰因果检验”由2003年诺贝尔经济学奖得主克莱夫·格兰杰 (Clive W. J. Granger) 在20世纪60年代末提出并经过逐步完善。该方法的基本着眼点,是两个自由变量呈高度相关,并不能说明它们之间一定存在因果关系,可能有别的因素存在,使之显示出协同变化趋势,因此,须对相关变量进行因果关系检验。“格兰杰因果检验”作为一种归因分析的方法,实现了跨学科的推广,特别是近年来,从社会经济学科被成功引入自然科学,尤其难得。

一、“格兰杰因果检验”的基本原理

简单的因果关系检验认为:如果事件A的发生改变了事件B发生的概率P,即 $P(B|A) \neq P(B)$,则可以认为事件A与事件B之间存在因果关系。但事实上,A可能并不是B的原因,可能有一个共同因素C影响着A和B,造成了A与B之间的联系,也可能存在A除了直接影响B,还通过影响C来间接影响B等更为复杂的联系。

“格兰杰因果检验”运用了信息集的概念,且强调事件发生的时间序列。要检验A和B之间的因果性,设 Ω_n 为到时间n为止宇宙中有恒定时间间隔($t=1,2,\dots,n$)的所有信息的集合(亦包含除A和B以外的信息), B_n 为到时间n为止所有B的信息, $B_n \in \Omega_n$,则 $\Omega_n - B_n$ 为到时间n为止B以外的所有信息。 B_n 和 Ω_n 均为多元变量,且为随机变量。假设:(1)现在和过去可以影响未来,但未来不能影响过去;(2) Ω_n 不包含任何冗余信息,如果某变量 Z_n 与其他一个或多个变量在功能上相关,则需将其从 Ω_n 中



如果 $P(\text{关节痛}|\text{阴天}) > P(\text{关节痛})$,即阴天导致关节痛的概率增加,那么按照公式一定可以推出 $P(\text{阴天}|\text{关节痛}) > P(\text{阴天})$,关节痛导致阴天的概率更大,这显然是不合逻辑的。“格兰杰因果检验”通过考虑时间发生的先后顺序来解决类似问题。

去除。如果有: $P(A_{n+1} | \Omega_n) \neq P(A_{n+1} | \Omega_n - B_n)$,则认为变量B是变量A的因, B_n 包含一些独有的信息影响接下来 A_{n+1} 的发生。

“格兰杰因果检验”的思路与简单因果关系检验类似,但它集信息集的概念,把需要考虑的因素拓展。要得出B是A的原因的结论,理论上必须全面考虑论域中所有的变量,但实际操作中,不可能获得宇宙中所有的信息,而在有限的信息集中保证不遗漏重要的相关变量是非常关键的。目前很多采用“格兰杰因果检验”的研究是在两个变量之间进行检验,很容易出现遗漏重要信息的情况。例如,观察到气压计变动(A),下雨(B)的概率就会增加,即 $P(B|A) > P(B)$,显然气压计变动并不是下雨的真正原因,而气压计变动和下雨背后有一个共同的原因,即气压的降低,如果把气压降低(C)纳入信息集,A就不再是B发生的原因了。

时间序列因果检验是该方法的核心,即如果B对A构成格兰杰因果性,则 B_n 会影响 A_{n+1} 的概率分布。传统因果关系的一个缺点是没有考虑事件发生的先后,导致有时从统计上无法区分原因和结果,从公式推导上,如果 $P(B|A) > P(B)$,则 $P(A|B) > P(A)$ 一定成立,即:如果A是B的原因,则必然可以推导出

B是A的原因。例如,如果 $P(\text{关节痛}|\text{阴天}) > P(\text{关节痛})$,即阴天导致关节痛的概率增加,那么按照公式一定可以推出 $P(\text{阴天}|\text{关节痛}) > P(\text{阴天})$,关节痛导致阴天的概率更大,这显然是不合逻辑的。“格兰杰因果检验”通过考虑时间发生的先后顺序来解决类似问题。时间序列分析是格兰杰对经济学界做出的伟大贡献,诺贝尔奖评委会认为,格兰杰的工作改变了经济学家处理时间序列数据的方法,对研究财富与消费、汇率与价格以及短期利率与长期利率之间的关系具有非常重要意义。

二、“格兰杰因果检验”在各学科领域应用的文献计量分析

1. 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(CAJD)和ISI Web of Science平台数据库,检索国内外有关“格兰杰因果检验”主题文献。在CAJD中,采用检索式为:SU='格兰杰因果' OR SU='granger因果' OR SU='格兰杰检验' OR SU='granger检验' OR SU='格兰杰因果检验' OR SU='granger因果检验',精确匹配,时间不限定,学科不限定,共检索命中文献8337篇(检索日期为2014年5月5日)。在ISI Web

of Science中,选择SCI-E数据库和SSCI数据库,采用检索式为:主题=(“Granger caus*”),年限选择所有年,文献类型限定研究论文和综述,共检索命中文献2362篇,其中有中国作者署名的文献310篇(包括台湾)(检索日期为2014年5月5日)。

2. 文献年代分布

图1给出了各数据库“格兰杰因果检验”主题文献随年代的分布,从图中可以看出,该方法的发展应用可分3个阶段:1981—1989年,属于起步阶段,SCI-E和SSCI中文献总量18篇,CAJD中0篇;1990—1999年,属于发展阶段,在文献数量上比前一阶段有了实质性的增长,SCI-E和SSCI中文献总量288篇,CAJD中14篇;2000年以后为跨越式发展阶段,文献数量直线增加,SCI-E和SSCI中文献总量2056篇,年均140篇以上,CAJD中高达8000多篇。

检索到中国最早引入“格兰杰因果检验”方法进行研究的学者为西安交通大学管理学院的孙林岩,他于1996年在英文期刊Journal of Environmental Management发表题为Global warming and global dioxide emission: An empirical study的文章,通过格兰杰因果检验证实,全球地表温度与二氧化碳排放之间确实存在因果关系。同年,他在中文期刊《系统工程理论与实践》发表题为《我国教育投资对国民收入的影响分析》一文,用格兰杰因果检验法检测证实,1950—1988年我国国民收入与国家对教育的投资之间存在

着长期稳定的关系,且教育投资与国民收入互为因果。此后直至2000年,SCI-E和SSCI中没有检索到中国学者的相关文献,CAJD中也仅有10多篇。中国学者对该方法的大量应用是在2004年以后。

3. “格兰杰因果检验”由社会经济学科向自然和工程科学领域的引入

“格兰杰因果检验”仍然以经济学及相关领域应用为最多(表1)。在SCI-E和SSCI库检索到的文献中,有一半以上论文属于经济学相关领域。在CAJD检索到的8000多篇文献中,更有95%以上与经济学和管理学相关。随着学科研究的发展,格兰杰因果检验方法也在不断的改进和创新。由于金融时间序列数据大多是非平稳、非线性的,为适应不同情况,格兰杰因果检验模型也逐渐从传统的线性平稳领域的分析逐渐发展到线性非平稳领域和非线性平稳领域,常用的检验方法包括针对线性平稳的基于向量自回归的WALD检验,针对线性非平稳的协整检验和MWALD检验,以及针对非线性平稳的修正的Baek Brock检验。针对线性非平稳和非线性平稳领域的检验方法的发展是格兰杰因果分析在经济学领域应用发展的重要里程碑。

国际上,经济学以外的领域广泛引入“格兰杰因果检验”发生在20世纪90年代以后。SCI-E(代表自然和工程科学)和SSCI(代表社会科学)中,1980—1989年的18篇论

文均在社会科学领域,且仅有1篇属非经济学领域,由美国学者Freeman于1983年将该方法用于政治关系的研究。1990—1999年,已经有40个学科领域(根据SCI-E和SSCI类别,下同)引入该方法,但288篇论文中的95%以上仍然在社会科学范畴,SCI-E中仅检索到41篇文献,占比14%,且其中34篇属于自然科学和社会科学交叉领域。此时期,经济学以外的其他领域开始逐步引入“格兰杰因果检验”,如:1991年,美国学者Enders和Sandler将格兰杰因果检验用于跨国恐怖主义与旅游的关系研究;加拿大学者Weersink和Tauer用该方法检测了加拿大各州乳品农场规模和生产率之间的因果关系;1992年,美国学者Wood以美国环保署和50个州实施《清洁空气法案》为例,用该方法分析1977—1985年美国政府的政策执行效力,结果表明,单独区分联邦执行的效力是不容易被理解的,国家和地方层面的输出是互相依存,交织在一起的。

2000—2009年,共检索到来自98个领域的778篇文献,SCI-E库检索到331篇,占比43%,其中117篇属于自然和工程科学和社会科学的交叉领域,医学、环境科学、数学、计算机、生物化学等成为应用该方法进行研究的突出领域。2010年以后仅3年多的时间,SCI-E和SSCI中已能检索到应用和讨论该方法的文献1200多篇,其领域进一步延伸,SCI-E库检索到750多篇,占比50%,虽然其中仍然有300篇左右属于自然和工程科学与社会科学的交叉领域,但可以看出自然科学领域对该方法的应用正呈突飞猛进式增长。

当前,非经济学相关领域中,以医学相关领域(包括神经科学、医学影像等)对该方法的应用最多。截至检索时间,SCI-E和SSCI库“格兰杰因果检验”主题引用频次最高的前10篇论文中,有9篇都在医学相关领域(详见本期P3页榜单)。但CAJD库在“医药卫生科

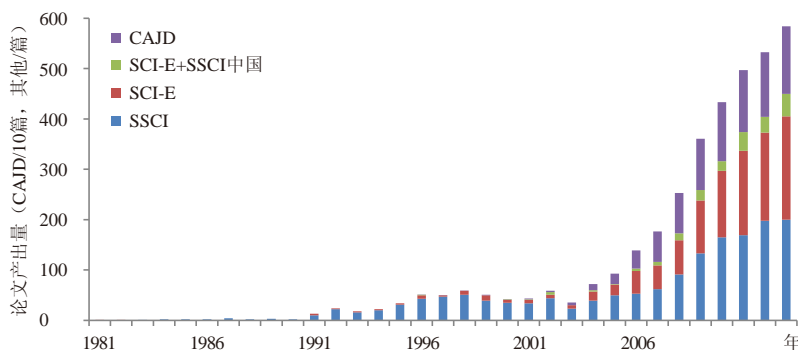


图1 “格兰杰因果检验”主题文献的年代分布

表1 “格兰杰因果检验”主题文献产出较多的领域

SCI-E和SSCI		CAJD	
学科领域	产出 (篇)	学科领域	产出 (篇)
经济	1084	宏观经济管理与可持续发展	6307
神经科学	326	金融	3323
能源燃料	190	经济体制改革	2982
企业财务	183	数学	2021
环境研究	143	投资	1793
核放射医学成像	135	贸易经济	1421
神经影像学	115	证券	991
环境科学	114	市场研究与信息	768
概率统计	83	农业经济	710
跨学科	78	工业经济	673

技”大类下仅检索到11篇文献。中国作者在医学相关领域发表的论文大多是与国外专家或海外华人联合发表在国际期刊上。

CAJD中，其“基础科学”类别下检索到相关文献2000多篇，其中大多是与经济学管理学的交叉领域，98%以上的文献在数学类别下，其次是资源科学，有14篇，海洋学有11篇。

4. “格兰杰因果检验”在地学和大气科学领域的应用

“格兰杰因果检验”在地学相关领域的应用相对较少。在SCI-E和SSCI中，共检索到地学相关领域应用格兰杰因果检验的文献56篇，其中大多数在气象学及气候变化领域（47篇）。气象学领域最早应用格兰杰因果检验方法的是 Triacca于2001年发表在Theoretical and Applied Climatology杂志上的“On the use of Granger causality to investigate the human influence on climate”一文，采用格兰杰因果检验研究了人类活动对气候的影响，指出人类活动对气候的影响并不十分显著。同年，Reichel等采用格兰杰因果检验研究北半球平均地面气温与太阳活动周期的关系，检验通过99%的信度水平，指出二者之间存在因果关系。

气象学领域被引频次最高的是美国波士顿大学地理系的Wang Weile等2004年发表在Journal of Climate上的“The relation between the North Atlantic Oscillation and SSTs in the North Atlantic Basin”一文和

英国学者Mosedale等2006年发表在Journal of Climate上的“Granger causality of coupled climate processes: Ocean feedback on the North Atlantic oscillation”一文，两篇文章均被引用35次，都是在研究北大西洋涛动与海面温度的关系中采用了格兰杰因果检验。Wang Weile等通过研究指出格兰杰因果检验比简单的滞后相关性更为严格和可靠。Mosedale等则使用格兰杰因果关系时间序列，在耦合大气环流模式中定量诊断北大西洋涛动中每日海面温度的反馈。从研究内容看，当前研究主要集中在北大西洋涛动、厄尔尼诺、南方涛动的原因及影响、人类活动和自然因子引起的气候变化等方面。

CAJD中共检索到地学领域（自然地理学和测绘学+气象学+海洋学+地质学+地球物理学+资源科学）应用格兰杰因果检验的论文36篇，其中气象学领域8篇。地学领域应用该方法最早的论文为傅开道于2006年发表于《科学通报》上的“澜沧江干流水电开发的下游泥沙响应”一文。气象学领域最早的论文为曹鸿兴等于2008年发表于《气候变化研究进展》上的“气候检测与归因的格兰杰检验法”，该文对格兰杰因果检验法进行了介绍，并通过格兰杰检验解释我国气温变化由滞后到同步于全球气温的现象。引用频率最高的是孙慧宗和李久明2010年发表于《人口学刊》的“中国城市化与二氧化碳排放量的协整分析”一文，共被引26次。

地学气象学领域的大多数研究都是直接利用格兰杰因果检验研究不同变量因子之间的关系，而对该方法在地学气象学领域的适用性研究很少。2005年，Triacca发表论文讨论格兰杰因果检验在检测大气二氧化碳浓度和全球温度因果关系的适用性，认为应用格兰杰方法检测二者之间的关系并不合适。因此，格兰杰方法在地学及气象学领域的适用性和方法论还有待进一步的研究。

5. 国家和机构产出和影响力分析

SCI-E和SSCI库中，“格兰杰因果检验”主题文献产出量最多的国家为美国，占总文献量的33%，中国排在第2位。从他引总次数和h指数两个影响力指标来看，美国仍然远超其他国家，排在第1位。英格兰虽然在文献量上不及中国，但影响力比中国高。中国排在第3位。德国、澳大利亚、意大利、荷兰等国虽然文献总量不多，但影响力均相对较高（表2）。

表3给出了“格兰杰因果检验”主题文献产出较多的机构。国际机构中，以佛罗里达大学产出最高，中国科学院排在第7位。从表中可以看出，机构的国别很分散，排在前10位的机构中，只有2个机构同属于美国，其他机构分别隶属于不同的国家，还有一个国际机构“东地中海大学”。巴基斯坦、马来西亚等

表2 “格兰杰因果检验”主题文献产出较多的国家/地区及其影响力 (SCI-E和SSCI)

国家/地区	产出	他引总次数	h指数
美国	780	13907	59
中国	310	2356	27
英格兰	203	4767	34
德国	163	2011	26
土耳其	148	1246	19
澳大利亚	141	1987	22
意大利	128	1189	21
法国	83	820	15
荷兰	79	1582	22
希腊	78	784	16

表3 “格兰杰因果检验”主题文献产出较多的机构

机构 (SCI-E和SSCI)	产出 (篇)	国别	机构 (SCI-E和SSCI中国)	产出 (篇)	机构 (CAJD)	产出 (篇)
佛罗里达大学	48	美国	中国科学院	23	中南财经政法大学	170
COMSATS信息技术学院	42	巴基斯坦	台湾逢甲大学	18	东北财经大学	146
莫纳什大学	31	澳大利亚	复旦大学	17	中国人民大学	141
东地中海大学	28	土耳其与北塞浦路斯	电子科技大学	17	南开大学	139
马来亚大学	28	马来西亚	香港理工大学	13	重庆大学	135
华威大学	28	英国	北京师范大学	12	安徽财经大学	128
中国科学院	23	中国	台湾中山大学	12	暨南大学	127
伊利诺伊大学	23	美国	台湾大学	11	湖南大学	122
马斯特里赫特大学	23	荷兰	台湾中正大学	10	西南财经大学	121
比雷埃夫斯大学	23	希腊	香港大学、武汉大学	各8	南京大学	121

虽然论文产出总量不高,但均有在该领域权威的机构,尤其是巴基斯坦的COMSATS信息技术学院,总排名位列第2。SCI-E和SSCI中国文献的机构以中国科学院产出最多,前11位的机构中包括6个台湾和香港机构。CAJD库发表该主题文献较多的机构集中在大学系统,以中南财经政法大学产出最多,东北财经大学和中国人民大学分列第2和第3位。

三、结果讨论

文献计量结果表明,“格兰杰因果检验”正被加速引入各领域的研究中,2000年以后国内外该主题文献的产出呈稳步增长趋势。该方法由经济学向社会科学其他领域,及由社会科学向自然和工程科学领域应用经历了一定的历程,呈现出由经济学为主(1980年代)→社会科学其他领域或社会科学与自然和工程科学交叉领域为主(1990年代)→自然和工程科学领域占相当比例(2000年以后)逐步引入,各领域共同增长的趋势。

“格兰杰因果检验”方法学及应用发展最为成功的仍然是在经济学领域,国际和中国文献数据库中,分别有超过50%和超过95%的文献都在经济学和管理学相关领域。国际上,经济学以外的领域应用该方法最多的是医学相关领域,但国内在医学领域的应用还相对较少。

地学气象学领域引入“格兰杰因果检验”开展研究是在2000年以后,国际上的研究主要集中在气象和气候变化领域,“格兰杰因果检

验”为人们理解不同气象和气候因子之间的联系提供了有用的线索。国内该方法在地学气象学领域的应用还刚刚起步。目前研究中,大多都是直接利用该方法进行不同变量之间的因果关系检验,其在地学和气象学领域的适用性和方法论还有待进一步发展。

近年来,我国虽然在该领域已发表了8000多篇中文论文,但国际表现力较弱,仅有310篇(其中大陆209篇)文献发表在国际期刊上。我国相关领域研究地位与英国、德国相当,与美国相比还存在较大差距。我国在该领域的权威学者也较

少,且主要集中在经济学、管理学领域,中文发文最多的作者也仅有14篇论文。

需要说明的是,文献计量方法本身尚存在一些局限性。例如,虽然前述的孙林岩的文章是研究温度与二氧化碳排放之间的关系,但由于作者本人从事的是管理学研究,且论文发表在管理类期刊上,数据库没有将其归为气象学类别。尽管如此,文献计量法能够帮助研究者从总体上把握学科发展现状和动向,是信息研究中常用且可靠的方法之一。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

深入阅读

- Covey DB. 1992. Testing for granger's full causality. *The Review of Economics and Statistics*, 74(1): 146-153.
- Freeman JR. 1983. Granger causality and the times series analysis of political relationships. *American Journal of Political Science*, 27(2): 327-358.
- Granger CWJ. 1969. Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. *Econometrica*, 37(3): 424-438.
- Granger CWJ. 1980. Testing for Causality: a personal view point. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2: 329-352.
- Reichel R, Thejll P, Lassen K. 2001. The cause-and-effect relationship of solar cycle length and the Northern Hemisphere air surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A8): 15635-15641.
- Sun LY, Wang MH. 1996. Global warming and global dioxide emission: An empirical study. *Journal of Environmental Management*, 46(4): 327-343.
- Triacca U. 2005. Is Granger causality analysis appropriate to investigate the relationship between atmospheric concentration of carbon dioxide and global surface air temperature? *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3-4): 133-135.
- Wood B D. 1992. Modeling federal-implementation as a system - the clean-air case. *American Journal of Political Science*, 36(1): 40-67.
- 曹鸿兴, 郑艳, 虞海燕, 等. 2008. 气候检测与归因的格兰杰检验法. *气候变化研究进展*, 4(1): 37-41.
- 曹永福. 2006. 格兰杰因果性检验评述. *数量经济技术经济研究*, (1): 155-160.

次季节-季节预测的应用前景与展望

——“次季节-季节预测 (S2S)”会议评述

■ 齐艳军 容新尧

由WMO的世界天气研究计划(WWRP)/全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)和世界气候研究计划(WCRP)联合举办的次季节-季节(Sub-seasonal to Seasonal, S2S)预测研究项目国际研讨会, 2014年2月10—14日在美国国家环境预报中心(NCEP)召开(详细信息见<http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/s2s/>), 来自美国、英国、加拿大、法国、日本、澳大利亚、中国、德国、印度、韩国等多个国家的约150位学者与会, 就5个会议主题: (1) S2S预测和可预报性以及与之相关的现象, (2) 极端事件预测, (3) 模式初始化与扰动预报方法, (4) 动力-统计预报系统的设计、偏差订正、检验和量化的不确定性, (5) S2S从预报到业务应用的集成方法, 进行了交流。

一、S2S预测项目的科学意义和研究内容

从天气到气候的多时间尺度预报预测中, 次季节-季节尺度的预测起着关键的接口作用, 尤其是次季节尺度预测业务的开展将在数值天气

次季节时间尺度上有多种重要的潜在可预测性来源, 例如MJO、平流层初始条件、陆面的土壤湿度/冰/雪的初始条件以及海表面温度等, 其中MJO被认为是预测全球次季节时间尺度的主要来源。

预报与短期气候预测之间建立起一座桥梁, 来填补中长期天气预报到季节预测之间的缝隙(图1)。无论从天气-气候尺度的无缝隙预报的专业发展还是从社会需求角度, 次季节-季节气候预测的开展和实施都具有重要的科学意义和广泛的社会应用价值。对于许多管理决策层来说, 次季节尺度预测是主动减灾的一个关键, 例如农业, 最终的需求是月时间尺度以内(小于30天)的预报, 所以发展介于天气-气候之间的无缝隙预报将具有潜在的社会和经济价值。WWRP和WCRP联合天气和气候研究团队, 将S2S预测视为近5年的首要任务, 组织制定了“S2S预测计划”。

S2S项目主要围绕以下3方面的内容展开研究: (1) 针对社会服务为导向的研究——与WWRP/SERA

(社会和经济研究与应用) 协力开展基于极端天气气候事件的示范性项目的研究和校验; (2) 基础研究——可预报性来源问题, 包括来自热带大气季节内振荡(MJO)、季风、平流层、积雪/海冰/土壤湿度等陆面因子的影响以及遥相关响应; (3) 模式模拟——模式分辨率、初值条件、多模式集合、海气耦合与模式的系统误差等问题。

二、S2S的研究进展和面临的科学问题

次季节尺度的气候预测介于较为完善的常规天气预报和正在发展中的季节预测之间的时间尺度范围内。对于日常的天气预报业务, 虽然海洋和陆面条件对其有一定影响, 但影响短期数值天气预报准确性的最主要问题还是大气初始条件; 在季节到年际尺度上的预测则更强烈依赖于像海表面温度这样缓慢变化的强迫源要素, 介于这两个时间尺度之间的是次季节尺度的变率。目前为止, 对次季节尺度的预测与中期天气预报和季节预测相比, 受到的关注程度要少得多, 因此一直以来人们都认为次季节尺度的气候预测是一个“预测沙漠”。

次季节尺度的预测目前仍处于发展初期, 在能够实现对次季节尺度进行较准确的预测之前, 仍有许多科学问题和模式物理过程需要解决和改进。最近的研究结果指出, 次季节时间尺度上有多种重要的潜

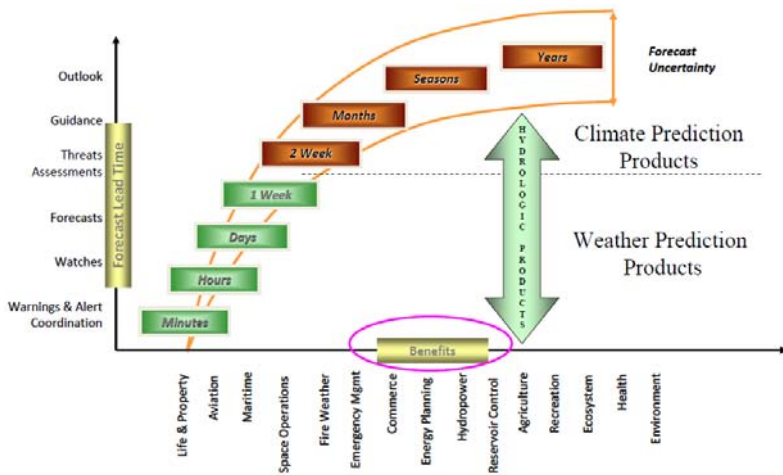


图1 天气-气候无缝隙预报示意图(引自Yuejian Zhu在S2S会议上的报告)

在可预测性来源,例如MJO、平流层初始条件、陆面的土壤湿度/冰/雪的初始条件以及海表面温度等。在这些潜在的S2S可预测性来源中,作为热带大气季节内变率的主要模态,MJO被认为是预测全球次季节时间尺度的主要来源。研讨会上诸多学术报告,展示了各国最先进的研究模式和业务模式对MJO模拟和预测的最新研究结果和进展。

近十年来,动力模式对MJO的预报技巧有了大幅度的提高。例如,美国JPL的Duane Waliser基于大气季节内变率的回报试验(ISVHE)得出北半球冬季的MJO信号可提前20~30天预测;ECMWF的模式回报试验显示MJO的预报技巧已经超过了30天,同时ECMWF的实时业务月预报也有较高的准确率,对北半球热带外预测技巧的提高在很大程度上可以归因于其对MJO预测水平的提高;MJO任务组(MJOTF)的负责人之一Eric Maloney分别从模式的物理过程、MJO的垂直结构和非绝热加热过程、热带大气季节内变率的实时预测评估、CMIP5模式对季节内变率的实时模拟能力、海气相互作用等方面,对MJOTF的主要研究内容进行了阐述;英国气象局的大气模式通过耦合边界层海洋模式(GA3.0-KPP),并在修改控制深对流夹卷过程的参数后,对MJO的振幅及传播方向和速度的模拟能力有显著的提高,显示出海气相互作用是模式能够对MJO成功模拟及预测首先需要考虑的重要环节。

MJO的活动异常不仅仅对热带地区,同时对中高纬地区的天气气候异常也有显著的影响,加拿大环境部的林海致力于热带MJO异常信号对热带外动力过程的非线性响应的模式研究,并取得一定进展。英国和德国的科学家在平流层的爆发性增温影响对流层的次季节时间尺

度预测方面指出,能够提前多长时间可以预测平流层中的动力影响因素,模式中平流层的关键物理过程如何更好地描述可预测性信息等都将是需要重点关注和研究的问题。在陆一气相互作用中,土壤湿度控制着地表水分和能量平衡,通过比较CFS的再回报资料和模式预报结果,美国GMU的Dirmeyer得出改善包含土壤湿度等信息的初始场条件,改进模式物理过程对土壤湿度的描述,将有助于提高CFS的预报水平。中国科学家从欧亚大陆北极海冰的减少对东亚冬季天气气候的影响,中国东部地区夏季降水的季节内振荡,大西洋海温异常对亚洲夏季风和ENSO关系的影响,以及中国冬季气温的季节预报等方面在会议期间做了交流。

在对阻塞高压、热带气旋、高温和干旱等极端事件进行模拟研究时,所用模式主要来自美国的NCEP、GFDL、ESRL,欧洲的ECMWF以及澳大利亚的BoM等。虽然在次季节尺度预测方面取得了令人鼓舞的初步成果,但是在业务预测过程中仍存在很多的科学问题没有得到很好的理解和解决。为了提高数值预报的准确度,以及目前的模式发展水平和不足,S2S科学指导小组建议当前的首要任务是建立一个基于现有次季节尺度业务预测产品的数据库,类似于TIGGE为中期天气预报和CHFP为季节预报所建立的数据库,数据库的建立能够促进应用部门对这些预测结果的使用并对预测的不确定性进行评估,使用这一数据库也有助于评估多模式组合在次季节时间尺度预测上的优势。

三、东亚地区次季节尺度预测的展望

从本次研讨会上科学家们的学术报告中,认识到现阶段以及未来的很长一段时间对次季节尺度的

预测是一项具有挑战性的艰巨任务,虽然代表热带大气季节内变率的MJO模态在某些模式中有良好的表现,但是对模式的关键物理过程及初值条件仍需要深入的诊断分析,以进一步提高MJO在气候模式中的代表性,同时也为模式预测热带外的大气季节内变率提供参考依据。在研究不同的极端事件时,更重要的是需要了解各种不同可预测性来源的相对重要性,这些可预测性来源的组合可能是非线性的,不同来源之间如何相互作用还不是很清楚。

针对我国对季节内预测产品的需求,未来应更多关注东亚季风区S2S可预报性来源及相关的物理过程,并研究建立适用于东亚天气气候的S2S动力预报系统。这需要研究东亚区域高影响天气如热带气旋、高温热浪以及强降水等事件的次季节尺度特征,加强对这些事件中某一个或几个变量和气候发生变化的物理过程的理解。对于东亚区域季节内尺度的模拟和预报,提高大气模式分辨率以及改进模式的关键物理过程是提高对东亚地区短期气候动力预测技巧的有效途径,因此,对目前我国数值模式中分辨率的提高和物理参数化过程的改进仍是亟需解决的重要问题。

致谢:感谢武炳义研究员的宝贵建议,感谢评审专家对本文提出的诚恳意见及建议。本文由国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417205)和中国气象科学研究院基本科研业务(2009Y006,2010Z003)共同资助。

(作者单位:中国气象科学研究院)

编辑选编

数值天气预报检验方法研究进展

——《地球科学进展》2014年第29卷第3期

数值天气预报检验是改进及应用数值模式的重要环节。近年来,模式检验中的观念不断更新,适用于不同预报产品及不同用户需求的模式检验方法也不断涌现。潘留杰等首先简单回顾了以列联表为基础的传统的模式检验方法。其次重点总结了伴随高分辨率数值预报而出现的空间诊断检验技术,按照检验目的的不同,诊断方法可以归纳为:(1)基于滤波技术的分辨模式在不同时空尺度上预报能力的邻域法、尺度分离法;

(2)利用位移偏差诊断模式预报位置、面积、方位、轴角等与观测差异的属性判别法、变形评估法。然后阐述了集合样本成员的概率分布函数(PDF)、集合预报与观测概率分布函数相似程度、事件发生的概率预报等集合预报检验方法。最后论述了空间诊断技术、集合预报检验方法的适用领域,并讨论了模式检验中存在的一些问题及未来的发展方向。

交互集合耦合模式系统模拟检验

——《地球物理学报》2014年第57卷第4期

清华大学地球系统科学研究中心在一个标准耦合模式(SC)的基础上建立了交互集合耦合模式系统(IE),该系统可以实现多个不同大气模式或者同一大气模式采取不同初值组成的多个分量集合之后与海、陆、冰模式进行耦合。辛晓歌等利用同一大气模式七个不同初值分量与其他模式分量开展在线集合耦合试验,利用积分稳定之后100年的试验结果,分析了IE在减小海气界面大气噪音的情况下,对北太平洋海表面温度(SST)变率和ENSO的模拟,并与SC模拟结果进行了对比。分析表明,IE减小了北太平洋中高纬度SST

方差的85%以上,表明该区域SST变率主要受大气的影 响,且主要是通过改变海表湍流热通量实现的。黑潮延伸区和北太平洋中部副热带涡旋区域平均SST 8年左右的低频周期主要受来自大气内部动力过程的驱动。在集合耦合模拟中,无论是副热带涡旋区SST与ENSO的联系,还是ENSO与北太平洋中高纬度SST的联系都能模拟出来,而标准模式未能模拟出这些现象,意味着大气噪音过强将掩盖ENSO与太平洋热带外SST的联系。IE对与ENSO关联的“太平洋—北美”(PNA)遥相关型的合理模拟,并通过湍流热通量对海表温度的影响,是其能够更好模拟ENSO与北太平洋中高纬度SST关系的重要原因。文章通过分析验证了所建立的交互集合耦合模式系统的合理性,揭示了该系统在海气相互作用研究领域具有一定应用前景。

太阳活动与地球表面温度变化的周期性和相关性——《科学通报》2014年第59卷第14期

赵新华等基于太阳黑子历史数据、太阳总辐照(TSI)重构数据和实测地球表面平均温度数据(全球、陆地、海洋),利用小波分析和交叉相关分析等方法,考察了太阳活动和地表温度变化在数百年时间尺度上的周期性及相关性。主要结果有:

(1)在所考察的时间范围内,太阳活动(包括黑子和太阳总辐照)存在4个置信度高于95%(白噪声)的主周期变化,分别为11a周期、50a周期、世纪周期和双世纪周期全球温度存在64.3a的主周期变化,接近太阳活动的50a周期;(2)太阳活动与全球温度变化具有22, 50a的显著共振周期;(3)太阳活动与地表温度长期变化的相关性高于其短期变化的相关性,以黑子为例,它与地表温度年均值的相关系数为0.31~0.35, 11a滑动平均值相关系数为0.58~0.70, 22a滑动平均值相关系数为0.64~0.78, 太阳总辐照与地表温度的相关性高于

黑子与地表温度的相关性;(4)太阳活动在近100年里有明显增强,它与全球温度(包括陆地、海洋)近100年的升温是一致的,太阳活动与海洋温度的相关性略高于太阳活动与陆地温度的相关性。这些结果表明,太阳活动在百年时间尺度上对于地表温度的变化具有不可忽略的影响。

黄山地区不同高度云凝结核的观测分析——《大气科学》2014年第38卷第3期

李力等为研究华东高山地区云凝结核(Cloud Condensation Nuclei, CCN)沿山峰的垂直变化特征,2011年6月利用云凝结核计数器(Cloud Condensation Nuclei Counter, CCNC)在黄山三个不同高度处对CCN进行观测。观测结果表明,不同高度的CCN浓度随时间的变化趋势基本一致,CCN浓度随高度的升高而减小,过饱和度为0.8%时山顶、山腰、山底CCN浓度平均值分别为1105.62、1218.39和1777.78 cm^{-3} ,山底的高CCN浓度(大于1000 cm^{-3})出现频率大于山腰和山顶,表明山底受周边污染源的影响较山顶和山腰大。山顶和山底的日变化曲线均为双峰型,两个峰值分别出现在午前和午后,与大气边界层高度及山谷风变化有关。利用公式 $N=CS^k$ 拟合了山顶在不同天气条件下CCN活化谱,并分析了其变化特征。结果显示,晴天、雨天和雾天的C值分别为2798、384、765,小于一些污染城市,属于清洁大陆型核谱。研究结果有助于改进对华东背景地区云凝结核时空分布的认识,为该地区云雾核化在数值模式中的表达提供观测依据和参数化方案。

深圳大气PM_{2.5}来源解析与二次有机气溶胶估算——《中国科学:地球科学》2014年第44卷第4期

黄晓锋等基于2009年全年在深圳开展的PM_{2.5}样品采集与分析,应用正向矩阵因子解析(PMF)模型对其主要来源及时空变化规律进

行了解析, 结果表明, 深圳市区(大学城点)大气PM_{2.5}年均浓度为42.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中二次硫酸盐生成、机动车排放、生物质燃烧和二次硝酸盐生成是最主要来源, 对PM_{2.5}总质量分别贡献了30.0%, 26.9%, 9.8%和9.3%; 高氯源、重油燃烧、海盐、扬尘和冶金工业分别贡献了PM_{2.5}总质量的2%~4%。不同源贡献的时空变化规律显示, 机动车排放主要为本地源, 二次硫酸盐和生物质燃烧主要为区域源, 而本地排放和区域传输对二次硝酸盐生成都有重要贡献。二次有机气溶胶(SOA)的识别一直是颗粒物源解析的难点, 在研究中结合了PMF模型与OC/EC比值法对PM_{2.5}中SOA进行了估算, 结果表明, 深圳市区(大学城点)PM_{2.5}中SOA年均浓度为7.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占有机物质量的57%, 机动车排放是SOA前体物的最主要来源。研究可为国内今后更深入地开展PM_{2.5}污染与源解析研究提供相关案例借鉴。

BJ-RUC系统模式地面气象要素预报效果评估——《应用气象学报》2014年第25卷第3期

闵晶晶利用自动气象站逐小时地面观测资料, 采用客观检验方法对北京市气象局快速更新循环预报(BJ-RUC)系统在2008—2010年5—9月的预报结果进行检验, 初步评估了BJ-RUC系统对地面气象要素的业务预报性能。结果表明: BJ-RUC系统对地面气象要素预报与实际的变化趋势有很好的一致性。其中, 2m温度预报整体偏高, 误差范围为-1.5~1.5 $^{\circ}\text{C}$, 早上和傍晚偏大, 正午偏小; 2m相对湿度的预报整体偏低, 误差为-25%~0, 白天偏大, 夜间偏小; 10m风速预报明显偏大, 午后尤为显著, 误差为0.6~1.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 6h累积降水的晴雨预报效果较好, TS评分可达到0.4。系统在初始起报时次的稳定性较差, 从第3个起报时次开始逐渐稳定, 但预报误差随着预报时效的增长逐渐

增大, 12h内的预报误差较小, 预报结果较可靠, 在短时临近预报中具有参考价值。

雷暴潜势预报中几个基本问题

——《气象》2014年第40卷第4期

王秀明等讨论了基于雷暴发生三要素的雷暴潜势预报思路在业务预报应用中的一些具体问题, 澄清一些容易混淆的概念。内容包括大气层结不稳定与对流; 雷暴触发机制与抬升作用及其与天气系统的关系; 如何处理雷暴发生三要素“足够”的问题; “流型识别”与“配料法”的综合应用等。层结不稳定是雷暴发生三要素之一, 也是短时预报分析的重点, 文章讨论了各种中尺度不稳定在雷暴发生中的作用, 给出了估计CAPE值时空演变的着眼点, 对位势不稳定和对称不稳定概念及其判据进行了较深入的讨论。

京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望——《地球科学进展》2014年第29卷第3期

频发的霾污染是目前京津冀最严重的环境问题。如何协调区域经济合理快速发展与防止大气环境恶化, 已经成为公众关注的焦点, 也是各级政府亟待解决的问题之一。王跃思等对国内外典型大气污染事件的产生及治理历程进行了简要回顾; 结合我国当前霾污染问题产生的特殊性, 分析了京津冀区域霾污染研究对经济和社会发展、气候和环境变化、人体健康和区域和谐发展的现实意义; 阐述了京津冀霾污染现象频发的主要客观要素和内在原因, 并分析了当前研究工作中的不足。最后, 在全球气候变化的大背景下, 推测了京津冀及东亚地区未来大气污染的发展趋势。

科学大数据与数字地球

——《科学通报》2014年第59卷第12期

大数据研究正发展为科技、经济、社会等各领域的关注焦点, 诸多国家已将大数据研究上升至国家战

略层面。郭华东从时空角度论述了大数据的缘起、内涵与发展势态, 分析了科学大数据成为科学研究新途径的历程——科学范式开始从模型驱动向数据驱动发生转变。给出了科学大数据的定义及科学大数据计算的应对策略。进一步地论述了数字地球学科的基本理论框架和数字地球中的数据系统, 指出了数字地球学科具有大数据的鲜明特点。最后以“胡焕庸线”形成机理的空间认知研究为例, 具体阐述了数字地球学科中的大数据研究的理论和方法。指出试图通过简单地堆砌、耦合“胡焕庸线”中的子系统 and 子过程的机理模型从而达到获取“胡焕庸线”形成机理的空间认知模型是不可行的, 而应该在数字地球平台上对于海量空间数据和社会经济数据进行虚拟汇聚, 经过一定流程的预处理过程, 进行相关数据空间的表征和建模, 在精简的数据空间进行挖掘和分析。

气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析——《气候变化研究进展》2014年第10卷第2期

崔鹏等基于青藏高原1930—2010年山地灾害实例, 分析了气候变暖对青藏高原山地灾害的影响。结果表明: 在气候变暖背景下, 冰湖溃决灾害增多, 冰川泥石流趋于活跃, 特大灾害出现频繁, 灾害链生特征明显, 表现出时间和空间上的延拓性, 巨灾发生概率增大; 在藏东南地区表现出雨热同期的气候特征, 构成了利于冰川类泥石流形成的条件; 波密县城位于两条泥石流危险区的建筑物占地面积由1988年0.014 km^2 扩展到2012年1.004 km^2 , 人口与经济密集区与灾害高风险区重叠, 加之气候变化导致的灾害危险性增加, 青藏高原灾害风险显著增大。上述结果提供了气候变化对青藏高原山地灾害影响的证据, 初步阐述了其影响特征, 有助于山地减灾和进一步认识气候变化对山地灾害的影响机理。

大气环流模式反映降水低频变化的能力如何——How well do general circulation models represent low-frequency rainfall variability? *Water Resources Research*, 2014, Vol. 50, No. 3.

大气环流模式(GCMs)提供了全球和大陆尺度大气变量的可靠模拟,但是在区域至流域尺度上,GCMs对于与水资源管理有关的一些重要变量的模拟能力有限。与观测相比,GCM模拟的一系列不确定性导致了输出结果的短暂(随时间而变化)和系统(不随时间变化)的偏差。对水资源基础设施管理而言,GCM的一个重要偏差是对降水低频(或年际间)变化的代表性不足,这会影响到防洪和抗旱决策的制定。澳大利亚新南威尔士大学的Rocheta等给出了一个用于评估GCMs模拟低频降水变化可靠性的判断指标,称作聚合持续评分(APS)。研究发现:

- (1) GCMs在捕捉观测到的降水持续性方面,存在很大的空间差异;
- (2) GCMs普遍低估了降水的持续性特征;
- (3) 进行嵌套偏差校正后的输出结果,对降水持续性的模拟有了显著改善。研究认为,一方面,参数化方案的改进、更精细的模式分辨率和驱动降水持续性的模式遥相关的改善可能对提高GCM降水低频模拟能力至关重要;另一方面,GCM输出结果的偏差校正技术的进步和实施,能够显著改善降水低频变化的模拟。

利用区域气候模式对留尼汪岛降水进行高分辨率分区——Regionalizing rainfall at very high resolution over La Réunion island using a regional climate model. *Monthly Weather Review*, 2014, in press.

区域气候模式(RCMs)将大尺度气候信息降尺度到局地尺度时,可能会受到地表条件的强烈影响。法国留尼汪大学的Morel等以位于印度洋西南的留尼汪岛为例,评价了WRF RCM从日到季节尺度以及年与

年之间的对留尼汪岛降水变化的高分辨率(680m)分区能力。留尼汪岛地形复杂,气流上升运动异常激烈,大尺度大气环流系统,如热带气旋(TC),可能对当地的降雨格局具有放大效应,只有由大尺度强迫并融合了小尺度过程的非常高分辨率的RCM,才可能适于模拟这种效应。研究选取了两个雨季(11—4月):2000—2001年(异常干旱)和2004—2005年(异常湿润)。利用回归—克里格(RK)方法将雨量站观测数据插值到WRF格点上,然后和WRF模拟的降水进行比较。RK避免了站点到格点的比较问题,但会受到取样不完善的影响,因此其插值质量需要进行检验。WRF模拟的季节降水量和观测具有较好的一致性;然而在季节内和日时间尺度上,二者差异比较明显。这些差异看起来不能被观测站点稀疏、RK质量更不确定来解释,因为在Piton de la Fournaise火山的东坡,WRF的模拟结果甚至比RK插值更接近观测值。而对于2001年1月6日伴随于热带气旋Ando产生的强降水,WRF和RK的分歧较弱,显示了WRF在极端事件期间的降水分区能力。

数值天气预报在对流降水临近预报中的应用:近来的进展与挑战——Use of NWP for nowcasting convective precipitation: recent progress and challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, Vol. 95, No. 3.

传统意义上,降水临近预报能力的提高很大程度上借助于观测的外推,特别是雷达回波。近年来,传统外推和高分辨率数值天气预报(NWP)技术的混合在临近预报领域受到越来越多的欢迎,这也给NWP群体带来了更多挑战,因为高分辨率NWP的临近预报对初始条件及其质量的要求要高于长期NWP。近年来,得益于计算资源的增加、高分辨率数据同化技术的进步、显式对流数值模拟的改善,NWP在临近预

报领域的应用已经取得了很大进展。NCAR的孙娟珍等总结了这些进展,并从降水系统的可预测性、改进中尺度观测网络的必要性和快速更新NWP和数据同化系统的改进等几个方面讨论了下一步的挑战。

气候变暖背景下全球气候类型地理分布的时空变化——Spatiotemporal change in geographical distribution of global climate types in the context of climate warming. *Climate Dynamics*, 2014, in press.

全球气候分区是了解世界各地气候特征的重要方式。气候变暖背景下,全球气候类型的地理分布会发生怎样的变动是一个重要问题。世界通用的气候分类法是柯本(Köppen)分类法,由于柯本分类法比较主观并且还考虑了植被分布等原因,故柯本分类法在研究气候区变动时有一定的局限性。为此,中科院大气物理所的张先亮等基于CRU TS 3.1数据集中1901—2009年的全球陆地气候数据,利用K均值聚类方法研究了气候变暖背景下全球气候区分布的变动,并与柯本分类法进行了对比。研究发现,两种方法得到的气候类型的总体分布基本一致。并且,聚类方法划分出的气候类型和它们对应的植被类型的分布也基本吻合。因此,在划分世界气候类型时,聚类方法可作为柯本分类法的一种替换,但聚类方法的优势在于它是一种客观分类法,而且不用像柯本方法那样将植被分布作为参考信息。研究还分析了每隔25年全球气候类型地理分布的时空变化,并用kappa值检验了不同时段之间的空间一致性。总的来说,尽管近百年间全球温度有一个明显的增长趋势,但气候类型的总体分布没有大的变化。不过,南美洲和非洲的气候类型分布却出现了一些明显变化。在南美洲,热带雨林气候和冬季干旱的热带草原气候的分布发生了大面积的变动。在非洲,

热带雨林气候、夏季干旱的热带草原气候、冬季干旱的热带草原气候、草原气候和沙漠气候都发生了大的变化。概况而言,在世界各个气候类型中,热带雨林气候、热带季风气候、草原气候、沙漠气候、和苔原气候的地理分布容易发生变动,尤其是在气候变化比较明显的1976—2009年。

1900—2006年中国温度距平序列的新估算和不确定性评价——A new estimate of the China temperature anomaly series and uncertainty assessment in 1900–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, Vol. 119, No. 1.

尽管上个世纪的全球气候变暖已经被充分认识到,但在气候变暖的地区,如中国,限于早期有限的观测,对过去百年来气候变暖幅度的认识仍然存在一些不确定性。不同研究组已经独立开发了几套中国20世纪的温度距平序列,其中的不确定性主要来自于1950年以前稀疏的观测。为减小这些不确定性,中科院地理所的王劲峰等将两种新颖独特的适用于一个空间异质面上不同样本情形的统计方法相结合,估算了中国的年平均温度距平。这两种方法分别被称为B-SHADE和MSN, B-SHADE能够弥补小的和具有潜在偏差的样本,MSN方法能够考虑到空间相关和异质性问题。研究发现,1900—1999年间, BSHADE-MSN估算的结果为温度上升了 0.8°C (95%置信区间, $0.41\sim 1.18^{\circ}\text{C}$), 这显著低于气候距平方法和块克里格法计算的温度上升值。同现有其他研究相比,新的温度距平序列显示出1950年以前的中国存在轻微的变暖。迄今为止,对于1950年以后的变化,所有适用的方法都显示出了较好的一致性,1950年以后有足够的站点计算温度距平序列。交叉验证表明,同本研究中评估的其他方法相比,新的区域平均气温距平系列产品具有更小的估计误差方差和更高的精度。

气候内部变率和强迫气候变化之间的可能交互——On the possible interaction between internal climate variability and forced climate change. *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, No. 8.

最近十几年来,全球变暖速率有所放缓,这也被称作全球变暖间隙,无论如何,这并不意味着人为温室气体强迫及其对气候变化造成的影响(Forced climate change, FCC)出现了间断。佛罗里达州立大学的吕建华等指出,无论是大西洋数十年振荡(AMV)还是太平洋年代际振荡(PDO),可能都会导致全球平均地表气温(SAT)的波动,从而引起SAT在年代际时间尺度上的交替的正/负趋势。然而,平均状态下,由温室气体强迫导致的SAT变化并不依赖于AMV和PDO的不同阶段,这暗示了FCC和气候内部变率可能会线性叠加,导致了目前观测到的全球平均SAT瞬态。不过,另一方面,瞬态FCC的区域格局取决于内部变率的不同阶段,因为大气和海洋环流可能会受到气候内部变率的不同阶段的影响。研究表明,气候内部变率和FCC的空间格局之间存在双向互动。

利用基于遥感的植被物候和生产力评估1999—2010年间欧洲的生态系统干旱足迹——Drought footprint on European ecosystems between 1999 and 2010 assessed by remotely sensed vegetation phenology and productivity. *Global Change Biology*, 2014, Vol. 20, No. 2.

干旱灾害对人类的影响不亚于其他任何自然灾害,但是目前对生态系统是如何应对干旱的理解依然甚少。就此,欧盟委员会联合研究所的Ivits等分析了欧洲主要的生物气候带在1999—2010年间植被物候和生产力变化与干旱格局时空变化的联系。本研究选取了标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation

evapotranspiration index, SPEI)反映干旱,生长季长度和植被生产力的变化源于基于遥感的归一化植被指数(NDVI)序列。基于对干旱时空变异的主成分分析,识别出了欧洲1999—2010年间4大主要的干旱事件。对应的分析显示,在大陆尺度上,植被生产力和物候对干旱事件的不同响应,主要与生态系统和土地覆盖有关。其中,北欧和地中海生态系统的植被物候和生产力对干旱的胁迫更具韧性;而干旱情形下,西大西洋地区和东欧的植被生产力下降明显,植物生长季也明显缩短,表明这些生态系统不能很好的缓冲干旱的影响。从气候变化角度而言,干旱发生频率和强度的增加可能会对这些生态系统产生较大影响,从而应强化这些地区的管理和适应策略。

北半球森林生长对干旱时间尺度的多样性响应——Diverse responses of forest growth to drought time-scales in the Northern Hemisphere. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, in press.

西班牙Pirenaico生态研究所的Vicente-Serrano等使用气候干旱指数SPEI和1657个站点(主要位于北美和欧洲)的树木年轮数据,分析了北半球树木生长对不同时间尺度干旱的响应,以确定植被对干旱的响应格局是否受到了不同气候和森林特征的驱动。研究使用相关分析量化了树木生长对不同时间尺度干旱的响应,然后,使用主成分分析(PCA)对相关分析的结果进行了总结,使用预测判别分析(PDA)估计了不同环境因素的贡献。结果显示,不同森林类型的树木生长对干旱的响应存在明显差异:(1)在半干旱地区,森林主要响应于长时间尺度的干旱;(2)半湿润条件下,森林主要响应于中—长时间尺度干旱;(3)在潮湿(非常潮湿的地区除外)、寒冷地区,森林对短期干旱的响应尤为明显。

第80页评刊 来信截至 2014年5月31日

@盼盼要靠谱

关于《太行山脉影响下的华北暴雨分型》一文，我认为文章提供的数据和结论都不具有足够的说服力。对多少个暴雨个例进行了统计？其中每个类型各占多少？每种类型进行合成后是不是应该进行详细的大尺度和中尺度分析？既然认为山脉地形对暴雨有影响，可否进行地形敏感性试验来验证一些结论？即便此文属于短论，还是觉得本文所能表达的信息量过少，深度不够。

回复 (from作者)

非常感谢这位读者就文章提出疑问和建议，就相关问题回复如下。作者对太行山暴雨分型天气学模型的建立、太行山地形敏感性试验等方面均已作了研究分析。因为篇幅所限，本文仅介绍了分型情况。

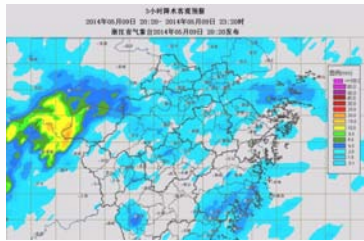
太行山暴雨分型过程中，通过对中国740台站逐日降水观测资料（1951—2011年）分析，太行山以东暴雨型挑选个例51个，其中A型个例22个，B型个例29个；太行山以西暴雨型共挑选个例12个；山区型暴雨7个；太行山两侧暴雨型8个；过山时减弱型暴雨6个。作者对每种型态下的典型个例进行了天气学诊断，建立了不同分型暴雨的天气学模型，以期为太行山暴雨预报提供着眼点。作者通过数值模拟，进行了太行山地形敏感性试验，认为太行山地形在暴雨天气过程中起着非常重要作用，影响暴雨的落区、强度和移动等。对于不同型态暴雨过程，地形的作用有不同的体现，在太行山以东型A型和B型暴雨过程中，山脉的抬升作用导致垂直环流发生变化，上升运动及低层辐合的强度发生变化，从而影响了降水的强度，山脉的阻挡作用减慢了降水系统的移动速度，进而改变了暴雨中心的落区，太行山地形是山区型暴雨形成的主要原因。

@夏旭东

在《流域水文气象耦合的洪水预报研究及应用进展》4.2节雷达定量降水估算(QPE)与洪水预报的耦合中，作者提到了雷达估测降水的降水峰值预报存在滞后性。但是，我觉得可以结合快速更新同化预报系统(WARRS)的预报，并在算法上做一些处理，那么，在降水峰值预报延迟方面有所缓解。如图为浙江省气象局的雷达估测降水预报系统，在去年的台风菲特带来的倒槽强降水过程中，起到了一定的作用。

回复 (from作者)

针对读者所提到的“雷达估测降水的降水峰值预报存在滞后性。”文章所指的并不是降水预报的滞后性，而是经过扰动的多组雷达估算降水数据输入水文模型后，模拟的洪峰出现滞后。具体可以参见参考文献[33]（张利平等，2012）。



@中国气象爱好者

本期在选题上，似乎就两块，一块是数据或模式，另一块是中尺度研究，理论性太强，相对而言，面向应用的就弱了。地域上，偏重长江流域，仅提了一下华北，对于暴雨最多的华南却没有涉及。叙述上，以纯理论为主，案例很少。若加上案例，文章会更生动，读者印象也会更深。

回复 (from编辑部)

本期论文以中国气象局武汉暴雨研究所的成果为主，而这些成果，最重要的是针对论文首页左下角标注的资助课题负责，我们和这位评刊人一样，希望给出涵盖所有类型的暴雨及研究的完整专辑。最新一期《热带气象学报》（2014年2期）第一篇文章，编辑部编辑和科学家一道给出科学选题的全面进展分析，也许也是我们减少遗憾的努力方向。

@original棋子灯花

《气象科技进展》一刊中的“主编语”与“文献计量分析”是一个不错的部分，前者能够让读者了解到该期刊物内容的重要性，后者能够让读者更加有针对性地去看阅读相关内容，相信不少读者跟我感觉相同。

建议以后每期都针对该期的主题内容列出被引最多的文章，能分中文期刊英文期刊当然更好，这会让读者有更多的可选性，更适合于不同层次的读者，提高刊物可读性。

回复 (from编辑部)

感谢你这两个栏目的认可。“主编语”是本刊最大的特色之一，是主编与读者交流、为读者提供信息的重要途径。“文献计量分析”则是编辑部依托中国气象局图书馆为读者奉献的每期主要关注领域的文献计量分析信息。

自创刊以来，每期都会针对当期主题，根据数据库检索，在P3和P5页给出外文及中文期刊被引频次最多的文献排名，欢迎浏览已发表的卷期。

@达达爱插画

感觉“科学观察”栏目和“阅读”栏目中的“编辑选编”这两个模块性质上差不多。前者主要国外为主，后者主要以国内为主，这两者能否融合一下呢？不然显得有点杂乱。很喜欢新书架和媒体扫描推荐的各种书，都是最跟时代步伐的，了解气象前沿很有帮助。

回复 (from编辑部)

“科学观察”栏目主要分3部分，其中“读图”和“数字”是从国内外各种媒体、报告中提炼出来的有关于大气科学及交叉学科的新鲜资讯，涉猎较广，偏重于图文并茂和量化的进展及结果，特别关注气象对社会的影响和相关学科的进展对气象界的启发等；“阅读”栏目中的“编辑选编”则更多关注本学科原创新进展，来自最新发表在国内外影响力最大的自然科学/大气科学类期刊的科学论文。几个栏目各有侧重，旨在从不同的视角为读者提供更多的信息。

《环球科学》创刊100期 2014年4月

在美国最长寿的杂志《科学美国人》2015年迎来170岁生日前，其中文版《环球科学》本期迎来百期。编辑部在梳理100期内容时，找出了若干“关键词”，其中“气候变化”排在“基因测序”之后位列第二位。该刊2006年第10期，以“给地球降温”为题目，给出专题文章。2007年第9期，又一次邀请IPCC的5位气候评估专家撰写相关文章。2009年，哥本哈根会议召开，该杂志不仅仅是关注气候变化本身，还延伸到全球变暖的方方面面。



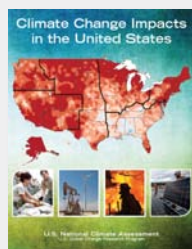
《连线》

2014年4月22日

这本闻名的杂志，本期瞄准“绿色煤电”这一主题，提出“可再生能源无法满足，清洁煤才是未来的能源之路”的观点。封面文章从技术和应用等角度，详述了煤炭不容忽视的几个关键问题，特别是对碳捕捉技术在形成绿色煤电过程中的关键作用等问题，进行了深入剖析。

《气候变化对美国影响》 2014年5月6日

这是美国全球变化研究项目（USGCRP）发表的第3份国家气候评估报告，对美国气候变化的影响，给出了有史以来最全面、权威和透彻的科学阐述。总计30章，800多页的报告，确认气候变化正在影响该国的每个区域和各主要经济和社会领域，强调向气候变化带来的威胁宣战，以更好应对和提高美国社会的弹性。



《皮叶克尼斯气候研究中心2013年进展报告》 2014年4月

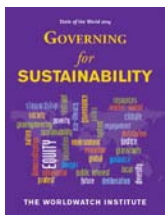
位于挪威的该中心，是包含多家机构的伞形组织。包括的机构有卑尔根大学、联合研究（Uni Research）、海洋研究所和南森环境及遥感中心等。作为国家卓越中心，皮氏中心已经走过10年，过去一年该中心在巩固其作为国际气候研究的领先机构以外，对机构进行了重整，皮叶克尼斯中心与气候动力中心合并为一个中心，成为最重要的研究力量，使得整个组织进入一个新的发展阶段。

媒体扫描

MEDIA SCAN

《2014世界状况：可持续性管理》 2014年5月

由世界观察研究所出版的，已经延续了30年的世界状况主题年度报告，2014年将焦点聚集到可持续性这一世界面临的重大问题。报告阐述了在世界并不存在政府的情形下，我们如何能够和必须制定可实施的规则民主、公证，特别是可持续地利用有限的资源，而且与易于犯错误的各国政府和并不完美的市场进行合作，共同实现未来美好的结局。



《NOAA北极行动计划》 2014年4月

美国总统在今年初公布了美国国家北极地区战略的执行计划，作为对该计划的响应，NOAA发表的这份行动计划，提出了监测、认识和保护这一广袤、价值无限和脆弱的地区的路线图，并给出了其支持国家战略的包括改进海冰和天气及水预报在内的6个战略目标。

《空间研究委员会2013年报》 2014年4月

美国科学院出版社的这份年报，给出早在1958年6月成立的空间研究委员会（SSB）在2013年开展的各项研究活动和取得的成绩。比NASA成立早3个月的SSB，一直给予后者外部独立的科学指导，此外SSB还关注包括NOAA、NSF和USGS等机构在内的美国空间研究活动，这份年报也因此能给读者一幅美国空间研究的过去一年的全景图。



《NCAR ESL战略（2014—2019）》 2014年4月

美国大气科学研究的主要机构NCAR的地球系统实验室（ESL）在大气和相关地球系统科学领域具有国际领先水平，其最新发表的，每年更新的5年计划，常被认为具有风向标意义。该实验室近年来在实施UCAR计划的同时，不断寻求扩展其研究领域，同时成为学界资源的提供者，这些资源不仅有观测设施和为外场试验提供支持，还包括有价值的科学数据库和最先进并被广泛使用的天气、化学和气候模式等。未来，该实验室的发展和优先领域，都在这份战略文件中被详尽阐述。战略在实验室整体层次上（多学科挑战、促进世界先进学科发展等主题）和实验室所属部门（大气化学部、气候和全球动力部、中尺度和微尺度气象部）层次上，分别给出其5年内的发展思路和目标。

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

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors

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

Managing Editors

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

Editors

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

Overseas Editors

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

Editorial office

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

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,

Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

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

<http://weibo.com/2115232930/profile>

Printed by

Beijing Baochang Color Printing Limited Corporation

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

Article

- 6 Liu Suxia, Wang Sheng, Wang Yueling, et al/ Exploring the Relationship between Polar Motion and Runoff
- 13 Shi Wenjing, Yang Ping, Xiao Ziniu/Progress in Studies on the Atmospheric Angular Momentum
- 20 Yan Haoming/ Global Climate Change Detected from Earth's Rotation and Time-Variable Gravity Field
- 26 Wang Yong Liu Suxia, Shao Yaping, et al/ Progress in Simple Earth Models
- 32 Lin Zhu, Mei Huang, He Gong, et al/ Spatial and Temporal Variations of Global Mountain Torque and Relations to Earth's Rotation
- 36 Zhu Yuxiang, Zhao Liang/ The Causal Chain Analysis of Natural Factors for China Surface Temperature Variation during the Recent 100 Years
- 41 Yan Zhongwei, Wang Jun, Li Zhen, et al/ Assessing Climatic Effects of Urbanization Based on Homogenized Daily Observations
- 49 Zhou Lingxi, Yao Bo, Fang Shuangxi, et al/ Study on Impact of City Emission and Transportation on Greenhouse Gases Background Observation at Shangdianzi Regional Station, Beijing
- 53 Tang Huiqiang, Li Chao, Li Quanyue, et al/ Design of the Automatic Weather Station Based on IOT
- 57 Huang Bin, Yan Lifeng, Yang Chao, et al/ Development of Marine Meteorological Numerical Prediction in China
- 62 Yang Tiegang, Sun Lingdong, Bai Xiufang, et al/ Development and Application of the Real-time Precipitation Analysis System Based on GIS

Forum

66 Zhang Qingling/ Metrology Toward to Meteorology
——European Meteomet Program Introduction

Survey

2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

70 Zheng Qihong, Li Jinghua, Wu Can/ A Bibliometrical Analysis of the Scientific Literature on Granger Causality Test and Its Application

Reading

Meeting Review

74 QiYanJun, Rong Xinyao/ Application Prospects and Outlook of Sub-Seasonal to Seasonal Prediction——Review of "Sub-Seasonal to Seasonal (S2S)" Conference

Information

25 New Publication

76 Selected Papers