

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

03

2011年10月
第1卷 第3期

阳江第八届国际探空系统
比对试验



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
名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

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

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

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

海外编委 (按音序排名)
陈镜明 李 俊 刘征宇 金飞飞 王 斌
翁富中 杨 崧 张大林 张广俊 邹晓蕾

编辑部 张 萌 侯美亭 胡 英 苏士坡
陈忠美

出版: 《气象科技进展》编辑部
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: 20元



本刊已被教育阅读网、《中国学术期刊网络出版总库》及CNKI系列数据库收录。

目 次

第1卷 第3期 2011年10月

研究论文

封面报道

6 李柏, 李伟: 阳江第八届国际探空系统比对试验综述

世界气象组织第八届国际探空系统比对试验于2010年7月12日—8月1日在中国阳江成功举办。对国际比对试验的举办背景、规模、试验情况和意义进行了阐述……

评述

- 14 丁一汇: 季节气候预测的进展和前景
- 28 王绍武: 从“气候”到“全球气候系统”概念的发展
- 31 俞小鼎: 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警

“卫星资料应用”专题系列

- 42 邹晓蕾: 卫星资料测量精度参数“NEDT”

研究进展

- 45 陶丽等: 一次西南低涡诱发川南特大暴雨的综合诊断
- 50 方萌: 中国气象卫星数据共享服务现状和未来发展

主编语



P6

封面报道：阳江第八届国际探空系统比对试验综述

封面图：阳江第八届国际探空系统比对试验

读竺可桢先生1920年撰写的《气象学发达之历史》，他在第一句话定义了气象学是研究地球上大气各种现象之科学后，指出“(气象学)起源之早，除天文学而外，当首屈一指。”天文学和气象学在应用学科中历史最悠久，应该说得益于天文和气象观测是人类可以通过肉眼观察得以实现的基本前提：日月星辰、风雨雷电、云雾冰雪、寒暑交替、四季变幻，都是人类感知地球环境的基本信号。

随着现代科技的发展。气象观测逐步实现了从肉眼到仪器的转化过程。在这一进程中，最初的观测仅局限于由广阔的地球表面所构成的二维经纬空间中，这显然无法表现整个大气的全部。地球可以被比喻为一只鸡蛋，而大气层就像裹在外层的蛋壳，虽然薄，但依然有厚度。要想了解千变万化的真实大气，就必须将探测扩展到三维空间。气象观测早在17世纪伴随气象传感器的发明而陆续开始，但是推进现代气象科学实现突破性进展的大气层立体观测一直等到了20世纪初，携带探空仪的小小气球使气象观测实现了从地球表面向三维空间的关键性跨越。

本期封面报道，从多个角度介绍了由WMO组织的全球探空比对项目，特别是去年在广东阳江进行的第八届试验的

有关情况。这类比对试验首次在中国举办，与我国气象科技的发展密切相关，而试验中包含的更多科学内容，早已非上个世纪初所能设想，很多严格的观测比对内容，揭示了正是由于不断更新换代的探空传感器对观测点的精确测量，其“in-situ”(实地)观测的本质，使气象科学家能够对更全面准确地掌握大气环境的真实状况，以及由此可能带来的新的科学突破给予更多期待。

竺可桢先生在其同一篇著作中还指出，气象学可分为四种，即气象力学、气象光学、气象热学和气候学。随着时间的推移，气象学的分类已有了新的变化和整合，但气候学则一直延续至今，且有了较广泛的拓展。本期丁一汇院士和王绍武教授的文章，诠释了气候学的发展与演变，以及气候系统之说的原委，非常值得一读。

本期还针对“卫星资料应用”这一重要主题，推出系列探讨性文章。这一尝试的目的，是希望针对卫星气象这一现代气象科学的重要领域，向读者介绍一些有价值的科学和应用问题。

本刊主办机构，已更名为“中国气象局气象干部培训学院”，这一改变，应该说为这本杂志的发展，提供了更好的土壤。

论坛

55 罗云峰等：NOAA新一代战略计划

科学观察

2 读图 数字 榜单

41 ESI地学领域“快速突破论文”



P2

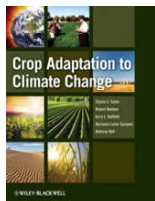
特写

58 侯锦芳：COMET介绍及特点分析

阅读

书评

59 赵海燕：《农作物对气候变化的适应》评介



P59

信息

27 新书架

27 下期要目

30 会议信息

54 中国气象局气象干部培训学院揭牌

60 文摘(中文文献)

62 文摘(英文文献)

封3 媒体扫描



封3

往事钩沉

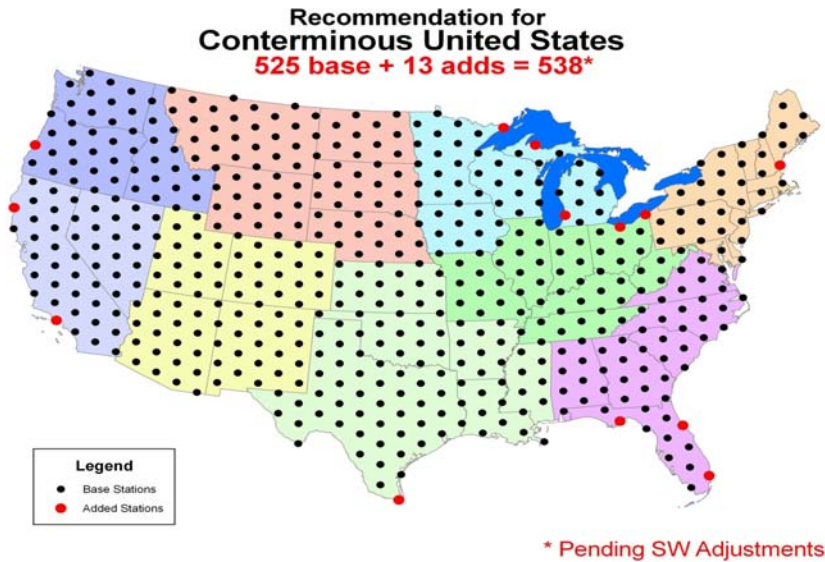
事件

64 史一卓：气象学者早期高空科学观测



P60

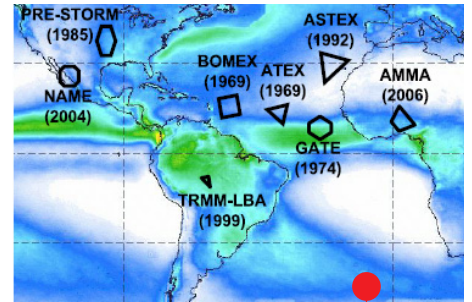
读图



美国气候基准网 (USCRN) 下一步目标——500个站

美国气候基准网 (US Climate Reference Net, USCRN), 自2000年6月28日第一个USCRN站破土动工, 到2008年按照计划完成美国大陆114个站的建设并投入业务化, 已经成为世界上第一个着眼于高精度气候变化和长期稳定的专门观测网络。目前, 该网通过与美国国家综合干旱信息系统 (NIDIS) 项目合作, 开始在站点安装土壤温度、湿度观测仪器。USCRN网的下一个目标将着眼于区域气候变化尺度的监测, 站点数提高到500个左右以获得足够的空间分辨率。

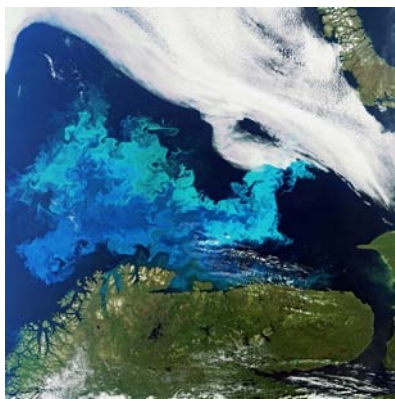
来源: NOAA



大气科学外场试验: 亟待抢救的数据遗产

大气科学外场试验在过去半个世纪里对大气科学的发展起到了至关重要的作用。然而, 1950年代到1980年代开展的一些重要试验, 其资料并没有完好保存, 使得这些资料的再利用价值无法实现。最近NCAR实施的项目, 就是要改变这样的状况, 抢救过去一些重要试验的大气探测数据, 例如, 图中给出的分布于世界各地的重要大气科学试验, 包括1969年的巴巴多斯海洋和气象试验 (BOMEX), 1974年的GARP大西洋热带试验 (GATE), 1985年Oklahoma-Kansas风暴中心预备试验 (OK PRE-STORM) 以及1992—1993年热带海洋全球大气耦合试验 (TOGA-COARE) 等。

来源: AMS



空间监测地球气候的新方法

英国地球观测仪器中心 (The Centre for Earth Observation Instrumentation, CEOI) 的一个研究团队, 最近获得了50万英镑的资助, 开发一种从空中监测地球气候的新的卫星监测手段。该研究团队获得了英国空间局的支持。这项研究将检验新的仪器技术, 用于观测生物燃烧和工业污染对气候的作用, 同时开发着眼于改进数值天气预报的仪器技术, 监测从大气中的降水、云冰和水汽中放射的自然微波辐射以及海洋表面参数。图中为ENVISAT卫星上的中分辨率成像分光计捕捉到的挪威北部巴伦支海海藻群。

来源: Science

数字

35个

《国家“十二五”海洋科学和技术发展规划纲要》日前发布, 未来5年海洋科技对海洋经济的贡献率将从“十一五”时期的54.5%上升到60%, 专利授权增长35%以上。据悉, 全国35个涉海科研单位约110位专家参与了纲要的编制。

30年

1981年8月16日 Meteosat-2地球静止气象卫星投入业务运行开展地球气候监测, 至今该系列卫星已经运行30年, 按照WMO关于气候均值需要30年时间尺度的要求, “卫星气候”资料业已形成。

100人

今年两江一河 (长江流域嘉陵江、汉江及黄河流域渭河) 秋汛降雨影响广、局地降水强度大、持续时间长。据国家减灾委统计, 截至2011年9月23日16时, 灾害造成四川、陕西、河南、重庆、湖北和山西6省 (市) 2109.7万人受灾, 死亡100人, 失踪17人, 经济损失272.1亿元。

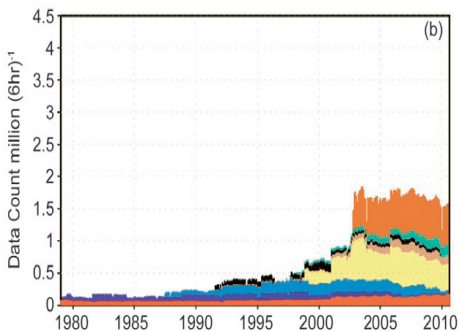
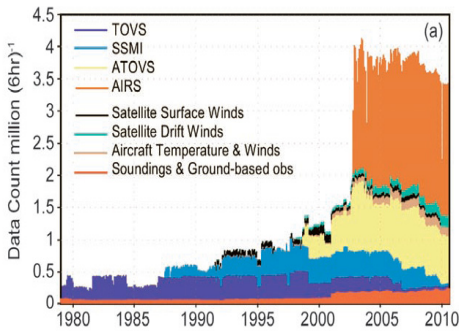
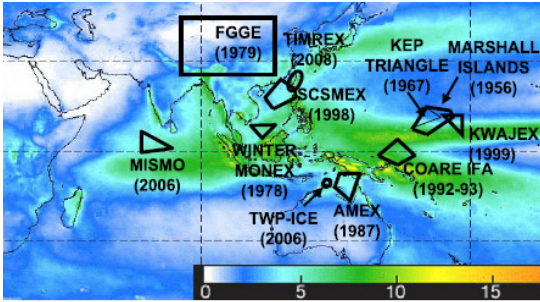
榜单

国际“大气探测”主题被引频次最高前10篇论文

| 排名 | 篇名 | 第一作者 | 来源 | 被引频次 |
|----|--|----------------|---|------|
| 1 | A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space | Wan, Z M | IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4) | 242 |
| 2 | Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP | Wickert, J | Geophysical Research Letters, 2001, 28(17) | 186 |
| 3 | Remote sensing of vertical profiles of atmospheric trace constituents with MIPAS limb-emission spectrometers | Fischer, H | Applied Optics, 1996, 35(16) | 162 |
| 4 | Feasibility of land surface-temperature and emissivity determination from AVHRR data | Li, Z L | Remote Sensing of Environment, 1993, 43(1) | 116 |
| 5 | COSMIC system description | Rocken, C | Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2000, 11(1) | 115 |
| 6 | A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation | Hajj, G A | Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial physics, 2002, 64(4) | 115 |
| 7 | Optimized forward model and retrieval scheme for MIPAS near-real-time data processing | Ridolfi, M | Applied Optics, 2000, 39(8) | 114 |
| 8 | The Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment (FASTEX): Scientific objectives and experimental design | Joly, A | Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(9) | 110 |
| 9 | Emissivity of Terrestrial Materials in the 3-5-MU-M Atmospheric Window | Salisbury, J W | Remote Sensing of Environment, 1994, 47(3) | 89 |
| 10 | Imaging spectroscopy for extrasolar planet detection | Sparks, W B | Astrophysical Journal, 2002, 578(1) | 88 |

来源: SCIE数据库, 检索时间: 2011年9月29日

胡英提供

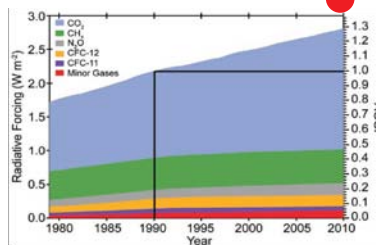


卫星数据: 在同化中发挥更重要的作用

最近, 美国科学家给出自1980年代以来数值预报资料同化中可以利用 (a) 和实际利用 (b) 卫星数据的数量。最近的7~8年来, 因为借助卫星传感器获得的大量资料, 6小时同化窗口可利用的数据数量接近400万, 实际利用的数据也稳定在150万个以上。

来源: J. Climate

2010年AGGI指数为1.29



《美国气象学会公报》(BAMS) 发表的2010年气候状态报告显示, 用于表示温室气体含量的AGGI (the Annual Greenhouse Gas Index, 年温室气体指数) 在2010年为1.29。自1990年以来, 该指数增加了29%。

来源: BAMS

8次

未来5年里, 我国将开展8次极地科考。迄今我国已经开展了27次南极和4次北极考察。“十二五”期间, 通过5次南极和3次北极科考, 掌握南北极环境的变化趋势及对全球气候变化的影响。

3.8%

斯坦福大学学者与合作者的一项针对1980年以来全球气候变化趋势与全球粮食产量的研究表明, 1980—2008年, 全球玉米产量因气候变化趋势而减产3.8%, 小麦则达5.5%, 相对而言, 四大谷物的大豆和稻米, 因气候趋势导致的减产和因技术改进等造成的增产大抵平衡。

0.25ha

联合国粮农组织第37届会议报告指出, 过去150年世界粮食产量增加了2.5到3倍, 而耕地面积仅仅增加了12%。其中粮食增产的40%来自灌溉农田, 后者面积增加了1倍。同期世界人均耕地从0.44ha下降到0.25ha。

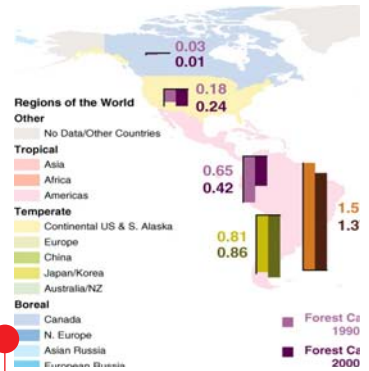
读图



世界建筑节：“大气层”未来建筑

2011年第四届世界建筑节将在巴塞罗那举行，预计有59个不同国家的704件作品参加，其中有大量未来派建筑设计方案令人耳目一新。来自印度的设计师设计了一座高达百米的空间站风格的未来派建筑，名为“大气层”（Atmosphere），其壮观程度令人叹为观止。

来源：<http://www.worldarchitecture-festival.com>



世界森林碳收支：巨大和持续的碳汇

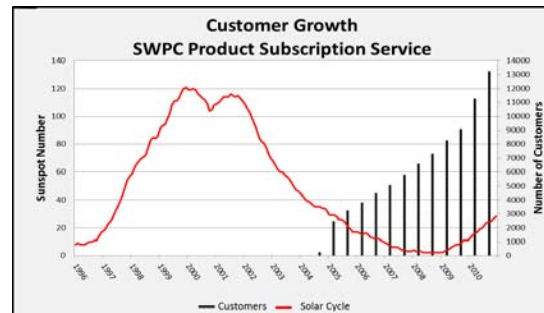
中美洲等国科学家在针对全球森林碳排放和吸收进行的一项研究，给出了全球森林碳



欧洲的知识创新共同体：能源、气候和通信领域先行

为了提高欧洲的科技竞争力而成立的欧洲创新和技术学院（EIT），2007—2013年预算仅3.09亿欧元，但欧盟决定大力发展EIT，2014—2020年预算达40亿欧元。EIT的发展要解决创新三角问题：即商业、教育和研究。一种称为KIC（知识和创新共同体）的联盟应运而生。过去一年最先成立的三个KIC，分别属于能源、气候和通信领域。

来源：Science



近来海平面上升趋缓

NASA最近卫星海面高度观测结果表明，全球海面高度在过去一年出现下降，幅度大约为0.5厘米。究其原因，NASA科学家认为是太平洋上的厄尔尼诺和拉尼娜循环使然。2010年开始的相当强的厄尔尼诺，到年末被近年来最强的拉尼娜替代，这一突然的转换改变了全球降水分布，也影响到海面高度持续上升的势头。

来源：NASA

数字

200万

根据世界卫生组织公布的来自91个国家的近1100座城市空气质量数据，许多城市的空气污染已达到威胁人类健康的程度。世卫组织估计，每年有200多万人因吸入室内和室外空气污染中的细小微粒而死亡。估计室内空气污染会造成约200万人过早死亡，这大多发生在发展中国家。这类死亡中，约有一半是五岁以下的儿童因患肺炎而死。估计室外空气污染每年造成世界上130万人死亡。生活在中等收入国家的人们受到的危害更大。

88%

水电能源是可再生的，但水电是绿色的吗？换句话说，水电生产过程会向大气排放温室气体吗？巴西和美国等国学者对85个水坝进行的最新研究表明，有88%的水坝产生CO₂净排放，而且水坝是否排放温室气体和水坝的建成时间及纬度相关。

37%

中国科学院大气物理研究所学者最近在《气候杂志》上撰文探讨中国干旱问题。他们利用1950—2006年土壤湿度资料和4个模式研究发现，中国有37%的土地在变干，22%的土地在变湿，中国北方和中部主要经历严重干旱。

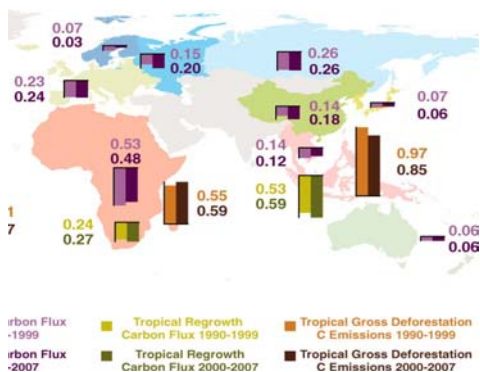
榜单

中国“大气探测/探空”主题被引频次最高前20篇论文

| 序号 | 篇名 | 第一作者 | 来源 | 被引频次 |
|----|---------------------------------|------|------------------------|------|
| 1 | 登陆热带气旋研究的进展 | 陈联寿 | 气象学报, 2004/05 | 170 |
| 2 | 1998年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析 | 王建捷 | 气象学报, 2002/02 | 127 |
| 3 | 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究 | 杨景梅 | 大气科学, 2002/01 | 105 |
| 4 | 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式 | 杨景梅 | 大气科学, 1996/05 | 98 |
| 5 | 我国的水汽输送和水份平衡 | 徐淑英 | 气象学报, 1958/01 | 81 |
| 6 | 地面GPS探测大气可降水量的初步结果 | 王小亚 | 大气科学, 1999/05 | 75 |
| 7 | 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析 | 孟燕军 | 气象, 2002/04 | 66 |
| 8 | 西双版纳地区冬季辐射雾的初步研究 | 黄玉生 | 气象学报, 1992/01 | 62 |
| 9 | 全球定位系统遥感水汽总量 | 李成才 | 科学通报, 1999/03 | 59 |
| 10 | 福州气象条件与酸雨的关系研究 | 林长城 | 热带气象学报, 2005/03 | 56 |
| 11 | 地基GPS反演大气水汽总量的初步试验 | 何平 | 应用气象学报, 2002/02 | 56 |
| 12 | 大气不稳定性参数与闪电活动的预报 | 郑栋 | 高原气象, 2005/02 | 53 |
| 13 | DZZ1-2型自动气象站的故障判断和维修 | 蔡耿华 | 广东气象, 2006/02 | 52 |
| 14 | 应对自动气象站数据缺失的措施 | 马祖胜 | 广东气象, 2007/03 | 51 |
| 15 | 北京地区强对流天气短时预报方法的研究 | 王笑芳 | 大气科学, 1994/02 | 50 |
| 16 | 青藏高原地-气过程动力、热力结构综合物理图象 | 徐祥德 | 中国科学(D辑:地球科学), 2001/05 | 49 |
| 17 | 有限区域卫星云图资料变分分析的试验研究 | 沈桐立 | 高原气象, 1996/01 | 49 |
| 18 | 广东省地面气象综合探测全网实时监控系统的研究 | 李源鸿 | 广东气象, 2007/04 | 48 |
| 19 | 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题 | 翟盘茂 | 气象学报, 1997/05 | 48 |
| 20 | 2004年冬季华北平原持续大雾天气的诊断分析 | 康志明 | 气象, 2005/12 | 47 |

来源: CNKI中国学术期刊总库, 检索时间: 2011年10月11日

胡英提供



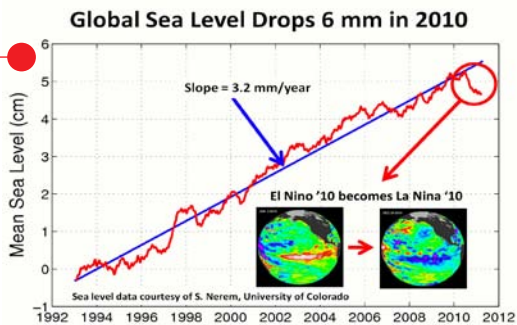
汇和碳源 (Pg C /年) 分布图。图中向下和向上的彩柱分别代表碳汇和碳源。研究估计1990—2007年全球森林净碳汇强度为 1.1 ± 0.8 (Pg C/年)。

来源: Science

NWS: 空间天气服务增多

美国天气局 (NWS) 官员最近在WMO的一次会议上指出, 近年来随着太阳活动加剧, 该局空间天气服务需求呈现较大的增加, 客户的数量已经超过10万户。

来源: NWS



25%

2003年, 一向湿润的阿尔卑斯山东部地区出现干旱, 国际水资源专家认为这是大自然的警示。过去100年, 阿尔卑斯山位于奥地利部分降水量持续下降, 使得地下水补给量减少了25%, 导致当地山泉数量明显减少。欧盟已经启动“阿尔卑斯山缺水”科学调查项目, 观测和研究该地区水源储藏量、温度、降水及地下水之间的关系。

2.4米

最近几十年, 厄尔尼诺和印度夏季季风之间的联系在减弱, 为探讨其原因, 澳大利亚新南威尔士大学学者分析了1877—2006年印度中西部降水记录, 发现在厄尔尼诺单独出现的年份, 季风季节的降水减少2.4米, 而当印度洋偶极子正位相时, 降水正常。最近, 因后一种现象常发生, 导致弱化现象。

10.392

根据汤森路透集团发表的统计结果, 世界著名杂志《自然》子刊《自然—地学》, 2010年的影响因子为10.392, 是地学类研究期刊中最高。

阳江第八届国际探空系统比对试验综述

李柏 李伟

(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要: 世界气象组织(WMO)第八届国际探空系统比对试验于2010年7月12日—8月1日在中国阳江成功举办。对国际比对试验的举办背景、规模、试验情况和意义进行了阐述,介绍了国际比对试验主办方WMO仪器与观测方法委员会(CIMO)的组织结构及所承担的任务;重点介绍了国际探空系统比对试验中各参试系统的技术特点及观测数据分析评估结果。针对比对试验的分析结果,结合CIMO专家组对试验和观测仪器提出的建议,提出了我国参试系统的技术改进措施,并对我国高空观测系统未来发展方向进行了规划设计。

关键词: 阳江, 国际探空比对, 综述

A Review of Yangjiang 8th International Radiosonde Intercomparison

Li Bai, Li Wei

(Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Yangjiang 8th intercomparison of radiosonde system, sponsored by WMO, was held successfully from 12 July to 1 August 2010. The history, scale and significance of radiosonde intercomparison are reviewed together with an introduction to CIMO structure and its responsibility, in particular the final evaluation results and technological characteristics of Yangjiang 8th international radiosonde intercomparison as well as the advice and recommendations from CIMO expert team. Finally the corresponding improvement measurements and future development targets for Chinese radiosonde are proposed.

Key words: Yangjiang, international radiosonde intercomparison, review

1 引言

高空气象观测系统作为综合气象观测系统的重要组成部分,在天气预报和气候监测中发挥着重要作用^[1],同时,高空气象观测资料在大气遥感观测真实性检验和校准检验中发挥着无可替代的基准作用。世界气象组织(WMO)认为,影响观测数据质量的因素多种多样,包括观测环境、观测仪器、业务规程等,其中特别强调了观测仪器的稳定性与探测精度对于观测数据质量会产生直接的影响^[2]。各种不同探空系统之间的国际对比是提高全球高空气象探测准确度和一致性的重要手段之一,为了提高探空仪质量,WMO根据探测技术发展情况,定期或者不定期地举办国际探空比对试验。通过国际比对,一方面评估各国业务探空仪的水平,另一方面针对探空新技术与新设备进行测试与评估,为探空业务发展奠定技术基础。

WMO的仪器与观测方法委员会(CIMO)负责全球与区域仪器比对试验工作,截至目前CIMO已经主办了8届国际探空系统比对试验。1984年在英国举行了第一届国际探空比对试验,之后陆续于1985,1989,1993,2001和2005年分别在美国、哈萨克斯坦、日本、巴西和毛里求斯举办了多届国际探空比

对试验,期间还举办了一些特殊目的的国际比对,例如于1995—1997年间在俄罗斯和美国分别举行了国际探空湿度传感器比对^[3-10]。为了正确评估探空仪性能,一直沿用了多个探空仪同球施放的方法,保证所有被试探空仪能够对同一观测对象进行观测,各参试探空仪悬挂及同球施放如图1所示。

对于探空仪的比对数据评估,其中两个最基本的指标就是系统偏差与随机误差(标准偏差),但是比对数据评估方法一直处于发展变化中,从气压对齐方式进行统计分析,逐步发展到以时间对齐方式进行统

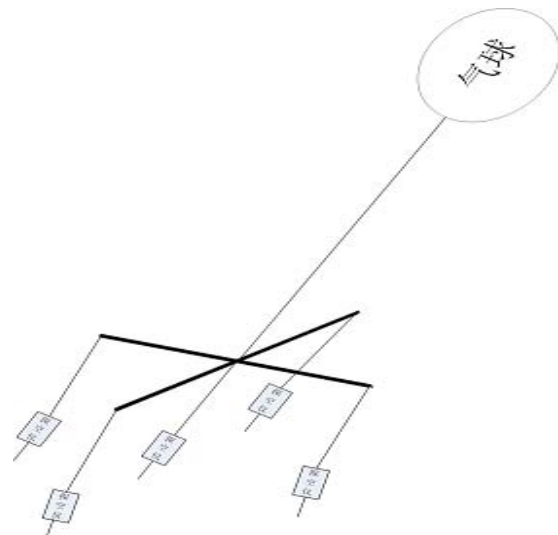


图1 同球比对示意图

收稿日期: 2011年5月24日; 修回日期: 2011年8月9日
第一作者: 李柏(1959—), Email: libai@cma.gov.cn

计分析。例如最开始的两届国际比对试验，采用气压高度对齐进行数据评估，这首先要假设气压是精确的，但实际上这个假设前提很难满足，影响了数据的评估，在以后的比对中改变了这种方式，代之以气球飞行时间对齐方式进行数据评估，保证了比对评估是针对同一观测对象。为了保证国际比对数据的可比较性，采用关联探空仪的方法，即在不同的探空比对中采用相同类型的探空仪，其比较结果可以将不同的探空比对数据与分析结果关联起来，实现探空比对的可比较性，同时利用关联探空仪还可以将不同时期与不同地点的探空比对结果关联起来进行比较分析。在国际比对过程中，逐渐将比对方式与比对评估方法标准化，在此基础上，还发展了一套国际比对标准分析软件RSKOMP，这套软件在1990—2000年世界上许多探空仪比对中得到应用，并且从2005年毛里求斯国际探空比对开始，被世界气象组织指定为官方标准数据处理与产品生成软件，实现了比对数据分析标准化。

历届国际探空系统比对试验的开展，反映了探空技术的发展历程。以2001年的巴西国际探空比对为分界点，之前为雷达、无线电经纬仪、地基导航测风、GPS导航测风等多种方式并存，之后转向GPS导航测风探空系统；对于GPS导航测风系统，其位势高度与风的测量主要取决于GPS定位误差，而GPS定位误差不受高度影响，探测过程中水平和垂直方向定位误差分别在10m和16m左右，测量精度明显高于其他雷达探空系统。由于大气气压随高度呈指数减小趋势，造成气压随高度迅速减小，因此直接使用气压传感器会出现高度越高而气压测量准确性越差的情况，因此随着GPS技术的气象应用，采用GPS测量位势高度，结合温度与湿度信息，进行气压反算，也就是说，反算气压可以取代气压传感器，气压传感器不再是探空仪的必备元件；除此以外，与我国目前业务上采用地面雷达测风体制的L波段高

空探测系统相比，GPS导航测风系统安装简单，操作方便，自动化程度高，其被动接收体制增强了电磁屏蔽能力，尤其是位势高度、风、气压测量精度高，体现了卫星导航测风的优势。

从2005年毛里求斯国际探空比对开始，GPS探空系统发展成熟，其位势高度误差在20m之内，反算气压在16km之下与气压传感器精度相似，16km之上要好于气压传感器直接测量结果，此外湿度传感器开始由湿敏电阻转为湿敏电容，虽然低温性能有所改善，但是还是存在一些问题需要解决。2008年6月2—6日，WMO秘书处瑞士帕雅尼组织召开了第三届高空观测系统国际对比专家组和高空观测系统国际对比组织委员会联合会议，确定于2010年在中国进行第八届高精度探空仪国际比对试验。第八届国际比对试验将检验分析各国生产商对仪器进行改进后的观测性能，检验观测设备对全球范围内各地探空数据一致性的影响，第八届高精度探空仪国际比对试验的主要目的是在热带/亚热带高湿度条件下，测试高质量业务探空仪与高质量研究型探空仪的性能对比。测试结果将作为一些国家在区域基本气候网络/区域基本天气网络（RBCN/RBSN）以及高空基准观测站（GRUAN）中选用高质量业务探空仪的参考，同时也可为全球气候观测系统（GCOS）选择适宜于GCOS基准高空网络的探空系统提供依据。2010年7月12日—8月1日，世界气象组织在中国广东阳江组织了第八届国际探空比对试验，在中国气象局的大力支持下，中国气象局气象探测中心精心组织、周密安排，与其他单位密切合作，保障了比对试验的顺利开展。

2 阳江国际比对结果分析

第八届阳江国际探空系统比对试验有来自中国、美国、德国、芬兰、南非、法国、瑞士、日本、韩国等9个国家16种型号探空仪参与，其中瑞

链接 世界气象组织仪器与观测方法委员会

世界气象组织仪器与观测方法委员会（Commission for Instruments and Methods of Observations，简称CIMO）是世界气象组织下属的技术专业委员会，在气象、气候、水文、海洋，以及相关的地球物理与环境仪器领域，为了促进世界范围的标准化，负责制定技术标准、质量控制程序与仪器使用指南，负责仪器与观测方法的国际标准化与兼容性，具体体现在如下方面：

- 提出仪器与观测方法的具体建议，包括仪器类型、特性、精度、性能以及经济实用性。
- 负责全球与区域仪器比对，遴选满足用户需求的观测设备，同时符合全球资料兼容性要求。
- 观测方法研究与建议，包括测试与标定方法，以及数据订正方法。
- 促进科学试验仪器应用和发展。
- 制定仪器与观测系统规格，从经验与新的技术方法方面，对世界气象组织其他的项目与团体活动提供支持。
- 促进合适的、经济实用的仪器与观测方法应用，特别是针对发展中国家情况，提供满足发展中国家业务使用的观测设备。

从组织机构上，CIMO可划分为管理组与专家组两个层面；从技术上，CIMO又可以划分为标准与比对组、遥感与新技术组、能力建设组，其中标准与比对组被细分为标准、新地面技术、仪器比对、飞机观测专题四个小组，遥感与新技术组被细分为业务遥感、新遥感技术与试验基地、频率保护、卫星观测专题四个小组，能力建设组被细分为区域仪器中心与检定溯源、CIMO指南编写、培训与培训教材、探空仪性能监视、地基仪器性能五个小组。

士SnowWhite露点式湿度仪、美国CFH霜点式湿度仪、美国Multi-thermistor多温度传感器探空仪，以及日本Meisie科学试验探空仪、芬兰Vaisala科学试验探空仪也参与了比对试验。本次参加比对的探空仪系统中，中国南京大桥机器有限公司的GTS1-2型L波段电子探空仪系统、中国航天科工集团第23研究所和中国华云技术开发公司的国产GPS探空仪系统参加了本次国际比对试验，除中国南京大桥机器有限公司的GTS1-2型L波段电子探空仪系统使用的是地面二次测风雷达外，其他探空仪系统都是基于卫星导航的探空仪系统。此外，全球气候观测系统（GCOS）委员会也首次派出专家参与此次比对试验。

2010年7月14日上午8:30分，第一次比对施放开始，一直到2010年8月1日2:45最后一次结束，共施放气球72次，全部施放成功，取得了丰富翔实的观测数据。气球平均升空高度30577.8m，超过30km高度个数52个，30km升空有效率72.2%，升速总体控制在 $383\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 。较好的飞行高度和合适的升速为获得足够多的观测数据提供保障。针对阳江高湿天气造成探空气球飞行高度有所降低的情况，采用双球（子母球）充球方式，有效地提高了飞行高度，为获得足够多的观测数据提供保障。

针对这次国际探空比对，中国气象局气象探测中心还专门组织了多种地基遥感设备开展辅助遥感观测，包括S波段天气雷达、GPS/MET水汽观测系统、云雷达、X波段双偏振雷达、风廓线雷达、云高仪、微脉冲激光雷达、全天空成像仪、微波辐射计等设备，利用不同原理的观测设备和观测方法对同一目标物（垂直大气柱）开展同步观测，并通过大气要素观测值的相互对比验证和综合分析，获得更加准确的垂直大气柱的连续观测结果。

2.1 参试探空仪总体评价

CIMO认为阳江国际探空比对试验中所有参试探空仪关于大气温度、气压、位势高度、风向风速要素的测量性能都比较理想，其中部分探空仪探测性能达到了GRUAN站的使用要求，各测量要素探测性能评价如下：

(1) 所有参试探空系统的温度测量结果差别很小（图2，图3）。所有参试探空仪的夜间温度探测性能达到非常高的标准，各系统温度偏差均小于0.4K，白天探测性能有所降低，主要原因可能是温度传感器没能充分暴露在自由大气中，或者是温度传感器与探空仪距离不够远，受到探空仪本身的热污染。

(2) 在高空相对湿度探测方面，存在着明显的不足（图4，图5）。不同探空仪系统对湿度测量结

果差别很大，在温度小于 -40°C 低温情况下，湿度传感器测量性能受到较大影响。自上届毛里求斯国际比对试验以来，尽管在相对湿度测量方面取得了很大的进步，但是在毛里求斯对比中出现的部分问题还继续存在。

①阳江国际探空比对试验参试探空仪除瑞士Meteolabor和韩国Jinyang外，其他探空仪在高于 -40°C 探测环境下湿度传感器测量性能复现性较好。大部分参试探空仪夜间比白天的湿度测量性能要差。

②法国Modem、中国大桥、韩国Jinyang、中国华云和日本Meisei在湿度测量方面具有正的系统偏差，与高质量探空仪的要求有较大差距，这五种探空仪的正的系统偏差在白天探测时要比夜间小。

③瑞士Meteolabor和德国Graw探空仪在白天测量时湿度探测结果也具有一定的正系统偏差，降低了其探测质量。

④南非InterMet探空仪在白天测量时，在高湿段存在大的负系统偏差。如果系统偏差的来源能够确定（例如校准偏差、传感器通风问题、材料的吸湿特性、软件处理中的问题），则系统偏差能够进行有效的订正。

⑤阳江国际比对试验不能有效证明芬兰Vaisala或者瑞士Meteolabor SnowWhite探空仪夜间湿度探测结果的绝对正确。SnowWhite探空仪在高层大气中具有比Vaisala探空仪更快的反应速度，因此不能认为Vaisala探空仪的测量结果总是绝对正确。然而Vaisala和Meteolabor SnowWhite探空仪探测结果差别很小，二者的测量性能非常优异，可以达到5分的等级。

⑥美国LMS探空仪在云中探测湿度结果不能达到饱和状态，存在较大的测量误差。在白天测量时出现的问题要比夜间测量时复杂得多，Vaisala探空仪对高层云中湿度探测结果为过饱和状态，而LMS探空仪不能得到过饱和结果，有可能是白天探测湿度结果订正过多造成。

⑦德国CFH（霜点式露点仪）探测结果与Vaisala探空仪相差不大，能够得到云中饱和水汽探测结果，测量误差较小，在白天探测高云时，Vaisala和LMS探空仪可以达到4.5分等级。

⑧中国华云探空仪在白天高层水汽探测时，由于探测结果随机误差比其他探空仪要大，因此其得分等级要低，主要原因可能是由于湿度传感器与探空仪箱体太近，受到箱体的污染。

(3) 在位势高度测量方面（图6），参试探空系统在100hPa等压面高度时，测量得到的位势高度随机误差小于20m，而当前各个国家正在使用的探空系统在此等

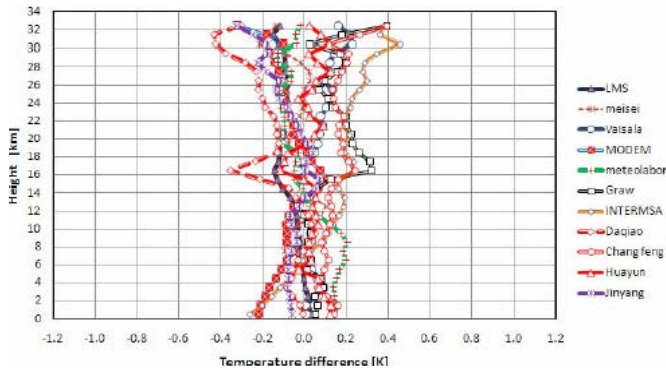


图2 夜间温度系统偏差

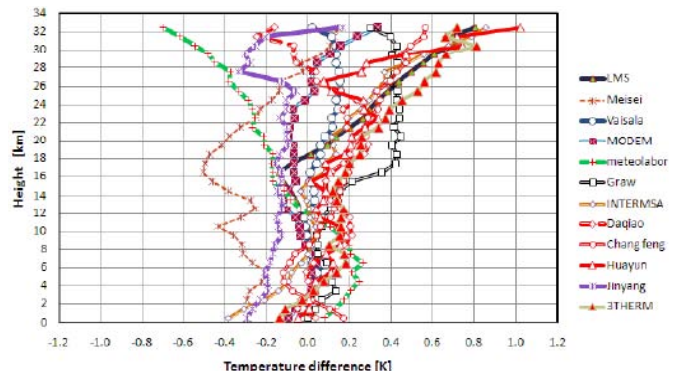


图3 白天温度系统偏差

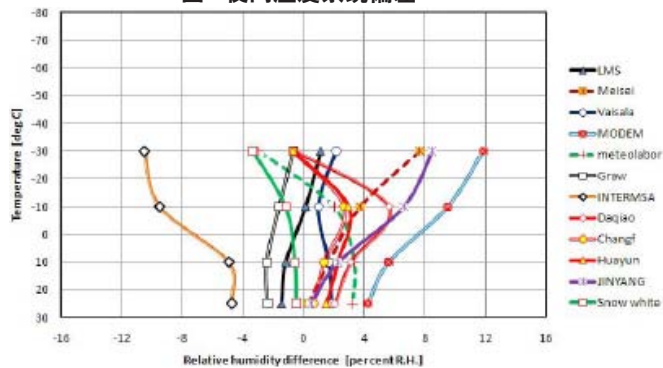


图4 夜间湿度系统偏差 (湿度大于80%)

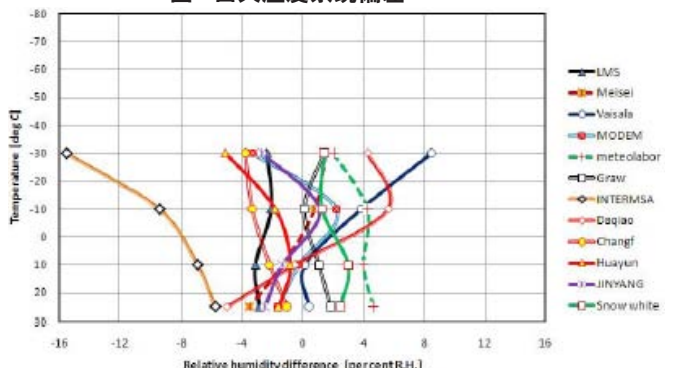


图5 白天湿度系统偏差 (湿度大于80%)

压面高度测量的位势高度随机误差在30~60m左右。

中国大桥探空系统采用气压、温度、湿度联合计算位势高度体制，其探空仪的气压传感器具有很好的测量性能，适于业务使用，但是当气压小于20hPa时，不适合应用于高空气候观测。

(4) 在气压探测方面，所有参试GPS探空系统均具有较高准确度(图7)。

①Meteolabor探空系统和Meisei探空系统通过位势高度反算气压的算法需要进一步改进。

②中国大桥气压传感器气压测量性能可达到其他GPS探空系统水平，而GPS探空系统比二次测风雷达系统要昂贵，因此对于常规观测业务使用来讲，没有理由不使用二次测风雷达系统。然而，如果在某地进行高空气候观测等试验时，最好还是使用GPS探空系

统(或其他卫星导航探空系统)。

(5) 所有参试探空系统在风向风速测量方面都具有良好性能(图8, 图9)。

①由于某些原因，瑞士Meteolabor探空系统在对流层风向风速测量结果稍差，平流层测量结果较好。

②中国大桥雷达探空系统在平流层风向风速探测时，由于其长的斜程观测方式，相比对流层探测，具有一定的噪声影响。

2.2 参试探空仪得分情况

阳江国际比对试验结束后，CIMO组成了比对数据处理评估专家组，对各参试探空仪获取观测数据利用RSKOMP标准分析软件进行了分析处理，各参试探空仪得分情况如表1所示，同时简单介绍了分值划分等级和个别探空仪数据处理中采取的措施。

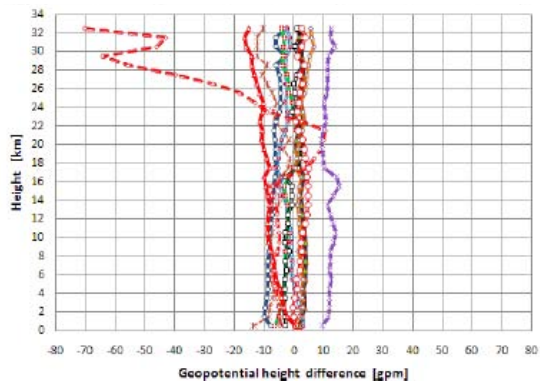


图6 位势高度系统偏差

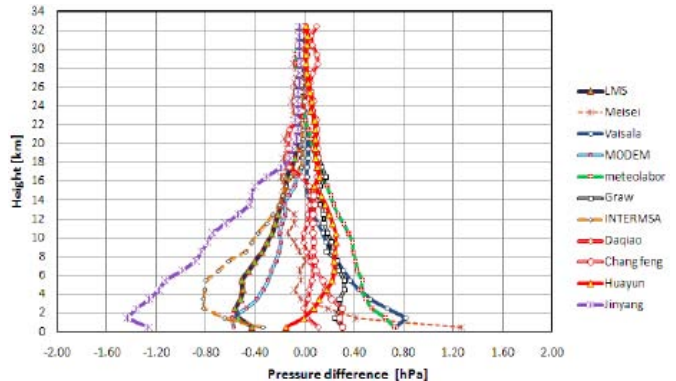


图7 气压系统偏差

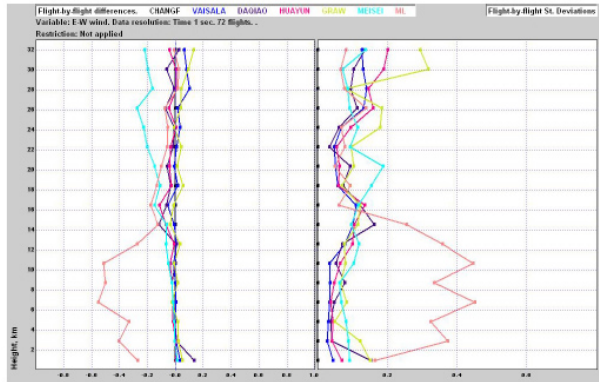


图8 东西风分量统计结果（左图为系统偏差，右图为标准偏差）

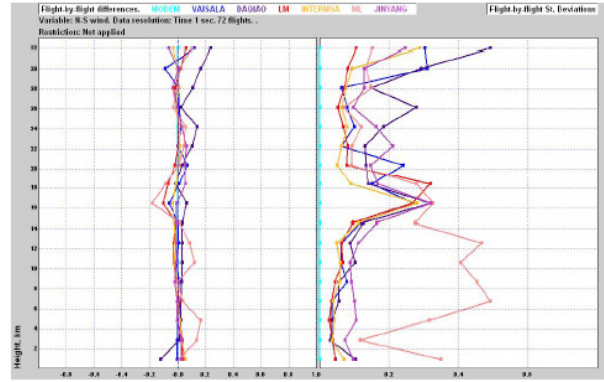


图9 南北风分量统计结果（左图为系统偏差，右图为标准偏差）

(1) 各分值代表的性能水平

- 1分：最低可接受的测量性能（鉴于目前现有的技术）。
- 2分：接近CIMO指南对仪器准确度的业务要求。
- 3分：刚满足CIMO指南的业务要求。
- 4分：满足CIMO指南的业务要求，但仍需进一步改善方能供GRUAN观测使用。
- 5分：性能良好可供GRUAN使用。
- 6分：误差订正和处理过程文档可供GRUAN观测使用。

(2) 上标说明

- ①* 标注的是科学探空仪，其他为业务探空仪。
- ②¹ 法国Modem探空仪的工厂检定误差已被找到，大约高出5%，这个误差已经被英国气象局对Modem探空仪业务运行经验所证实。如果对其进行校正，其得分将会增加0.5~1.0的范围。此外由于前期

与试验项目小组的协议，地面湿度校正没有在试验中被使用。

③² 德国Graw的数据经过两次重新处理，以此达到修正算法的目的。

④³ 瑞士Meteolabor的问题是由软件引起的。经过在瑞士帕雅尼站做了针对Meteolabor探空仪对比试验后，地面锁定GPS的问题得以解决。

⑤⁴ 此问题引起的原因同³一样。经过在瑞士帕雅尼站做了针对Meteolabor探空仪的对比和订正后，计算低风速时的误差得以确定。

⑥⁵ 韩国Jinyang在采用了一个新的高度偏移和发射点算法后其评分等级得以提升。目前改进后的算法正在韩国（韩国气象厅）使用。

⑦⁶ 去掉日本Meisei大约10%不好的跟踪定位信息。在对不好的跟踪定位进行校正后，将会获得更大的改进。同时改善过滤算法，以减少在阳江探空站由

表 1 阳江第八届国际比对参试探空仪得分情况统计表

| | 南非 | 法国 | 德国 | 瑞士 | 大桥 | 韩国 | 日本 | 长峰 | 华云 | 美国 | 芬兰 | 瑞士* | 美国* |
|---|------|-------------------|-------------------|-------------------|------|-------------------|-------------------|------|------|------|-------------------|------|------|
| 气温 ($h < 16\text{km}$), 夜间 | 4.50 | 5.00 | 4.50 | 5.00 | 4.25 | 4.75 | 5.00 | 4.75 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 气温 ($h < 16\text{km}$), 日间 | 4.75 | 5.00 | 4.50 | 5.00 | 4.5 | 4.50 | 4.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 气温 ($h > 16\text{km}$), 夜间 | 3.25 | 5.00 | 4.50 | 5.00 | 3.25 | 3.75 | 5.00 | 4.75 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 气温 ($h > 16\text{km}$), 日间 | 3.25 | 5.00 | 4.25 | 4.75 | 3.75 | 3.50 | 4.25 | 4.50 | 2.75 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 对蒸发冷却误差的防护 | 否 | 否 | 否 | 否 | 否 | 否 | 否 | 否 | 否 | 否 | 是 | 否 | 否 |
| 湿度 ($T > -40^\circ\text{C}$), 夜间 | 4.50 | 3.00 ¹ | 5.00 | 4.25 | 2.75 | 3.75 | 4.75 | 5.00 | 4.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 湿度 ($T > -40^\circ\text{C}$), 日间 | 4.25 | 4.25 ¹ | 4.75 | 3.25 | 4.00 | 4.75 | 5.00 | 4.25 | 3.75 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 湿度 ($T < -40^\circ\text{C}$) 对流层中上部, 夜间 | 4.50 | 4.25 | 4.5 | xx | xx | 4.00 | 4.00 | 3.50 | 3.25 | 4.75 | 5.00 | 5.00 | 4.75 |
| 湿度 ($T < -40^\circ\text{C}$) 对流层中上部, 日间 | 2.50 | 3.00 | 4.25 | xx | xx | 4.25 | 3.00 | 3.00 | 2.75 | 4.50 | 4.50 | xx | 4.50 |
| 位势高度 ($P < 100\text{hPa}$) | 5.00 | 5.00 | 5.00 ² | 5.00 | 4.75 | 4.25 ⁵ | 4.00 ⁶ | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 ⁷ | 5.00 | 5.00 |
| 位势高度 ($P > 100\text{hPa}$) | 5.00 | 5.00 | 5.00 ² | 5.00 | 3.25 | 5.00 | 5.00 ⁶ | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 气压 ($< 100\text{hPa}$) | 4.75 | 4.75 | 4.50 ² | 4.75 ³ | 3.25 | 4.25 | 4.25 ⁶ | 5.00 | 4.75 | 5.00 | 5.00 ⁷ | 4.75 | 5.00 |
| 气压 ($> 100\text{hPa}$) | 4.00 | 5.00 | 4.50 ² | 4.00 ³ | 4.75 | 3.50 ⁵ | 4.50 ⁶ | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 4.00 | 5.00 |
| 风 (对流层) | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 3.00 ⁴ | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 3.00 | 5.00 |
| 风 (平流层) | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 4.50 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |

于多变的气球升速造成的误差。

⑧⁷ 芬兰Vaisala不正确的GPS天线定位设置被修正。

3 阳江GPS国际探空比对技术特点

本次国际探空比对主要体现了以下两个特点：

(1) 探空技术先进，探空仪呈多样化

对于温度探测，多个因素都会影响温度传感器测量准确性，通常包括电路自加热效应、滞后性、长波辐射、短波辐射等，通常情况下是采取缩小温度传感器体积、增加表面防辐射涂层、算法订正三种途径解决，其中传感器体积的缩小可以明显减小滞后误差，结合良好的防辐射涂层可以明显减小长波辐射，通过算法可以在一定程度上消除短波辐射，但是辐射订正算法从本质来说属于半理论半经验方法，在某些情况下会表现很好，但是在某些情况下还是会引起较大误差。美国Multi-thermistor探空仪采取多个不同涂层的温度传感器，利用不同的涂层吸收与反射辐射特性，采用联合解算方式去除温度辐射影响，是一种绝对辐射量计算，可以视为完全去除了辐射影响，大大提高了高空温度观测精度。

对于湿度探测，虽然近年来技术发展较快，但是与以前的湿敏电阻相比，目前世界上广泛采用的湿敏电容还是属于吸附式元件，吸湿容易而脱湿较为困难，存在明显的滞差环。为了解决这一问题，芬兰Vaisala公司设计了双湿度传感器，采用轮流加热方式强制去湿；瑞士SnowWhite探空仪与美国CFH探空仪分别采取了直接测量露点的方式探测高空湿度，这种方法更接近湿度的原始定义，更加准确，特别是美国CFH探空仪在对流层上层，特别是平流层环境下测量结果更为可靠准确；此外，芬兰Vaisala公司还专门设计了一种新型探空仪，也是通过直接测量露点来探测湿度，其特制湿敏电容传感器灵敏度更高，适于低湿下大气湿度测量。

(2) 多种参考探空仪参加试验，提高了比对的可比较性

此次比对试验中，分别有美国Multi-thermistor探空仪作为温度的相对参考标准，瑞士SnowWhite探空仪与美国CFH探空仪作为湿度的相对参考标准。此外日本Meisei科学试验探空仪与芬兰Vaisala科学试验探空仪也参加了此次比对。多种高精度科学试验探空仪的参与，为数据比对分析提供了良好的坐标系，发展高精度参考设备也是CIMO长期发展目标之一。

从历届国际探空比对结果来看，一些高质量探空仪的温度观测已经非常接近满足气候观测需求，也就是温度精度达到0.1K至0.2K之间^[11-13]；虽然湿度也

有了长足的进步，但是湿度仍然是一个挑战性的课题，特别反映在对流层中层与高层的低湿性能^[14]；虽然气压传感器的测量精度也在不断提高，但是在气压小于10hPa时，还是不能提供可靠的位势高度资料；令人鼓舞的是，现代GPS技术开始应用到气象探空领域，从1993年日本国际比对开始，在巴西和毛里求斯及2010年中国举办的国际探空比对试验中，GPS探空系统逐渐成为技术主流。探空仪的温、压、湿和经纬度、高度等数据经地面接收系统接收，并由相应的处理软件处理^[15]，高空风是用探空仪在相邻时刻的水平位置变化量来计算的^[16]，经对比分析证明，GPS探空系统与地面雷达测风系统相比，能够保证全量程的稳定的精度^[17]。GPS定位不仅能够提供全量程高精度位势高度与测风数据，而且可以用来开展气压反算，历届国际探空比对试验技术概况如表2所示。

GPS探空体制具有较大的优势，针对GPS技术在气象探空中的应用，国内很早就开始这方面的研究。早在20世纪90年代，毛节泰等国内学者就开始关注GPS定位技术在气象上的应用^[18-21]；21世纪初，国内徐刚等逐步开展了GPS探空仪原理样机的设计^[22]，马舒庆等最早研制了GPS探空仪并通过中国气象局试验考核^[23]，特别是在2008—2010年，中国气象局组织了专门的国产GPS探空系统试验比对，国内有多个科研院所与厂家参加，最后遴选了两个型号的国产GPS探空系统参加了阳江国际探空比对，国产参试探空系统的技术指标已达到国际同等观测设备要求^[24, 25]。目前中国气象局已经基本完成了基于L波段二次测风雷达的电子探空仪换型工作，采用芬兰Vaisala公司RS92探空仪作为比对参考标准，对比结果显示国产探空仪的温度与气压观测结果表现相对较好，湿度、位势高度与风观测还存在较大的系统偏差^[26]。考虑到国家安全、业务稳定使用，以及价格等多方面因素，GPS探空系统在中国虽然发展很早，也受到多方面关注，目前还是没有进入中国业务应用，但是不可否认，卫星导航系统在探空位势高度计算、测风以及气压反算等方面都具有明显优势，未来随着中国北斗卫星导航系统的发展与成熟，中国探空业务必将过渡到卫星导航测风系统。

此外，通过此次国际探空比对试验，我们得到以下几方面的启示：

(1) 随着卫星导航测风体制的应用，由于其高精度的位势高度测量结果，今后气压可以采用反算方式，气压传感器已不是必备元件。

(2) 采用体积更小的珠状温度传感器，替换目前体积较大的柱状温度传感器，表面涂层改为真空镀

铝，替代目前的白漆涂层，减少红外长波影响，特别是来自云体的长波影响。

(3) 采用湿敏电容湿度传感器替代目前的碳湿敏电阻湿度传感器，提高其稳定性，以及低温条件下测量性能。此外，参照国外先进探空仪经验，研制相应的湿度订正算法。

(4) 传感器支撑架应该尽量长，使传感器远离探空仪箱体，避免箱体热污染；围绕传感器本身的支架设计应对称形状，以利于利用软件算法进行滤波处理，建议尽可能减少传感器本身支架，使传感器直接裸露在空气中。

表2 历届国际比对试验技术特点概况

| 测风方式 | 辅助遥感 | 湿度测量 | 温度测量 | 气压测量 | 位势高度测量 |
|---------------|-------------------------|-------------------|--------------------|------------|----------|
| 第八届阳江国际比对试验 | 新一代天气雷达，激光雷达等多种辅助遥感观测设备 | 全部采用湿敏电容传感器，技术成熟 | 珠状热敏电阻温度传感器，金属涂层工艺 | 卫星定位高度反算气压 | 卫星导航定位为主 |
| 第七届毛里求斯国际比对试验 | 少量辅助遥感设备 | 开始采用湿敏电容传感器，技术未成熟 | 棒状热敏电阻温度传感器，白漆涂层工艺 | 卫星定位高度反算气压 | 卫星导航定位为主 |
| 前六届国际比对试验 | 少量辅助遥感设备 | 湿敏电阻传感器为主 | 双金属片、热敏电阻温度传感器 | 气压传感器直接测量 | 气压推算为主 |

4 CIMO专家组建议

4.1 对于WMO成员国的影响及益处

(1) 试验的结果可以作为成员国购买自身业务系统的参考，从而减少单独开展性能试验的花费。

(2) 试验证明，对于业务GPS探空系统，将不再需要配备压力传感器（这将进一步减少探空仪施加的花费）。

(3) 本次试验结果为GRUAN选择潜在可用的业务探空仪提出了建议，用于GRUAN站的探空系统已经明确了建立自身观测的不确定度模型的需求。

(4) 建议针对应用于GRUAN观测的探空仪，满足GRUAN站网的重要气候变量的测量性能评分结果应至少达到4分。

(5) 对于中国，二次雷达系统是一个具有优良探测性能的业务观测系统，但其配套的探空仪需要匹配能够满足中国气象业务要求的湿度传感器。

4.2 对WMO成员国的建议

(1) 对于特定的探空仪，配套的地面接收系统的信号接收能力必须跟得上，以前很多探空系统经常由于地面接收系统接收能力较弱，对距离较远的信号不能有效接收，不能够满足使用要求。

(2) 任何成员国决定购买某种型号的探空仪系统，必须充分考虑探空系统价格及本国或某一地区对观测性能业务水平的需求。本次试验的结果显示，相对于过去，现在可选择使用的探空系统的范围扩大了。但

是本次试验不能对探空系统制造商的可信程度、产品的长期稳定性以及其业务备份和技术支持的能力进行评价，因此需要在合同签约时开展商务谈判。

(3) 对于那些希望将观测结果应用于气候监测的成员国，在采购系统时应注意采购系统误差小的系统。对于那些正在使用平均得分低于3分业务探空仪的国家，如果本报告中的指标应用于其自身的观测网络，应该尽快替换其观测系统以达到本报告中提出的业务要求指标。

4.3 对系统制造商的要求

(1) 如果制造商进行基础数据的订正，需要完成订正方法文档的编写（湿度和温度的时间滞后订正，辐射订正，白天温度噪声的滤波方法等），并将文档向用户公开。

(2) 基础的原始数据对测试过程中判断探空仪存在的问题是至关重要的。因此，在未来的国际对比试验中，基础原始数据必须提供给试验组，并允许在最终报告中发布，系统制造商在开发软件时，应能够产生只有一个版本的基础原始数据的文件，并在下一阶段试验前完成软件的开发。

(3) 如果一个探空仪操作系统判定探测结果不可靠，对其进行标注，并做置空处理，而不是让软件通过插值或拟合来制造虚假数据。此外不鼓励对超过1分钟以上的缺失观测数据进行插值拟合。

(4) 未来开展相对湿度传感器在低温下的校准时，只有3个公式在温度低于-50℃以下时被用于水汽分压力方程的计算，即Wexler（1977），Hyland和Wexler（1983），以及Sonntag（1994）公式。

(5) 建议制造商提高相对湿度传感器的校准技术，处理参与的系统性误差，并持续关注低温状态下的传感器校准工作。

(6) 在温度传感器方面，制造商应注意到CIMO指南第七版（2008）的要求，不要在温度传感器上刷白漆，这将导致显著的红外辐射误差。

(7) 为温度传感器提供尽可能好的通风环境，这是减少平流层随机误差的关键因素（例如MTR探空仪能够检测到其传感器上面2m处空气流过竹竿时产生的扰动），类似的温度传感器必须在探空仪盒体的上方并尽可能远离探空仪箱体。

(8) 制造商现在需要提供更好的防护措施，防止探空仪穿过云层进入干层时，水汽蒸发制冷带来的误差。这对于在数值预报模式中对于低云部分的预测具有重要作用。

5 结束语

WMO第八届阳江国际探空系统比对试验结束后,中国气象局气象探测中心积极开展国产探空仪探测性能评估工作,针对我国三种型号参试探空系统的具体情况,对对比中出现的问题进行梳理和改进,对国产探空仪不同要素测量性能进行了评估,全面详细地对国产探空系统与其他参试系统的对比结果进行分析,找出自身的不足,并提出技术改进措施,组织国产探空系统生产厂家进行技术改进和数据处理算法的完善工作。具体表现在以下几个方面。

(1) 将比对成果转化到业务GTS1-2型探空仪上,以指导以后的生产,提高我国高空探测业务水平。

①借鉴国外探空仪的经验,将湿度元件的防雨帽直径由原来的6mm增加到12mm,以增加湿度测量元件周围的空气流量,减少时间常数,解决湿度测量的迟滞误差。

②借鉴南非InterMet探空仪的温湿度支杆结构,加长温湿度支杆,从原来的152mm增加到157mm,同时改变探空仪盒与支杆之间的角度。以减小探空仪机壳的辐射对温度测量结果的影响。

(2) 加强高空仪器研制,提高硬件水平

①开展高空温度标准探空仪的研制工作,开展高空温度辐射误差订正算法的完善研究,力图从硬件设计和软件控制两方面提高高空温度探测质量。

②针对国产探空仪湿度探测结果与国外探空仪差距较大的情况,国内相关厂家正在自行研发适用于探空用的湿敏电容,力图解决湿度传感器在低温下测试滞后的问题。

(3) 研制高空订正算法

通过文献调研,以及借鉴阳江国际比对经验,国外先进探空仪都包含了许多重要的算法,特别是对于温度与湿度的订正算法,而国内这一工作开展相对较少。中国气象局气象探测中心依托于气象行业专项,开展相关高空算法研究,并将其应用到业务探空仪上,从硬件与软件上综合提高高空数据质量。

(4) 完善比对技术

通过承办阳江国际探空比对,中国气象局积累了举办大型国际活动,特别是组织比对试验的经验,培养了一支比对试验队伍,并且通过吸取国外先进的比对技术与方法,进一步完善与提高我国高空比对技术,与世界先进水平接轨。

参考文献

- [1] 宋连春,李伟.综合气象观测系统的发展.气象,2008,34(3):3-9.
- [2] WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation(V7.0). Geneva: WMO, 2006.
- [3] Hooper A H. WMO international radiosonde comparison, Phase I, Beaufort Park U K, 1984. WMO/TD-No.174, Instruments and Observing Methods Report, 1986: 28.
- [4] Schmidlin F J. WMO international radiosonde comparison, Phase II, Wallops Island, USA, 1985. WMO/TD-No. 312, Instruments and Observing Methods Report, 1988: 29.
- [5] Nash J, Schmidlin F J. WMO international radiosonde comparison, (UK 1984, USA 1985) Final report. WMO/TD-No.195, Instruments and Observing Methods Report, 1987: 30.
- [6] Ivanov A, Kats A, Kumosenko S, et al. WMO international radiosonde intercomparison phase III (Dzhambul,USSR,1989) final report. WMO/TD-No. 451, Instruments and Observing Methods Report, 1991: 40.
- [7] Yagi S, Mita A, Inoue N. WMO international radiosonde intercomparison phase IV (Tsukuba, Japan, 1993) final report. WMO/TD-No.742, Instruments and Observing Methods Report, 1996: 59.
- [8] Balagurov A, Kats A, Krestyannikova N, Schmidlin F. WMO radiosonde humidity sensor intercomparison, 1995. WMO/TD-No. 1305, Instruments and Observing Methods Report, 2006: 88.
- [9] Silveira D, Fisch R G, Machado L, et al. WMO intercomparison of GPS radiosondes, Alcantara, Brazil, 2001. WMO/TD-No.1314, Instruments and Observing Methods Report, 2006: 90.
- [10] Nash J, Smout R, Oakley T, et al. WMO intercomparison of high quality radiosonde systems final report (Vacaos, Mauritius, 2005), 2006.
- [11] GCOS. Manual on the GCOS surface and upper-Air networks: GSN and GUAN, GCOS73, WMO/TD-No.1106, 2002.
- [12] GCOS. GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN): Justification, requirements, siting and instrumentation options, GCOS112, WMO/TD-No.1379, 2007.
- [13] Haimberger L. Homogenization of radiosonde temperature time series using innovation statistics. Journal of Climate, 2007, 20(7): 1377-1403.
- [14] Sapucci, Luiz F, Luiz A T, et al. Analysis of relative humidity sensors at the WMO radiosonde intercomparison experiment in Brazil. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(6): 664-678.
- [15] 姚雯,郑国光,郭亚田,等.气象探空测风软件系统的标准化研究.应用气象学报,2004,15(1):88-94.
- [16] 黄炳勋. C波段测风一次雷达的跟踪特性及其应用前景.应用气象学报,1995,6(2):153-162.
- [17] 姚雯,马颖,黄炳勋,郭亚田.利用GPS定位资料分析L波段雷达测风性能.应用气象学报,2009,20(2):195-202.
- [18] 毛节奏. GPS的气象应用.气象科技,1993(4):45-49.
- [19] 朱喜林. GPS及其在大气探测中的应用.气象水文海洋仪器,2004(1):42-46.
- [20] 李国平,黄丁发. GPS气象学研究及应用的进展与前景.气象科学,2005,25(6):651-661.
- [21] 秦晓军. GPS技术在气象探空测风中的应用.陕西气象,2006,3:29-30.
- [22] 徐刚,王培延. GPS气象探空仪原理与工程设计.导航,2005,41(2):115-118.
- [23] 马舒庆,李峰,邢毅. 从毛里求斯国际探空系统对比看全球探空技术的发展.气象科技,2006,34(5):606-609.
- [24] 航天科工集团第二研究院23所北京长峰声表面波公司. GPS探空系统技术文件,2009:1-16.
- [25] 中国华云技术开发公司. HY-GTS(U)1-1型数字式GPS电子探空仪地面接收处理系统技术说明,2009:1-10.
- [26] 李伟,邢毅,马舒庆. 国产GTS1探空仪与VAISALA公司RS92探空仪对比分析.气象,2009,35(10):97-102.

季节气候预测的进展和前景

丁一汇

(国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 对季节气候预测的进展进行了评述, 主要集中在动力季节预测方面。全文共分四部分: (1) 季节预报的科学基础; (2) 动力 (GCM) 季节预报的进展; (3) 东亚季节预报水平低的原因分析; (4) 从国际气候预测未来发展规划国家气候中心气候预测的前景。根据上述结果, 最后提出了中国气象局季节预测发展的建议。

关键词: 季节气候, 预测, 进展

Progress and Prospects of Seasonal Climate Prediction

Ding Yihui

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

Abstract: The present paper has reviewed the recent progress of the seasonal climate prediction, with a special emphasis on the aspect of dynamic seasonal prediction. It consists of four parts: (1) the scientific basis of the seasonal prediction; (2) the state of the art of the dynamical seasonal prediction; (3) analysis of the skill of the dynamical seasonal prediction; and (4) future development and prospect of the seasonal climate prediction. Based on the above results, the suggestions and recommendations have been put forward of the development and future planning of the seasonal prediction for China Meteorological Administration.

Key words: seasonal climate, prediction, progress

1 季节预报的科学基础

从未来预报时效、原理和方法上区分气象预报可分为三种类型: 天气预报、短期气候预测和气候变化预估^[1]。由于后两种预报的差别主要是在时间尺度上, 所以可统称为气候预测, 因而气象预报简单地说包括天气预报和气候预测。但近年来也有人认为天气预报与短期气候预测都依赖于初始条件, 只是预报延伸的长度不同, 应统称天气—气候预报, 而气候变化主要取决于外强迫作用, 不同于前两种或天气—气候预报。气候预测方法的研究有长期的历史, 最早可以追溯到19世纪甚至更早。近一百多年来, 利用不同的相关关系、经验规则、动力模式和非线性混沌理论等提出了多种气候预测方法和工具, 并且有不少在实际预报中得到了应用, 获得了一定程度的成功。中国的气候预测 (过去称长期天气预报) 在业务上正式应用也有近50年的历史。虽然整体来看, 气候预测还处于研究、试验和业务应用不断改进的阶段, 但它至今取得的进展被认为是地球科学在近几十年中取得的最突出的成就之一^[2, 3]。

季节预报是超前预报未来一个季节或几个季节的气候条件, 尤其是预测偏离过去平均气候条件的异常程度。如果预报员认为预报的未来季节的气候条件与

过去的没有差别, 则可用“气候”预报作为未来的实际季节预报。这是制作季节预报的出发点。因而, 首先是考察所制作的季节预报是否与过去观测到的同期气候条件相似或基本匹配。但气候条件经常受到多种因子的扰动, 而使它不同于气候平均态气候。正是这些因子对未来预报结果的扰动是可预报的, 从而形成了季节预报的科学基础和目标。应该指出准确而确定的天气预报的上限取决于被预报天气的尺度, 预报时刻的大气气流的可预报特征与初始条件的准确性。而对于几个星期和几个月的尺度, 有意义的确定性每日天气预报是不可能的。大量研究表明, 所有能做的只是制作天气和天气型的概率预报。

近二十年来, 动力季节预报得到了迅速发展, 不少国家气候预测中心都发展和建立了自己的季节和年际数值预报模式, 在不少国家, 它们已逐步成为季节预报的主要工具^[4]。中国也在2003年建立了自己的动力季节预报模式^[5]并作为季节预报的主要工具之一。最近为了总结和评估国际上动力预报的进展、技巧、存在问题和未来发展前景, WMO和其他有关机构对季节预报从不同方面进行了评估^[4, 6-10]。这对于认识动力季节预报目前的水平和技巧, 以及存在问题和未来发展方向是十分有益的。本文将主要依据这些报告和相关论文, 针对我国的季节预报需求进行总结和评述。目前季节预报关注的是大尺度的异常分布, 但统计结果表明, 未来的季节预报分布常常会与气候平

收稿日期: 2011年6月23日; 修回日期: 2011年8月4日
作者: 丁一汇 (1938—), Email: dingyh@cma.gov.cn

均分布有显著的相似或重合。因而，气候平均态的分析和研究是季节预报的重要起点。在此基础上再分析影响平均态造成季节气候异常的因子，以及这些因子是如何产生气候异常的。造成气候平均态扰动或异常的因子有两类：外强迫作用和气候系统的内部变率，正是它们决定着季节预报的可预报性。

1.1 外强迫作用

(1) 太阳和火山活动

太阳活动作用的变化一般对长期的气候有较明显的影响，如11年周期循环。对季节尺度太阳活动影响不强，一般情况下不作为重要因子考虑。

火山活动可以影响气候，尤其是强火山爆发后的1~2年间全球变冷0.5℃左右，因而可为季节预报增加一定的预报技巧。但有人在研究了El Chichon和Pinatubo火山后认为：火山信号只有在大陆尺度才是可用的，并且这种信号易被气候变率模糊或完全掩盖住。

(2) 温室气体与气溶胶

温室气体和气溶胶作用在季节预报中常不被考虑，这是由于其作用与自然变率相比是小的，并且由温室气体产生的全球变暖信号已包含在季节预报的初始条件中。但近年不少研究表明，在模式中直接包含人类强迫确能影响季节预报，可发现在季节预报模式中计算的温室气体和气溶胶强迫的时间变化是呈增加趋势的，因而其影响可能会逐渐增长。这就是为什么有不少研究者认为即使在季节预报中，也应考虑人类引起的温室效应的影响。

(3) 土地利用变化

目前在季节预报模式中是否考虑土地利用的变化研究还不多见，尚不能确定它在季节预报中的重要性。

1.2 内部变率

气候系统的内部变率是自然变化，它具有各种尺度，一般又可分大气的内部变率与耦合变率两种。前者包括天气系统的影响，对季节预报而言，它被看做是不可预测的噪音。季节尺度可预报性的来源主要是气候系统的慢变过程，如海洋和耦合海气系统的低频变化以及海冰、土壤条件、雪盖等的影响。热带平流层准两年振荡（QBO）和平流层状况也可作为上边界影响季节预报。ENSO是季节预报最主要的可预报性来源。它是年际变率的主要模态，并通过全球遥相关影响各地区的温度和降水异常。目前用复杂的业务海气耦合模式已能较准确地预测ENSO事件的爆发与演变。除ENSO外，海洋的异常也会影响不同地区的季节尺度温度和降水，如印度洋偶极子（IOD），热带和温带大西洋海温的异常等。陆面过程的影响目前研究尚不够，但至少对某些地区和在某种情况下可为

季节预报提供一种信号。异常雪盖/雪量也可能是有一定作用的信号。不少研究和中国气象局国家气候中心（NCC）业务预报表明，用高原和欧亚前冬和春季雪盖多少作为汛期预报的信号有明显的技巧，尤其是前者。分析大气内部区域性模态也可提高季节预报的技巧，如南北半球环状模（SAM与NAM），NAO，PNA，NPO等。这些因子是大气内部的动力模态，有时可影响季节可预报性。有些情况下，它们与海洋强迫有联系，另一些情况则没有联系。这些模态的变率大部是不可预报的，但它们在下垫面强迫与大气内部变率间常常起媒介或传递的作用。除了QBO外，平流层环流变化对对流层异常也有预兆作用，尤其是平流层低频分量可向下传播并影响对流层季节尺度的环流，例如这可通过冬季北极涛动（AO）来影响对流层环流。因而考虑对流层与平流层的双向作用是有必要的，这与十几年前只考虑对流层对平流层的单向作用的观点有了明显改变。

气候的可预报性有三种来源^[6]：气候变量的惯性或记忆，耦合系统不同的相互作用（如反馈）或变率的模态和气候变量对外强迫的响应（图1）。前两种来源与气候系统内部变率和耦合变率的动力增长和衰减作用以及海洋和陆面的储存能力有关。这不仅包括变量相互之间的直接作用，也包括远距离的遥相关作用。通过这种作用能够把一个地区的可预报性传送到另一遥远地区。

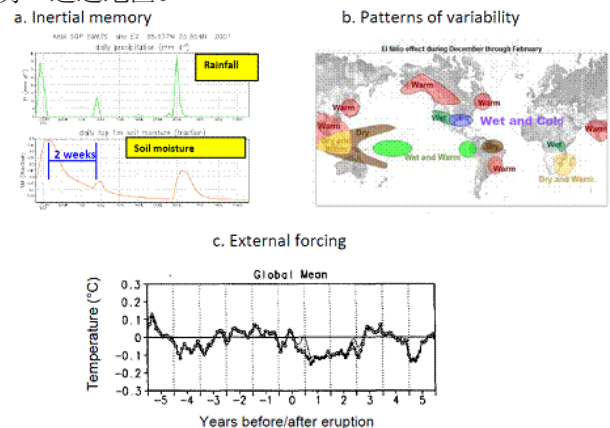


图1 (a) 惯性记忆的例子：在俄克拉荷马ARM/CART测点出现的正土壤湿度异常比引起它的大气事件要长得多的时间尺度上减少，在其他测点的土壤湿度时间尺度甚至比此更长；(b) 遥相关的例子：12月一次年2月期间El Niño影响全球气候异常的分布图；(c) 外强迫因子：6次火山爆发平均得到的前（x轴负值）后（x轴正值）全球平均温度变化，可以看到爆发后，约2年内观测到显著的冷却（黑色线表示ENSO事件影响已除去，淡色线为未除去的情况）^[6]

1.3 季节预报的可预报性和概率特征

季节可预报信号总是与不可预报的天气噪音共存的，也就是说，没有一个气候模式是完善的，总会产生模式误差，因而观测和模式预测的结果只能够以概

率的形式集合形成两套概率密度函数（PDF），以此提供相互比较的依据。这是由于一般由季节信号造成的方差只占方差的中等比率。因而，其可预报性也是如此，尤其在中高纬度地区其方差更低。处理这种有限的可预报性的最合适的方法是把预报用一种概率分布（PDF）来表征。作为一个例子，图2是热带太平洋SST预报的PDF比较。初始预报由绿色表示，相对于此PDF，以后的PDF（红和蓝色）都显示具有较高的概率预测，SST有更高的正距平值。观测的SST距平恰为0.8°C略低一些，正位于后来的两个PDF峰值之间。这种检验表明，预测的SST确实是应向更大的正距平值偏移。上三个PDF的标准差是预测超前期的函数。确定性预报实质上是把某一具体预报结果赋予概率为1。概率预报能够清楚地指明预报结果的不确定性。

可预报性和预报技巧是系统状态和地理区域的函数，如在ENSO极端位相技巧一般比平均条件高。对于SST强迫，可预报性最大的区域在热带。这是由于热带的自然内部变率较低，且大气能合理地直接对SSTs变化产生响应。随着纬度的增加，自然内部变率增大，同时来自热带的SST的信号衰减，因而，实际上气候事件的预报很少能到达上述理想研究给出的在陆地和中纬地区中等程度的技巧水平。在这种情况下，十分关键的是，季节预报要依据过去业务系统的运行情况和性能，并给出过去不同地区的预报技巧的量值大小，以此作为参照，才能更适当地利用和评估未来预报结果。

自然内部变率分析表明，季节预报的可预报性随着时间和地点而变化，并且可预报信号经常为自然的内部信号所掩盖，因而从本质上预报方法和技巧的改进是逐渐演进的。它取决于更好的观测、分析、模式

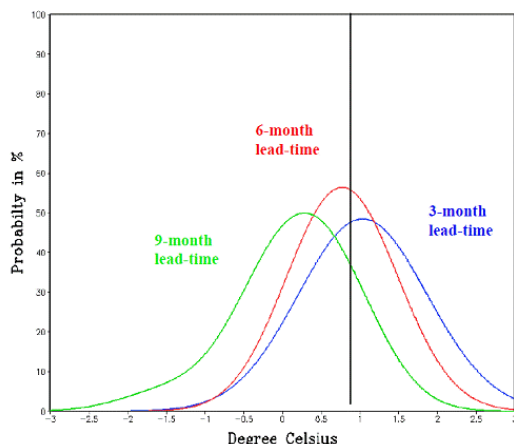
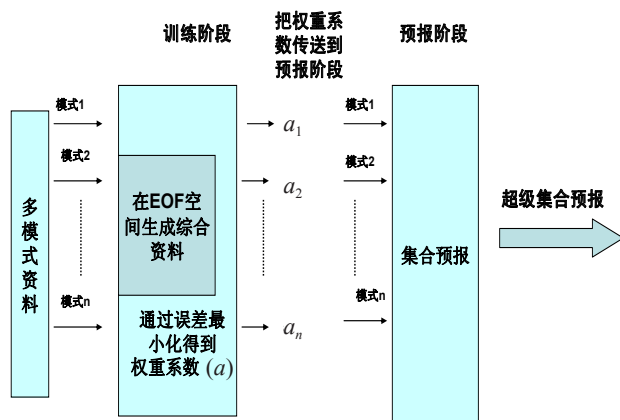


图2 Niño3.4 SST概率预报（由概率密度函数PDF表示）的例子，绿线是最长超前期的预报，红线和蓝线分别是6个月和3个月超前期预报；超前期越短，预报的PDF愈移向逐步增暖的海温（垂直黑线是观测值（0.78））^[6]

发展和预报复杂的耦合气候系统的能力改进，这需要通过以经济和有益于社会的方式为用户连续不断地提供预报的努力和工作来实现，也就是说，在不断的业务实践和社会服务中改进和提高预报技巧。目前可用多种方法制作概率预报。对于动力季节预报系统，起点是多样本的预报集合，它由一组初始条件产生，这组初始条件反映了其不确定性。因为初始条件不同，预报值以后有不同的演变，这造成了在预报时刻轨迹的散布。如果轨迹散布较宽，得出的概率分布也宽，预报是不确定的。如果出现一束密切相近的轨迹，则表明不确定性较小，这时是不考虑模式在向前积分过程中产生的误差。经验表明，多样本动力季节预报模式一般对信度估计过高，即所得到的散布程度太窄，与观测结果的范围并不完全相匹配。另外还经常表现为集合散布与预报误差间没有什么关系，其原因被认为是模式误差偏大，因而这导致多模式集合方法的出现（即超级集合）。多模式方法是把不同水平的模式进行组合得到集合值，以此把某些模式误差和随机误差平均掉，因而，一般比单模式结果可产生更有技巧的预报。综上所述，目前不少气候中心解决概率预报的途径是采用多样本、多模式方法。

多模式集合即超级集合方法^[11]可据多种模式的预报得到单一的确定性预报。与参与集合预报的单模式相比，由这种方法得到的预报有最高的技巧，并且技巧也高于偏差消除的集合平均预报（系统误差订正集合平均预报）。该方法的原理是把整个预报过程分成两个阶段。第一阶段称训练阶段，在此阶段利用多模式预报和观测（分析）场得到模式性能的统计结果。第二阶段称预报阶段，利用多模式预报和上述统计结果得到未来的超级集合预报（图3）。

在训练阶段，通过使用观测（或分析场）作为比较的基场，可用过去的预报得到各模式过去性能的统计特征。其做法是据这一套过去的多模式预报，先把它们内插到高分辨格点上，再用多元回归方法（对多模式），把模式预报对观测场（分析场）进行回归。这是利用最小二乘法使模式预报和分析场距平之差达最小，据此可确定权重。由每一个别模式得到的这些回归系数被认为能够代表该模式在训练期任何格点上模式的相对可靠性程度。对于每一模式的预报变量，训练的目的是估计模式偏差的地理与垂直分布。对 P 个变量和 q 时段设有 m 个模式， n 个格点（水平和垂直方向），则有 $m \cdot n \cdot q$ 个统计系数（约有 10^7 权重）。所以做得这么详细对于超级集合是有必要的，它需要在每个格点上计算出不同的权重值。设某一预报时效的超级集合预报为：

图3 超级集合方法流程图^[8]

$$S = \bar{O} + \sum_{i=1}^N a_i (F_i - \bar{F}_i) \quad (1)$$

\bar{O} 是观测的时间平均值, a_i 是个别模式*i*的权重, F_i 是模式*i*的预报值, \bar{F}_i 是模式*i*在训练期的时间平均值, N 是模式数。在每一格点计算出权重, 即使预报的均方根误差的目标函数达最小:

$$G = \sum_{t=0}^{t=train} (S_t - O_t)^2 \quad (2)$$

训练期建立的回归方程为:

$$O_t = \bar{O} + \sum_{i=1}^N a_i (F_{it} - \bar{F}_i) \quad (3)$$

F_{it} 是训练期模式*i*的预测值。在训练期每一模式预报的序列对观测场进行多元回归, 以后把所有这些多元回归系数集合在一起。训练期取多长依每种预报类型而变。在训练期得到的这些统计量以后直接输送到预报阶段。在预报阶段, 也有相同的诸模式之预报值。它们由其过去的总体表现被订正。这种消除偏差的方法比一般的偏差消除集合平均要更有效。后者在偏差消除后规定所有的模式权重为1.0, 而超级集合的权重依据各模式的过去表现而定。

权重可为分数, 甚至为负数。在任何阈值水平上, 从概率的意义上, 超级集合概率预报比多模式偏差消除集合方法都会略好一些。

注意参与超级集合的各个模式的回归(权重)系数, 随空间(格点)变化, 但随时间不变。另外, 其他多模式集合方法也包括:

简单的集合平均,

$$E_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (4)$$

或与消除偏差法相结合,

$$E_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}_i) + \delta \quad (5)$$

消除偏差的方法(Bias-removal)中简单的一种方法

是 δ 法, 即由相对于模拟当今气候的气候模式输出(预报)决定将来的气候变化(即两者之差), 一般以两者的温度差或降水的百分比变化表示, 以后这些变化被用于观测的历史气候资料输入到影响模式中。 δ 法认为, 将来平均值和变率的模式偏差是与当今模拟的偏差相同, 作为订正, 可把这个偏差(δ 量)直接加在预报的平均距平(相对于训练期)上。因而这个假设的结果是, 将来的极端天气事件的频率和量级相对于将来的平均气候是与当今气候的情况相同。这是这个方法的主要问题。注意, 公式(5)中的偏差消去集合法即为此方法之应用, 它与式(1)相比, 没有训练时期, 因而不用最小二乘法得到回归方程和回归系数 a_i 。

1.4 气候预测中的混沌问题

什么是混沌? 撇开数学上严格的定义不谈, 从物理上, 我们可以说混沌是在确定性(deterministic)动力学系统中出现的一种貌似随机的运动。动力学系统通常由微分方程、差分方程或简单的迭代方程所描述, “确定性”指方程中的系数都是确定的, 没有概率性因素。从数学上说, 对于确定的初始值, 决定性的方程应给出确定的解, 描述着系统确定的行为。但在某些非线性系统中, 这种过程会因初始值极微小的扰动而产生很大的变化, 即系统对初值依赖的敏感性。由于这种初值敏感性, 从物理上看, 过程好像是随机的。这种“假性随机”与方程中有反应外界干扰的随机项或随机系数而引起的随机性不同, 是决定系统内部所固有的, 可称之为内禀随机性(intrinsic stochasticity)^[12]。

现在的问题是由复杂的耦合气候模式预测的将来气候变化是否可靠, 在多大程度上是可信的。这是许多人经常提出的一个科学问题。混沌理论告诉我们, 在混沌系统中, 系统具有对初始条件敏感的依赖性, 也就是系统的初始条件仅仅稍有改变, 足够长时间后, 系统将达到完全不同的状态。由于初始条件总不能被精确地知道, 即使系统的运动规律是严格确定的, 人们仍无法准确预测系统的长期行为(确定性混沌)。简单地说, 系统是确定的, 但不可预测。长期以来, 牛顿动力学被认为是高度确定性的, 因而原则上是可预测的。但这种可预报性最先在1903年前后被法国数学家庞加莱所质疑, 他研究了牛顿动力学下物体运动的近似解, 发现一些解并不收敛, 他认识到在这些情况下, 实际解一定是高度依赖于初始条件, 致使实际的可预报不复存在。这种微小差异的初始条件可导致不同预报结果的不可预报的混沌行为, 在20世纪60年代得到了广泛的研究。并且第一次被洛

伦兹 (E.N. Lorenz) 用于大气模式中, 得到了著名的 Lorenz 吸引子, 并形象地把这种大气的混沌行为描述为“蝴蝶效应”^[12]。

气候是一种混沌现象, 它具有明显的湍流或非周期性运动。它的长期行为是否可预测。如果可预测, 是否存在一个预测的极限。这涉及到气候的可预测性问题。由于篇幅所限, 这里将不再详细讨论大气或气候系统 (如海洋) 的混沌特性与行为以及如何研究其可预报性, 而只提供重要的证据和理由来说明气候模式的预测结果在什么情况下和在多大程度上是可预报的, 因而其预报结果应该是可靠的。

(1) 初值决定的数值天气预报其理论可预报上限为2周, 但如果数值模式十分完善, 初始条件误差很小, 预报时限可延长到3周, 这可能是用确定性的动力模式方法获得有用预报的最长时效。但是对于某些天气和气候形势下的预报尚可维持延长, 甚至达到近4周的时间。这主要是对冬季中纬度大尺度大振幅准定常波的预报。它们常常表现为具有持续性高压区的阻塞形势。另外模式中对热带大气环流和行星尺度波动描述的改进也能显著改进中高纬度天气和气候异常的预报。

(2) 对于月以上的气候预报如季节和年际预报, 耦合强迫 (如海洋与陆面过程, 包括积雪覆盖) 对气候异常起着非常重要的作用。例如中东赤道太平洋海表温度一旦出现明显异常 (变暖或变冷), 会形成厄尔尼诺或拉尼娜现象。目前已可依据这种海洋对大气的耦合强迫作用提前1年做出全球气候变化或异常的预报。另外, 海洋和陆面过程可以引起大气环流的优势模态, 这种环流的优势模态可持续数年或数十年, 从而造成大范围甚至全球的气候异常或气候变化。这种行星尺度的环流优势模态或者由耦合强迫产生, 也可能在人类引起的气候变化条件下产生。现在大多数国际上先进的复杂耦合气候模式能预测这种环流的优势模态, 它们对于区域气候变化的预报尤其重要。从动力系统的观点看, 这反映了海洋或陆面强迫或日益增加的人类活动引起的温室气体造成的辐射强迫影响的气候吸引子几何形状会发生什么变化。混沌理论的研究表明, 虽然在混沌系统中, 个别轨迹可能是不可预报的, 但整个几何形状的变化是完全可预报的。上述气候变率优势模态的存在和演变, 反映了吸引子几何形状和优势极性的改变。

(3) 气候变化的预测不同于几周时间尺度的天气的可预报性, 后者主要依赖于初值, 而前者既依赖初始条件, 也依赖边界条件或者完全依赖于边界条件。较短时间尺度的季节气候预测就是依赖于以上两种条

件, 因而在模式中边界条件的变化如上边界太阳辐射的季节循环, 下边界的海表温度的变化都包含在模式中。这种可预报性被洛伦兹称为第一类可预报性。对于长期 (几十年或几百年) 的气候变化预测, 如由人类活动造成的温室气体增加引起的全球气候变化, 将不依赖于大气的初始条件, 这是由于在模式长期积分之后, 将完全丧失对初始条件的记忆, 因而失去它的影响。

这种完全依赖于详细边界条件变化的气候预测被洛伦兹称为第二类可预报性, 其可预报性决定于外界强迫变化的时间尺度^[13, 14]。由于气候系统的惯性, 即使施加于边界 (包括CO₂增加) 的外强迫消失之后很久, 气候系统还将继续变化相当长的时间, 甚至长达千年以上。海平面上升的响应就是一个例子。从外强迫引起的辐射平衡的变化看 (即辐射强迫), 由人类活动造成温室气体的增加与火山爆发、太阳活动等外强迫在引起全球辐射不平衡上是相当的和等效的。古气候模拟表明, 气候模式对于自然的外强迫响应是比较合理与正确的, 因而有理由认为, 气候模式对于温室气体增加以及其他耦合强迫的气候响应也应是基本正确的。这就是气候变化预测可靠性的基本科学基础。

从混沌理论观点看, 这种结果是令人十分意外的。但它反映了气候系统的某种规则性, 表明对于一些大的气候变化, 气候系统并不是强混沌性质的, 而是以大致可预报的方式响应如米兰科维奇循环等不同尺度的强迫作用。米兰科维奇循环的强迫产生于地球轨道变化引起的地球上太阳辐射分布的变化。前面已经指出, 由温室气体增加所引起的全球气候变化也是被大气顶辐射状况的变化驱动。从性质上它与米兰科维奇强迫产生的辐射状况变化并无不同, 因而可以认为, 从这个方面看, 温室气体增加以及其他外强迫也应该导致基本可预测的全球气候响应。

由于预测结果对初始条件的敏感性, 首先是要改进全球气候观测系统, 为气候模式提供更准确的初始场。但要做到这一点在相当长时间内是有困难的, 因而目前的解决办法是用数学方法对观测的初值进行扰动, 得到在观测和分析误差范围之内相差甚小的一群初始值, 它们代表在初始时刻可能出现的所有观测场, 其数量可达50个以上。以后用每一初始值进行预报, 最后把所有个别预报成员用统计方法进行集合, 这就是前面所述的多样本集合方法。如果各预报成员的结果具有低离散度, 则预报具有较高的技巧和可信度。反之如果个别成员的预报相互之间有很大的离散度, 则预报技巧偏低^[15] (图4)。

另一方面, 气候模式并不是十分完善的, 尤其

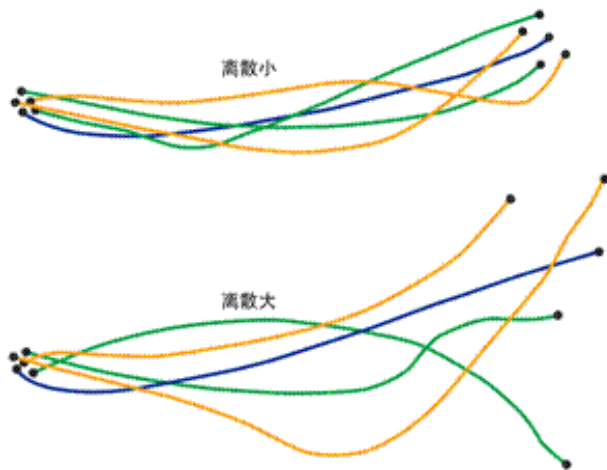


图4 集合气候预测的示意图：依据十分接近的一组初始条件制作的30天气候预测，有些集合预报整体上表现出低的离散度，有些则表现高度离散，低离散度的集合预报可用于实际的预报，它具有更大的可信度^[15]

是对于中小尺度（如云）和湍流运动的描述是比较粗的，它们主要采用物理参数化方法，即以大尺度变量表征它们的总体效应，这也会导致气候预测的误差，因而继续改进和完善气候模式是另一方面的发展方向。由于目前各国气候预报中心使用的模式并不完全相同，各具特点，因而也可以采用数学方法对各种模式的预报结果进行集合，这就是前面说明的超级集合方法。但有一个前提，就是参加模式超级集合的各气候模式一般要有较好的预报性能。通过集合之后一方面可使模式的随机误差或噪音相互抵消以及系统偏差减小，另一方面可突显出由耦合强迫与外强迫在模式中产生的有用气候信号，以提高集合预报的信噪比。因而目前和将来的气候预测是多初值与多模式集合预报系统。从本质上看，季节气候预报演变成一种概率预报。为了给公众和用户一个确定性的预报结果，目前是对各成员用算术平均（等权重）或加权平均得到。这在某种程度上，是解决作为混沌现象的气候变化的一个很好的途径。

2 动力季节预报的进展

2.1 ENSO和印度洋海表温度（SST）的预报

由于ENSO预报是最成功的季—年际尺度的大尺度现象预报，因而评估季节预报模式的出发点是ENSO预报。一般主要用Niño3.4区（5°N—5°S，170°—120°W）SST距平定量表示，或用MSSS计算Niño3.4 SST预报的确定性技巧。有人也用时间相关系数（TCC）和均方根误差（RMSE）进行技巧评估，这种情况下，几乎都用偏差订正的预报，而不用原始模式产品。所有研究表明：多模式预报（MME）的预报技巧通常是最高。其性能超过所有个别模式的技巧

（图5）^[4]。ENSO预报技巧与季节循环有关，通常5—7月比较难报，因为一年的这个时期异常的持续性很低（即所谓春季预报障碍）。总体上，ENSO预报的技巧是不断提高的。图6表示ECMWF ENSO预报系统技巧在过去十年左右的时间中稳定增加的情况。可以看到，在近十年中，随着业务气候预报系统的改进（由S1系统到S3系统），预报技巧是逐步提高的。对于亚太经合组织气候中心（APCC）7个耦合模式预报的平均相关系数，从5月1日和11月1日开始的6个月超前期分别为0.77和0.81（图7a）。如果把此ENSO的预报技巧与EC的DEMTETR的集合预报（MME）相比（图7b）^[5, 16]，后者比前者略高。如果把DEMTETR和APCC/CliPAS模式组合在一起，则对所有以5月和11月为初始条件的6个月超前期预报的平均技巧为0.86。Jin等发现^[17]，预报技巧明显取决于季节，ENSO位相（阶段）和强度。较强的El Niño和La Niña事件更可预报。中性年比暖冷事件的可预报性要低得多。

印度洋偶极子（IOD）的发生与ENSO事件有密切关系，它影响周围南亚、东南亚、东非、澳大利亚，甚

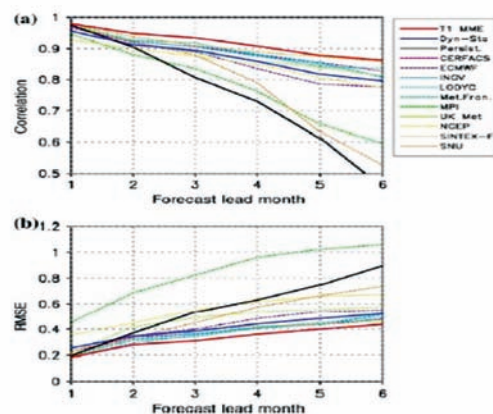


图5 全球主要耦合模式预报的ENSO集合预报。图中给出1980—2001年Niño3.4区海表温度集合预报和各模式成员的技巧（红线是MME）。（a）实况与预报的相关系数；（b）均方根误差（WCCC-3）

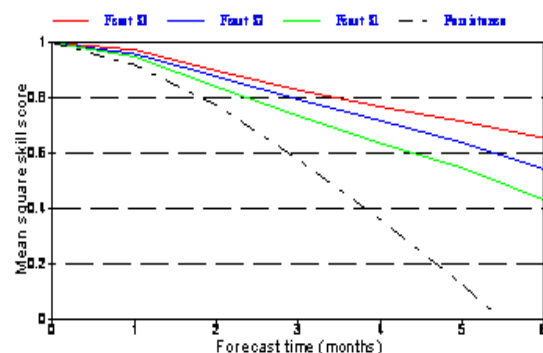


图6 欧洲中期天气预报中心（ECMWF）三个业务系统（S1,S2,S3）对Niño3.4区预报的平均平方技巧分（MSSS）

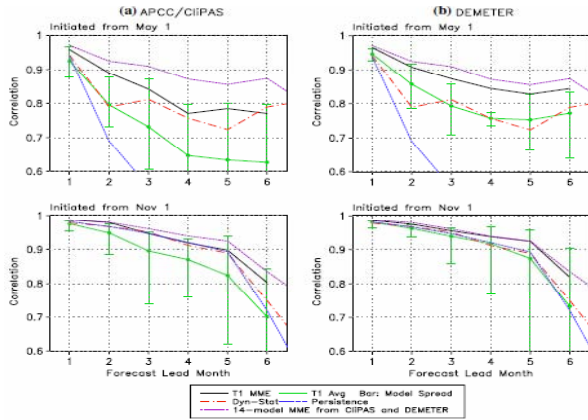


图7 (a) 1981—2001时期7个CIIPAS耦合模式得到的Niño3.4 SST指数预报的时间相关技巧。横坐标是预报超前期月数(从5月1日和11月1日开始); (b) 同期7个DEMETER耦合模式结果, 绿线是各个模式的平均技巧, 垂直线表示最好的持续性预报(蓝线)的变化范围。紫色虚线是CIIPAS与DEMETER 14个耦合模式的MME结果^[5]

至东亚的气候变化。图8a, b是东西印度洋SST和IOD指数的预报技巧。可以看到, 对于印度洋, 两个初始预报时间(5月1日和11月1日)的6个月超前预报的相关技巧为0.68, 西印度洋以11月为初值的6个月超前期预测相关技巧为0.80, 而5月初值的5个月超前期预测相关技巧为0.43, 这些技巧都超过11月初值的持续性预报和统计动力预报。虽然东、西印度洋SST预报具有一定的使用技巧, 但IOD和SST指数的预测技巧明显减小。以5月和11月为初值的3个月超前期IOD预测的TCC技巧皆低于0.4, 这种结果是由于7月预报障碍和严重的1月预报障碍的存在所致。

总之, 通过ENSO和印度洋SST MME预测的检验表明: (1) ENSO事件具有较高的预报技巧, 而印度洋SST预报技巧虽比ENSO低, 但也具有相当的技巧, 尤其东印度洋SST具有较好的预报技巧。IOD并不具有较高的预报技巧; (2) 使用MME方法对SST预报有明显的改进, 其平均预报技巧皆高于个别模式

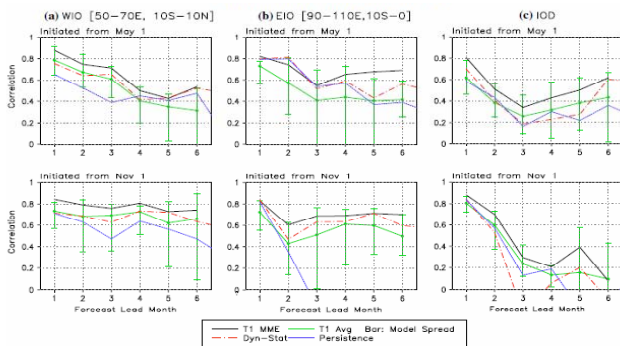


图8 (a) 同图7, 但是对西印度洋(WIO, 10°S—10°N, 50°—70°E) SSTA, (b) 东印度洋(EIO, 10°S—0°, 90°—110°E) SSTA, (c) 对印度洋偶极子(IOD) SST指数, 它是WIO与EIO SSTA的差值^[5]

成员的预报技巧; 并且MME预报也都远超过持续性预报和统计—动力预报(用贝叶斯方法组合统计预报和模式预报)。

2.2 MME预报水平的评估指标

第一节中已指出, MME预报是一种概率预报。概率预报的技巧评分是用Brier技巧分(BSS)和相对业务特征量评定。BSS的定义来自Brier评分(BS), 它是一个二分事件概率预报准确性的标量度量, 其定义为:

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2 \quad (6)$$

n 是预报次数, f_i 是第*i*次预报发生的预报概率, o_i 是第*i*次的观测概率。如事件发生, $BS=1$, BS 可分解成三项, 它们分别与不确定性、可靠性和分辨率有关。

$$BS = \bar{o}(1-\bar{o}) + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m n_k (f_k - \bar{o}_k)^2 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m n_k (\bar{o}_k - \bar{o})^2 \quad (7)$$

$$= BS_{unc} + BS_{rel} - BS_{res}$$

式中, \bar{o} 是事件的气候概率, m 是概率仓数, f_k 是仓*k*的预报概率, \bar{o}_k 是当预报概率为 f_k 时, 事件发生的相对频率。气候的预报Brier技巧分 $BS_{clim} = BS_{unc}$, 因而Brier技巧分

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{clim}} = \frac{BS_{res} - BS_{rel}}{BS_{unc}} \quad (8)$$

对气候预报, $BSS=0$ 。

概率预报的另一个指标是ROC曲线之下的面积量(AROC), 在一概率阈值范围内的同号率对错报率图中积分ROC曲线下方的面积就可得到AROC。对于一完全确定性预报AROC等于1, 如同号与错报率相等, $AROC=0.5$, 代表没有技巧。

2.3 MME预报结果的评估结果

表1是DEMETER MME冬季温度和降水的分区技巧(BSS评分)。

表1 6—8月和12—2月温度和降水的BSS评分 E_T 和 E_T 分别代表最高10%和最低10%的类型^[18]

| Region | 2-m Temperature | | | | Precipitation | | | |
|------------------------|-----------------|----------|----------|----------|---------------|----------|----------|----------|
| | JJA | | DJF | | JJA | | DJF | |
| | $E_T(x)$ | $E_T(x)$ | $E_T(x)$ | $E_T(x)$ | $E_T(x)$ | $E_T(x)$ | $E_T(x)$ | $E_T(x)$ |
| Australia | 10.7 | 10.1 | 1.3 | -0.4 | -1.3 | -2.5 | -3.1 | -3.6 |
| Amazon basin | 14.4 | 9.1 | 23.4 | 25.7 | 2.2 | 2.1 | 9.5 | 8.9 |
| Southern South America | 8.5 | 8.2 | -1.2 | 1.8 | 7.8 | 5.0 | -0.7 | -2.8 |
| Central America | 12.1 | 9.9 | 14.8 | 6.3 | 2.6 | -0.7 | 8.7 | 8.5 |
| Western North America | 6.5 | 7.7 | 3.9 | 2.3 | 3.2 | 5.5 | -0.6 | 0.0 |
| Central North America | -4.1 | -3.6 | -7.5 | 0.3 | -1.8 | -7.0 | 3.7 | 5.3 |
| Eastern North America | 0.6 | 5.7 | 4.1 | 9.5 | -4.5 | -8.3 | 9.2 | 6.0 |
| Alaska | 3.0 | 2.1 | 0.0 | -0.7 | -0.1 | 0.3 | 2.4 | 4.9 |
| Greenland | 3.6 | 4.2 | 8.0 | 5.8 | -1.4 | -0.5 | -2.1 | -2.0 |
| Mediterranean basin | 7.6 | 10.7 | 3.2 | 3.2 | -0.5 | 0.1 | 1.6 | -0.9 |
| Northern Europe | -4.4 | -4.2 | 4.8 | 2.9 | -1.0 | 1.9 | -1.1 | -0.9 |
| Western Africa | 10.4 | 11.8 | 18.1 | 17.2 | -1.6 | -2.0 | -4.9 | -3.5 |
| Eastern Africa | 12.6 | 5.8 | 13.3 | 10.3 | 0.1 | -0.3 | 1.2 | 0.6 |
| Southern Africa | 5.6 | -1.1 | 15.9 | 15.7 | 0.7 | -1.2 | 5.4 | 3.6 |
| Sahara | 7.6 | 7.4 | 6.9 | 3.9 | -2.4 | -4.8 | -2.7 | -2.7 |
| Southeast Asia | 10.7 | 5.9 | 8.7 | 18.1 | 14.2 | 10.3 | 3.4 | 2.5 |
| East Asia | 4.2 | 7.9 | 10.8 | 10.0 | 0.6 | -1.0 | -1.6 | -0.9 |
| South Asia | 4.9 | 13.1 | 7.6 | 8.6 | -1.6 | -3.0 | 2.0 | 0.5 |
| Central Asia | 0.8 | 3.8 | 1.3 | -0.4 | 0.5 | 0.1 | -3.1 | -3.6 |
| Tibet | 10.7 | 10.1 | 23.4 | 25.7 | -1.1 | 0.0 | 9.5 | 8.9 |
| North Asia | 14.4 | 9.1 | -1.2 | 1.8 | -1.3 | -2.5 | -0.7 | -2.8 |

由表1 DEMETER计划的检验可见, 在1980—2000年间, 季节平均的地表气温和降水最高10%和最低

10%类型的超前1个月的MME预报技巧(BSS)明显地依赖于地区和季节。但不论季节,大部地区一般平均地表气温的预报技巧高于降水。某些热带地区的DJF预报,如亚马逊地区, JJA东南亚,季风降水距平的预报有显著的技巧。地表气温统计上显著的技巧在某些地区不限于热带,可扩展到中纬度。如JJA时的澳大利亚,南美南部,北美西部与DJF时的东亚。注意由长期回报得到的预报技巧并不完全代表目前和未来季节预报水平,这主要是因为季节可预报是逐年改变的。过去的不等于现在和将来的,尤其是将来气候极端事件(如强 El Niño 事件)可能发生的年份或时段。

图9是早期亚—印—太地区北半球夏季降水(6—8月)的集合预报水平评估(1979—1999年)^[7]。可以看到,在东亚和南亚季风区预报技巧是很低的,主要在热带中东太平洋和热带东西印度洋有比较高的相关技巧。如前面所述,它们主要来自ENSO事件和热带海洋SST的作用。热带西太平洋不少地区降水预报有一定技巧,但总体上不高。菲律宾以东地区和东海地区具有较高的预报技巧。

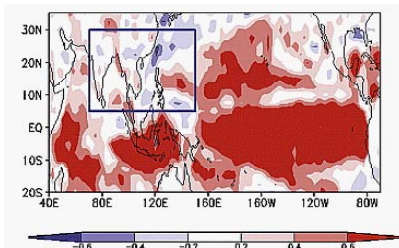


图9 观测的CMAP降水(1979—1999年)与5个模式模拟集合平均的6—8月降水间的相关系数^[7]

图10和图11分别是1981—2003年MME超前1个月2m气温和降水的预报技巧(TCC:时间相关系数)。海洋表面附近的气温具有持续性,这是因为它深受其下垫面SST的影响,因而其预报技巧一定会明显地高于持续性预报。图10的下图给出了MME与持续性预报的差。在12月一次年2月有用的技巧主要呈马蹄形分布,由大陆和东印度洋向东北和东南太平洋延伸。另外,在北美、欧洲、中东、南非、东南亚也是统计显著的技巧区。它们可能是通过遥相关产生于ENSO峰值阶段的影响。6—8月MME的温度预报在不少地方超过持续性预报,但在不少地区不一定好于持续性预报。这表明持续性预报可能是夏季温度预报的一种补充工具,尤其是1998年之后,气温具有更强的持续性。

6—8月和12月一次年2月降水MME预报高技巧地区(0.5~0.7)位于10°S—20°N的热带太平洋和大西洋地区,海洋大陆,巴西东北部,副热带南太平洋辐合区(图11)。注意12月一次年2月的高技巧区比6—8月有一定的扩大,主要向副热带海洋(20°—

40°N)和大陆地区,这也表明模式具有预测ENSO遥相关的能力。与图9相比,西太平洋高的技巧区DJF时期都有扩大,从长江中下游到日本南部有更明显的高技巧区,夏季40°N附近从中亚到北美的一系列小范围高技巧区可能反映了Rossby波遥相关的结果^[19]。

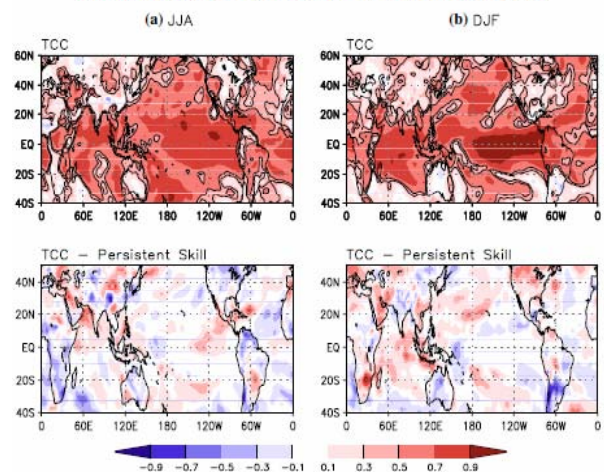


图10 APCC MME系统的技巧评估。1981—2003年14个CliPAS模式超前1个月2m气温MME季节预测与实况的事件时间相关系数(TCC), (a) 6—8月, (b) 12月一次年2月; 下图是夏、冬MME预测与持续技巧的差值分布。细(粗)实线代表0.05 (0.01) 水平的相关系数的统计显著性

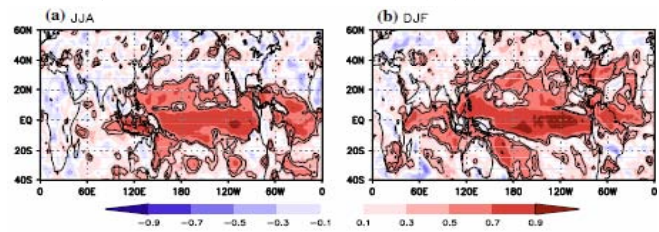


图11 同图10, 但对于降水

预报技巧以及可预报性不但是纬度和经度的函数,而且还具有明显的年际变化。这主要与ENSO时间的影响范围和演变有密切的关系。纬向平均的TCC技巧表明(图12),赤道地区平均技巧最高,6—8月在5°S超过0.6;12月一次年2月在5°N超过0.7(图12a)。主要在北半球0°—40°N之间地区12月一次年2月降水预测技巧超过6—8月预报,尤其在20°—40°N地区。但在南半球,在30°以南6—8月预测比12月一次年2月

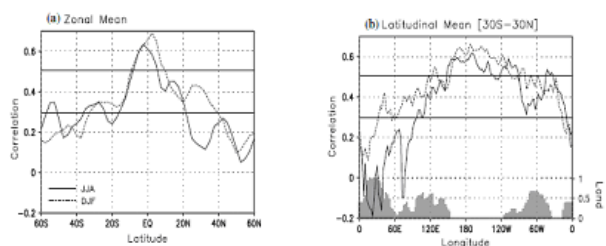


图12 6—8月和12月一次年2月热带和中东太平洋地区降水预报的技巧。(a) APCC/CliPAS MME系统预测的降水纬向平均时间相关技巧。实线: JJA, 虚线: DJF; (b) 纬向平均30°S—30°N的经向平均时时间相关技巧, 阴影区为陆地区

好，即都是冬季优于夏季。这可能是在ENSO发展阶段与海洋大陆对流异常的遥相关增强了南半球冬季的遥相关，以此增加预报技巧。

图12表明，无论6—8月和12月一次年2月，热带平均的降水预报技巧都从ENSO发生区向东西减少。6—8月最高的技巧位于日界线附近（150°E—170°W），12月一次年2月位于150°E—140°W经度区。热带非洲的预报技巧最低。亚澳季风区（4°—14°E）和美洲热带地区（60°—90°W），12月一次年2月的预报技巧显著高于6—8月。陆地地区一般预报技巧甚低。全球热带地区预报技巧的进一步检验表明，整个技巧的逐年变化依赖于ENSO变率。MME PCC（异常型相关系数）技巧与Niño3.4 SST的振幅有清楚的相关，尤其是北半球冬季温度相关系数达0.76，降水相关系数达到0.75，相关最差的年份常出现在ENSO过渡或正常阶段。图13是大气环流场的季节预报，一般它比温度和降水有较高的技巧，超前一个月850hPa流函数季节预报高技巧区在6—8月位于西太平洋和亚洲大陆、东太平洋、北美；12月一次年2月位于海洋大陆（图13上）。200hPa流函数预报高技巧区位于40°S—60°N地区，只是赤道区是例外（图13下）。500hPa位势高度场预报（图13中）的高技巧区主要位于全球热带地区，但它随季节有南北移动。上述环流预报的空间型和季节差异也主要反映了ENSO的影响：（1）6—8月到12月一次年2月预报技巧的增加是因为ENSO强迫在此时期增加的结果；（2）850hPa流函数距平高技巧区明显东移是由于ENSO引起的最强赤道对流区从ENSO发展阶段（JJA）到成熟阶段东移的结果；（3）200hPa流函数分布是对El Niño和La Niña产生的赤道偶极子热冷源产生的大气Rossby波响应和遥相关结果。在El Niño年，在东太平洋增暖条件下，激发的赤道开尔文波和Rossby波迅速地东传，整个热带增暖。La Niña情况正好相反，结果与温度变化一致。500hPa高度在El Niño时期上升，La Niña时期下降。因而，几乎所有的高技巧区都是由于ENSO遥相关通过大气内部动力学过程而造成的。

通过上面的检验，可以得到，（1）预报技巧随地点和季节而异；（2）相关技巧空间型和季节差表明ENSO变率是全球季节预报技巧的主要来源；（3）在两半球由于ENSO引起的遥相关冬季季风降水更可预报；（4）陆地和局地夏季季风区的降水预报几乎没有技巧。

2.4 概率预报及其与确定性预报的关系

依据BSS和AROC（ROC曲线下方的面积）用气候三分法对三类预报进行了概率预报技巧的分析。图14是

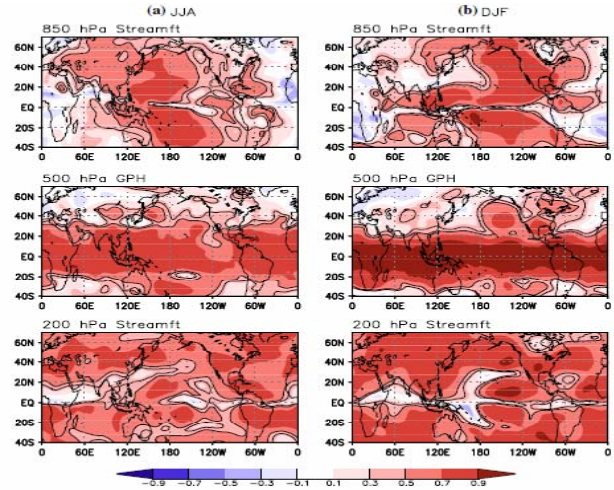


图13 850hPa（上）和200hPa（下）流函数以及500hPa高度场（中）的时间相关系数。（a）JJA；（b）DJF，细（粗）实线代表0.05（0.01）显著性水平

正距平类型2m温度预报的可靠性图。一般MME的可靠性曲线（BSS线）比个别模式的曲线更为接近对角线，这表明MME预报的可靠性明显高于任何个别模式的预报，尤其是对很高和很低的预报概率情况，依据可靠性指标（ BS_{rel} ），降水预报略好于2m温度预报。它在12月一次年2月是最可靠的（ $BS_{rel}=0.7$ ）。但应指出，虽然多模式系统的降水概率预报更可靠，但其分辨率很差，图14中的直方柱代表偏高类型以不同概率水平预报的相对频率，即所谓锐度。对于降水，概率分布函数明显偏高，降水事件的气候频率集中。这意味着预报不比根据气候条件的预报好。降水BSS的分辨率技巧很低，这使整个BSS值下降，结果降水的BSS对于6—8月只有0.01，对12月一次年2月只有0.06。而依据BSS，12月一次年2月的温度预报具有最高的值（0.22），而6—8月降水预报的得分最低（0.01）。负距平类型预报情况与正距平类型预报相似，但正常类型的降水和温度预报的BSS值无论是6—8月和12月一次年2月均小于零（负值）。

多模式概率预报的技巧与MME确定性预报有密切的关系。AROC=0.5的值代表同号率等于空报率，BSS=0代表概率预报技巧等于气候学预报的技巧。图15表明：（1）BSS和AROC得分的空间分布相互十分一致。（2）两种概率技巧指标的空间型十分类似于温度和降水的MME TCC分布（参看图10）。（3）0.7的AROC分值对确定性预报大致相对应于0.1的BSS值和0.6的TCC值，结果也表明，无论温度和降水，正常事件是难以预报的，但正或负距平事件用现在的多模式系统是能够预报的。

图16给出了确定性的TCC和概率的BSS和AROC分之间的一般关系。十分清楚，这种关系是非线性

的，但当技巧较高时，其关系变成线性的，例如当 $TCC > 0.6$ ，AROC则超过0.7，BSS超过0.1。由上可见，概率预报技巧高，确定性的技巧也高，也就是说，在技巧偏低时，确定性预报的技巧增长较快，在技巧偏高时，两种预报是成比例的升高或降低。

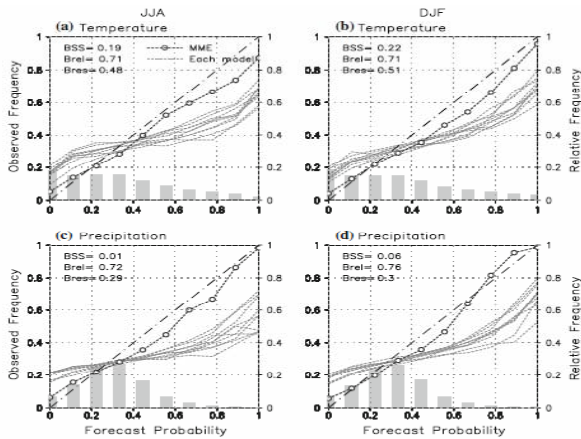


图14 全球热带 JJA (左) 与 DJF (右) 2m 气温 (上) 与降水 (下) 高于正常的类别的可靠性图。概率预报由 CliPAS MME 系统做出。带圆圈的粗虚线: 多模式预报的可靠性; 细虚线: 每一模式预报的可靠性; 方柱: 预报的锐度, 它代表以不同概率水平预报的偏高 1/3 的相对频率。图中也给出 BSS 可靠性项 (B_{rel}), 分辨率项 (B_{res}) 的值

3 东亚季节预报水平的分析

由上节全球季节预报的技巧可以看到，对东亚季风季节温度和降水的预报能力是很低的，尤其是降水。主要的预报能力在中东太平洋热带地区，即 ENSO 地区，热带西太平洋地区的预报技巧是第二偏高区，并且不断在提高。对于东亚大陆地区，除了环流以外，温度和降水的预报技巧一般很低。

3.1 东亚夏季风降水预报

Krishnamuriti 等最近用 16 个海气耦合模式对亚洲季风进行了集合预报^[8]，其中大部分模式积分是从 5 月 1 日—9 月 30 日 (北半球夏季风) 和 11 月 1 日—次年 3 月 31 日

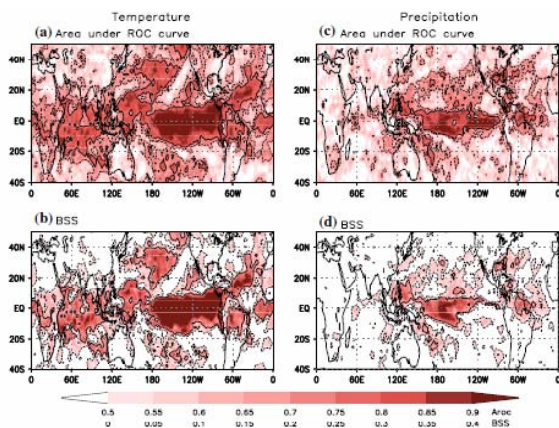


图15 2m 气温 (左) 和降水 (右) 三类概率预报 ROC 下方面积 (AROC) (上) 和 Brier 技巧分 (下) 的空间分布

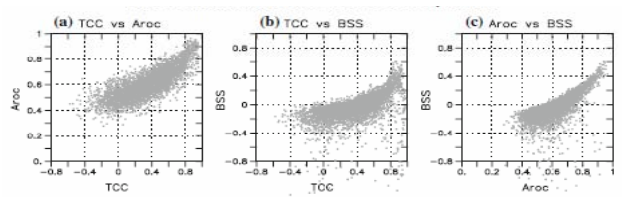


图16 全球热带每一格点 DJF 降水 TCC 对 AROC (a), TCC 对 BSS (b) 和 AROC 对 BSS (c) 预报技巧的散布图

(北半球冬季风)。16 模式与 APCC/cliPAS 计划使用的模式基本相同，但 Krishnamuriti 等的研究是集中在亚洲季风区及其更小的分区，包括南亚季风区和东亚季风区以及东亚季风区内的更小分区。因而在 MME 预报时 (1987—2001 年)，在训练阶段采用了降尺度 (downscaling) 方法和双线性内插方法把所有模式资料和观测资料都内插到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率的格点上。在此过程中可以得到每一模式的系统性误差，并用降尺度方法计算同时求得每一模式在格点上的权重系数，在此基础上构建一多模式集合预报。结果表明，降尺度集合预报对亚洲季风雨带及其分区的降水距平预报都一致地比个别模式成员的预报具有更高的技巧。无论是确定性和概率性 (Brier) 预报都是如此。其中概率可靠性评分对 MME 是最高的。这意味着从概率的意义看，MME 预报是最可靠的。无论用相关系数和均方根误差检验也都表明区域预报有很大的改善。由于许多模式中存在着较大的系统性误差，它是使预报技巧降低的一个主要原因。由于在此

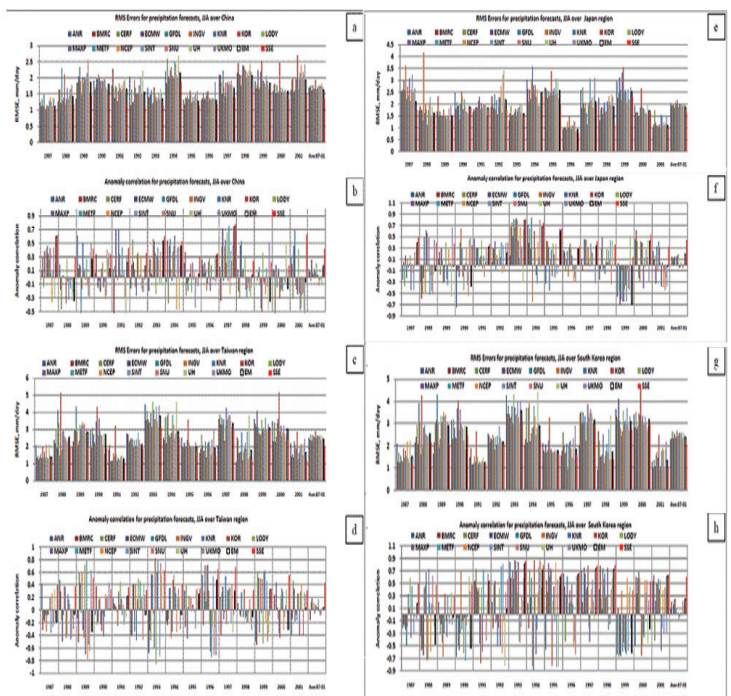


图17 中国大陆 (a, b), 台湾地区 (c, d), 日本 (e, f) 和韩国 (g, h) 地区夏季 (JJA) 多模式集合 (16 个海气耦合模式) 预报的降水距平 RSM 误差和距平相关系数。直方图的最后一栏为 16 年的平均技巧

MME系统中大大降低了系统性误差，而突现了模式中强迫因子的作用，从而使MME预报的技巧明显地提高了。图17是对东亚季风区中的韩国、日本、中国和台湾地区预报的夏季（6，7，8月）降水距平RMS误差和相关系数检验的结果。中国的RMS误差大致从1.0~2.5，而台湾地区，日本和韩国分别是1.1~5.0，0.85~3.5，1.0~4.0。对集合平均和超级集合降水距平的RMS误差最小值分别是（1.1，1.0），（5.4，1.0），（0.95，0.8），（1.2，1.0）。四个地区的相关系数分别为：（-0.5~+0.7），（-0.7~+0.8），（-0.6~+0.8），（-0.7~+0.85）。集合平均和多模式超级集合的最大相关分别为（0.7，0.8），（0.5，0.7），（0.8，0.85）。这些技巧也有明显的年际变化。总之，对于东亚各分区多模式超级集合也提供了最高的预报技巧。

前面指出，气候模式的系统性误差是造成气候模拟和预测（包括季节预测）的主要不确定性的原因之一。根据IPCC /AR4 19个海气耦合模式对夏季（JJA）降水模拟的检验结果（1979—1999年）（图18），可以看到在东亚地区系统性误差是十分明显的^[20]。在东亚东部季风区，模拟的降水普遍偏低，尤其在梅雨区和华南更明显。这可能与模式的物理参数化方案，尤其是云的参数化方案密切相关。另一个降水误差偏大的地区在青藏高原的下游，东侧和东北侧。它们与东部季风区不同是正距平。这可能与青藏高原大地的影响密切相关。这是国内外众多气候模式普遍存在的问题。因而如何改进地形的作用，不仅是数值天气预报模式，而且也是改进气候预测模式的重要问题。对于多模式气候异常的预报，上述系统性误差可以在很大程度上予以订正。

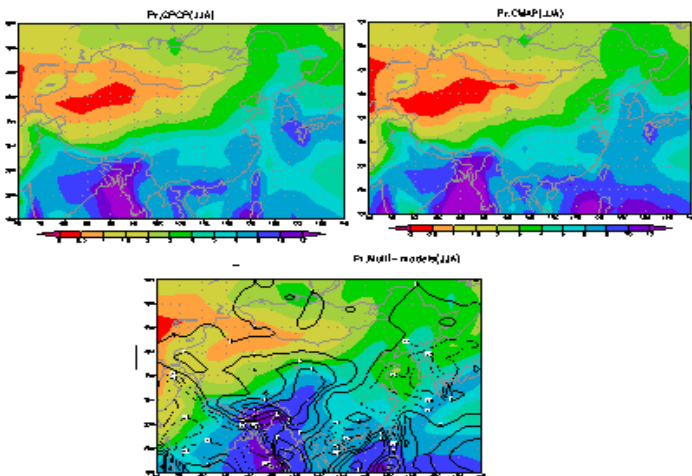


图18 19个IPCC/AR4 海气耦合模式夏季降水（6—8月）模拟（1979—1999年）误差分布图（上图为GPCP和CMAP 实测降水，下图是模式降水与实测值偏差，单位：mm/天）^[20]

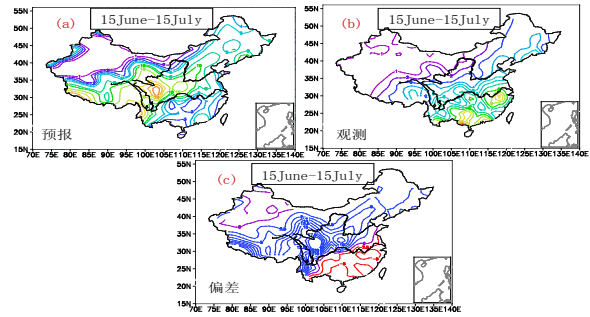


图19 NCC/LAP 海气耦合模式对梅雨期（6月15日—7月5日）降水的20年（1987—2006年）回报检验结果。（a）预测降水分布（mm/天）；（b）观测降水分布；（c）预测与观测降水差值分布

3.2 国家气候中心（NCC）动力季节预报模式的预测能力

梅雨季是中国夏季的主要雨季，是每年汛期预报关注的重点。因而以下选择梅雨期降水作为检验模式预测性能的对象。图19是NCC/LAP 海气耦合模式对梅雨期（6月15日—7月15日）降水的20年回报结果^[21]。从模式预报的降水（图19a）与观测（图19b）之间的差值分布（图19c）看，长江以北是偏多的，长江以南偏少。这种系统性误差与模式预测的季风强度偏强有关，而这又与青藏高原地区预测的高度场偏低有关。另外，还可以注意到高原的下方（东侧和东北侧），预测的降水明显偏大，与图18类似，这反映了高原大地形背风面的地形直接影响。

图20是这20年梅雨期预报与观测降水之间逐年的空间距平相关系数（ACC）。可以看到预报较好的年份是1988，1990，2001，2002，2004年，比较差的年份是1991，1997，1995，1998年。这表明预报的年际变化有明显变化。这取决于该年的气候信号或强迫的影响程度，以及所造成的降水强度。如果求取20年的平均预报技巧，则其ACC会很低，这与国际上的情况大致是一致的。但从2000年以后，梅雨预报能力有明显提高。上述结果也表明梅雨降水的季节预报的技巧有显著的年变化，这和前面的模式技巧的评估是一致的。

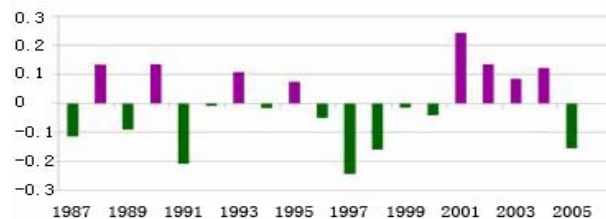


图20 1987—2006年江淮流域平均的梅雨期模式预报与观测降水之间的相关系数序列

平均梅雨雨强（mm/天）概率预报的检验表明（图21），NCC/LAP 气候模式只能预报出15mm/天以下的雨强，在0~15mm/天雨强期间预报与实况大

致相近，但对于15~25mm/天的较强降雨则无能力预测。因而如何提高降水强度的预报是今后改进模式的一个重要方面。这主要涉及积云参数化方案的改进。

另外，模式对年代尺度降水变率预报能力也不足。从1999年开始，长江流域梅雨期的降水量开始减少（减少10%左右），这主要是由于长江中下游梅雨雨带北跳到黄淮地区所致^[22]。图22表明，对于这种年代尺度降水带突然北跳过程气候模式并没有完全预报出来，只是预报了雨带具有逐渐北移的过程。目前绝大多数耦合模式都不能预报降水年代或年代际尺度变化，这是个缺陷，目前正在大力研究和改进中。

综上所述，NCC/LAP的耦合气候模式具有一定的预报梅雨降水的能力，尤其是自2000年之后，但在预报降水的强度和年代尺度变化以及某些持续性强降水事件方面技巧不高。

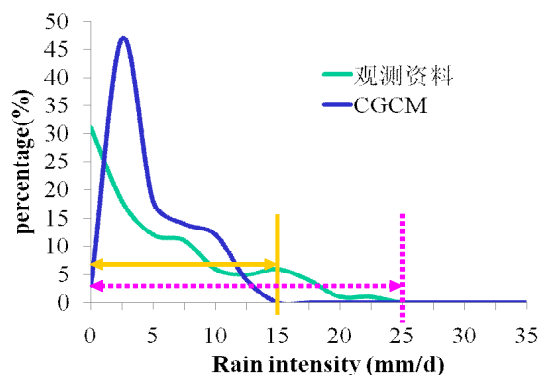


图21 1989—2006年梅雨强度概率分布的预报

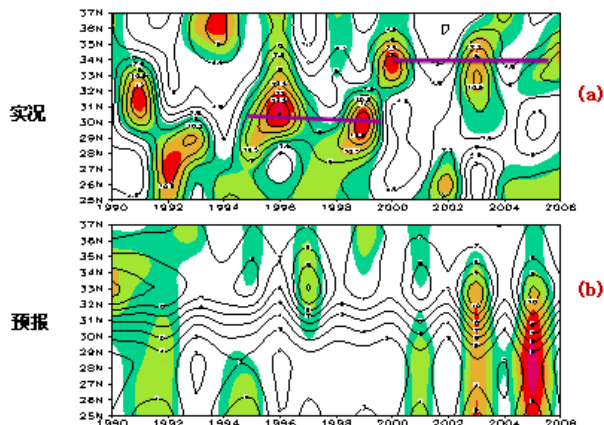


图22 1990—2006年梅雨期110°—122°E纬向平均的观测(a)和预报(b)的降水量(等值线, mm/天)、降水距平百分率(阴影)的时间—剖面图

3.3 东亚夏季风及其降水预报水平低的原因分析

由前面的检验和分析可以得到，东亚夏季风及其降水预报总体上预报水平不高，究其原因可能与下列几个关键科学问题有关。

(1) 西太平洋暖池和印度洋地区SST和次表层温度预报不够准确。它造成了：驱动亚洲夏季风的海陆温差有问题；源自西太平洋和南海的对流活动与遥相

关预报不准确；源自或由此区向东传播的MJO及其与中纬度相互作用不准确；由海洋耦合强迫造成的低频振荡与大气环流优势环流模态不准确，这包括El Niño引起的西太平洋地区的异常反气旋；La Niña时期的异常气旋；TBO（对流层准两年振荡），鄂海阻塞以及欧亚正一负—正环流型等；ISO的经向和纬向传播和强度不准确。

应该指出，季节预报的可预报性主要来自海洋，因为海洋有很大的热容量和慢变的动力学。但海洋的变化和长记忆也有不驱动大气的部分，因而气候模式中包括海洋不一定会提高大气可预报性，尤其是中纬度海洋，这点也是应值得注意的。

(2) 先进的海洋资料和陆面过程（如土壤、植被、海冰）同化系统没有完全建立，缺乏提供较准确耦合强迫初值的能力，也影响集合预报的样本数。

(3) 弱强迫信号（如ENSO循环的中性阶段）下气候系统尤其是大气内部变率的作用可预报性很低，过去研究结果很多，但缺乏诊断和鉴别其可用性。

(4) 区域气候模式没有发挥更大作用。还没有高分辨率的集合区域气候预报：多初值与多初值集合预报。强迫信号偏弱时，区域地形、陆面过程、区域性海陆热力差异等中尺度边界强迫可能更重要，这些下边界强迫都可能在高分辨区域气候模式预报中留下印迹。因而可进一步增强季节预报的可预报性。

(5) 统计或统计—动力方法尤其是非线性方法的研究和应用不够。

(6) 青藏高原大地形尤其是陡峭地形的处理和参数化未能很好解决。地形造成的重力波拖曳作用的参数化也值得改进。

4 季节气候预测未来发展的前景

近十年来，由于对天气和气候的可预报性从理论和方法上有突破性进展以及超级计算机的迅速发展，目前天气与气候预报正处于一场重大的转变之中。这对季节预报既是一个机遇也是一个挑战。中国气象局国家气候中心气候预测的发展应在这种大环境和背景下制定自己的发展计划，能切实满足国家不断增长的需求；同时也能步入并能保持NCC作为国家级气候预测中心在国际上的先进地位。为此应考虑下列问题：

(1) 建立在概率密度预报基础上的集合预报的出现使天气和气候预报进入一个新的时期，它减少了预报的不确定性，增加了预报的可靠性；同时能够定量地评估天气与气候预报的风险。这使预报员不仅从气象上能继续估计其预报技巧，而且可根据用户的经济参数估计预报的潜在经济价值。这也决定了将来是

增加集合预报的样本数还是增加模式分辨率为优先？根据中国的情况提高预报准确率减少不确定性是主要目标。因而首先应增加初值的样本，至于模式的样本数根据近期的研究^[5, 6]其预报技巧在5~6个模式样本基本达到饱和。模式的分辨率可以适当增加，但在相当时间内以大于10km的水平分辨率为宜。应该指出，气候模式业务预报的结果在相当长时期内技巧不会太高，因而如何使用准确率不高的预测结果是应用服务的一个重要任务。

(2) 由于预报变量是概率密度 $\rho(x, t)$ ，其预报方程是刘维尔和福克—普朗克(Liouville和Fokker-Planck)方程，即由确定性的动力方程组转化为随机动力方程组^[10]。因为随机动力方程组能减少气候预测的系统性误差，正如Lorenz在1975年所说：“我相信，最终的气候模式将是随机的，即随机数将出现在方程时间导数的某些地方。”

(3) 通过三步嵌套预报(全球—区域—局地或用户)使全球天气和气候预报的产品可直接应用于特定地区、流域、城市以及农业水利、能源、保险等部门，大大提高了产品的潜在社会经济价值。并通过建立风险评估管理系统，提高不同用户对概率预报应用的决策能力。这是一种观念上的改变：对于用户而言，更重要的不一定是将来的天气或气候最可能是什么，而是他们敏感的天气或气候事件是什么。

(4) 统计与动力方法或气候模式同时发展，两条腿走路。这可以更好地利用历史资料订正模式预报，同时可以建立有用的多种统计预报方法，目前主要用在ENSO预报中。也就是说，以继续发展和改进气候模式为优先目标，并同时考虑动力和统计方法齐头并进，发展具有特点的多种统计与动力方法集合预报(如贝叶斯方法)。

(5) 发展多模式集成方法——以不同参数化方法为基础的集合预报^[10]。

参数化的不确定产生的基本原因是：①实际上可分辨与不可分辨运动并没有尺度分离。不可分辨运动的谱主要由不同程度的近网络尺度运动构成。这是结构的不确定，不是参数不确定性。②参数化方法不能考虑可分辨和不可分辨气流的非线性相互作用，因而造成气候模式中的系统性误差。为此目前提出对次格网运动用随机动力参数化方法解决模式不确定性问题。

如运动方程的简单的形式：

$$\begin{aligned} \dot{X} &= F(x) + P + e \\ e &= \varepsilon P \end{aligned}$$

P 是通常的参数化项， ε 是无因次随机参数，平均为

零。欧洲中期天气预报中心(EC)的预报表明，采用上述方法对中期集合预报系统(EPS)已有改进。

模式的不确定关键是对次网格尺度运动的参数化问题。其集合预报有三类：多模式集合(超级集合)，成员包括不同的天气或气候模式；多参数化集合：在同一模式动力核心中，包括不同的参数化方案 $P(x, \alpha)$ ；多参数集合，各成员皆是由同一模式算出，但对参数化方案的参数 α 进行扰动和集合。这三种方法可以逐步或同时采用。

(6) 考虑气候变化对季节预报的影响

这包括两个方面，一是在季节和年际预报中包括温室效应的影响，这种作用虽然已体现在所用的初值中，但还应考虑在整个演变过程中温室效应等人类活动造成的长期趋势对较短时期(如季节尺度)气候变率的影响。这是季节预报的重要背景。

季节预报是天气预报和气候预测之间的桥梁，是构建无缝隙预报系统的一个关键部分。根据季节预报的结果向前延伸可以得到月和数周的延伸预报结果。从而可以填补无缝隙预报系统的缝隙，也为将来构建统一的天气—气候模式提供理论和方法的基础。当然，无缝隙预报系统并不要求对所有时间尺度都用同一个模式，但这个系统可构建在相同的模式框架基础上，十分有利于认识和追踪模式偏差和不同尺度的误差及其相互传播。气候模式虽然是由数值天气模式发展而来，但气候预测不会重复天气预报发展的老路。因为两者之间预报对象、过程与机理十分不同。真正的气候业务系统的建立和完善可能会比天气预报系统花费更长的时间和资源，因而需要几代科学家的不懈努力。

参考文献

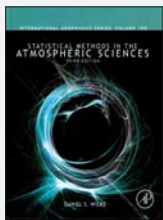
- [1] 丁一汇. 气候变化(大学教材). 北京: 气象出版社, 2010.
- [2] 赵宗慈, 高学杰, 汤懋苍. 气候变化预测. 见: 中国西部环境演变评估(第三卷). 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 中国业务动力季节预报的进展, 气象学报, 2004, 62(5): 598-612.
- [4] Stockdale T N, et al. Understanding and predicting seasonal and inter-annual climate variability—the producer perspective. White paper for WCC-3, 2009.
- [5] Wang B, et al. Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CliaPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980—2004). Clim Dyn, 2009. doi: 10.1007/S00382-008-0460-0.
- [6] NRC/NAS. Assessment of Intra-seasonal to Inter-annual Climate Prediction and Predictability. The National Academies Press, 2010.
- [7] Wang B, et al. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall. Geo Res Lett, 2005, 32:L 5711. doi:10.1029/2005GL 02274.
- [8] Krishnamuriti T N, Kumar V. Improved seasonal prediction forecasts for the Asian monsoon using 16 atmospheric ocean coupled models: Part I Climatology and Part II: Anomaly, J Climate, 2010(Personal communication).
- [9] CCSP. Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitation .A Report by the US Climate Science Programme and

- Subcommittee on Global Research. Bader D C, et al, (eds). DOE, 2008.
- [10] Palmer T N, Hagedorn R (eds). Predictability of Weather and Climate. UK: Cambridge University Press.
- [11] Krishnamuriti T N, Kishtawai C M, Larow T E, et al. Improved weather and seasonal forecasts from multimodal superensemble. Science, 1999, 285: 1548-1550.
- [12] 赵凯华, 罗蔚茵. 力学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [13] Lorenz E N. The Essence of Chaos (混沌的本质). 严中伟, 等译. 北京: 气象出版社, 1993.
- [14] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002.
- [15] Houghton J. The Physics of Atmospheres. UK: Cambridge University Press, 2001.
- [16] Palmer, et al. Development of a European multimodal ensemble system for seasonal to interannual prediction (DEMETER). Bull Am Meteorol Soc, 2004, 85:853-872. doi:10.1175/BAMS-85-6-853.
- [17] Jin E K, et al. Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models. Climate Dyn, 2008, 31: 647-664. doi:10.1007/s00382-008-0397-3.
- [18] Palmer T N, et al. Toward seamless prediction. Bull Am Meteorol Soc, 2008 (4):459-470.
- [19] Ding Q, Wang B. Circumglobal teleconnection in Northern Hemisphere summer. J Climate, 2005, 18: 3483-3505.
- [20] Sun Y, Ding Y H. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia. Science China(Earth sciences), 2009, 53: 284-300. doi:10.1007/s.11430-009-0123-y.
- [21] 司东, 丁一汇, 柳艳菊. 全球海气耦合模式(BCC-CM1.0)对江淮梅雨降水预报的检验. 气象学报, 2009, 67: 947-960.
- [22] Si D, Ding Y H, Liu Y J. Decadal northward shift of the Meiyu belt and the possible cause. Chinese Science Bulletin, 2009, 54: 4742-4748.

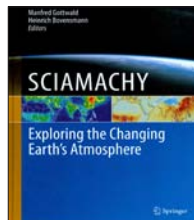
新书架

NEW BOOK

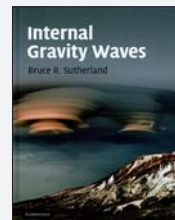
感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆阅览室阅读或凭索书号借阅



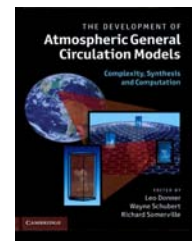
Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (Third Edition)
《统计方法在大气科学中的应用(第三版)》
编著者: Daniel S. Wilks
出版者: Academic Press
出版年: 2011



SCIAMACHY-Exploring the Changing Earth's Atmosphere
《SCIAMACHY——探索正在变化的地球大气》
编著者: Manfred Gottwald等
出版者: Springer
出版年: 2011



Internal Gravity Waves
《重力内波》
编著者: B. R. Sutherland等
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2010



The Development of Atmospheric General Circulation Models
《大气环流模式的发展》
编著者: Leo Donner等
出版者: Cambridge University Press
出版年: 2011



《黄土高原生态建设环境效应研究》
编著者: 田均良等
出版者: 气象出版社
出版年: 2010
索书号: X21/27/1



《中国西部现代人类活动及其环境效应研究》
编著者: 李秀彬等
出版者: 气象出版社
出版年: 2010
索书号: X21/27/3



《中国西部典型内陆河生态-水文研究》
编著者: 程国栋等
出版者: 气象出版社
出版年: 2010
索书号: X21/27/4



《中国西部环境演化集成研究》
编著者: 丁仲礼等
出版者: 气象出版社
出版年: 2010
索书号: X21/27/2

下期要目: “空间天气”专辑

- ◆ 关于我国空间天气保障能力发展战略的一些思考
- ◆ 空间天气与空间天气业务
- ◆ 国际上的空间天气计划与活动
- ◆ 空间天气研究进展

从“气候”到“全球气候系统”概念的发展

王绍武

(北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871)

摘要: 气候学中从“气候”的概念发展为“全球气候系统”标志着科学的发展。从现代气候学的观点看, 气候是全球气候系统的特征, 而不是局部的温、湿、压。科学技术进步是全球气候系统概念建立的基础, 这主要指: 高速电子计算机的制造, 全球观测系统的建立, 及气候模式的发展。气候科学的发展同社会发展的关系越来越密切。

关键词: 气候, 气候系统, 气候学, 气候模式

From "Climate" to "Global Climate System"

Wang Shaowu

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

Abstract: Change of conception in climatology from "climate" to "global climate system" characterizes the development of science. Climate, now from the point-view of modern climatology, is the character of global climate system, rather than temperature, precipitation, and sea level pressure in a local site. Advancement of science and improvement of technology provided the basis for the formation of modern conception "global climate system", namely, the manufacture of high-speed computers, the establishment of the global observational system, and the development of the global climate system model. Progress of climatology more and more closely relates to the development of society.

Key words: climate, climate system, climatology, climate model

1 经典的气候概念

经典气候学对“气候”的理解是狭隘的。这表现在3个方面: 气候平均值, 气候代表要素及气候成因^[1]。(1) 把30年平均做气候平均是一个重要的概念, 至今英文都把这个平均称为“normal”, 直译即“标准值”。经典气候学的概念是如果对一个气象站有了30年的观测, 则可以得到一个气候的“标准值”, 这个值可以用来描述本站的气候特征。既然这个值是“标准的”, 也就意味着是“不变的”。这样就排除了气候变化的概念。开始国际气象组织(IMO)统一规定用1901—1930年平均为标准值, 后来世界气象组织(WMO)又改用1931—1960年平均, 当时已经考虑到测站的增加影响。由于人们广泛承认气候变化, 所以WMO决定2011年以前用1971—2000年平均, 从2011年开始用1981—2010年平均, 以后每10年更新一次。这样既可以适应气候的变化, 也能照顾到新的观测资料覆盖面的增加。(2) 经典气候学认为对于一个气象站有了温、湿(降水量)、压(气压)的观测, 就掌握了该站的基本气候特征。当然, 我们并不反对这3个要素是最基本的气候要素, 但是把对气候特征的认识局限于这3个要素, 无疑就限

制了对气候的了解^[2]。例如现代气候学研究表明, 对于陆地测站雪盖也是一个重要的要素, 降水量的记录并不能完全代替雪盖的记录, 雪盖的存在不仅依赖于降水量, 与温度、风、云等要素也有密切的关系。因此, 雪盖是一个综合性的气候要素, 认识雪盖这个要素, 对研究一个地区的气候特征, 研究气候变化, 乃至短期气候预测均有重要意义。又如云也是一个重要的要素, 云的变化对温室效应的影响至今仍是研究全球气候变暖中一个未解决的问题。因此, 仅仅用地面观测的温、湿、压3要素来描述气候是不完全的。(3) 经典气候学把影响气候形成的因子归纳为3个: 测站所在经纬度、海陆分布及大气环流。无疑这3个因子在决定一个地区的气候特征中有重要的作用。经纬度决定了太阳辐射条件, 海陆分布决定了气候大陆度。另外在不同的地理位置大气环流条件不同, 例如是在中纬度还是在热带, 在大陆西岸还是在大陆东岸, 大气环流条件有根本的差异。但是现代气候学研究表明, 除了这3个因子之外, 还有一些不可忽略的因子, 如ENSO、温室气体、热盐环流。海气相互作用, 特别是ENSO的影响是当前短期气候预测的核心问题。温室效应是温室气体变化的影响, 由于大气中CO₂浓度增加, 使大气的温室效应加剧, 气候变暖, 这是当前国际上的热门问题。又如热盐环流(Thermohaline Circulation), 全球大洋深层环流的变化对海洋中的热量交换与局地气候, 如北大西洋两

收稿日期: 2011年8月4日

作者: 王绍武(1932—), Email:swwang@pku.edu.cn

资助信息: 科技部创新方法工作专项项目
(2008IM020500)

岸的气候有关键性的作用。这些是在过去都不认识或认识不够的因子。这说明仅仅局限于从局地的因素来认识气候的形成是不够的。气候是全球气候系统各圈层之间相互作用的结果，而且这个相互作用是全球性的。

2 全球气候系统概念的建立

从1979年召开第1次世界气候大会，到IPCC（政府间气候变化专门委员会）于1990，1995，2001及2007年先后发表了4次评估报告^[3-6]，现代气候学已经形成了“全球气候系统”的概念。人们不再把气候视为一个“不变的”、“地面的”及“局地的”现象。根据现代气候学的概念，气候是在全球气候系统影响下形成的。气候的形成是地球的5个圈层相互作用的结果，这包括大气圈、水圈、冰冻圈、陆面及生物圈。例如“全球气候变暖”，对这个问题的现代气候学认识不仅仅局限于温度上升，也包括了冰雪的融化、海平面上升、植被变化等。现代的短期气候预测，特别是对未来长期气候变化的预估，都是以海—陆—大气耦合模式或全球气候系统模式为基础。因此，可以认为现代气候学已经用新的“全球气候系统”概念代替了经典气候学的狭隘的“气候”概念。

从“气候”到“全球气候系统”概念的更新不仅不是一朝一夕就能做到的事，而且有重要的“社会”与“科学”的背景。“社会”背景就是人们对气候认识需求的生长。气候预测就是一个最明显的例子。当天气预报仅限于“短期”（24小时）的时效以内时，似乎人们只考虑当前的大气状况就足以应付了。因此早期的短期天气预报是以大气模式为基础。后来当人们提出中期（10天以内）数值预报时，就需要应用海气耦合模式，也就是要考虑海—气的相互作用，所以预测模式逐渐采用海洋—大气耦合模式。这时对海面温度的异常，海冰、雪盖、植被的变化，似乎还可以忽略不计。但是人们需要进一步做短期气候预测，则考虑海面温度异常成为一个中心问题。而且由于预测时间长，还要考虑海面温度异常的变化。目前，由于模式的预测能力限制，所以对热带太平洋海面温度单独做预测，然后再用来强迫大气环流模式的技术取得了一定的效果。而完全的海洋—陆面—冰雪—大气全方位耦合的全球气候系统模式仍在研制与不断改进之中。不过，全球气候系统模式无疑不仅是长期气候预估，也是短期气候预测发展方向。这个例子说明，对气候预测需求增加，是社会的发展对气候科学发展的核心推动力。离开了社会的需求，任何科学也不会自行发展的^[7, 8]。

并不是社会发展了，自然灾害的影响就会自己减

弱，相反社会的脆弱性反而会增加。例如，今天有了电网、有了高速公路，大风雪对中国南部的影响要远远超过明清时期，尽管那时的风雪可能还要更强。因此，现代社会对气候预测的要求一天比一天高。特别是现代人类活动对环境造成了破坏，人们迫切需要了解这种破坏对人类生活和社会发展的影响。就是在这样巨大社会需求的驱动下，全球气候系统的概念才进入社会、也进入了科学界。

3 建立全球气候系统概念的科学基础

社会的需求是一个问题，如何来响应这个需求则是另一个问题。这就关系到科学的发展。气候学像任何一个科学分支一样，其发展是不能脱离整个科学发展水平的。气候系统概念的建立有3个重要的科学支柱，即高速电子计算机的发明与发展、以卫星为主体的全球观测系统的建立以及全球大气环流模式的开发。

(1) 大型高速电子计算机

在没有发明高速电子计算机之前，科学上的大量计算都是靠人力进行的。Walker为了研究世界三大涛动，在第1次世界大战之后就曾经雇佣了二百多人，进行了4年的计算，这才导致了1920年代到1930年代发表著名的“世界天气”系列研究。那时唯一的工具是手摇计算机。在这种情况下，数值天气预报是不可能实现的。最早的实验证明计算的速度远远落后于天气发展的速度，因此无论原理如何，从技术上讲，数值预报是不可能的。现在，国际上最快的计算机已经达到了若干万亿次/秒，中国自行设计的计算机也步入世界先进行列，数值预报也就成为许多国家气象局天气预报以及短期气候预测的主要业务。全球气候变暖预估研究的一个重要基础就是用耦合模式或全球气候系统模式做长期积分，有时是达到百年以上的积分^[9-11]。

(2) 全球观测系统

建立气候系统概念的另一个基础是全球的观测系统。没有对地球各个圈层的全球尺度观测是不可能建立任何全球模式的。无论大气环流模式，海洋—大气耦合模式，还是全球气候系统模式毫无疑问都需要对大气、海洋、陆面、冰冻圈及生物圈层有全面的了解。卫星观测是提供这些资料的主要来源。因为只有卫星观测才能覆盖那些荒无人烟的高山、冰原、沙漠、大海等没有可能进行日常观测的地区。1950年代后期人造地球卫星的发射提供了广泛的前景。到了1980年代初，人们逐渐开始了全球海冰、积雪、大洋中部海面温度的观测，因此也就积累了足够的覆盖全球的观测，这为建立全球气候系统模式打下了重要的基础^[7, 8]。

(3) 气候模式

有了高速电子计算机,到1980年代计算速度已经提高到百万次/秒至千万次/秒以上,具备了长期积分全球大气环流模式的能力。大气环流模式、海洋—大气耦合模式乃至全球气候系统模式相继发展。开始只是进行3天的短期数值预报,1980年代逐渐开始试做月平均环流预报,模式也逐渐改为以海洋—大气耦合模式为主。目前逐日预测大约以10天为界,欧洲哈得来中心的10天预测达到了相当高的水平。月平均环流的短期气候预测也做到1~3个季度。为了进行未来数十年到一个世纪的气候预估,全球气候系统模式在研制与不断改进之中。为了研究千年乃至万年的古气候变化,又开发了中等复杂程度的气候模式。这些模式的建立成为当前气候预测与预估及古气候模拟的主要手段。气候模拟为气候再分析计划提供了重要的支撑,形成了近50年到100年的再分析资料同化系统。这个系统反过来又对气候预测、气候预估及气候模拟提供了重要的资料基础^[7]。

总之,高速计算机、全球观测、气候模式是当前全球气候系统研究的3个重要支柱,缺一不可。也只有在这3个支柱的支撑下,才建立了全球气候系统的概念。从“气候”到“全球气候系统”概念的发展,使气候学以崭新的面貌出现于世界。气候学研究的一个主要目标就是预测,预测气候的变化是人类社会最主要的需求。预测是多方面的,从短期气候预测到上百年的气候预估,以至对万年尺度气候变化成因及变化规律的分析,都是当前气候学面临的核心课题。古为今用,研究古气候变化,其中一个重要的目的也是为了预测未来的气候变化。因为一方面我们要了解时间尺度为万年、千年的古气候,另一方面也为了估算当前人类活动造成的气候变化。在这方面,高科技的发展,提供了前所未有的重要信息。¹⁴C及不同同位

素分析给古气候年代学研究打下了基础, $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$ 分析为古气候研究提供了可能。如今人们已经对过去约百万年的气候有了前所未有的了解。对发生于几十年乃至十年以内的气候突变有深刻的认识,这都是近20年,甚至近10年才得到的结果。这些基本资料为更精确的气候预估提供了可能^[12]。

因此,当我们回顾气候学的发展,分析从经典的气候概念到现代全球气候系统概念的发展,就会看到气候学概念的发展是与社会及科学的发展息息相关的。没有社会的需求这种发展不可能提上日程,没有整个科学的进步这种发展也是不可能实现的。

参考文献

- [1] 王绍武. 气候系统引论. 北京: 气象出版社, 1994.
- [2] The Physical Basis of Climate and Climate Modeling, Report of the International Study Conference in Stockholm, 29 July-10 August, 1974, GARP Publications Series No. 16, 1975.
- [3] IPCC. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J T, eds. Cambridge: Cambridge University Press, N Y: United Kingdom and New York, 1990.
- [4] IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Houghton J T, et al, eds. Cambridge: Cambridge University Press, N Y: United Kingdom and New York, 1996.
- [5] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T, et al, eds. Cambridge: Cambridge University Press, N Y: United Kingdom and New York, 2001.
- [6] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. Cambridge: Cambridge University Press, N Y: United Kingdom and New York, 2007.
- [7] 丁一汇. 气候变化. 北京: 气象出版社, 2010.
- [8] 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001.
- [9] 威廉·伯勒斯. 21世纪的气候. 秦大河, 丁一汇, 等译校. 北京: 气象出版社, 2007.
- [10] 丁一汇. 中国气候变化—科学、影响、适应及对策研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [11] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] 王绍武. 全新世气候变化. 北京: 气象出版社, 2011.

会议信息

- ◆ 可持续的地球科学会议（第一届会议和展览）（Sustainable Earth Sciences, 1st Conf. and Exhibition），2011年11月8—11日，西班牙，巴伦西亚（<http://www.eage.org/events/index.php?evp=5184&ActiveMenu=>）
- ◆ 第五届国际空间地球会议——最有效的解决方案（Earth from Space – The Most Effective Solutions, 5th Int. Conf.），2011年11月28—12月1日，俄罗斯，莫斯科（<http://www.conference.scanex.ru/index.php/en.html>）
- ◆ 第八届欧洲空间天气周（8th European Space Weather Week），2011年11月28—12月2日，比利时，Namur（<http://sidc.oma.be/esww8>）
- ◆ 地球观测海洋—大气相互作用科学会议（Earth Observation for Ocean-Atmosphere Interaction Sciences），2011年11月29—12月2日，意大利，Frascati（<http://www.eo4oceanatmosphere.info/>）
- ◆ 第39届COSPAR科学大会（39th COSPAR Scientific Assembly），2012年7月14—22日，印度，Mysore（<http://www.cospar-assembly.org>）
- ◆ 欧洲气象卫星中心2012年气象卫星大会（2012 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference）2012年9月3—7日，波兰，索波特（<http://www.conferences.eumetsat.int>）
- ◆ ISTP国际研讨会议（International Symposium on Tropospheric Profiling, ISTP），2012年9月3—7日，意大利（<http://cetemps.aquila.infn.it/istp/>）
- ◆ 2012年海洋科学会议（2012 Ocean Sciences Meeting），2012年2月20—24日，美国，犹他州，盐湖市（<http://www.tos.org/index.html>）
- ◆ 欧洲地学联盟大会（European Geosciences Union General Assembly）2012年8月22—27日，奥地利，维也纳（<http://meetings.copernicus.org/egu2012/home.html>）

强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警

俞小鼎

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 简要介绍了强对流天气(包括强冰雹、龙卷、雷雨大风和暴雨)的多普勒天气雷达识别和预警技术。

关键词: 多普勒天气雷达, 强对流, 识别与预警

Detection and Warnings of Severe Convection with Doppler Weather Radar

Yu Xiaoding

(CMA Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: This paper presents classification of convective storms, subjective identification and warning techniques of severe convective events including large hail, tornadoes, strong wind gust, and heavy convective precipitation.

Favorable environmental conditions for large hail are high value of CAPE between -10°C and -30°C , significant deep layer (0~6km) vertical wind shear, and moderate 0°C level height above the ground. The characteristics of large hail radar echo are the echo region with the reflectivity over 50 dBz extending vertically above the -20°C level, the Weak Echo Region (WER) under the Echo Overhang, the Bounded Weak Echo Region (BWER) within the Echo Overhang, strong storm top divergence, and the Three Body Scattering Spike (TBSS), etc.

The strong 0~1km vertical wind shear and low LCL are two important conditions for F2 or greater tornado potential. The warning criteria for tornadoes are the identification of strong mesocyclone or TVS within a mesocyclone of any strength.

Favorable conditions for downburst and damaging wind gust potential are the existence of relatively dry air layer within the mid-troposphere and relatively steep lapse rate of the environmental temperature. The warning criteria for downburst are the constant descending of reflectivity core, accompanied by the convergence above cloud base. The warning for the damaging wind gust produced by moving strong convective storms such as multicell storm, supercell storm or squall line are based on the identification of the bow echo and/or the Mid Altitude Radial Convergence (MARC).

The severity of convective precipitation depends on rainfall rate and duration. The rainfall rate can be estimated by examining the low level reflectivity, and the precipitation duration can be judged based on the radar echoes movement. Special attention should be paid to the convective storms of tropical precipitation type, which has the tendency to produce heavy rainfall during a short period. Efforts should also be done to identify the back propagated MCSs which are slow moving with high probability of producing heavy rainfall.

Key words: Doppler weather radar, severe convection, detection and warning

1 引言

强对流天气是造成气象灾害的主要天气类型之一, 主要包括冰雹、龙卷、雷雨大风和暴雨。天气雷达从它在半个多世纪前开始应用于气象领域开始, 一直是监测和预警强对流天气的主要工具。天气雷达发射一系列脉冲电磁波, 电磁波遇到云雨等气象目标会向四面八方散射, 其中后向散射波回到雷达被接收。传统天气雷达只能提取回波中的强度(反射率因子)信息, 而多普勒天气雷达除了提取反射率因子信

息外, 还可以从雷达回波中提取云雨目标沿雷达径向的运动速度和相应的谱宽信息, 大大加强了天气雷达的监测和预警能力。我国正在建设的新一代天气雷达网全部由多普勒天气雷达构成。新一代天气雷达比传统雷达具有更高的空间分辨率和探测灵敏度, 可以探测到传统雷达通常探测不到的晴空回波。美国于1996年完成了150多部新一代天气雷达在全美国的布网工作。中国气象局新一代天气雷达网将由216部多普勒天气雷达构成, 到2011年6月底为止, 已经完成156部新一代天气雷达的布网工作。我国的新一代天气雷达共有S(10cm)和C(5cm)两个波段七种型号, 其中CINRAD-SA型和SB型多普勒天气雷达与美国的WSR-88D在结构和应用软件方面几乎完全相同, 是我国东部沿海地区、长江流域、淮河流域、黄河下游和珠江流域的主要布网雷达。已布设的新一代天气雷达已发

收稿日期: 2011年7月5日; 修回日期: 2011年8月12日

作者: 俞小鼎(1962—), Email: xdyu0422@sina.com

资助信息: 财政部气象行业专项“中尺度对流性天气诊断分析方法研究”(GYHY200906003); 中国气象局“国家级强对流预报专家团队项目”

挥了明显效益。新一代天气雷达的应用领域主要包括对流天气的探测和预警、降水估计、雷达上方大气垂直风廓线的估测和通过对雷达反射率因子和径向速度数据的同化为高分辨率数值预报模式提供初始场。本文将利用新一代天气雷达进行强对流天气的识别和预警的技术进行简要的介绍。

2 对流风暴（雷暴）的分类及其产生的环境条件

2.1 强对流风暴的分类

任何对流风暴（雷暴）都是由对流单体构成，对流单体在雷达反射率因子图上表现为一个个分立的密实区域。对流单体分为普通单体和超级单体^[1]。普通单体的生命史通常经历三个阶段^[2]，即塔状积云阶段、成熟阶段和消散阶段。各个阶段约为7~10分钟，整个生命史一般在20~30分钟左右。在某些特殊的有利天气条件下，单体的成熟阶段可处于一种动态平衡的准稳定状态，可持续30分钟以上至数小时。这种长时间持续的处于准稳定状态的对流单体称为超级单体。Marwitz^[3]和Chisholm^[4]将对流风暴划分为多单体风暴、超级单体风暴、强烈剪切风暴和飑线。Browning^[11]将对流风暴划分为孤立单体风暴、多单体风暴和线风暴（飑线），其中孤立单体风暴既可以是普通单单体风暴也可以是孤立的超级单体风暴，而构成多单体风暴和飑线的对流单体既可以是普通单体也可以是超级单体。雷达气象学界在1990年代重新定义超级单体为具有深厚持久的中气旋的雷暴单体^[5]。目前雷达气象学的研究人员倾向于将对流风暴划分为超级单体风暴和非超级单体风暴两大类，而从事强对流天气预报的业务人员仍然习惯于将对流风暴划分为普通单单体风暴、多单体风暴、超级单体风暴和飑线。其中多单体风暴通常指由几个呈团状分布的普通单体构成的雷暴，而超级单体风暴既可以是孤立的超级单体风暴，也可以是由一个超级单体和几个普通单体紧密相连构成的团状多单体雷暴，其中超级单体占支配地位。也就是说，如果多单体风暴中有一个单体是占支配地位的超级单体，更倾向于将整个多单体风暴归类为超级单体风暴。在超级单体风暴和强烈多单体风暴之间的区别并不是非常明显的，所谓的“超级单体”风暴多数情况下也具有一定程度的“多单体”结构，其最本质的特征是具有一个持久深厚的中气旋。超级单体风暴划分为经典超级单体、强降水超级单体和弱超级单体^[6]。飑线是多个单体呈线状排列构成的线风暴（直线、弧线或波形线），其35dBz以上回波部分的长宽之比要求超过5:1，并且长度最少为50km。构成飑线的单体可以有超级单体，也就是镶

嵌在飑线内的超级单体风暴。普通单单体风暴、多单体风暴、超级单体风暴和飑线是根据其雷达回波形态确定的雷暴类型，而有些强对流类型如中尺度对流复合体MCC是根据其卫星云图特征定义的，MCC从雷达回波判断有时呈现飑线结构，有时是多个多单体风暴、超级单体风暴、飑线和层状云降水区（或层状云混合降水区）的集合体。

2.2 强对流风暴产生的环境条件

决定对流产生的三个要素是大气层结的垂直稳定性、水汽条件和抬升（触发）机制。大气层结垂直稳定性和水汽条件代表的雷暴潜势通常通过两个重要的参数对流有效位能CAPE和对流抑制CIN来代表（见图1）。

抬升机制主要由边界层辐合线、重力波和中尺度地形抬升作用产生。边界层辐合线可以是锋面、干线，也可以是中尺度的雷暴出流边界（阵风锋）和海陆风辐合线等。边界层辐合线是触发雷暴的重要机制^[7, 8]。美国国家大气研究中心（NCAR）的雷暴临近预报系统Auto-nowcaster主要建立在识别边界层辐合线的基础上^[9]。边界层辐合线在雷达回波上表现为晴空窄带回波，强度在5~20dBz之间，回波产生的原因可能是一些生物目标（例如昆虫）在辐合线上浓度的相对集中，也有学者认为是辐合线附近相对强的湍流造成的回波。前一种说法更流行，证据更充分一些^[10]。在不少情况下，中尺度地形的迎风坡也可以为雷暴的生成提供必要的抬升触发机制。重力波也是触发对流的一种机制，只是不容易观测到它的存在，因此也很难为雷暴起始的预报提供有效的线索。

决定雷暴的组织结构和强弱的关键因子之一是风向风速随高度的变化，即垂直风切变。表示深层垂直风切变最简便的方式是根据6km和地面之间风矢量

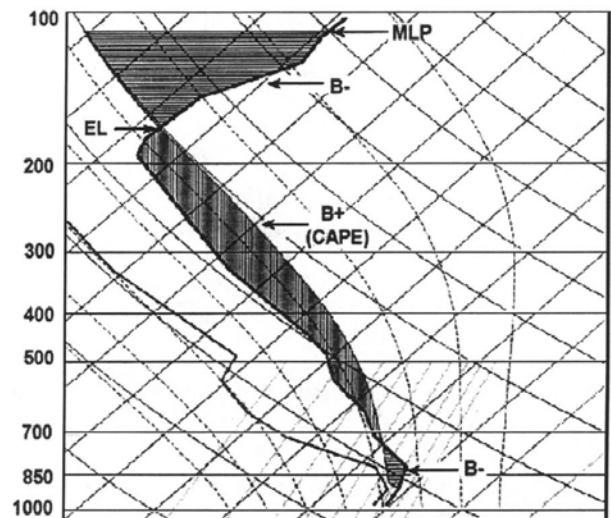


图1 T-logP图中分析对流潜势，其中CAPE和CIN分别如图中B+和B-所示

之差的绝对值（也可以用500hPa和地面之间风矢量差）。若该值超过20m/s，则属于较强垂直风切变；若该值在12m/s和20m/s之间，则属于中等偏上强度垂直风切变；若该值在12m/s以下，则是比较弱的垂直风切变。上述阈值只提供一个大致参考，具体的划分需要根据局地气候条件进行修正。在垂直风切变较弱时，一般只会出现单单体对流风暴或组织松散的多单体风暴；在中到强的垂直风切变条件下，有利于组织完好的多单体强风暴和飚线的出现；如果垂直风切变加强，并且风向在低空的顺时针旋转比较明显，则有利于超级单体风暴的产生^[4]。因此，强的对流不稳定，中等到强的垂直风切变和充沛的低层水汽供应加上适当的抬升条件是强对流风暴产生的有利环境。

需要指出的是，上述对流前环境的确定目前主要依靠探空。而探空的时空分辨率很低，时间上每隔12小时一次，空间相隔200~300km，利用其判断风暴前环境很不可靠。尤其是大气水汽的空间和时间变率很大，而水汽的分布对大气稳定性影响很大。对于午后深层垂直风切变的估计，500hPa的风场可以利用数值预报模式结果，地面风观测目前至少3小时一次，密集的自动站观测甚至10分钟一次，这样可以估计午后的垂直风切变。在雷达周边有大片降水的情况下，其VAD风廓线产品可以比较好地给出雷达上空垂直风廓线，并且每6分钟更新一次，可以用来判断垂直风切变。对于午后对流有效位能CAPE的估计需要在对08时探空进行订正的基础上进行估计。订正主要根据简单的法则结合局地经验进行。例如在冷暖平流不明显时，可以用预报的午后最高地面气温和08时边界层的平均比湿来估计午后的对流有效位能CAPE。

3 强对流天气的雷达识别与预警

强对流天气指的是2cm以上直径的冰雹、除水龙卷之外的所有龙卷、瞬时风速8级以上的雷雨大风（美国天气局雷雨大风标准是10级以上瞬风和暴洪。暴洪往往由对流暴雨过程所导致。另外雷电时常造成人员伤亡，是否列入强对流天气视具体情况确定。

3.1 新一代天气雷达的观测

方式

新一代天气雷达以体积扫描方式作为主要的观测方式，这与传统雷达采用的低层PPI扫描加上对强回波的RHI垂直扫描的观测方式有很大的不同。体扫可以给出回波相对完整的三维结构，而一个体扫接一个体扫的时间上连续的观测可以提供比较完整的四维基数据（三维空间加一维时

间），而传统的低仰角PPI扫描加强回波垂直RHI扫描的方式是无法提供这样相对完整的四维基数据的。但传统的RHI的优势是可以对强回波进行快速扫描，约30秒钟左右更新一次，而最快的体积扫描也需要5分钟左右更新一次，因此传统的观测方式或许在人工消雹作业的雷达监测中更加有效。总体而言，体积扫描的优势远远超过传统的扫描方式，因此新一代天气雷达主要采用体积扫描方式。新一代天气雷达的体扫方式有VCP11，VCP21和VCP31三种方式，分别在强对流、非强对流的显著性降水和无降水（包括微量降水情况）下使用。实际业务中，可以只使用VCP11和VCP21两种体扫模式，强对流情况下使用VCP11，其他情况下使用VCP21。从图2可见，VCP11从最低0.5°到最高19.5°共由14个仰角扫描构成，而VCP21由0.5°到19.5°的9个仰角扫描构成，在距离雷达150km（80海里）以内时，VCP11在高空比VCP21具有高得多的垂直分辨率，这就是在强对流情况下要求使用VCP11体扫模式的主要原因。另外一个原因是VCP11一个体扫所需时间为5分钟，而VCP21所需时间为6分钟，即VCP11比VCP21具有更快的更新周期，更适合于观测强对流风暴。最高仰角设定为19.5°的主要原因是超过该角度，垂直速度对径向速度的贡献将不能忽略，而19.5°以下可以忽略垂直气流对径向速度的贡献，只将径向速度解释为风（水平气流）在雷达径向上的投影，具有清晰的物理意义，便于解释和应用。这样，19.5°以上就没有观测，该区域称为静锥区。由于静锥区的存在，当雷暴到雷达距离在20km以内时，其位于6km以上的部分是无法观测到的。另外，在远离雷达的地方，雷达波束的线宽度变得较大，同时由于地球曲率的影响，最低仰角波束中心到地面高度变得较大，雷暴下半部分不能观测到。因此，雷达对于雷暴的最佳探测距离通常在20~120km之间（对于强雹暴，有效的探测距离可以达到300km以上）。

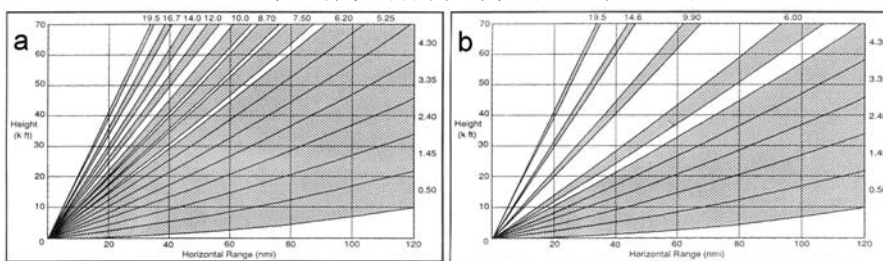


图2 VCP11和VCP21 纵坐标单位为千英尺(1千英尺=304.8m),横坐标单位为海里(1海里=1.852km)

3.2 中气旋

中气旋是与强对流风暴相联系的最重要的雷暴尺度速度场特征。自20世纪70年代以来，多普勒天气雷达先是在研究中使用，后来随着WSR-88D在美国全国的布网而开始在业务中广泛使用。对流风暴的径向

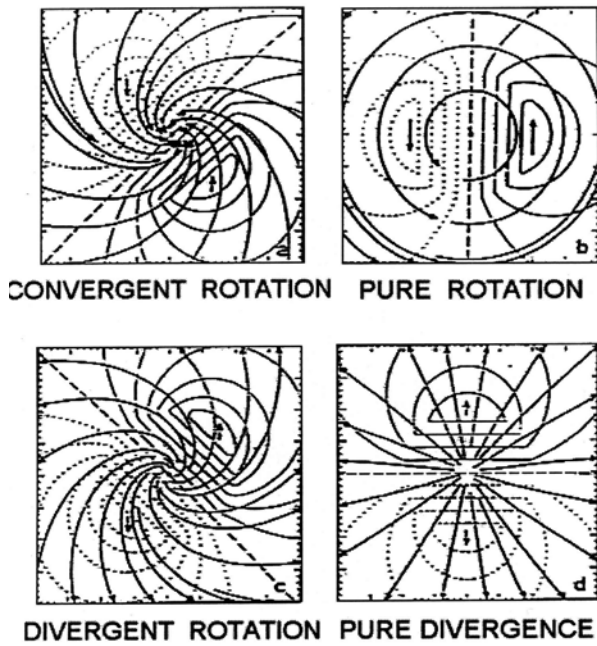


图3 成熟阶段中气旋的概念模型^[6]

速度回波的资料逐步积累。从较大范围的径向速度场特征可以判断环境风场随高度变化情况，对于确定风场环境是否有利于强对流风暴的发展非常有用。小尺度的径向风速特征如旋转、辐合和辐散可用来判断对流风暴的强弱和进一步的发展趋势。超级单体风暴是对流风暴中最为猛烈的。大量观测和数值模拟表明^[11-15]，超级单体风暴总是与径向速度场上称为“中气旋”（mesocyclone）的小尺度涡旋相伴随，这个“中气旋”与最早由 Brooks 通过分析龙卷周围的地面气压场得出的龙卷母气旋基本上是同一个概念。为了业务上使用中气旋来预警强对流风暴和龙卷，美国天气局制定了中气旋识别判据，要求在速度切变、垂直伸展和时间持续性三个方面都满足一定指标的小尺度涡旋才能被认定为中气旋。中气旋分为强、中和弱三个等级。一旦识别出中气旋，要立即发布强对流天气警报；而一旦识别出强中气旋，要立即发布龙卷警报。在出现中气旋时，强冰雹、龙卷和雷雨大风三种强对流天气中至少出现一种的概率在 90% 以上，在出现强中气旋时，龙卷发生概率为 40%。中气旋往往最先出现在超级单体风暴的中层，然后分别向上下发展。但也并非总是如此。图 3 给出了成熟阶段中气旋的概念模型。在对流风暴的低层，风场特征为辐合型气旋式旋转（图 3a），中低层为纯粹气旋式旋转（图 3b），中高层为辐散型气旋式旋转（图 3c），高层风暴顶

为纯粹辐散（图 3d）。

在我国一些地区新一代天气雷达开始应用以来，观测到不少超级单体及其相应的中气旋个例，每个个例都产生了强烈天气，主要是灾害性大风、大冰雹和龙卷。这些个例中的一些超级单体中气旋的结构与图 3 中的概念模型基本相符。

3.3 大冰雹的雷达探测与预警

冰雹是我国分布很广、危害最大的强对流灾害，每年我国都因为雹灾而遭受巨大损失，其中，大冰雹的危害最大。大冰雹是指降落到地面时直径超过 2cm 的冰雹。要产生大冰雹，雷暴中的上升气流要足够强，并且强的上升气流需要持续一段时间。

有利于大冰雹产生的环境条件是：（1）比较大的对流有效位能 CAPE，尤其是位于 -10°C 和 -30°C 等温线之间的对流有效位能比较大；（2）0~6km 之间的垂直风切变较大；（3） 0°C 层距地面的高度不是太高。

产生大冰雹的强对流风暴的最显著的特征体现在反射率因子高值区向上扩展到较高得高度。具体地讲，如果 -20°C 等温线对应的高度之上有超过 50dBz 的反射率因子，则有可能产生大冰雹。相应反射率因子的值越大，相对高度越高，产生大冰雹的可能性和严重程度越大^[16]。一般而言，如果 50dBz 的回波扩展到 -20°C 等温线以上高度，同时 0°C 层距地面的高度不超过 4.5km，可以考虑发布强冰雹预警。

大冰雹形成要求的强烈上升气流速度多数情况下在中等以上垂直风切变情况下才能达到。有时在较弱垂直风切变情况下也可以产生大冰雹，此时产生强对流天气的雷暴称为脉冲风暴。脉冲风暴通常是多单体风暴，其中一个或几个单体可以发展为强单体，其主要特征是初始回波高度比较高，通常在 6~9km 之间，回波中心强度超过 50dBz。脉冲风暴可以产生边缘尺度（2cm 左右）的大冰雹，但持续时间较短，预警相对困难。

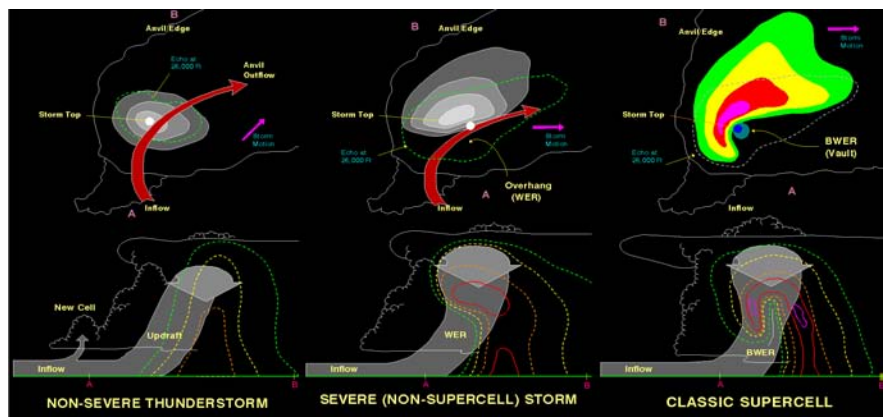


图4 非强对流风暴（左）、非超级单体强对流风暴（中）和超级单体风暴（右）的反射率因子特征^[17]

1970年代后期, Lemon^[17]提出了一种在中等以上垂直风切变环境中识别雷暴内上升气流强度的概念模型受到美国强对流天气预警业务人员的欢迎。该模型强调风暴的三维结构。图4中的三张示意图, 代表不同类型上升气流强度不同的风暴。对于多单体风暴, 图中的风暴单体代表其中发展最强盛的风暴单体。每种风暴类型由高中低层反射率因子平面综合图和沿风暴低层入流方向通过回波单体核心的相应垂直剖面来表示。平面图上, 阴影区表示低层回波反射率因子等值线。虚线表示中层回波强度超过20dBZ的范围, 白色小圆点代表风暴顶的位置。线段AB给出相应垂直剖面的位置。图4(左)所表示的风暴, 上升气流强度不大, 高中低层反射率因子高值区在垂直方向上相互重叠, 没有倾斜, 低层反射率因子四周梯度均匀, 风暴顶位于低层反射率因子区域的中心, 垂直剖面上没有弱回波区或有界弱回波区。图4(中)对应非超级单体强风暴, 低层反射率因子等值线在入流的一侧出现很大的梯度, 风暴顶位于低层反射率因子在入流一侧的强梯度区之上, 中层回波强度轮廓线的靠低层入流一侧的下部出现弱回波区。也就是说, 回波自低往高向低层入流一侧倾斜, 呈现出弱回波区和弱回波区之上的回波悬垂结构。这一点从垂直剖面上可以看得更加清楚。图4(右)对应超级风暴。此时, 风暴低层反射率因子出现明显的钩状回波特征, 入流一侧的反射率因子梯度进一步增大, 中低层出现明显的有界弱回波, 其上为回波悬垂, 风暴顶位于低层反射率因子梯度区或有界弱回波区上空。上述概念模型代表三种不同类型风暴的反射率因子结构, 即非超级单体非强风暴、非超级单体强风暴和超级单体风暴。这个概念模型同时也可代表超级单体风暴发展的三阶段模型。大多数对流风暴只发展到第一阶段就消亡了, 一小部分对流风暴可以发展到第二阶段, 成为非超级单体强风暴(大多为多单体强风暴), 只有极少数能够发展到第三阶段, 成为超级单体风暴。根据上述概念模型, 可以根据

低层、中层和高层的对流风暴雷达回波反射率因子特征及其相互配置进行雷暴内上升气流强度的识别和预警。通常可以通过在屏幕上同时显示4幅不同仰角的反射率因子的形式来确定雷暴的结构和强弱, 称为四分屏显示。

图5给出了2005年6月15日凌晨发生在安徽北部强烈雹暴雷达回波的四分屏显示。分别为6月15日0时16分(北京时)0.5°, 2.4°, 6.0°仰角的反射率因子图和1.5°仰角的径向速度图。注意到0.5°(左上)和6.0°(右下)仰角的反射率因子图上的双箭头指示同样的地理位置, 在0.5°仰角上(左上), 双箭头指向风暴的低层入流缺口, 箭头紧前方是构成入流缺口的一部分低层弱回波区, 而在6.0°仰角(右下), 箭头紧前面是超过60dBZ的强回波中心, 也就是说在低层与入流缺口对应的弱回波区之上, 有一个强回波悬垂结构。因此, 通过这种四分屏显示方式, 不必做垂直剖面, 就可以判断出对流风暴雷达回波的垂直结构。上述雹暴在15日0时30分左右在安徽固镇降落了直径达12cm的巨大冰雹。因此, 对于大冰雹的雷达回波识别, 除了第一条高悬的强反射率因子之外, 在中等以上垂直风切变条件下可以进一步考虑雷暴回波的三维结构, 通过四分屏显示方式判断有无低层反射率因子高梯度区、低层入流缺口、弱回波区、回波悬垂、有界弱回波区等代表强上升气流的特征。在第一个条件(50dBZ最大高度在-20°C等温线高度以上, 并且0°C等温线距离地面高度不超过4.5km)满足的情况下, 上述代表强上升气流的回波形态特征部分出现, 则大冰雹的概率会明显增加, 大冰雹警报的发布

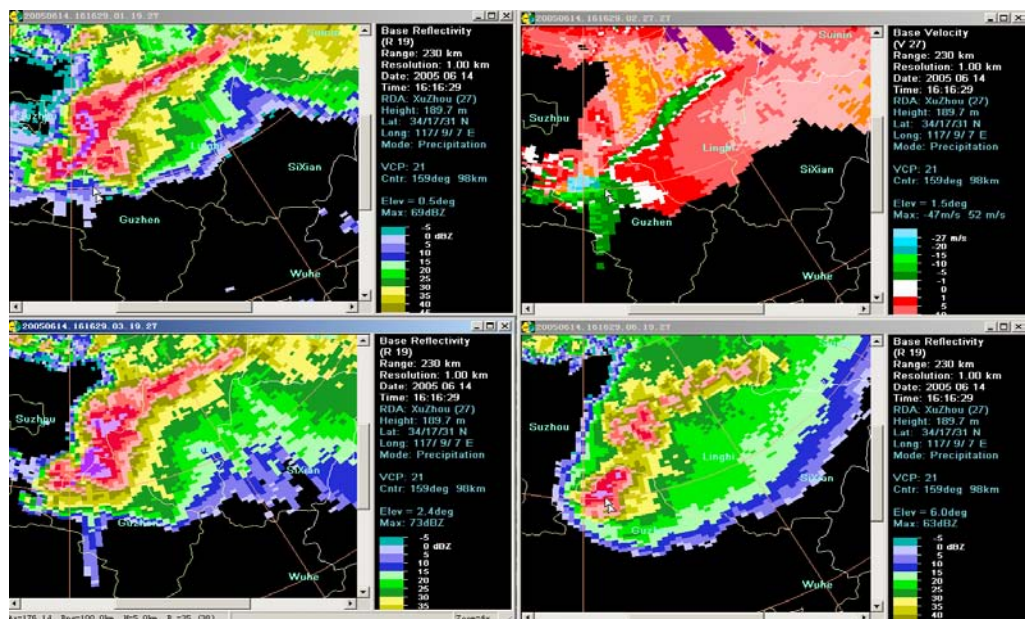


图5 2005年6月15日0时16分徐州SA雷达显示的0.5°(左上), 2.4°(左下), 6.0°(右下)仰角的反射率因子和1.5°(右上)仰角的径向速度图(图中的双箭头指示同样的地理位置)。

出可以更果断。

用来判断对流风暴强度的一个十分有用的参量是垂直累积液态含水量VIL，其定义为液态水混合比的垂直积分。液态水混合比是通过雷达测量的反射率因子和雨滴之间的经验关系：

$$M=3.44 \times 10^{-3} Z^{4/7}$$

进行计算的。对上式进行垂直积分即可得到垂直累积液态水含量VIL（该参量在CINRAD-SA和SB型新一代天气雷达中是日常产品）。VIL如果大大高于相应季节的对流风暴的平均VIL值，则发生大冰雹的可能性很大。根据美国Oklahoma州的统计，5月份对应于出现大冰雹的垂直累积液态含水量VIL的阈值为55kg/m²，6—8月份的相应阈值为65kg/m²。Amburn和Wolf^[18]定义VIL与风暴顶高度之比为VIL密度。他们的研究表明，如果VIL密度超过4g·m⁻³，则风暴产生直径超过2cm的大冰雹的概率很大。需要指出，在距离雷达30km以内和150km以外，雹暴的VIL值会有较大的估计误差。

用来判断大冰雹的另一个指标是风暴顶辐散。Witt和Nelson^[19]给出了风暴顶正负速度差值与地面降雹尺寸之间的经验关系。产生大冰雹的正负速度差值的阈值为38m/s。按照该经验关系，2002年5月27日皖北超级单体风暴最强盛时的风暴顶正负速度差值为63m/s^[14]，这样强的风暴顶辐散与高尔夫球大小的降雹相对应，即冰雹直径为40~50mm左右。

S波段雷达回波中三体散射^[20, 21]的出现表明对流风暴中存在大冰雹。三体散射现象是指由于云体中大冰雹散射作用非常强烈，由大冰雹侧向散射到地面的雷达波被散射回大冰雹，再由大冰雹将其一部分能量散射回雷达，在大冰雹区向后沿雷达径向的延长线上出现由地面散射造成的虚假回波，称为三体散射回波假象。S波段雷达回波中三体散射的出现是存在大冰雹的充分条件而非必要条件。C波段雷达回波中出现三体散射的机会更多一些，但并不一定表明大冰雹的存在。在C波段条件下，小冰雹也有可能产生三体散射。在研究了数个三体散射个例后，Lemon^[22]指出，在观测到三体散射后的10~30分钟内地面有可能出现大于2.5cm的降雹，同时往往伴随有地面的灾害性大风。廖玉芳等^[23, 24]对发生在我国三体散射进行了全面的分析，发现几乎所有三体散射个例都伴随有大冰雹。图5中的雹暴也产生了明显的三体散射，在1.5°和2.4°仰角尤其明显。

3.4 龙卷的雷达探测与预警

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害性天气，最强龙卷的地面风速介于110~140m/s之

间。当有龙卷时，总有一条直径从几十米到几百米的漏斗状云柱从对流云云底盘旋而下，有的能伸达地面，在地面引起灾害性的风称为龙卷；有的未及地面或未在地面产生灾害性风的称为空中漏斗；有的伸达水面，称为水龙卷。龙卷漏斗云可有不同形状，有的是标准的漏斗状，有的是呈圆柱状或圆锥状的一条细长绳索，有呈粗而不稳定且与地面接触的黑云团，有的呈多个漏斗状。绝大多数龙卷都是气旋式旋转，只有极少数龙卷是反气旋式旋转。一般用Fujita等级^[25]来确定龙卷风的大小，Fujita等级是基于建筑物或地面植物的损坏情况的龙卷灾害等级，类似于地震的烈度。除了确定龙卷级别外，Fujita等级也可以用来确定雷雨大风（包括下击暴流）的等级。表1给出了Fujita等级的描述。

表1 Fujita 龙卷等级^[25]

| F等级 | 估计最大风速 (m/s) | 损害描述 |
|-----|--------------|---|
| F0 | 18~33 | 轻微损害。烟囱会有一些损害，一些树枝被刮掉，树根浅的树可能被刮倒，指路牌被损坏。 |
| F1 | 33~50 | 中等程度损害。可以刮掉房屋屋顶的表面，将移动房屋刮离地基或侧翻，正在开动的汽车被推离公路。 |
| F2 | 50~70 | 相当大的损害。框架结构的屋顶被刮掉，移动房屋被摧毁，集装箱卡车侧翻，大树被折断或被连根拔起，轻的物体快速飞到空中。 |
| F3 | 70~92 | 严重损害。屋顶严重损坏，一些结构比较结实的房屋的墙被刮倒，火车被刮翻，森林里大多数树木被连根拔起，汽车被掀离地面并被抛到一定距离以外。 |
| F4 | 92~117 | 巨大损害。较结实的房屋被夷平，一些房屋部件被抛到一定距离以外，汽车被抛到空中，一些大的物体高速飞入空中。 |
| F5 | 117~143 | 难以想象的损害。非常结实的房屋被推离地基并被带到相当距离之外碎成几块。汽车大小的物体以超过100m/s的速度被抛入空中，会发生难以置信的现象。 |

我国的龙卷主要发生在东部的平原地区，包括江淮流域、两湖平原、华北平原、东北平原，还有华南的珠江三角洲和丘陵地区。每年我国有记录的龙卷在50~80个之间（实际数量可能大大超过这个数字），其中F2级以上的强龙卷大约为5~6个。我国龙卷发生的频率远低于美国（美国每年有记录的龙卷约为1300个）。

龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷两大类。超级单体龙卷发生在中气旋内，其反射率因子回波的主要特征是低层的钩状回波。需要指出的是，并非所有的超级单体都呈现出典型的钩状回波，大多数情况下都是由风暴主体向着低层入流方向伸出的一个突出物，Fujita给出了常见的超级单体钩状回波的5个变种^[26]。超级单体发生前的环境往往为中等到强的对流不稳定能量和中等到强的相对风暴的螺旋度。此外，0~6km垂直风切变通常超过20m/s，低层风切变矢量有较大的气旋式曲率。并非所有超级单体风暴都产生龙卷，在龙卷超级单体和非龙卷超级单体的钩状回波之间并没有非常明显的区别^[27]。研究表明，有

利于F2级以上强龙卷产生的有利环境是强烈的低层(0~1km)垂直风切变和低的抬升凝结高度^[28, 29]。

多普勒天气雷达提供了径向速度场图像,可以通过识别中气旋来进行龙卷预警。统计表明,大约只有20%左右的中气旋能够产生龙卷。所以只有当观测到强中气旋时才发布龙卷警报,此时探测概率会大大增加,大约接近40%,但漏报和空报还是时有发生。2002年5月27日皖北的一个超级单体风暴伴随一个强中气旋,但只产生了狂风和大冰雹,没有产生龙卷^[14]。而2003年7月8日安徽无为强烈龙卷^[30]、2005年7月30日安徽灵璧强烈龙卷^[31]和2007年7月3日安徽天长和江苏高邮强烈龙卷都伴随有强中气旋,从强中气旋出现到龙卷产生的间隔时间在上述个例中分别为8分钟、40分钟和0分钟。龙卷有时伴随的另一个径向速度特征是龙卷涡旋特征TVS^[11]。它是一个比中气旋还要小的强烈涡旋,在径向速度图上表现为像素到像素的沿着雷达方位角方向的很大的气旋式切变^[30]。如果在一个中气旋中心识别出一个龙卷涡旋特征,则不论中气旋是否是强中气旋都要立即发布龙卷警报。大多数的F2级以上强烈龙卷都是超级单体龙卷。

非超级单体龙卷中的一部分产生于大气边界层中的辐合切变线^[32]。当上升速度区与切变线上预先存在的涡度中心重合时,上升速度使涡管迅速伸长,导致旋转加快而形成龙卷。非超级单体龙卷的母气旋(通常称做微气旋)一般局限于大气边界层内,因此几乎不可能在50km以外探测到。加之这种微气旋生命史很短,所以这种龙卷的预警相当困难。

3.5 雷雨大风的雷达探测与预警

这里雷雨大风是指除了龙卷以外的直线型风害,主要由对流风暴的强烈下沉气流所造成。其中,以下击暴雨造成的危害最为严重。下击暴雨^[33]是指能在地面产生18m/s以上辐散风的一股强下沉气流。下击暴雨分为微下击暴雨和宏下击暴雨。微下击暴雨是指水平尺度小于4km,时间尺度小于10分钟的下击暴雨。宏下击暴雨指水平尺度超过4km,持续时间超过10分钟的下击暴雨,简称下击暴雨。微下击暴雨可导致很大的水平风切变,对飞机起飞降落威胁很大。宏下击暴雨强烈时可造成与龙卷类似的风害。下击暴雨可以通过多普勒天气雷达0.5°仰角的径向速度图进行识别,局限于距离雷达60km以内区域,呈现为低层明显的辐散。在雷达回波静止或移动缓慢时,下击暴雨低层辐散场基本对称,比较容易从雷达上进行识别。当产生下击暴雨的强对流系统,如飑线,移动较快时,下击暴雨造成的低层辐散场不对称,通常比较难识别,此时下击暴雨的发生需要通过灾后实地调查来

确定。沿着一条飑线常常会产生很多个下击暴雨,从雷达回波上很难一一识别,可以统称为雷雨大风。除了下击暴雨以外,雷雨大风还可以由多个雷暴下沉气流汇合在一起的冷空气堆的前沿阵风锋产生,偶尔还可以由雷暴的即将进入上升气流的低层入流产生。因此,下击暴雨只是雷雨大风的一种类型,往往最强的雷雨大风都是由下击暴雨导致的。由于雷雨大风主要由雷暴内的下沉气流产生,因此有利于其产生的有利环境条件是中高对流层有相对于层以及500hPa以下大气的温度直减率比较大^[34]。

在垂直风切变较弱的环境下,下击暴雨通常由脉冲风暴产生^[11]。Roberts等^[35]在研究了31个发生在美国Colorado州的由脉冲风暴产生的微下击暴雨及其相应的风暴后,发现下降的反射率因子核同时伴随雷暴云中某一高度处(2~6km)或云底附近不断增加的径向辐合是重要的下击暴雨预报线索;若同时伴有雷暴云的旋转和侧向入流槽口,则可以更加肯定地预报下击暴雨,预报提前时间为0~10分钟。受到Roberts和Wilson的启发,Eilts等^[36]做了类似的工作。他们研究了发生在美国Florida, Oklahoma, Arizona和Colorado州的下击暴雨,得到的下击暴雨预兆与Roberts和Wilson发现的类似。这些预兆是:①一个迅速下降的反射率因子核;②强并且深厚的中层辐合(2~6km AGL);③产生下击暴雨的反射率因子核往往开始出现在比其他雷暴单体核更高的高度。上面三点是最重要的。其次还有两点:④中层旋转;⑤强烈的风暴顶辐散。他们根据上述发现开发了一个称为灾害性下击暴雨预报和探测算法(DDPDA),该算法的总体表现平平,可以平均提前6分钟做出下击暴雨的预报。

在中等以上垂直风切变环境下,下击暴雨或雷雨大风可出现在任何类型的对流风暴中,但更经常出现在超级单体钩状回波附近或弓形回波的顶点附近,其中后者更为常见。典型的弓形回波如图6所示,实线

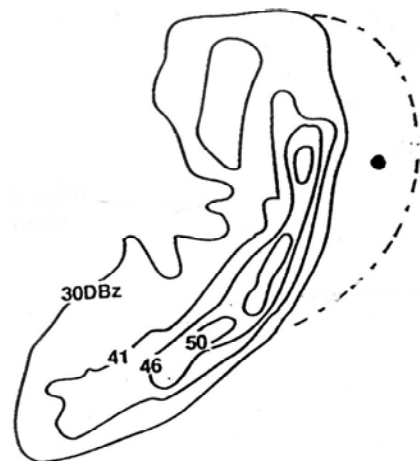


图6 典型的弓形回波^[11]

为低层反射率因子等值线。虚线为中高层反射率因子等值线，表示向前的回波悬垂，黑色圆点为回波顶。典型弓形回波前沿为强的低层反射率因子梯度区。后侧的弱回波通道代表干冷的向前下沉的气流。下击暴流或雷雨大风最容易出现在弓形回波的顶点（凸点）附近，龙卷也时常出现在弓形回波顶点以北。弓形回波的尺寸变化很大，小到10km左右，大到数百千米。大的弓形回波中还可以包含小的弓形回波。除了图6显示的典型弓形回波外，还有包含超级单体的弓形回波复合体、单体型弓形回波和爬线型（波形）弓形回波^[11]。需要指出的是，很多类型的对流风暴都能产生下击暴流和雷雨大风，只不过弓形回波更加突出一些，同时具有容易辨认的外形。

爬线是产生下击暴流或雷雨大风的另一个常见的强对流系统。如上面所讲，弓形回波经常构成爬线的一段。即使不出现弓形结构，爬线也可以产生下击暴流或雷雨大风。需要提到的一个雷雨大风的径向速度特征是中层径向辐合MARC^[37, 38]。如果爬线的某一强回波段对应的2~5km之间高度上有明显的径向速度辐合存在，则该段爬线前沿出现下击暴流或雷雨大风的可能性很大。另外，如爬线的某一段有中气旋存在，则该段前沿也很可能产生雷雨大风。

3.6 对流暴雨的雷达探测与预警

暴洪的产生取决于两方面的条件，即气象方面的条件和水文方面的条件。水文方面需要确定某一区域内出现暴洪所需要的降水阈值，这个阈值是随时间不断变化的。气象方面的条件通常是对流暴雨。与大冰雹、龙卷和雷雨大风不同，对流暴雨在多普勒天气雷达上并不呈现出明显的特征。另外，对流暴雨不是一个瞬时的事件，需要一段时间的累积。对流暴雨是“较大的雨强持续相对较长时间”的结果。雨强的大小主要由低空的雷达反射率因子大小来判断，而强回波持续时间长短与很多因素有关。一种情况是强回波

区域不大，但几乎停滞不动，造成其停滞地区的暴雨。造成回波停滞的原因很多情况下是由于雷暴回波中每个单体按照雷暴承载层平均风移动构成的平流矢量与由于新单体在雷暴某一端不断生成构成的雷暴回波传播矢量方向几乎相反而大小相等（图7），使得作为上述二者矢量和的雷暴回波移动矢量近乎为零。如果雷暴回波的传播矢量与雷暴回波的平流矢量方向差超过90°，则称该雷暴系统为后向传播系统，否则称为前向传播系统。后向传播系统容易产生暴雨。因此，对于对流雨团雷达回波传播规律的研究会非常有助于对流暴雨的临近预报。另外一种产生暴雨的典型情况是所谓的“列车效应”：一条狭长强对流雨带的移动方向与雨带走向一致，在该雨带路径上的地区将经历雨带上每一个强对流单体的降水，即所谓的“列车效应”，导致雨带路径上的暴雨。

需要特别注意的是，有一种高降水效率的对流系统，通常称为“热带降水型”，其反射率因子的主要特征是在中低对流层越靠近地面回波越强，质心位置较低，45dBz的回波往往会对应极强的雨强，持续半小时往往就可以导致暴雨。例如登陆的台风中的对流雨带、梅雨锋降水系统中的对流雨团都属于这类高降水效率的对流系统，这类系统的较短时间持续就可以产生暴雨。

有利于这种高降水效率的“热带降水型”出现的环境条件是：①整层大气相对湿度较高；②抬升凝结高度到0℃层之间的距离较大。与上述“热带降水型”对流系统形成鲜明对照的是雹暴对流系统，其强回波可以扩展到较高的高度，质心位置较高，降水效率较低，在降冰雹的同时偶尔也可以产生很大的雨强，在其持续时间较长的地点也可以产生暴雨，只是雹暴系统产生暴雨的频率远低于“热带降水型”对流系统。

图8给出了2005年8月6日麦莎台风登陆后13时02分（北京时）浙江宁波SA雷达的0.5°仰角反射率因子和沿图中所标线段的垂直剖面，40dBz以上的较强回波全部位于6km以下。由于极大的雨强和列车效应造成的较长持续时间，麦莎台风的一条螺旋雨带在宁波北仑区产生了650mm的过程雨量。图9给出了2007年7月18日17时53分济南SA雷达0.5°仰角反射率因子和沿图中所标线段的垂直剖面。济南市中心地区从17:20—18:20的1小时累积雨量为151mm。济南2007年7月18日14时的探空显示深厚湿层位于整个对流层中部和下部，0℃层的高度高达5.7km，因此非常有利于“热带降水型”的产生。图9中垂直剖面显示45dBz以上的较强回波主要集中在地面以上的低空，属于明显的“热

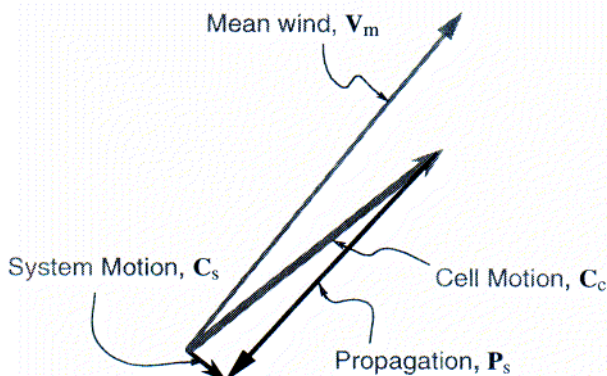


图7 中 β 尺度的对流雨团雷达回波的移动矢量等于对流单体基本沿着风暴承载层平均风(V_m)的平流矢量 C_c 和由于对流单体在某一侧不断生成产生的传播矢量 P_s 之和 C_s ^[11]

带降水型”，具有很高的降水效率，导致极强的雨强。尽管强降水阶段在济南市区持续只有1小时，还是造成了大暴雨和城市暴洪，导致34人死亡。

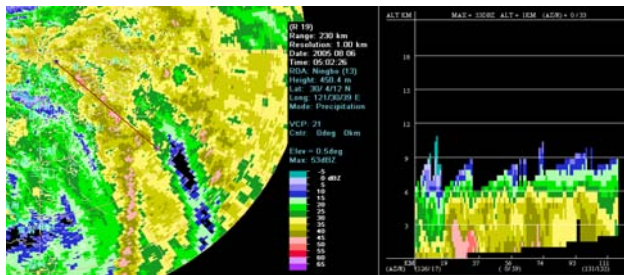


图8 2005年8月6日13时02分宁波SA雷达观测的麦莎台风0.5°仰角反射率因子和沿图中所标线段的垂直剖面

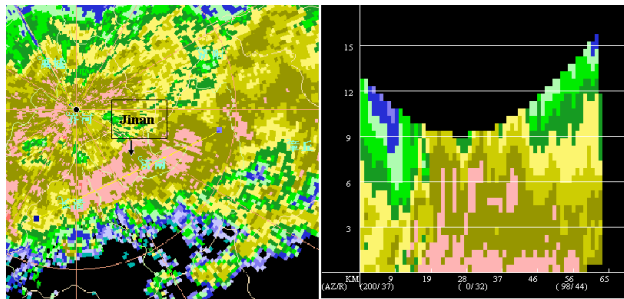


图9 2007年7月18日17时53分济南SA雷达0.5°仰角反射率因子和沿图中所标线段的垂直剖面

3.7 强对流天气雷达识别的客观算法

上述强对流天气的雷达识别的主要思路可以通过设计相应的算法而在一定程度上实现强对流天气的自动识别。拥有客观算法和产品是新一代天气雷达区别于传统天气雷达的主要特征之一。目前最具有代表性的强对流天气识别算法系统是美国新一代天气雷达WSR-88D的算法^[11]和由美国国家强风暴实验室NSSL开发的警报决策支持系统WDSS (Warning Decision Support System)^[36]，二者中有许多算法是类似或相同的（实际上WSR-88D的算法中大多数也是由NSSL开发的）。其中最基础的算法是风暴单体识别与跟踪算法SCIT^[39]。该算法识别并跟踪对流单体，可给出该单体过去1小时期间每隔一个体扫的位置、目前的位置和未来1小时中每隔15分钟的位置，并通过属性表的形式给出该单体的具体特征。在单体识别和跟踪算法的基础上，WSR-88D算法进一步给出该单体产生冰雹和强冰雹的可能性^[16]，是否伴随中气旋^[40]或龙卷涡旋特征^[41]。重要的算法还有VAD风廓线算法和降水算法。另外，还有一些简单的算法和产品，如组合反射率因子、分层组合反射率因子、回波顶、垂直累积液态水含量以及强天气分析等。其中垂直累积液态水含量可以在一定程度上代表雷暴的总体强度，只是其水平分辨率比较粗(4km×4km)，另外在近距离和远距离都有相当的误差。组合反射率因子将出现在各仰角的最大反射率因子显示在一张图上，可以有高分辨

率产品(1km×1km)，但时常超折射回波会对其形成严重干扰。VAD风廓线算法在雷达周边地区充满降水情况下可以提供高时间分辨率的比较可靠的雷达上空垂直风廓线，便于对强对流的环境进行估计。降水算法可以给出过去1小时和3小时的每一个2km×1°的像素上的累积雨量。上述WSR-88D的算法几乎全部移植到我国的CINRAD-SA型新一代天气雷达的算法之中，并且上述算法也正在移植到我国其他型号的新一代天气雷达当中去。

根据美国天气局的统计，风暴单体识别与跟踪算法SCIT外推5, 15, 30, 45和60分钟的雷暴单体路径预报误差分别是2, 5, 10, 15和23km。在我国的应用中，还没有研究给出比较系统的统计。强冰雹探测算法中如果以30%以上概率算命，则根据美国天气局的统计该算法相应的命中率率和虚警率分别为70%和49%（这意味着，平均而言，出现100次强冰雹该算法可以命中70次，而由该算法识别的100次强冰雹中，有49次属于错误识别），相应的临界成功指数（即TS评分）为42%。在我国东部地区的盛夏季节，上述强冰雹探测算法更经常地出现虚警，一个可能的原因之一是盛夏季节0℃层较高导致冰雹在下落过程中融化的效应没有充分考虑。特别需要指出，上述冰雹算法要求每天在RPG上更新0℃和-20℃等温线的高度，否则给出的结果是不恰当的。SA雷达的中气旋算法在148km附近（即SA雷达径向速度的最大探测距离附近）由于速度数据的距离折叠影响常常出现中气旋的错误识别。需要注意的是该中气旋算法中中气旋的判距与美国天气局给出的预报员主观判距并不完全一样，尤其是没有时间持续性的条件。TVS算法识别TVS的目的是帮助预报员判断可能发生龙卷的地点，在我国的使用中发现，在速度模糊出现情况下，龙卷涡旋特征算法常常给出虚假的TVS识别。在降水估计算法中，默认的Z-R关系($Z=300R^{1.4}$)只是大致适合于大陆型对流降水（接近于上面谈到的雹暴系统），而不适合于层状云降水和“热带降水型”对流系统。

4 总结与讨论

本文介绍了对流风暴的分类、主观雷达识别和预警技术以及主要客观产品。上面给出的强对流主观识别技术和客观算法基本都是从美国借鉴过来的。因此，在看到对流风暴普遍性的同时，还要注意我国的局地气候和地形特点。初步的研究表明^[14, 23, 24, 30, 31, 34, 38, 42]，我国的雷暴雷达回波特征与美国的雷暴特征在多数情况下是类似的。上述识别强对流风暴的技术在我国也是完全适用的。

需要指出的是，预报员根据雷达回波特征能够正确做出强对流风暴预警的前提是预先对周边的环境和天气形势具有非常充分的了解和把握，提前几十分钟到数小时预先判断出有可能出现强对流天气的区域并给予充分的注意。只有对环境条件充分掌握的基础上，一旦雷达上出现强对流风暴特征，才有可能迅速正确地预警。

强对流天气包括大冰雹、龙卷、雷雨大风和暴洪。

有利于大冰雹的环境条件是 -10°C 和 -30°C 之间的对流有效位能较大，地面和500hPa之间的垂直风切变较大， 0° 层距离地面高度不是太大。主要的雷达回波特征是50dBz的回波扩展到 -20°C 等温线高度之上，弱回波区和回波悬垂，以及有界弱回波区等。

有利于F2级以上强龙卷产生的环境条件是低层（ $0\sim 1\text{km}$ 之间）强烈的垂直风切变和低的抬升凝结高度。龙卷预警的判据是出现强中气旋或任何强度的中气旋中心出现龙卷涡旋特征。

有利于下击暴流和雷雨大风的环境条件是对流层中层或中上层有相对比较干的空气以及500hPa以下大气环境的温度直减率比较大。下击暴流预警的雷达判据是反射率因子核心的不断下降伴随云底以上的对流层中层辐合。移动性下击暴流或雷雨大风经常出现在弓形回波顶点和超级单体的钩状回波附近，以及飚线中对应明显中层径向辐合（MARC）的部分。

对流暴雨的出现取决于较强的雨强持续相对长的时间。因此对流暴雨的判断分为根据低空反射率因子判断雨强和根据回波近期的移动判断强回波在具体地点可能持续的时间。特别注意那些高降水效率的“热带降水型”，这种系统极高的雨强可以在30分钟时间内造成暴雨。特别注意后向传播的中 β 尺度对流雨团，这种类型的雨团由于后向传播造成的移动缓慢有利于暴雨的产生。

目前特别需要做的一件事是建立强对流天气目击志愿者网络。大冰雹、下击暴流和龙卷等强对流天气刚好发生在气象站点上的概率很小，强对流天气实况需要一个组织完好的目击志愿者网络才能完整记录下来。我们对于上述强对流预警技术的检验必须要建立在完成详细的观测和目击的基础之上。

另外需要特别强调的是，强对流天气识别的客观产品只是给预报员提供一个安全网，防止预报员出现重要的遗漏和疏忽，强对流天气识别和预警主要是通过预报员的主观分析和判断实现的，这与短期预报中相当大程度上依赖数值预报是完全不同的。

最后给出建议使用的产品清单。通过常规产品列表的方式可以申请40个产品，具体产品的建议见表2。

另外，可以通过一次性请求的方式申请反射率因子、径向速度和谱宽的剖面产品以及其他没有包括在上述常规产品清单中的产品。

表2 建议的常规产品列表

| 名称 | 缩写 | 标识号 | 内容 | 分辨率 |
|--------------|-----|-----|--|--------------------------------|
| 反射率因子 | R | 19 | 0.5, 1.5, 2.4, 3.5, 4.3, 6.0, 9.9, 14.6, 19.5 | $1^{\circ}\times 1\text{km}$ |
| 反射率因子 | R | 20 | 0.5 | $1^{\circ}\times 2\text{km}$ |
| 径向速度 | V | 27 | 0.5, 1.5, 2.4, 3.5, 4.3, 6.0, 9.9, 14.6, 19.5 | $1^{\circ}\times 1\text{km}$ |
| 径向速度 | V | 26 | 0.5 | $1^{\circ}\times 0.5\text{km}$ |
| 相对风暴径向速度图 | SRM | 56 | 0.5, 1.5, 2.4, 3.5, 4.3, 6.0, 9.9, 14.6, 19.5 | $1^{\circ}\times 1\text{km}$ |
| 组合反射率因子 | CR | 37 | | $1\text{km}\times 1\text{km}$ |
| 分层组合反射率因子最大值 | LRM | 65 | 显示中间层的最大反射率因子，中间层的底部定义为 -20°C 等温线高度，顶为底以上3km的高度，主要用来判断强冰雹的区域 | $4\text{km}\times 4\text{km}$ |
| 垂直累积液态水量 | VIL | 57 | | $4\text{km}\times 4\text{km}$ |
| 风暴路径信息 | STI | 58 | | |
| 冰雹指数 | HI | 59 | | |
| 中气旋 | M | 60 | | |
| 龙卷涡旋特征 | TVS | 61 | | |
| 速度方位显示风廓线 | VWP | 48 | | 0.3km |
| 1小时累积雨量 | OHP | 78 | | $1^{\circ}\times 2\text{km}$ |
| 3小时累积雨量 | THP | 79 | | $1^{\circ}\times 2\text{km}$ |

参考文献

- [1] Browning K A. The structure and mechanisms of hailstorms. Amer Met Soc Monograph, 1978, 38.
- [2] Byers H R, Braham R R. The thunderstorms. US Govt Printing Office, Washington, DC, 1949, 287.
- [3] Marwitz J D. The structure and motion of severe hailstorms. J Appl Met, 1973, 11: 166-201.
- [4] Chisholm A J. Radar case studies and airflow models, Albert hailstorms, Meteor Monogr, No. 36, 1972, Amer Met Soc, 1-36.
- [5] Doswell C A III, Burgess D W. Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards (Church C, et al, eds), Geophys Monogr 79, 1993, AGU, 161-172.
- [6] Muller A R. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. Wea Forecasting, 1994, 9: 327-347.
- [7] Wilson J W, Schreiber W E. Initiation of convective storms by radar-observed boundary layer convergent lines. Mon Wea Rev, 1986, 114: 2516-2536.
- [8] Wilson J W, Muller C K. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. Wea Forecasting, 1993, 8: 113-131.
- [9] Muller C K. NCAR Auto-Nowcast System. Wea Forecasting, 2003, 18: 545-561.
- [10] Wilson J W, Weckwerth T M, Vivikanandan J, et al. Boundary Clear-Air Radar Echoes: Origin of Echoes and Accuracy of Derived Winds. J Atmos Oceanic Technol, 1995, 11: 1184-1206.
- [11] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用, 北京: 气象出版社, 2006, 314.
- [12] Fujita T T. Mesoanalysis of the Illinois tornadoes of 9 April 1953. J Meteor, 1958, 15: 288-296.
- [13] Brooks E M. The tornado cyclone. Weatherwise, 1949, 2: 32-33.
- [14] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 一次超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报, 2004, 62: 317-328.
- [15] Weisman M L, Klemp J B. The structure and classification of numerical simulated convective storms in directionally varying wind shears. Mon Wea Rev, 1984, 112: 2479-2498.
- [16] Witt A. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. Wea Forecasting, 1998, 13: 286-303.
- [17] Lemon L R. New severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: A preliminary report. NOAA Tech. Memo, 1980, NWS-NSSFC1, 60. [NTIS No. PB-273049].
- [18] Amburn S A, Wolf P L. VIL Density as a Hail Indicator. Wea Forecasting, 1997, 12: 473-478.

- [19] Witt A, Nelson S. The relationship between upper-level divergent outflow magnitude as measured by Doppler radar and hailstorm intensity. Preprints, 22nd Radar Meteorology Conf. AMS, Boston, 1984, 108-111.
- [20] Zrnic D S. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value. Radio Sci, 1987, 22: 76-86.
- [21] Wilson J W, Reum D. The flare echo: Reflectivity and velocity signature. J Atmos Oceanic Techno, 1988, 5: 197-205.
- [22] Lemon L R. The radar "Three-Body Scatter Spike": An Operational Large-Hail Signature. Wea Forecasting, 1998, 13: 327-340.
- [23] 廖玉芳, 俞小鼎, 郭庆. 一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析. 应用气象学报, 2003, 14: 656-662.
- [24] 廖玉芳, 俞小鼎, 吴林林, 等. 雷达三体散射与强冰雹预警. 高原气象, 2007, 26: 812-820.
- [25] Fujita T T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. J Atmos Sci, 1981, 38: 1511-1534.
- [26] Fujita T T. Proposed mechanism of tornado formation from rotating thunderstorms. Preprints, Eighth Conf. on Severe Local Storms, Denver, CO, Amer Meteor Soc, 1973, 191-196.
- [27] Markowski P M. Direct surface thermodynamic observations within the Rear-Flank Downdrafts of nontornadic and tornadic supercells. Mon Wea Rev, 2002, 130: 1692-1721.
- [28] Evans J S, Doswell C A. Investigating derecho and supercell proximity sounding. Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms, 2002, Amer Meteor Soc, San Antonio, TX, 635-638.
- [29] Brooks H E, Craven J P. Database proximity soundings for significant severe thunderstorms, 1957-1993. Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms, 2002, Amer Meteor Soc, San Antonio, TX, 639-642.
- [30] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象, 2006, 25: 914-924.
- [31] 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [32] Wilson J W. Tornadogenesis by nonprecipitation induced wind shear lines. Mon Wea Rev, 1986, 114: 270-284.
- [33] Fujita T T. Manual of downburst identification for Project NIMROD. SMRP Research Paper 156, University of Chicago, 1978, 104.
- [34] 俞小鼎, 张爱民, 郑媛媛, 等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析. 应用气象学报, 2006, 17: 385-393.
- [35] Roberts R D, Wilson J W. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar. J Appl Meteor, 1989, 28: 285-303.
- [36] Eilts M D. Severe weather warning decision support system. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, San Francisco, CA, Amer Meteor Soc, 1996, 536-540.
- [37] Schmocker G K. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the midaltitude radial convergence (MARC) signature. Preprints, 15th Conf. on Weather Analysis and forecasting, Norfolk, VA, Amer Meteor Soc, 1996, 306-311.
- [38] 姚叶青, 俞小鼎, 张义军, 等. 一次典型飑线过程多普勒天气雷达资料分析. 高原气象, 2008, 27: 373-381.
- [39] Johnson J T. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D Algorithm. Wea Forecasting, 1998, 13: 263-276.
- [40] Stumpf G J. The National Severe Storms Laboratory mesocyclone detection algorithm. for the WSR-88D. Wea Forecasting, 1998, 13: 304-326.
- [41] Mitchell E D. The National Severe Storms Laboratory tornado detection algorithm. Wea Forecasting, 1998, 13: 352-366.
- [42] 廖玉芳, 俞小鼎, 唐小新, 等. 基于多普勒天气雷达观测得湖南超级单体风暴特征. 南京气象学院学报, 2007, 30(4): 433-443.

文献信息

ESI地学领域“快速突破论文”

Essential Science Indicators (ESI) 即基本科学指标数据库, 是由国际知名的学术信息出版机构美国科技信息所 (ISI) 推出的基于 ISI Web of Science 所收录的学术文献及所引用的参考文献而建立的计量分析数据库。ESI 从引文分析的角度, 对 11000 余种期刊上 1000 余万篇的文献数据分 22 个学科进行分析, 将在最近连续 10 年以上的统计时段内入库的期刊论文中, 按被引频次在相应学科和年份排名在前 1% 的论文, 列为“高被引论文” (Highly Cited Papers), 数据每两个月更新一次。通常这些论文都是各学科高质量、具有较大影响力的论文, 透过这些论文可较清晰地了解各学科具有长期影响的研究方向和研究课题。同时, 对于这些经典论文中在每两个月更新期间引用增长率最高, 因此代表了正在日益得到科学界关注的最新贡献的科学论文, 被冠以“快速突破论文” (Fast Breaking Papers), 这类论文可使科研人员及时洞察学科持续热点研究中近期频受关

注的研究内容。

以下给出 2011 年 4 月、6 月和 8 月三个更新周期中地学领域最受瞩目的“快速突破论文”的相关信息。

2011 年 4 月: Review of the formulation of present-generation stratospheric chemistry-climate models and associated external forcings. Morgenstern O, Giorgetta M A, et al. Jorunal of Geophysical Research-Atmosphere, 2010, 115(2).

2011 年 6 月: Tropical cyclones and climate change. Knutson T R, McBride J L, et al. Nature Geoscience, 2010, 3(3).

2011 年 8 月: Black soot and the survival of Tibetan glaciers. Xu BQ, Cao J, et al. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106 (52).

王卫丹 提供

“卫星资料应用”专题系列

卫星资料测量精度参数“NEDT”

邹晓蕾^{1, 2}

(1 佛罗里达州立大学地球海洋大气科学系, 美国;

2 南京信息工程大学资料同化与研究应用中心, 南京 210044, 中国)

数值天气预报和气候变化研究不仅依赖于充分多、高准确度的卫星资料, 还依赖于这些资料在数值天气预报和气候模式中的有效同化。在这方面的应用上, 观测资料的测量精度是一个关键参数。

假定对一个地球目标的辐射在 λ 波长上进行了 N 次观测, 并假定这些观测是独立进行的且观测误差为正态分布的。我们把这 N 次观测的测量值记为 $\{y_{i,\lambda}^{obs}, i=1, 2, \dots, N\}$, 测量精度(σ_λ)可以用这些样本值的标准差来进行统计估计, 即

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_{i,\lambda}^{obs} - \bar{y}_\lambda^{obs})^2} \quad (1)$$

其中, $\bar{y}_\lambda^{obs} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{i,\lambda}^{obs}$ 是对平均值的统计估计。

在资料同化中, 不同通道卫星资料的测量精度值是必须提供的。例如, 在变分同化系统中, 代价函数的极小化可以用下式进行求解:

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^{obs})^T (\mathbf{O} + \mathbf{F})^{-1} (\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^{obs}) \quad (2)$$

其中 \mathbf{x}_b 是背景场; \mathbf{B} 是背景误差协方差矩阵; \mathbf{y}^{obs} 代表不同通道卫星资料观测值; \mathbf{O} 代表观测误差协方差矩阵, 其对角线元素即测量精度 σ_λ^2 ; $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 代表辐射传输模式(RTM), 该模式依据给定的输入参数包括大气状态变量 \mathbf{x} 来计算大气顶层的辐射; \mathbf{F} 是RTM的误差协方差矩阵。

公式(2)中代价函数的极小值 \mathbf{x}^{ana} 可以通过一种选定的迭代过程求解^[1]。得到的极小值 \mathbf{x}^{ana} 满足下列不等式: $J(\mathbf{x}^{ana}) \leq J(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x}_b$ 附近的邻近值 \mathbf{x} 。 (3)

因此, 准确确定观测资料的测量精度(σ_λ^2)对卫星资料同化结果(即分析场 \mathbf{x}^{ana})的精确度有直接影响。换句话说, 测量精度的确定直接影响到分析卫星资料在数值天气预报和气候模式预报中的应用效果。

卫星仪器的测量精度通常是由参数“NEDT”提供的, 它代表噪声等效温差(Noise Equivalent Delta Temperature)。例如, 美国国家海洋和大气管理局(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)系列极轨环境卫星(POES, polar-orbiting environmental satellites)携带的高级微波温

度探测仪(AMSU-A, Advanced Microwave Sounding Unit-A)提供共15个不同频率(即不同通道)的辐射观测量。AMSU-A1模块有2套天线辐射系统(A1-1和A1-2), 他们共提供分布在50~60 GHz氧气带上的12个不同频率的通道和分布在低频(23.8GHz和31.4GHz)和高频(89.5GHz)上的另外3个通道。氧气带通道主要用于得到从地表到42km(2hPa)的温度信息, 另外3个低频和高频通道用来得到与地表发射率、大气中的云和水汽有关的信息。当NOAA把AMSU-A测量数据提供给用户的时候, 依赖于通道的NEDT值也一并提供给了用户(见表1^[2])。那么, 什么是NEDT? NEDT值又是如果得到的呢?

表1 AMSU-A给定的NEDT值

| 通道 | 1-2 | 3 | 4-9 | 10-11 | 12 | 13 | 14 |
|----------|------|------|------|-------|------|------|------|
| NEDT (K) | 0.30 | 0.40 | 0.25 | 0.40 | 0.60 | 1.20 | 0.50 |

实际上, NEDT是描述卫星仪器观测精度的一个参数。NEDT的计算步骤可以描述如下。首先, 当卫星每完成一次扫描线, 铂电阻温度计(PRT, Platinum Resistant Temperature)测量一个黑体校准温度, 同时, 卫星观测仪器记录指定波长(λ)来自地球场景不同观测像元的原始辐射计数值, 即所谓的观测计数值(observation count), 记为 $c_{j,i,\lambda}^{raw}$, 其中下标 i 表示第 i 根扫描线, j 表示第 j 轨。在每一个轨道上, 卫星天线对地球场景进行 N 次扫描得到 N 条扫描线(即 $c_{j,i,\lambda}^{raw}, i=1, 2, \dots, N$)。通常情况下, 将每5根邻近扫描线上的计数值平均可以得到一个平滑的量值($c_{j,i,\lambda} = \sum_{k=5(i-1)+1}^{5(i-1)+5} c_{j,k,\lambda}^{raw}, i=1, 2, \dots, N/5$)。计数值 $\{c_{j,i,\lambda}\}$ 的样本标准差记为 $\sigma_{c,\lambda}$ (为简单起见, 省略下标 j)。利用两点校准方程, 我们可以将观测计数值标准差($\sigma_{c,\lambda}$)转换成卫星观测辐射量的标准差(σ_λ)。具体来说, 两点校准方程可以写为:

$$R_{j,i,\lambda} = \overline{R_{c,\lambda}} + \frac{c_{j,i,\lambda} - \overline{c_{c,\lambda}}}{\overline{c_{w,\lambda}} - \overline{c_{c,\lambda}}} (\overline{R_{w,\lambda}} - \overline{R_{c,\lambda}}) \quad (4)$$

其中 $R_{c,\lambda}$ 和 $R_{w,\lambda}$ 分别表示波长为 λ 的对应于宇宙背景温度和黑体温度 T_w 的辐射量。 $c_{w,\lambda}$ 表示黑体计数值, $c_{c,\lambda}$ 代表宇宙背景(冷空)计数值, $c_{j,i,\lambda}$ 是地球场景计数值。上划线表示相应量的多根扫描线的平均值。利用公式(4), 我们可以得到:

收稿日期: 2011年10月10日

作者: 邹晓蕾, Email: xzou@fsu.edu

$$\sigma_{\lambda} = \frac{\overline{R_{w,\lambda}} - \overline{R_{c,\lambda}}}{\overline{c_{w,\lambda}} - \overline{c_{c,\lambda}}} \sigma_{c,\lambda} \quad (5)$$

$NEDT_{\lambda}$ 被定义成黑体在波长 λ 上发射辐射强度为 σ_{λ} 的辐射量所必须具有的温度。换句话说, $NEDT_{\lambda}$ 就是对应于辐射强度为 σ_{λ} 的亮温, 其值的大小可以用下面的普朗克方程^[3]计算所得:

$$\sigma_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/(\kappa_B \lambda NEDT_{\lambda})} - 1)} \quad (6)$$

其中 $c=2.998 \times 10^8$ 是光速; $h=6.626 \times 10^{-34}$ (单位: $J \cdot s$) 是普朗克常数; $\kappa_B=1.381 \times 10^{-23}$ (单位: $J \cdot K^{-1}$) 是波尔兹曼常数。

$NEDT_{\lambda}$ 的大小是由该卫星仪器发射前的测试数据决定的。从理论上讲, $NEDT$ 会随着观测场景的温度变化而变化, 随波长的变化而变化。当给出的不同通

道的卫星资料的 $NEDT$ 值相同时, 如NOAA极轨卫星携带的微波温度探测仪 (MSU, Microwave Sounding Unit), 表明各个卫星通道间的 $NEDT$ 值差异很小。

对用户来说, 观测精度的重要性怎么强调都不为过分。Tarantola^[4]在他的《资料反演理论》一书中写道: “理想情况下, 仪器供应商应该提供经过详细统计分析得到的仪器误差 (如果他不那样做, 我们不应该付费)。” 然而, 当前存在的问题是资料提供者可能会提供免费数据, 而用户在使用该数据的时候并不关注观测误差, 或者用户愿意付费得到并没有提供资料的统计误差的数据。随着卫星观测技术的迅速发展, 从事数值预报和气候研究的科研和业务人员在应用卫星资料时要特别重视所用资料的观测精度。

Serial of Applications of Satellite Observations

Satellite Measurement Precision Parameter “NEDT”

Zou Xiaolei^{1,2}

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

2 Center of Data Assimilation for Research and Application, Nanjing University of Information and Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Numerical forecasts of weather and climate changes depend on the availability of highly accurate satellite observations and the effectiveness of assimilation of these observations into numerical weather prediction (NWP) and climate prediction models. Measurement precision is a key parameter associated with observations and their applications in NWP and climate studies.

Assuming that an Earth view was independently measured N times at the wavelength λ and the measured values are denoted as $\{y_{i,\lambda}^{obs}, i=1, 2, \dots, N\}$, the measurement precision (σ_{λ}) is defined as the standard deviation of sampled values, i.e.,

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_{i,\lambda}^{obs} - \overline{y_{\lambda}^{obs}})^2} \quad (1)$$

where $\overline{y_{\lambda}^{obs}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{i,\lambda}^{obs}$ is the mean.

The values of measurement precision for different channels are required input for satellite data assimilation. For example, in a variational satellite data assimilation system, the minimum solution (\mathbf{x}^{ana}) of the following cost function is sought:

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2} (H(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^{obs})^T (\mathbf{O} + \mathbf{F})^{-1} (H(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^{obs}) \quad (2)$$

where \mathbf{x}_b is the background state variable vector; \mathbf{B} is the background error covariance matrix; \mathbf{y}^{obs} includes satellite observations from various channels; \mathbf{O} is the observation error covariance matrix with the measurement precisions σ_{λ}^2 as its diagonal elements; $H(\mathbf{x})$ represents a forward radiative transfer model (RTM) which calculates the radiance at the top of the atmosphere for a given set of input parameters which include the atmospheric state variables \mathbf{x} ; and \mathbf{F} is the RTM error covariance matrix.

The minimum solution \mathbf{x}^{ana} in (2) is obtained through an iterative procedure^[1] and satisfies the following inequality:

$$J(\mathbf{x}^{ana}) \leq J(\mathbf{x}), \quad \forall \mathbf{x} \text{ in the neighborhood of } \mathbf{x}_b. \quad (3)$$

Therefore, the accurate quantification of measurement precision directly affects the accuracy of the analysis (\mathbf{x}^{ana}).

The measurement precision of any satellite instrument is often provided by the so-called “NEDT”, which stands for Noise Equivalent Delta Temperature. For example, the Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) on the NOAA series of polar-

orbiting environmental satellites (POES) provides 15-channels radiance measurements. AMSU-A1 module uses two antenna-radiometer systems (A1-1 and A1-2) and provides twelve channels in the 50 to 60GHz oxygen band for profiling the atmospheric temperature information from the Earth's surface to about 42km (or 2hPa), three channels at 23.8GHz, 31.4GHz and 89.5GHz for characterizing the surface and atmospheric features such as surface emissivity, atmospheric cloud and water vapor. When NOAA AMSU-A radiance data is delivered to users, a set of channel-dependent $NEDT$ values is also provided to users (see Table 1^[2]). Then what is $NEDT$? How is the value of $NEDT$ determined?

Table 1 Specified $NEDT$ of AMSU-A

| Channel | 1-2 | 3 | 4-9 | 10-11 | 12 | 13 | 14 |
|------------|------|------|------|-------|------|------|------|
| $NEDT$ (K) | 0.30 | 0.40 | 0.25 | 0.40 | 0.60 | 1.20 | 0.50 |

In fact, $NEDT$ describes the precision of measured radiances by satellite instruments. Its value is determined as follows: First, at the end of each scan line, a Platinum Resistant Temperature (PRT) thermometer measures a temperature of calibration target (e.g. blackbody) and the satellite antenna simultaneously records a raw radiometric count at a specified wavelength λ from the measuring target or simply called field-of-view (FOV) count, $C_{j,i,\lambda}^{raw}$, where the subscript i represents the i^{th} scan line, and the subscript j represents the j^{th} swath. In each orbit, satellite antenna scans through the FOV target many times, say a total of N scan lines (i.e., $C_{j,i,\lambda}^{raw}$, $i=1, 2, \dots, N$). Typically, the FOV target counts over every five scan lines are averaged to obtain a stable (smooth) count $c_{j,i,\lambda} = \sum_{k=5 \times (i-1)+1}^{5(i-1)+5} C_{j,k,\lambda}^{raw}$ ($i=1, 2, \dots, N/5$). The standard deviation of the count sample $\{c_{j,i,\lambda}\}$, $\sigma_{c,\lambda}$, is then calculated (the subscript "j" is omitted in $\sigma_{c,\lambda}$ for simplicity). Using a two-point calibration equation, the standard deviation of count ($\sigma_{c,\lambda}$) is then converted into the standard deviation of satellite-measured radiance (σ_λ). Specifically, the two-point calibration equation can be written as

$$R_{j,i,\lambda} = \overline{R_{c,\lambda}} + \frac{c_{j,i,\lambda} - \overline{c_{c,\lambda}}}{c_{w,\lambda} - \overline{c_{c,\lambda}}} (\overline{R_{w,\lambda}} - \overline{R_{c,\lambda}}) \quad (4)$$

where $R_{c,\lambda}$ is the radiance at wavelength λ corresponding to cosmic background temperature, $R_{w,\lambda}$ is the radiance at wavelength λ corresponding to the blackbody target of temperature T_w , $c_{w,\lambda}$ is the blackbody warm count, $c_{c,\lambda}$ is the cosmic background count, $c_{j,i,\lambda}$ is the earth scene count, and the over-bar represents average of the

corresponding variable over scan lines on which the standard deviation is being calculated. Based on (4), one obtains

$$\sigma_\lambda = \frac{\overline{R_{w,\lambda}} - \overline{R_{c,\lambda}}}{c_{w,\lambda} - \overline{c_{c,\lambda}}} \sigma_{c,\lambda} \quad (5)$$

$NEDT_\lambda$ is defined as the temperature at which a blackbody in thermal equilibrium with its surroundings would have to emit at the intensity of radiation σ_λ at wavelength λ . In other words, $NEDT_\lambda$ is the brightness temperature corresponding to radiance σ_λ and its value can finally be derived using Planck's function^[3]:

$$\sigma_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/(\kappa_B \lambda NEDT_\lambda)} - 1)} \quad (6)$$

where $c=2.998 \times 10^8$ (unit: $m \cdot s^{-1}$) is the speed of light, $h=6.626 \times 10^{-34}$ (unit: $J \cdot s$) is Plank's constant, and $\kappa_B=1.381 \times 10^{-23}$ (unit: $J \cdot K^{-1}$) is Boltzmann's constant.

The value of $NEDT_\lambda$ for each satellite instrument is determined based on the data from the prelaunch tests for that instrument. Theoretically speaking, $NEDT$ would vary with the temperature of the scene being observed and would be different for different channels. When a single value of $NEDT$ is provided, such as Microwave Sounding Unit (MSU) on early NOAA polar-orbiting satellites, it means that such differences are rather small.

The importance of obtaining measurement precision for data users can never be emphasized enough. Tarantola^[4] wrote in his book the following: "Ideally, the supplier of the apparatus should provide a statistical analysis of the errors of the instrument (if he does not, we should not pay for it!)." However, the data suppliers may deliver free data, the users may use the data with no concern of its errors, or the users are willing to pay for the data that do not come with error statistics. With the rapid advances in satellite observations, it is hoped that all data users be concerned with data errors and have a quantitative knowledge of measurement precision.

参考文献 / Reference

- [1] Zou X, Navon I M, Berger M, Phua P K H, Schlick T, LeDimet F X. Numerical experience with limited-memory quasi-Newton and truncated-Newton methods. *SIAM Journal on Optimization*, 1993, 3: 582-608.
- [2] Mo T. Calibration of the advanced microwave sounding unit-A radiometers for NOAA-L and NOAA-M. NOAA Technical Report NESDIS, 1999, 92: 53.
- [3] Petty G W. A First Course in Atmospheric Radiation. Sundong Publishing, Madison, Wisconsin. 2004: 445.
- [4] Tarantola A. Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation. Elsevier. 1987: 613.

一次西南低涡诱发川南特大暴雨的综合诊断

陶丽 李国平

(成都信息工程学院大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225)

摘要: 利用NCEP/NCAR $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点再分析资料, 对2007年7月8—10日发生在川南地区的西南低涡暴雨做了一次较为全面的诊断分析, 结果表明: (1) 500hPa高度场上小槽与700hPa西南低涡缓慢东移; 流场上有低层辐合高层辐散的结构; 垂直速度场上维持有较强烈的上升运动; 这些都为暴雨的发展和维持提供了有利的条件。(2) 对流层低层假相当位温随高度降低, 有不稳定能量的存在, 易于触发暴雨。(3) 湿位涡分析得出, MPV1垂直结构呈正负值叠加的配置是暴雨发生发展的有利形势, 强降水落区基本位于MPV1正负值交界的等值线密集带; MPV2的增大可使对流运动和降水加强。

关键词: 西南低涡, 暴雨, 诊断, 湿位涡

Diagnostic Analysis of a Heavy Rainfall in Southern Sichuan of China Induced by Southwest Vortex

Tao Li, Li Guoping

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology / The Key Laboratory of Plateau Atmosphere & Environment of Sichuan Province, Chengdu 610225)

Abstract: Using NCEP data of $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ with 6-hour interval, the evolution of Southwest Vortex (SW) causing heavy rainfall in Southern Sichuan of China during 8-10 July 2007 is comprehensive diagnosis. The results indicate that: (1) On height field, there is a small groove on 500hPa, and 700hPa southwest vortex moving eastward slowly; on flow field; there is a structure of convergence on the low level and divergence on the upper level; on vertical velocity field, there maintains a relatively strong upward motion, they provide a favorable circulation background for the development and maintenance of heavy rainfall. (2) On the lower troposphere, the pseudo-equivalent temperature decreases with height. The existence of an unstable energy can easily trigger heavy rainfall. (3) Moist potential vorticity analysis gives a superposition of the vertical structure of the configuration, both positive and negative, to provide a favorable situation in the development of heavy rainfall. Strong precipitation areas are basically located in the dense band contour of the positive and negative junction of MPV1; the increase of MPV2 is conducive to the intensification of convection and rain.

Key words: southwest vortex, heavy rainfall, diagnosis, moist potential vorticity

1 引言

西南低涡产生于我国的西南地区, 它是一种对流层低层的中尺度涡旋系统, 多见于700hPa或850hPa上。地面气压场有时但不一定每次过程都出现闭合中心, 其水平特征尺度一般为200~500km^[1, 2]。已有的研究表明^[1, 3], 西南低涡一年四季均有发生, 但在夏季它是我国西南地区引发暴雨的重要天气系统之一。当它滞留原地时会引发川渝暴雨, 而发展东移则可能会引起我国东部地区较大范围的降水。大气中的气旋性

涡旋, 诸如台风、季风低压、温带气旋、梅雨锋上的中尺度低压(扰动)、东北低涡等常与降水天气甚至暴雨有密切的关系。对于这些低值系统, 已有不少研究^[1-7], 但是对于西南低涡的研究尚有待深入。

2007年7月8—10日四川盆地南部发生了一次特大暴雨天气过程(以下简称“07-7-9”川南特大暴雨), 特大暴雨主要位于四川盆地南部(28.84—29.45°N, 105.05—105.40°E)的范围内。对此次过程, 文献[8]从暴雨中尺度散度以及数值预报方面进行过讨论。本文针对“07-7-9”川南特大暴雨天气过程, 分别利用动力学物理量、热力学物理量、水汽物理量以及动力和热力综合物理量进行一次较为全面的诊断分析, 期望得出的一些结论能为今后低涡暴雨的预报提供参考。

收稿日期: 2011年4月21日 修回日期: 2011年9月14日

第一作者: 陶丽(1987—), Email:taoli8501416@126.com

通讯作者: 李国平, Email:leegp@126.com

资助信息: 国家自然科学基金(40875023); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2009LASW-A01)

2 资料

本文所用降水资料为Micaps提供的6小时和24小时降水资料，物理量计算所用资料取自NCEP/NCAR提供的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 一天4次(00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC)再分析资料，垂直分层至100hPa的21层网格点数据。

3 “07-7-9”川南特大暴雨概况

2007年7月8—10日四川盆地南部发生了一次特大暴雨过程，有44个站的降雨量超过100mm，有14个站的降雨量超过250mm。特大暴雨中心位于四川省内江市的隆昌县。依据Micaps 24小时和6小时的累积降水资料对此次暴雨进行降水量统计(见表1)，从24小时累积降水量可看出，7月10日08时(北京时，下同)，隆昌县(29.33°N, 105.30°E)累计最大降水量达到326mm。7月9日20时，隆昌县(29.33°N, 105.39°E)6小时累积降水量达到123mm。泸州市(28.77°N, 105.39°E)、豪江县(29.03°N, 106.63°E)24小时和6小时的累计降水量分别达到107mm和118mm。从降水量看，此次降水发生时段主要集中在7月9日08时—10日08时。

表1 2007年7月8—10日的暴雨统计

| 暴雨时间 | 24h最大降水量(mm)/位置 | 6h最大降水量(mm)/位置 |
|-------|----------------------------|----------------------------|
| 7月8日 | 64/遂宁市(30.53°N, 105.58°E) | 96/巴中市(31.86°N, 106.74°E) |
| 7月9日 | 107/泸州市(28.77°N, 105.39°E) | 123/隆昌县(29.33°N, 105.39°E) |
| 7月10日 | 326/隆昌县(29.33°N, 105.30°E) | 118/豪江县(29.03°N, 106.63°E) |

4 环流分析

4.1 高度场分析

大暴雨发生前，7月8日14时(北京时，下同)500hPa(图1a)欧亚中高纬地区为“两槽一脊”环流形势，两长波槽分别位于我国巴尔喀什湖以南和我国中东部地区，高压脊位于甘肃、青海一带。位于我国中东部地区的大槽可延伸至四川东南部，川南地区大部处于槽前的西南气流中。9日02时(图1b)，随着西风气流，位于巴尔喀什湖的槽东移，强度不变，位于东北部的槽北抬，而脊有所加强。此时在四川北部地区有闭合的低压生成，暴雨中心处于低压前部的西南气流中，有利于气旋性环流的发展。10日(图略)川南地区已处于较为平直的风西气流中，降水强度有所减弱。

8日14时(图1c)，700hPa上西南涡在四川与青海交界地区活动，低涡中心位于四川西北部，中心位势达到3040gpm。至8日20时(图1d)低涡范围扩大，中心强度维持不变。至9日08时(图略)，西南低涡

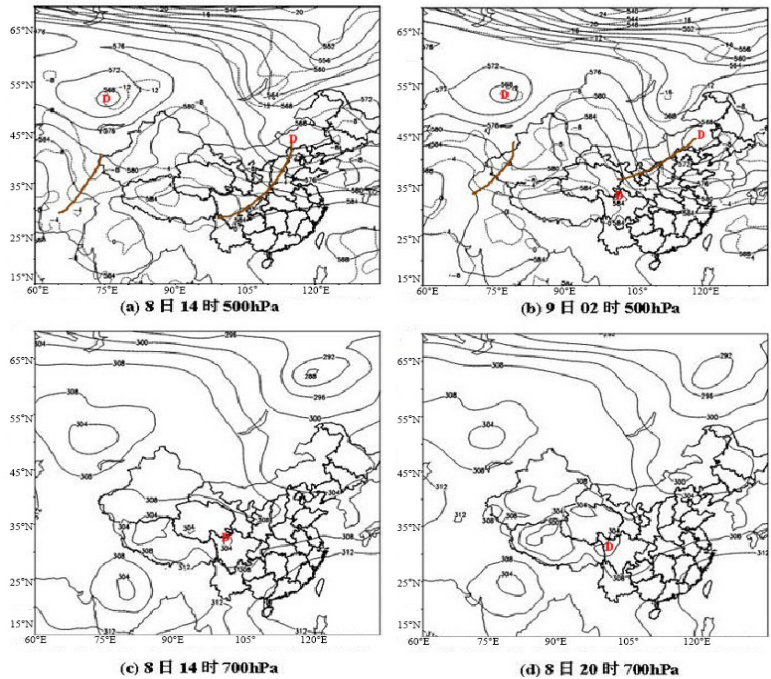


图1 2007年7月8日和9日500hPa(a,b)和700hPa(c,d)高度场分布(单位:gpm)

向东南移动，暴雨中心位于低涡右前部的西南气流中，受其影响出现了自西向东的强降水。同时，西南涡沿500hPa引导气流(西南气流)缓慢向东北方向移动，西南低涡在9日20时(图略)移至此次暴雨中心的隆昌县上空，10日02时(图略)移到重庆一带，但其强度变化不大。

4.2 流场分析

由前面的降水分析可知7月8—10日的主要降水时段发生在9日08时—10日08时，因此针对9日08时的流场进行主要分析，可以看到9日08时从高层300hPa至低层850hPa表现出一致的上升气流。850hPa上(图2a)，有明显的气流辐合带，暴雨中心的隆昌县(29.33°N, 105.30°E)基本处于气流辐合带中心，其东南侧西南气流显著发展。700hPa(图2b)重庆至陕西中部出现西南急流，四川东南部呈现气旋性弯曲，暴雨中心即在此弯曲的拐点处。500hPa(图2c)重庆西部出现反气旋弯曲，300hPa(图2d)在川南地区出现反气旋中心和较强的辐散气流，其右前侧有较强的负涡度。随着低涡的加强东移和急流的出现，雨区降水显著加强，随之出现此次过程的最强降水。综合850hPa至300hPa的流场分析可看出，低层气流辐合，高层气流辐散，有利于垂直运动发展，这是暴雨发生的必备条件。

5 物理量诊断

5.1 水汽通量及水汽通量散度

充足的水汽是暴雨形成的最基本条件。水汽通量矢量(qV)是表示水汽输送强度的物理量，而水汽

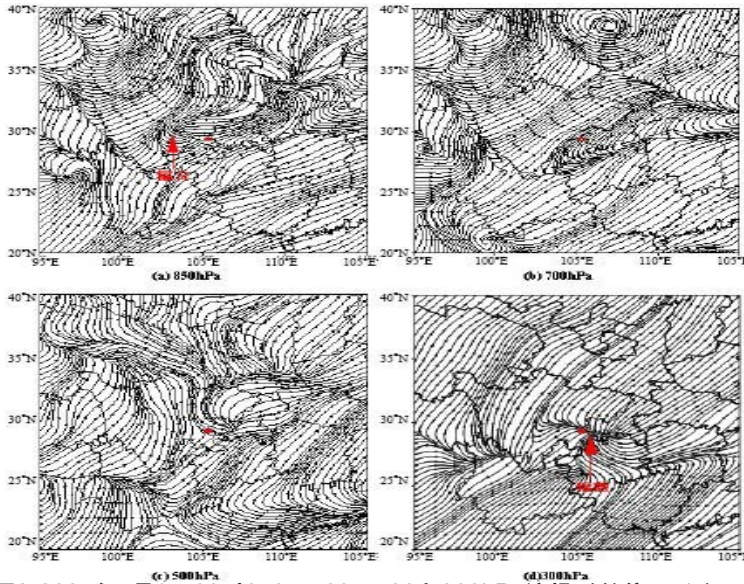


图2 2007年7月9日08时850, 700, 500和300hPa流场(单位: m/s), 圆点为标注的特大暴雨中心(29.3°N, 105.3°E) 通量散度则是水汽集中程度的物理量^[9, 10], 单位体积(底面积1cm², 高1hPa)的水汽通量散度计算公式为

$$A = \nabla \cdot \left(\frac{1}{g} \mathbf{V} q \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{g} u q \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{g} v q \right) \quad (1)$$

当 $A > 0$, 则水汽通量是辐散的(水汽因输送出去而减少); 若 $A < 0$, 水汽通量是辐合的(水汽因输送进来而增加)。图3给出9日08时和14时850hPa水汽通量矢量和水汽通量散度的分布图。

从9日08时850hPa水汽通量矢量和水汽通量散度图(图3a)可以看出, 暴雨发生前, 四川西部地区一直维持一条显著的水汽通量输送带, 强劲的西南风将孟加拉湾的水汽输送到四川盆地西部一带(32°—34°N, 100°—103°E); 另外, 还有来自南海的水汽输送到四川盆地南部和重庆一带(28°—30°N, 105°—110°E)。雨区上空有水汽通量散度负值中心, 中心负

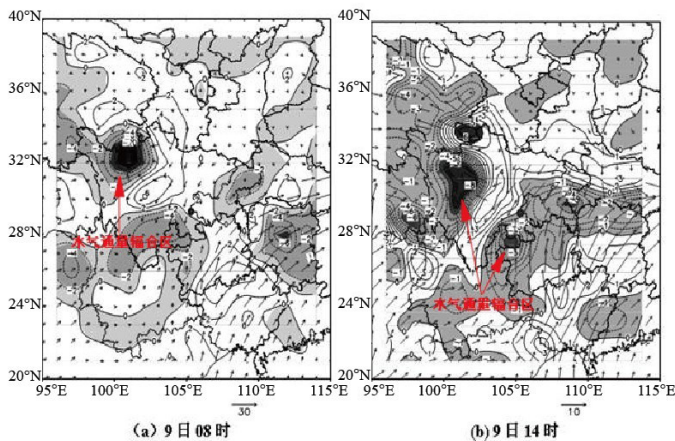


图3 2007年7月9日08时(a)和14时(b)850hPa水汽通量矢量及水汽通量散度(阴影区为水汽通量散度的负大值区, 单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 箭头为水汽通量矢量, 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 圆点为特大暴雨中心)

值为 $-4 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明该地区有水汽通量辐合, 水汽在暴雨中心上空堆积, 为暴雨的发生孕育了良好的水汽条件。

暴雨发生过程中, 9日14时(图3b)水汽通量输送明显加强, 两支不同方向的水汽源向暴雨区输送了充足的水汽。两个水汽通量散度的负值中心强度增大, 一个位于四川盆地西北部(31°N, 102°E)强度为 $-8 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 另一个位于四川盆地南部(28°N, 105°E)强度为 $-5 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。水汽辐合区也明显扩大, 川南暴雨中心的隆昌县就处于水汽通量的辐合区内。10日08时(图略), 随着暴雨区上空水汽通量辐合区的消失, 暴雨明显减弱。这说明暴雨的形成、加强与减弱和暴雨上空水汽通量辐合区的演变关系密切。

5.2 假相当位温

假相当位温(θ_{se})是表征大气温湿特征的物理量, 其值大小反映了显热能和潜热能的高低, 其高值中心对应大气能量的积累。 θ_{se} 随高度的变化还反映大气层结稳定度状况^[9, 11], 当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) > 0$, 对流不稳定; 当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) < 0$, 对流稳定。图4给出这次过程7月9日14时850hPa的 θ_{se} 场和9日08时沿105.3°E的 θ_{se} 垂直剖面图。

从850hPa θ_{se} 场(图4左)可见, 与西南低涡东南侧西南暖湿气流相对应, 有一个 θ_{se} 大值(高能)中心位于四川省西部以及青海甘肃交界一带($\theta_{se} \geq 380\text{K}$), 与东北低压后部偏北气流相对应, 而在河南东部存在一个低能中心($\theta_{se} \leq 340\text{K}$)。这两支不同能量性质的气流(即高能舌与低能中心)之间, 存在一条南北向 θ_{se} 能量锋区, 暴雨中心的隆昌县位于两层能量锋区靠近低能一侧。700hPa的 θ_{se} 场(图略)同样可见能量锋区, 但 θ_{se} 高能中心最大值由395K减弱为375K, θ_{se} 随高度减小, 说明暴雨中心有不稳定能量存在, 只要有冷空气入侵, 极易释放不稳定能量, 有利于造成强降水。

分析7月9日08时(图4右)和14时(图略)沿105.3°E的 θ_{se} 垂直剖面图发现, 可以看到28°—29°N对流层低层 θ_{se} 随高度降低, 即 $(\partial \theta_{se} / \partial p) > 0$, 反映了该处大气处于不稳定, 而中层为中性层结, 这种大气层结有利于产生强对流性降水。并且14时假相当位温梯度较08时的梯度有所增强, 大值中心也由375K增大为390K。表明此次暴雨发生中心的隆昌

县(29.3°N, 105.4°E)的假相当位温随高度的变化达到最大值, 极易释放不稳定能量。但400hPa以上 θ_{se} 随高度升高, 即大气高层处于稳定状态。

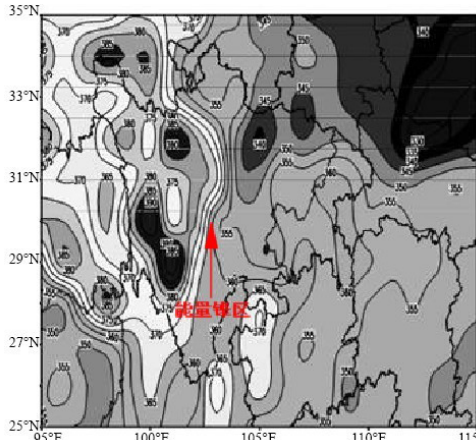
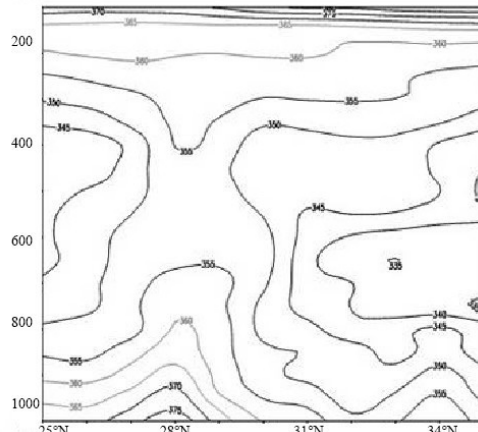


图4 2007年7月9日20时850hPa(左)和9日08时沿105.3°E的 θ_{se} 垂直剖面图(右)(单位: K)



5.3 湿位涡分析

当忽略垂直速度的水平变化时, p 坐标下的湿位涡为^[12, 13]:

$$MPV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

一般, 湿位涡可分为湿正压项MPV1和湿斜压项MPV2, 即

$$MPV1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \quad (3)$$

$$MPV2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

其中MPV1是湿位涡的第一分量(垂直分量), 表示惯性稳定度($\zeta+f$)和对流稳定度 $-g \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ 的共同作用, 其值取决于空气块绝对涡度的垂直分量与相当位温的垂直梯度的乘积, 代表湿位涡的正压部分。MPV2是湿位涡的第二分量(水平分量), 它的数值由风的垂直切变(即水平涡度)和相当位温的水平梯度决定, 包含了湿斜压性($\nabla_p \theta_{se}$)和水平风垂直切变的贡献, 代表湿位涡的斜压部分。一般情况下, 绝对涡度为正值, 当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) < 0$ (对流稳定)时, 湿正压项 $MPV1 > 0$ 。故只有湿斜压项 $MPV2 < 0$, 垂直涡度才能得到较大增长, $MPV2$ 负值越大, 表明大气斜压性越强; 而当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) > 0$ (对流不稳定)时, $MPV1 < 0$, 只有 $MPV2 > 0$, 垂直涡度才能得到较大增长。表示湿位涡的单位为PVU ($1PVU = 10^{-6} m^2 \cdot K \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$)。

5.3.1 850hPa上的正压湿位涡和斜压湿位涡

下面通过分析850hPa MPV1, MPV2的分布来考察暴雨区的不稳定状况。从850hPa MPV1分布图

(图5a)可见, 9日14时, 四川省西北部和湖北、河南交界处有两个MPV1负大值中心, 强度分别为 $-0.8PVU$ 和 $-1.0PVU$ 。四川省与重庆市其他大部地区也均为MPV1负值区, 降水中心的隆昌县正好位于MPV1正负值交界的等值线密集带。随后9日20时(图5b), 两个MPV1负值区范围逐渐扩大, 四川西部地区的负值中心的强度加强, 达到 $-0.9PVU$; 川南地区的MPV1负值区范围也有所扩大, 梯度也加强, 强降水落区基本位于MPV1正负值交界的等

值线密集带, MPV1负值中心有较弱的降水。

从850hPa MPV2的分布(图5c)可见, 9日14时, 850hPa暴雨区基本处于弱的MPV2正值区, 暴雨中心强度在 $0 \sim 0.1PVU$ 之间。到9日20时(图5d), MPV2正值范围扩大, 强度增强, 中心强度达到 $0.8PVU$, 负值范围相对较小, 强度为 $-0.5PVU$ 。正负值分布集中, 梯度较大。川南地区基本处于MPV2正值区内, 暴雨中心的隆昌县则位于零线附近, 梯度大, 降水强。至10日06时(图略)川南地区开始处于MPV2的负值区, 此时降水减弱, 暴雨趋于结束。因此, 湿斜压位涡MPV2的增大, 可导致垂直涡度的发展, 非常有利于对流运动和降水的加强。当MPV2正值区减弱或移出, 意味着暴雨区的暖湿气流减弱, 伴随对流不稳定区的移出, 暴雨过程趋于结束。

5.3.2 正压湿位涡的剖面分析

沿29°N做MPV1的垂直—经向剖面图。暴雨发生前(图6a), 在105°E附近可以看到900~1000 hPa高度上有MPV1的负值区($MPV1 < 0$), 中心强度达到 $-0.6PVU$, 为强对流不稳定区。900hPa向上延伸, 又转为MPV1正值区($MPV1 > 0$), 则MPV1随高度的发布呈现正负叠加排列。在300~400hPa处有正值中心, 强度为 $0.1PVU$, 表明对流层高层为对流稳定区。暴雨发生时(图6b), MPV1中心值增大, 对流层低层负值中心增大为 $-0.7PVU$, 正值中心在700~800hPa, 增大为 $0.2PVU$, 范围也有所扩大。垂直结构上, MPV1呈现高低层正负值叠加的配置, 是暴雨发生发展的有利形势。这种对流层高层正值区对应低层负大值中心的结构有利于低层不稳定能量的释放, 使对流不稳定迅速发展。则高层高值正位涡的下

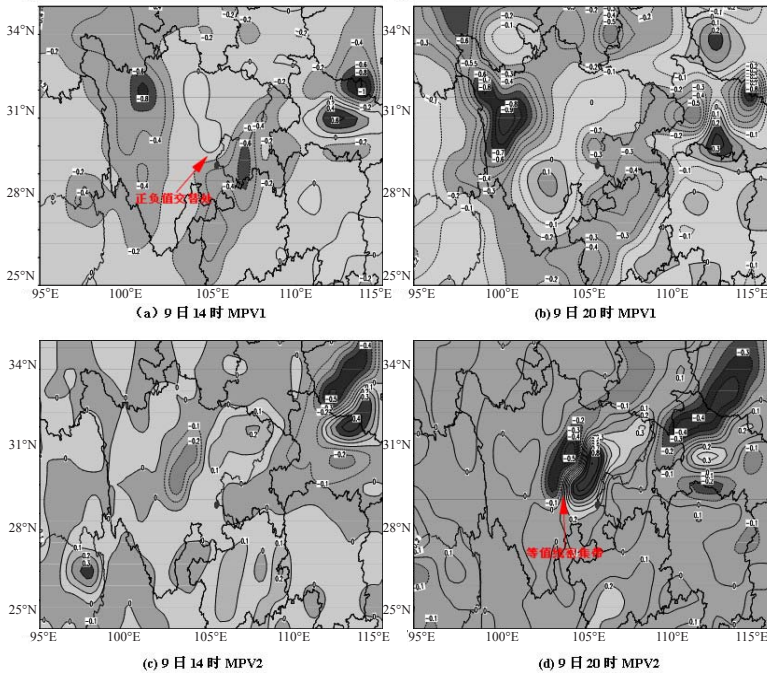


图5 7月9日14时和20时850hPa上MPV1和MPV2的分布(单位: PVU, 圆点为标注的特大暴雨中心)

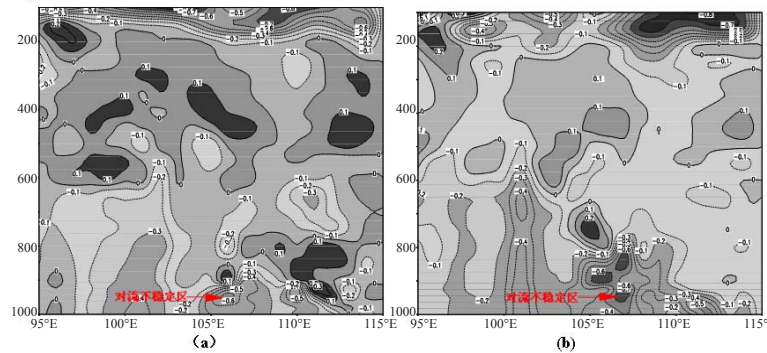


图6 MPV1(单位: PVU)沿29°N的垂直—纬向剖面图 (a) 9日08时; (b) 9日14时

传有利于低层气旋性涡度的发展, 低层的负位涡区也有利于对流加强, 两者的结合有利于暴雨产生。

6 结论

通过对2007年7月8—10日发生在川南地区由西南低涡诱发的特大暴雨进行的综合诊断分析, 得到以下几点结论:

(1) 这次暴雨过程是在有利的局地环流背景下发生的。高度场上, 500hPa上川南地区位于槽前的西南气流中, 700hPa西南低涡缓慢东移。流场上, 暴雨区发生前, 从300hPa至低层850hPa表现出一致的上升

气流, 低层气流辐合, 高层气流辐散, 十分有利于垂直运动发展。暴雨发生期间, 较强的上升运动为暴雨的发生与维持提供了动力条件。

(2) 暴雨过程中, 四川西部地区一直维持一条显著的水汽通量输送带, 强劲的西南风将孟加拉湾的水汽不断输送到四川西部, 同时对流层低层水汽通量辐合较强, 水汽的积聚为暴雨的发生、维持提供基本条件。

(3) 对流层低层 θ_{sc} 随高度减小, 反映了暴雨期间低层大气的的不稳定性, 而中层大气处于中性, 这种大气层结有利于产生对流性强降水。

(4) 这次特大暴雨过程的湿位涡分析表明, MPV1高低层正负值的配置是暴雨发生、发展的有利形势, 强降水落区基本位于MPV1正负值交界的等值线密集带; MPV2的增大, 可导致垂直涡度的发展, 非常有利于激发对流运动, 加大降水强度。

参考文献

- [1] 卢敬华. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社, 1986: 1-270.
- [2] 赵思雄. 西南低涡结构的个例分析. 青藏高原气象会议论文集, 1977: 296-306.
- [3] 陶诗言等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980: 225-230.
- [4] 陶诗言, 赵思雄, 周晓平, 等. 天气学和天气预报的研究进展. 大气科学, 2003, 27(4): 451-467.
- [5] Matsumoto S, Ninomiya K, Yoshizumi S. Characteristic features of "Baiu" front associated with heavy rainfall. Meteor Soc Japan, 1971, 49: 409-429.
- [6] Pettersen S, Sembye S J. On the development of extra tropical cyclones. Quart Roy Meteor Soc, 1971, 97: 457-482.
- [7] 陈志明, 闵文彬, 崔春光. 西南低涡研究的一些新进展. 高原气象, 2004, 24(增刊): 1-5.
- [8] 顾清源, 周春花, 青泉, 等. 一次西南低涡特大暴雨过程的中尺度特征分析. 气象, 2008, 40(4): 39-47.
- [9] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 2000: 369-372.
- [10] 于波, 林永辉. 引发川东暴雨的西南低涡演变特征个例分析. 大气科学, 2008, 32(1): 141-154.
- [11] 郑京华, 董光英, 梁涛, 等. 一次西南低涡东移诱发的罕见暴雨诊断分析. 暴雨灾害, 2009, 28(3): 229-234.
- [12] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404.
- [13] 李国平, 刘行军. 西南低涡暴雨的湿位涡诊断分析. 应用气象学报, 1994, 5(3): 354-360.

中国气象卫星数据共享服务现状和未来发展

方萌

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 分析了国家卫星气象中心在为全国气象系统及气象系统以外各类用户, 提供气象卫星数据资料和产品分发共享服务方面的发展过程和当前服务现状, 及其所采用的相关技术手段和所存在的问题。并在此基础上提出: 从分析各类用户的不同需求入手, 在提高卫星气象产品品质上下功夫, 采用适当的先进技术, 向不同用户提供有质量的气象卫星数据共享服务。

关键词: 气象卫星, 数据分发, 共享服务

The Actuality and Prospect of Meteorological Satellite Data Sharing Service in China

Fang Meng

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

Abstract: The article analyzes the development, actuality and problems of meteorological satellite data sharing service in China. Then, it tries to find out the approaches to solve the problems. That is to say, priority is given to the improvement of the quality of satellite products and the use of different technical ways to disseminate satellite data and products which come from different kinds of users with various demands.

Key words: meteorological satellite, data distribution, sharing service

1 引言

自1988年中国发射第一颗极轨气象卫星以来, 国家卫星气象中心先后采用多种技术手段, 提供气象卫星数据共享服务^[1], 如: 建设中小规模气象卫星用户利用站, 直接接收气象卫星发送的图像资料; 每天固定时间通过中央电视台电视节目播发卫星图像和产品为台站预报人员提供卫星遥感信息; 通过9210气象信息传输系统分发等。但这些服务的效果还不能尽如人意。

目前气象卫星正处于快速发展时期, 由气象卫星遥感得到的原始信息及其加工产品日传输量已到达非汛期约45GB, 汛期约90GB^[2]。本文的目的就是通过分析梳理气象卫星数据、产品的分发共享服务现状, 发现其中存在的问题, 探索更好的卫星数据共享服务方式^[3]。

本文所叙述的国家卫星气象中心对气象卫星资料的接收和存档数据来自该中心的业务存档系统; 气象数据广播系统分布资料源自中国气象局有关职能司的统计资料和华云星地通公司的有关数据; 数据共享服务信息主要来自用户调研, 下发用户使用调查表的汇总和统计结果; 网站共享服务信息来自网站数据统计。

2 气象卫星资料共享服务渠道及现状

2.1 现有气象卫星资源

国家卫星气象中心早在1978年就开始接收国外(主要是美国、欧洲和日本)气象卫星数据资料, 并于2005年建成了较为完善的数据共享服务系统。目前, 正在业务运行的国内外气象卫星达12颗(表1), 历史存档气象卫星资料19颗(表2)。

表1 当前业务运行气象卫星资源

| 序号 | 卫星名称 | 卫星种类 | 所属国家/地区 | 开始接收时间 | 停止接收时间 |
|----|-----------|--------|---------|---------|--------|
| 1 | FY-2D | 静止气象卫星 | 中国 | 2006.12 | 至今 |
| 2 | FY-2E | 静止气象卫星 | 中国 | 2008.12 | 至今 |
| 3 | FY-3A | 极轨气象卫星 | 中国 | 2008.7 | 至今 |
| 4 | FY-1D | 极轨气象卫星 | 中国 | 2002.5 | 至今 |
| 5 | NOAA-15 | 极轨气象卫星 | 美国 | 2006.4 | 至今 |
| 6 | NOAA-16 | 极轨气象卫星 | 美国 | 2002.10 | 至今 |
| 7 | NOAA-17 | 极轨气象卫星 | 美国 | 2003.3 | 至今 |
| 8 | NOAA-18 | 极轨气象卫星 | 美国 | 2005.8 | 至今 |
| 9 | EOS/TERRA | 地球观测卫星 | 美国 | 2000.12 | 至今 |
| 10 | EOS/AQUA | 地球观测卫星 | 美国 | 2004.1 | 至今 |
| 11 | MTSAT-2 | 静止气象卫星 | 日本 | 2010.7 | 至今 |
| 12 | MSG-1 | 静止气象卫星 | 欧洲 | 2007.2 | 至今 |

通过对气象数据广播系统(原名FENGYUNCast, 现名CMACast)的接收、中小规模利用站直接接收、9210气象信息传输系统和卫星数据服务网站等多个渠道, 来自国内外的气象卫星数据资料用户都可以实时

收稿日期: 2011年6月2日; 修回日期: 2011年8月8日
 作者: 方萌(1978—), E-mail: fangmeng@cma.gov.cn

表2 历史存档气象卫星资源

| 序号 | 卫星名称 | 卫星种类 | 所属国家/地区 | 开始接收时间 | 停止接收时间 |
|----|-----------|--------|---------|---------|---------|
| 1 | FY-2A | 静止气象卫星 | 中国 | 1997.10 | 2003.3 |
| 2 | FY-2B | 静止气象卫星 | 中国 | 2000.7 | 2005.6 |
| 3 | FY-2C | 静止气象卫星 | 中国 | 2004.10 | 2009.11 |
| 4 | FY-1A | 极轨气象卫星 | 中国 | 1988.9 | 1988.10 |
| 5 | FY-1B | 极轨气象卫星 | 中国 | 1990.9 | 1991.8 |
| 6 | FY-1C | 极轨气象卫星 | 中国 | 1990.5 | 2004.7 |
| 7 | NOAA-7 | 极轨气象卫星 | 美国 | 1984.2 | 1985.2 |
| 8 | NOAA-8 | 极轨气象卫星 | 美国 | 1984.4 | 1986.11 |
| 9 | NOAA-9 | 极轨气象卫星 | 美国 | 1985.4 | 1988.11 |
| 10 | NOAA-10 | 极轨气象卫星 | 美国 | 1987.4 | 1991.12 |
| 11 | NOAA-11 | 极轨气象卫星 | 美国 | 1988.11 | 1994.9 |
| 12 | NOAA-12 | 极轨气象卫星 | 美国 | 1991.12 | 1999.3 |
| 13 | NOAA-14 | 极轨气象卫星 | 美国 | 1998.2 | 2002.5 |
| 14 | GOES-9 | 静止气象卫星 | 美国 | 2003.7 | 2005.9 |
| 15 | GMS-1/2/3 | 静止气象卫星 | 日本 | 1978.4 | 1989.10 |
| 16 | GMS-4 | 静止气象卫星 | 日本 | 1990.1 | 1995.5 |
| 17 | GMS-5 | 静止气象卫星 | 日本 | 1995.6 | 2003.5 |
| 18 | MTSAT-1R | 静止气象卫星 | 日本 | 2005.7 | 2010.7 |
| 19 | Metosat-5 | 静止气象卫星 | 欧洲 | 1999.10 | 2007.2 |

获取到表1中所列各颗卫星资料，还可以通过申请审批，由气象卫星数据服务网站获得如表2所示的数据库中存储的历史卫星资料数据。

2.2 当前数据共享服务方式

从20世纪90年代到现在，国家卫星气象中心的数据资料共享服务方式发生了很大变化，这主要取决于通信技术的发展，气象卫星遥感获取的信息量和各类用户不断增长的需求^[4]。其总的趋势是遥感信息的种类、数量成海量增加（其探测波段已覆盖了从紫外、可见光、红外到微波的整个电磁波谱，其方式也包括了主动、被动遥感两种类型）和用户需求的飞速增长，使得快速发展的通信能力总也无法满足分发遥感信息的需求。从而形成了在这一领域中，通信能力与应用需求之间的重大矛盾。尽管目前已经采用了多种途径向用户提供卫星数据共享服务，但仍不能完全满足用户日益增长的需求。

2.2.1 通过气象数据广播系统（CMACast）提供共享服务

21世纪初，随着EOS系列的第一颗卫星Terra的成功发射，星上实时广播的中分辨率成像光谱仪（MODIS）获取的高光谱成像探测资料引起了气象、农业、林业、资源和环境等诸多领域的业务和科研工作者的极大兴趣，仅在北京就建立了五套以上价格不菲的MODIS资料接收处理系统。形成了既不经济，又不合理的卫星遥感信息获取方式。在科技部和中国气象局的共同大力推动下，开始探索利用数字视

频广播技术（DVB-S），把不同地方接收到的原始卫星资料集中到国家卫星气象中心，通过DVB-S技术对外广播（其传输速率可达8.5Mbps）^[5]。全国各地的用户，只要具有接收该数字视频广播数据的能力，就可以共享全国和周边地区的MODIS资料。实践证明，采用DVB-S技术实现遥感信息共享的做法是合理、可行的。此后，作为气象卫星遥感资料分发服务的DVB-S，发展更名为FENGYUNCast，其信息传输速率为8.8Mbps。这之后，中国的FENGYUNCast与美国的GEONETCast-America和欧洲的EUMETCast共同组成全球地球观测数据共享卫星广播分发系统（GEONETCast）。目前，作为卫星遥感数据共享服务的FENGYUNCast已经被中国气象局整合升级成为具有更高性能的中国气象数据广播系统，并命名为CMACast。通过卫星数据广播，全国各地的用户不必重复建设耗资巨大的遥感卫星地面直收站，仅采用类似于卫星电视接收设备的系统就可以方便地接收到通过通信卫星转发的遥感卫星数据，CMACast的信息传输速率可达70Mbps，用户未来还可以通过其方便快捷地获取大气温度、湿度、地表温度等常规地面观测数据、探空数据和各类预报的格点场数据。CMACast的推广将对天气预报、防灾减灾、环境保护等领域产生深远影响。

CMACast自2005年开始投入国内业务运行，每日广播包括FY-1D、FY-2C、FY-2D和一些国外气象卫星在内的9颗极轨和静止卫星数据与产品，数据量高达26GB，用户涉及气象、水利、农业、林业、海洋、环境、地震、石油、民航、教育、部队等行业的130多个单位，在天气预报、气候预测、灾害监测、环境遥感和农业服务等方面产生了巨大的经济和社会效益。不仅如此，作为全球地球观测数据共享系统的一个区域系统，2006年底CMACast正式切换到C波段，卫星信号覆盖范围扩大到亚太地区，为亚太地区各国通过数字视频广播获取地球观测数据创造了条件。

目前，气象数据广播系统在国内已经得到较为广泛的推广使用，根据华云星地通公司统计数据，截至2010年12月，全国范围内共计安装部署气象广播数据接收系统203套。其中气象系统82套，其他系统121套，涉及34个省（市、自治区），此外还有10个国家部委直属机构用户（图1）。除台湾省外，全国所有省级行政单位（包括香港和澳门特别行政区）均已不同程度配备气象数据广播接收系统。其总体分布呈现中东部沿海地区多，西部相对较少的状况。其中，陕西、广西和海南三个省级行政单位仅有气象系统安装有气象数据广播接收系统；在北京、江苏、山东、四

川等省气象系统以外的其他行业普及安装数量较大；青海、西藏等经济相对落后的西部省份气象数据广播系统普及率较低。

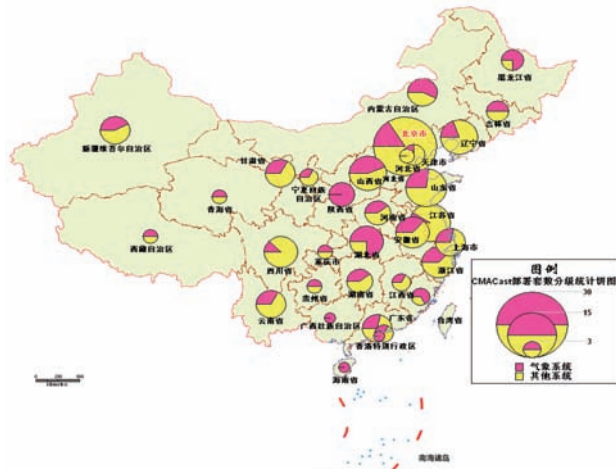


图1 全国各省CMACast安装部署数量分级统计饼状图

2.2.2 通过9210气象信息传输系统提供共享服务

9210是气象信息卫星通信传输系统的简称，其中向下分发数据的部分技术名为PCVSAT。9210是20世纪90年代初期国家批准，由中国气象局执行的重大工程建设项目，其核心是采用当时相当先进的Ku波段卫星通信技术收集各地的地面、探空等常规观测资料，分发由全球电信系统（Global Telecommunication System，简称GTS）获取的全球观测资料产品和国家气象中心生成的各种加工产品，其传输速率为2Mbps，该系统在设计时并未考虑利用其分发卫星资料原始信息和高分辨率图像^[6, 7]。因此，9210系统的通信能力和租用的通信卫星带宽均不具备分发高时间和高空间分辨率卫星遥感资料的能力。尽管9210系统是当前在气象系统内部卫星资料提供共享服务的一种重要方式，但目前通过9210下发的卫星资料产品，包含来自FY-1D，FY-2D，FY-2E和NOAA等多颗卫星的数据资料和定量、图像产品，共计约100个，却并未包含原分辨率的极轨卫星资料，更没有高时空分辨率的静止卫星数据资料。国家卫星气象中心对这些产品的分发方式是，先将其实时推送至国家气象信息中心，而后由信息中心通过9210气象信息传输系统向全国气象系统分发。9210这一服务方式从地域范围上讲，可以覆盖全国，但对于卫星资料时效性和分辨率要求很高的天气预报来讲，9210不能很好地满足气象系统各级业务用户的需求。

2.2.3 通过数据服务网站提供共享服务

依托风云卫星工程建设，国家卫星气象中心于2005年建成了较为完善的数据共享服务系统。通过气象卫星数据服务网站（<http://satellite.cma.gov.cn>），用户可以方便地浏览、检索实时和历史存档卫星数据

和产品，通过注册、审核，还可以完成数据下载工作。图2给出了近几年数据服务网在注册用户数、网络订单等多方面的情况统计。通过广泛宣传和多方面促进，近5年来该网站的注册用户数增加了两个量级以上，用户面涉及地球科学多个分支学科的科研、教学和业务单位，甚至还包括一部分国外用户。网络订单数和数据下载量均呈逐年上升趋势，并有较大幅度的增长。

2.2.4 通过中规模气象卫星资料用户利用站接收卫星资料

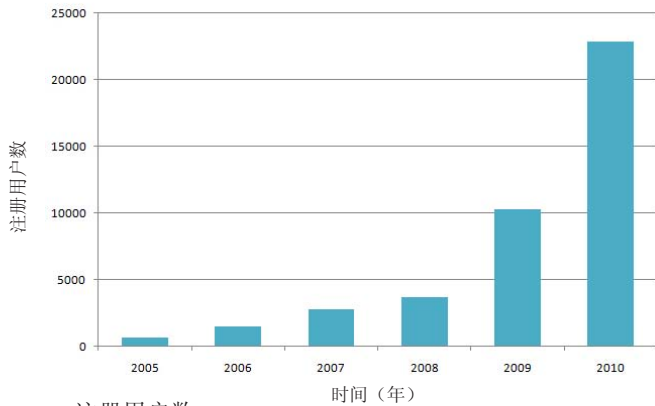
目前，我国的极轨气象卫星资料用户利用站主要接收FY-3的HRPT及MPT资料、NOAA系列及FY-1系列的AHRPT、METOP的HRPT等资料，同时兼容接收码速率在30Mbps以下的其他卫星的数据。静止气象卫星用户利用站主要接收处理中国FY-2播发的S-VISSR展宽资料和日本MTSAT卫星播发的HRIT资料。随着中国风云二号系列静止气象卫星的成功发射和稳定的业务运行，在气象行业，静止气象卫星用户利用站从省级气象部门配备到市、部分县级气象部门，在国内民航、水利、海洋预报、农林等领域也被广泛地建立和利用。

中国气象局综合观测司统计资料显示，目前全国各地各级气象部门共安装极轨气象卫星资料用户利用站37套，静止气象卫星用户利用站282套，具体分省统计见图3。此外，据华云星地通公司不完全统计，国内民航系统安装气象卫星用户利用站150余套，水利部门拥有约120套，各级人民解放军部队（空军站等）部署气象卫星用户利用站100余套。

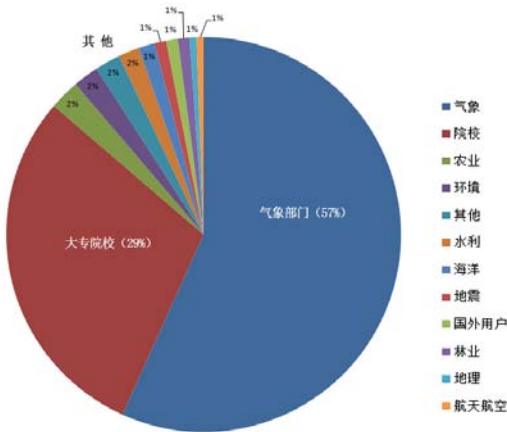
2011年4月，华云星地通公司对于全国气象系统静止气象卫星中规模利用站用户进行了调查回访。本次调查共发放《气象系统中规模利用站运行状况调查表》282份，实际回收调查表230份，其中运行正常的用户站为123家，占调查有效样本的53%，但由于设备老化等原因，作为业务系统仍存在不稳定因素，等待更新改造；运行不正常的用户站28家，其中有因设备老化等原因，已不作为业务系统设备；已停用的站点共79家，占有效样本数的34%，其中的39家用户已不打算恢复并继续使用，希望更换备件后恢复运行的用户共40家。以上调查显示，气象卫星中规模用户利用站仍是目前提供气象卫星数据资料共享服务的重要方式之一。

2.2.5 直接分发服务

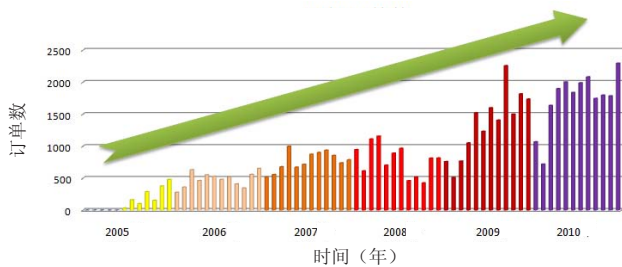
由于历史原因，目前尚有一部分对数据质量要求高、时效高且数据种类多的用户单位，采取由国家卫星气象中心将实时接收、处理的各类卫星数据和产品通过FTP方式主动推送到用户指定的服务器的方式，前



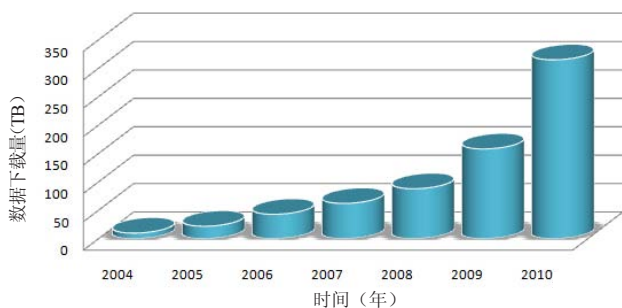
a 注册用户数



b 用户专业领域



c 网络订单数



d 数据下载量 (TB)

图2 国家卫星气象中心数据服务网站信息统计

提是这些用户必须与中国气象局网络联通。目前, 该类用户主要包括国家气象中心、北京市气象局、总参气象局等。此外, 通过国家气象信息中心气象资料共享平台, 省级气象部门可以利用宽带网下载卫星数据。

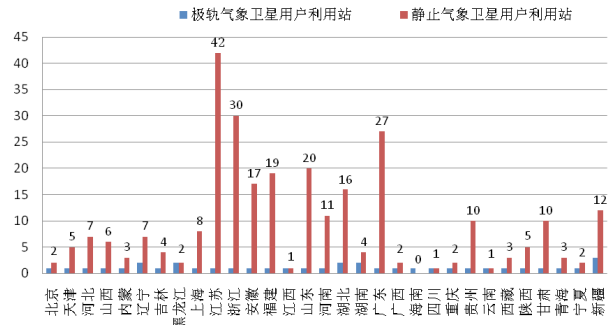


图3 全国气象部门部署气象卫星用户利用站分省统计图

3 用户需求分析和数据共享服务途径探讨

3.1 用户需求分析

气象卫星是最早成功发射、服务面最广、发展最为完善的对地观测卫星, 在美国一直将气象卫星命名为环境卫星。由于气象卫星遥感资料可用于地球科学的多个分支学科, 各学科的发展现状, 其与国计民生的关系就决定了用户对气象卫星资料需求的多样性。

3.2 实现数据共享服务的途径探讨

3.2.1 提高卫星加工产品的质量和精度

随着遥感技术的发展, 由遥感手段获取的产品种类, 时间、空间和光谱分辨率迅速提高, 其信息量呈量级增长, 作为气象卫星数据共享服务提供者的国家卫星气象中心就必然面临一个品质和精度选择的问题。

首先, 必须通过充分调研和分析, 以用户的需求为导向, 对浩如烟海的遥感信息和产品进行分类排序, 选择把预报业务急需的产品排在共享服务的最高优先级。而后, 致力于提高卫星产品的质量——没有质量就没有数量。产品的加工一定要以可靠的数学物理处理模型为依据, 推出的产品必须经过真实性检验, 并以一定时段处理结果的误差、偏差和均方根误差的统计分析为依据, 按品质优劣排序推出卫星遥感产品。定量遥感是当今遥感的前沿。为此, 必须对遥感探测器的辐射定标精度提出明确要求, 并通过辐射校正场定标和多星观测的交叉定标来弥补其不足, 为提供高品质遥感加工产品提供保证。

3.2.2 数据共享服务实现的技术途径

按用户对卫星资料产品的需求, 大致可以概括分为以下三种情况: ①高空间分辨率、高时间分辨率的实时遥感资料。这类资料对通信的要求是传输信息量大、时效要求高, 分发的难度较大, 但却是预报业务, 尤其是中尺度灾害性天气监测和预警所必须解决的技术难题。②高空间分辨率、高光谱分辨率, 探测精度高的近实时遥感信息。这类资料对通信的要求是传输的信息量大, 但时效可滞后几个小时以上。③经过加工处理的长时间序列卫星遥感信息及产品, 没有明确的时效要求。这类资料对通信的要求是具有

定传输速率的信息网络。

针对上述气象卫星遥感资料用户具有多部门、多用途,对卫星产品具有不同时效、不同空间分辨率、不同加工水平和不同精度要求的特点,采用单一的数据共享服务方式是难以奏效的。二十多年来,国家卫星气象中心在产品分发共享服务方面走过了一条并不平坦的道路,通过以上分析总结,提出以下可供选择的技术途径。

第一,通过CMACast提供服务。CMACast的分发速率已达70Mbps,通过CMACast优先分发前文所述第一类高时空分辨率的实时卫星资料,以满足中短期预报业务和短时、临近预警气象业务和灾情监测的需求,略为滞后的分发上述第二类资料。数字视频广播技术是一种先进的卫星数据广播技术,其广播速率高,传送信息量大,可以满足目前甚至未来一段时间内近实时的集中分发风云三号 and 风云四号等国内外极轨和静止卫星资料的需要。由于这类资料的种类多、信息量大、业务应用需求时间紧迫,在用户接收端配备针对主要应用功能,方便、快捷地处理软件,是充分发挥其效益的关键。应当改造目前Micaps系统中对静止气象卫星高时空分辨率资料的处理、显示等功能,使其满足对中尺度强对流天气系统的监测和分析是必须优先解决的技术问题。

第二,通过数据共享服务网站提供服务。通过数据共享服务网站,为上述第三类资料的用户提供服务,这是向用户提供数据共享服务的另一主要渠道。随着互联网快速普及,必将呈现用户持续高速增长的趋势。做好网站服务的有关工作,提供存档数据目录、产品检索手册、用户指南等,让更多的用户了解

网站。

第三,整合现有通过9210、中规模用户利用站和直接推送服务的信息和产品。目前,通过9210方式为预报业务提供的气象卫星图像产品部分可纳入CMACast,同时其分发的卫星加工产品则可大部分纳入网站共享数据服务渠道。事实上,根据中国气象局新一代卫星广播系统的设计方案,PCVSAT将被整合到CMACast中。问题是在CMACast中如何科学、合理地确定分发高时空分辨率图像的状态级别和哪些卫星产品要通过其分发,哪些产品纳入卫星数据网站服务的范围。如果这种分发方案能满足台站的精细预报和中尺度强对流灾害性天气预警的需求,则中小规模利用站的数量和规模会逐渐缩小,最终将被CMACast所取代。一些直接推送服务的用户也将逐步纳入CMACast的服务网络。

致谢:感谢中国气象局综合观测司、华云星地通公司和国家卫星气象中心数据服务室等单位提供的有关气象卫星分发、服务和接收站点分布等方面的资料。

参考文献

- [1] 赵立成,王素娟,施进明.国家卫星气象中心信息共享体制研究与技术实现.应用气象学报,2002,13(5):627-362.
- [2] 魏彩英,张晓虎,杨军.气象卫星分发产品业务监视系统简介.应用气象学报,2002,13(5):634-636.
- [3] 许健民,杨军,张志清,孙安来.我国气象卫星的发展与应用.气象,2010,36(7):94-100.
- [4] 赵海坤.建立一个气象卫星资料共享系统.计算机应用与软件,2005,22(2):44-45,123.
- [5] 蒋克俭,王春芳,陈宏尧.DVB-S在气象数据广播中的应用研究.气象科技,2006(34):13-18.
- [6] 李集明,熊安元.气象科学数据共享系统研究综述.应用气象学报,2004,S1:1-9.
- [7] 李集明,沈文海,王国复.气象信息共享平台及其关键技术研究.应用气象学报,2006,17(5):621-628.

中国气象局气象干部培训学院揭牌

2011年9月22日,中国气象局气象干部培训学院揭牌仪式在北京举行,中国气象局局长郑国光和副局长许小峰为中国气象局气象干部培训学院揭牌(右图)。经中组部、中编办批准,中国气象局培训中心正式更名为中国气象局气象干部培训学院。本刊从本期开始,主办机构也更名为中国气象局气象干部培训学院。

气象干部培训学院历经北京气象学校、北京气象学院、中国气象局培训中心等发展阶段,围绕气象事业发展不同时期对人才的不同需求,大力开展气象教育和培训,是国内唯一的综合性、专业化、高层次气象教育培训机构。



(本刊编辑部)

NOAA新一代战略计划

■ 罗云峰 郭彩丽 编译

美国国家海洋和大气管理局(NOAA)于2010年12月发布了其最新的未来五年战略计划——《NOAA新一代战略计划》(简称“新战略”),全面展示了NOAA的使命和未来愿景、必须应对的国家和全球挑战、力求帮助社会实现的具体目标,以及NOAA必须采取的行动。本文对其主要内容做简要介绍。

NOAA新一代战略计划内容架构

新战略的主体内容共五章。前两章重点展示战略计划的核心内容——NOAA的使命和未来愿景。其中NOAA的使命“科学,服务和管理”是最为核心的内容,其目的就是实现NOAA的理想即“增强生态系统、社会和经济体系的适应力”的未来愿景,而为了实现这个理想,NOAA将在其使命范围内重点实现四个长期目标,即“气候适应和减缓;天气有序国度;健康的海洋;增强沿海社区和经济体系的适应力”。它们之间环环相扣,紧密联系。

后三章则着眼于战略计划的落实——把NOAA战略目标瞄准要实现的环境、社会、经济成果所需要的全部门能力进行细化,任务落实到NOAA的科学技术机构、合作机构以及组织和管理机构,并对战略计划的执行和评估以及战略合作伙伴做了介绍或说明。

NOAA的使命

NOAA的使命:科学、服务和管理

■ 认识和预测气候、天气、海洋和海岸带的变化;

■ 分享知识和信息;

■ 保护和管理海岸带、海洋的生态系统和资源。

NOAA之前对其长期使命的表述在很长一段时间一直是“认识和预测地球环境的变化,保护和管理海岸带和海洋资源,满足美国经济、社会和环境的需求”(To understand and predict changes in Earth's environment and conserve and

manage coastal and marine resources to meet our nation's economic, social, and environmental needs),新战略第一次将其凝炼为“科学、服务、管理”三大使命,而且据其对三大使命的解读,NOAA更加强调科学在其使命中的地位和作用,认为“科学要素为NOAA使命中的服务要素和管理要素奠定了基础并提供了未来保障”。

NOAA强调指出,其使命对于应对当今的许多重大挑战至关重要。气候变化、恶劣天气、自然和人类活动导致的灾难、生物多样性日趋减少、海洋酸化、濒临威胁或已经退化的海洋和海岸带资源等诸多挑战传达着一条共同的信息:人类的健康、繁荣和康乐依赖于自然—社会耦合生态系统的健康和恢复能力。要维护好这种相互依赖关系就要求我们为决策提供及时、有用的信息和我们对这些系统的科学认知。地球生态系统支撑着人类、社会和经济,因此,要提高人类福祉就必须对自然系统的变化做到有备而战、积极应对。NOAA的使命

“科学、服务和管理”旨在面向未来构建健康和极具适应力的社会和生态系统,以应对突发或持续的环境变化。

NOAA的未来愿景

NOAA的未来愿景:增强生态系统、社会和经济体系的适应力

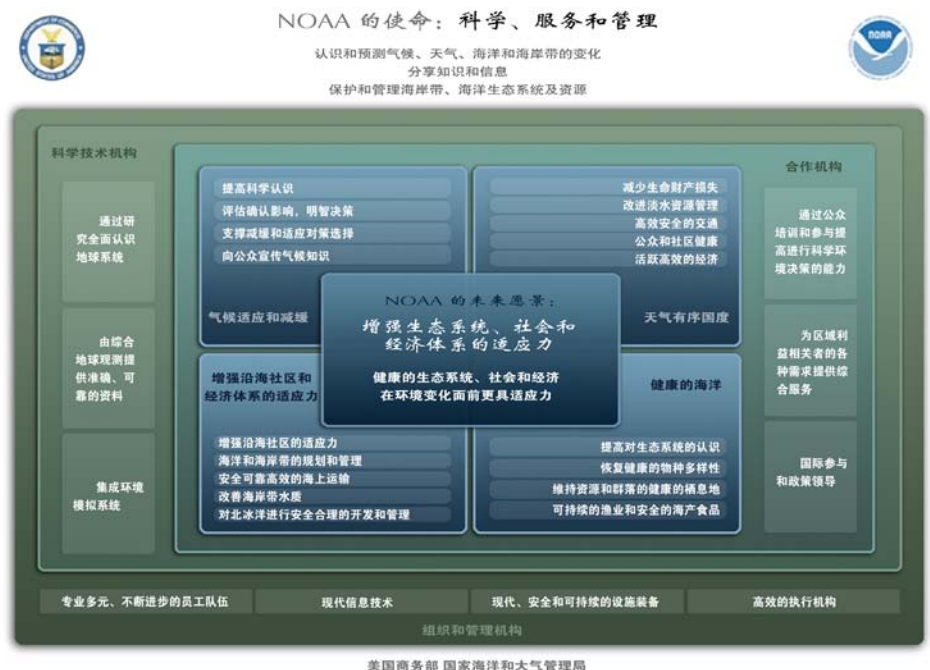
健康的生态系统、社会和经济体系在环境变化面前更具适应力

NOAA认为,只有增强生态系统、社会和经济体系的适应力,才能够通过预见、消减和分散环境变化的影响来保持和提高其健康水平和生命力。在这种增强适应力观念的指导下,NOAA及其合作伙伴将协同努力,减少社会和生态系统在短期变化面前的脆弱性,同时帮助社会避免或适应长期的环境、社会和经济变化。为此,NOAA将在其主要的使命范围内重点实现四个长期目标。

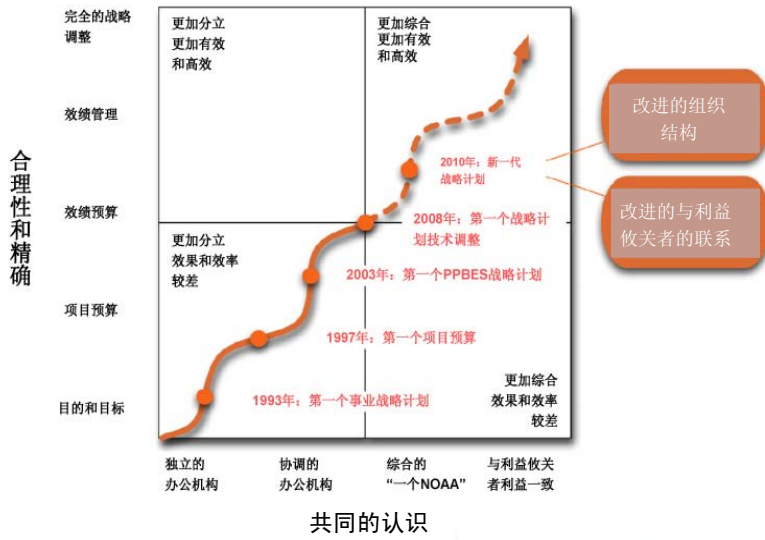
NOAA的长期目标(见表1):

■ 气候适应和减缓:全社会对气候变化及其影响有清楚的认识并能及时预测和响应;

■ 天气有序国度:全社会对与天



NOAA组织结构与战略的演化



共同的认识
NOAA 战略的“战略”：其“足迹”通向右上端的“和谐”

气有关的事件有备而战，积极应对；

■健康的海洋：健康富饶的生态系统维持着海洋渔业、栖息地和生物多样性；

■增强沿海社区和经济体系的适应力：沿海和大湖社区在环境和经济方面可持续发展。

在四个长期目标之上有一个共同的理念，那就是增强适应力，从而主动适应环境变化，主动应对各种灾害和风险。在这种增强适应力理念的指引下，这些目标互相支持，互为补充。正如经济的繁荣依赖于健康的环境一样，海洋和海岸带生态系统的可持续发展亦依赖于社会减缓和适应气候变化及其他环境变化的能力。同样，美国沿海地区、干旱区以及世界各国的经济可持续发展也依赖于区域尺度的气候预测和预估。而增强沿海社区的适应力也依赖于其对突发或持续恶劣天气/水极端事件的认识水平和防备工作情况。NOAA会充分利用这些相互作用，扩大每个目标在增强生态系统、社会和经济体系适应力方面的效果。

新战略中，NOAA针对实现每一个长期目标必须要解决的科学问题，以及围绕解决这些问题NOAA应开展的观测、模拟试验、服务、合

作、宣传等一系列行动做了系统的部署。同时，将每个长期目标都细化为若干个阶段性目标任务，并针对每一项目标任务强调了NOAA应采取的一系列行动。为了对战略计划的实施进行评估，新战略还明确提出了每一项目标任务未来五年的预期进展。

新一代战略计划的若干特点

NOAA自上个世纪90年代初开始公布其战略计划，近20年来，其制定战略的战略，追求的是与社会完全的融合。这种和谐的追求，也使得新战略更加注意了美国国内乃至世界未来的发展动向，通篇在灌输和体现一种新的战略观，即对未来趋势的判断左右着NOAA的重心，而趋势的不确定性正是战略中要充分考虑的因素。此外，对各种影响未来作用力的量化分析以及未来“情景”的审视，都是所谓“新一代”战略的特殊之处。

○用地球系统科学的观点，从能力建设层面确立未来愿景和长期目标不再拘泥于满足社会的具体需求，而是从增强生态系统、社会和经济体系适应力使之健康发展的角度来阐述问题。

科学、服务和管理三大使命之间，不同的重点任务之间，不同类

型的部门之间，所有要素相互支撑，密切联系，核心是增强适应力，主动迎接各种挑战，追求有序发展、可持续发展。

○目标明确，任务具体，执行有行动方案，进展有要求

围绕每一个长期目标，新战略都给出了四五项具体的阶段性目标任务，不仅描述了具体的任务内容，而且给出了为完成这些任务NOAA必须采取的行动，并给出了未来五年的预期进展，这些进展都是具体的、可考量的发展要求。

○目标任务有评估，并将其作为组织机构能力建设的重要环节

NOAA新一代战略计划所确定的目标任务是NOAA在通向更宏伟、更长远目标并成为更有能力、更具韧性的机构的道路上可以完成的具体成果。这些成果是可以量度的，同时也会受五年内各种具体活动的影响。NOAA将会系统地监控和评估本计划的执行，以期实现其以成果为导向的长期目标和目标任务。绩效评估可以使NOAA从成与败中汲取经验和教训，不断提升组织自身的能力，更好地完成对于科学、服务和管理使命的承诺。

○特别强调科学是基础

作为一个以科学为基础的机构，NOAA新一代战略计划处处体现了科学是基础，是核心，是灵魂。

在NOAA肩负的三大使命中科学排在第一位，而且强调指出“科学要素为NOAA使命中的服务要素和管理要素奠定基础并提供未来保障”。

新战略的基础是NOAA 2035年情景和NOAA广大利益相关者咨询磋商结果，是在从NOAA对社会进步的实质性贡献角度对其最优先发展领域的评估结果，换言之，这是一份在科学研究基础上发展形成的分析和评估报告。

尊重科学、依靠科学、科学发展的思维方式贯穿始终。NOAA对其发展战略充满信心，“作为一个以科学为基础的组织，NOAA独有的创新能力为其实现这些宏伟的长期战略

奠定了坚实基础”。NOAA的视线主要集中在全面认识人类的健康和繁荣与错综复杂的地球系统之间的相互依赖关系。为了达到这种认识水平，NOAA强调它必须应对全面、长期的科学和技术挑战：研发和应用全面综合的地球系统方法来认识那些在不同尺度上联系着大气、海洋、空间、陆面过程和冰冻圈的各种变化与生态系统、生物和人类的各种过程。NOAA是否能实现其长期目标，“要依赖于其整个机构科学和技术的继续发展和集成，依赖于各部门更紧密的合作和各方面的积极参与，也依赖于更有效的组织和管理”，即使在强调NOAA要成为最有效的服务机构就必须很好地融入社会时，也是因为“NOAA在科学研究、开发、业务进步或政策行动方面的新突破，可能就取决于某合作伙伴或客户的独特知识或需求”，符合科学发展的规律。

○强调开放合作和国家利益至上
新一代战略自始至终一再强调，NOAA不可能单枪匹马实现其长期目标，社会也不可能撇开NOAA取得这些成就。在描述每一个长期目标时，以及在对部门能力细化时——科技机构、合作机构、组织管理机构，都专门有一段文字强调NOAA在这一领域的合作伙伴，以及各自的职责、合作的重点内容等。此外，还特别强调融入社会，与广大民众和利益相关者的互动与合作。计划最后又专门用一章的篇幅来再次强调在实现四个长期目标领域的战略合作伙伴。

如此强调的结果使我们深切感受到NOAA是站在美国国家层面来谋划发展的，NOAA与如此之多的部门、机构、非政府组织、利益相关者息息相关，牵一发而动全局，是其重要性使然，也是其系统科学思想的又一体现。

NOAA从1993年完成第一个发展规划开始，每5年更新一次战略文本（一般每5年时间段都有2年期的重叠和衔接时间）。NOAA几代领

导人多次在不同的场合表示，NOAA的组织结构类似“烟筒”形状，彼此的协调和合作内容很少，需要向矩阵型转变。新规划的制定，可以说首先瞄准的是这一软肋。此外，人们在阅读新战略后很容易提出的一个疑问，就是为什么是“新一代”？我们认为这可以从两个方面加以解读。首先从内部看，自从NOAA于1970年成立直到新世纪初，其内部组织结构就一直没有明显的改变。这使得NOAA看起来就像是一排“夫妻店”，每家店都有自己经营特色但与其他店关系不大。这样的情况如果长期下去，显然NOAA

在今后难以担当更为艰巨的使命，因此，NOAA到了从组织结构上进行调整的时候了。再者，从外部环境看，如果说NOAA以前和商务部其他机构相比，其政府服务职能更强而管理职能偏弱的话，那么今后随着气候变化与经济生活更加充分的结合，其行使政府管理任务在可预见的未来将逐渐增加，甚至国家某一块新的管理职能落户其中也有可能（例如，NOAA作为美国气候变化委员会的主要部门，在对碳排放监测方面具有优势，进而可能在对经济生活中碳排放的管理方面履行国家职责等）。这时，NOAA新战略需

表1 NOAA新一代战略计划的长期目标及任务

| 长期目标 | 目标任务 |
|-----------------|------------------------------------|
| 气候适应和减缓 | 提高对气候系统变化及其影响的科学认识 |
| | 评估气候系统当前和未来状态，辨识其潜在影响并用于科学、服务和管理决策 |
| | 开展持续、可靠、及时的气候服务，支撑减缓和适应 |
| | 公众了解气候，认识气候变化的脆弱性并能明智决策 |
| 天气有序国度 | 减少高影响天气事件的生命财产损失和破坏 |
| | 改进淡水资源管理 |
| | 提高交通运输的效率和安全性 |
| | 改进空气和水质服务，造福公众及社会健康 |
| | 通过事关美国关键经济部门的环境信息，促进经济更加繁荣高效发展 |
| 健康的海洋 | 提高对生态系统的认识，为资源管理决策提供信息 |
| | 实现海洋和海岸带物种的恢复和健康 |
| | 健康的栖息地维护着海洋资源和群落的适应力和生机 |
| | 发展可持续渔业和安全的海洋食品，保障公众健康和社会繁荣 |
| 增强沿海社区和经济体系的适应力 | 增强沿海社区的适应力，使其适应灾害和气候变化的影响 |
| | 海洋和海岸带综合规划和管理 |
| | 安全高效和环境友好的海上运输 |
| | 提高海岸带水质，为人民健康和海岸带生态系统服务提供支撑 |
| | 安全、环境友好的北极通道和资源 |

要考虑的除了高效外，更重要的是与利益攸关方有充分的协调和相互信任。特别是，如果美国将逐渐走进新的气候变化经济框架，而NOAA又担任重要的碳排放、贸易等内容的管理职责，那么其利益攸关方则几乎覆盖了美国经济生活的所有成员，而这却是NOAA隶属于美国商务部最能反映未来内容的诠释。因此，NOAA的“新一代”新战略将有更多的内容为NOAA在未来国家生活中更为重要的位置进行铺垫。

（作者单位：中国气象局）

COMET介绍及特点分析

■ 侯锦芳

COMET是Cooperative Program for Operational Meteorology, Education and Training 的缩写,即表示“业务气象、教育和培训合作计划”。1989年,为了更好地理解中尺度气象学和最大限度的利用新的气象技术,大气研究联合大学(UCAR)和美国国家气象局(NWS)成立了关于业务气象、教育和培训的合作计划即COMET。如今,COMET主要通过开展远程教育、现场课堂、科研项目外展计划来满足大气科学和相关领域的教育和培训需要。COMET有11个赞助单位,目前有45名工作人员,包括气象学家,水文学家,计算机科学家,图形艺术家和教学设计专家,以及信息技术和质量保证专家。COMET的主页是<http://www.comet.ucar.edu>和<http://meted.ucar.edu>。

截止到2010年6月1日,COMET网站世界范围内共有145000用户,他们来自200多个国家,共有1075所大学参与到COMET计划中。COMET提供了600多门、将近1200多小时的网络在线学习课程。COMET课件资源按主题分类统计见表1。

COMET的学习资源库中的大部分学习内容是以课件的形式来展现的,由表1可知COMET课件资源几乎涵盖了气象领域的各个分支,是气象专业内最大的学习资源网站之一。

COMET课件主要由五部分组成:概要和课程介绍、

表1 COMET课件资源主题分类统计表

| 主题 | 课件模块数 (个) | 课时数 (小时) |
|-----------------|--------------|-------------|
| 航空气象 | 41 | 117 |
| 气候学 | 20 | 26 |
| 海岸天气 | 25 | 39 |
| 强对流天气 | 31 | 91 |
| 应急管理 | 18 | 38 |
| 环境与社会 | 16 | 31 |
| 火险天气 | 34 | 43 |
| 雾、低层云 | 25 | 55 |
| 水文学、洪涝 | 47 | 60 |
| 海洋气象学 | 41 | 64 |
| 中尺度气象学 | 34 | 78 |
| 山地气象学 | 16 | 25 |
| 数值天气预报 (NWP) | 68 | 129 |
| 其他 | 24 | 60 |
| 定量降水预报 (QPF) | 19 | 26 |
| 雷达气象学 | 5 | 14 |
| 卫星气象学 | 72 | 112 |
| 空间天气 | 4 | 9 |
| 热带气象、飓风 | 33 | 72 |
| 冬季天气 | 42 | 90 |
| 总共: | 615 | 1179 |

学习主体内容、总结、课后测试以及用户反馈。在界面结构上,大部分课件将界面分成两部分或三部分。左侧是目录与导航区,右侧是主要学习内容区,由文字、图片、动画和音视频来展现。页面顶端是课件名称或该小节的标题。

COMET课件的特点有如下几个方面:(1)教学内容分类细

致,组织结构清晰。COMET课件的教学内容以知识点进行分类组织,细致清晰,每个课件的目录简洁明了,细化到学习单



元,点击目录最后一级即可进入单个学习单元。每个学习单元控制在10分钟左右,便于学习者有效利用时间灵活学习。(2)课程测试方式灵活多样,课前有前测,课中、课后都有测试题,根据知识点进行安排,重点知识部分有较多测试,测试题多数为选择题,也有填空、画图、连线题和开放式问答题等。选择题测试完毕后会立即给出测试结果,检验学习效果,加深学习印象。(3)课件模块化设计科学合理,导航形式多种多样,吸引力强。COMET课件是由多个学习模块构成的,模块化设计满足用户在不同目的和不同情境下对资源重复使用的需求。学习者对学习模块的访问是依靠导航来实现的,COMET屏幕设计和导航条的设计清晰明了,很多课件的导航非常富有创意,增强了学习兴趣。灵活清晰的导航增强了学习者的定位意识,便于学习者对学习模块的理解,提高学习效率。(4)资源更新及时。COMET课件内容取材广泛,每月都会有新的课件上传到网站,资源建设与更新及时。课件内容一大部分是来自会议、讲座、workshop等,这给COMET提供了一手的素材,将录制回来的素材进行二次整理、设计、编辑,形成结构化的教学课件。(5)重视用户反馈信息。学员在课程学习结束后进入用户调查模块,来了解学习者对该课件的满意度和建议。另外,利用COMET网站进行学习时,可以通过在论坛中留言,发表自己的看法,对整体的学习网站进行评价,进而促使学习网站不断完善。值得一提的是,COMET为了更好地让学员及时了解课件资源的更新情况,访问课件需要学员进行免费注册,每当有新的资源更新时,系统给学员邮箱发送邮件,第一时间把更新的学习资源通知到所有的COMET用户。

COMET的学习资源是开放共享的,我们可以对COMET课件的课程模块、功能、结构特点等方面进行细致分析,总结其规律和特点,学习其开发模式,应用于我国气象远程教育资源的建设中,正所谓他山之石可以攻玉!

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

《农作物对气候变化的适应》评介

■ 赵海燕

气候变化是当今世界所面临的现实问题。目前政府间气候变化专门委员会(IPCC)和研究气候变化的主流科学家认为,人类活动引起的温室气体排放是导致近年来气候变化的主要原因,大气中CO₂的浓度已从西方工业化革命前的280ppm升至现在接近400ppm的水平。提早采取有力的减缓措施,减少温室气体排放,避免灾难性气候变化更具有现实和长远意义。

必须认识到,尽管采取积极的应对措施,可能仍然不能避免未来大幅度的气候变化。世界上许多地区的农作物正经受着新石器时代以来从未有过的温度变化:较高的平均气温、频繁的极端冷暖事件、生长关键期和脆弱期的高温胁迫等等,这些变化不是简单的或者无关紧要的气候波动,而是几乎所有的大气环流模式(GCM)都能预测到的确定事实。虽然农作物在历史上经历过直接或间接的气候变化,但是,从来没有受到像现在这样迅速的、剧烈的气候变化影响。

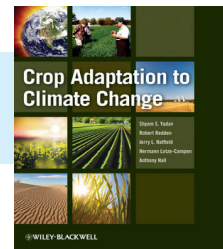
气候变化逐渐成为粮食安全的最大威胁之一。部分科学家的研究表明,尽管在气候变暖最初的20~30年里,温度升高对某些地区农作物产量具有一定的正作用,但是对于大部分地区,特别是2030年以后,气候变暖将对粮食生产带来严重的负作用。例如,在印度,气温升高1℃,预计小麦将减产700万吨左右。撒哈拉沙漠边缘的非洲地区以及南亚地区的农业也将受到全球变暖的严重影响。气候变暖已使欧洲和北美地区春季农作物的生长季提前。随着气候变化的继续,这些影响将可能波及全世界。

预计全世界的人口到2025年可增至80亿,21世纪中期甚至可能达到90亿。满足这样庞大数量人口的粮食需求需要农业生产力得到实质

性提高,而耕地面积预计未来不会增加太多。当前的农业系统在一定程度上适应了现在的气候,如果要提高农业生产力水平,则需要其适应进一步的气候极端变化事件。

为了更充分地理解气候变化对农作物的影响,并使农业适应可预测到的、在一定程度上不可避免的气候变化,确保粮食安全,来自六大洲的100多位科学家共同编著了这本《农作物对气候变化的适应》(*Crop Adaptation to Climate Change*)。这本书概括了国际上众多学者有关热带和温带地区农作物对气候变化适应的研究成果,主要包括了两个方面的内容:(1)量化的气候变化在多大程度上影响世界上不同地区的作物生产力;(2)评价通过培育新品种和提高农业管理水平等手段提高农作物对未来气候变化适应能力的可能性。

预测未来气候变化需要使用复杂的GCM,目前广泛使用的GCM大概有20多个,在全球尺度上,它们对未来的气候预测结果基本一致。然而,在区域或国家尺度上,不同GCM的预测具有较大的差异,这些模式之间的差异需要引起重视,特别是对于较小空间尺度上降水格局的预测,因为它关系到区域农业对气候变化的适应对策。如果不同研究者使用了不同GCM的输出结果,那么不同研究之间的对比将变得更加复杂。基于这种考虑,本书大部分章节使用了GCM的集合预测结果。与降水格局的预测相比,不同GCM对温度变化趋势的预测更为一致。多数GCM模拟发现,在未来50~100年中,全世界许多地区的温度升高趋势非常明显。本书中的研究指出,大于30℃的天数的增加对于谷物的产量将产生严重的影响。本书同时关注了不同气候变量的变化对农业系统和作物生产力的交互影响。例如,大气中CO₂浓度的上升



Wiley-Blackwell, 2011年出版

可能使作物的水分利用效率提高,从而有利于作物生长,但这可能被温度升高以及降水格局改变带来的负作用所抵消,本书中的研究发现,这种交互影响具有一定的区域性特征。

随着气候变化的加剧和人口的持续增加,粮食生产也必须增长到相应的可维持未来需求的水平。这种增长不仅仅是数量上的,更应该是质量上的,例如较高的营养标准、更多动物性蛋白的供应。本书描述了与这些需求有关的具有较高品质的作物品种培育。在过去的100年里,作为食物来源的75%的农作物品种已经消失了。从农业发展史上看,人类已经种植过7000余种农作物,而仅有30种作物占据了人类食物来源的90%。遗传多样性的消失具有潜在的破坏性后果,依赖于少数几种农作物,将使农业系统面临气候变化时的脆弱性加剧。一旦适宜的气候条件发生变化,少数的农作物品种将可能无法满足农业生产的可持续性。为此,本书关注了农业生物多样性与气候变化的关系。

本书也评价了世界上主要农业区域的农业系统脆弱性,并讨论了其如何适应气候变化的问题。因为预计将来世界人口的增长可能会较多地出现在非洲、亚洲和南美的欠发达国家,而且气候变化对分布有较多欠发达国家的低纬度区域的影响也相对严重。因此,本书涵盖了这些人口增长可能较迅速和受气候变化影响更大的区域的农业适应性研究。发展未来农业的一个重要标准是选取对气候变化具有最佳适应能力的农作物品种,以及实施合适的农业可持续管理对策,这些问题也在本书中有所阐述。

(作者单位:山西省气候中心)

文摘 (中文文献)

基于构成要素的预报方法——配料法——《气象》2011年第37卷第8期

俞小鼎撰文介绍了1996年由Doswell等人提出的“基于构成要素的预报方法”，即所谓“配料法”的主要思路。通过与常用的传统预报方法“流型辨识方法”进行比较来说明“配料法”的优势和局限性，并利用实际雷暴生成的例子解读“配料法”的应用；强调“配料法”和“流型辨识方法”之间有很强的互补性；同时对有关“配料法”的一些误解进行了澄清。

一类高阶位涡反演的算法及其应用——《气象学报》2011年第69卷第3期

甘璐等撰文指出：以2008年7月21—24日由低涡东移所引发的江淮地区大范围降水事件为例展示高阶位涡反演算子的具体应用，包括对高阶位涡反演算子的可信度检验以及它与满足非线性平衡的反演算子之间的优越性，分析高阶位涡反演得到的平衡流、垂直速度场以及非平衡流的演变特征等。研究表明，高阶位涡反演要优于满足非线性平衡的反演算子；平衡流在很大程度上代表了实际气流，它的演变反映了系统的形成、发展和移动。降水区附近伴随着与惯性重力波无关的平衡流的调整。与惯性重力波相关的非平衡流的演变和发展与高压系统有很大的关系，对于辐合区的形成起了重要作用，它与暴雨的落区形成很好的配置关系。值得指出的是，高阶平衡方程与非线性平衡相比其优势应该在于刻画超梯度流等系统上的准确性。

太平洋经向模态对西北太平洋热带气旋有重要影响——《热带气象学报》2011年第27卷第4期

黄勇等撰文指出：在分析研究太平洋海气耦合经向模(PMM)和西北太平洋生成热带气旋频数变化关系的基础上，利用NCAR的大气环流模式CAM3模拟研究太平洋海气耦合经向模态对西北太平洋生成热带气旋的影响。结果表明，海气耦合的经向模态通过影响热带气旋生成的大尺度环境

从而影响热带气旋的频数和强度。在模式中当增加了PMM的海温强迫后，纬向风切变变小，对流层中低层相对湿度变大，热带西太平洋对流层低层出现西风异常，在西北太平洋地区形成一个异常的气旋性环流，并且匹配有较大的正涡度异常；对流层高层出现赤道东风异常和一个与低层气旋性环流相匹配的反气旋性环流，有利于对流活动的发展，从而有利于热带气旋的生成和发展。在增加了PMM的海温强迫的试验中，热带气旋中心的海平面最低气压降低，850 hPa中心附近最大切向风速增加，气旋中高层的暖心强度增强。热带气旋强度总体增加。数值模拟结果与资料分析相互印证，揭示了太平洋经向模态对西北太平洋热带气旋有重要影响。

我国东部季风区夏季降水的时空变化存在两种主模态——《大气科学》2011年第35卷第4期

黄荣辉等撰文指出：利用1958—2000年ERA-40再分析每日资料 and 我国516台站降水资料以及EOF方法，分析我国东部季风区夏季降水异常主要模态的年代际变化特征及其与东亚上空水汽输送通量时空变换的关系。结果表明，我国东部季风区夏季降水的时空变化存在两种主模态：第1主模态不仅显示出明显的准两年周期振荡的年度变化特征且也有明显的年代际变化，在空间上具有经向三极子型分布；第2主模态显示出明显的年代际变化特征，且在空间上具有经向偶极子型分布。这两主模态有明显的年代际变化，并且这两主模态的年代际变化与东亚上空夏季水汽输送通量的时空变化密切相关。

中层大气重力波的全球分布特征——《地球物理学报》2011年第54卷第7期

张云等撰文指出：从2002年1月到2009年12月的SABER温度剖面数据提取了可以反映重力波活动的垂直尺度2~10km的中尺度温度扰动，分析了全球中层大气重力波的分布。重力波扰动在夏季和冬季明显强于春季和秋季，而冬季与夏季相比，在70km以下的高度夏季弱于冬季，在70km以上夏季比冬季要强。从全球重力波分布

来看，较大值分布在冬季半球和25°N到25°S的热带范围，其中热带范围重力波的峰值随着高度向北移动，而在南半球高纬度地区重力波扰动较大值位于极区涡流的边缘。热带范围的扰动沿着经度方向有明显的变化，这是由风过滤、地形和波动等因素共同作用的结果。重力波扰动强度随高度变化，在25~30km处呈现下降趋势，而超过42km后又逐渐递增。对比8年平均的重力波在不同高度的强弱分布，可以看到，在较低高度，重力波的强弱明显与地形有关，而在较高高度，重力波的分布与地形的关系变得不明显。这说明重力波的形成与地形有显著相关性，但在传播过程中重力波的分布会随高度出现明显的变化。

海面变化经纬向耦合特征及其对ENSO事件响应——《地球物理学报》2011年第54卷第8期

俞肇元等撰文指出：引入3阶主张量分析方法对1993—2008年赤道太平洋地区卫星测高数据进行解析，前两个主张量可有效表征海面变化的经、纬向耦合特征，重构与对比了该时段内6次ENSO事件海面变化的经、纬向演化的空间构型与耦合作用过程。结果表明：海面的经向变化可表征ENSO强度变化，纬向变化表现为受ENSO影响的年周期波动；经、纬向张量的时间系数与MEI(多变量ENSO指数)以及EMI指数(El Niño Modoki指数)间多尺度分析表明，两者均受El Niño Modoki影响，但在耦合尺度、能量共振关系以及相位关系上存在差异；海面变化对不同类型ENSO事件响应差异主要表现在高、低海面位置、振幅以及高、低值区分布形态与空间范围等方面。其中常规的El Niño多表现为东太平洋型ENSO，El Niño Modoki则表现为中太平洋型。不同类型的ENSO在经纬向耦合演化轨迹的周期性、规则性和方向性特征可在一定程度上作为ENSO类型区分依据。

陆-气耦合增加中国的高温热浪——《科学通报》2011年第56卷第23期

张井勇等撰文指出：极端气候，例如高温热浪，对社会、经济和生态系统有着重要的影响。在过去的几十

年间,中国的高温热浪已经发生了显著的年际和年代际尺度上的变化。然而,目前对引起中国高温热浪变化的物理机制尚不清楚。本文利用2个长期的含有和没有土壤湿度—大气相互作用的WRF区域气候模式模拟评估了陆—气耦合对中国夏季高温热浪的影响。结果表明陆—气耦合增加了中国的高温热浪。尤其是,在中国东部和西南的大部分地区,高温热浪的增加都有统计上的显著性。在这些地区,陆—气耦合能够贡献30%~70%的高温热浪。研究结果表明,陆—气相互作用对中国高温热浪的发生起到重要作用。

夏季亚洲—太平洋热力差异年代—百年尺度变化与太阳活动——《科学通报》2011年第56卷第25期

赵平等撰文指出:利用重建的近千年亚洲—太平洋涛动指数和太阳辐照度时间序列,用统计方法研究了夏季亚洲与其周边的海陆热力差异在年代—百年际时间尺度上的变化特征及其与太阳辐照度的关系,结果表明:亚洲季风区热力差异存在着90a左右、10~13和3~7a的周期振荡;在百年尺度上,热力差异表现出3次明显突变,它们分别发生在1305~1315年、1420~1430年以及1625~1635年。海陆热力差异与太阳辐照度之间有显著正相关,并且在250a,120~160a,60~70a以及15a变化周期上,二者的联系更显著。热力差异的3次突变分别对应着太阳辐照度的明显减弱或加强,并且滞后太阳辐照度突变时间12~22a,可能反映了太阳辐射对亚洲季风气候百年尺度突变的一种影响;在年代尺度上,热力差异突变与太阳辐照度关系不紧密,说明太阳活动可能不是影响亚洲—太平洋热力差异年代际突变的主要因子。与亚洲—太平洋热力差异比较,北半球年平均表面气温的年代际突变与太阳活动的关系更紧密,而气温百年尺度的突变与太阳活动关系较弱。

东亚副热带夏季风建立与中国汛期开始时间——《中国科学D辑:地球科学》2011年第41卷第8期

祝从文等撰文指出:采用谐波等分析方法,讨论季节转化过程中东亚大陆降水和对流层风场时空分布特征、海—陆热力差异以及大气加热与

风场和降水之间的季节变化关系,确定了春季中国江南降水的副热带夏季风性质。分析认为,3月份中国江南春雨是东亚副热带夏季风降水的孕育阶段,4月初东西向海陆热力差异在东亚副热带地区最早完成冬夏的季节性反转,时间早于南海夏季风爆发并对应华南前汛期的开始,标志着东亚副热带夏季风的建立和中国汛期降水的开始。东亚副热带夏季风主要活动在东亚100°E以东、20°N以北地区,春季(3~4月份)中南半岛和江南地区大气加热的持续作用可能导致了东亚东西向海陆热力差异在副热带地区完成反转。其中,江南上空大气热源是导致该地区对流层低层西南风、上升运动和降水增强的主要原因。

国产GPS探空仪国际比对试验结果——《应用气象学报》2011年第22卷第4期

李伟等撰文指出:通过2010年7月12日—8月1日第8届世界气象组织阳江国际探空比对,采取同球比对施放方式,选择芬兰Vaisala探空仪作为比对标准,对中国参加国际比对的长峰探空仪与华云探空仪,使用共29次同球比对数据,从典型个例分析与统计分析两方面开展系统性评估。初步评估结果表明:对于温度探测,中国长峰探空仪整体系统偏差在0.4℃之内,标准偏差在0.7℃之内,中国华云探空仪在30km高度以下性能与长峰探空仪相当,但是30km高度以上偏差明显增大;对于气压与风的探测,两者系统偏差与标准偏差均较小,表明GPS定位以及气压与风的算法准确;对于湿度探测,与芬兰Vaisala探空仪相比,还存在一定差距,特别是低温性能需要提高。

中国过去2000年温度变化速率——《中国科学D辑:地球科学》2011年第41卷第9期

葛全胜等撰文指出:利用24个温度变化代用序列,分析了中国过去2000年温度在百年与30a两个尺度上的变化速率及过去500年10a尺度的温度变化速率。结果表明:从全国平均看,在百年尺度上,20世纪的升温速率为 $(0.6 \pm 1.6)^\circ\text{C}/100\text{a}$ (95%的置信区间,下同);在过去500年中,最大升温速率为 $(1.1 \pm 1.2)^\circ\text{C}/100\text{a}$,出现在小冰期

向20世纪暖期的转换过程中,且这一升温速率可能也是过去2000年中最大的。在30a尺度上,尽管20世纪期间全国平均升温显著,但其最大升温速率仍小于历史时期的最大升温速率(分别出现在小冰期末至20世纪初及公元270s~320s)。在10a尺度上,20世纪末的升温虽非常明显,但在过去500年中却并非空前。北部地区过去2000年的最快升温出现在公元180s~350s,青藏高原出现在260s~410s和500s~660s。降温方面,小冰期期间出现的最快百年和30a尺度降温在过去2000年中也并非史无前例。20世纪期间,全国平均的10a尺度最快降温出现在1940s~1950s,速率为 $(0.3 \pm 0.6)^\circ\text{C}/10\text{a}$,与20世纪前的最快降温大致相当;且各区域20世纪期间最大降温速率皆未超过历史时期的最大值。

南海夏季风爆发与冬春季南海上层海洋热含量的关系——《海洋学报》2011年第33卷第4期

王丽娟等撰文指出:利用1980年1月—2007年12月逐月的南海上层海洋热含量和逐层海温资料,分析了南海夏季风爆发早年和晚年前一年冬季和春季南海上层海洋热含量的时空分布特征及其与南海夏季风爆发的关系,并在此基础上,进一步探讨了热含量影响南海夏季风爆发早晚的可能原因。结果表明,南海上层海洋热含量的变化集中体现在中南部(8°—16°N,110°—120°E),而且热含量变化的信号在南海100~200m之间最强。季风爆发早、晚年的冬春季,南海中南部热含量呈反位相变化。当南海夏季风早(晚)爆发,热含量为正(负)距平。南海夏季风爆发早晚与前期1~5月份南海中南部上层海洋热含量有显著负相关关系,尤其是3月份相关关系最好。当热含量为正(负)距平时,上层海洋异常得到(失去)热量,增大(减弱)了季风爆发前陆地冷海洋暖的海陆温差,有利于南海夏季风的早(晚)爆发。

文摘 (英文文献)

Pinatubo火山爆发后南半球中纬度地区平流层的臭氧并未减少——Missing Stratospheric Ozone Decrease after Mt. Pinatubo: A Dynamical Perspective. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2011, Vol. 68, No. 9.

Pinatubo火山爆发导致了北半球热带以外地区的臭氧总量显著减少,但是南半球没有出现类似程度的下降。为寻找其原因,苏黎世联邦理工学院的Poberaj等使用多元线性回归方法分析了化学和动力学影响下臭氧年代际变化(CANDIDOZ)的三维同化臭氧(CATO)数据集,解释变量包括了太阳活动周期,准两年振荡(QBO),火山喷发效应,用于描述Brewer-Dobson循环的低平流层的Eliassen-Palm(EP)通量,平流层的氯增长。研究发现,QBO和显著的EP通量异常补偿了火山活动引起的化学臭氧消耗。使用NCEP-NCAR再分析数据,发现异常的EP通量是由1991年9—11月到1992年间的几次显著的平流层行星波活动引起的,它和气溶胶升温效应共同作用导致了显著增强的Brewer-Dobson循环,以及更多的从热带到热带以外的臭氧传输。这样,火山臭氧损耗的开始出现在了1992年,损耗强度也有所下降。

动态季节内预报技巧对不同初始条件的敏感性——Sensitivity of Dynamical Intraseasonal Prediction Skills to Different Initial Conditions. *Monthly Weather Review*, 2011, Vol. 139, No. 8.

季节内振荡(ISO)的可预报性依赖于初始条件和较低边界条件(或大气—海洋的相互作用)。初始条件常使用大气再分析数据。夏威夷大学的Fu等研究了三种再分析数据(NCEP-R1, NCEP-R2, ERA-Interim)描述ISO时的偏差,以及这些偏差对ISO预报技巧的影响。研究发现,尽管这三种再分析资料都低估了向东传播的赤道ISO强度,但是ERA-Interim的总体质量要好于

NCEP-R1和NCEP-R2。使用这些再分析数据作为ECHAM4—UH-HCM(夏威夷大学的混合动力耦合模式)中的初始条件,模拟东南亚和全球热带地区的850hPa(U850)纬向风和降水,ISO预测技巧仅达到1周。研究提出了一种对辅散场的加强松弛逼近方法,显著改善了初始条件,使降水预测延长了2~4天,U850预测延长了5~10天。

在使用一种信号恢复方法恢复了原始再分析资料中的ISO信号后,产生的初始条件包含了更接近于观测强度的ISO,但ERA-Interim中的降水与观测的相关关系有所下降。使用这些信号恢复的再分析资料作为初始条件,Wheeler-Hendon指数显示北方夏季ISO的预测技巧达到14天。东南亚的U850和降水预测技巧,分别达到23和18天。研究还发现,初始条件中的小尺度的天气扰动,通常会增加ISO预测技巧。UH-HCM和NCEP气候预测系统(CFS)在海洋陆地区域遭遇了预报障碍。

11—1月期间南海热带气旋的形成过程分析——An Analysis of Tropical Cyclone Formations in the South China Sea during the Late Season. *Monthly Weather Review*, 2011, Vol. 139, No. 9.

台湾大学的Lin和Lee研究了11—1月(NDJ)间在强烈的东北季风影响下南海(SCS)热带气旋的形成过程。结果显示,与5—6月梅雨锋影响下的热带气旋形成比例相比,NDJ期间所有涡旋发展成为热带气旋的比例较小。但是,NDJ期间热带气旋的形成时间比梅雨锋期间明显要短。合成分析显示,在NDJ期间,未形成热带气旋的涡旋相比,发展成热带气旋的涡旋具有较大的低层涡度和高层辅散,以及较高的700hPa相对湿度。另外,东北风的减弱可能是热带气旋形成的重要原因,因为它减少了垂直风切变,并阻止了扰动中心从南海南部向婆罗洲附近转移。而且,它减弱了冷干空气侵入下的稳定效应。以往研究已经指出,在MJO活跃阶段,较强的赤道西风可能导致较强的气旋性切变涡度,从而,可以触发更多的对流活动和更多的涡旋形成。尽管较多的涡旋或云团对于导致一个单独的涡旋发展成热带气旋并非必要,但这种有

利的天气环境对于初始涡旋的进一步发展是重要的。

自然年代际变化和人为因素对中国夏季降水的共同影响——I: 观测事实——Exploring the Interplay between Natural Decadal Variability and Anthropogenic Climate Change in Summer Rainfall over China. Part I: Observational Evidence. *Journal of Climate*, 2011, Vol. 24, No. 17.

20世纪,中国的夏季降水在较长时间尺度上发生了很大的变化。这种变化是由自然内在因素引起的,还是人为气候变化信号的一部分,这仍然是一个未知数。雷丁大学的Lei等使用高质量的观测数据,研究了夏季降水的年代际变化和近来的变化趋势,重点关注了日降水的季节演变特征,重新评价了降水变化与全球变暖的关系。研究发现,1958—2008年间,中国夏季降水发生了非常大的年代际变化,不过这种大的年代际变化特征在20世纪初期(1950年代以前)也有出现。经过EOF分析,发现了与近来南方洪涝和北方干旱有关的两个主导格局。除了降水强度和频数(特别是小雨日数)以外,降水的其它变化特征可以归因于自然年代际规律。而中国大部分区域(特别是北方)的降水强度的增加,小雨日数的减少,至少部分与人为原因(例如全球和区域尺度上的温室气体排放和气溶胶增加)有关。

COSP: 用于模式评估的卫星观测模拟器——COSP: Satellite simulation software for model assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, Vol. 92, No. 8.

IPCC第四次评估报告指出,GCMs中云模拟的误差是一个长期存在的问题,充分理解产生这些误差的物理过程是非常必要的。为此,云反馈模式比较计划(CFMIP)发展了CFMIP观测模拟器(COSP),COSP能够模拟主动和被动遥感所观测的变量。Hadley中心的Bodas-Salcedo等对COSP进行了简要描述,提供了一些COSP在数值模式中的应用结果。COSP是一个灵活的工具,为所有传感器提供通用接口,使其便于使用在任何类型的数值模式中,覆盖了从高分辨率的云模型,到IPCC评估所采用的低分辨率的GCMs,以及天

气预报和区域模拟之间的各种尺度。模式参数化方案的差异使得模拟和观测间的对比变得困难,一些参数化变量(比如云量)在不同模式中往往具有不同的意义。COSP使用的方法允许各种模式以更一致的方式评估观测以及模式之间的相互对比,允许对数值模式中云和降水行为的物理过程进行更详细的诊断。因此,世界气候研究计划(WCRP)耦合模式工作组推荐下一次IPCC报告中的气候模拟试验使用COSP。COSP可以从CFMIP网站下载(<http://www.cfmip.net>)。

中国东部城市化引起的气候变暖——Observed surface warming induced by urbanization in east China. *Journal of Geophysical Research*, 2011, Vol. 116, D14113.

使用中国东部463个气象站的月平均气温观测数据以及NCEP/NCAR再分析数据,上海台风研究所的Yang等分析了快速城市化进程对温度带来的影响。基于DMSP夜晚灯光数据和人口统计资料,将463个气象台站分为特大城市,大城市,中等城市,小城市,郊区和农村等六种类型。利用观测减去再分析(OMR)、城市减去农村(UMR)方法检测了城市化对温度产生的影响。研究发现,利用这种客观和动态的站点分类方法,观测和再分析数据对于农村的温度趋势显示了很好的一致性,表明再分析数据能有效捕捉农村区域的温度变化。使用OMR和UMR方法得到的城市热岛(UHI)效应基本一致,显示中国东部的迅速城市化对地表变暖具有显著影响。总体而言,UHI效应对区域平均变暖趋势的贡献约占24.2%。最显著的UHI效应出现在21世纪初期。城市化对年均温影响最强烈的区域发生在特大城市和大城市,相应的贡献分别占44%和35%,UHI趋势分别达到了0.398°C/10年和0.26°C/10年。

北方高纬度陆地对大气CO₂的吸收正在减弱?——Is the northern high-latitude land-based CO₂ sink weakening? *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, Vol. 25, GB3018.

作为全球最大的陆地碳汇,北方高纬度陆地生态系统吸收的大气CO₂占全球陆地净吸收的60%。然而,在

这些区域,碳循环的主要驱动因素近年来正在发生显著变化,例如,该区域气温的显著升高明显大于全球平均水平,生态系统扰动的频率和严重程度也在不断增加。在这种背景下,无论是北极苔原还是北方森林生态系统,对大气CO₂的吸收是否一如既往,这不得而知。阿拉斯加大学的Hayes等使用陆地生态系统模型(TEM)模拟发现,该区域过去几十年对CO₂的吸收可能被高估了。对大气CO₂吸收减少的原因是气候变暖,气候变暖不仅增加了土壤有机质分解,而且可能导致北方森林火灾频发,加强了CO₂的排放。这种变化对气候变暖产生了正反馈,进一步加大了减排的压力。

印度夏季风季节前期和后期的太平洋海温异常与降水的可预测性——Pacific Ocean sea-surface temperature variability and predictability of rainfall in the early and late parts of the Indian summer monsoon season. *Climate Dynamics*, 2011, DOI: 10.1007/s00382-011-1194-y.

科罗拉多大学的Rajagopalan和Molnar研究发现,对于印度中部及其西海岸地区,季风季节前期(5月15日—6月20日)和后期(9月15日—10月20日)的降水分别与前一个月(4月,8月)的太平洋海温异常具有显著的相关关系,因此可以使用海温异常来预测降水。海温异常与降水相关最好的区域为日界线附近的赤道地区。尽管1980年以前所有印度季风降水与ENSO指数的相关普遍强于1980年以后,但季风季节前期和后期的相关表明ENSO事件继续影响着这些季节内的季风活动。与气候学预测相比,4月(8月)太平洋特定区域的海温异常对于季风季节前期(后期)的降水量的预测技巧提高了25%,对于大于2.5mm降水天数的预测技巧提高了20%。

华北平原雾和灰霾的形成原因分析——Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11, No. 15.

为理解气溶胶粒子在雾和灰霾形成中的作用,北京城市气象研究所的

Quan等分析了1954—2009年间中国华北区域雾和灰霾的发生特征。研究发现,雾和灰霾的发生具有非线性的关系。如果灰霾的发生频率低于40天/年,则雾的发生频率和灰霾的发生是强烈相关的。如果灰霾的发生频率高于75天/年,则雾的发生对灰霾的发生并不敏感。实地试验表明,在雾和灰霾混合出现的天气情形下,大气具有相当高的气溶胶浓度,平均气溶胶粒子数浓度达24000cm⁻³。大量的气溶胶粒子扮演了凝结核的角色,有利于雾滴的形成。在雾阶段,观测到了大量(>1000cm⁻³)的小尺寸(5~6μm)雾滴,这导致了低能见度(<100m)天气的发生。

夜间温度冷却率对局地尺度上城市土地利用变化的响应——Analyses of Nocturnal Temperature Cooling-Rate Response to Historical Local-Scale Urban Land-Use/Land Cover Change. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, Vol. 50, No. 9.

城市热岛效应通常用城市区域和农村区域的温度之差来衡量。其中,一个重要的问题是城市和农村的判定,特别是判别与城市邻近的农村区域尤为困难。亚利桑那州立大学的Chow和Svoma提出了一种新的判别方法——地表温度的冷却率/升温率,其大小可以通过直接测量土地利用变化后的温度变化得到。研究使用TM/ETM影像检测了位于Arizona州Phoenix市几个气象站及其500m缓冲区内的土地利用变化,并分析了它们在理想晴空和稳定天气条件下的夜间近地表气温的变化,也同时考虑了近地面风对温度的影响。结果显示,城市区域比农村区域具有更低的夜间温度冷却率,夏季的平均夜间温度冷却率通常高于冬季。城市化也使夜间城市平均风速发生了显著变化,这也可能对局地尺度上的温度冷却率造成影响。

气象学者早期高空科学观测

■ 史一卓 编译

1862年两位英国人詹姆斯·格雷休 (Sir James Glaisher, FRS, 1809—1903) 和亨利·考科斯维尔 (Henry Coxwell) 乘坐气球, 没有借助任何呼吸工具, 上升到了30000英尺 (9144米) 的高空, 创下了当时乃至之后几十年的纪录。

格雷休是英国皇家气象学会和英国皇家航空协会的创始人之一, 1838年至1874年期间担任格林威治天文台气象和地磁部门的负责人。考科斯维尔是一位经验丰富的气球驾驶人。



詹姆斯·格雷休

1862年9月5日, 二人乘坐的气球从英国伍尔弗汉普顿升空, 当地一家煤气厂的经理为他们的热气球提供了高质量的燃气。穿过云层后, 他们受到了强烈的阳光照射, 升空后19分钟, 他们到达了10560英尺 (3218米) 的高度。当气球上升到21000英尺 (6400米) 时, 空气变得更加稀薄, 气温也明显下降, 但是他们仍继续上升。当气球升到26000英尺 (7925米) 时, 阀门线被缠在了绳子上, 两个人意识到他们必须要把阀门线解开, 不然他们就可能会控制不了受燃气释放推动而迅速上升的气球了。考科斯维尔爬到缆绳上去松开阀门线, 格雷休继续使用气压计和气温计等仪器进行观测。他想要研究大气中电和氧气的含量, 以及在不同海拔大气电流的方向和电荷。二人记录下了云层的种类、高度、密度以及厚度。很快, 他们升到了29000英尺 (8840米) 的高空, 那里的空气非常

之稀薄, 温度也到了零下。格雷休发现他无法读取仪器了, 而且他的四肢也失去了知觉, 他试图向同伴求救, 但已发不出声音, 这是严重缺氧带来的后果。考科斯维尔也试着解开阀门线, 但他的双手也因低温而不听使唤。最终, 他用自己的牙齿拽动阀门线, 让燃气从气囊中释放出来, 气球这才开始缓慢地下降。从30000英尺 (9144米) 的高空, 两个失去知觉的人乘坐着气球慢慢下降到了氧气含量较高的低层大气中。

格雷休后来这样描述此次观测: “我……看着气压计, 发现上面的数字已经达到了9¼ 英寸 (24.8厘米), 而且还在快速下降, 这说明当时我们已经到达了29000英尺 (8839米) 以上的高空。我把胳膊放到桌子上, 不论怎样努力, 也无法让它听从指挥了——肯定是暂时失去力量了。我试着移动另一条胳膊, 发现它也无法动弹了。然后我试着摇晃自己, 我做到了, 但却像没有四肢一样。读取气压计的时候我的头歪向了左肩, 我试着再次摇晃身体, 但胳膊还是不能动。我的头也只是直了一下, 就又垂向了我的右肩; 然后我开始向后倒, 我的背靠在了吊仓的侧面, 头靠在了吊仓的边缘。

当我开始再次摇晃身体时, 背部的肌肉和脖子似乎重新获得了能量, 但四肢还是感觉无力。然后背部和脖子的能量又在一瞬消失了。我模模糊糊地看着考科斯维尔先生, 试图跟他说话, 但是发不出声音。在一瞬间, 我的眼前一片漆黑, 视觉神经也失去作用了, 但我当时还是很清醒, 我的大脑就像现在写这些时一样活跃。我觉得我快要窒息了, 如果不赶快下降, 我们必死无疑; 当时我的脑子里还有其他想法, 但突然就失去了意识, 就像睡着了一样。”

虽然没有人敢百分之百地肯定, 但在当时人们公认他们上升到



了30000英尺 (9144米) 的高空, 并成为了首次进入平流层的人类。不论具体的高度是多少, 当时53岁的格雷休和44岁的考科斯维尔已经达到了人类在不借助任何呼吸仪器的前提下所能达到的最高海拔。

虽然他们之后还进行了其他的升空活动, 但已不可能再达到这一次的高度了。想必当初二人也没有想到气球会带着他们上升到如此的高度吧。

这项升空高度记录一直保持到了20世纪。1901年同为普鲁士气象研究所研究人员的波兰气象学家亚瑟·约瑟夫·斯坦尼斯劳斯·博森和莱因哈德乘坐气球升到了35500英尺 (10820米) 的高度。1931年, 瑞士的奥古斯德·皮卡德乘坐加压铝吊舱的气球上升到了53139英尺 (16197米) 的高度, 再一次刷新了纪录。

深入阅读:

Rolt L T C. 1985. Brunswick: Alan Sutton Publ. The Aeronauts.

Jennifer Tucker. 1996. Wesleyan University Social Sciences Faculty Publications. Voyages of Discovery.

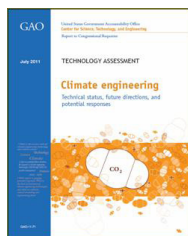
www.centennialofflight.gov/essay/Lighter_than_air/early_scientific_balloons.

Chris Argent. 2011. Early Balloon-borne Scientific Measurements. Space Research Today, August 2011.

(作者单位: 中国气象报社)

《自然》2011年8月25日

本期的封面报道，给出了美国哥伦比亚大学学者及合作者最新关于全球气候与人类暴力行为分布之间关系的研究成果。研究基于1950—2004年热带国家的数据，分析发现在厄尔尼诺年民间冲突发生的概率是气温较低的拉尼娜年的2倍。ENSO可能在引发1950年以来所有民间冲突中的21%起了一定作用。这项研究是关于现代社会的稳定性与全球气候相关的首次证明。

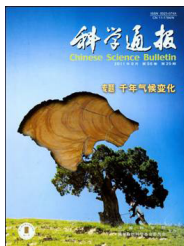
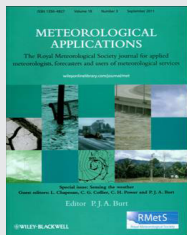


《气候工程：技术现状、未来方向和潜在反映》

美国审计总署（GAO）2011年发表的这篇技术评估报告，全面介绍了气候工程的概念、科学基础，特别对气候工程的各种技术手段进行了全面评估。报告认为目前的气候工程技术还不能让全球气候变化发生可见的改变，但这些技术的研究是迫切的需求。其中，报告特别指出，这些研究中，气候模式和资料的改进必不可少。

《气象应用》2011年第3期

英国皇家气象学会（RMetS）主办的《气象应用》杂志，推出“探测天气”（Sensing the weather）专辑。专辑编辑语认为，过去50年里，基于卫星和空基平台的探测新技术，给传统天气观测网带来了革命，天气探测的时空尺度发生了根本性改变。本专辑着眼于这些新技术和新方法，对对流层探测的多个探测领域里的新进展进行了评介，展望了未来发展的趋势。（网上阅读：<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.v18.3/issuotoc>）

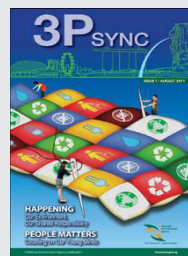


《科学通报》
2011年第25期

本期为“千年气候变化”专辑。中国气象科学研究院周秀骥院士在为专辑撰写的“中国地区千年气候变化特征与规律”编者按中指出，全球气候变化研究已经成为当代科学的前沿。2009年实施的“中国地区树轮及千年气候变化研究”项目试图揭示中国地区千年气候变化特征、规律和机理，并探索建立气候变化的非线性动力学预测方法。专辑的8篇论文是项目两年来的部分成果。

3P SYNC电子杂志

新加坡气象部门推出了名为3P SYNC的数字杂志。推出这本网上季刊的主要目的，是号召读者保护新加坡环境，在日常生活中为环境的可持续性做出贡献。杂志倡导环境友好型生活方式，做环境的保护者。（网上阅读：<http://www.cgs.sg/Magazine/>）

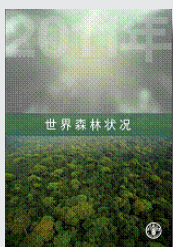
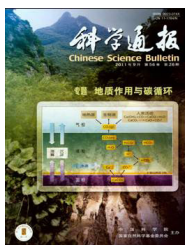


媒体扫描

MEDIA SCAN

《科学通报》
2011年第26期

本期为“地质作用与碳循环”专辑。大气温室气体浓度升高与全球气候变化相互关系的探讨，使地球系统的碳循环受到越来越多的关注。地球系统的碳循环是指在岩石圈、水圈、大气圈和生物圈之间各种形式的碳相互转换和运移的过程。从17世纪开始认识CO₂，1799年发现光合作用以来，人类对碳循环的探索已接近400年。阅读本期的8篇论文，可以对这一认识过程有一个很好的梳理。



《世界森林状况》
2011年版

联合国粮农组织每两年编辑出版《世界森林状况》，主要介绍影响世界森林重要主题的最新信息。2009年版的主题是“社会、森林和林业：适应未来”，从“需求方”的视角分析了森林趋势和相关论题。2011年版则以“途径在变化，生活在改变：森林支持可持续发展的多种途径”为主题，全面地分析了森林改善人民生计的多种途径。联合国大会已将2011年确定为“国际森林年”，希望以在其他国际舞台开展的涉及气候变化和生物多样性活动为契机，给世界森林以更多关注。

《水文科学杂志》
2011年第4期

本期推出“水危机：从对抗到合作”专辑。目前地球上的淡水总量和凯撒大帝统治古罗马时是一样的，然而，2000年来世界人口从2亿左右增加到近70亿。实际上，1950年前后世界人口和经济的大幅度增长，在很大程度上是因水工程推进的，如大坝蓄水、运河输送水、水泵获取地下水。1950年以来，全球水坝数量以每天增加2座的速度，从5000座增加到大约50000座。本期专辑的14篇论文，从多个角度重新审视了过去半个世纪以来全球的水规划和管理行为，对未来的机会和挑战进行了前瞻性研究。



《中国科学：地球科学》
2011年第9期

位于亚洲内陆的华北及蒙古因极端干旱的气候而成为世界上最主要的沙尘来源之一。本期以评述论文方式，综述了地球化学方法在亚洲风尘物源研究中的应用。文章认为，Nd-Sr同位素示踪体系研究最为深入，并取得了大量成功的应用，碎屑矿物地球化学在理论上具有较大的示踪优势，值得进一步研究。物源示踪还发现亚洲风尘最终来自青藏高原北缘和中亚造山带物质，进一步确认了造山过程制造粉砂物质的重要性。根据亚洲风尘物源示踪的最新进展，文章针对现代风尘来源的自然背景与人为因素、亚洲风尘源区物质演化及其与气候变化和青藏高原抬升的关系，以及青藏高原在亚洲风尘系统中的重要地位等问题展开讨论。

IPCC:《可再生能源与减缓气候变化》报告出版

在南非气候大会召开前夕，政府间气候变化专门委员会（IPCC）发表了《可再生能源与减缓气候变化特别报告》（SRREN）。报告全面回顾了可再生能源的资源和技术、相关成本和效益，及其在一套减缓选择组合中的潜在作用。报告对各种技术和情景所涉及的成本和温室气体排放的详尽叙述，第一次向世人证实了可再生能源的重要作用。报告的中文摘要版已翻译完成。



Supervisor China Meteorological Administration (CMA)

Sponsor CMA Training Centre

Honorary Editor Chou Jifan

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng

Associate Editors

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

Managing Editors

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

Editors

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

Overseas Editors

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

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Hu Ying, Su Shipo, 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 20.00

Main Contents

Message from the Editor-in-Chief

Article

- 6 Li Bai et al/A Review of Yangjiang 8th International Radiosonde Intercomparison
- 14 Ding Yihui/ Progress and Prospects of Seasonal Climate Prediction
- 28 Wang Shaowu/ Climate Change Affects Crop Production and Its Adaptation
- 31 Yu Xiaoding/ Detection and Warnings of Severe Convection with Doppler Weather Radar
- 42 Zou Xiaolei/ Satellite Measurement Precision Parameter “NEDT”
- 45 Tao Li et al/ Diagnostic Analysis of a Heavy Rainfall in Southern Sichuan of China Induced by Southwest Vortex
- 50 Fang Meng/ Analysis on Meteorological Satellite Data Sharing Service in China

Forum

- 55 Luo Yunfeng et al/ NOAA's Next Generation Strategic Plan

Feature

- 58 Hou Jinfang/COMET Program

Reading

Book Review

- 59 Zhao Haiyan/ Crop Adaptation to Climate Change

Information

- 27 New Publication
- 54 A New Name of CMA Training Centre
- 60 Selected Papers

History

Event

- 64 Shi Yizhuo/ Early Balloon-borne Scientific Measurements by Meteorologists

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking
- 41 Fast Breaking Papers in Geoscience