

Advances

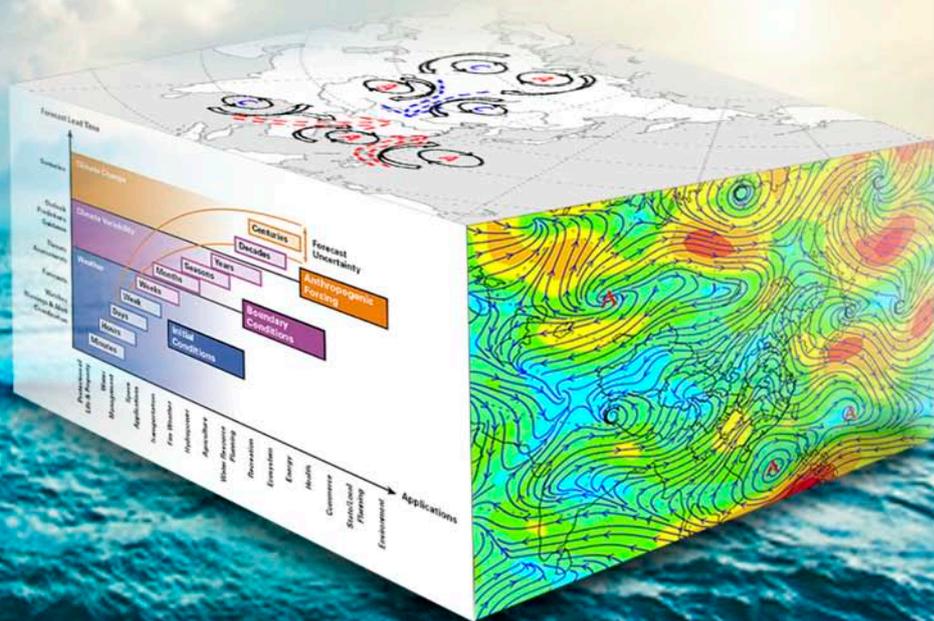
in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

No.1

2013年2月
第3卷 第1期

延伸期预报



气象科技 **进展**
Advances in Met S&T

ISSN 2095-1973



9 772095 197132

02>

中国气象局气象干部培训学院 主办

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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

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

常务编委 (按音序排名)

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

编委 (按音序排名)

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

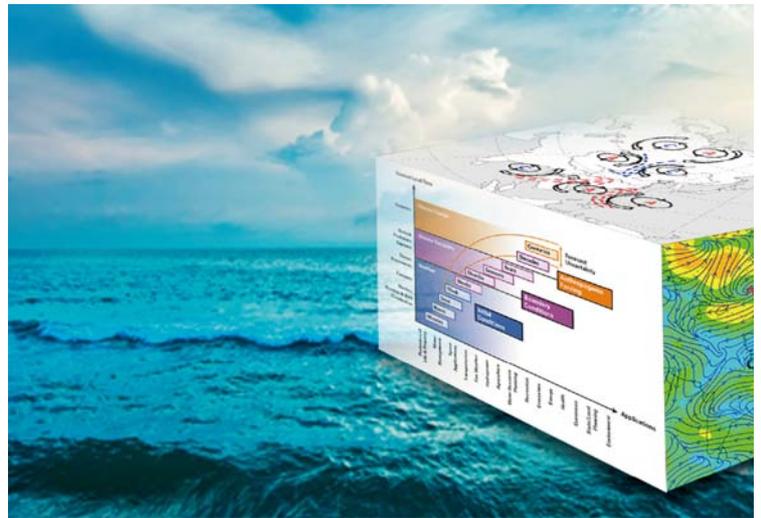
海外编委 (按音序排名)

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

编辑部

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

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



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

目 次

第3卷 第1期 2013年2月
(延伸期预报 专辑)

研究论文

封面报道

- 6 孙国武, 李震坤, 信飞, 何金海: 用低频天气图方法进行延伸期预报的探索

在应用低频天气图制作上海地区5年(2008—2012年)夏季强降水过程延伸期业务预报的基础上, 进一步探索了低频天气图方法在使用过程中的技术规则、技术要点和技术方法……

研究进展

- 11 何金海等: 延伸期预报的思考及其应用研究进展
18 康志明等: 我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势
25 郑志海: 月动力延伸预报研究进展回顾
31 梁萍等: MJO在延伸期预报中的应用进展
39 高建芸等: 2010年福建前汛期典型持续性暴雨过程的低频特征分析
46 陈伯民等: 月内重要天气过程与气候趋势预测系统及应用进展
52 信飞等: 经验正交函数分解在上海地区低频天气图方法中的应用
57 杞明辉等: 利用MJO活动规律进行云南雨季开始期的延伸期预测试验

短论

- 64 胡春丽等: 低频天气图方法在辽宁夏季延伸期强降水预报中的应用

主编语

随着近几十年来在中短期数值预报业务上获得的巨大成功,对于3~10天的大尺度环流形势预报,预报员的改进余地已很有限,以数值预报的结果作为判断依据成为最佳选择。但若预报时效再延长一些呢?对于超过10天的预报,动力模式尚难以完全覆盖到,按照洛伦茨提出的混沌理论,两周以后,数值模式将失去初始记忆。用什么方法来弥补这一段尚够不到月以上长期预报的缝隙呢?本期发表了多篇关于“延伸期预报”的文章,试图探讨和介绍这一问题 and 目前已取得的进展。

从历史的角度审视延伸期天气预报,可以“动感”地看到这项业务的进步。从字面上理解,“延伸期”预报即常规预报在时间上的延伸。从20世纪中叶开始,现代天气预报业务逐渐在世界各国普及,那时的预报时效一般不超过3天,若是展望一周的预报,就涉及到延伸期了。气象科学的进步,推动着预报技巧的提高,预报时效约每十年可延长1天,进入到21世纪,数值天气预报模式的时效,已达到7天以上。目前WMO定义的延伸期预报,是指10~30天的预报。这一方面是基于目前的数值预报模式能力,另外也与随着预报时间尺度的改变,预报所依据的方法会有所改变,以及需要克服大气运动本身的混沌本质等有关。无论怎样,延伸期预报是实现“无缝隙天气预报”的重要环节,从中短期天气预报跨越到月以上的长期预报,不能遗漏这一时段。

目前,延伸期预报方法呈现出多样性特征。一方面是由于在理论和实践上尚不成熟,业务化的水平也很有限,延伸预报产品大多只能提供参考;另一方面,在经济社会的现实中又有着巨大需求,带动了业务部门积极开展探索与试验,并取得了一定成效。其中,本期封面报道文

章(P6)介绍的低频天气图方法在延伸期预报中的应用就是其中一项有代表性的工作,已在一些省(市)预报业务中得到应用,本期选取了福建(P39)、上海(P46、P52)、辽宁(P64)等省(市)应用低频天气图方法开展延伸期天气预报取得的效果进行介绍。

除了低频天气图等以统计为主的方法以外,还有一些研究和预报实践,借鉴和吸收了近年来海气相互作用研究理论和利用强信号作为突破口。例如,MJO作为一种典型的热带大气季节内振荡现象,其对延伸期预报具有重要意义(P31),研究和业务人员已经将其应用于云南雨季开始期预测(P57)并获得成效。另外,本期的几篇综述文章回顾了延伸期预报的可预报性、不同预报方法(P11)、我国延伸期预报的业务现状以及发展趋势(P18),特别是模式预报方法的进展和思路(P25),这些内容又和国际上以“月预报”和“季节预报”为特征的发展(P72)一脉相承。国内外延伸期预报呈现的多彩格局(P70)在本期文章中得以体现。

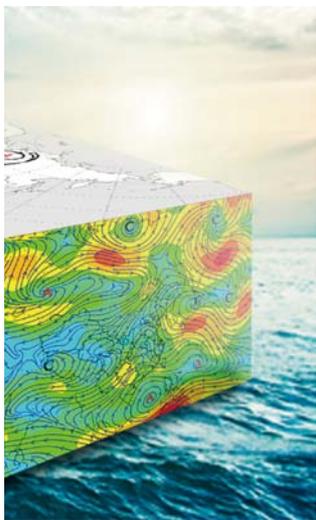
本期“论坛”栏目的文章是基于年轻气象工作者与丑纪范院士交流的摘录(P68),从早期的极锋理论、长波理论,到目前的数值预报,大气科学百年来的发展脉络跃然于纸上。

本刊从本期开始,正式扩版到每期80页。

兰州干旱气象研究所和上海市气候中心对本期文章给予了积极的支持和帮助,在此深表谢意。

2012年岁末,我们和读者一起怀着沉痛心情,送走了新中国气象事业奠基人之一——陶诗言院士,本期摘登了“怀念陶诗言先生”一文(P75),向陶先生表示深切的敬意和哀思。

许小峰



P6

封面报道:用低频天气图方法进行延伸期预报的探索

封面图:延伸期预报



P2

科学观察

2 读图 数字 榜单

论坛

68 钟琦等:极锋理论—长波理论—数值预报的发展和内在联系

特写

70 胡英等:“延伸期预报”主题文献计量指标分析

阅读

书评

72 贾朋群:大展宏图正当时

——欧洲中期天气预报中心关于季节预报学术会评介

信息

24 会议信息

51 下期要目

63 新书架

76 文摘(中文文献)

78 文摘(英文文献)

80 《气象科技进展》2012年主要内容回顾

封3 媒体扫描



封3

往事钩沉

人物

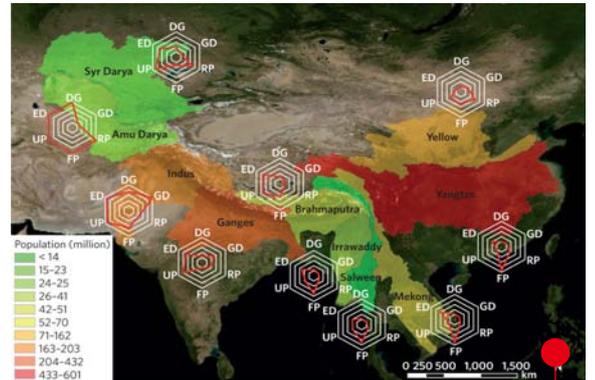
75 怀念陶诗言先生



固体降水对比观测拉开序幕

世界气象组织最近启动的一项历时两年的“固体降水相互对比试验 (Solid Precipitation Intercomparison Experiment, SPICE)”，将在全球不同地点布设的15个最先进的雪观测站 (如图) 之间开展对比试验，这些站最高位于海拔4318m处。试验的目的是让降雪和雪深的观测更为准确。SPICE项目目前在青藏高原上还没有站点，这是一个很大的欠缺，科学家表示，他们试图年初在高原建立覆盖该地区，最高观测点位于6000m高度的雪观测网，以扩展SPICE项目。

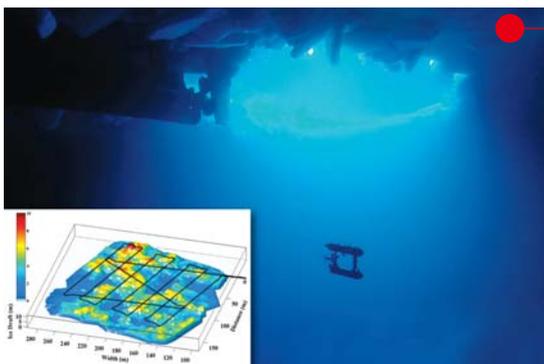
来源: WMO



亚洲流域水平衡

来自荷兰和瑞士的学者，以源自亚洲高山的10个主要亚洲河流域为例，研究了当今和未来水平衡问题。图中给出这些流域的人口 (2000年，用不同颜色表示) 与水短缺敏感性因子之间的关系：这些因子包括冰川融化 (DG)、地下水消耗 (GD)、水库潜能 (RP)、未来降水 (FP) 和未来降水不确定性 (UP) 等自然要素，以及用GDP和人口增长表示的经济发展因子 (ED)。

来源: Nature-Geoscience



南极海冰探测：从下向上看

虽然卫星资料能够探测南极海冰面积的变化，但是针对海冰厚度却无能为力。最近，一项为时7周的海冰物理和生态系统试验 (Sea Ice Physics and Ecosystem eXperiment II, SIPEX)，巧妙地利用以前用于海底探测的水下自动探测车 (autonomous underwater vehicle, AUV)，只是将其探测探头从探测车的底部移到顶部，在南大洋水下20m处，利用多束声纳获得了首张南极海冰底部3D地图 (小图)，从而得到了海冰体积的关键数据。

来源: Science



Nature年度图像：极端天气气候引关注

北极破裂的海冰和这幅表现美国壮观天气现象的图像都被推上榜。2012年全球气候变化和极端天气的发生，带来的改变随处可见，借助Instagram、Facebook和Twitpic等图像信息传播工具，这些现象第一时间能够让让更多的人分享。而如此多的与气象灾害相关的图片引起关注，除了自然造物的魅力使然之外，似乎还预示着什么，可能这也是科技期刊选择上榜图片的特别视角。

来源: Nature

数字

第4

大型气候纪录片《环球同此凉热》一经播出，获得广泛关注和好评，根据视频网站“爱奇艺”的统计，该片首播期间视频点击突破250万次，排名纪录片风云榜第四。

89个

近期召开的地球观测系统组织 (GEO) 第九届全体会议透露，该组织2012年成员国和地区达到89个，覆盖了全球大部分地区。此外，还有67个组织加入GEO，使得该组织的国际化程度得到空前的加强。

140%

世界气象组织针对2011年大气温室气体排放发表的报告指出，该年大气中二氧化碳的浓度达到390.9ppm，是工业化前水平的140%。报告指出，自1750年工业革命开始以来，人类活动已向大气中排放了相当于2750亿吨的二氧化碳。

国际“延伸期预报”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	Radiative forcing and climate response	Hansen, J	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1997, 102(D6)	703
2	Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation	Kiladis, GN	Journal of Climate, 1989, 2(9)	596
3	Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber-frequency domain	Wheeler, M	Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(3)	524
4	An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction	Wheeler, MC	Monthly Weather Review, 2004, 132(8)	333
5	The description of the navy operational global atmospheric prediction systems spectral forecast model	Hogan, TF	Monthly Weather Review, 1991, 119(8)	271
6	The prospects for seasonal forecasting - a review paper	Palmer, TN	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1994, 120(518)	221
7	ENSO and hydrologic extremes in the western United States	Cayan, DR	Journal of Climate, 1999, 12(9)	211
8	Extended-range atmospheric prediction and the Lorenz model	Palmer, TN	Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(1)	190
9	Gregarious tropical convection	Mapes, BE	Journal of the Atmospheric Sciences, 1993, 50(13)	176
10	Tropical extratropical interaction associated with the 30-60 day oscillation and its impact on medium and extended range prediction	Ferranti, L	Journal of the Atmospheric Sciences, 1990, 47(18)	173

来源: SCIE数据库, 检索时间: 2012年12月7日

胡英、李婧华提供



生物圈2项目关键流域试验启动

曾经让很多人期待的生物圈2项目 (Biosphere 2), 经过几年争执和停滞后终于再次启动。项目科学家设计为期10年的“景观演化观测 (Landscape Evolution Observatory)”项目, 借用一个位于沙漠的巨大的玻璃塔 (上图) 开展各种试验, 建筑体内有3个长33m的山坡 (下图), 每个山坡嵌入了1800个传感器。借助这一装置进行的人造流域试验, 将有益于人类认识生态、水文和土壤之间的相互作用。

来源: Biosphere 2



全球气候变化保险业: 2万亿美元规模

灾害发生的风险, 对保险业就是机会。截至2012年10月, 全球有51个国家378个实体, 通过总计1148个项目 (始于1973年, 但大部分项目是在过去10年内出台的) 的实施, 构成了全球气候变化适应和减缓保险业的格局, 保险收入达到2万亿美元, 从业人员为250万人。图中给出这些项目按照种类和国家的分布。

来源: Science

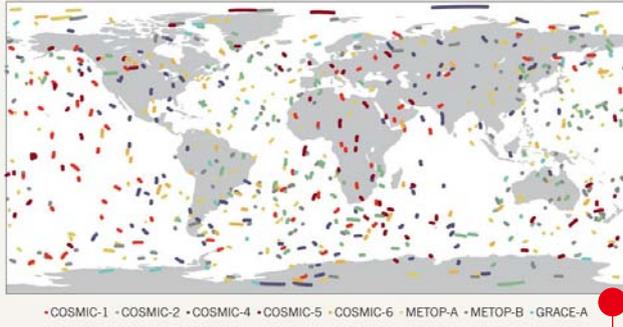
5岁 已经被全球地学领域科学家熟知的《自然—地学》杂志, 已经5岁了, 为此, 该刊通过专门网页给出《自然—地学》10篇最受欢迎的论文。5年里来稿量从2007年创刊开始时的396篇, 增加到2012年的1662篇。

20年 20多年前的1991年, 载有雷达高度计的地球资源1号卫星 (ERS-1) 升空。欧洲空间局开展了包括召开主题学术会等一系列纪念活动, 纪念卫星雷达高度计探测20年取得的进步。

100年 印度气象局最新发表了印度降水数据光盘, 该套资料给出1901—2000年共100年印度降水资料, 包括印度各地月、年和季节降水系列数据。

A GLOBAL VIEW

Over the course of just six hours, a handful of satellites can observe radio signals as they penetrate the atmosphere at multiple locations over land and sea, providing data that blanket the globe.



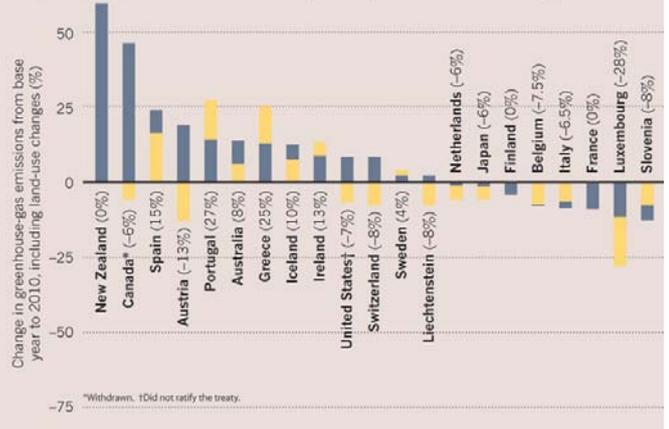
无线电掩星技术：填补气象观测资料空白

进入太空的越来越多的人造卫星有些朝向地球以外，但大多数对准地球，其中“气象、电离层和气候卫星群观测系统”（Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate, COSMIC）卫星瞄准的是地球边缘，探测射线长距离穿越大气层，利用掩星技术可以获得全球分布的大气信息。图为目前卫星群在6小时内获得大气信息点的分布。

来源：Nature

UNEVEN PROGRESS

The nations with binding limits under the Kyoto Protocol reduced their overall greenhouse-gas emissions by 16% from 1990 levels, but many are likely to miss their individual targets.



《京都议定书》答卷：目标试验的结果

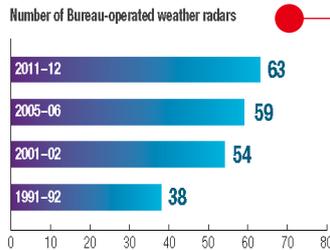
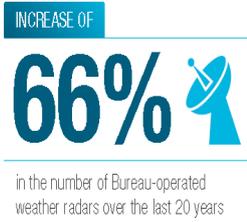
总计37个国家签署的《京都议定书》，是全球面对气在该议定书第一承诺期到2012年结束的时候，可以梳理一严重的不平衡。图中国家名称后的括号内比例，为各国承整体减排的比例为16%。



CLAREO：瞄准气候变化不确定性

2007年IPCC在第四次评估报告指出，云反馈仍然是最大的不确定性来源。目前这种状况仍然改变很少，例如，同样CO₂加倍，GFDL和NCAR模式分别得到低云量减少和增加的相反结论，导致的全球变暖幅度也分别为4K和2K。为此，在最近一次COSMIC会上，科学家描述了在2016年前后升空的CLAREO（气候吸收辐射和反射率观测）使命卫星，其设计的各种高精度的观测数据，将为减少气候变化的不确定性带来新的科学机会。

来源：COSMIC



澳大利亚：天气雷达网已成规模

位于南半球的澳大利亚国土广阔，而相对较少的人口分布在沿海城市。进入21世纪，随着灾害性天气多发和造成损失加大，澳大利亚气象局加快了天气雷达站的建设，图中给出了过去20年的4个时间点雷达数量。此外，2012年全国水文监测站的数量，也在2011年2250个的基础上，增加到2788个。

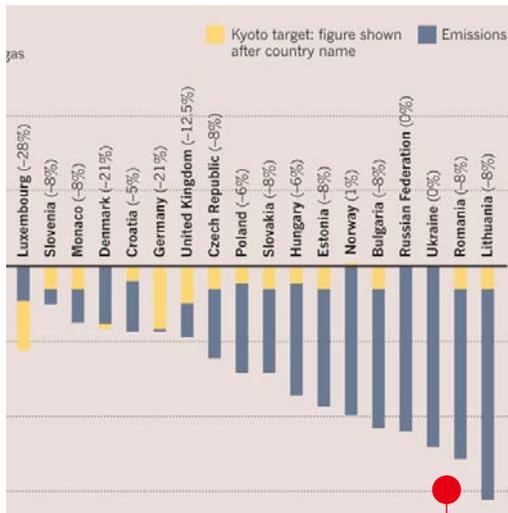
来源：澳大利亚气象局2011—2012年年报

数字

3.5% 2012年我国碳强度至少下降3.5%，这是国家发改委副主任解振华在国务院新闻办公室的一次发布会上提到的。2011年全国能耗强度下降了2.1%，我国包括气象在内的各领域适应气候变化的能力得到了进一步提升。

10% 根据2012年底公布的重点在调整能源结构和发展低碳经济的新能源法案，英国政府希望到2030年国内电力需求减少10%，为此在未来10年内将投入1100亿英镑。

15% 多哈会议虽然取得了就《京都议定书》第二承诺期达成共识等成果，但是美国，以及日本、俄罗斯和加拿大等主要碳排放国家退出议定书的格局没有改变，导致修正的议定书中受到约束的发达国家，其排放仅占全球排放量的约15%。



气候变化通过的具有法律约束力的国际协议，下签约国履行其承诺的实际情况，可以发现承诺的相对1990年水平减排的比例，协议国家

来源：Nature

中国“延伸期预报”主题被引频次最高的前11篇论文

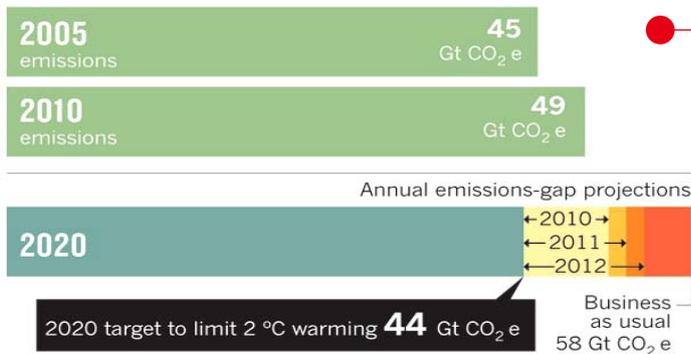
排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	动力延伸预报产品释用方法的研究	李维京	气象学报, 1999/03	74
2	近五十年来华北地区旱涝特征与全球变化的研究及对未来趋势的探讨	孙淑清	高原气象, 1999/04	65
3	降尺度技术在月降水预报中的应用	陈丽娟	应用气象学报, 2003/06	61
4	我国短期气候动力预测模式系统的研究及试验	丁一汇	气候与环境研究, 2002/02	44
5	月动力延伸预报产品的评估和解释应用	陈丽娟	应用气象学报, 1999/04	40
6	多模式温度集成预报	赵声蓉	应用气象学报, 2006/01	35
7	位涡诊断在云南夏季强降水预报中的应用	范可	高原气象, 2004/03	29
8	相似-动力模式的月平均环流预报试验	鲍名	科学通报, 2004/11	26
9	基于多个参考态更新的动力相似预报方法及应用	任宏利	物理学报, 2006/08	25
9	改善月动力延伸预报水平的一种新途径	陈伯民	科学通报, 2003/05	25
9	1991年江淮暴雨期间环流异常的动力延伸预报试验	章基嘉	气象学报, 1994/02	25

来源：CNKI中国学术期刊总库，检索时间：2012年12月5日

胡英、李婧华提供

EMISSIONS GAP GROWS

The chasm is widening between cuts in greenhouse-gas emissions needed by 2020, and those projected in each of the past three years on the basis of existing carbon-saving policies.



Gt CO₂e = Gigatonnes of carbon dioxide equivalent

减排缺口在加大

在2012年末多哈会议召开同时，联合国环境署（UNEP）发表的报告显示，各国承诺的减排保证尚不足以“很可能”（大于66%的可能性）将全球温度升高限制在2℃以内。到2020年以前，全球年排放不能高于44 Gte，然而最严厉的承诺距离目标还有8 Gte的差距，这一差距自从2011年以来在增加。

来源：UNEP

41~47 Gt CO₂e/yr

虽然实现将地球升温幅度控制在2℃以下这一长期目标，很多研究给出到2020年短期排放的水平在41~55 Gt CO₂e/yr之间，但是瑞士、奥地利和美国等科学家最新研究，将这一范围缩小到41~47 Gt CO₂e/yr。

3500 亿元

2012年末颁布的我国首部大气污染综合防治规划划定了13个大气污染防治重点区域，确定了到2015年的目标。规划项目13369个，投资约3500亿元。

7 周

全球每年流感可能导致25~50万人死亡，对这种在温带地区呈季节性爆发的疾病的预测，美国哥伦比亚大学公共卫生学院的学者借助天气预报同化技术建立的新模式，可以提前7周做出预报。

用低频天气图方法进行延伸期预报的探索

孙国武^{1, 2} 李震坤² 信飞² 何金海³

(1 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020; 2 上海市气候中心, 上海 200030; 3 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

摘要: 在应用低频天气图制作上海地区5年(2008—2012年)夏季强降水过程延伸期业务预报的基础上, 进一步探索了低频天气图方法在使用过程中的技术规则、技术要点和技术方法。就低频天气图的计算和绘制、天气关键区的划分、分析低频天气系统等技术规范 and 预测模型的建立等应用中的问题进行了讨论。以强降水过程为例, 论述了低频天气图使用方法及其依据的天气学原理。

关键词: 低频天气图, 低频天气系统, 强降水天气过程, 延伸期预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.001

Exploration of the Low-Frequency Synoptic Map for Extended-Range Forecast

Sun Guowu^{1, 2}, Li Zhenkun², Xin Fei², He Jinhai³

(1 Lanzhou Institute of Arid Meteorology/Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province/Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of CMA, Lanzhou 730020

2 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030 3 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: Based on the application of the low-frequency synoptic map (LFSM) for extended-range forecast of summer strong precipitation process in Shanghai for five years (2008–2012), this paper further explores the technical rules, technical points and technical methods of LFSM. The main contents include how to calculate and draw LFSM, the technical principles for the key regions' division of LFSM, the technical rules for analysis of the low-frequency weather systems and the foundation of the prediction model. Finally, with an instance of one strong precipitation process, the usage and weather principles are discussed for reference of the related weather operational departments during the spread of LFSM.

Keyword: low-frequency synoptic map, low-frequency weather system, strong precipitation process, extended-range forecast

1 引言

延伸期预报通常指10~30d的天气预报, 它既有短期气候预测(月)的预报时效; 又有中短期天气预报的内容(过程、时段等)。气象部门的服务实践证明, 延伸期天气过程预报是社会公众和政府部门迫切需要的气象服务重点之一。因为, 它能为政府部门防灾减灾部署和应急预案预留更多的采取措施的准备时间, 使防灾减灾工作更有针对性。

正因如此, 近年来国内在延伸期预报领域做了大量工作, 也取得了明显的进展。延伸期预报有许多方法, 应用大气低频振荡特性和原理进行延伸期预报的

探索研究, 无疑是当前诸多大气科学工作者关注的热点问题之一。

大气低频振荡与延伸期预报的应用研究内容, 归纳起来大致可分为: (1) 重大天气气候事件如暴雨、低温冰冻和夏季风的大气低频特征分析^[1-5]; (2) 大气低频系统的延伸期预报^[6, 7]; (3) 降水趋势的延伸期预报^[8-10]和天气过程的延伸期预报^[11-14]等。

国外学者也根据大气低频振荡(含MJO-Madden Julian Oscillation)的特性进行监测、预测的延伸期低频环流场、MJO指数和降水趋势等方面的分析研究工作也有了初步结果^[15-20]。

本文则是近5年在以上海为重点并推广到全国11个省(市)的低频天气图应用方面的进一步探索, 主要探索低频天气图如何绘制分析, 如何理解掌握其技术关键点及其天气学原理, 并列举预报实例来说明如何使用低频天气图方法制作延伸期强降水过程预报。

收稿日期: 2012年9月26日; 修回日期: 2012年10月27日
第一作者: 孙国武(1937—), Email: guowusun@yahoo.com.cn
通信作者: 李震坤(1982—), Email: lizhenk@yeah.net
资助信息: 中国气象局行业科研专项(GYHY201006020);
公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006023)

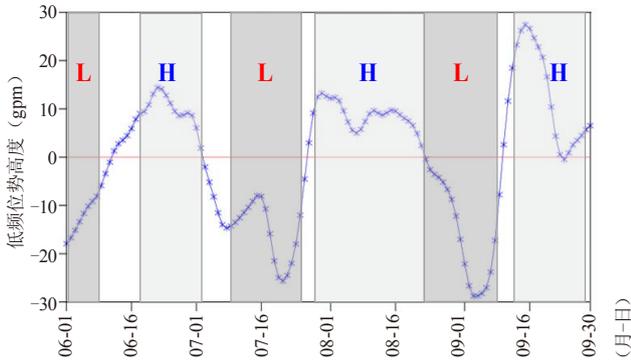


图1 2012年6月1日—9月30日低频位势高度和低频天气系统逐日演变 (L和H分别代表低频低压和低频高压)

2 低频天气图

2.1 低频天气图概述

低频天气图和常规天气图(如等压面位势高度场、风场和地面气压场图等)类似,所不同的是通过带通(30~50d)滤波器处理后绘制的位势高度、风和地面气压等要素的分布图,统称为低频天气图。

在低频天气图上,如果是低频流场,则出现低频气旋、反气旋;如果是低频位势高度场,则出现低频低压、高压等;这些都称为低频天气系统。通过这样的转化,将普通天气图转化为“低频天气图”,将普通天气图上的气旋、反气旋、高压和低压转化为“低频天气图”上的“低频气旋”、“低频反气旋”、“低频低压”和“低频高压”。实质上,从某一给定时段和某一给定区域的低频位势高度曲线的演变特征来看,低频天气图(以700hPa位势高度为例)上,低频系统(低频低压和高压)反映出该时段、该地区低频位势高度曲线振荡振幅的最大正位相或最小负位相,即低频低压对应最小负位相,低频高压对应最大正位相。

图1是2011年6月1日—9月30日西太平洋地区(25°—35°N, 125°—140°E)的逐日低频位势高度曲线和对应的逐日低频低压(深灰色区)和高压(浅灰

色区)。从图中可以看出,低频低压(高压)与低频高度曲线最大负位相(正位相)基本上是一致的。这样,通过低频曲线可以推断出低频系统;反之亦然。使得两种预报方法——低频天气图^[11]和天气关键区低频曲线^[13]相互结合和补充。

2.2 低频天气图计算绘制

计算绘制低频天气图,是使用Butterworth带通(30~50d)滤波器处理的流场图、位势高度场图等。为了业务预报的需要,必须有实时(即当日)的低频天气图。关于逐日低频天气图的计算绘制,采取的计算方案是自行设计的“滚动算法”,即“前减(1d)后加(1d)”的步骤,使资料样本长度始终保持在150d,通过带通(30~50d)滤波后,取其最后一天的值,各格点组合绘制成图,这样便得到当日的低频天气图,供业务应用。例如2012年8月18日的低频天气图,则用2012年3月22日—8月18日共计150d资料进行滤波计算,取各格点最后一天(8月18日)的滤波值绘制成图,便得到当日(8月18日)的低频天气图。8月19日制图时则前减1d后加1d,即从2012年3月23日—8月19日仍然是150d资料进行滤波和绘图,得到8月19日的低频天气图,依此类推。这种方法与国内外用过去的资料进行滤波计算的方法不同,这也是本方法能在业务单位推广应用的独特之处。

图2给出的是2011年6月10日700hPa低频天气图,分别使用了三种 u 、 v 格点资料,包括MICAPS资料(格距为 $4^\circ \times 4^\circ$)、NCEP/NCAR再分析资料(格距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$)和ERA-Interim资料(格距为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$),这三种资料都能从网上下载,实时得到。比较起来,三种资料绘制的低频流场的基本形势相近,但MICAPS资料闭合系统(低频气旋、反气旋)比NCEP/NCAR和ERA-Interim资料少,这与格点资料的分辨率和范围有关。

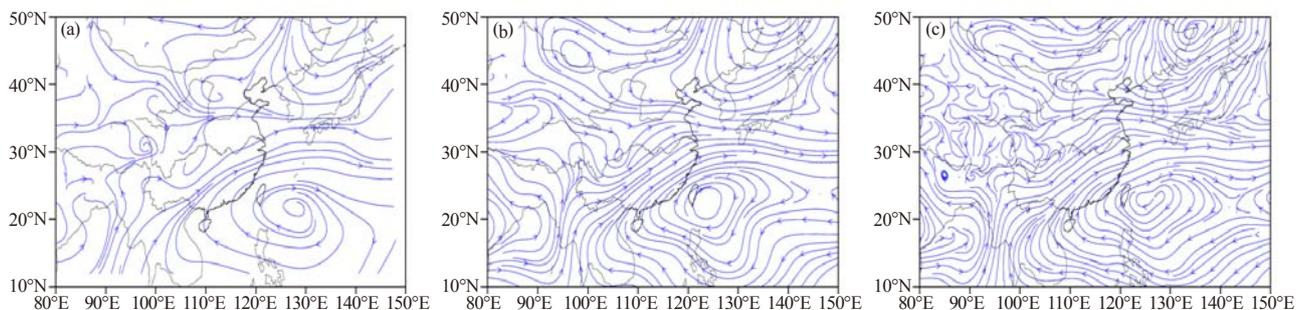


图2 2011年6月10日MICAPS (a)、NCEP/NCAR再分析(b)和ERA-Interim资料(c)700hPa低频流场图

3 预报方法探索

3.1 预报对象

延伸期天气过程预报属于月时间尺度(10~30d),比中期预报时效长,但又具有中期预报的内容,即着眼的主要预报对象,包括重要天气过程如强降水、沙尘暴、高温热浪和寒潮等发生的时段(具体日期)和强度。从预报内容上看,显然比月短期气候预测(气象要素如气温、降水的趋势预测)更详细和具体。

3.2 预报要点

低频天气图预报方法是不同于天气学方法、数理统计方法和数值预报方法的一种新方法,但这种方法是以天气学理论为基础,符合天气学原理,天气学中天气图分析规则完全适用于低频天气图。只不过将天气图及其快变的天气系统(高频扰动)改变为低频天气图及其慢变的低频天气系统(低频变化)。它既不是一一对应的统计相关法,也不是环流形势场前期相似预测后期的相似法。因此,应用这种方法时,掌握以下的预报要点是十分必要的。

(1) 低频天气图分析

低频天气图分析的技术规定与天气学中天气图分析相同,只不过在低频天气图上分析的是低频天气系统(低频气旋、反气旋;低频低压、高压等)。由于低频系统具有时间上的持续性和周期性(30~50d)、空间上的连续性和相似性以及地域上的准定常性(以下简称“三性”),是根据2000—2010年5—9月共1683张逐日低频天气图上低频系统的分析结果,具有统计意义。因此,分析低频天气图上的低频系统时,使低频系统客观地显示出“三性”特征至关重要,涉及到预测模型的建立。为达到此目的,在分析低频天气图时,会出现一些技术问题,如:低频系统的突变与加速、低频系统的合并与分裂、低频系统的发展与消失以及低频系统的原地振荡与位相传播等,都必须按天气学规则仔细分析,使每一个低频系统具有客观、完整和连续的原地振荡或位移的相对静态或动态的图像。避免原本是一个系统的连续演变,被分析成几个系统的独立变化,从而破坏了低频系统的完整和连续等特性。

(2) 天气关键区的划分

从天气学角度分析,某地发生的天气过程,是该地以南和以北或以西和以东有天气系统向该地移来并相遇,即有相应的不同方向的气流在该地汇合而引起。所谓天气关键区是指常有天气系统生成并影响本地出现天气过程的地区。低频天气图上的天气关键区

是同样的道理,即分析影响本地出现天气过程的低频系统常出现的地区,这些地区被定义为天气关键区。以上海的强降水天气过程为例,上海位于30°N副热带地区,在30°N以北,主要考虑西、西南和南方向南下的冷空气,故关键区定为西伯利亚—贝加尔湖、新疆—蒙古人民共和国、河套等地区,这些地区也是低频系统集中出现的地区。在30°N以南,主要考虑东亚夏季风和印度夏季风的北上,故关键区定为西太平洋、中南半岛—华南和印度—孟加拉湾地区,这些地区同样是低频系统频发的地区。

(3) 预报模型的建立

预报模型以省(区)范围或以相同类型的气候区范围建立为宜,不可能建立全国和行政大区范围的预测模型。道理很简单,各地有各地的天气气候特点和相应的环流形势和影响系统,预测模型有很强的地域特点。

预测模型的建立需要分步骤进行。首先,选定预报对象,如夏季强降水、春季沙尘暴、冬季冷空气过程等,但这些天气事件要定出具体的标准,才能统计出历年的个例。其次,分析每一个天气事件的个例与各个天气关键区低频系统的对应关系及其各关键区低频系统的分布配置,还要进一步分析各关键区低频系统的活动状态:原地振荡或位相传播。在这些分析工作的基础上,归纳整理预报天气过程的相应指标,即天气过程发生时,各关键区低频系统的活动特征和分布配置图。再次,低频天气图延伸期预报方法不是单一的一一对应,而是强调各关键区低频系统的分布和配置,这种配置有利于低频系统及其相应的低频气流有南、北方向或东、西方向的汇合而引起天气过程。

此外,预测模型的建立分为两种类型:静态,即预测模型中的低频系统以在各关键区原地振荡为主;动态,即预测模型中的低频系统以在各关键区相互移动为主,主要是向偏东(西风带系统)、偏西(副热带系统)位移。

图3给出上海夏季强降水过程的预测模型(静态)。从图上低频系统的分布和配置来看,30°N以北(南)分别出现偏北(南)低频气流,并在30°N附近汇合。

3.3 预报方法

以2012年6月上海地区的一次强降水过程预报为例,介绍低频天气图预报方法。2012年5月18日发布预报时,查看逐日低频天气图,根据5月14日新疆—蒙古人民共和国初生的低频气旋,外推40d,则6月23日该区将有低频气旋出现;5月15日西太平洋地

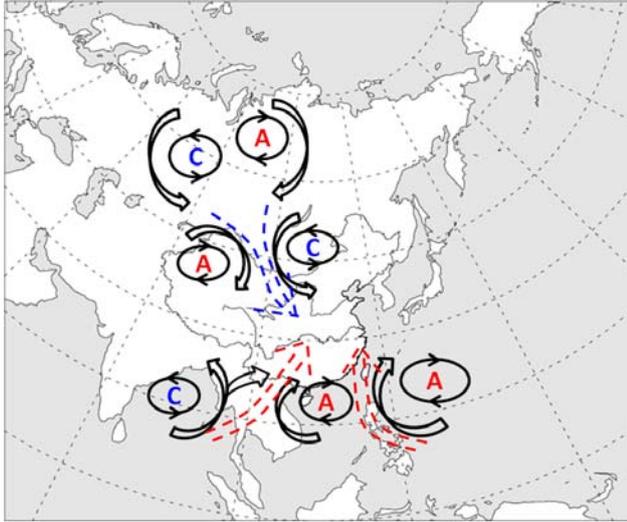


图3 2012年上海地区夏季强降水过程预测模型示意图

区初生的低频反气旋，外推30d，则6月15日该区将有低频反气旋出现；以及5月18日孟加拉湾初生的低频气旋外推30d，则该区域6月17日将有低频气旋出现。至于外推周期（各区低频系统周期不尽相同）的选取，主要根据历年同期和当年前期低频系统的活动周期，可参看文献[11-12]。

这样，恰好在6月中旬后期到下旬前期低频图上将出现符合预测模型（图3）的低频系统的分布，即6月中旬中期、中旬后期和下旬前期的时段内，新疆—蒙古将有低频气旋活动，其后部将有相应的低频偏北气流南下；同时，西太平洋地区将有低频反气旋及其西南部的低频偏南气流西北上；孟加拉湾地区有低频反气旋及其西部的偏南气流东北上。低频系统的分布和配置表明，在6月中旬中到下旬初，将有低频偏北和偏南气流在上海地区汇合，故预报6月中旬中、后期一下旬前期上海地区将出现强降水过程（预报过程发生日期为6月17—23日），详见《上海地区未来10~50d强降水过程预报》2012年第一期（5月18日发布），提前30d发布预报（表1和2）。

4 低频天气图的天气学原理

基于大气低频振荡的特征，利用滤波方法，是有

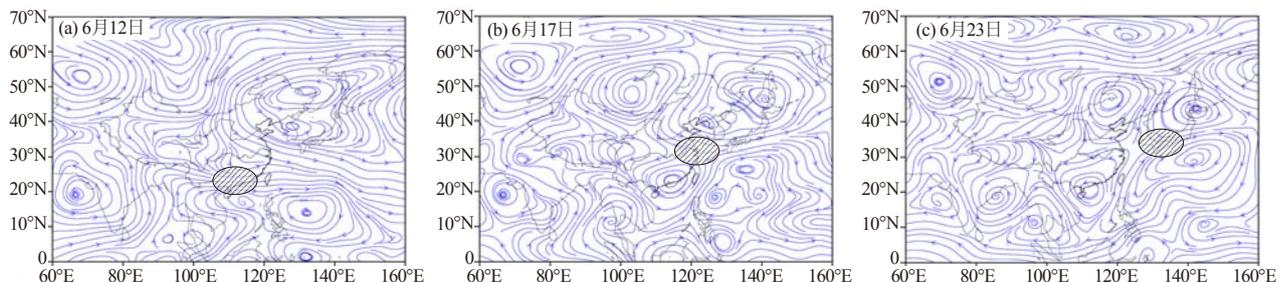


图4 2012年上海地区夏季强降水过程预测的700hPa低频流场（阴影区表示低频气流的辐合区）

表1 上海地区强降水过程预报统计

发布预报日期	预报时段	降水实况	备注
5月18日	6月17—23日	6月17—18日全市普降大到暴雨，局地大暴雨，金山单日降水量达138.4mm	入梅首场降水（6月17日入梅）

表2 上海地区11站降水实况雨量（单位：mm）

6月	崇明	嘉定	宝山	浦东	徐家汇	青浦	闵行	松江	南汇	奉贤	金山
17日	11.1	10.6	15.0	28.2	20.8	18.0	31.9	27.0	26.6	42.6	42.0
18日	28.6	25.7	26.3	82.7	75.6	29.0	66.1	57.9	87.3	108.4	138.4

可能提取大气中的低频信号制作低频天气图，分析低频系统，用来制作延伸期天气过程预报的。从天气学意义分析，低频天气图上的低频天气系统与日常天气图上的天气系统虽有差别，但也有密切联系。低频天气系统是造成某种天气过程的一些主要天气系统的发生、维持、加强、移动和减弱过程的原因。

下面仍以上述的强降水过程的预报进行分析。如表1，2012年6月17—18日上海地区出现了大到暴雨、局部特大暴雨（最大降水量为138.4mm）的强降水过程，从图4可以看出，降水发生前5d（6月12日），低频偏北与偏南气流相遇的辐合区位于长江中下游以南地区（图4a）；降雨发生当日（6月17日），南北两股低频气流的辐合区北抬到30°N附近的上海地区（图4b）；降水发生后5d（6月23日），低频气流的辐合区继续北抬，位于长江中下游以北、以东的洋面上（图4c）。图4明显地反映出强降水过程发生前、发生时和发生后偏北、偏南气流辐合区与强降水发生与否配合的全过程。

有意义的是，将降水发生时同日同时的700hPa未滤波的流场图（图5）与低频流场图（图4b）比较，两者的环流形势场和主要环流系统基本相似，且位于30°N附近的两股气流辐合区也很一致。所以低频天气图上与低频偏北、偏南气流相应的低频系统反映了未滤波的偏北、偏南气流相应的天气系统生成、维持和消亡的演变过程。问题在于，这次强降水过程，未滤波的中高纬和低纬的天气系统始见于6月8日（图略），即影响降水发生的天气系统在过程发生前10d

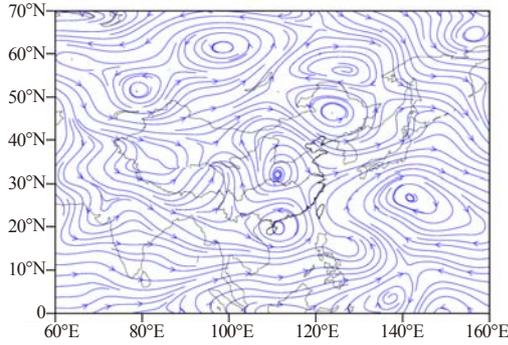


图5 2012年6月17日700hPa流场图(未滤波)

可以追踪到,但低频天气图上的30°N以北和以南的低频系统在前1个月就追踪到了,这正是低频天气图的优势之处。

5 小结和讨论

本文在已有低频天气图研究和实践工作^[11-14]的基础上,以强降水过程(2012年6月17—18日上海地区大到暴雨,局部大暴雨)为例,进一步详细具体地论述了低频天气图预报方法中的几个关键技术问题。需要指出的是,低频天气图预报方法虽然在上海地区近5年(2008—2012年)预报业务实践中,对夏半年强降水过程的预报结果比较成功,预报时效达到15~45d^[14]。中国气象局预报与网络司以“月内重要过程趋势预测系统”立项,列为中国气象局现代气候业务建设试点任务,在全国11个省(市)气象业务单位推广。这一举措姑且不从气象服务需求的角度考虑,单从该方法的技术角度考虑也是十分必要的,因为任何一种新的预报技术方法,都必须经过业务实践的检验,不断发现问题,不断解决问题,才能使其提高和完善。

围绕低频天气图和低频天气系统等问题,还有许多理论性的问题要进行深入分析和研究。有些学者已经在有关方面做了有科学意义的工作,如丑纪范等^[21, 22]、支蓉等^[23]论述了天气和气候可预报性的认识过程并且提出了延伸期可预报分量的提取方法;李建平等^[24]和丁瑞强等^[25-27]引入非线性误差增长理论对大气可预报性和天气可预报性的时空分布进行了研究,其结果表明大气的可预报性可达20d,超出了洛伦兹等人提出的大气可预报性的极限。然而由于问题本身的难度和复杂性,关于可预报性仍有许多重要问题没有解决。Jin等^[28, 29]和Pan等^[30]的低频动力学研究也在天气尺度涡动与低频气流相互作用的动力学方面得到了有科学意义的结果,这些工作为我们开展低频天气图的相关理论研究打下了良好的基础。

参考文献

- [1] 陆尔, 丁一汇. 1991年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡. 气象学报, 1996, 54(6): 730-736.
- [2] 马晓青, 丁一汇, 徐海明, 等. 2004/2005年冬季强寒流事件与大气低频波动关系的研究. 大气科学, 2008, 32(2): 380-394.
- [3] 贾小龙, 梁潇云. 热带MJO对2009年11月我国东部大范围雨雪天气的可能影响. 热带气象学报, 待发表.
- [4] 杨秋明. 全球环流20-30d振荡与长江下游强降水. 中国科学D辑: 地球科学, 2009, 39(11): 1515-1529.
- [5] 徐国强, 臧建升, 周伟灿. 1998年京津冀夏季风的低频振荡与降水的特征. 应用气象学报, 2001, 12(3): 297-306.
- [6] 杨玮, 何金海, 孙国武, 等. 低频环流系统的一种统计预报方法. 气象与环境学报, 2011, 27(3): 1-5.
- [7] 信飞, 孙国武, 陈伯民. 自回归统计模型在延伸期预报中的应用. 高原气象, 2008, 27(增刊): 69-75.
- [8] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸预报. 气象, 2011, 36(7): 111-122.
- [9] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸预报试验. 大气科学, 2012, 36(1): 102-116.
- [10] 牛法宝, 李汀, 陶诗言, 等. 对云南2011年冬季降水的延伸期天气预测试验. 云南大学学报(自然科学版), 2012, 34(1): 62-65.
- [11] 孙国武, 信飞, 陈伯明, 等. 低频天气图预报方法. 高原气象, 2008, 27(增刊): 64-68.
- [12] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报. 高原气象, 2010, 29(5): 1142-1147.
- [13] 孙国武, 孔春燕, 信飞, 等. 天气关键区大气低频振荡延伸期预报方法. 高原气象, 2011, 30(3): 594-599.
- [14] 孙国武, 冯建英, 陈伯明, 等. 大气低频振荡在延伸期预报中的应用进展. 气象科技进展, 2012, 2(1): 12-18.
- [15] Hendon H H, Liebmann B. The intraseasonal(30-50day) oscillation of the Australian summer monsoon. J Atmos Sci, 1990, 47:2909-2923.
- [16] Whitaker J S, Weickmann K M. Subseasonal variations of tropical convection and week-2 prediction of wintertime western North American rainfall. J Climate, 2011, 14: 3279-3288.
- [17] Maharaj E A, Wheeler M C. Forecasting an index of the Madden-Oscillation. Int J Climatol, 2005, 25:1611-1618.
- [18] Wheeler M C, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. Mon Wea Rev, 2004, 132: 1917-1932.
- [19] Jones C, Carvalho M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. J Climate, 2004, 17: 2078-2094.
- [20] Galin M B. Study of the low-frequency variability of the atmospheric general circulation with the use of time-dependent empirical orthogonal functions. Atmospheric and Oceanic Physics, 2007, 43(1): 15-23.
- [21] 丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 10-30d延伸期数值天气预报的策略思考一直面混沌. 气象科学, 2010, 30(5): 569-573.
- [22] 丑纪范. 天气和气候的可预报性. 气象科技进展, 2011, 1(2): 12-14.
- [23] 支蓉, 龚志强, 郑志海, 等. 基于矩阵理论的全局温度资料的尺度性研究. 物理学报, 2009, 58(3): 2113-2120.
- [24] 李建平, 丁瑞强, 陈宝花. 大气可预报性研究的回顾与展望——21世纪大气科学前沿与展望. 北京: 气象出版社, 2006: 96-103.
- [25] 丁瑞强, 李建平. 误差非线性的增长理论及可预报性研究. 大气科学, 2007, 31(4): 571-576.
- [26] 丁瑞强, 李建平. 非线性误差增长理论在大气可预报性中的应用. 气象学报, 2009, 67(2): 241-249.
- [27] 丁瑞强, 李建平. 天气可预报性的时空分布. 气象学报, 2009, 67(3): 343-354.
- [28] Jin F F, Pan L L, Watanabe M. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part I: A linear closure. J Atmos Sci, 2006, 63: 1677-1694.
- [29] Jin F F, Pan L L, Watanabe M. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part II: a theory for low-frequency mode. J Atmos Sci, 2006, 63:1695-1708.
- [30] Pan L L, Jin F F, Watanabe M. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part III: baroclinic model results. J Atmos Sci, 2006, 63: 1709-1725.

延伸期预报的思考及其应用研究进展

何金海¹ 梁萍² 孙国武³

(1 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 上海气候中心, 上海 200030;
3 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020)

摘要: 10~30d延伸期预报是介于常规天气预报和短期气候预测之间的预报“缝隙”, 既是国际学术界关注的热点问题, 又是当前预报决策服务的重要发展方向。近年来, 我国诸多科研业务单位相继开展了延伸期预报研究及预报应用, 并在业务实践中取得了一定效果。针对延伸期预报的可行性, 本文就延伸期预报是什么, 能否做, 如何做, 怎么评价, 未来前景如何等方面的问题进行了思考和讨论。特别重点介绍了国内在进行延伸期预报业务试验方面的实际进展。在讨论如何为延伸期预报评分时, 提出了预报时效与预报精度相对应匹配的观点。

关键词: 延伸期预报, 可预报性, 低频振荡, 预报评分

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.002

Consideration on Extended-Range Forecast and Its Application Study

He Jinhai¹, Liang Ping², Sun Guowu³

(1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

3 Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration/Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020)

Abstract: The 10–30 days' Extended-Range Forecast (ERF) is a forecasting 'gap' between conventional weather forecast and short-range climate prediction, which has attracted great attention from the academic community world-wide and has become an important development direction of the current forecast decision-making services. In recent years, a great number of departments of studies and operational work all over China have engaged in scientific research and forecasting application of the ERF and achieved some results in forecast practice. As for the feasibility of the extended-range forecast, this paper expounds on what the ERF is, whether or not there is a possibility to deal with it, how to carry it out and how to evaluate ERF. In addition, the future prospects of ERF are also thought about deeply and discussed. Specially, the actual progress of the forecast operational practice on ERF is highlighted. Finally, for readers' reference, a point of view is proposed that the forecasting range and accuracy should match each other in the ERF evaluation.

Keywords: extended-range forecast, predictability, low-frequency oscillation, forecast score

1 引言

中国是个自然灾害频发的国家, 气象灾害占有所有自然灾害的70%以上^[1]。随着我国经济的迅速发展, 近年来, 特别是在全球变暖背景下, 阶段性、持续性、频发性高影响异常天气事件形成的气象灾害给国民经济和人民生活财产造成的损失也越来越大。例如, 2008年南方低温雨雪冰冻灾害; 2009年西南五省秋、冬、春连旱; 2010年南方暴雨洪灾, 以及同年8月甘肃省舟曲县因强降雨引发的特大泥石流; 2011年

南方多省“旱涝急转”等。面对每一场灾害, 各级气象部门都密切配合, 积极全力投入到气象灾害的预测预警服务中去。虽然气象部门对于一周以内的每一次天气过程都能比较准确地预报出来, 但是对于一周以后天气的准确预报还面临着很大困难, 对天气过程的持续性及其可能诱发的气象灾害也难以把握^[2]。为应对政府和公众对气象服务提出的更高要求, 有必要延长天气气候事件和过程的预报时效, 为做好防灾减灾工作提供重要的参考依据。

目前, 国内气象部门常规的天气预报和预测业务包括10d以内的中、短期预报和30d以上的月、季尺度的长期预报(短期气候预测), 而10~30d延伸期预报仍缺少客观的预报方法和工具。延伸期预报在预

收稿日期: 2012年9月24日; 修回日期: 2012年11月14日
第一作者: 何金海(1941—), Email: hejhnew@jssmail.com.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006020)

报内容方面与中短期逐日预报和长期趋势预报不同，是衔接“天气”预报和“气候”预测之间的“时间缝隙”或“预报缝隙”。实现延伸期预报，意味着真正做到了“无缝隙预报”，这将为政府在防灾减灾决策方面带来前瞻性和主动性。然而，延伸期的预报是否具有可预报性或者说延伸期的预报是否具有实际可操作性？基于可预报性的延伸期预报方法有哪些？预报对象是什么？如何评价其预报效果？这些问题的回答是开展延伸期预报研究及业务应用的重要基础。为此，本文将针对延伸期预报的上述基础性问题，对延伸期可预报性来源及目前已有的延伸期预报方法进行综述和讨论，并进一步就延伸期预报内容、可能的评价方法等提出一些思考。

2 延伸期预报的可预报性

目前公认的短期天气预报时效（即可预报期限）的上限是10d，最多为2周，然而10~30d的延伸期预报为什么又是可能的呢？这就提出了延伸期预报的可预报性问题。

短期天气预报的可预报期限主要由初值决定。中高纬度天气系统的可预报期限大约为2周，这在很大程度上是由预报对大气初始条件的敏感性决定的^[3, 4]。而10~30d延伸期预报同时受到初始条件和大气外部强迫因子的影响。包括海洋、陆地及冰冻圈在内的外强迫通常都具有缓慢变化（缓变）的分量，它们对大气的影响可以提高大气的可预报性期限。同时，缓变外强迫与大气的耦合所形成的大气内部过程，如MJO和大气低频变化，也有助于提高可预报期限。此外，延伸期预报中经常用到各种时间的平均（如周和候的平均等），这种方法去除了部分天气噪声，突显了大气缓变变化。因此，延伸期预报的可预报期限应该可以突破传统天气预报可预报期限的上限（2周）。简言之，缓变的外强迫及其影响下的大气低频变化（如MJO等）都为延伸期预报提供了有用的低频信息^[5]，进而使得做延伸期预报成为可能。

延伸期预报的可预报因子源自大气、海洋和陆地上的各种动力过程，这些过程包括：（1）MJO，即热带地区的季节内低频振荡（ISO）。它由Madden和Julian^[6, 7]在20世纪70年代初首先发现，具有向东传播、40~50d周期、纬向1波全球尺度的特征。MJO作为热带地区季节内变率（ISV）的主要模态，伴随着有规律的对流活动，对热带和中高纬地区都有相当大的影响，且时间尺度介于月、季之间，因而被认为是次季节尺度上全球可预报性的一个主要因子。（2）土壤湿度。它的记忆效应可以持续数周，可通过蒸发

量和地表能量收支的变化影响某些特定区域季节内时间尺度上气温和降水的预报^[8]。（3）平流层—对流层相互作用。来自于平流层的信号影响极涡和北大西洋涛动时，对流层异常气流可持续大约2个月时间^[9]。

（4）海洋条件。海表温度异常可引起海—气热通量和对流的变化，从而影响大气环流。研究发现，基于耦合模式ISV的预报技巧已有所提高^[10]。

ISO在天气气候的演变中扮演着重要角色，对持续性异常极端事件的发生有重要影响，是联系天气与气候的纽带，因而可作为开展延伸期预报的主要预报研究对象^[11]。目前，通过改进对MJO的预报来提高全球延伸期预报技巧是可期的。采用“完全模式”方法^[12-15]，估计MJO的潜在可预报期限大概在20~40d。虽然近年来动力模式取得了很大改进，但是对MJO的预报模拟能力仍较为薄弱，预报时效仅在7~10d^[16-20]。而经验和统计模式对MJO有较好的预报技巧，预报时效在15~20d^[15, 21-26]。最近的研究表明，MJO的预报时效已经可以提高到20d以上^[16, 27, 28]。总的看来，目前经验模式对ISO的预报能力要比动力模式好，在动力模式进一步得到改进之前，它无疑是一种研究ISO可预报性的更加有效的途径。

3 延伸期预报方法

延伸期预报的方法主要分为统计模式和动力模式两类。其中，美国、英国、加拿大、欧洲中心、澳大利亚等诸多国家将动力模式应用于对MJO的延伸期预报中，且实时业务模式主要以发布未来2周的MJO指数预报为主。但由于数值预报模式对于MJO的延伸期预报技巧仍有限，对与MJO相联系的强天气过程及异常事件的延伸期预报存在较大难度，因而更加有效的统计模式方法得到了广泛应用。在我国，包括国家气候中心、国家气象中心、上海区域气候中心、兰州干旱研究所、南京信息工程大学和中国气象科学研究院等在内的诸多科研业务单位分别利用动力模式、低频天气图、低频波、自回归模型及MJO等方法开展了10d以上的延伸期预报信息研判和针对不同对象的预报产品制作，并在业务实践中取得了一定的效果。下面将主要方法归纳为以下几类。

3.1 动力延伸方法

自20世纪90年代初期开始，国家气候中心开展了以月内逐旬预测为重点的月动力延伸预报研究与业务应用^[29-33]，并建立了月动力延伸集合业务系统。其中，李维京等^[29]首先提出利用动力与统计相结合的方法，从大尺度大气动力学方程组出发，根据月尺度大气环流的演变特征，先推导出可旬滚动的月降水距

平百分率和500hPa月平均高度距平场的关系, 所得到的方程表明预报对象和预报因子两者之间具有明确的物理意义。然后利用动力延伸预报的500hPa月平均高度距平资料和站点的实际降水资料, 使用统计学中的反演方法确定出预报方程中的系数, 得到所预报站点的月降水预报方程, 将该方程应用于实际预报试验中去, 并经过独立样本检验, 结果表明动力与统计相结合的方法对月动力延伸集合预报产品的释用具有明显的效果。在实时业务运行中, 国家气候中心月动力延伸预报的具体做法是, 以国家气象中心中期数值预报模式T63L16为基本动力框架, 采用滞后平均集合预报法(LAF), 取每旬末两天00:00, 06:00, 12:00和18:00 UTC为初始场分别积分30d, 作逐旬滚动月预报^[29]。在此基础上, 诸多研究提出利用环流特征量和要素之间的统计关系直接用于要素预报^[32]、采用与预报月高度场相似月作为样本资料改善预报方程系数^[34]、基于月动力延伸预报产品的逐步回归MOS统计方法^[35]等, 对动力延伸预报产品解释应用技术进行诸多尝试和改进。上述基于动力延伸方法的预报技术及试验经过不断改进, 在目前的延伸期预测业务中发挥了重要作用。

3.2 MJO 方法

MJO是展示热带地区ISO的强信号, 它的东传不仅能够影响热带地区的天气和气候, 还会通过对流强迫或遥相关影响到热带外地区^[11, 36]。由于MJO具有季节内时间尺度的准周期特性, 利用MJO的延伸期预报研究已相当活跃。迄今, 基于MJO的延伸期预报方法大多是根据MJO的带通滤波信号或主模态方法进行的^[16, 18]。然而, 在实时预报中基于滤波的预报方法存在局限性, von Storch等^[37]、Lo等^[21]基于未滤波MJO指数的预测方法则弥补了这个缺陷, 他们分别采用主振荡型技术、滞后线性回归模型进行MJO的识别和预测, 预报时效约为15d。

Wheeler等^[22]采用时空域上的傅里叶分析滤波方法, 对MJO的实时监测方法进行研究。通过改进, Wheeler等^[38]使用近赤道(15°S—15°N)平均的OLR(向外长波辐射)、850和200hPa纬向风多变量EOF(经验正交函数)分析, 将逐日观测资料投影到前两个EOF模态上以提取出主要包含MJO信号的一对主成分RMM1和RMM2, 即实时多变量MJO监测与预测指数。而由RMM1和RMM2确定的位相分布图可以清晰地反映逐日的MJO空间位相演变, MJO的强度由 $\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2}$ 决定, > (<) 1表示强(弱), 这样MJO的自西向东移动及其强度的变化就可在位相分

布图上表现出来。Wheeler等^[38]定义的多变量MJO指数不仅可用于MJO信号的实时预测, 还可应用于各个季节, 相比于传统的时间滤波方法, 表现出很大的优越性。

目前, 该MJO指数已被广泛应用于美国气候预测中心(CPC), 澳大利亚和印度等国家的气象部门, 结合其他在此基础上发展起来的向量自回归模型(VAR)、多变量滞后回归模型^[26]以及滞后线性回归PCL^[24]、经验位相传播EPP^[39]、相似法^[40]等方法, 对MJO进行实时监测和诊断。在我国, 基于该MJO指数, 丁一汇等^[11]发现热带MJO不同位相可作为江淮/上海地区夏季降水(或极端降水)的延伸期预报信号, 其中, 在2009年5月23日和6月2日制作梅汛期延伸期预报的实时业务中, 根据美国NCEP-GFS预报的6月上旬和中旬前期MJO活跃于西太平洋地区的6, 7位相, 得出6月上旬和中旬前期不利于江淮/上海地区入梅, 预报结果符合实况, 这为江淮梅雨汛期的延伸期预报提供了有力依据。而根据MJO传播规律对云南延伸期降水的影响来制作延伸期预报也已经成为云南省气象台的一种新手段^[41]。

3.3 低频天气图方法

早在20世纪90年代初, 孙国武等^[42]和章基嘉等^[43]就提出了“低频天气图”的概念。同时, 孙国武等^[44]、He等^[45]又积极倡导低频天气图在业务预报中的应用, 自2007年起取得了不少可喜进展, 并以上海气候中心、沈阳中心气象台和兰州中心气象台等单位为基地推进低频天气图预报方法的试验与实践。上海市气候中心连续4年(2008—2011年)的业务化应用表明, 15~45d延伸期强降水天气过程预报取得了较好效果, 特别是成功预报了2010年上海世博会期间几次关键时期的重要天气过程, 以及2011年5—6月长江中下游的旱涝转折过程。

低频天气图方法利用大气低频振荡在时空演变上的特性(时间上的持续性和周期性, 空间上的连续性和相似性)提取大气中的强低频信号, 通过外推30~50d, 制作出未来10~30d的较强降水过程预报^[44]。该方法对逐日风场和位势高度场格点资料进行30~50d带通滤波, 得到低频流场图和高度场图。低频天气图与一般天气图明显不同, 由前者分析出的低频天气系统(低频气旋和反气旋)具有缓变特征, 存在于天气噪音水平之上, 代表的是ISO振幅最大位相随时间的变化, 可反映天气系统的演变规律。在天气学意义上反映的是造成某种天气过程的主要天气系统的生成、维持、加强、移动和消亡过程。低频天气图预报方法的主要操作步骤是: (1) 滤波绘图。(2)

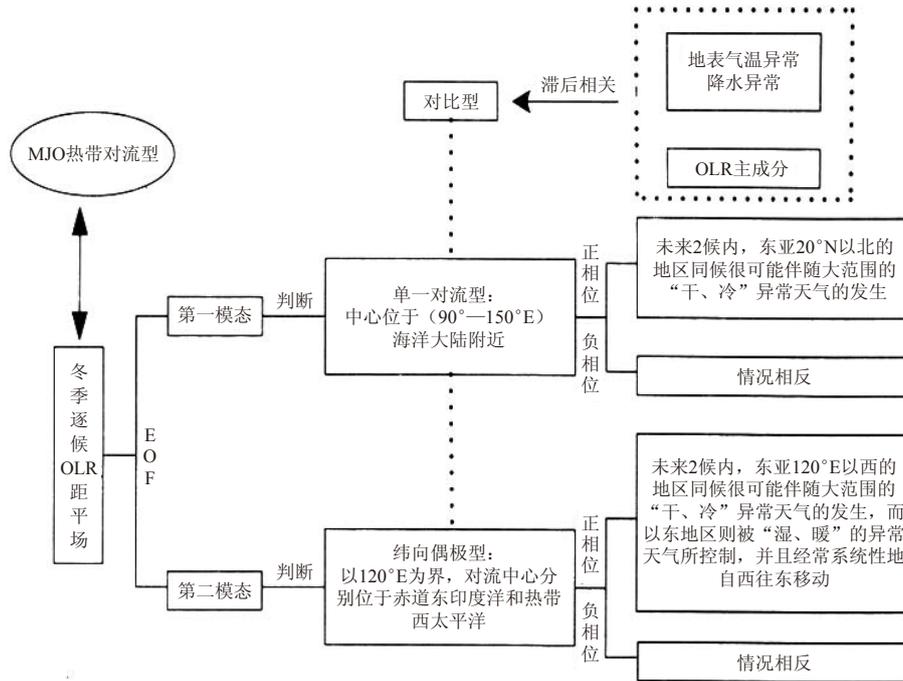


图1 东亚冬季延伸期预报的框架流程^[45]

分析和追踪。逐日分析低频天气系统的生成、移动和消失的位置和时间。(3)划分天气关键区。保证低频系统在各个区域的独立性和完整性为前提。(4)整理归纳。将(2)和(3)的分析结果进行归纳和整理。(5)联系天气过程。将各个区域的低频系统的活动特征与预报区域降水过程的发生发展联系起来。

(6)预报降水过程。根据低频系统特性，利用外推法，预报各个区域的低频系统，再根据各个区域低频系统的相互配置与上海降水过程的对应关系，预报未来10~30d较强降水的集中时段和过程。

3.4 低频周期外推法

21世纪以来，丑纪范等^[46]和支蓉等^[47]利用大气环流异常信号持续性能够导致异常天气持续性的特征，提出了延伸期可预报分量的提取方法。然而在实际操作方面，如何提取低频信号并将之用于预报中，仍存在较大困难。近期，He等^[45]在最新的研究中发现，热带MJO对流活动前2个模态对我国冬季干(冷)和暖(湿)异常天气有2候左右的预报时效，并提出了利用MJO制作东亚冬季延伸期预报系统的方案(图1)。

杨玮等^[48]从统计角度通过分析700hPa水汽输送通量场流函数和势函数的低频分量演变特征及其与上海地区夏季降水过程的对应关系，提出了一种低频环流系统的统计预报方法。该方法具有一定的可行性和实际应用价值，并且在上海市气候中心的预报中已见成效。图2给出了预报方法的具体流程。如图所示，

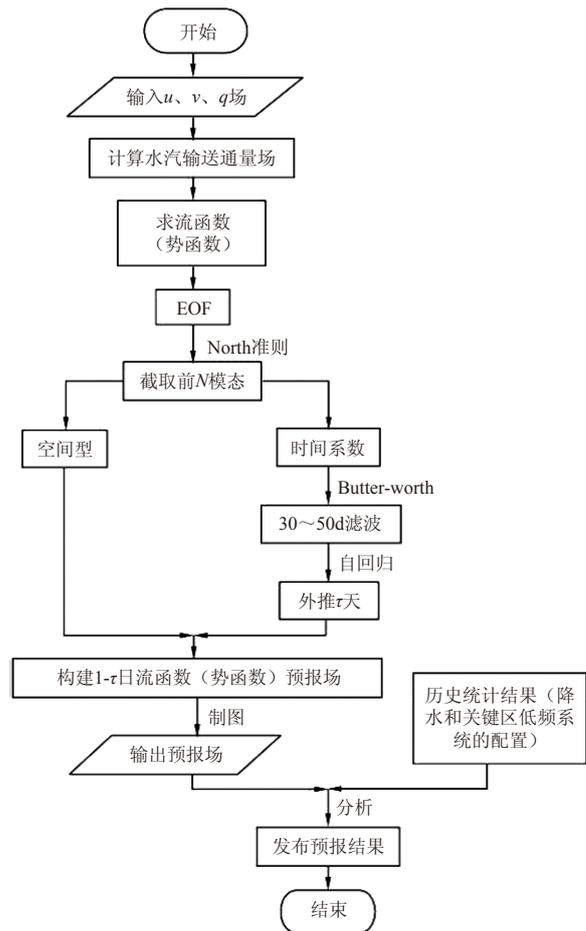


图2 夏季延伸期预报思路流程^[45]

首先利用MICAPS的700hPa逐日20时流场、温度露点差和湿度场资料计算700hPa水汽通量及其流函数和势函数,将计算得到的流函数(势函数)场进行EOF,按照North准则^[49]截取前 N 个主要模态,得到前 N 对空间型及相应的时间系数,对时间系数进行30~50d的Butter-worth滤波。考虑到影响上海地区的4股关键气流分布,选取与孙国武等^[44]相同的8个关键区。输出的低频流函数正(负)中心表示高(低)压中心,势函数正(负)中心表示辐散(辐合)中心。参考Jones等^[24]方法,采用多阶自回归模型,将截取的各模态时间系数外推 τ (取 $\tau=30$)日,用所得时间系数外推场和空间型重建 $1-\tau$ 日流函数(势函数)预报场。将输出预报场与历史实况统计结果(降水和关键区低频系统的配置)进行分析比较,找出其与上海地区夏季降水过程的对应关系,最后发布预报结果。

杨玮等^[48]将使用该方法得出的预报结果与实况对比表明,流函数和势函数在预报中能够达到一定准确率。虽然该方法仅是以上海降水为例,使用的参数也仅是700hPa水汽输送通量,且未考虑样本的年际差异,因此可能会带来一定的主观偏差等问题,但从某种意义上讲,这种预报方法具有实际应用价值和一定的普遍意义。

此外,梁萍等^[50]发现利用集合经验模态分解(EEMD)方法提取的江淮梅雨区夏半年(4—9月)降水的低频分量对该地区实际降水量的延伸期预报具有一定的指示意义,采用最优子集回归方法可提前30d对江淮地区汛期降水量进行延伸期预报。他们还利用经验波传播(EWP)方法对MJO活动的延伸期预报进行了探讨,发现该方法可提前40d预报ITCZ活跃异常的东传,并可以较好地预报出梅雨区的风场距平。谷德军等^[51]研究得出,利用降水要素本身近期变化的主要周期,采用简谐波拟合的方法建立其延伸期预报模型对广州降水中期和延伸期预报也有良好的预报效果,该方法的预报可为实际业务预报提供重要参考。

3.5 各种来源低频信号的综合

特定对象的10~30d延伸期可预报信号往往是来自不同源地的低、中和高纬大气低频振荡或持续过程,这些可预报信号与其本身及影响系统在延伸期时间尺度上是否具有持续性、周期性密切关联。以江淮梅雨为例,研究发现,以MJO为主要特征的赤道印度洋和热带西北太平洋大气季节内准周期振荡可通过影响亚洲夏季风进一步对东亚地区的天气气候演变和阶段性、持续性异常事件产生重要影响^[11, 52-63],从而

可能成为包括江淮梅雨在内的东亚天气气候事件在10~30d延伸期时间尺度上的可预报信号。这种准40d时间尺度的ISO除了存在于热带的MJO,还存在于中高纬度地区^[54, 64-67],如能持续2~3周的阻塞形势,也对江淮梅雨起着很大作用^[68-73]。另外,江淮梅雨区降水本身变化也存在30~60d低频振荡特征^[74-76]。同时,以准双周为主要周期的另一类低频振荡也对中国东部降水有着重要影响^[77-80]。由此看来,在讨论江淮梅雨的维持时就要综合考虑不同来源的低频信号。例如,梁萍等^[81]研究发现,东亚梅雨的峰值降水阶段既与热带异常对流的北传有关,又与来自中高纬里海附近冷空气低频波列的东传以及鄂霍次克海高位涡的西南向传播有关。陈官军等^[82]则将能够反映大尺度环流背景和江淮持续性强降水低频特征的10个东亚环流关键系统指数作为预报因子引入到江淮地区汛期(6—8月)的持续性降水过程的预报模型中。然而,对于特定对象的不同时空尺度降水过程的延伸期可预报信号的完全认识还存在一定难度,以及其中的内在机理目前尚不清楚。

4 延伸期预报的预报内容及其评价方法

大气是一个高度非线性的混沌系统,很小的不可避免的初始场误差也会通过与大尺度运动的非线性相互作用而影响大尺度环流形势,最后使得一定时期(确定性预报理论上限约为2周)之后的预报值与真实状况相距甚远,逐日预报失去意义。因此,延伸期预报起码目前不可能像10d以内中短期天气预报一样在10~30d的预报时效内做逐日天气的预报。延伸期预报的预报内容也不同于短期气候预测,它预报的不是未来10~30d内的要素平均值,而是未来10~30d(甚至更长)内某段时间(如候、旬“子时段内”)的要素平均值、距平或是持续强的异常环流造成的重大天气过程。可见,延伸期预报比短期天气预报要宏观一点,比短期气候预测报得要更精细一点。

这里有必要强调指出,预报时效与预报精度应该是相匹配的。也就是说,预报某一天气事件(过程)的提前时间的长短(即预报时效)与该天气事件实际开始的时间、持续时间、强度和空间范围的预报误差(即预报精度)应该是相对应的。举例来说,如果提前一天(即预报时效为1d),预报的天气事件(过程)开始时间出现了一天的偏差,则是不可接受的;但如果提前10d做出的天气过程预报,其开始时间相差1d甚至2d则都是有意义的。应该基于这样一种认识来探索延伸期预报的评价方法。

延伸期预报目前正处于研究或业务试用阶段,

其预报效果的评分指标还不很明确。梁萍等^[83]针对降水过程的不同持续时间并结合预报经验,通过多次试验制定了延伸期降水过程预报的评分指标。考虑到提前10~30d对降水过程的预报不可能像天气预报评分那样做到精确到站点和时间完全一致,他们认为除预报的降水范围和强度要求和实况一致外,当预报时段和实际降水时段存在较小偏差时也认定为预报正确。举例说明,对于3d以内的天气过程,起始和终止的时间与实况相差1d,也认为正确;对于持续时间4~6d的过程,预报与实况相差2d,也认为正确;对于7d以上的过程,预报与实况重叠4d以上时,也认为预报准确。另外,他们还利用该评分指标对1960—2007年汛期强降水过程预报进行了多年回报评分。辽宁省气象局也开展了降水过程预报客观检验指标研究,他们参照短、中期天气预报和长期气候趋势预测的质量评分方法,采用区域评分方法(对整个预报区域总体评定),制定了预报时效得分、预报强度得分和预报过程次数得分的评分标准。最后根据公式:

$$P = (\text{预报时效得分} + \text{预报强度得分} + \text{预报过程次数得分}) / 3$$

得到预报区域月内强降水过程预报的最后评分。上海市气候中心也提出了针对预报区域的评分方法,即:

$$C_s = D_a / (D_a + D_b + D_c)$$

其中, D_a , D_b , D_c 分别表示预报区域在评分时段内,以指定的降水强度标准为依据,报对天数、漏报天数和空报天数。 C_s 只能进行预报区域评总分,为了细化到具体台站,利用

$$C_i = D_{a,i} / (D_{a,i} + D_{b,i} + D_{c,i})$$

就可以得到某一台站*i*的评分结果,还可以提供预报区域内预报效果的空间分布。

此外,谷德军等^[51]为检验简谐波预报模型对广州降水中期和延伸期预报的效果,对1990—2000年的回报试验进行了评分,采用和借鉴了相关系数方法和广东省气象台中期预报科关于天气过程出现时段的评分方法。

5 结束语

延伸期天气预报尚处在探索和初步实践的阶段,但已取得了一定的可喜成果。数值模式预报的发展被认为是从根本上解决天气预报问题的科学途径,但是目前数值模式的预报时效还远远满足不了延伸期预报预测业务的需要,将预报时效延长到延伸期应是我们的期待,但短期内还难以实现,可谓“远水救不了近火”。眼下应该在改进动力模式的同时,采用各种方法进行试验,以解燃眉之急,并积累经验,期待突破。

致谢:加拿大环境部高级科学家、麦吉尔大学教授林海提供了建设性指导意见,杨玮、王晓芳、谢潇为本文的完成做出了贡献。在此,一并致谢。

参考文献

- [1] 张强,潘学标,马柱国,等.干旱.北京:气象出版社,2009.
- [2] 金荣花,马杰,毕宝贵.10~30d延伸期预报研究进展和业务现状.沙漠与绿洲气象,2010,4(2): 1-5.
- [3] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 1965, 17: 321-333.
- [4] Lorenz E N. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *J Atmos Sci*, 1969, 26: 636-646.
- [5] Lin H, Brunet G. Impact of the North Atlantic Oscillation on the forecast skill of the Madden-Julian Oscillation. *Geophys Res Lett*, 2011, 38, L02802. DOI: 10.1029/2010GL046131.
- [6] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 702-708.
- [7] Madden R A, Julian P R. Description global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J Atmos Sci*, 1972, 29: 1109-1123.
- [8] Koster, R D, Mahanama, S P P, Yamada T J, et al. Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, L02402. DOI: 10.1029/2009GL041677.
- [9] Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, et al. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts. *Science*, 2003, 301(5633): 636-640.
- [10] Woolnough S J, Vitart F, Balmaseda M A. The role of the ocean in the Madden-Julian Oscillation: Implications for MJO prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(622): 117-128.
- [11] 丁一汇,梁萍.基于MJO的延伸预报.气象,2010,36(7): 111-122.
- [12] Waliser D E, Lau K M, Stern W, et al. Potential predictability of the Madden-Julian oscillation. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84: 33-50.
- [13] Reichler T, Roads J O. Long-range predictability in the tropics. Part II: 30-60-day variability. *J Climate*, 2005, 18: 634-650.
- [14] Pegion K, Kirtman B P. The impact of air-sea interactions on the predictability of the tropical intraseasonal oscillation. *J Climate*, 2008, 21: 5870-5886.
- [15] Rashid H A, Hendon H H, Wheeler M C, et al. Prediction of the Madden-Julian Oscillation with the POAMA dynamical prediction system. *Climate Dynamics*, 2010, 36: 649-661.
- [16] Waliser D E, Jones C, Schemm J K E, et al. A statistical extended-range tropical forecast model based on the slow evolution of the Madden-Julian oscillation. *J Climate*, 1999, 12: 1918-1939.
- [17] Waliser D E. Predictability and forecasting// Lau W K M, Waliser D E. *Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System*. Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2005.
- [18] Jones C, Waliser D E, Schemm J K, et al. Prediction skill of the Madden and Julian oscillation in dynamical extended range forecasts. *Climate Dynamics*, 2000, 16: 273-289.
- [19] Hendon H H, Liebmann B, Newman M, et al. Medium-range forecast errors associated with active episodes of the Madden-Julian oscillation. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 69-86.
- [20] Seo K H, Schemm J K, Jones C, et al. Forecast skill of the tropical intraseasonal oscillation in the NCEP GFS dynamical extended range forecasts. *Climate Dynamics*, 2005, 25: 265-284.
- [21] Lo F, Hendon H H. Empirical extended-range prediction of the Madden-Julian oscillation. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 2528-2543.
- [22] Wheeler M, Weickmann K M. Real-time monitoring and prediction of modes of coherent synoptic to intraseasonal tropical variability. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2677-2694.
- [23] Mo K C. Adaptive filtering and prediction of intraseasonal oscillations. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 802-817.
- [24] Jones C, Carvalho L M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. *J Climate*,

- 2004, 17: 2078-2095.
- [25] Maharaj E A, Wheeler M C. Forecasting an index of the Madden-Oscillation. *Int J Climatol*, 2005, 25: 1611-1618.
- [26] Jiang X, Waliser D E, Wheeler M C, et al. Assessing the skill of an all-season statistical forecast model for the Madden-Julian oscillation. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 1940-1956.
- [27] Kang I S, Kim H M. Assessment of MJO predictability for boreal winter with various statistical and dynamical models. *J Climate*, 2010, 23: 2368-2378.
- [28] Vitart F, Leroy A, Wheeler M C. A comparison of dynamical and statistical predictions of weekly tropical cyclone activity in the Southern Hemisphere. *Mon Wea Rev*, 2010, 138: 3671-3682.
- [29] 李维京, 陈丽娟. 动力延伸预报产品释用方法的研究. *气象学报*, 1999, 57(3): 338-345.
- [30] 陈丽娟, 李维京. 月动力延伸预报产品的评估和解释应用. *应用气象学报*, 1999, 10(4): 486-490.
- [31] 李维京, 纪立人. 月动力延伸预报研究. 北京: 气象出版社, 2000.
- [32] 陈丽娟, 李维京, 张培群, 等. 降尺度技术在月降水预报业务中的应用. *应用气象*, 2003, 14(6): 648-655.
- [33] 陈丽娟, 李维京, 刘绿柳, 等. 中国区域月气候预测方法和预测能力评估. *高原气象*, 2008, 27(4): 838-843.
- [34] 江双五, 田红, 陈丽娟. 动力延伸预报产品释用方法的改进试验. *应用气象学报*, 2005, 16(6): 779-786.
- [35] 陈豫英, 陈楠, 王素艳, 等. MOS方法在动力延伸期候平均气温预报中的应用. *应用气象学报*, 2011, 22(1): 86-95.
- [36] 白旭旭. MJO对我国华南前汛期降水的影响//第27届中国气象学会年会灾害天气研究与预报分会场论文集, 2010, 北京.
- [37] von Storch H, Xu J S. Principal oscillation pattern analysis of the 30- to 60- day oscillation in the tropical troposphere. Part I: Definition of an index and its prediction. *Climate Dynamics*, 1990, 4: 175-190.
- [38] Wheeler M C, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 1917-1932.
- [39] Seo K H, Wang W, Gottschalck J, et al. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models. *J Climate*, 2009, 22: 2372-2388.
- [40] Xavier P K, Goswami B N. An analog method for real-time forecasting of summer monsoon subseasonal variability. *Mon Wea Rev*, 2007, 135: 4149-4160.
- [41] 李汀, 严欣, 琚建华. MJO活动对云南5月降水的影响. *大气科学*, 2012, 36(6): 1101-1111.
- [42] 孙国武, 陈葆德. 青藏高原上空大气低频波的振荡及其经向传播. *大气科学*, 1988, 12(3): 250-256.
- [43] 章基嘉, 孙国武, 陈葆德. 青藏高原大气低频变化的研究. 北京: 气象出版社, 1991.
- [44] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 64-68.
- [45] He J H, Lin H, Wu Z W. Another look at influence of the Madden-Julian Oscillation on the wintertime East Asian weather. *J Geophys Res*, 2011, 116, Do3109, doi: 10.1029/2010JD014787.
- [46] 丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 10~30d延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌. *气象科学*, 2010, 30(5): 569-573.
- [47] 支蓉, 龚志强, 郑志海, 等. 基于矩阵理论的全球温度资料的尺度性研究. *物理学报*, 2009, 58(3): 2113-3120.
- [48] 杨玮, 何金海, 孙国武, 等. 低频环流系统的一种统计预报方法. *气象与环境学报*, 2011, 27(3): 1-5.
- [49] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007.
- [50] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸预报试验. *大气科学*, 2012, 36(1): 102-116.
- [51] 谷德军, 纪忠萍, 林爱兰, 等. 广州逐日降水振荡及其延伸期预报的简谐波模型. *热带气象学报*, 2012, 待刊.
- [52] 丁一汇, 刘芸芸. 亚洲-太平洋季风区的遥相关研究. *气象学报*, 2008, 66(5): 670-682.
- [53] Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(3): 521-533.
- [54] 李崇银, 龙振夏, 穆明权. 大气季节内振荡及其重要作用. *大气科学*, 2003, 27(4): 518-535.
- [55] Chen L X, Zhu C W, Wang W, et al. Analysis of characteristics of 30-60 day low-frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(4): 623-638.
- [56] 陈隆勋, 高辉, 何金海, 等. 夏季东亚和印度热带季风环流系统动能和对流扰动的纬向传播特征[J]. *中国科学(D): 地球科学*, 2004, 34(2): 171-179.
- [57] 何金海, 宇婧婧, 沈新勇, 等. 有关东亚季风的形成及其变率的研究. *热带气象学报*, 2004, 20(5): 449-459.
- [58] 琚建华, 赵尔旭. 东亚夏季风区的低频振荡对长江中下游旱涝的影响. *热带气象学报*, 2005, 21(2): 163-171.
- [59] 毛江玉, 吴国雄. 1991年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡. *气象学报*, 2005, 63(5): 762-770.
- [60] 张瑛, 陈隆勋, 何金海, 等. 1998年夏季亚洲地区低频大气环流的特征及其与长江中下游降水的关系. *气象学报*, 2009, 66(4): 577-591.
- [61] Zhang L N, Wang B Z, Zeng Q C. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in southeast China. *J Climate*, 2009, 22: 201-215.
- [62] 杨秋明. 全球环流20~30d振荡与长江下游强降水. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2009, 39(11): 1515-1529.
- [63] 刘冬晴, 杨修群. 热带低频振荡影响中国东部冬季降水的机理. *气象科学*, 2010, 30(5): 684-693.
- [64] Ding Q H, Wang B. Intraseasonal teleconnection between the summer Eurasian wave train and Indian monsoon. *J Climate*, 2007, 20: 3751-3767.
- [65] 赵亮, 丁一汇. 东亚夏季风时期冷空气活动的位涡分析. *大气科学*, 2009, 33(2): 359-374.
- [66] 王跃男, 陈隆勋, 何金海, 等. 夏季青藏高原热源低频振荡对我国东部降水的影响. *应用气象学报*, 2009, 20(4): 419-427.
- [67] 王亚非. 有关OKJ波列研究及展望. *气象学报*, 2010, 68(4): 584-589.
- [68] 李双林, 纪立人, 倪允琪. 夏季乌拉尔地区大气环流持续异常. *科学通报*, 2001, 46(9): 753-758.
- [69] 布和朝鲁, 施宁, 纪立人, 等. 梅雨期EAP事件的中期演变特征与中高纬Rossby波活动. *科学通报*, 2008, 53(1): 111-121.
- [70] 潘婕, 纪立人, 布和朝鲁. 夏季欧亚中高纬持续流型的季节内气候特征. *大气科学*, 2009, 33(2): 300-312.
- [71] 张庆云, 陶诗言. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响. *气象学报*, 1998, 56(2): 199-211.
- [72] 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件. *大气科学*, 2003, 27(6): 1018-1030.
- [73] 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖, 等. 东亚梅雨系统的天气—气候学研究. *大气科学*, 2007, 31(6): 1082-1101.
- [74] 王遵亲, 丁一汇. 中国雨季的气候学特征. *大气科学*, 2008, 32(1): 1-13.
- [75] 梁萍, 陈隆勋, 何金海. 江淮夏季典型旱涝年的水汽输送低频振荡特征. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 84-91.
- [76] 黄菲, 黄少妮, 张旭. 中国降水季节内振荡的气候特征分析. *中国海洋大学学报*, 2008, 38(2): 173-177.
- [77] Wen M, Zhang R H. Role of the quasi-biweekly oscillation in the onset of convection over the Indochina Peninsula. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2007, 133: 433-444.
- [78] Wen M, Zhang R H. Quasi-biweekly oscillation of the convection around Sumatra and low-level tropical circulation in boreal spring. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 189-205.
- [79] 占瑞芬, 孙国武, 赵兵科, 等. 中国东部副热带夏季风降水的准双周振荡及其可能维持机制. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 98-108.
- [80] 尹志聪, 王亚非, 袁东敏. 梅雨准双周振荡的年内变化及其前期强信号分析. *大气科学学报*, 2011, 34(3): 297-304.
- [81] 梁萍, 丁一汇. 东亚梅雨季节内振荡的气候特征. *气象学报*, 2012, 70(3): 418-435.
- [82] 陈官军, 魏凤英. 基于低频振荡特征的夏季江淮持续性降水延伸期预报方法. *大气科学*, 2012, 36(3): 633-644.
- [83] 梁萍, 丁一汇. 强降水过程气候季节内振荡及其在延伸期预报中的应用. *高原气象*, 2012, 待刊.

我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势

康志明 鲍媛媛 周宁芳
(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 中期预报是天气预报业务的重要环节之一, 因其预报时效长, 预报可靠性也相对较高, 中期预报在防灾减灾科学决策中起着重要作用。回顾了我国中期预报的发展历史, 着重介绍了目前国家气象中心的中期预报业务现状以及主要技术手段。并通过分析和总结我国中期预报业务和国际先进国家的不同和差距, 讨论我国中期预报业务的未来发展趋势。同时, 还对国家气象中心开展的延伸期预报业务做简略介绍, 讨论其主要技术手段以及未来发展趋势。

关键词: 中期预报, 延伸期预报, 季风, MJO

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.003

Current Situation and Development of Medium-Range and Extended-Range Weather Forecast in China

Kang Zhiming, Bao Yuanyuan, Zhou Ningfang
(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract: Medium-range weather forecast is an important part of the weather forecast operation. Because of relatively long forecasting valid time and high reliability, medium-range forecast plays a significant role in the decision-making process of disaster prevention and reduction. This paper reviews the history of medium-range forecast in China, and emphatically introduces the current situation and the main technical means of medium-range forecast in the National Meteorological Center. Based on the comparative analysis of the differences and gaps in the medium-range weather forecast both in China and in developed countries, the development trend is discussed. A brief introduction to the extend-ranged forecast developed by the National Meteorological Center is also given in the paper, its technical means and the development trend are also discussed.

Keywords: medium-range forecast, extend-ranged forecast, monsoon, Madden-Julian Oscillation

1 引言

按“中期天气预报”国家标准, 中期天气预报的定义为“72h以上, 240h以内天气变化的预先估计和预告”。在“延伸期预报”概念出现之前, 在10d以上, 15d以内的预报也属于中期天气预报业务范畴。

我国地处欧亚大陆东端, 北临西伯利亚高寒地带, 东临太平洋, 以及受到高达对流层中层的青藏高原的热力与动力作用的显著影响, 使我国成为复杂的季风气候区域^[1-5]。由于季风的季节性推进和大尺度特征, 我国灾害性天气具有明显的中期变化规律, 并呈区域性分布特点, 如区域性暴雨洪涝和干旱、高温热浪、沙尘暴雨和寒潮等。而区域性灾害往往涉及某个或多个流域, 多个省(市), 直接威胁到国家和人民生命财产安全。因此, 我国中期天气预报自建立之初即以旱涝、冷暖趋势以及关键性、灾害性和转折性天

气预报服务作为核心业务, 以超前的预报时效, 在充分利用各种天气气候资源及防灾减灾等国家重要决策的气象保障中占有重要地位。

中期预报是一个困难而复杂的科学问题, 既不同于长期预报, 也不是短期预报的延长, 它着重于研究行星尺度系统或者一群天气尺度系统的演变规律, 特别是天气尺度系统与行星尺度系统之间的非线性相互作用和中期物理过程。自20世纪50年代中期天气预报业务开始, 到20世纪90年代初中期数值预报发展之前的四十多年里, 我国中期天气预报专家利用有限资源探索出了一条与短期天气预报不同的发展之路: 20世纪50年代, 主要采用前苏联牟尔坦诺夫斯基等为代表的“自然天气周期法”; 20世纪60年代, 德国鲍尔倡导的“环流型预报方法”占据主导地位; 20世纪70年代中后期, 北半球天气图开始在日常预报工作中得以应用, 并对其进行时间平均或空间滤波, 以识别长波、超长波演变, 制作更长时效的中期天气预报; 20世纪80年代前期, 数值模式形势产品开始出现, 将其转化为区域性的具体天气预报, 是该时期中期天气预

收稿日期: 2012年5月28日; 修回日期: 2012年8月10日
第一作者: 康志明(1978—), Email: kangzm@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006018)

报业务面临的新课题。

20世纪90年代之后,随着数值预报的发展,数值产品在时效、层次、要素、范围、分辨率和准确率等方面进展迅速,中期天气预报进入飞速发展期。特别是进入21世纪,随着信息技术和大气科学的发展,以中期数值天气预报为基础,各种数值产品统计释用技术为辅助手段,传统中期预报技术与天气学经典原理、天气动力热力学前沿理论为科学理论支撑,人机交互处理系统为工作平台的现代中期天气预报体系已基本成熟,中期集合预报产品业务应用逐步推进,中期天气预报已进入新的发展时期。

与中期预报相比,延伸期预报是一项新的预报业务。延伸期天气预报时效为10~30d,它衔接了天气预报(1~10d)和气候预测(月尺度以上)的“时间缝隙”。在中短期数值天气预报取得成功的基础上,世界上主要的数值预报中心均试图延长预报时效,而大气系统是一个高度非线性的混沌系统,这使得数值模式对初始时刻的误差非常敏感,即非常小的误差,随着时间的延长,误差会不断扩大。因此,在理论上决定了延伸期预报非常困难,利用数值预报对其预报有很大难度,统计预报也存在局限性。目前国内外延伸期预报业务的开展主要从两方面进行,一是对气象要素(气温、降水)在某段时间的平均值或距平值进行预报;二是针对持续性环流异常造成的重大天气过程进行预报。

近年来,我们在中期预报业务的发展上取得了一定的进展,延伸期预报业务也初步建立。然而,社会经济的快速发展,对中期、延伸期预报也提出了更高的要求。2008年1月,南方地区持续性低温雨雪冰冻天气造成的灾害和影响,体现出现代社会对灾害天气,特别是持续性异常极端事件预报时效尽量提前的需求越来越强。同时,与发达国家相比,我国中期、延伸期预报业务虽然有自身的特色,但也不可否认仍存在很大差距。2011年开始,国家气象中心推动现代天气业务建设,本文对中期、延伸期预报业务近年来取得的进展进行回顾,并对国内外在中期、延伸期预报方面的研究进展和主要技术手段给出总结,在此基础上,探讨我国中期、延伸期预报业务的发展趋势。

2 中期天气预报业务现状和发展趋势

2.1 中期天气预报业务的现状

2.1.1 发达国家中期天气预报业务现状

目前,欧美国家的天气预报业务中心依托其数值模式产品开发了大量的中期精细化预报产品。如美国国家环境预测中心(NCEP)主要集中制作3~7d

精细化的气象要素预报产品,具体包括3~7d最高和最低气温预报,3~7d 12h和24h间隔降水概率预报,4~7d 6h间隔降水可能性指数、露点、风、云量和天气等格点预报等;英国气象局(Met-Office)中期时段(3~5d)为逐日具体要素预报,如天空状况、最高气温、最低气温、降水量、风速、风向和能见度等;日本气象厅的中期预报业务产品为1~7d逐日站点趋势预报,其中降水为概率形式。Met-Office还对6~15d以及16~30d预报主要以文字描述的形式给出未来天气趋势、温湿特征等,同时也指出某些区域可能出现的极端天气事件。

此外,天气预报尤其中期预报出现由确定性向概率预报转变的趋势,NCEP的水文气象预报中心每日发布中期基本气象要素概率预报产品,气候预测中心发布延伸期降水和气温异常概率预报产品等。这些概率产品的生成多以客观为主,在技术支持上除了集合预报产品的应用外,还发展了蒙特卡洛等一系列统计预报方法来充分考虑预报的不确定性。概率产品覆盖多种尺度天气和预报时效,为用户科学认识天气预报的不确定性,并且将这种不确定性转化为可供经济用户使用的概率信息,这无疑是天气预报业务发展的里程碑。

2.1.2 我国国家级中期天气预报业务现状

相对于欧美国家以逐日精细化要素预报为主要业务产品,国家气象中心中期天气预报以防灾减灾和公众服务为重心,承担着大量的不定期的决策服务。预报的核心是对未来中期时段内全国总体降水、气温趋势的把握,以及灾害性、转折性和关键性天气过程的预报。

业务产品主要有“中期天气公报”(未来10d天气趋势预报)、“中期旬报”以及各种供政府决策的服务材料,其内容包括冷暖趋势(平均气温距平)、降水趋势和主要天气过程预报,特别是灾害性天气(区域性寒潮、暴雪、暴雨、高温、沙尘暴和霜冻等),转折性天气(持续性旱涝天气的转换、持续高温起讫、低温雨雪冰冻的持续与结束等)和关键性天气(华南前汛期暴雨、梅雨、华北暴雨和华西秋雨等)过程预报。在逐日预报方面,中央气象台主要为气温(以MOS客观产品为主)和降水(落区)预报,时间间隔为24h。

与发达国家相比,国家气象中心中期天气预报在预报产品的精细化程度和产品种类上都有明显差距。同时,集合预报应用程度不高,应用水平相对还比较低,概率预报业务发展缓慢。近年,国家气象中心中期现代天气业务建设在中期灾害性天气预报和中期概

率预报方法进行了业务拓展,开始设计并发布更有针对性的中期预报产品,如过程降水量预报、夏季逐日高温、冬季未来一周极端最低气温预报、气温距平和降水距平概率预报等。

2.2 中期预报技术方法

2.2.1 我国天气趋势、重大天气过程及灾害性天气的中期天气预报技术方法

鉴于我国中期天气预报重点在于天气总体趋势和重大天气过程,其决定性的环流因素主要有西风带锋区位置和强度变化,阻塞高压的建立和崩溃,冬半年南支西风扰动以及夏半年西北太平洋副热带高压等东亚季风系统成员的活动等。因此,探索这些大气环流和关键天气系统的演变规律和机制是中期天气预报技术的核心。中期天气预报的难点在于未来环流形势预报参考信息的不确定,为减少这种不确定性,需要增加较多基于中期预报基础理论的数值预报产品的再加工提炼产品,这是降低中期预报不确定性的重要途径。

从20世纪90年代以来,我国中期预报员继承和总结过去各个时期有效的预报技术经验和成果,广泛吸收现代气象科学前沿理论成果,利用信息化技术手段,针对我国各季节天气特点及其主要影响系统,深度开发中期数值预报产品;在中期数值模式预报产品中提炼能反映大气环流、关键天气系统的总体特征和演变趋势的特征物理量场和指数时间序列,并结合实况和历史观测资料、数值模式再分析资料分析其与气候态的偏差,以此预报未来中期时效内天气的总体变化趋势,形成了具有中国特色的中期预报技术方法。如通过500hPa平均高度与距平、Rossby指数(南北半球西风环流指数)、地转风、季风指数、副高指数等中期预报特征场和特征指数滤去短波,突出大尺度环流总体形势与气候态的偏差以及超长波、长波、急流和关键天气系统的活动特点,在我国气温和降水趋势预报、重大天气过程等中期和延伸期预报中有着非常重要的指示意义。

由于我国地域辽阔,天气气候复杂,灾害天气种类繁多。国家气象中心中期预报主要制作以下灾害性天气预报:北方地区冬春连旱、江南春季低温阴雨、北方春季沙尘、北方麦区初夏干热风、麦收期间连阴雨、华南前汛期暴雨、江淮梅雨、北方暴雨、长江中下游伏旱、夏季大范围持续性高温、东北夏季低温冷害、华西持续秋雨、江南深秋寒露风、冬季冷空气过程、台风、霜冻等等。大尺度环流形势的持续稳定和调整,是造成灾害性天气的主要环流背景。因此,准确判断大气运动不同阶段的环流和天气的演变趋势,

是中期灾害性天气预报的关键问题。我国中期预报员通过多年来实践经验总结、个例研究、天气动力学和统计学等综合分析,并吸收借鉴学术界的研究成果对上述各项灾害性天气形成了涵括大气环流背景、关键天气系统分布、大气三维动力热力结构以及关键气象要素阈值的天气学概念模型。在预报业务中,通过数值预报产品性能分析和订正,充分发挥预报员的经验和决策能力,形成成熟的中期灾害性天气预报业务流程,在防御气象灾害,科学合理地安排工农业生产等方面做出了积极贡献。

2.2.2 集合预报在中期天气预报中的应用

美国国家环境预报中心(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的集合预报系统1992年投入业务运行后,集合预报迅猛发展。集合预报的优势在于揭示天气过程非线性不确定性因素,与中期预报的最大困境——数值预报产品和天气过程的不确定性不谋而合,因此集合预报对于中期预报尤为重要。国家气象中心于1999年建立基于国产神威计算机的集合预报系统,2005年底,建立在全球T213L31模式基础上的全球集合预报系统,并投入实时运行,其产品率先在中期预报业务中应用。

目前,中国气象局与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国国家大气研究中心一起成为TIGGE(the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)资料交换的三个全球中心,每天接收(ECMWF)、(NCEP)和加拿大气象中心等国家的集合预报资料,预报时效达到10~16d。国家气象中心依托TIGGE资源,结合中期预报理念和技术方法积极开发中期业务产品。

在国家气象中心实时业务中应用的概率预报产品包括基于T213集合预报模式、ECMWF、NCEP GFS等集合预报模式开发的产品,主要有:(1)关键标准层的高度、风矢量及急流等逐日集合平均和距平及离散度产品;(2)逐日各等级降水量等气象要素集合平均及概率产品;(3)反映各集合预报成员对关键天气系统预报的发散度的特征等值线条图;(4)任一时段平均形势场和要素场的集合平均和离散度;(5)反映大气环流转变的特征指数及格点要素时间序列的盒须图;(6)任一时段平均气温距平、降水量等及其距平等的集合平均及离散度以及各等级概率预报产品;(7)基于气象要素阈值判别分析的灾害性天气概率预报;(8)基于天气系统和天气型识别的中期概率预报;(9)极端天气概率预报等。通过集合预报产品的开发和应用,中期预报技术和能力得到进一步发展。

2.2.3 中期数值预报产品的动力统计解释应用技术

基于天气气候、动力统计等方法的中期数值预报产品的解释应用技术是国际上对于气象要素预报的最为通行的预报技术。国家气象中心基于MOS技术的中期(3~10d)逐日最高气温、最低气温产品为各级气象台站逐日站点天气预报和与气温相关的灾害性天气预报提供了科学依据,取得了良好的成效。

针对中期气温趋势,基于主流模式中期预报数值产品和历史天气气候观测资料和气象要素再分析资料,利用车贝雪夫、自然正交法、多元线性回归和动力相似等技术开展中期客观预报技术方法研究,研发的“未来10天平均气温距平”、“未来10天降水量及其距平”等要素客观预报产品。

对模式降水的客观订正目前仍是中期天气预报的一大难题。长期以来,国家气象中心中期降水落区预报主要依靠预报员对模式降水的主观订正。由于中期时效内,雷达、云图、地面和高空观测等资料大都失去指示意义,数值模式误差增长也导致影响降水的诊断物理量几乎不可用;没有客观科学的支撑工具以及预报员个人知识背景差异等因素造成对模式降水订正的随意性较大,订正能力不高。2011年,中期预报团队开展了降尺度订正预报方法研究,针对汛期主要雨带,利用历史实况资料,分析我国盛夏典型强降雨过程样本的雨带分布特征,凝练雨带的主要模态;采用相关分析、EOF分解等数理分析方法和中期预报技术方法分析研究各主要降水模态和降水强度的大尺度环流特征和主要气象要素的强度和分布特征,形成雨带位置和强度的客观预报因子,并建立各主要模态雨带位置的客观预报方程。从而在数值预报模式基础上,利用大尺度环流特征和雨带的关系对数值模式降水预报进行客观订正,为提高中期降水预报能力提供技术支撑。

为充分挖掘中期预报中的不确定信息,提高小概率极端天气事件及高影响天气的预报能力,国家气象中心加大了中期概率预报产品的研发力度。目前,概率预报开发主要有两条技术路线。其一为基于集合预报产品的概率预报技术;另一路线为基于确定性预报的降尺度概率预报技术,即统计较长时间历史资料,形成包括实况观测资料和模式再分析资料的历史样本集,利用天气动力学分析、数理统计和合成等技术手段提炼历史资料 and 中期数值模式预报产品信息,利用客观动力相似等降尺度预报技术(或基于物理量诊断分析的配料概率生成技术),在主流模式确定性预报的基础上研发中期灾害性天气和气象要素客观概率预报技术,并形成产品以供业务参考。

2.2.4 中期天气预报业务平台

随着探测技术与数值预报的发展,预报员越来越面临着如何消化急剧膨胀的信息的难题,计算机可视化技术不仅为综合大量信息以及形象化的显示提供了有效的手段,还帮助预报员从新的视角分析认识天气系统的机理,从而推进了天气预报技术的发展。利用计算机建立天气预报业务系统,实现资源整合、流程优化和新技术开发是天气预报业务发展的必然之路。世界各国气象部门非常重视天气预报业务系统建设,如法国的“SYNERGIE”,美国AWIPS高级天气交互处理系统,澳大利亚AIFS预报业务系统,中国气象局MICAPS系统等。

各国业务预报系统的主要功能在于对雷达、卫星、各种观测资料的分析和可视化、实时数值预报产品的显示和加工处理以及预报产品的制作和发布,其主要优势功能模块在于中尺度模式产品和短期、短时临近预报。而中期天气预报技术开发较为薄弱,其在业务系统中的功能模块非常单薄,主要为中期数值模式逐日产品的调阅和中期预报制作。各国对中期预报系统开发的不重视,主要原因之一为有的国家地域狭小,影响天气系统较为单一,有的国家灾害性天气的中期变化规律不显著,如低纬度国家,某些国家如美国的主要灾害系统为爆发性气旋等中尺度系统,只能通过实时监测和中尺度模式模拟;另一重要原因是中期预报难度大,雷达等新资料除改进模式初始场之外,对中期预报意义不大,中期数值预报模式准确率随时效延长迅速下降,只能描述大尺度环流形势变化趋势,但已出现误差,其基于诊断分析的物理量因环流形势和天气尺度系统的误差几乎不可用。

我国灾害性天气季节性变化具有明显的中期变化规律,并呈区域性分布特点,因此我国区域性灾害天气的中期预报是非常重要而且是可行的。近年,国家气象中心天气预报室中期科为弥补MICAPS业务系统对中期预报的不足,开发了针对中期天气预报的中期预报系统,该系统整合了中期预报的所有资源,初步建立全国以日、候、旬为时间尺度单位的历史背景资料库,开发了基于有中国特色的中期预报理论为基础的中期数值预报再处理产品,初步开发了基于中期数值预报产品统计释用技术的中期预报客观预报产品,并形成了数值模式产品的统计学和天气学检验,实现了实时数据的自动录入、自动加工处理和入库以及各种产品的便捷图形显示。该系统基于可移植性、更新能力强,引起各省气象局的关注,正向全国各省气象局推广。

2.3 我国中期天气预报的未来发展方向

我国国家级中期延伸期预报业务的发展应在保持自身特点的同时,借鉴并充分吸收发达国家先进经验。要继续强化在国家防灾减灾决策气象服务中的主力地位,不断提升服务能力;逐步建立和完善中期延伸期概率预报业务;培养一支具有较高业务和科研能力的专业化人才队伍;业务发展和专业技术在全国起到引领和示范作用;逐步建设成为国内有影响力的国家级中期延伸期预报服务和技术研究中心。

为达到此目标,未来需要加强以下几项工作:

(1) 加强中期预报核心业务能力建设

针对中期灾害性、关键性和转折性天气,完善历史数据库建设,以全球中期模式产品为基础,基于动力统计释用技术,研究重大天气过程的客观(概率)预报方法,提升中期预报业务能力。

(2) 改进和完善现有中期业务预报产品,提高产品针对性和实用性

突出中期时段总体降水和冷暖趋势预报产品,进一步发展中期过程降水量预报业务,改进4~5d降水落区预报。“中期天气公报”预报时效延长至未来两周,对两周以内的主要天气过程给出趋势预报。

通过科技攻关、流程优化,在模式产品检验分析、集成分析等关键技术的支撑下,形成有效的中期气象要素预报订正分析方法和客观预报技术,力争大量级降水TS评分比模式有所提高。

(3) 发展概率预报业务,丰富灾害性天气预报产品

改进现有的降水距平、气温距平概率预报,发展基于集合预报的概率预报技术和动力统计结合的客观概率预报技术,进一步拓展中期概率预报业务。

开发6~10d有无降水以及大量级降水概率预报产品,开展中期灾害性天气(高温、低温、强降水、大风、霜冻和寒露风等)概率预报。

(4) 建立中期模式预报性能评估和分析业务

根据中期预报特点,研究数值模式大型环流形势、影响天气系统和中期气象要素等预报性能的检验评估方法,逐步建立并开展中期模式产品性能评估分析业务。

(5) 中期、延伸期综合业务平台建设

根据中期、延伸期业务需求,建立中期气象要素、模式再分析产品的历史资料库,建成中期灾害性、关键性和转折性天气过程的典型大气环流型及相对应的气象要素状况分布的历史资料库。建设集成气候资料库和中期延伸期预报方法的预报业务新平台。

(6) 丰富中期预报产品,提升影响力

开展大气环流系统的监测和未来10d的预报分析,包括极涡、南亚高压、副热带高压、高低空急流、中高纬阻塞高压、季风活动、南支槽、MJO等指数的监测和未来预报分析。

充分发挥网络的作用,建成集大气环流监测、模式性能分析、客观预报产品和概率预报产品等为一体的中期(延伸期)预报业务网站,力争成为国内最有影响力的中期(延伸期)预报专业服务网站,提升国家级业务中心地位。

3 我国延伸期预报业务现状和发展趋势

3.1 国内外延伸期预报业务发展情况

从2002年开始,国家气象中心利用历史资料和我 国月动力延伸模式预报产品和中期数值预报产品,通过分析冬季寒潮天气过程的大气持续异常特性、大气周期变化性质以及利用相似延伸预报模型,研发了国家级延伸期监测应用和预报模型,并建立了延伸期预报业务系统。2005年9月,延伸期预报业务开始准业务化,主要制作未来第二旬和第三旬的降水量及其距平百分率、温度及其距平预报。2008年开始,国家气象中心进一步推进延伸期预报业务的建设,开发新的预报方法,制定了预报规范和预报流程。2010年5月,国家气象中心和国家气候中心建立了联合会商机制和流程,统一了延伸期预报业务规范、流程和产品等。预报频次由每旬增至每候,由两个业务中心通过会商联合发布延伸期预报,产品内容包括未来第11~20d的降水量、温度距平、降水距平百分率以及相应时段的主要天气过程。

ECMWF将10~30d延伸期预报又称为月预报,预报产品基于集合预报系统数值预报产品。为延长预报时效,将中期预报进行动力延伸,并在预报起始日的第10d后开始考虑海气耦合作用。具体做法是,在第10d前模式中 海温保持恒定,从第10d开始利用风应力驱动海洋模式来产生海洋的初始场,热通量和EP通量由集合预报成员产生。输出的产品有500hPa位势高度场、海平面气压、12h累积降水和850hPa温度场,以气象要素的周平均值及其概率形式给出,预报时效为未来5~11d(第1周),未来12~18d(第2周),未来19~25d(第3周)以及未来26~32d(第4周)。

NCEP自1988年6月6日开始,NCEP下属的气候预测中心(CPC)开始负责6d以上预报的研究探索。目前CPC的延伸期预报业务主要是发布6~10d和8~14d的趋势预报,即偏高、偏低或等于同期气候值。具体产品为地表2m温度、降水百分率等。除预报产品

外, CPC还发布大量监测类产品, 比如海温等外强迫条件监测、风暴路径和阻塞高压等环流系统监测等。NCEP的延伸期模式预报开始于2004年8月13日, 采用海气耦合模式, 大气部分为NCEP的全球预报系统(GFS), 水平分辨率为T62L64。海洋部分为GFDL海洋模式。NCEP以不断提高延伸期预报技巧、提高产品通俗性、可用性以及精细化水平、预报预测由平均态向极端事件拓展为其未来发展目标。

总的来看, 与发达国家(以美国为例)相比, 我国延伸期预报业务还有很多不足, 体现在: 美国延伸期预报业务相对成熟, 我国还处于起步阶段; 美国延伸期业务产品丰富, 我国延伸期业务产品相对单一; 美国全球集合预报系统为延伸期预报核心技术, 我国全球集合预报系统还无法满足延伸期预报业务需要。

3.2 延伸期预报主要技术方法

3.2.1 动力延伸预报

延伸期预报大部分是基于数值模式展开, 即动力延伸预报。虽然延伸期的预报非常困难, 然而, 研究普遍认为该预报时段存在一些可预报的信息源, 如来自于低纬度大气低频变化, 特别是MJO^[6], 以及平流层和对流层的相互作用^[7, 8]等, 这为该时段的预报提供了基础。最近十多年来, 中期数值天气预报取得了很大的进展, 特别是资料同化技术和模式的性能都有了很大的提高, 模式的耦合技术也有了进一步发展, 这些都有利于延伸期预报的改进。

1995年, 中国气象局以原有的试验性动力延伸预报为基础, 开发建立了一套中期集合数值预报系统(DERF), 并于1996年9月开始投入业务试验运行, 此后经历多次升级和改进。目前我国数值模式水平与发达国家之间的差距明显缩小, 为开展延伸期预报奠定了基础。

3.2.2 统计预测方法

相似的天气形势反映了相似的物理过程, 因此相似预报方法是延伸期预报较早常用的预报方法之一。此外, 作为高频天气变化的重要背景, 周期为30~60和10~30d左右的大气低频振荡是联系天气与气候的直接纽带, 可作为开展延伸期预报的主要预报方法, 国内在这方面做了很多工作^[9, 10]。研究表明, 我国东部洪涝很大程度上与大气低频振荡有关, 特别是长江中下游、华南地区降水与低频振荡及其传播联系密切^[9, 11]。孙国武等^[12, 13]提出了基于时间滤波的低频天气图方法开展延伸预报, 并投入到上海、兰州和沈阳的汛期延伸期预报业务应用中; 此外, 季忠萍等^[14]以大气低频振荡原理和特性为依据, 根据影响广州天气关

键区的大气低频的演变和配置, 对广州等地的延伸期天气过程做出预报。近年来国内外学者也通过研究热带MJO不同时空分布与气温和降水的关系来做延伸期预报, 并取得了一些成果^[15-17]。上述研究结果部分已经在国家级延伸期预报业务中得到运用。

3.3 延伸期预报业务未来发展趋势

为了满足气象防灾减灾的迫切需求, 深化延伸期预报业务, 中国气象局提出大力发展延伸期预报。目前我国的延伸期预报业务建设的发展主要围绕以下几个方面展开:

(1) 目前业务中使用的T639和T213集合预报产品在1~10d已经有较好的预报能力, 将中期(集合)数值模式的预报时效延长到15d, 是今后发展的重要目标之一。

(2) 近些年, 资料同化技术和模式的性能都有很大的提高, 这些可能有利于延伸期预报的改进。基于目前性能较好的全球模式, ECWMF月预报系统显示了不错的预报效果, 这有助于促进延伸期预报的进一步发展。因此, 月动力延伸数值模式在2周以上至月尺度可预报性研究及应用技术开发十分重要。同时, 加强数值模式预报产品的解释应用技术研究。

(3) 虽然统计方法有一定的局限性, 但目前数值预报对延伸期预报还存在很大的不确定性, 因此采用动力与统计相结合的方法仍是改进延伸期预报的发展方向。因此, 相似分析、多元回归和概率统计等天气气候统计方法在延伸期预报技术上的应用研究仍十分必要。

(4) 已有的研究表明大气低频系统是开展包括中期—延伸期时间尺度在内的次季节尺度预测的物理基础之一, 但无论是中期预报还是延伸期预报国内对其应用都很少, 主要原因之一是缺乏一个客观的、实时提取演变信息(比如强度和位置)的方法; 另一方面是因为低频振荡作为大气内部动力过程, 其可预报性本身存在很大的不确定性, 预报手段也比较缺乏, 因此限制了其在预报业务中的应用。但近几年, 国际上在上述两个方面的研究都取得很大进展, 因此, 基于大气低频振荡规律, 包括中高纬度大气低频振荡和热带低频振荡等在我国延伸期预报中的应用技术研究是比较有效的方法。

(5) 加强延伸期预报平台建设, 建立延伸期预报规范化的业务流程。建立集动力延伸模式产品分析显示和统计预报技术等为一体的业务平台对延伸期预报业务发展至关重要。同时, 根据延伸期预报科学认识, 建立规范化的延伸期预报业务流程, 设计业务产

品,将有助于更好地发挥延伸期预报的社会效益。

总的来说,延伸期预报准确率的提高,离不开数值模式预报时效的延长。随着近年来集合预报的广泛应用,模式产品释用技术的发展,预报员对延伸期天气过程认知程度的加深,以及大气低频变化信号在延伸期预报中的应用等方面的研究发展,延伸期要素预报和重要天气过程预报的能力将有很大的提高。

4 结语

通过对我国中期、延伸期预报业务的回顾和分析,可以看到,我国中期天气预报业务经过几十年的发展,形成了有中国特色的预报技术方法,并在气象服务中发挥了重要的作用。但是,面对服务需求的快速增长,中期预报,尤其是延伸期预报业务能力的提高刻不容缓,业务水平与国际发达国家相比仍有一定差距。20世纪90年代以来,集合预报快速发展,中期、延伸期预报的不确定性得到了更为科学的定量描述,概率预报取代确定预报已经成为一种趋势。中期、延伸期预报业务必将迎来大的变革,同时也是中期、延伸期预报业务发展的好机遇。

参考文献

- [1] 章基嘉. 中长期天气预报基础. 北京: 气象出版社, 1982.
- [2] 盛华, 陶诗言. 青藏高原和落基山对气旋的动力影响. 气象学报, 1988, 45(2): 130-141.
- [3] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the east Asian summer monsoon in China. *Monsoon Meteorology, Monogr Geol Geophys*, Vol 7. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- [4] 梁潇云, 刘屹岷, 吴国雄. 青藏高原隆升对春、夏季亚洲大气环流的影响. 高原气象, 2005, 24(6): 610-614.
- [5] 王同美, 吴国雄, 万日军. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风环流的影响. 高原气象, 2008, 27(1): 1-9.
- [6] Waliser D K, Lau W S, Jones C. Potential predictability of the Madden-Julian oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84: 33-50.
- [7] Baldwin M P, Dunkerton T J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, 2001, 294: 581-584.
- [8] Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, et al. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts. *Science*, 2003, 301: 636-640.
- [9] Chen L X, Zhu C W, Wang W. Analysis of the characteristics of 30-60 day low-frequency oscillation near Asia during 1998 SCSMEX. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(4): 623-638.
- [10] 李崇银, 龙振夏, 穆明权. 大气季节内振荡及其重要作用. 大气科学, 2003, 27(4): 518-533.
- [11] 王遵娅, 丁一汇. 夏季长江中下游旱涝年季节内振荡气候特征. 应用气象学报, 2008, 19(6): 710-715.
- [12] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法. 高原气象, 2008(s): 64-68.
- [13] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报. 高原气象, 2010, 29(5): 1142-1147.
- [14] 纪忠萍, 谷德军. 广东省前汛期暴雨与500hPa关键区准双周振荡. 应用气象学报, 2010, 21(6): 671-684.
- [15] Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(3): 521-533.
- [16] Zhang L N, Wang B Z, Zeng Q C. Impacts of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in southeast China. *J Climate*, 2009, 22: 201-216.
- [17] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸预报. 气象, 2010, 36(7): 111-122.

会议信息

- ◆ 大气—海浪—海冰—海洋短期到中期耦合预报学术会: 状态、需求和挑战 (Workshop on Short- to Medium-range coupled prediction for the atmosphere-wave-sea-ice-ocean: Status, needs and challenges), 2013年3月19—21日, 美国, 华盛顿 (<https://www.godae-oceanview.org/science/task-teams/short-to-medium-range-coupled-prediction-smrcp-tt/>)
- ◆ 第四届WGNE天气和气候模式系统误差学术会 (4th WGNE workshop on systematic errors in weather and climate models), 2013年4月15—19日, 英国, Exeter (<http://www.metoffice.gov.uk/conference/wgne2013>)
- ◆ 第35届国际遥感环境大会 (35th International Symposium on Remote Sensing of Environment), 2013年4月22—26日, 北京 (<http://www.isrse35.org/>)
- ◆ 国际季节到10年预报学术会 (International workshop on seasonal to decadal prediction), 2013年5月13—16日, 法国, 图卢兹 (<http://www.meteo.fr/cic/meetings/2013/s2d/index.html>)
- ◆ 第21届ESA欧洲火箭和气球探测项目和相关研究学术会 (The 21st ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research), 2013年6月9—13日, 瑞士 (<http://spaceflight.esa.int/pac-symposium2013/index.html>)
- ◆ WCRP/CLIVAR第二届边界流动力学国际会议 (WCRP/CLIVAR Second International Symposium on Boundary Current dynamics), 2013年7月8—9日, 云南, 丽江 (<http://www.clivar.org/organization/indian/activities/wcrpclivar-second-international-symposium-boundary-current-dynamics>)
- ◆ 第三届中国科学院超级计算应用大会, 2013年8月11—17日, 安徽, 黄山市 (<http://sca2013.csp.escience.cn/dct/page/1>)
- ◆ 北京全球变化研讨会 (Beijing Symposium on Global Change), 2013年9月23—25日, 北京 (<http://bjsgc2013.csp.escience.cn>)
- ◆ 第三届全球华人空间/太空天气科学大会, 2013年10月15—21日, 广西, 桂林 (<http://guilin2013.csp.escience.cn>)
- ◆ 地球科学与环境保护国际会议 (ICESEP2013), 2013年10月18—20日, 昆明 (<http://www.icesep.org/home.html>)
- ◆ 区域气候国际会议 (International Conference on Regional Climate - CORDEX 2013), 2013年11月4—7日, 比利时, 布鲁塞尔 (<http://cordex2013.wcrp-climate.org/index.shtml>)

月动力延伸预报研究进展回顾

郑志海

(国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 延伸期预报介于中期天气预报和短期气候预测之间, 对开展防灾、救灾工作具有极其重要的意义, 同时又是具有相当难度的科学问题。延伸期时间尺度虽然超过逐日天气预报时效理论上限, 但仍然存在可预报的气象场特征。回顾了月动力延伸预报的发展历程和最新进展。基于大气系统的混沌特性, 重点回顾和总结了延伸期的可预报性、历史资料在月动力延伸期预报中的作用和延伸期集合预报方法等方面的研究进展。

关键词: 延伸期预报, 可预报性, 可预报分量, 历史资料, 集合预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.004

Review of the Progress of Dynamical Extended-Range Forecasting Studies

Zheng Zhihai

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

Abstract: The extended-range forecasting (ERF) fills the gap between medium-range weather forecasting and short-range climate forecasting. It plays an important role in disaster prevention and reduction, and it is often considered a difficult scientific problem. Although extended-range forecasting has exceeded the limit of daily predictability of weather, there are still partially predictable characteristics in such forecasts. Both history and development studies on dynamical extended-range forecasting (DERF) are reviewed. Based on chaotic characteristics of the atmosphere, extended-range predictability, the role of historical data in DERF and the extended-range ensemble prediction method are reviewed and summarized.

Keywords: extended-range forecast, predictability, predictable components, historical data, ensemble prediction

1 引言

2008年1月南方持续性低温雨雪冰冻事件以及其他一些灾害天气的预报表明, 目前短期天气预报已具有较高的技巧, 但更长时效的延伸期预报水平亟待提高, 防灾减灾的需求使得改进延伸期预报显得尤其迫切。大气可预报性理论研究表明, 逐日天气可预报时效的理论上限一般为2周^[1, 2]。在中短期数值天气预报取得成功的基础上, 世界上主要气象预报中心均在努力研发各种技术, 以提高天气预报的准确率与延长预报时效^[3-5]。

10~30d延伸期预报与天气预报和短期气候预测有很大的不同, 它的预报时效较长, 超过了逐日天气可预报时效的上限(约2周), 逐日天气预报的主要对象(如Rossby波)在延伸期时间尺度已经变得不可预报^[6-8]; 同时, 其预报时效又太短, 以至于气候系统

中一些缓慢变化的外界强迫(如海温、海冰、土壤湿度和积雪等)的作用还未完全显现。处于中短期天气预报和季节预测之间的动力延伸预报, 初始场的信息随着预报时效的延长而逐渐减弱, 而气候系统中缓变的外强迫所起的作用则在逐渐显现, 因此, 它既是初值问题, 也是边值问题, 这在理论上决定了该时间尺度的预报非常困难^[9-11]。

在大气环流模式(GCM)建立之后, 世界上的主要预报中心先后进行了大量的月动力延伸预报(DERF)试验^[12-21]。但由于预报技巧不高, 在当时并未将延伸期预报投入业务应用。随着对气候系统的认识不断加深, 尤其是对延伸期可预报信息源的认识不断深入, 如MJO、平流层和对流层的相互作用等^[10, 22], 为延伸期预报提供了发展基础。最近十多年来, 资料同化技术和模式的性能都有了很大的提高, 集合预报技术得到了广泛应用, 都为提高延伸期预报技巧提供了有利条件。因此, 世界上主要的数值预报中心再次对延伸期预报投入了极大的研究热情, 并逐步发展了自己的业务或准业务动力延伸期预报系统^[23-25]。为此, 本文主要回顾月动力延伸预报的发展

收稿日期: 2012年8月30日; 修回日期: 2012年11月30日

第一作者: 郑志海(1981—), Email: zhengzh@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金(41105070, 41005051);

国家科技支撑计划(2009BAC51B04); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906015)

历程和最新进展,结合延伸期的特点,重点回顾和总结延伸期的可预报性、历史资料在动力延伸期预报中的作用和延伸期集合预报方法等方面的研究进展。

2 月动力延伸预报的发展历程

中短期数值预报的成功,启发人们用数值模式进行延伸期预报,20世纪70年代初,Miyakoda等^[26]为实现月动力预报做了大量的试验,从10d的中期预报试验开始,在改进了很多模式和资料问题后,延伸到了月尺度。此后,利用全球模式GISS开展了大量的延伸期预报研究^[27,28],显示出一定的预报技巧。在这时期所用模式比较简单,受到可预报性的限制,虽经过很多努力对模式的气候漂移有所改进,但预报技巧有限。

在GCM建立之后,尤其是Miyakoda等^[29]利用GCM对1977年1月的阻塞提前一个月进行了再现。自此之后,用GCM作月平均环流预报有了蓬勃发展^[14-16]。世界上先进的业务预报中心^[17-21]先后进行了大量的月动力延伸预报试验。王绍武^[30]对这时期的研究工作进行了回顾,概括出以下几点认识:大部分只用大气环流模式,未和海洋模式耦合,初始场用大气的实际初始场,海温则大多采用气候平均或初始海温持续,一般只积分30d,然后求30d的环流平均距平;用系统误差订正或通过扣除模式气候平均的方式来克服气候漂移,并采用了集合预报;预报试验大多在冬季,月平均500hPa高度场的距平相关系数大约在0.35~0.40之间。预报技巧主要集中在前10d,10d以上的预报相对于气候预报显示出一定的预报技巧^[14-20],ECMWF和NCEP的一些研究表明延伸期预报技巧并不显著优于持续预报,且高质量的技巧是偶然的^[31,32],因此,这些试验在当时并未使得动力延伸预报投入业务应用。事实上,从20世纪80年代中期到90年代末,月平均环流预报的水平仍未有明显提高,这使得研究方向转向季节平均的环流预报,动力延伸预报基本处于中断状态。

在国外探索利用GCM试做月平均预报的同时,中国学者则创造性地提出一种距平滤波模式的理论和方法^[33,34],对500 hPa高度和地表温度距平场的月预报效果是令人鼓舞的。认为长期预报的物理基础是:有了非绝热耗散后,出现了一组比Rossby波移动更慢的非绝热波,并认为它代表了半永久的活动中心,是长期数值天气预报的预报对象,距平模式正是将Rossby波作为干扰长期天气过程的“噪音”而滤掉,为长期数值预报开辟了一条新路。此后,基于T42L9模式,郑庆林等^[35]考察了初值精度对月预报的影响,对模式中云辐射过程、地形和下垫面作用以及低纬预报方面进

行改进,并采用一种非纬向平均的云诊断新方案来改进预报。李维京等^[36]对500hPa月平均环流预报水平作了评估,对比分别使用气候和实况海表温度(SST)的月预报,初始场稳定时影响小,反之亦然;误差增长与大气斜压稳定性有关。1995年以后国内DERF研究全面展开,基于T42谱模式对月DERF季节变化和减小误差后处理方法的研究^[37];全球海温距平对月预报的影响^[38];将数字滤波方法应用到月尺度预报并考察保留不同低频过程的影响^[39];根据强迫耗散非线性系统自由度衰减理论提出了利用EOF剔除高频分量的月预报新方法^[40];建立了一个基于大气自忆原理的月预报谱模式^[41];将基于4D-Var同化的集合新方法应用到月DERF^[42];在南京大学混合坐标系原始方程模式上做了月DERF的全面试验^[43];把非线性时空序列预测理论和方法用于改进月尺度0波预报^[44];将大气相似性原理与T63月DERF模式相结合进行月平均环流预报试验,取得了很好的效果^[45],以此为基础进一步发展了动力相似预报的策略和方法^[46-49]。国内于1990年代后期建立了试验性月DERF业务系统^[50]。

延伸期预报非常困难,然而,普遍认为该预报时段存在一些可预报的信息源,比如来自于低纬度大气次季节变化,特别是MJO^[22],以及平流层和对流层的相互作用等^[10],这为该时段的预报提供了基础。虽然过去的很多研究显示月动力预报水平并未得到明显提高^[31,32],但最近十多年来,中期数值天气预报取得了很大的进展,特别是资料同化技术和模式的性能都有了很大提高,模式的耦合技术也有了进一步发展,这些可能有利于延伸期预报的改进,基于目前性能较好的全球模式,欧洲中期天气中心(ECMWF)^[24]、东京气候中心(TCC)和美国气候预测中心(CPC)^[25]等业务中心都已开展了业务的月预报应用,国家气候中心也正在发展新一代的动力延伸预报模式^[51],显示了不错的预报效果,这有助于促进延伸期预报的进一步发展。

3 延伸期的可预报性

大气是一个复杂的非线性系统,由于其内在的随机性,客观存在可预报期限。大气可预报性理论研究表明,逐日天气可预报时效的理论上限一般为2周。根据经典可预报性理论,短期数值天气预报可提为初值问题,短期气候预测为边值问题。对延伸期预报而言,由于预报时效超过逐日天气可预报时效的上限,但气候系统中缓变的外强迫所起的作用又未完全显现,它正好处于这两个时间尺度之间,因此它既是初值问题,又是边值问题,其可预报性更为复杂。

可预报性问题, 实质上是时空尺度问题, 不同时空尺度有不同的可预报性, 超过了逐日天气预报时效理论上限, 则未来某日或某个具体时刻的天气预报将变得不可能, 然而, 这并不意味着超过逐日天气预报时效理论上限以后的大气运动没有可预报的分量^[7, 52, 53]。莫宁^[54]曾指出“确定可预报性期限本身并不是一个建设性的课题(本身也不应该是目的), 建设性的解决某个长时期的可预报性问题应该是指出这时期中所预报的气象场的特征。”对于延伸期数值天气预报, 是否仍有可预报的气象场的特征? 一些观测事实表明, 行星尺度的大气活动中心、低纬度的低频信号及平流层的异常信号等特征时间尺度比天气尺度更长, 具有更长的预报时效。动力理论研究表明, 绝热、无耗散的方程组(线性理论)中的各种波动, 最慢的是天气尺度波(Rossby波), 其时间尺度为几天, 这是中短期天气预报重要的预报对象。已有研究发现有了非绝热耗散后, 出现了一组比Rossby波移动更慢的非绝热波, 并认为它代表了半永久的活动中心, 是长期数值天气预报的预报对象^[33, 34]。观测和动力理论研究均表明, 在延伸期时间尺度, 客观存在可预报的分量^[55, 56]。

可预报性通常从定性和定量的角度来进行度量, 大气系统的可预报性是其固有属性, 很多研究致力于从观测资料中反映大气的可预报性, 通常从信噪比角度来定性研究大气的可预报性^[57, 58], 定量方面则从非线性动力系统理论和误差增长的角度来研究可预报性, 如采用非线性局部 Lyapunov 指数来研究大气的可预报性^[59-61]。数值模式是延伸期预报的主要手段之一, 因此另一类可预报性研究是从数值模式出发, 研究模式的可预报性^[62, 63]。它的关键问题之一是确定描述天气和气候发展变化的非线性系统的 fastest growth initial perturbation, 通常假设初始误差无限小, 利用切线性模式来寻找线性近似的 fastest growth perturbation。由于切线性的局限性, 直接使用非线性模式, 引入了条件非线性最优扰动^[64, 65]。传统的可预报性和集合预报研究往往关注最优向量的发展, 因为它代表了相空间中误差增长最快的方向, 即最先失去可预报性的部分。相反, 也必然存在着初始误差增长较慢的分量, 即对初值小的误差敏感, 这正是可预报的分量。在实际预报中, 我们往往更关注在预报时段内还有哪些分量是可预报的, 对于不可预报的分量, 已经无法通过数值模式来确定性预报, 应避免其误差快速增长的干扰。基于此, 丑纪范等^[52, 53]针对大气系统的混沌特性, 以数值模式为基础, 阐述了 10~30d 延伸期可预报分量的提取方

法, 通过构建与最快增长初始扰动相反的泛函, 逐步求取误差增长较慢的分量, 将误差增长小于某个阈值的分量定义为可预报分量。

预报成功有两个重要因素: 一是对某个时间尺度, 实际大气过程中有哪些特征是可以预报的; 二是对这些可预报过程的理解程度, 即如何对这些可预报的特征进行有针对性的预报^[66]。延伸期预报的困难在于大气系统的混沌特性使得预报误差不可避免的快速增长和模式误差的稳定增长, 因此认识延伸期时间尺度的可预报性特征, 区分哪些特征是可预报的, 哪些特征是不可预报的, 是开展有针对性预报的前提和基础。

4 使用历史资料的重要性

数值模式作为实际大气的一种近似, 不可避免的存在误差, 其误差增长主要来自于两方面, 一是大气系统本身的不稳定性会放大初始误差, 导致小尺度特征结构的误差快速增长, 即内部误差增长; 二是模式缺陷导致外部误差增长, 即模式误差^[67, 68]。第一个方面是可预报性问题, 由于延伸期时间尺度超过逐日天气可预报时效的上限, 可预报性是一个不可回避问题; 第二个方面是数值模式在近似描述实际大气过程中存在误差。如何有针对性的减小这两方面引起的预报误差是提高动力延伸预报的关键。

数值天气预报的误差增长除了大气系统本身的不稳定性会放大初始误差外, 另一个重要原因是模式缺陷导致的外部误差增长。随着计算能力的飞速发展, 针对数值模式的改进开展了大量的研究, 尤其是在物理参数化过程或提高分辨率等方面, 然而, 不论多么准确的参数化方案或多么精细的分辨率, 不可分辨的次网格过程和模式误差都客观存在。因此, 数值模式虽得到了很大的改善, 但近一步提高预报水平还有相当的难度。数值模式是作为初值问题提出的, 而事实上大量依据历史资料的统计经验预报被广泛应用于业务中, 鉴于此, 如何结合二者的优点, 利用已有的历史资料(包括模式的历史表现)来提高动力模式的预报水平, 一直是备受关注的科学问题。

数值模式发展的同时, 用统计方法改善模式预报的模式误差订正技术也取得了长足的进步, 主要通过两种方式进行, 一种是后处理订正, 另一种则是过程订正。后处理订正在预报完成后对其结果进行处理, 没有考虑预报过程中内部误差和外部误差的非线性相互作用; 过程订正通过将短期的预报误差看成是模式状态的函数, 从而实现在积分过程中逐步订正预报误差, 阻止预报误差增长。显然, 数值模式的预报误差依赖于初始流型, 为了考虑模式误差的流型依

赖性，常采用统计方法建立预报误差与模式变量的联系，这类方法需要预先设定二者间的函数形式，用最优估计的方法确定函数中的各个参数，使得其对训练样本的拟合最佳^[68-75]。实际上，预先设定的函数形式是否是误差和模式变量真实关系的合理描述需要研究，且这种函数形式具有模式依赖性，不便于移植。

我国学者很早就提出了在数值预报中引入历史资料的重要性和可能性^[76, 77]，围绕如何有效结合历史资料和动力模式，开展了一系列很有特色的工作，例如使用过去演变资料的多时刻预报方法^[77, 78]、基于大气自记忆原理的方法^[79]、回溯阶差分格式^[80]以及模式统计后处理^[81]等，近年来，相似—动力方法^[45, 47, 53, 82-88]得到了很大的发展，并已初步应用到延伸期预报和短期气候预测中^[86-88]。针对延伸期尺度的可预报分量，有针对性的减小模式预报误差的方案和策略被提出^[89]。通过在预报过程中滤除随机分量，保留可预报性较高的分量，建立起针对可预报分量的数值模式，避免小尺度分量预报误差的快速增长对预报效果的影响。同时，结合历史资料，利用相似—动力方法对可预报分量的预报误差进行订正，达到减小模式误差和从统计角度考虑随机分量对可预报分量影响的目的，结果显示该方法能有效提高预报技巧。

5 延伸期集合预报

20世纪大气科学取得的重大成就之一，就是混沌现象的揭示。由于不稳定的非线性系统使得初始条件很小的误差，都将不可避免的在一段时间后导致预报技巧完全丧失，而受到观测和分析技术的限制，真实的大气初始条件永远无法准确获得，同时，作为实际大气非线性系统近似的数值模式存在误差，也会使得预报误差随着时间增长。初始条件和模式误差的不确定性使得一段时间以后只能预报天气事件发生的概率，集合预报正是解决初始条件和模式误差不确定性的有效途径。

集合预报的目的主要有三个：一是通过集合平均提高预报质量，其提高之处在于集合平均会过滤掉预报中不确定成分，而保留下集合成员中一致的部分倾向；二是提供预报的可靠性；三是为概率预报提供定量基础^[90]。集合成员中有一致倾向的部分对初值不敏感，即初始状态虽存在一定的差异，但这部分在预报时效内差异并未显著放大，这和模式的可预报性紧密相连。集合预报的离散度代表了对初值的敏感程度，集合成员中显著差异的部分正是不能进行确定性预报的部分，只能给出概率分布特征，同时不同的流型离散程度存在差异，因此可利用集合成员的偏离程度

来先验地给出可预报性和预报可信度的估计。由此可知，由于初值和模式不确定性的存在，确定性和概率性的预报都必不可少，可预报期限大于预报时效的分量，对初值不敏感，即使初值扰动也不会产生较大差异，因此只需进行确定性预报；而对初值敏感的部分是真正需要集合的部分，则必须用集合来给出概率分布。

集合预报是延伸期预报的重要手段，目前主要采用和中短期集合预报类似的方案，主要对初始条件和数值模式的不确定性进行有代表性的扰动，获得未来预报的概率分布。对初始条件主要通过初始扰动方法来考虑，如目前广泛应用于业务的繁殖法^[91]、奇异向量法^[92]和观测扰动法^[93]等，此外，还有很多扰动方法被提出，如最优初值形成的四维变分同化方法^[42]、条件非线性最优扰动法^[64, 65]和基于集合转换技术的初始扰动法^[94]等。对模式误差的不确定性，则多通过扰动边界条件、物理参数化过程中对预报对象敏感的参数或者采用不同参数化方案^[95, 96]，以及统计后处理的多模式集合和超级集合方法^[97, 98]等。大量研究和业务应用表明集合预报能有效提高预报技巧。

鉴于延伸期的可预报性特征的特殊性，各国在集合预报方案上有所不同^[99]，如美国CPC主要采用海气耦合模式^[25]，初始扰动包括了大气和海洋的演变；英国气象局和日本东京气候中心主要采用大气模式，海温为初始异常持续，初始扰动只包括大气分量；ECMWF则采用了不同的方案^[100]，前10d采用高分辨率的大气模式，10d之后则应用分辨率相对较低的海气耦合模式，对大气和海洋初始条件均进行了扰动。通过前面的讨论和分析，不难发现欧洲中心的延伸期集合预报和可预报性联系是更为紧密的。前10d，逐日天气是可预报的，因此采用分辨率较高的大气模式，但10d以后，由于初值信息的衰减，外强迫的作用不断显现，因此海气耦合则成为必然选择，同时，由于可预报性的限制，高分辨率的大气模式必然导致更多小尺度的预报误差增长，因此需要滤除不可预报的小尺度分量，而采用低分辨率的大气模式。延伸期集合预报必然要和其可预报性特征结合起来。针对延伸期的可预报性特征，对具有不同特性的延伸期可预报分量和随机分量应采用不同的集合预报方案，基于此发展了一种基于延伸期可预报性的集合预报新方法^[101]。

6 结语

10~30d延伸期预报介于中期天气预报和短期气候预测之间，是有相当难度的科学问题，当前的水平仍然比较低。本文回顾了动力延伸预报经历兴起、中

断到再发展的过程。针对大气的混沌特性, 讨论了延伸期不同于逐日天气和短期气候的可预报性特征, 并指出延伸期的时间尺度虽然超过逐日天气预报时效理论上限, 但仍然存在可预报的气象场特征, 这是延伸期预报的基础。结合数值模式不可避免的存在误差, 回顾和讨论了结合历史资料, 利用动力-统计相结合的方法减小数值模式预报误差的重要性。集合预报是延伸期预报的重要手段, 分析了几个业务中心的集合预报方案, 并提出了对具有不同可预报性特征的分量应采用不同的集合预报方案的思路。

参考文献

- [1] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20: 130-141.
- [2] Lorenz E N. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, 1982, 34: 505-513.
- [3] 陈德辉, 薛纪善, 杨学胜, 等. GRAPES新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究. *科学通报*, 2008, 53: 2396-2407.
- [4] Kalnay E, Lord S J, McPherson R D. Maturity of operational numerical weather prediction: Medium range. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79: 2753-2769.
- [5] Simmons A J, Hollingsworth A. Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2002, 128:647-677.
- [6] 丑纪范, 谢志辉, 王式功. 建立6-15天数值天气预报业务系统的另类途径. *军事气象水文*, 2006(3): 4-9.
- [7] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002.
- [8] Delsole T. Predictability and information theory. Part I - Measures of predictability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61: 2425-2440.
- [9] Reichler T J, Roads J O. The role of boundary and initial conditions for dynamical seasonal predictability. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2003, 10(3): 211-232.
- [10] Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, et al. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts. *Science*, 2003, 301: 636-640.
- [11] 穆穆, 李建平, 丑纪范, 等. 气候系统可预报性理论研究. *气候与环境研究*, 2002, 7(2):227-235.
- [12] Miyakoda K, Sirutis J, Ploshay J. One-month forecast experiments-without anomaly boundary forcings. *Mon Weather Rev*, 1986, 114: 846-869.
- [13] Palmer T N, Brankovic C, Molteni F, et al. The European centre for medium-range weather forecasts (ECMWF) program on extended-range prediction. *Bull Ame Meteorol Soc*, 1990, 71: 1317-1390.
- [14] Déqué M, Royer J F. The skill of extended-range extratropical winter dynamical forecasts. *Journal of Climate*, 1992, 5:1346-1356.
- [15] Owen J A, Palmer T N. The impact of El Niño on an ensemble of extended-range forecasts. *Monthly Weather Review*, 1987, 115:2103-2117.
- [16] Tracton M S, Mo K, Chen W, et al. Dynamical extended range forecasting (DERF) at the National Meteorological Center. *Monthly Weather Review*, 1989, 117:1604-1635.
- [17] Cubasch, U, Wiin-Nielsen A C. Predictability studies with the ECMWF spectral model for the extended range: the impact of horizontal resolution and sea surface temperature. *Tellus*, 1986, 38:25-41.
- [18] Tibaldi S, Palmer T N, Brankovic C, et al. Extended-range predictions with ECMWF models: Influence of horizontal resolution on systematic error and forecast skill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1990, 116:835-866.
- [19] Brankovic C, Palmer T N, Molteni F, et al. Extended-range predictions with ECMWF models: Time-lagged ensemble forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1990, 116: 867-912.
- [20] Palmer T N, Brankovic C, Molteni F, et al. Extended-range predictions with ECMWF models: Interannual variability in operational model integrations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1990, 116: 799-834.
- [21] Mansfield D A. The skill of dynamical long-range forecasts, including the effect of sea surface temperature anomalies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1986, 112:1145-1176.
- [22] Wheeler M, Hendon H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Month Weather Rev*, 2004, 132: 1917-1932.
- [23] 李维京, 张培群, 李清泉, 等. 动力气候模式预测系统业务化及其应用. *应用气象学报*, 2005, 16: 1-11.
- [24] Vitart F. Monthly forecasting at ECMWF. *Mon Weather Rev*, 2004, 132: 2761-2779.
- [25] Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. The NCEP climate forecast system. *J Clim*, 2006, 19: 3483-3517.
- [26] Miyakoda K, Hembree G D, Strickler R F, et al. Cumulative results of extended forecast experiments I. Model performance for winter cases. *Monthly Weather Review*, 1972, 100: 836-855.
- [27] Druyan L M, Somerville R C J, Quirk E J. Extended-range forecasts with the GISS model of the global atmosphere. *Monthly Weather Review*, 1975, 103:779-795.
- [28] Spar J, Lutz R. Simulations of the monthly mean atmosphere for February 1976 with the GISS model. *Monthly Weather Review*, 1979, 107:181-192.
- [29] Miyakoda K, Gordon T, Caverly R, et al. Simulation of a blocking event in January 1977. *Monthly Weather Review*, 1983, 111(4): 846-869.
- [30] 王绍武. 气候预测研究. 北京: 气象出版社, 1996.
- [31] Molteni F, Cubasch U, Tibaldi S. 30- and 60-day forecast experiments with the ECMWF spectral models. *Proc. ECMWF Workshop on Predictability in the Medium and Extended Range, Reading, United Kingdom, ECMWF*, 1986, 51-107.
- [32] Anderson J L, Van den Dool H M. Skill and return of skill in dynamic extended-range forecasts. *Mon Wea Rev*, 1994, 122:507-516.
- [33] 巢纪平, 季劲钧, 何家骅, 等. 一种长期数值天气预报方法的物理基础. *中国科学*, 1977(2): 162-172.
- [34] 巢纪平, 季劲钧, 朱志辉, 等. 长期数值天气预报的滤波方法. *中国科学*, 1979(1): 75-84.
- [35] 郑庆林, 宋青丽, 蒋平. 一个改进的T42L10谱模式及其在月预报中的应用. *应用气象学报*, 1993, 4(增刊): 50-56.
- [36] 李维京, 张小礼, 李清泉, 等. 海温对月平均环流影响的数值试验. *应用气象学报*, 1993, 4(增刊): 45-49.
- [37] 张道民, 纪立人, 李金龙. 动力延伸(月)预报的季节变化和误差分析. *大气科学*, 1997, 21(2): 141-150.
- [38] 骆美霞, 张道民. 实时海温对动力延伸(月)预报影响的数值试验研究. *应用气象学报*, 2002, 13(6): 727-733.
- [39] 杨燕, 纪立人. 数字滤波方法在月尺度数值预报中的应用 I. 初始场滤波的作用. *大气科学*, 1997, 21(4): 437-448.
- [40] 张培群, 丑纪范. 改进月延伸预报的一种方法. *高原气象*, 1997, 16(4): 376-388.
- [41] 谷湘潜. 一个基于大气自忆原理的谱模式. *科学通报*, 1998, 43(9): 1-9.
- [42] 龚建东, 李维京, 丑纪范. 集合预报最优初值形成的四维变分同化方法. *科学通报*, 1999, 44(10): 1113-1116.
- [43] 钱永甫, 郑琼. P- σ 全球模式的月尺度动力延伸预报试验. *大气科学*, 2001, 25(5): 641-649.
- [44] 陈伯民, 纪立人, 杨培才, 等. 改善月动力延伸预报水平的一种新途径. *科学通报*, 2003, 48(5): 513-520.
- [45] 鲍名, 倪允琪, 丑纪范. 相似-动力模式的月平均环流预报试验. *科学通报*, 2004, 49(11): 1112-1115.
- [46] 任宏利, 丑纪范. 统计-动力相结合的相似误差订正法. *气象学报*, 2005, 63(6): 988-993.
- [47] 任宏利, 张培群, 李维京, 等. 基于多个参考态更新的动力相似预报方法及应用. *物理学报*, 2006, 55(8): 4388-4396.
- [48] 任宏利, 丑纪范. 在动力相似预报中引入多个参考态的更新. *气*

- 象学报, 2006, 64(3): 315-324.
- [49] Gao L, Ren H L, Li J P, et al. Analogue correction method of errors and its application to numerical weather prediction. *Chinese Physics*, 2006, 15(4): 882-889.
- [50] 李维京, 纪立人. 月动力延伸预报研究. 北京: 气象出版社, 2000.
- [51] Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate. *Climate Dynamics*, 2008, 34(1): 123-147.
- [52] 丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 10~30d延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌. *气象科学*, 2010, 10(5): 569-573.
- [53] 郑志海. 6~15天数值天气预报业务技术研究. 兰州大学博士学位论文, 2010.
- [54] 莫宁. 天气预报——一个物理学的课题. 林本达, 王绍武译. 北京: 气象出版社, 1981.
- [55] Lorenz E. On the existence of extended range predictability. *Journal of Applied Meteorology*, 1973, 12(3): 543-545.
- [56] Roads J O. Predictability in the extended range. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(23): 3495-3527.
- [57] Shukla J, Gutzler D S. Interannual variability and predictability of 500 mb geopotential heights over the northern hemisphere. *Monthly Weather Review*, 1983, 111: 1273-1279.
- [58] 黄嘉佑. 长期天气过程的可预报性研究的进展. *气象科技*, 1992, 3: 30-37.
- [59] 陈宝花, 李建平, 丁瑞强. 非线性局部 Lyapunov指数与大气可预报性研究. *中国科学 (D辑): 地球科学*, 2006, 36: 1068-1076.
- [60] 丁瑞强, 李建平. 非线性误差增长理论及可预报性研究. *大气科学*, 2007, 31(4): 571-576.
- [61] Li J P, Ding R Q. Temporal-spatial distribution of atmospheric predictability limit by local dynamical analogs. *Mon Weather Rev*, 2011, 139: 3265-3283.
- [62] 王会军, 陈丽娟, 李维京, 等. 中国区域月平均温度和降水的模式可预报性分析. *气象学报*, 2007, 65(5): 725-732.
- [63] Simmons A J, Mureau R, Petroligias T. Error growth and estimates of predictability limit from the ECMWF forecasting system. *Q J R Meteorol Soc*, 1995, 121: 1739-1771.
- [64] 穆穆, 段晚锁. ENSO可预报性研究的一个新方法: 条件非线性最优扰动. *科学通报*, 2003, 48(7): 747-749.
- [65] Mu M, Duan W S, Xu H, et al. Applications of conditional nonlinear optimal perturbation in predictability study and sensitivity analysis of weather and climate. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(6): 992-1002.
- [66] Zhu Y. Ensemble forecast: A new approach to uncertainty and predictability. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(6): 781-788.
- [67] Chou J. Predictability of the atmosphere. *Adv Atmos Sci*, 1989, 6: 335-346.
- [68] Danforth C M, Kalnay E, Miyoshi T. Estimating and Correcting Global Weather Model Error. *Mon Weather Rev*, 2007, 135: 281-299.
- [69] Chen H, Lin Z. A correction method suitable for dynamical seasonal prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(3): 425-430.
- [70] Barreiro M, Chang P. A linear tendency correction technique for improving seasonal prediction of SST. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L23209.
- [71] Delsole T, Hou A Y. Empirical correction of a dynamical model. Part I: Fundamental issues. *Monthly Weather Review*, 1999, 127: 2533-2545.
- [72] Ferranti L, Klinker E, Hollingsworth A, et al. Diagnosis of systematic forecast errors dependent on flow pattern. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, 128: 1623-1640.
- [73] Leith C E. Objective methods for weather prediction. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1978, 10: 107-128.
- [74] Yang X Q, Anderson J L. Correction of systematic errors in coupled GCM forecasts. *Journal of Climate*, 2000, 13: 2072-2085.
- [75] Hamill T M, Whitaker J S, Wei X. Ensemble reforecasting: improving medium-range forecast skill using retrospective forecasts. *Monthly Weather Review*, 2004, 132: 1434-1447.
- [76] 顾震潮. 天气数值预报中过去资料的使用问题. *气象学报*, 1958, 29(3): 176-184.
- [77] 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题. *中国科学*, 1974(6): 635-644.
- [78] 郑庆林, 杜行远. 使用多时刻观测资料的数值天气预报新模式. *中国科学*, 1973, 16(2): 289-297.
- [79] 曹鸿兴. 大气运动的自忆性方程. *中国科学 (B辑): 化学*, 1993, 23(1): 104-112.
- [80] Feng G L, Dong W J. Evaluation of the applicability of a retrospective scheme based on comparison with several difference schemes. *Chinese Physics*, 2003, 12: 1076-1084.
- [81] Lin Z H, Wang H J, Zhou G Q, et al. Recent advances in dynamical extra-seasonal to annual climate prediction at IAP/CAS. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21: 456466.
- [82] 丑纪范. 长期数值天气预报的若干问题// 中长期水文气象预报文集. 北京: 水利电力出版社, 1979.
- [83] 邱崇践, 丑纪范. 改进数值天气预报的一个新途径. *中国科学 (B辑): 化学*, 1987 (8): 903-910.
- [84] 黄建平, 王绍武. 相似-动力模式的季节预报试验. *中国科学 (B辑): 化学*, 1991(2): 216-224.
- [85] Huang J P, Yi Y H, Wang S W, et al. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution. *Quart J Royal Meteorol Soc*, 1993, 119: 547-565.
- [86] 孙丞虎, 李维京, 任宏利, 等. 一个ENSO动力-相似误差订正模式及其后报初检验. *大气科学*, 2006, 30(5): 965-976.
- [87] 郑志海, 任宏利, 黄建平. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验. *物理学报*, 2009, 58(10): 7359-7367.
- [88] 郑志海, 封国林, 丑纪范, 等. 数值预报中自由度的压缩及误差相似性规律. *应用气象学报*, 2010, 21(2): 139-148.
- [89] Zheng Z H, Huang J P, Feng G L, Chou J F. Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components. *Science China Earth Sciences*, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4513-1.
- [90] Kalnay E. 大气模式、资料同化和可预报性. 蒲朝霞, 杨福全, 邓北胜, 等译. 北京: 气象出版社, 2005.
- [91] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(12): 3297-3319.
- [92] Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction System: Methodology and validation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1996, 122: 73-119.
- [93] Houtekamer P L, Lefaiivre L, Derome J, et al. A system simulation approach to ensemble prediction. *Monthly Weather Review*, 1996, 124(6): 1225-1242.
- [94] Wei M, Toth Z, Wobus R, et al. Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system. *Tellus A*, 2008, 60(1): 62-79.
- [95] Buizza R, Miller M, Palmer T N. Stochastic simulation of model uncertainties. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125: 2887-2908.
- [96] Mu M, Duan W, Wang Q, et al. Nonlinear processes in geophysics an extension of conditional nonlinear optimal perturbation approach and its applications. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2010, 17: 211-220.
- [97] Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Zhang Z, et al. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. *Journal of Climate*, 2000, 13: 4196-4216.
- [98] Krishnamurti T N, Kumar V. Improved seasonal precipitation forecasts for the Asian monsoon using 16 atmosphere-ocean coupled models. Part II: Anomaly. *Journal of Climate*, 2012, 25: 65-88.
- [99] 金荣花, 马杰, 毕宝贵. 10-30d延伸期预报研究进展和业务现状. *沙漠与绿洲气象*, 2010, 4(2): 1-5.
- [100] Vitart F, Molteni F. Dynamical extended-range prediction of early monsoon rainfall over India. *Monthly Weather Review*, 2009, 137: 1480-1492.
- [101] 郑志海, 封国林, 黄建平, 等. 基于延伸期可预报性的集合预报方法和数值试验. *物理学报*, 2012, 61(19): 199203.

MJO在延伸期预报中的应用进展

梁萍¹ 何金海² 穆海振¹

(1 上海市气候中心, 上海 200030; 2 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 10~30d延伸期预报是介于天气预报和短期气候预测之间的一个预报期, 近年来已成为国际上天气-气候无缝隙预报体系的一个重要发展方向。基于Madden Julian Oscillation (MJO) 为主的大气低频振荡特征, 我国和国际上的一些天气-气候预报中心在延伸期预报的研究和应用中取得了一定的成果。从MJO的基本特征出发, 基于MJO与天气气候关系的最新研究成果, 重点介绍利用MJO开展实时监测和延伸期预报应用进展, 主要包括: MJO的延伸期预报; MJO在延伸期强降水、台风、寒潮及灾害预估中的业务应用。最后对MJO在延伸期预报应用中的发展趋势进行了展望。

关键词: MJO, 延伸期预报, 强降水, 台风, 寒潮, 灾害

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.005

Application of MJO in Extended-Range Forecast

Liang Ping¹ He Jinhai² Mu Haizhen¹

(Shanghai Climate Center, Shanghai 200030 2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: 10–30d extended-range forecast (ERF) is a forecast “seam” between traditional weather forecast and short-term climate prediction. It has become an important research direction for the development of international weather-climate seamless forecast system in the last decades. Some national or international weather-climate forecast centers have made preliminary achievements on ERF research and application based on MJO. In this paper, according to latest studies related to associations between MJO and weather or climate, starting from basic features of MJO, development of MJO monitoring and ERF application are chiefly introduced. The developments mainly include: ERF of MJO and operational application of MJO in ERF of heavy rainfall, typhoon, cold wave and disasters. Finally, this paper discusses the developing trend of ERF based on MJO in the future.

Keywords: MJO, extended-range forecast, heavy rainfall, typhoon, cold wave, disaster

1 引言

我国是世界上遭受气象灾害最严重和最频繁的国家之一, 每年阶段性、持续性和频发性高影响天气气候事件导致的气象灾害都造成国民经济和人民生命财产的巨大损失。针对高影响天气气候事件在10~30d延伸期尺度上做出准确预报显得尤为重要和迫切。但10~30d延伸期预报是目前业务预报中的一个“缝隙”, 介于常规的10d以内逐日天气预报和月尺度以上短期气候预测之间。由于目前的动力模式难以提供准确描述大气的初始条件和缓变的海表面边界条件^[1], 10~30d延伸期预报的基础理论在国际气象科学发展前沿中还处于探索研究阶段。然而, 鉴于月内天气演变对农业生产和决策服务的重要性, 延伸期预报

已成为国际气象界关注的热点问题。

MJO是源于热带地区的30~60d准周期性季节内振荡现象, 具有纬向1波的全球尺度, 并以热带地区对流增强/减弱区的向东传播为主要特征。与热带对流异常相伴的, 近赤道地区(15°S—15°N)纬向风、海平面气压、云量、降水、海温和海表蒸发等也以30~60d为主要周期从西向东传播。尽管MJO具有全球尺度特征, 但在印度及西太平洋季风区表现得更为明显^[2,3]。

作为目前发现的全球最强低频信号, 国内外普遍认为MJO可作为联系数值天气预报和季节预报的桥梁, 填补中期预报与短期气候预测之间的延伸期预报时段缝隙。总的来说, MJO的重要应用价值主要源于: (1) MJO与热带对流的密切关系, 且热带对流是全球天气和气候系统的强迫因子。要延长中高纬天气的预报时效主要应考虑来自热带的低频信号, 即MJO。而中高纬大气季节内振荡也通过波能量的传播对热带MJO和亚洲季风活动产生相互作用。(2) MJO具有准周期性, 故MJO活动有可能具

收稿日期: 2012年10月23日; 修回日期: 2012年12月6日

第一作者: 梁萍(1980—), Email: liangping1107@163.com

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006020-04-01); 国家自然科学基金资助项目(41205060); 973项目(SQ2011CB046594)

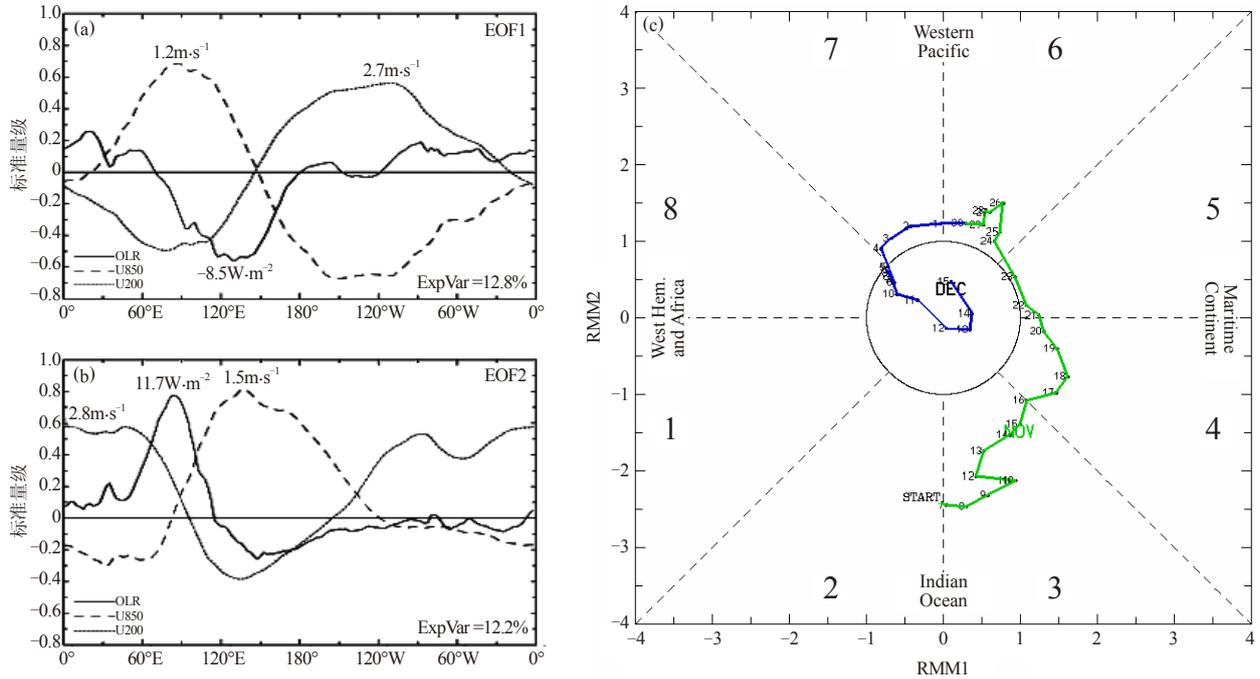


图1 (a) 和 (b) 由近赤道平均的OLR、U850、U200的联合多变量EOF获得的前2个模态空间结构；
(c) 多变量MJO指数RMM1、RMM2确定的位相分布演变图^[6] (曲线上标注的数字表示日期)

有提前15~20d左右的可预报性。(3) MJO的时间尺度介于月、季之间, 而延伸期预报的时间尺度约为10~30d, 二者在时间尺度上相匹配, 至少可以预报4~5周期间的主要过程和事件。鉴于MJO的上述三个特点, 目前比较有效的方法是根据以MJO为代表的季节内振荡的传播来制做延伸期预报。国际上一些天气-气候预报中心通过数年的业务试验已取得了初步结果。我国一些科研、业务单位近年来也分别利用MJO、低频天气图及动力模式等方法开展了10d以上的延伸期预报信息研判, 并针对不同对象制做了预报产品, 在业务实践中取得了一定的效果^[4-16]。

本文从MJO的基本特征出发, 基于MJO与天气气候联系的最新研究成果, 着重介绍利用实时监测的MJO开展延伸期业务预报的应用进展, 最后对MJO在延伸期预报中的发展趋势进行展望。

2 MJO基本特征及实时监测

MJO以热带降水增强或抑制区(特别是印度洋和太平洋)的向东传播为特征。伴随热带降水异常的东传, 热带和副热带地区的低层和高层大气环流也出现显著异常型, 且异常特征不仅局限于东半球, 还延伸到整个全球。提高MJO缓变信号的监测能力, 对于MJO位置和强度的确定以及对其后期演变的准确预测都非常重要。关于MJO的实时监测, 以NCEP气候预测中心(CPC)^[17]及澳大利亚气象局^[18]为代表的国际

气象业务部门近年来已开发了诸多产品并用于实时业务发布。一方面, 业务上采用时间-经度剖面图来监测MJO相关的基本物理量进而识别MJO的移动和强度, 主要监测指标包括: (1) 反映热带对流和降水特征的向外长波辐射(OLR); (2) 对流层高层速度势; (3) 对流层高层和低层风场异常; (4) 反映中纬度响应的500hPa位势高度异常。上述监测应用表明, 伴随MJO从印度洋向东传播, 热带降水异常和对流层高层散度也从印度洋向东传播, 而在降水增强区域前方(后方)的东风(西风)异常也向东移动贯穿整个热带。另一方面, 各业务部门也多采用Wheeler和Hendon^[19]定义的RMM1、RMM2指数作为MJO实时监测预报的指数。首先, 对近赤道平均的850和200hPa纬向风及OLR通过多变量EOF分解, 得到近赤道MJO空间结构的前两个主模态EOF1和EOF2(图1a和1b)。在MJO的实时监测中, 将实时的多变量投影于上述两个主模态, 得到主成分RMM1、RMM2, 在由RMM1、RMM2确定的位相分布图(图1c)上可点出逐天的MJO空间位相演变; MJO强度由RMM1、RMM2平方和的算术根确定, 当大(小)于1, 即位于位相图中的圆圈外(内)时, 为强(弱)MJO; 由此可监测MJO的移动及强度变化。上述MJO监测方法避开了传统上采用时间滤波提取MJO信号不能用于实时预测的弊端, 是提取MJO信号的有效方法。

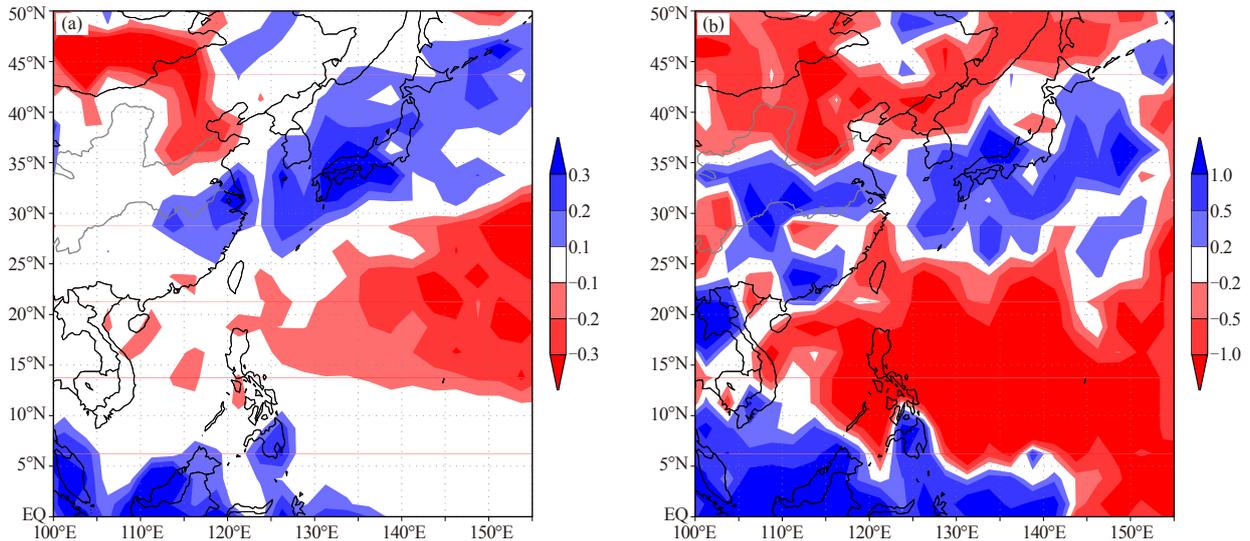


图2 夏季6—8月MJO位于3、4位相和6位相下降水现象 (a) 和极端降水事件 (b) 的概率差异 (概率为与气候概率的比值)^[6]

3 MJO的延伸期预报及应用

3.1 MJO的延伸期预报

关于MJO的预报业务,目前主要采用动力模式和统计模型两种途径实现,预报时间长度从2周到40d不等。在经验统计模型方面,美国、澳大利亚等主要利用各种回归模型^[20-22]、经验位相传播EWP^[23]和组合相似法ANL^[24]对MJO指数进行实时预报。韩国^[25]在多元回归、小波分析和奇异谱分析三种统计方法的基础上对MJO进行集合预报,结果表明多元线性回归集合预报对MJO指数的预报时效可达15d左右,而单一统计方法的预报时效为10d左右。

在MJO的动力模式预报方面,美国将MJO指数用于其全球业务中心的动力模式,如CFS/NCEP^[26](气候预报系统)、GFS/NCEP(全球预报系统)、GEFS/NECP(全球集合预报系统),进行MJO实时业务预报。试验比较表明,GEFS比CFS对MJO的预报有更高的技巧。为了对比各国动力模式(或集合预报)对MJO的实时业务预报性能,美国、英国、加拿大、欧洲中心、澳大利亚、巴西、日本、台湾及印度等国家和地区都采用统一的MJO指数算法,将各自实时业务模式得到的未来1周~40d(以2周为主)的MJO指数预报,加入到CLIVAR、WCRP-WWRP工作组设计的实时预报发布平台^[27]中,并计划采用统一的检验统计方法(双变量相关和均方根误差)对各家模式的MJO预报技巧进行检验^[28]。而韩国^[25]则应用多模式(AGCM和CGCM)集合预报方法开展了冬季MJO的30d延伸期的预报试验,对MJO两个指数的预报时效

可达20d;在此基础上进一步与统计预报相结合,使得预报技巧提高至22~24d。

3.2 MJO在重要天气气候事件延伸期预报中的应用

MJO与全球天气气候有重要联系且具有与延伸期尺度相匹配的准周期性,这使得MJO成为延伸期可预报性的重要来源,是全球延伸期预报的重要信号。在热带地区,MJO对天气气候的影响主要表现在:(1)改变区域降水分布型^[29-31];(2)增强或抑制热带气旋^[32-37];(3)调节季风爆发、中断、结束时间及季风强度^[38,39]。在东亚地区夏季,以MJO为主要特征的热带印度洋和西北太平洋大气季节内振荡通过影响亚洲夏季风,进而对东亚地区的天气气候演变和阶段性、持续性异常事件的发生产生重要影响^[40-52]。在冬季,MJO则可通过Rossby波列影响副热带大气环流,包括阿留申低压、西太平洋低层环流、副热带急流、天气尺度扰动及风暴轴等系统,从而影响到副热带地区的天气和气候。因此,基于以MJO为代表的季节内振荡制作延伸期预报可能是目前比较有效的方法。下面主要分强降水、台风、寒潮和灾害预估四个方面介绍基于MJO的延伸预报业务应用。

3.2.1 MJO具有的强降水延伸期预报信号及业务应用

以MJO为主要特征的热带有组织性对流季节内变率对全球都有明显影响^[53-58]。作为热带加热的大气响应,源自西太平洋的Rossby波列将向西传播,造成北美西海岸的异常强降水事件^[53-54,59]。而当MJO活动位于位相3(7)时,即活跃于印度洋(西太平洋)时,印度洋对流正(负)异常和西太平洋对流负(正)异

常的热带强迫偶极子可对副热带环流异常产生明显影响^[58]。Zhang等^[50]关于MJO与中国东南部夏季降水的关系研究表明：当MJO位于印度洋时，副高西进，中国东南部的的水汽输送和上升运动增强、降水增加；当MJO进入西太平洋时，情况则相反；随着MJO从印度洋向西太平洋移动，中国东南部夏季降水则由增强变为减少。MJO对夏季降水的最大异常和负异常影响可达气候平均降水的10%。对于冬季降水，Jia等^[52]的研究表明，MJO通过影响孟加拉湾南支槽、西太平洋副高、东亚冬季风和西风带槽脊活动进而影响冬季降水异常。同夏季类似，当MJO自印度洋向西太平洋传播时，长江流域和华南冬季降水由增强转为减弱。

丁一汇等^[8]研究表明，与气候概率相比，当MJO位于印度洋即3、4位相（西太平洋即6位相）时，降水事件（包括极端降水事件）的概率在东亚梅雨区（长江—韩日南部地区，图略）为一致性增大（减小）。对比MJO位于印度洋（3、4位相）和西太平洋（6位相）时的降水事件和极端降水事件的概率差异（图2）可明显看出，二者的差异呈现纬向分布特征，MJO位于3、4位相时东亚副热带地区出现降水/极端降水事件的概率明显增大，而其南北两侧则相反。这种非局地性差异反映出热带MJO对东亚副热带夏季降水的影响具有大尺度特征，而并非统计上的偶然性。

梁萍^[9]将MJO信号应用于晴雨及极端降水事件的延伸期预报中，给出夏季MJO不同位相下的上海地区雨日及极端降水出现概率（图3）。当热带MJO位于3位相（印度洋东部）、4位相（海洋大陆西部）时，上海雨日出现的概率最大（较气候概率大1~2成），对应的平均降水量也最多（较气候平均偏多3~4成）；而当热带MJO位于6位相（西太平洋西部）时，上海雨日出现的概率最小（较夏季平均概率小近2成），对应的平均降水量也最少（较夏季平均降水量偏少3~4成）。热带MJO位于3、4位相和6位相

时，上海地区出现极端强降水的概率分别达最大（较气候概率大4~6成）和最小（较气候概率小3成）。由此表明，MJO的3、4位相和6位相可作为上海地区夏季降水事件延伸期预报的热带信号。

MJO信号对于江淮梅雨的延伸期预报也有一定的参考价值。在2009年江淮梅雨延伸期预报中，热带MJO信号发挥了积极的参考作用。其中，在5月23日和6月2日制作梅汛期延伸期预报的实时业务中，美国NCEP-GFS分别预报6月上旬—中旬前期MJO活跃于西太平洋地区的6、7位相，根据夏季MJO不同位相与江淮/上海地区降水的关系，给出不利于江淮/上海在6月中旬前期之前入梅的信号，与实况一致，为江淮地区梅汛期的实时延伸预报提供了依据^[8]。

梁萍等^[14]进一步的预报试验对比研究表明，热带低频信号对梅雨区降水季节内振荡演变的预报价值优于中纬度或中高纬度低频信号。因此，在上海市气候中心开展的副热带季风延伸期预报业务中，基于MJO活动关键区低频信号建立回归模型，进而对6—9月副热带季风区（以上海和江淮地区为代表）未来10~50d的逐候降水趋势进行实时准业务预报。以上海地区延伸期降水预报实时业务为例，选取对上海降水异常影响明显的MJO关键区（近赤道印度洋及西太平洋，如图4a）的实况低频OLR作为预报因子，将其应用于回归模型，给出延伸期逐候降水演变预报（图4b）。可以看出，在2012年5月24日预报的上海延伸期降水量演变中，预报与观测实况的对比表明，该方法既可较好预报出延伸期（未来20~45d）降水的峰值出现时段（6月14—18日和6月24—28日）和逐候降水量增加或减少的演变，同时对逐候降水量异常也有一定的参考（图中预报与实况的异常趋势一致率为60%）。

此外，吕俊梅等^[60]研究了MJO传播规律对云南延伸期降水的影响，并利用MJO进行云南延伸期降水预测试验，较好地预测了延伸期（未来30d左右）大范

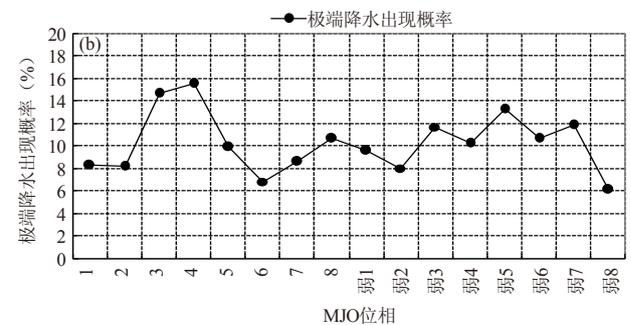
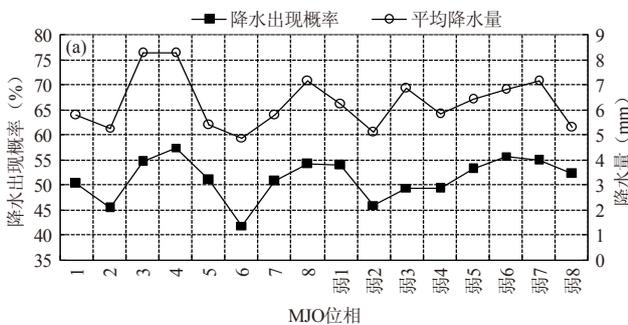


图3 夏季6—8月MJO不同位相合成的上海地区降水事件出现概率及平均降水量 (a) 和极端降水 (降水百分位数 $\leq 10\%$) 出现概率 (b)^[9]

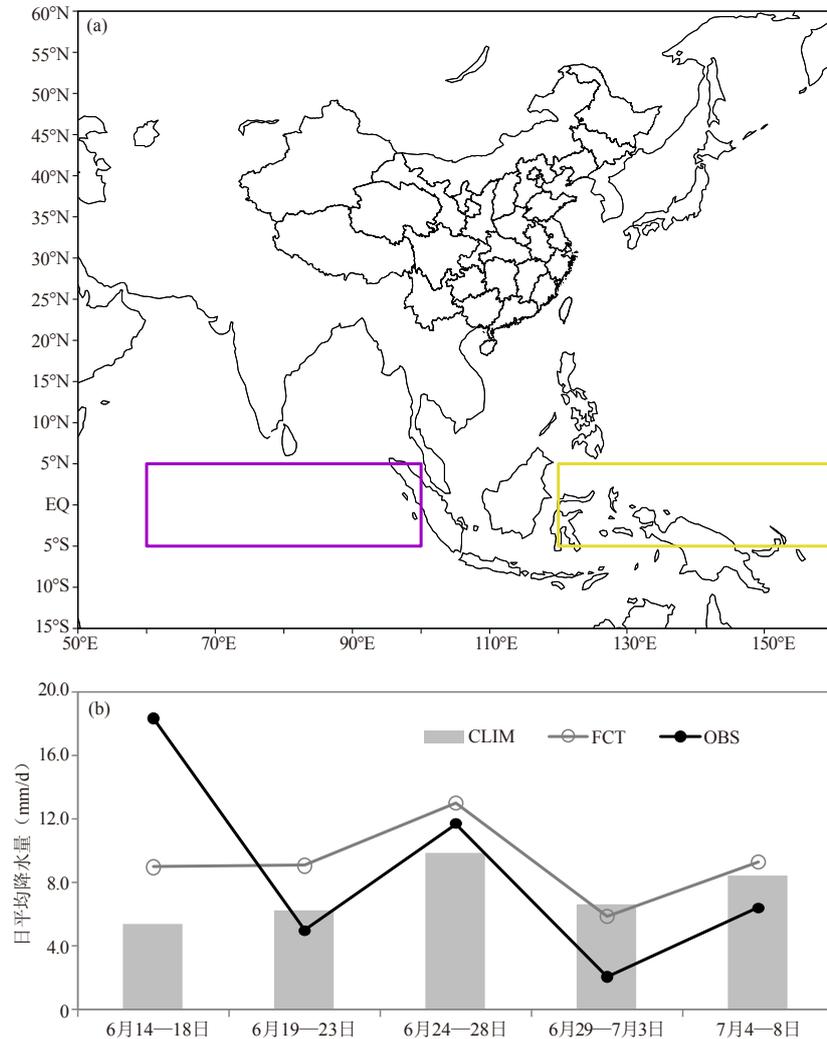


图4 (a) 基于MJO的延伸期降水统计预报模型的关键因子, 近赤道印度洋 (紫色方框) 及 西太平洋 (黄色方框) 的低频 OLR; (b) 2012年延伸期预报个例 (5月24日起报的上海地区延伸期降水演变, 空心圆折线为预报, 实心圆折线为观测, 阴影柱状图为1981—2010年平均, 单位: mm/d)

围干湿阶段的转换过程 (窗口期)。因此, 以MJO为主要特征的赤道印度洋和热带西北太平洋大气季节内准周期振荡通过影响亚洲夏季风进一步对东亚地区的天气气候演变和阶段性、持续性异常事件产生重要影响^[8, 42-44, 48, 50-52, 61-64], 可能成为包括江淮梅雨在内的东亚天气气候事件在10~30d延伸期时间尺度上的可预报信号。杨修群等^[65]通过“大气低频变化规律及其在气象预测中的研究”行业专项的研究, 建成了MJO对中国气候影响监测业务系统, 相关成果已在国家气候中心延伸期预警预测业务^[66]中得以应用, 包括不同月份或滑动季MJO不同位相的降水的合成, 为气候诊断和预测业务提供了有力的技术支持。

需要指出的是, MJO只是低频振荡在热带的重要表征, 全球各纬度带都存在低频振荡^[41, 67, 68]。因此,

综合不同来源的低频信号进行延伸期预报效果可能更好。为此, 梁萍等^[14]分别采用降水低频信号、关键区低频信号、MJO低频信号和低频环流场等多种统计模型并结合海-气耦合模式产品, 给出梅雨区降水量和降水概率的延伸期预报综合流程图 (图5), 在梅雨区降水延伸期预报中具有一定的应用价值。

3.2.2 MJO 具有的台风延伸期预报的信号及应用

谢义炳等^[69]的早期研究指出, 亚洲季风的脉动具有季节内振荡的特征, 并与西太平洋台风的多寡有较好的统计关系。丁一汇等^[70]发现南海和西北太平洋地区的热带辐合区中常常出现多个台风同时发展的现象, 表明台风活动具有集中性。Gray^[32]的研究表明, 全球热带台风形成总数往往集中在2~3周的活跃期, 而相对不活跃期也常常持续2~3周左右。这样, 诸如MJO

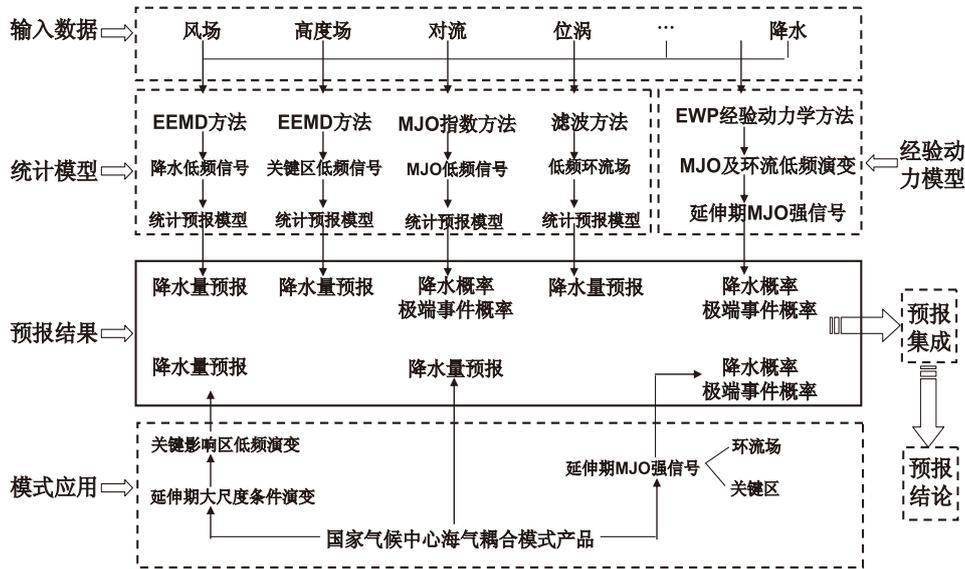


图5 基于诊断分析和预报试验的梅雨区降水延伸期预报综合流程图^[14]

等的行星尺度季节内变率可通过提供有利于（不利于）热带气旋发展的大尺度环境场来调节热带气旋活动的不同阶段。文献[33-37, 71]的研究进一步证实，MJO的不同位相可调节热带气旋的活动，随着MJO对流的向东传播，台风路径的密集区也向东移动，进而影响到热带地区的台风活动。例如，在MJO的6和7位相下，太平洋地区的台风较活跃，而在2和3位相下，太平洋的台风活动则大大减弱。

MJO对台风活动的调制影响可提高台风延伸期预报的可预报性。法国气象局^[72]基于Lorely等^[73]提出的统计方法，应用包含MJO指数的5个因子开展了以南半球为主的逐周台风活动延伸期预报，结果表明台风活动的预报技巧最大可达3周，在MJO强振幅情况下甚至有更长的预报时效。在2007—2008年夏季南印度洋地区生成台风的实时预测（图略）中，大多数台风的实况生成时间与预测的台风生成概率峰值时段相对应。因此，基于该方法的南半球台风实时预测在一定程度上还是比较成功的。

近2年，我们尝试在上海区域气候中心开展基于MJO的西太平洋台风活动信息预判业务，也取得了较好的试验结果。例如，在2012年，基于美国CPC自7月15日以来对未来2周MJO活动的组合相似统计预报（7月底—8月上旬前中期，MJO位相东移至西太平洋地区，图略），结合MJO活动位相与西太平洋台风的关系，在实时逐周滚动的长期预报信息业务中提出：7月底—8月上旬前中期，MJO位相东移至西太平洋地区，有利于该地区对流异常活跃和台风发展。上述信息预判与8月3日在西北太平洋洋面上生成201211号

海葵台风的事实基本相符。上述实时业务试验结果表明，MJO对北半球台风活动的延伸期预报也有一定的应用价值。

此外，在2012年7月13日的实时延伸期预报应用中，根据上一节所述的基于MJO统计回归模型，我们给出江淮地区可能于8月上旬中后期—中旬前期出现明显降水阶段的预报，这与201211号海葵台风影响带来的降水实况（8月7—12日浙江、上海、江苏、安徽和江西出现强降水）一致，表明已建立的基于MJO的统计延伸预报方法可为台风影响强降水预报提供一定的参考。

3.2.3 MJO 具有的寒潮低温延伸期预报信号及应用

Jeong等^[74]、Park等^[75]的研究表明MJO与东亚寒潮频数显著相关。东亚寒潮常常发生在MJO位于印度洋的时候，且MJO相关的大气环流异常可使得一般寒潮加强至极端寒潮。He等^[11]的最新研究发现，热带低频振荡的2个模态与我国冬季干（冷）和暖（湿）天气有显著相关，且有2候左右的预报时效，进一步指出了用MJO制作东亚冬季可能出现大范围“干冷”和“湿热”天气异常的区域。此外，国家气候中心延伸期预警预测业务^[70]对冬季MJO不同位相下的气温要素进行合成，发现MJO位于2、3位相（特别是3位相）对中国大部气温负异常有预报指示意义，而在1、8位相时，则对中国大部气温正异常有预报指示意义，为我国冬季大范围低温事件的延伸期预报提供了信号。

3.2.4 基于 MJO 的灾害预估

美国CPC将MJO的实时预报产品应用于每周滚动的全球热带灾害预估^[76]当中，根据ENSO、MJO及热

带季节内变率、与副热带环流的相互作用、数值预报、海温和土壤等下边界强迫、热带气旋发生发展统计模型,对未来2周全球热带灾害进行综合预估。内容包括:逐周降水增大或受抑制的可能区域,有利或不利于热带气旋生成的可能区域,以及预估的不确定性分析。如何综合各种统计/动力预报信息并将其转化为灾害预评估,上述基于MJO的灾害预估产品的发布为我们提供了范例。

4 展望

(1) MJO为季节内尺度变化,比7~9d以下的高频天气扰动具有更长的可预报性,是改进东亚地区延伸预报的重要途径。就其预报业务应用而言,目前已在国家级、区域级和省级一些业务、研究单位进行了应用试验和研究。但目前基于MJO的业务预报内容主要为降水/气温异常、梅雨和降水阶段,随着预报研究的进一步深入,今后我国的MJO业务应用还可能包括台风、持续低温、干旱等事件及灾害预报。

(2) 就预报方法而言,当前动力模式对MJO关键区及传播等的模拟还存在一定问题,这是目前动力延伸预报方法的主要问题。目前,统计方法的预报时效多优于动力模式。但统计方法具有一定的局限性,而动力模式则存在很大的改进空间。随着动力模式在MJO多尺度结构模拟上的改进和分辨率的进一步提高,在其基础上采用多模式集成或动力与统计相结合的方法,将进一步提高降水、极端事件与高影响天气统计特征的预报能力,可成为改进季节内或延伸期预报的发展方向。此外,如何将MJO与动力模式及其他延伸预报方法(如低频天气图)相结合,值得进一步研究。

(3) 在预报机制机理方面,MJO有明显的年内变化和年际变化,在不同季节或不同ENSO背景下,其活跃程度及循环周期有所不同。MJO是热带季节内振荡(Intraseasonal Oscillation, ISO)的最显著部分,而ISO既具有多时间尺度特征(包括以10~20d和30~60d两类准周期为主的振荡),又具有全球性特征(不仅存在于热带,也出现于中高纬)。为进一步提高MJO在延伸期预报中的适用性,有必要在分析以MJO为代表的ISO多时间尺度变化的基础上,进一步研究不同时间尺度的ISO传播过程对不同时空范围的重要过程、事件及异常的影响机理,特别是MJO与中高纬环流或天气气候事件相联系的物理图像。另一方面,与MJO变率相一致的30~60d季节内振荡具有全球性,而10~30d准周期振荡也对亚洲天气气候产生重要影响,这种振荡也应考虑和应用。各种季节内振

荡如何从源地传播以及在传播过程中如何相互作用并影响季节内天气气候过程/事件的强度、持续性和范围,是值得深入研究的关键问题,这可进一步为基于MJO的延伸期预报提供合理的物理动力基础。

致谢:在本文的撰写过程中,丁一汇院士、孙国武研究员提出了诸多建议,并进行了认真细致的修改,作者在此表示由衷感谢。同时,感谢审稿专家及编辑部对本文提出宝贵建议。

参考文献

- [1] Waliser D E. Predictability and forecasting// Lau W K M, Waliser D E, eds, *Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System*. Heidelberg: Springer-Praxis, 2005.
- [2] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40~50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 1971, 28(5):702-708.
- [3] Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40~50 day period. *J Atmos Sci*, 1972, 29(6): 1109-1123.
- [4] 孙国武,信飞,陈伯民,等.低频天气图预报方法. *高原气象*, 2008, 27(s): 64-68.
- [5] 孙国武,信飞,孔春燕,等.大气低频振荡与延伸期预报. *高原气象*, 2010, 29(5): 1142-1147.
- [6] 孙国武,孔春燕,信飞,等.天气关键区大气低频振荡延伸期预报方法. *高原气象*, 2011, 30(3): 594-599.
- [7] 丑纪范,郑志海,孙树鹏.10-30d延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌. *气象科学*, 2010, 30(5): 569-573.
- [8] 丁一汇,梁萍.基于MJO的延伸预报. *气象*, 2010, 36(7):111-122.
- [9] 梁萍.中国梅雨的季节内振荡分析和延伸预报.中国气象科学研究院,南京信息工程大学博士学位论文,2010.
- [10] 杨玮,何金海,孙国武. NCEP/CFS模式对东亚夏季延伸预报的检验评估. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 659-669.
- [11] He J H, Lin H, Wu Z W. Another look at influences of the Madden-Julian Oscillation on the wintertime East Asian weather. *J Geophys Res*, 2011, 116(2), D03109, doi:10.1029/2010JD014787.
- [12] 杨玮,何金海,孙国武.低频环流系统的一种统计预报方法. *气象与环境学报*, 2011, 27(3): 1-5.
- [13] 钱维宏.气候变化与中国极端气候事件图集.北京:气象出版社, 2011.
- [14] 梁萍,丁一汇.基于季节内振荡的延伸预报试验. *大气科学*, 2012, 36(1):102-116.
- [15] 梁萍,丁一汇.东亚梅雨季节内振荡的气候特征. *气象学报*, 2012, 70(3): 418-435.
- [16] 陈官军,魏凤英.基于低频振荡特征的夏季江淮持续性降水延伸期预报方法. *大气科学*, 2012, 36(3): 633-644.
- [17] <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/mjo.shtml>
- [18] <http://cawcr.gov.au/staff/mwheeler/maproom/RMM/>
- [19] Wheeler M, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(8):1917-1932.
- [20] Maharaj E A, Wheeler M. Forecasting an index of the Madden-Oscillation. *Int J Climatol*, 2005, 25: 1611-1618.
- [21] Jiang X N, Waliser D E, Wheeler M C, et al. Assessing the skill of an all-season statistical forecast model for the Madden-Julian Oscillation. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(6): 1940-1956.
- [22] Jones C, Carvalho L M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. *J Climate*, 2004, 17(11): 2078-2095.
- [23] Seo K, Wang W, Gottschalk J, et al. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models. *J Climate*, 2009, 22(9): 2372-2388.
- [24] Peng P, van den Dool H. Forecast tropical sub-seasonal variability with the constructed analog method. *American Geophysical*

- Union, Fall Meeting 2007, abstract #A41B-04.
- [25] Kang I S, Kim H M. Intraseasonal prediction and predictability for boreal winter. The Global Monsoon System: Research and Forecast, Chang C P et al., Eds, World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, Vol 5. Singapore: World Scientific, 2011.
- [26] Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. The NCEP climate forecast system. *J Climate*, 2006, 19(15): 3483-3517.
- [27] http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/CLIVAR/clivar_wh.shtml
- [28] Lin H, Brunet G, Derome J. Forecast skill of the Madden-Julian Oscillation in two Canadian atmospheric models. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(11): 4130-4149.
- [29] Knutson T, Weickmann K. 30-60 day atmospheric oscillations: Composite life cycles of convection and circulation anomalies. *Mon Wea Rev*, 1987, 115(7): 1407-1436.
- [30] Rui H, Wang B. Development characteristics and dynamic structure of tropical intraseasonal convection anomalies. *J Atmos Sci*, 1990, 47(3): 357-379.
- [31] Kayano M, Kousky V. Intraseasonal (30-60 day) variability in the global tropics: Principal modes and their evolution. *Tellus*, 1999, 51: 373-386.
- [32] Gray W M. Hurricanes: Their formation, structure, and likely role in the tropical circulation. *Meteorology over the Tropical Oceans*, 1979, 155-218.
- [33] Liebmann B, Hendon H H, Glick J D. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian Oscillation. *J Meteor Soc Japan*, 1994, 72(3): 401-412.
- [34] Maloney E D, Hartmann D L. Modulation of eastern North Pacific hurricanes by the Madden-Julian Oscillation. *J Climate*, 2000, 13(9): 1451-1465.
- [35] 张庆云, 彭京备. 夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响. *大气科学*, 2003, 27(1): 97-106.
- [36] Bessafi M, Wheeler M C. Modulation of south Indian Ocean tropical cyclones by the Madden-Julian oscillation and convectively coupled equatorial waves. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(2): 638-656.
- [37] 李崇银, 潘静, 田华, 等. 西北太平洋台风活动与大气季节内振荡. *气象*, 2012, 38(1): 1-16.
- [38] 王斌. 认识和预报亚洲季风气候: 前沿突破点和展望. *气象学报*, 2008, 66(5): 653-669.
- [39] Waliser D E. Intraseasonal variability. // Wang B, eds. *The Asian Monsoon*. New York: Springer/Praxis Publishing Ltd, 2006.
- [40] Krishnamurti I N, Subrahmanyam D. 1982. The 30-50 day mode at 850mb during MONEX. *J Atmos Sci*, 1982, 39(9): 2088-2095.
- [41] 李崇银. 大气中的季节内振荡. *大气科学*, 1990, 14(1): 32-45.
- [42] 李崇银, 龙振夏, 穆明权. 大气季节内振荡及其重要作用. *大气科学*, 2003, 27(4): 518-533.
- [43] Chen L X, Zhu C W, Wang W, et al. Analysis of characteristics of 30-60 day low frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(4): 623-638.
- [44] 陈隆勋, 高辉, 何金海, 等. 夏季东亚和印度热带季风环流系统动能和对流扰动的纬向传播特征. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2004, 34(2): 171-179.
- [45] 朱乾根, 何金海. 亚洲季风建立及其中期振荡的高空环流特征. *热带气象学报*, 1985, 1(1): 9-18.
- [46] 何金海, 智协飞, Nakazawa T. 中国东部地区降水季内变化的季节锁相. *热带气象学报*, 1995, 11(4): 370-374.
- [47] 琚建华, 赵尔旭. 东亚夏季风区的低频振荡对长江中下游旱涝的影响. *热带气象学报*, 2005, 21(2): 163-171.
- [48] 毛江玉, 吴国雄. 1991年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡. *气象学报*, 2005, 63(5): 762-770.
- [49] Krishnamurthy V, Shukla J. Seasonal persistence and propagation of intraseasonal patterns over the Indian monsoon region. *Climate Dynamics*, 2008, 30(4): 353-369.
- [50] Zhang L N, Wang B, Zeng Q C. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in southeast China. *J Climate*, 2009, 22: 201-215.
- [51] 杨秋明. 全球环流20-30d振荡与长江下游强降水. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2009, 39(11): 1515-1529.
- [52] Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(3): 521-533.
- [53] Mo K C, Higgins R W. Tropical convection and precipitation regimes in the western United States. *J Climate*, 1998, 11(9): 2404-2423.
- [54] Higgins W, Schemm J, Shi W, et al. Extreme precipitation events in the western United States related to tropical forcing. *J Climate*, 2000, 13(5): 793-820.
- [55] Vecchi G. A, Bond N A. The Madden-Julian Oscillation (MJO) and northern high latitude wintertime surface air temperatures. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L04104, doi:10.1029/2003GL018645.
- [56] Donald A, Meinke H, Power B, et al. Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation on rainfall. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L09704, doi:10.1029/2005GL025155.
- [57] Lin H, Brunet G. The influence of the Madden-Julian oscillation on Canadian wintertime surface air temperature. *Mon Wea Rev*, 2009, 137(7): 2250-2262.
- [58] Lin H, Brunet G, Mo R. Impact of the Madden-Julian Oscillation on wintertime precipitation in Canada. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(10), 3822-3839.
- [59] Jones C, Waliser D E, Schemm J K, et al. Prediction skill of the Madden and Julian oscillation in dynamical extended range forecasts. *Climate Dyn*, 2000, 16: 273-289.
- [60] 吕俊梅, 琚建华, 任菊章, 等. 热带大气MJO活动异常对2009—2010年云南极端干旱的影响. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2012, 42(4): 599-613.
- [61] 何金海, 宇婧婧, 沈新勇, 等. 有关东亚季风的形成及其变率的研究. *热带气象学报*, 2004, 20(5): 449-459.
- [62] 丁一汇, 刘芸芸. 亚洲-太平洋季风区的遥相关研究. *气象学报*, 2008, 66(5): 670-682.
- [63] 张瑛, 陈隆勋, 何金海, 等. 1998年夏季亚洲地区低频大气环流的特征及其与长江中下游降水的关系. *气象学报*, 2009, 66(4): 577-591.
- [64] 刘冬晴, 杨修群. 热带低频振荡影响中国东部冬季降水的机理. *气象科学*, 2010, 30(5): 684-693.
- [65] 杨修群, 任福民, 周兵. 大气低频变化规律及其在气象预测中的应用研究. 延伸期(月内)过程预报研讨会, 上海, 2010.
- [66] http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/Monitoring/moni_mjo.php
- [67] Anderson J R, Rosen R D. The latitude-height structure of 40-50 day variation in atmospheric angular momentum. *J Atmos Sci*, 1983, 40(6): 1584-1591.
- [68] Krishnamurti T N. Summer monsoon experiment, a review. *Mon Wea Rev*, 1985, 112(9): 1590-1626.
- [69] 谢义炳, 陈受钧, 张一良, 等. 东南亚基本气流与台风发生的一些事实的统计分析. *气象学报*, 1963, 33(2): 200-217.
- [70] 丁一汇, 范惠君, 薛秋芳, 等. 热带辐合区中多台风同时发展的初步研究. *大气科学*, 1977, 2(2): 89-98.
- [71] Harr P A. Monsoon impacts on tropical variability. The 3rd International Workshop on Monsoon (IWM-III): (I) The Reviews on the Current State of Research/Forecasting of Monsoon. World Meteorological Organization (WMO), WMO Tropical Meteorology Research Program (TMRP) Commission for Atmospheric (CAS), 2004, 11: 255-287.
- [72] <http://www.meteo.nc/espro/previcycl/cyclA.php>
- [73] Leroy A, Wheeler M C. Statistical prediction of weekly tropical cyclone activity in the Southern hemisphere. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(11): 4130-4149.
- [74] Jeong J H, Ho C H, Kim B M, et al. Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia. *J Geophys Res*, 2005, 110, D11104, doi: 10.1029/2004JD005408.
- [75] Park T W, Ho C H, Yang S, et al. Influences of Arctic Oscillation and Madden-Julian Oscillation on cold surges and heavy snowfalls over Korea: A case study for the winter of 2009-2010. *J Geophys Res*, 2010, 115, D23122, doi: 10.1029/2010JD014794.
- [76] <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/ghazards/index.php>

2010年福建前汛期典型持续性暴雨过程的低频特征分析

高建芸¹ 陈彩珠¹ 周信禹² 游立军¹

(1 福建省气候中心, 福州 350001; 2 福建省气象台, 福州 350001)

摘要: 利用NCEP再分析资料和NOAA的逐日向外长波辐射(OLR)资料以及福建2010年逐日降水资料, 通过对2010年福建省前汛期6月13—27日典型持续性暴雨过程的分析, 揭示了持续性暴雨过程的大气低频特征以及持续性暴雨过程发生前的大气低频前兆信号。研究表明: (1) 2010年福建前汛期降水具有显著的30~45d左右的变化周期, 呈现明显的少雨期和多雨期交替出现的干湿窗口, 长达15d的持续性暴雨就是发生在最后一个湿窗口内。(2) 持续性暴雨期间中高纬度和低纬的低频系统的配置和变化十分有利于暴雨的长时间维持。南亚高压、副热带高压、乌拉尔山高压、东亚大槽以及来自孟加拉湾和南海的水汽输送的低频变化造就了这次持续时间之长、强度之强皆为历史罕见的强降雨过程。(3) 持续性暴雨过程伴随着一次明显的东亚夏季风涌, 降水强度与大气低频振荡的强度密切相关, 强降水往往出现在对流活动30~60d季节内振荡(ISO)和10~20d准双周振荡(BWO)湿位相叠加的时期。(4) 低频系统具有明显的持续性和周期性, 及时监测并掌握大气低频前兆信号的变化规律, 无疑对后期持续性暴雨过程的延伸期预报具有十分重要的意义。

关键词: 大气低频变化, 典型持续性暴雨, 前汛期, 福建

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.006

Analysis of Low-Frequency Features on Typical Persistent Heavy Rainfall during Pre-Flood Season in Fujian Province in 2010

Gao Jianyun¹, Chen Caizhu¹, Zhou Xinyu², You Lijun¹

(1 Fujian Climate Center, Fuzhou 350001 2 Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001)

Abstract: By using the NCEP reanalysis data and NOAA daily out-going long-wave radiation (OLR) data, and the daily precipitation data in Fujian in 2010, this paper reveals the atmospheric low-frequency characteristics of the persistent heavy rain and atmospheric low-frequency precursor signals before the persistent heavy rain through the analysis of typical persistent heavy rain in Fujian Province during the pre-flood season from June 13th to the 27th in 2010. The study shows that: (1) The precipitation in pre-flood season in Fujian in 2010 has obvious characteristics of low-frequency variation, the significant cycle is about 30–45 days, showing an obvious wet and dry window that is drier and rainy periods alternating, up to 15 days of persistent heavy rains that occurred in the final wet window. (2) During the persistent heavy rain, the configuration and change of the low-frequency system in mid-high latitudes and low latitudes is very conducive to maintaining the long period of heavy rain. The low-frequency variation of the South Asia high, the subtropical high, the blocking high in Ural Mountains, the East Asian trough and moisture transport from the Bay of Bengal and the South China Sea created this heavy rainfall process with the duration and strength being rarely seen in history. (3) This persistent heavy rain accompanied by once obvious East Asia monsoon surge, the intensity of the precipitation is closely related to the intensity of the atmospheric low-frequency oscillation. The heavy precipitation often appears in the 30–60 days' intraseasonal oscillation (ISO) and 10–20 days' the quasi-biweekly oscillation (BWO) superimposed wet phase. (4) The low-frequency system has significant ongoing and periodic characteristics, timely monitoring and mastering the variation discipline of the atmospheric low-frequency precursory signals. The system has a very important significance for the extended-range forecast of the persistent heavy rain in the future.

Key words: atmospheric low-frequency oscillation, typical persistent heavy rain, pre-flood season, Fujian

收稿日期: 2012年9月3日; 修回日期: 2012年10月7日
第一作者: 高建芸(1968—), Email: Fzgaojyun@163.com
资助信息: 福建省科技厅科技计划重点项目(2011Y0008)

1 引言

福建省地处我国华南沿海地区, 受东亚季风影响降水充沛, 降水主要集中在4—9月, 其中在4—6月的前汛期是大范围洪涝灾害发生的阶段, 引发洪涝的主

要原因是持续性暴雨。2010年6月13—27日福建省发生了长达15d的持续性暴雨过程，其影响范围之广、持续时间之长、强度之大，给福建省带来严重灾害，特别是对交通运输、基础设施、农业及人民群众生活造成严重影响和损失，全省受灾人数达295.89万人，倒塌房屋4.88万间，直接经济损失高达108.18亿元。据统计，福建省自20世纪90年代以来，前汛期持续性暴雨过程有明显增强的趋势，此类持续性高影响天气事件所导致的气象灾害也越来越重，提前10~30d预报出前汛期持续性暴雨天气过程对防灾减灾有着重要意义。因此，衔接天气预报和短期气候预测之间的10~30d时间尺度的延伸期预报开始成为气象服务的主要关注热点。

大气季节内振荡（ISO）一般指时间尺度大于7~10d而小于90d的大气振荡^[1]，对持续性异常/极端事件/高影响事件的发生具有重要作用，作为高频天气变化的重要背景，季节内振荡是联系天气和气候的直接纽带，可作为开展延伸期预报的主要预报研究^[2]。

20世纪80年代以来，我国学者对季节内振荡对天气气候的影响开展了诸多研究，尤其是对季风区ISO影响的研究，包括南亚季风、东亚季风^[3]和南海季风^[4, 5]。研究表明ISO对东亚夏季风活动及降水异常均有重要影响^[6-8]；贺懿华等^[9]发现了南海夏季风季节内振荡有明显的北传现象并且可以影响到江淮地区；夏季风在北传过程中存在明显的准双周和季节内振荡现象，季风雨带的北进、停滞和中断等现象正是大气低频变化的表现^[10, 11]。韩荣青等^[12]认为北太平洋副热带大气ISO的活动与东亚夏季降水紧密相关，西北太平洋大气ISO在年际尺度上包含有显著的ENSO信号。近年来，澳大利亚、美国等国外学者关于MJO活动的监测和预报研究相当活跃，如Wheeler和Hendon^[13]、Maharaj等^[14]利用MJO开展延伸期预报，取得了较好效

果。目前我国处在延伸期预报的理论研究与准业务试行阶段，关于延伸期预报方法的研究值得进一步的探索与研究^[15-18]。

本文以2010年6月13—27日福建历史上罕见的典型持续性暴雨过程为研究对象，从大气季节内振荡特征的角度出发，揭示了持续性暴雨过程的大气低频特征以及持续性暴雨过程的前兆低频信号，为福建前汛期持续性暴雨过程的延伸期预报提供科学的参考依据。

2 资料与方法

本文应用2010年福建66个气象站逐日降水资料、NCEP再分析资料以及OLR逐日资料，采用了morlet小波分析、典型个例分析和合成分析等方法，使用Butterworth滤波器提取30~60d季节内振荡（ISO）和10~20d准双周振荡（BWO）等低频信号。

3 2010年福建前汛期降水概况

3.1 前汛期降水的低频特征

为了对福建前汛期降水强度和空间分布有个量化的表征，应用福建全省66个气象站降水资料，定义了一个暴雨综合指数（byzs）。该指数兼顾了降水范围以及强度，重点关注暴雨量级的降水，具体定义如下：

$$byzs = 2.0 \times \text{特大暴雨站数} + 1.5 \times \text{大暴雨站数} + 1.0 \times \text{暴雨站数} + 0.2 \times \text{大雨站数} + 0.04 \times \text{中雨站数} + 0.01 \times \text{小雨站数}$$

其中权重系数的确定主要考虑降水强度和空间分布对暴雨综合指数影响的大小，根据福建前汛期降水特点而确定的。应用逐日的暴雨综合指数，进行morlet小波分析。由图1可见，2010年福建省前汛期于4月22日开始，6月28日结束，整个前汛期降水具有显著的30~45d左右的变化周期，呈现明显“少雨期—多雨期—少雨期—多雨期”等干湿窗口交替出现的现象，且每个窗口维持时间大约15d左右，前汛期最后一场长达15d的持续性暴雨就是发生在最后的一个湿窗口期。

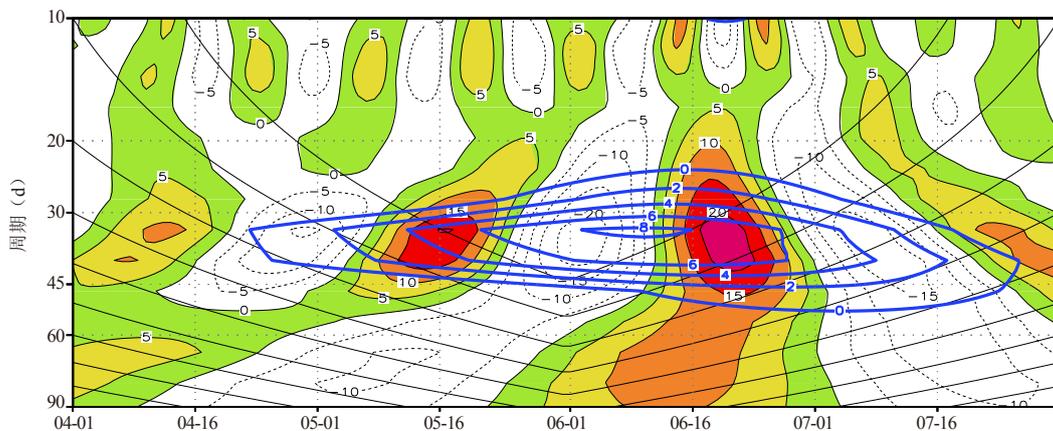


图1 2010年福建前汛期暴雨综合指数的小波变换图（等值线为通过95%信度检验的区域）

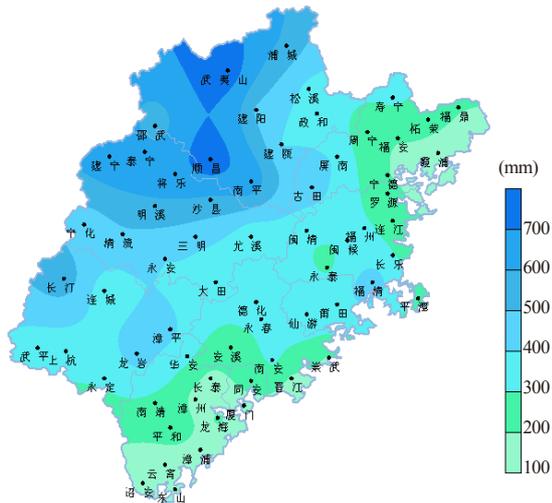


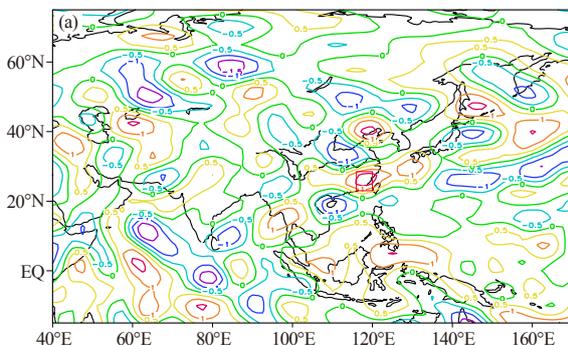
图2 福建省6月13—27日降水量分布图

3.2 持续性暴雨过程概况

2010年6月13—27日，福建省经历了一场长达15d的持续性暴雨的袭击，过程降水强度位居历史第二（1968年最强），强降水持续时间之长和强度之强皆为历史少见。6月12日20时—27日20时过程雨量，福建省所有县（市）均 $\geq 100\text{mm}$ ，其中48个县（市） $\geq 250\text{mm}$ ，12个县（市） $\geq 500\text{mm}$ ，以武夷山市的774.0mm为最大（图2）。此次长时间、高强度、大面积的强降雨致使闽江上游产生了严重洪涝，引发的山体滑坡等次生灾害致使房屋坍塌，交通受阻，人员伤亡惨重，直接经济总损失108.18亿元。

4 持续性暴雨过程的大气低频特征

此次持续性暴雨过程影响系统主要有500hPa低槽、850hPa切变和西南急流，地面是江南静止锋，高低空系统的良好配置，造就了这次强降雨过程。此次暴雨过程为何持续如此之长的时间，是否与大气的低频变化有着密切的联系？为此绘制了30~60d滤波的低频天气图，拟从大尺度环流系统的低频变化特征揭示持续性暴雨的发生原因。



4.1 高低空低频系统的配置

4.1.1 200hPa

低空辐合高空辐散是构成上升运动的充要条件。从30~60d滤波后的200hPa逐日散度场可见，暴雨发生前期，6月1—12日福建处在散度场的低频负值区，而持续性暴雨发生期间（图3a），福建上空为一个低频正辐散区所控制，对应200hPa的高度场（图3b），暴雨发生前，南亚高压中心在中南半岛一带，持续性暴雨期间，南亚高压中心相对稳定在孟缅一带，福建正好处在南亚高压东北侧强辐散区域，正散度中心在闽北区域；随着南亚高压中心向东北移动，27日起正值区减弱，转为负值区，强降雨明显减弱。由此可见，此次持续性暴雨过程与200hPa南亚高压的低频变化密切相关，高空低频信号在持续性暴雨期间福建上空为低频正值区，有利于加强福建上空的辐散，为持续性暴雨的维持提供了有利的条件。

4.1.2 500hPa

图4a是持续性暴雨期间500hPa高度场30~60d滤波合成图，从图中清晰可见低频高压和低压的位置：在泰梅尔半岛、我国东北地区以及江南地区存在低频低压中心；在乌拉尔山—贝加尔湖西南侧以及西北太平洋存在低频高压中心，该低频系统的配置，与常规天气图上的天气系统有着密切联系。从500hPa平均高度场合成图（图4b）可见持续性暴雨发生期间极涡位于泰梅尔半岛，槽线从中心伸到巴尔喀什湖，与东北到华东槽形成阶梯形式，北槽槽后不断分裂冷空气从中纬度向东南传输。而在西北太平洋上存在的低频高压中心，对应着副高明显的北抬，北侧588线在华南南部到福建省中南部一带维持，而副高北侧588线区域既有西南气流的水汽输送又有动力抬升的作用，是造成暴雨发生的重要因素之一。可见，低频高低压中心的空间配置有利于产生暴雨的天气系统的维持，是造成这次持续性暴雨过程长时间维持的重要原因。

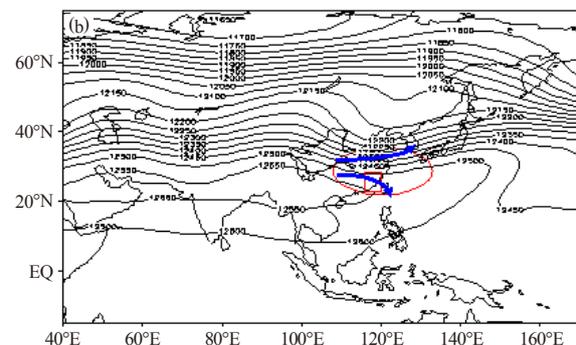


图3 2010年6月13—27日200hPa合成图

(a) 30~60d滤波散度场；(b) 原始高度场（红色方框为福建省所处位置，文中所有图同）

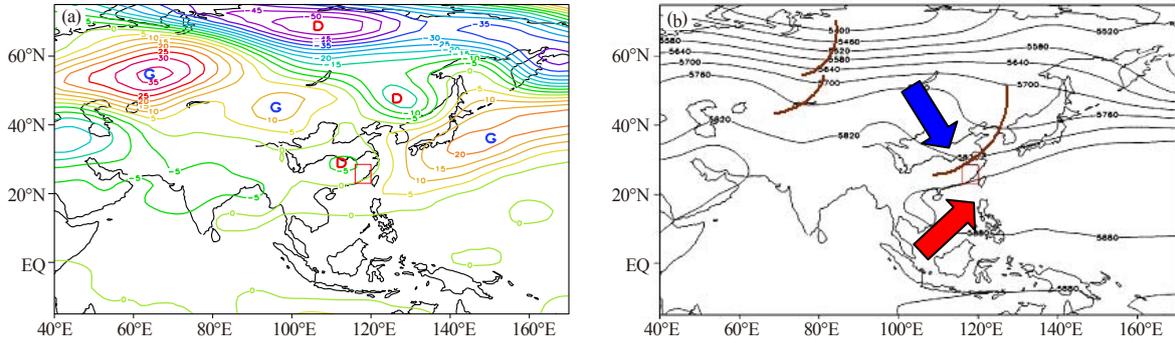


图4 2010年6月13—27日500hPa高度场合成图
(a) 30~60d滤波场； (b) 原始场

4.1.3 850hPa

由30~60d滤波后的850 hPa风场分析发现（图5a），持续性暴雨期间存在明显的低频气旋和反气旋中心。低频气旋中心始终处在福建上空、印度半岛西北部、孟加拉湾北部以及中南半岛东南部，低频反气旋中心位于乌拉尔山地区、西北太平洋上空以及索马里以东洋面上。福建上空850hPa低频气旋中心的维持加强了低层辐合，而500hPa低频低压的维持，使得冷空气不断南下，再加上高空低频辐散中心的维持，造成了这次持续时间之长历史罕见的强降雨过程。

持续性暴雨期间有两支西南气流交汇到福建上空（图5b），并把大量水汽输送到这一地区。一支是来自索马里附近的越赤道气流经孟加拉湾伸向华南江南，而索马里以东洋面上的低频反气旋、印度半岛西北部、孟加拉湾北部的低频气旋中心的存在加强了这支气流的水汽输送；另一支是越赤道气流经南海向大陆输送，中南半岛东南部低频气旋以及西北太平洋上空低频反气旋加强了该支气流的水汽输送。可见，水汽输送通道上低频气旋和反气旋中心的维持加强了水汽输送的持续性也是导致持续性暴雨维持的重要因素。

4.2 OLR 场的低频特征

分析对流场的低频特征，由图6a可见，5月下旬

南海和菲律宾附近出现了低频对流系统，并明显的由南向北传播，于6月13日左右到达福建上空；图6b可见5—7月福建上空（116°—120°E）对流存在着明显的30~60d的低频振荡，随时间呈现“—+—+—”的低频对流干湿位相交替，6月13—27日福建发生持续性暴雨期间正好处于一次强湿位相内（即对流活跃期）；从沿27°N的纬向OLR场的时空演变情况看，低频对流系统有随时间由东到西的传播过程。自5月下旬起140°E附近的对流活跃区逐渐向西传播，到6月第3候进入福建上空，且稳定维持了半个月，致使福建经历了一场长达15d的持续性暴雨过程，直至6月28日福建转为低频干位相控制，即副热带高压加强西伸控制福建，持续性暴雨过程才得以结束。对流的低频变化实际上反映了东亚夏季风的季节内振荡，夏季风涌的存在对我国东部地区的大尺度降水起着调控作用^[19,20]，此次持续性暴雨过程伴随着一次明显的季风涌。

此次长达15d的持续性暴雨过程中，雨强最强的时段分别为14—15日、18—19日和22—24日。从2010年6月13日—27日OLR场30~60d季节内振荡（ISO）与10~20d准双周振荡（BWO）叠加场的低频演变特征可以看出：6月14—15日（图7a）和22—24日（图7c）两个时段中，福建均处于ISO与BWO湿位相叠加的时

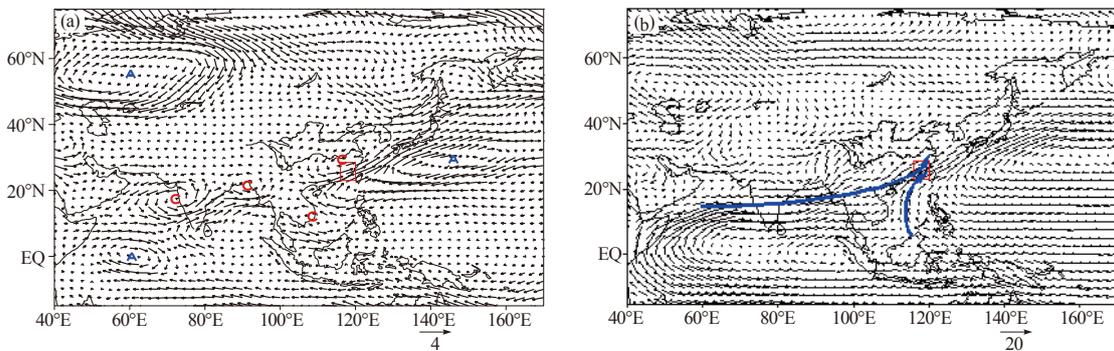


图5 2010年6月13—27日850hPa风场合成图
(a) 30~60d滤波场； (b) 原始场

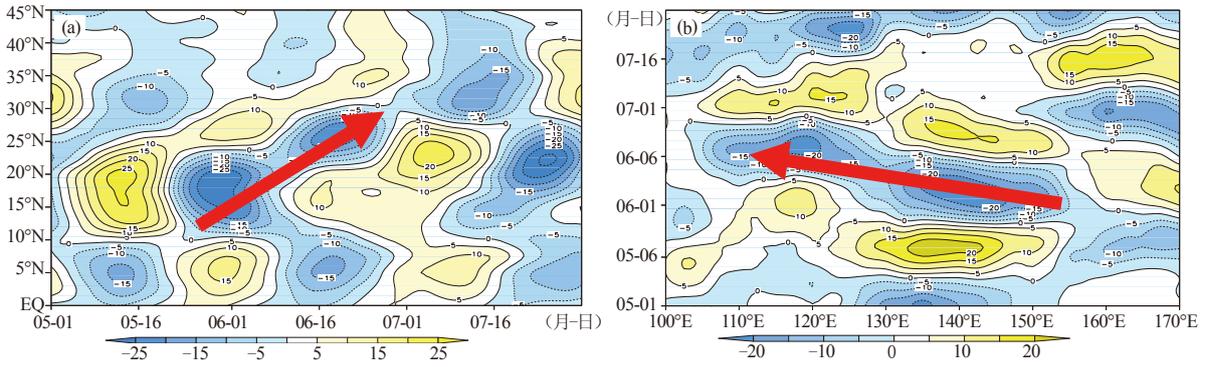


图6 2010年30~60d滤波后的OLR场沿120°E (a) 纬度—时间演变和沿27°N (b) 的经度—时间演变

期, 而18—19日(图7b)虽然BWO处于干位相, 但却是ISO信号最强的时期, 由此可见, 福建前汛期降水的强度与大气低频振荡的强度密切相关, 降水强度不仅与OLR场ISO强度有关, 也与BWO强度关系密切, 强降水往往出现在ISO和BWO湿位相叠加的时段。

5 持续性暴雨过程的前兆信号

从以上分析可以看到2010年6月13—27日这场持续性暴雨过程发生期间, 大气环流存在着较强的低频变化信号。从绘制的低频天气图上可以看出低频系统与常规天气图上的天气系统虽有差别, 但有密切联系。低频系统所反映的天气系统及其天气学、动力学规律, 恰好是造成某种天气过程的一些主要天气系统的生成、加强、维持、移动和减弱过程。由于低频系统有明显的持续性和周期性, 因此如果能够掌握低频

系统前期的演变规律, 就有可能对持续性天气过程做出提前10~30d的延伸期预报。

通过分析2010年4—6月的逐日850hPa的低频天气图, 尤其是持续性暴雨期间低频气旋和反气旋出现的位置, 选取了4个和持续性强降水过程配置较好的关键区, 分别为南海—中南半岛地区(5°—15°N, 100°—115°E)、印度半岛西北部地区(15°—25°N, 65°—85°E)、乌拉尔山地区(50°—60°N, 50°—70°E)和西北太平洋地区(25°—35°N, 130°—150°E)。绘制2010年4月1日—6月30日逐日暴雨综合指数及4个关键区850hPa平均涡度的30~60d低频变化曲线, 由图8可见, 与4—6月逐日降水匹配最好的是乌拉尔山关键区, 不管是福建早春季(3—4月)降水还是前汛期(5—6月)降水, 乌拉尔山地区

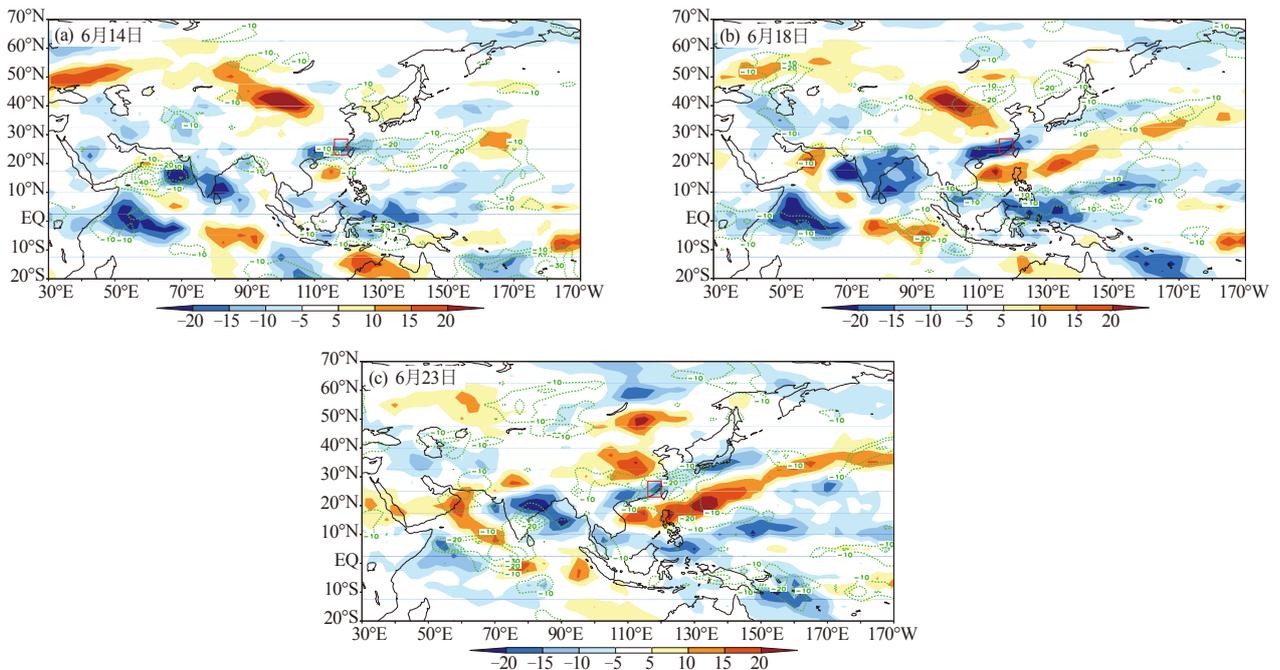


图7 2010年6月14日(a)、18日(b)和23日(c) OLR滤波场 (色块图表示ISO, 绿色曲线表示BWO, BWO仅显示负值区)

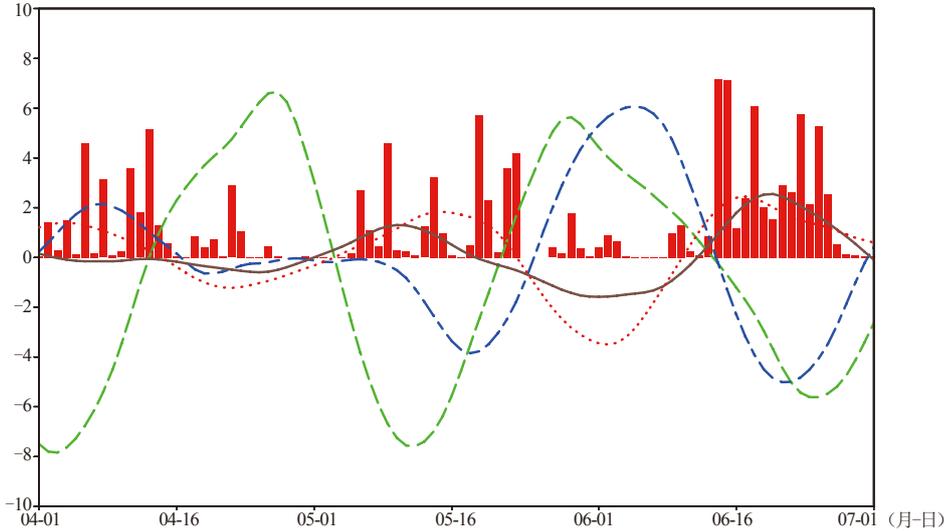


图8 2010年4月1日—6月30日逐日暴雨综合指数(直方图,大小为原数值的1/4)及关键区850hPa平均涡度的30~60d低频波演变图

(实线为南海—中南半岛,点线为印度西北部,虚线为乌拉尔山地区,点划线为西北太平洋,单位: $10^{-6}/S$)

涡度的低频变化与福建降水的低频周期对应很好,当乌拉尔山地区出现低频反气旋时,冷空气活动频繁,福建处于多雨期,当乌拉尔山地区出现低频气旋中心,冷空气较弱,则不利降水形成,福建处于少雨期。随着春季向前汛期转换,大气环流进行了调整,降水性质也发生了变化,热带系统的作用也逐渐显现出来,由图中看出,其他3个关键区的低频信号在5月初有所加强,并与福建前汛期降水的低频变化周期趋于吻合,即当乌拉尔山地区、西北太平洋为低频反气旋控制,同时南海—中南半岛地区、印度半岛西北部地区为低频气旋控制,对应的天气系统是乌拉尔山附近的阻塞高压增强以及西北太平洋上的副热带高压稳定维持,来自索马里的越赤道气流和经南海的越赤道气流的水汽输送得以维持,良好的低频系统配置,使得南北气流在福建上空持续交绥,导致了持续性暴雨过程的发生。

从以上的分析中注意到,福建早春季降水与前汛期降水对应的低频信号有较大差异,与大尺度环流系统由冬半年向夏半年的转换和调整有关,因此,做前汛期降水的延伸期预报是要密切关注大气低频信号的季节变化。此外,由于每年前汛期降水的低频系统配置不同,导致每年关键区的位置和低频变化周期也有差异,但导致暴雨发生的南北气流交绥的必要条件不会改变。如2010年,我们选择的4个关键区制作低频波演变图,就是为了反映冷空气(如乌拉尔山关键区)和西南暖湿气流的低频活动规律(如南海—中南半岛、印度半岛西北部和西北太平洋等3个关键

区),这4个关键区在早春季配合并不理想,但前汛期首场持续性暴雨过程中,有了较好的配合,而且这种匹配关系一直持续到前汛期结束。

除了来自中高纬度和低纬的低频信号外,本区上空的低频信号也不容忽视。图9为福建上空850hPa平均涡度和200hPa平均散度的低频变化曲线,由图可见,4月1日—6月30日,本区上空的低频信号与降水的低频变化的配合也非常好,反映的物理意义是产生局地暴雨所需的高低空辐合辐散配置。

从低频周期来看,无论是4个关键区还是本区上空的低频信号,在持续性暴雨发生前的上一个相对多雨期(30d前)或少雨期(15d前)已有较明显的低频信号,如果能及时监测并掌握该前兆信号的低频变化规律,无疑对后期持续性暴雨的延伸期预报具有十分重要的意义。

6 结语

本文利用NCEP再分析资料和NCAR的逐日向外长波辐射(OLR)资料以及福建66个气象站2010年逐日降水资料,通过对2010年福建省前汛期典型持续性暴雨过程的分析,揭示了持续性暴雨过程的大气低频特征以及持续性暴雨过程的前兆低频信号,为福建前汛期持续性暴雨过程的延伸期预报提供科学的参考依据。研究得到以下结论。

(1) 2010年福建前汛期降水具有显著的30~45d左右的变化周期,呈现明显的少雨期和多雨期交替出现的干湿窗口,且每个窗口维持时间大约15d左右,

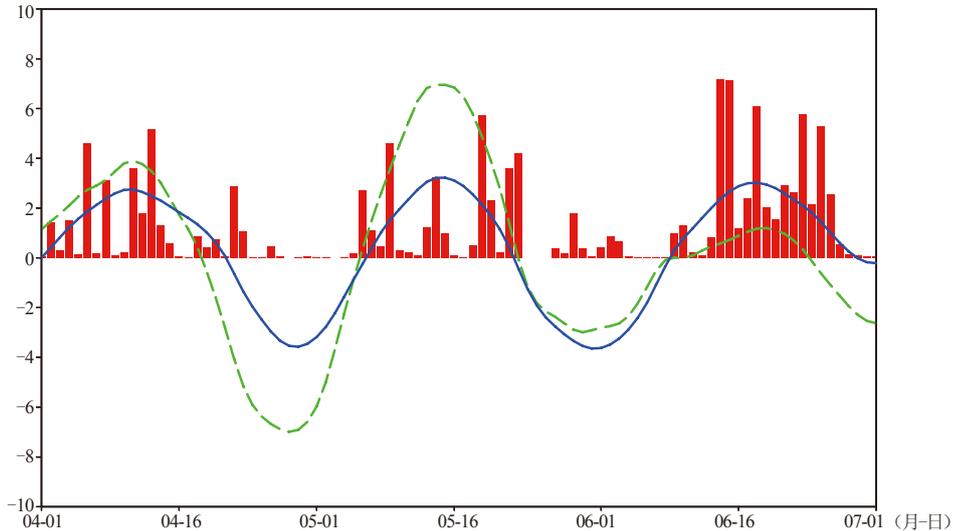


图9 2010年4月1日—6月30日逐日福建暴雨综合指数(直方图,大小为原数值的1/4)及福建上空850hPa平均涡度(实线,单位: $10^{-6}/S$)和200 hPa平均散度(虚线,单位: $50^{-6}/S$)的30~60d低频波演变图

持续性暴雨就是发生在最后的一个湿窗口期。

(2) 持续性暴雨期间中高纬度和低纬的低频系统的配置和变化十分有利于暴雨的长时间维持。南亚高压、副高、乌拉尔山高压、东亚大槽以及来自孟加拉湾和南海的水汽输送的低频变化造成了这次持续时间之长、强度之强皆为历史罕见的强降雨过程。

(3) 持续性暴雨过程伴随着一次明显的东亚夏季风涌,低频对流系统有着明显的北传和西传过程,降水的强度不仅与对流活动ISO强度有关,也与BWO强度关系密切,强降雨往往出现在ISO和BWO湿位相叠加的时段。

(4) 由于低频系统有明显的持续性和周期性,因此,若能及时监测并掌握大气低频前兆信号的变化规律,无疑对后期持续性暴雨过程的延伸期预报具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 刘一伶, 琚建华, 吕俊梅. 热带低频振荡与南海夏季风季节内振荡的关系. 科技创新导报, 2009(14): 230-242.
- [2] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸期预报. 气象, 2010, 36(7): 111-122.
- [3] Lau K M, Yang G J, Shen S H. Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia. Mon Wea Rev, 1988, 116(1): 18-37.
- [4] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 1999, 24(3): 257-266.
- [5] 郑彬, 林爱兰. 2007年南海夏季风季节内振荡的北传和影响因子. 热带气象学报, 2011, 27(6): 869-876.
- [6] Weickmann K M. Intraseasonal circulation and out going long-wave radiation modes during Northern Hemisphere winter. Mon Wea Rev, 1983, 111: 1838-1858.
- [7] Yang Hui, Li Chongyin. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Jianghuai river basin. Adv Atmos Sci, 2003, 20(4): 540-553.
- [8] 孙丹, 琚建华, 吕俊梅. 2003年东亚夏季风季节内振荡对我国东部地区降水的影响. 热带气象学报, 2008, 24(6): 641-648.
- [9] 贺懿华, 王晓玲, 金琪. 南海热带对流季节内振荡对江淮流域旱涝影响的初步分析. 热带气象学报, 2006, 22(3): 259-264.
- [10] 陶诗言, 卫捷. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系. 气象, 2007, 33(3): 10-18.
- [11] 何金海, Murakami T, Nakazawa T. 1979年夏季亚洲季风区域40~50天周期振荡的环流及其水汽输送场的变化. 南京气象学院学报, 1984, 7(2): 163-175.
- [12] 韩荣青, 李维京, 董敏. 副热带北太平洋大气季节内振荡时空特征的诊断研究. 气象学报, 2010, 68(4): 102-113.
- [13] Wheeler M C, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring prediction. Mon Wea Rev, 2004, 132: 1917-1932.
- [14] Maharaj E A, Wheeler M C. Forecasting an index of the Madden-Julian oscillation. Int J Climatol, 2005, 25: 1611-1618.
- [15] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报. 高原气象, 2010, 29(5): 1142-1147.
- [16] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸期预报. 大气科学, 2011, 36(1): 102-116.
- [17] 孙国武, 冯建英, 陈伯民, 等. 大气低频振荡在延伸期预报中的应用进展. 气象科技进展, 2012, 2(1): 12-18.
- [18] 陈丽娟, 陈伯民, 李维京, 等. T63模式月动力延伸预报高度场的改进实验. 应用气象学报, 2005, 16(增刊): 92-96.
- [19] 琚建华, 孙丹, 吕俊梅. 东亚季风区大气季节内振荡经向与纬向传播特征分析. 大气科学, 2008(3): 523-529.
- [20] 琚建华, 孙丹, 吕俊梅. 东亚季风涌对我国东部大尺度降水过程的影响分析. 大气科学, 2007, 32(6): 1129-1139.

月内重要天气过程与气候趋势预测系统及应用进展

陈伯民¹ 信飞¹ 沈愈¹ 李震坤¹ 杨雅薇¹ 史印山² 林纾³

(1 上海市气候中心,上海 200030; 2 河北省气候中心,石家庄 770020; 3 甘肃省气候中心,兰州 730020)

摘要: 对月内(延伸期)重要天气过程与气候趋势预测系统(MAPFS 1.1)的框架、预测方法与模块功能、推广应用情况进行了全面的介绍。该系统包含三种强降水过程预测方法模块和一种月降水趋势预测方法模块,目前已在华东区域等10个省市业务单位投入应用或业务试验,初步取得了较为理想的试验效果。上海、江苏、浙江气候中心等10家业务单位用低频图预报的2012年汛期月内强降水过程准确率平均达到67.7%,其中6家单位的准确率超过60%。

关键词: 月内强降水过程, 预测业务系统, 应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.007

Monthly Anomaly and Weather Process Forecast System and Its Application

Chen Bomin¹, Xin Fei¹, Shen Yu¹, Li Zhenkun¹, Yang Yawei¹, Shi Yinshan², Lin Shu³

(1 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030 2 Hebei Climate Center, Shijiazhuang 770020

3 Gansu Climate Center, Lanzhou 730020)

Abstract: This paper introduces the framework, feature and application of extended-range (Monthly) Anomaly and Process Forecast System (MAPFS 1.1) consisting of three precipitation process forecast modules (i.e., the low-frequent map, anomaly similarity and 150d cycle method modules) as well as the EOF-iteration downscaling module for monthly precipitation anomaly. Up to now, MAPFS 1.1 has been used in operation or in provisional operation in the climate centers of ten provinces or cities in China. The results indicate that extended-range (10-30d) heavy rainfall prediction accuracy from ten centers during the rain season of 2012 is, on average, up to 67.7%, and particularly that of six centers is larger than 60%.

Keywords: extended-range heavy precipitation process, operational forecast system, application

1 引言

强降水、强冷空气、高温等天气过程一直受到社会各界普遍关注和重视。若能尽早(如提前10~30d)掌握上述重要过程发生的时段及某些特征,则可在很大程度上减小其造成的气象灾害。然而,目前的中短期天气预报可用时效仅达到10d左右^[1],10d以上的逐日预报参考价值有限。而短期气候预测的对象是未来一个月的气候趋势(降水距平百分率和温度距平),一般不包含天气过程这样的预报信息。也就是说,尽管对10~30d过程预报存在越来越迫切的需求,但这类预报是目前中短期预报时效上暂时达不到的,也是短期气候预测在内涵上暂时做不到的一类预报。

20世纪80年代,国际上曾掀起一股动力延伸预报热。当时,人们期望能在较短的时间内使逐日预报时效接近洛伦兹提出的天气预报界限,并在此基础上继续向前延伸从而获得延伸期(10~30d)的天气预报结果。然而由于诸多方面的困难,延伸期的预报进展十分缓慢。即便是10~30d形势(如500hPa高度场)的预报,至今总体上仍未达到可用的水平^[1]。

自Madden和Julian 20世纪70年代发现热带地区MJO以后,大气中普遍存在的季节内振荡现象逐渐被认识。后来人们开始利用这些信息制作两周及以上时间尺度的降水预测^[2-5],取得了显著效果并在全球范围得到广泛应用。只是到现在,这类预报的对象还仅停留在降水的趋势上,尚未涉及到降水过程^[5]。

国内学者20世纪70年代后期开始关注延伸期到季节内时间尺度的天气过程预报^[6]。杨鉴初^[2]提出了用环流演变图预报长期天气过程并与旱涝冷暖结合的思想。需要指出的是,杨鉴初的这一思想有别于传统的长期天气过程概念和预报思路(主要预报平均态异常)。之后还有学者利用天文因子做10d以上到季节

收稿日期:2012年10月22日;修回日期:2012年11月5日
第一作者:陈伯民(1963—), Email: chenbm1@163.com
资助信息:国家科技支撑项目“持续性异常信号判别和预报预测技术的集成应用”第5课题(2009BAC51B05);
中国气象局现代气候业务发展改革试点工作
“月内重要过程趋势预测业务系统”

内的天气过程预测试验,如任振球等^[7,8]用天文因子预测连续性特大暴雨和华北汛期干热天气过程,刘德等^[9]用日月概率和神经网络方法预报未来降水及变温过程,林纾^[10]利用大气中存在的韵律现象做季节内的天气过程定性预报。受业务发展和服务需求的推动,近年来,国内一些业务单位持续开展延伸期天气过程预报预测探索。孙国武等^[6,11-14]成功开发出用于延伸期强降水过程预报的低频天气图方法和关键区大气低频波方法。杨玮等^[15]尝试用低频速度势预报延伸期降水过程。史印山等^[16],史湘军等^[17]利用环流异常相似信息做延伸期降雨(雪)及降温过程预报。覃志年等^[18]利用Lamb-Jenkinson环流分型相似预报延伸期暴雨过程。钱维宏^[19]通过将大气变量分解成日循环、年循环的气候分量和天气扰动分量,提出预报中期—延伸期极端事件的扰动天气图方法。郑志海通过挖掘国家气候中心T63模式温度扰动信息预测冬季延伸期大范围冷空气过程^①。这些方法部分已投入业务应用并在服务中发挥了良好的作用。

上海市气候中心自2008年以来连续5年用低频图预报方法开展延伸期强降水过程预报。该方法尤其在2010年世界博览会气象服务保障中发挥了突出的作用^[15]。在国家科技支撑项目和中国气象局现代气候业务发展与改革试点工作的推动下,上海市气候中心又对低频图方法进行了进一步完善和客观化,并与河北省气候中心、甘肃省气候中心一道,共同完成了“月内重要过程趋势预测系统(MAPFS 1.1)”的研制,期望以该系统为平台,以低频天气图等预报方法为主要预报工具,推动月内重要天气过程预测业务在更大范围开展。

在MAPFS 1.1系统中,上海市气候中心承担了系统整体设计、低频图预报方法模块和EOF迭代预测方法模块的开发,以及低频图预报方法的技术推广。河北省气候中心、甘肃省气候中心分别承担了异常相似释用预测方法模块^[17]和150d韵律预测方法模块^[10]的技术开发工作。目前,低频图方法连同MAPFS 1.1已经在12个省(市、区)投入业务应用或试验。本文主要介绍系统框架、低频图方法模块和扩展样本的EOF迭代预测方法模块功能及目前的推广应用情况。

2 月内强降水过程标准及主要预报内容

2.1 月内强降水过程标准

目前,MAPFS1.1系统主要涉及的过程是延伸期的强降水过程,包括三种预报方法。由于不同方法给

出的强降水过程标准有一定差别,这里首先对过程的标准做一个归纳。

强降水过程是指预报区域内按一定比例(或数量)要求的台站日雨量 X (单位: mm)满足一定的条件(或达到一定的阈值)。降水条件可表述为: $X \geq R$ 或 $R_1 \leq X \leq R_2$, R , R_1 和 R_2 的具体数值依照不同预报区域实际情况确定。

以上海为例,强降水过程是指11个地面气象站中,至少3个站(含3站)日(24h)雨量达到或超过10mm,即 $X \geq 10$ 。

2.2 月内强降水过程预报内容

根据近年的实践和中国气象局《月内强降水过程预报业务指导意见》要求,月内重要过程预报主要提供过程发生的时段(起止日期)和强度特征(即前述 R , R_1 和 R_2)

3 月内重要过程与趋势预测业务系统(MAPFS 1.1)

3.1 MAPFS 1.1 系统整体结构

MAPFS系统采用C++语言开发人机交互式界面作为主程序控制整个平台的运行,制定了各类文件的命名规范,以子目录文件库的形式存储平台数据以方便系统移植和推广。系统绘图用MICAPS 3.3部分软件绘图。核心计算模块采用FORTRAN 90/95语言编程,并编译成可执行文件或以动态库的方式供主程序调用。系统可在Windows 7.0、Windows XP环境下安装运行,其通用性可确保在不同省(市、自治区)的本地化推广应用。另外,系统还预留了接口,以后进行功能扩充和升级十分便利。

目前的MAPFS 1.1是2011年MAPFS 1.0版的升级,其中分为两个部分:降水过程预测和降水趋势预测。前者包括三个方法模块,即低频图方法模块、异常相似释用模块和150d韵律方法模块;后者目前只有样本拓展的EOF迭代预测方法模块。下面介绍降水过程预测和降水趋势预测两部分模块功能。

3.2 MAPFS 1.1 系统降水过程预测

3.2.1 低频天气图方法模块

(1) 低频天气图方法

低频天气图方法以分析低频图(借助带通滤波技术,将格点上的风场或位势高度场的低频分量分离出来,并绘制成类似于日常天气图的地图,即所谓的“低频图”)中的低频系统时空特征、演变规律及其与降水过程的关系为主要思路,通过追踪低频系统

① 私人交流

的演变，利用其时空特性达到间接追踪天气系统的演变，进而达到预测10~30d降水过程发生时段的目的。

用低频图方法做预报首先需要建立预报模型，包括划分预测区域，确定低频系统关键区，建立低频系统活动与降水过程的关系，计算低频系统周期等。有了预报模型便可用系统做过程预报。下面简要给出预报建模的具体步骤^[12-15]。

第一步是确定预测区域。对一个范围较大的区域进行降水一致性分析，通常需要将其划分为范围适中的一个到多个预测区域。过程预测将针对这些预测区域进行。在进行降水一致性分析时，所采用的方法以能很好地体现当地实际降水过程天气气候背景为原则，降水资料可使用预测区域内基本气象站历史逐日实况降水资料。

第二步是确定低频系统关键区。确定预测区域强/较强降水过程的等级标准，然后基于绘制的多年历史低频图（如经过30~50/60d带通滤波的低频风场）确定与预测区域强降水过程关联的低频系统关键区。确定关键区是建模的重要环节，主要以低频图中低频系统活动的时空特征及其与预测区降水过程存在的密切关系为依据，即综合参考与强降水时段对应的低频风场序列EOF分解前几个分量空间模态特征，以及与强降水过程对应的低频系统空间位置、分布及持续出现的频数。低频关键区通常由若干经线、纬线组成的矩

型区域构成。

第三步是低频图方法预测建模。通过分析强降水过程时段内各关键区低频系统的配置及其周期（低频系统出现的时间间隔），便可得到关键区低频系统的配置与强降水过程的关系，这样的关系就是所需要的降水过程低频图预测模型。

(2) 低频天气图预报模块功能

建立预报区低频图预测模型之后，便可用MAPFS 1.1的“低频图预报方法模块”进行月内延伸期的强降水的过程预报，全部预报流程见图1。

MAPFS 1.1低频图预报模块由包括“系统设置”、“FTP设置”、“低频数据运算”、“低频预报”、“历史资料”和“帮助”6个功能块组成。在这6个功能块中，预报员可灵活设置或增减预测区域，输入预测区域低频关键区低频系统的历史周期和最新周期，按需要选择原始格点风场资料种类（目前系统容许选择CMAcast, NCEP 1和NCEP 2三种资料）和标准等压面层次，设定地图投影方式（麦卡托投影和兰勃特投影）和低频流场显示方式（流线图、矢量图，以及流线疏密程度和颜色）；在“低频数据运算”和“低频预报”这两个核心功能块中，可实现低频系统动态识别、跟踪、统计、过程预报和产品输出。所有这些功能和具体操作方法在系统“帮助”功能块的《系统技术手册》中均有详细说明。

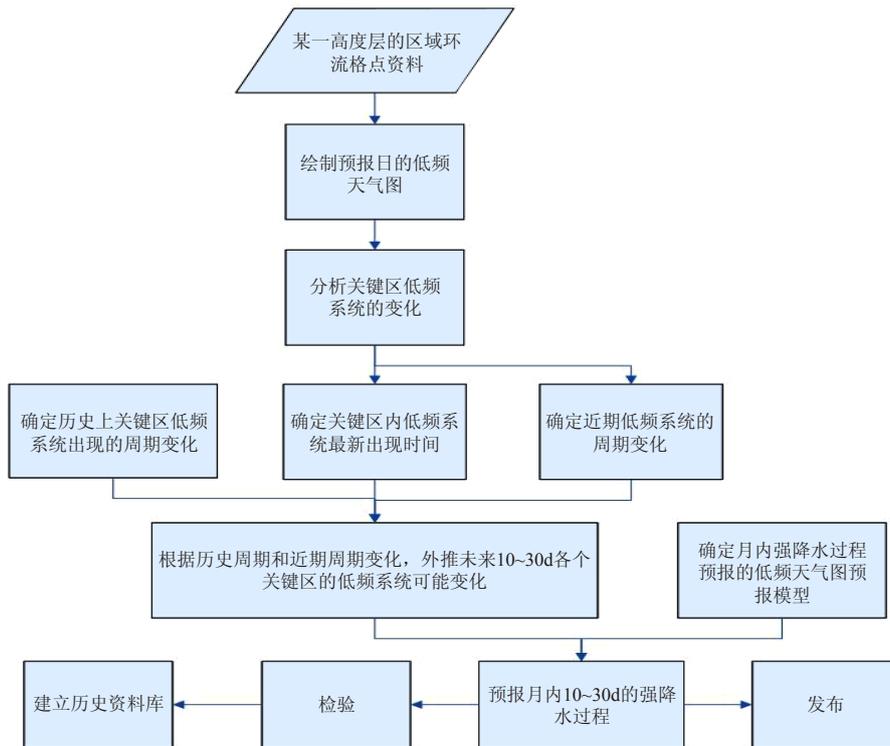


图1 低频图预报业务流程

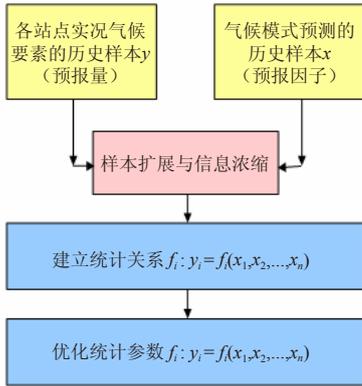


图2 基于样本拓展的EOF月动力产品解释应用技术流程

3.2.2 异常相似释用方法模块和 150d 韵律方法模块

降水过程预报部分的另两个方法是异常相似释用方法和150d韵律方法。它们是从分析北半球环流、要素和外源强迫异常入手，异常相似释用方法通过寻找异常的历史相似来制作10~30d月内重要天气过程预测，具体方法详见文献[17]。150d韵律方法以欧亚地区500hPa候平均高度场图为基本预测信息，以天气形势与预测区域的降水关系为主要依据预测未来降水过程，具体方法详见文献[10]。

3.3 MAPFS 1.1 系统降水趋势预测——扩展样本的 EOF 迭代预测方法模块

以月尺度的降水总量预测作为背景信息，对降水过程的准确把握有重要的参考意义。在MAPFS 1.1中，降水趋势预测采用扩展样本的EOF迭代方法，给过程预报提供旬滚动的未来30/40d降水趋势预测信

息。针对目前动力产品释用普遍存在的不足，以气候模式产品、历史台站资料的信息挖掘与信息变换、释用模型信息优化为介入点，对传统的EOF迭代释用方法进行了改进和优化。具体做法是：用主成分展开解决模式气候形势场整体信息的浓缩，利用随机过程遍历性原理解释用建模中的小样本拓展，利用全样本集的交叉检验来达到释用统计模型参数的全息优化，最后根据以往的实践，统计释用的转换函数的选择采用经验正交函数迭代或者典型相关回归^[20] (图2)。

扩展样本EOF迭代方法的关键是建模 (图3)。建模的第一步是建立气候资料文件。它包括站点预报量实况资料样本文件和模式预报、回报物理量场因子 (由用户选择) 资料样本文件两类。模式气候 (目前为国家气候中心第一代气候系统模式) 矢量因子场的范围及种类的选择需根据用户的相关预测经验以及相关的研究成果经交叉检验确定。

第二步是交叉回算。统计释用模型的性能取决于模型参数，选取合理参数的全息方案应该是全样本集交叉检验，而交叉检验的前提是交叉回算。本系统目前的建模方案是经验正交迭代，故第二步要做的是选择不同解释方差的经验正交迭代方案，进行历史交叉回算，处理程序是HindFctEof。

第三步是交叉检验评分。第二步所得的不同解释方差交叉回算资料，必须经过评分检验才能为在迭代模型中最合理的解释方差选取提供信息，本系统为此设计了处理程序NCC_Score。为了较为准确估计交叉

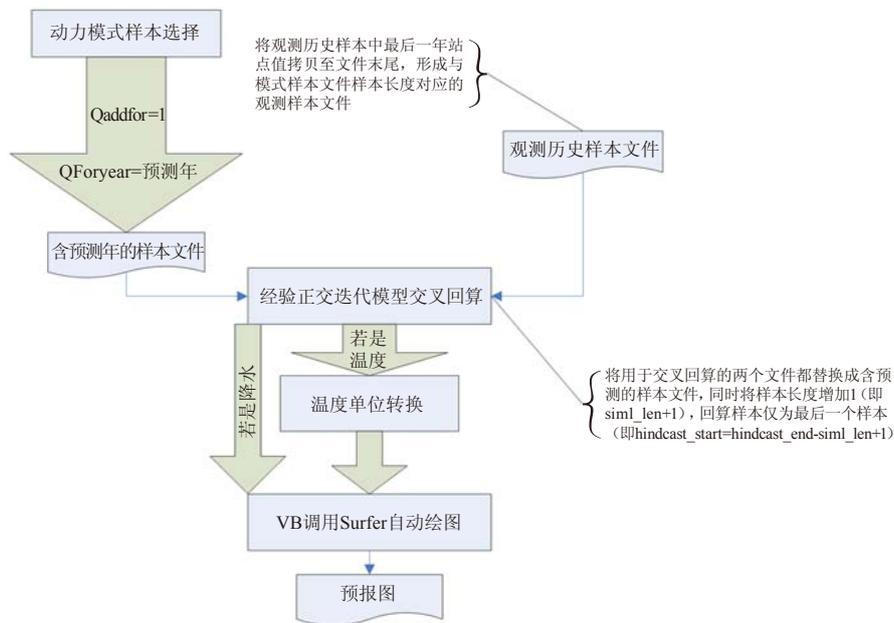


图3 EOF迭代模型建模流程

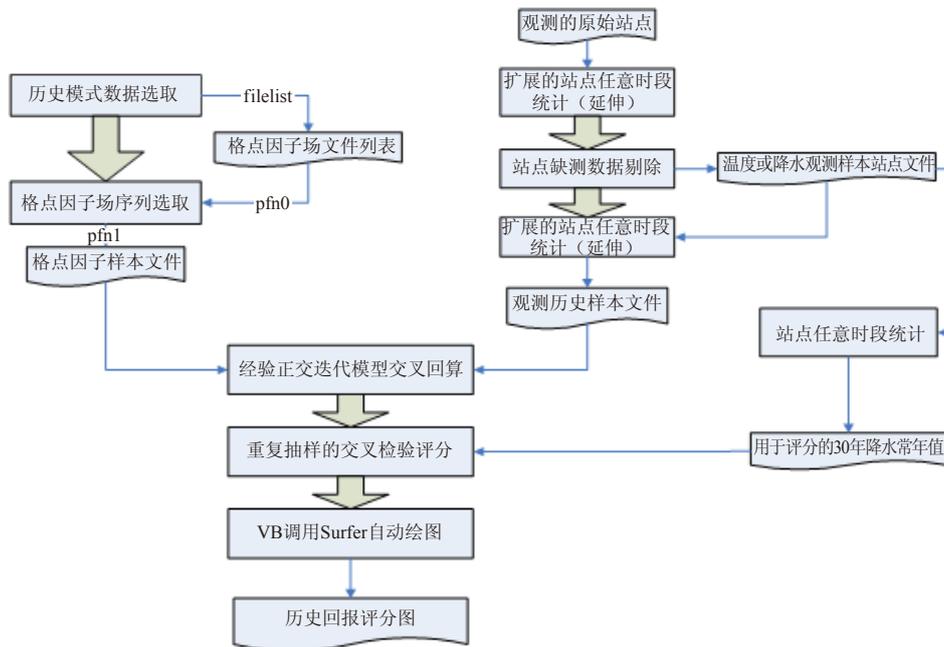


图4 EOF迭代降尺度业务预测工作流程

检验评分，此程序采用重复抽样技术来实现检验评分的无偏校正和置信区间的估计，图示NCC_Score所得评分信息，以求获得待选迭代模型合理解释方差释用效果的直观判断。

第四步是根据第三步所得信息确定经验正交迭代模型的解释方差建立模型，并用此模型进行预测。处理程序是HindFctEof_1。

EOF迭代降尺度预测的全部流程分三大块：台站及动力模式预测历史资料构建、建模及预测、预测结果后处理（数据输出及绘图显示）（图4）。

4 MAPFS 1.1 推广应用情况

在完成MAPFS 1.1研制后，重点对MAPFS 1.1系统的低频图预报方法模块进行了推广。目前，上海市气候中心、江苏和浙江省气候中心等10家单位已能掌握系统相关模块的使用方法，并在2012年汛期（6—8月）开展了月内延伸期（10~30d）强降水过程的业务预报（或业务试验）。10家单位预报结果初步检验显示（表1），2012年汛期10~30d强降水过程的平均预报准确率达到67.7%，空报率为32.3%；其中7家单

位预报准确率超过60%；上海、江苏、浙江和安徽气候中心预报准确率达到75%以上。江西省气候中心虽然由于时间原因只开展了4—6月的回报试验，但回报准确率达到83%。

这些结果说明大部分单位构建的月内强降水过程预报模型基本合理。另外，业务系统的多用途功能也在各单位前期确定低频系统活动关键区及强降水过程预报建模中起到了提高工作效率的作用。

5 小结和讨论

本文对月内重要过程与趋势预测业务系统（MAPFS 1.1）的开发情况、总体框架和功能、预报方法和推广应用效果做了介绍。系统在功能上涵盖强降水过程预报和月降水趋势预测，降水过程预报部分包含了三种方法：低频图预报方法、异常相似释用方法和150d韵律方法。月降水趋势预测部分为样本扩展的EOF迭降尺度预测方法。系统MAPFS 1.1为相关业务单位提供了一个平台，不同单位可根据当地天气气候特点，选择适合的方法，或对不同方法进行适当的优化组合以开展当地月内延伸期（10~30d）强降水

表1 10家单位用低频图预报方法对2012年汛期延伸期（10~30d）强降水过程预报（回报）效果初步检验

试点单位	上海	河北	江苏	浙江	辽宁	甘肃	重庆	山东	安徽	江西	平均
预报准确率(%)	75	50	92	85	47	47	56	67	75	83	67.7
空报率(%)	25	50	8	15	53	53	44	33	25	17	32.3

注：1 预报准确率=预报正确次数/预报总次数（实况强降水日和预报时段偏差1d视为预报正确）；空报率=1-预报准确率
2 江西为2012年汛期（4—6月）回报试验结果评分

过程预报。

目前,系统已在华东及其他区域部分省份实现业务化应用或试验,10家业务单位用低频图预报方法对2012年汛期延伸期强降水过程的预报准确率达到67.7%,其中7家单位预报准确率超过60%。系统和预报方法的技术推广取得了阶段性成果。

当然,由于时间仓促,业务系统建设和技术方法推广在取得了预期成果的同时,还存在一些问题和不足。在2012年汛期推广应用中,虽然大部分单位的预报准确率超过60%,但仍然有两家单位的预报准确率低于50%,效果暂时不太理想。实践中也发现,低频图预报方法应用到不同地区时,需要考虑不同地区强降水特征(强度、频率和持续时间等),以及与之关联的不同纬度带低频系统特点(如周期变化等),并且把这些特点和预报模型紧密结合起来。辽宁、甘肃2012年汛期预报准确率相对较低,可能就和所处纬度较高或降水强度相对较弱有关,需要结合这些经验改进预报模型。另外,低频图预报从诞生到应用时间还很短暂,方法本身也需要在今后的推广应用中不断加以改进和完善。可喜的是,辽宁省气候中心、甘肃省气候中心后期制作的预报中,预报准确率已有大幅度提高。如在辽宁省气候中心制作的15次过程预报中后期(7—8月)的预报准确率已达到67%,预报效果较前期有了明显的改善。这也说明,一些改进预报的经验是能够通过不断的实践而获得的。

另外,做延伸期过程预报还需要多种方法的集成,即通过不同方法预测结果的相互应用从而达到减少预报不确定性的效果。目前系统过程预报部分的“异常相似预报模块”仅实现了通用化改造,还未大范围推广应用。今后需要加大该方法的技术推广力度。

在系统性功能方面,过程预报的“150d韵律预报方法模块”还需要进行预报定量化的改进;系统的趋势预测部分目前仅有EOF迭代一种方法,需要进一步补充新的方法以便给过程预报提供更多可供参考的趋势背景信息。在系统性能方面,系统运行中有时会出

现运行速度降低等问题,还需要对源代码进行进一步的优化。

致谢:系统开发及预报方法推广过程中,孙国武研究员、何金海教授给予悉心指导并提出宝贵意见和建议,蒋薇、毛燕军、周须文、罗连升、杨苏华、王小桃、何慧根、孟祥新、马锋敏等专家提供部分预报及检验结果,在此深表谢意。

参考文献

- [1] Richardson D S, Bidlot J, Ferranti L. Verification statistics and evaluations of ECMWF forecasts in 2009—2010, ECMWF Technical Memoranda, 2011, 635: 2-5. (<http://www.ecmwf.int/publications/library/do/references/list/14>)
- [2] 杨鉴初, 归佩兰. 关于长期天气过程的划分. 气象, 1979, 4(6): 14-18.
- [3] Maharaj E A, Wheeler. Forecasting an index of the Madden-Oscillation. Int J Climatol, 2005, 25: 1611-1618.
- [4] Wheeler M C, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. Mon Wea Rev, 2004, 132: 1917-1932.
- [5] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸预报. 气象, 2010, 36(7): 111-122.
- [6] 孙国武, 冯建英, 陈伯民, 等. 大气低频振荡在延伸期预报中的应用进展. 气象科技进展, 2012, 2(1): 11-18.
- [7] 任振球, 张素琴. 用天文因子试报连续性特大暴雨长期过程的实况检验. 天气气象学术讨论会文集. 北京: 气象出版社, 1986.
- [8] 任振球, 张素琴, 李松勤. 1989年华北汛期干热天气过程预测的实况检验. 气象, 1990, 16(5): 43-45.
- [9] 刘德, 李晶, 李永华, 等. BP神经网络在长期天气过程预报中的应用试验. 气象科技, 2006, 34(3): 250-253.
- [10] 林纾. 500 hPa 准150天韵律在过程预报中的应用研究//新世纪气象科技创新与大气科学发展——气候系统与气候变化. 北京: 气象出版社, 2003.
- [11] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法. 高原气象, 2008, 27(增刊): 64-68.
- [12] 信飞, 孙国武, 陈伯民. 自回归统计模型在延伸期预报中的应用. 高原气象, 2008, 27(增刊): 69-75.
- [13] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报. 高原气象, 2010, 29(5): 1141-1147.
- [14] 孙国武, 孔春燕, 信飞, 等. 天气关键区大气低频波延伸期预报方法. 高原气象, 2011, 30(3): 594-599.
- [15] 杨玮, 何金海, 孙国武, 等. 低频环流系统的一种统计预报方法. 气象与环境学报, 2011, 27(3): 1-7.
- [16] 史印山, 顾光芹. 用相似释用方法制作小麦生育期逐旬气候预测. 气象科技, 2012, 待刊.
- [17] 史湘军, 史印山, 池俊成, 等. 10~30天延伸期重要天气过程的相似年统计预测方法. 河北气象, 2012(1): 1-4.
- [18] 覃志年, 李维京, 何慧, 等. 广西6月区域性暴雨过程的延伸预测试验. 高原气象, 2009, 28(3): 688-693.
- [19] 钱维宏. 中期-延伸期天气预报原理. 北京: 科学出版社, 2012.
- [20] 沈愈. EOF迭代降尺度方案及其在华东梅汛期降水预测中的应用. 高原气象, 2008, 27(增刊): 52-63.

下期要目

- ◆ 热浪对人体健康影响的研究进展
- ◆ 中国不同强度降水时空变化特征
- ◆ 多时间尺度认识气候及其变化
- ◆ 西北地区干旱对农业影响的评估方法——以甘肃省春玉米为例

经验正交函数分解在上海地区低频天气图方法中的应用

信飞¹ 李震坤¹ 王超²

(1 上海市气候中心, 上海 200030; 2 上海市松江区气象局, 上海 201620)

摘要: 用NCEP1逐日700hPa流场数据绘制低频天气图, 统计低频天气图上的低频系统, 重点研究上海地区汛期较强降水过程发生期间的低频系统特征, 借助向量场的经验正交函数分解方法(EOF)深入研究导致上海地区较强降水事件的低频系统空间分布, 综合考虑低频系统的完整性及所对应的天气实体等因素, 将东亚地区划分为八个关键区, 包括五个活跃关键区及三个次活跃关键区。为构建低频配置模型, 细致分析了上海地区汛期较强降水过程发生期间低频流场经向量场的EOF分解所得的前四个主成分的空间分布特征。结果表明: 南、北低频气流(暖、冷空气)的汇合, 是造成上海地区较强降水过程发生发展的最主要原因。此外, 位于我国东部沿海地区的低频气旋及中低纬西太平洋地区的低频反气旋也是导致上海地区发生较强降水过程的主要影响低频系统。

关键词: 低频天气图, 延伸期预报, 经验正交函数分解

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.008

The Empirical Orthogonal Function for the Predicting Method on the Low-Frequency Synoptic Weather Map

Xin Fei¹, Li Zhenkun¹, Wang Chao²

(1 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030 2 Songjiang Meteorological Service, Shanghai 201620)

Abstract: Based on NCEP1 700hPa daily wind data, we draw a low-frequency synoptic weather map. First, we analyzed the low-frequency system on the low-frequency synoptic weather map, focusing on the low-frequency characteristics during the strong precipitation in the flood season over Shanghai. With the help of EOF method we made a thorough study of the spatial distribution of a low-frequency system. We took into consideration the integrity of a low-frequency system and the corresponding physical factors such as weather. The East Asia region can be divided into eight key areas. Then, by the concentration of a low-frequency system, 8 key areas are divided into five active key areas and three less active key zones. For the construction of a low-frequency allocation model, we made a detailed analysis of strong precipitation in the flood season over Shanghai during low-flow field EOF from the decomposition of principal component space distribution characteristics. The results show that: North and south convergence of a low-frequency flow (warm and cold air) is the major factor that causes heavy precipitation in Shanghai area. In addition, the low-frequency cyclone located in China's eastern coastal areas and the low-frequency anticyclone located in low latitude regions of the Western Pacific are low-frequency systems that led to the strong precipitation process.

Keywords: low-frequency weather map, extended-range prediction, empirical orthogonal function

1 引言

自1970年代Madden等^[1, 2]发现热带地区纬向风的30~50d低频振荡开始, 气象学界对低频振荡的研究便全面展开。近年来, 主要研究方向集中在如何将赤道附近地区的大气低频振荡特性用于延伸期及中—长

期预报中。美国、澳大利亚等国的研究者在这方面已取得了一些成果。Wheel等^[3]利用逐日OLR及850hPa纬向风场来刻画MJO的强度、位相等特性, 并用其制作澳大利亚夏季降水的延伸期趋势预测。Jones等^[4]利用多元回归等统计方法建立低频形势场预报模型, 预报未来4个候的低频形势场。国内学者在大气低频特性与强天气气候事件的关系研究, 及其应用于延伸期预报等方面也取得了很多有意义的研究成果。吕俊梅等^[5]研究了MJO及AO的持续异常与云南干旱之间的关系, 认为MJO的持续异常是导致云南干旱的重要原因之一。梁萍等^[6]将集合经验模态分解(EEMD)及多

收稿日期: 2012年10月23日; 修回日期: 2012年11月27日
第一作者: 信飞(1981—), Email: xifei010@yahoo.com.cn
基金项目: 上海市自然科学基金(12ZR1449400); 上海市气象局项目(TD201206); 国家科技支撑计划课题(2009BAC51B05); 国家自然科学基金(41205060)共同资助。

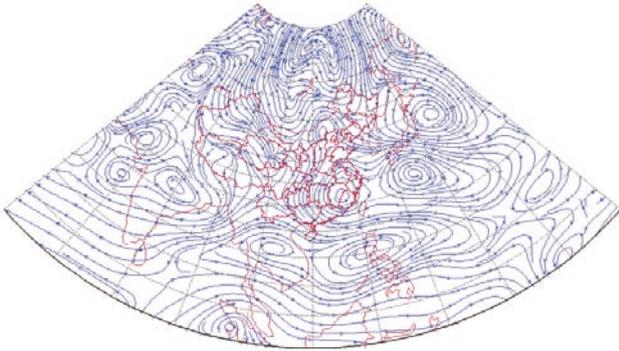


图1 2011年8月7日700hPa低频(30~50d)流场图

变量EOF等方法用于月内与季节内演变的延伸预报方法的研究,并基于MJO方法建立了长江下游降水量的延伸期预报模型。陈丽娟等^[7]利用大气环流模式做延伸期高度场预报。信飞等^[8]利用经验正交分解及自回归等统计方法构建未来3~5候低频流场,并分析了该方法所得的低频流场的预报效果。

现有的延伸期预报研究成果主要集中于延伸期气候趋势预测及环流预测,针对高影响事件的延伸期过程预测方法甚少。强降水过程等灾害性天气的破坏性极大,如能尽早准备将避免很多不必要的损失,因此这类灾害天气的预测受到各级政府、企事业、社会公众的普遍关注和重视,延伸期预报具有巨大的社会需求。目前,预报员利用数值天气中期预报模式输出结果,再结合经验修正,使天气预报的可预报时效达两周左右。而针对10d以上的天气预报,模式输出结果的参考意义十分有限。正因如此,延伸期过程预报方法的研发成为目前气象学界的热点也是难点问题。国内气象学界在延伸期过程预报方面已取得了一些研究成果。早在1990年代, Sun等^[9]和章基嘉等^[10]便提出利用大气振荡解决延伸期过程预报的方法——低频天气图。经过多年的不懈努力,2007年开始,孙国武等^[11]用该方法预测上海地区汛期(6—9月)延伸期(10~30d)尺度的强降水事件。近5年的预测结果表明,低频天气图预报方法在上海地区汛期强降水事件的延伸期预测方面有很好的效果。另外,孙国武等^[12]在低频天气图方法的基础上研发出天气关键区大气低频波延伸期预报方法,与低频天气图方法相辅相成,互为补充。

孙国武等^[11]提出低频图预报方法步骤为:分析、追踪、分区、整理和归纳。如何将预测区域合理恰当的分区是低频天气图预报方法成败的关键。低频系统关键区要考虑多方面的因素,如低频系统生成源地的地理依赖性及其移动路径的相似性,因此关键区的划分是否合理,可以说是低频天气图预测方法成败的

关键。只有通过大量的实际工作,掌握低频系统的基本变化规律,才能在此基础上得到合理的分区,进而继续进行低频天气图预报方法的后续研究。本文以NCEP1再分析资料为基础制作低频天气图,统计分析多年汛期较强降水发生时段低频系统的特性,同时,利用向量场的经验正交分解方法研究低频系统的分布特性,将两种方法相结合,对低频系统进行分区,并研究了各关键区低频系统配置特征。

2 资料与方法

本文使用NCEP1的700hPa经、纬向风场的逐日再分析资料,网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。利用Butterworth带通滤波器^[13]滤波,保留30~50d周期数据,并绘制低频天气图。本文分析了2007—2011年共5年汛期(6—9月)的逐日低频天气图,统计分析上海地区较强降水过程发生时段的低频系统分布特征,并利用向量场的经验正交分解方法划分低频关键区并研究低频系统的配置。

3 基于NCEP1再分析资料的低频系统分布特征

3.1 基于NCEP1资料的低频天气图

利用Butterworth带通滤波器对2007—2011年汛期(6—9月共610d)NCEP1数据的逐日700hPa风场格点资料的序列进行30~50d周期的滤波,得到逐日低频流场图,图1为2011年8月7日700hPa低频(30~50d)流场图。图上所显示的系统为低频气旋及低频反气旋,这里统称为低频系统。之前的研究结果^[14]表明低频天气系统具有准周期性,移动路径的相似性及生成源地的地理依赖性。由于低频系统的这些特性,在低频天气图上追踪系统生消及演变比实际天气图上容易得多;低频系统的准周期性也是将其用于延伸期降水事件预报的原因之一。

3.2 上海地区汛期较强降水过程发生时段低频系统配置特征

要利用低频天气图方法进行延伸期过程预测,需先分析低频天气图上低频天气系统的生消演变特性。本文首先统计分析近5年汛期逐日低频天气图上低频系统的生消、移动变化等特性,这一过程是认识低频天气图并掌握低频系统的基础,也是熟练运用低频天气图预报延伸期高影响事件的前提。为了寻找低频系统的生消演变与较强降水过程发生发展之间的联系,本文集中分析近5年上海地区所有较强降水过程期间(上海地区较强降水过程指上海11个地面站中至少3站日雨量达到或超过中雨)的700hPa流场低频系统的

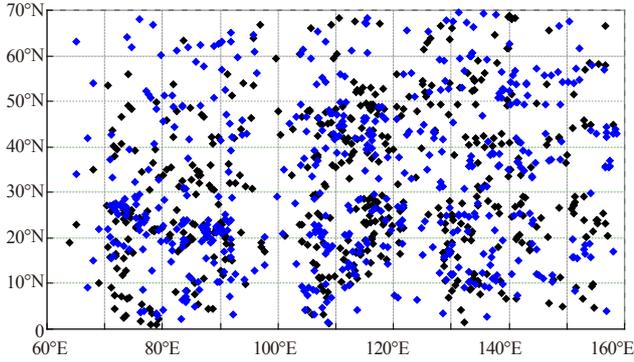


图2 2007—2011年6—9月上海地区强降雨过程期间低频气旋及反气旋的出现位置统计
(蓝色标记表示气旋, 黑色标记表示反气旋)

生消变化及其地理分布特征。

图2为2007—2011年汛期(6—9月)上海地区所有较强降水过程发生时段逐日700hPa流场低频天气图上, 东亚地区范围(0°—70°N, 60°—160°E)内低频气旋及反气旋出现的地理位置统计。综合分析表明, 上海地区较强降水发生期间, 低频系统存在明显的地域集中性。在这一点上, 30°N以南的低频系统体现得更为清晰。印度半岛及孟加拉湾附近地区、南海附近地区以及中低纬度西太平洋地区均为低频系统最为集中的区域, 这表明上述区域低频系统活动最为频繁。中高纬地区最显著的低频系统集中区域为(35°—55°N, 100°—120°E), 即蒙古至河套地区, 这里是影响我国冷空气的重要源地之一。另外, 在145°E以东的中高纬度地区也存在低频系统较为集中的区域。

在对较强降水日所有低频系统分布的分析中, 我们总结出低频系统大致的集中区, 但如若确定低频关键区, 还需辅助其他手段分析验证。将2007—2011年汛期(6—9月)上海地区较强降水过程期间的低频流场做向量场的经验正交分解, 前10个主成分的方差贡献率为73%。统计分析前10个特征向量的空间分布, 可以更加清晰地了解低频系统的地域性特征。图3显示, 在中低纬的三个区域(5°—30°N, 67°—95°E)、(10°—30°N, 105°—122°E)以及(0°—30°N, 128°—140°E)低频系统密集。前两个区域正是影响上海的主要水汽源地, 即孟加拉湾附近地区和南海附近地区。(0°—30°N, 128°—140°E)是中低纬西太平洋附近地区, 这一地区是热带气旋的活跃区, 台风及其倒槽等影响是导致上海地区较强降水发生的主要原因之一。中高纬地区低频系统的集中程度虽不及中低纬地区, 但仍有两个相对集中区域, 首先集中性最为明显的地区是(30°—50°N,

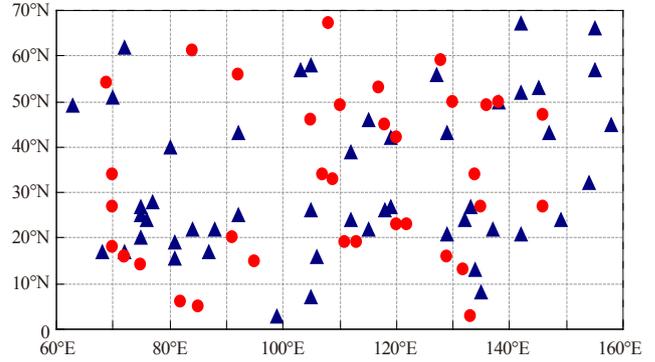


图3 近5年较强降水过程期间低频流场EOF正交分解后的前10个主成分空间分布中低频气旋及反气旋的出现位置统计
(▲表示低频气旋, ●表示低频反气旋)

100°—120°E), 即蒙古至河套地区, 这里是影响我国东部地区冷空气的主要路径, 另外在(50°N, 130°—140°E)附近存在一个低频系统集中区域, 这一地区是东北冷涡的活动范围。

以上分析显示, 较强降水发生时段, 低频系统的地理位置与实际大气环流中影响上海较强降水发生发展的天气实体有较好的对应关系, 这表明低频天气图上的低频系统能较好反映出天气实体的基本特征。

综合考虑低频系统活跃区位置、EOF分解后的主成分空间向量分布以及低频天气图法基本分区原则^[1](关注低频系统活跃区的同时, 也要兼顾低频天气系统在各个区域的独立性与完整性), 将东亚区域划分为八个关键区。将其中五个定义为活跃关键区, 包括三个中低纬关键区: 第一关键区为副热带高压及台风的重要活动区(0°—30°N, 120°—150°E), 第二关键区为南海附近地区(0°—30°N, 100°—120°E), 第三关键区为印度半岛及孟加拉湾附近地区(0°—30°N, 70°—100°E)。两个中高纬关键区: 充分考虑到东北冷涡及东亚大槽位置, 将(30°—50°N, 120°—150°E)定义为第四关键区, 中高纬最显著的低频系统集中区域为蒙古至河套附近地区(30°—50°N, 100°—120°E), 将其命名为第五关键区。除此之外, 还定义了三个次活跃关键区, 分别为第六关键区(30°—50°N, 70°—100°E), 第七关键区(50°—70°N, 120°—150°E)以及第八关键区(50°—70°N, 100°—120°E)。在具体的预测中要充分考虑到各个区域的不同活跃性, 综合分析建模。

3.3 较强降水过程关键区低频系统配置

为了进一步研究上海地区较强降水发生期间的低频系统配置特征, 将较强降水发生期间(2007—2011年共115d)700hPa低频流场做向量场的EOF正交分解, 分析前四个特征向量(方差贡献率为47%)的空

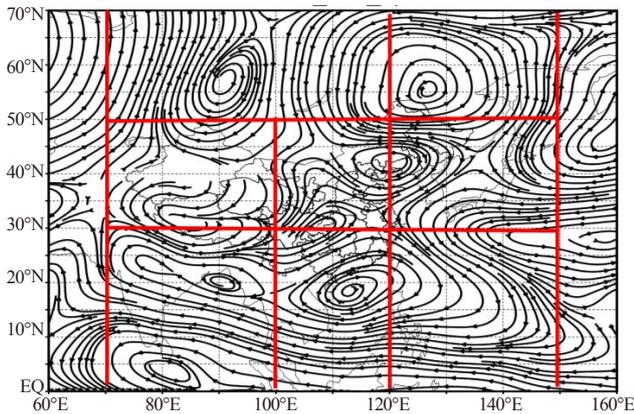


图4 针对上海地区较强降水过程的低频天气图方法关键区划分示意图

间分布(图5)。

第一特征向量的空间分布特征清晰地体现了南北低频气流在上海附近地区的交汇。这印证了低频天气图方法一直强调的最主要的降水配置型,即冷暖空气的交汇是导致上海附近地区较强降水过程发生发展的重要因素。分析第一特征向量中低频气旋和反气旋的空间分布特征,发现中低纬显著低频系统主要为赤道附近印度洋地区的低频气旋,孟加拉湾附近地区的低频反气旋,南海地区的低频反气旋;中高纬地区的显著低频系统主要为位于华北北部的低频反气旋以

及西伯利亚附近地区的低频气旋。即中低纬的第二、第三关键区、中高纬的第五区及高纬的第七区的共同作用,另外第八区也有低频反气旋活动。第二特征向量则主要反映了位于我国东南沿海的低频气旋(第二区及第一区)的北侧偏东气流所携带的海上水汽,造成上海地区的较强降水过程,这种环流形势在实际大气中往往对应台风或倒槽等影响。第三特征向量的低频配置则体现了西太平洋低频反气旋(第一区)的影响,对应实际的天气实体则为西太副高西侧的偏南气流。第四特征向量与第二特征向量类似,主要为南海附近气旋影响。

综合以上分析可以得到,导致上海地区较强降水发生发展的最主要条件为南北气流在副热带地区的交汇。其次,孟加拉湾附近的西南暖湿气流输送以及南海附近的低频系统都是上海地区较强降水发生发展的主要影响系统。低频系统与天气实体的较好对应,印证了利用低频天气图制作延伸期过程预报的可行性。需要注意的是,低频系统配置的分析工作有其灵活性,充分掌握低频天气图的特性,熟练应用关键区低频系统配置模型来预测延伸期较强降水的发生时段是低频天气图方法的核心。这需要在实践中不断探索、积累丰富经验,以更加灵活地利用低频天气图预报方法进行延伸期预测。

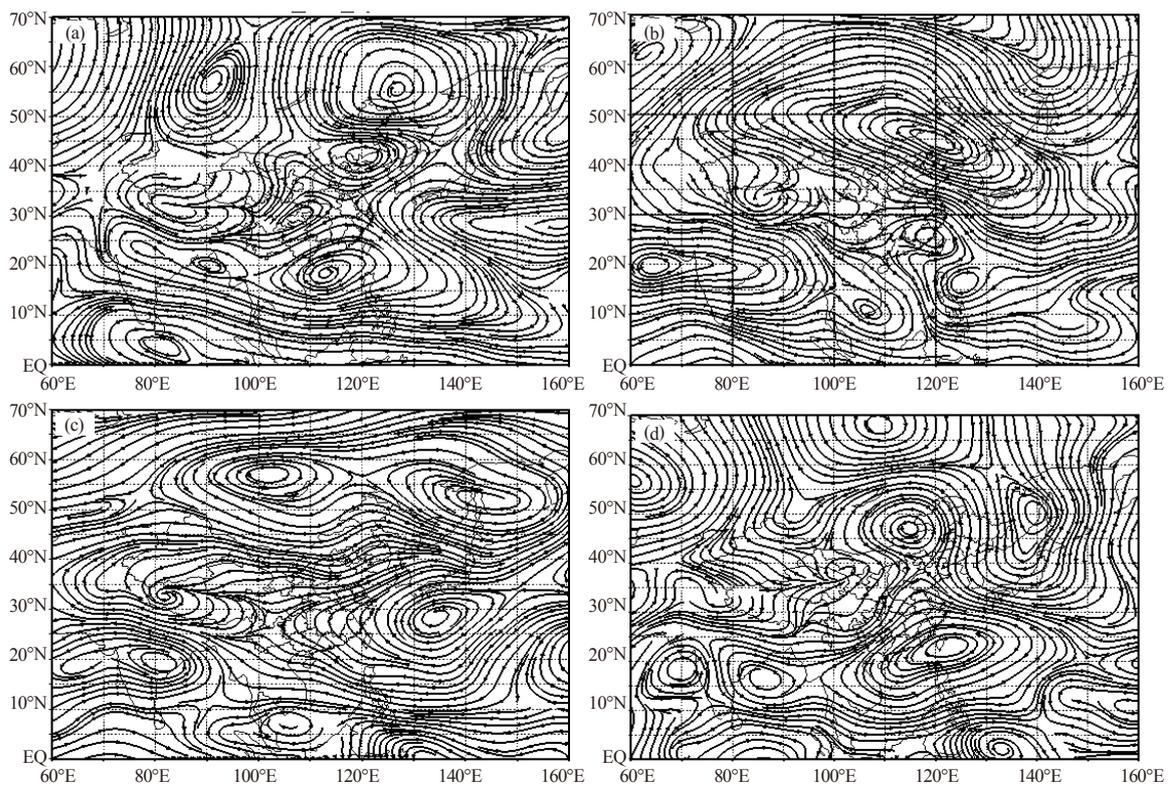


图5 经EOF正交分解的较强降水期700hPa低频流场的前四个特征向量的空间分布
(a) 第一特征向量, (b) 第二特征向量, (c) 第三特征向量, (d) 第四特征向量

4 小结和讨论

本文主要以NCEP1再分析资料所得的低频天气图为基础,利用向量场的EOF方法,确立低频天气图上低频系统的关键区,并分析了导致上海地区较强降水发生的典型低频系统配置模型。研究表明,在较强降水过程发生时段,低频系统(低频气旋及低频反气旋)存在着明显的地域集中性,再综合考虑低频系统的完整性,可将东亚地区(0° — 70° N, 60° — 160° E)划分为八个低频系统关键区。结合实际天气系统,进一步深入分析各个关键区的低频系统在较强降水发生发展期的特性,又将这八个关键区分为五个活跃关键区及三个次活跃关键区。然后,利用EOF方法分析了低频流场的主要模态。结果表明,前四个特征向量中的低频系统配置均与实际大气中影响上海地区较强降水事件的天气实体对应。特别是第一特征向量表现出的南北低频气流在上海附近地区的交汇,是低频天气图预报方法一直强调的最主要的配置模型,这一观点再次得到印证。另外,东部沿海的低频气旋及西太平洋的低频反气旋都是影响上海地区较强降水过程的主要低频系统。

对后续工作的思考及目前研究工作存在的问题如下:

(1) 本文完成了低频天气图方法前期的两项重要工作,即关键区的划分和较强降水过程低频模型的建立。但若利用低频天气图方法制作延伸期预测,还需掌握各个关键区的低频系统的较长样本的生消周期,这部分研究工作仍在进行中。

(2) 基于降水特征一致性的原则适当扩大延伸期较强降水过程的预报范围是下一步工作重点。

(3) 层次单一也是亟需解决的问题,后续计划将低频天气图与500hPa低频曲线波方法相结合用于汛期较强降水的延伸期预报中。这方面的工作还需深入的探索。

(4) 亟需深入研究低频天气系统对应的天气实体及其大气环流演变过程;如何将副热带夏季风系统

和南亚高压的季节变化等对我国夏季雨带产生重要影响的天气实体的最新研究成果与低频天气图方法有机的结合,这方面的尝试也在进行中。

(5) 在利用低频天气图方法建立汛期较强降水预报模型并用于延伸期预报的同时,开始计划将低频天气图或大气低频曲线波方法应用于其他高影响天气气候事件的延伸期预测方面,如冬春冷空气预测等。

致谢: 本文是在孙国武研究员悉心指导下完成的,借此机会对孙国武研究员的耐心指导和无私传授表示由衷的感谢。

参考文献

- [1] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 702-708.
- [2] Madden R A, Julian P R. Description of global scale in the tropics with 40-50 day period. *J Atmos Sci*, 1972, 29: 1109-1123.
- [3] Wheel M C, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index : Development of an index for monitoring and prediction. *Mon Wea Rev*, 2004, (132): 1917-1932.
- [4] Jones C, Carvalho M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. *J Climate*, 2004, (17): 2078-2094.
- [5] 吕俊梅, 琚建华, 任菊章, 等. 热带大气MJO活动异常对2009—2010年云南极端干旱的影响. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 599-613.
- [6] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸期预报试验. *大气科学*, 36(1): 102-116.
- [7] 陈丽娟, 陈伯民, 张培群, 等. T63模式月动力延伸期预报高度场的改进试验. *应用气象学报*, 2005, 16(增刊): 92-96.
- [8] 信飞, 孙国武, 陈伯民. 自回归统计模型在延伸期预报中的应用. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 69-75.
- [9] Sun G W, Chen B D. Oscillation characteristics and meridional propagation of atmospheric low frequency waves over Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese J Atmos Sci*, 1989, 12: 293-300.
- [10] 章基嘉, 孙国武, 陈葆德. 青藏高原大气低频变化的研究. 北京: 气象出版社, 1991.
- [11] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 64-68.
- [12] 孙国武, 孔春燕, 信飞, 等. 天气关键区大气低频波延伸期预报方法. *高原气象*, 2011, 30(3): 594-599.
- [13] Shanks J L. Recursion filters for digital processing. *Geophysics*, 1967, 32: 31-51.
- [14] 孔春燕, 孙国武. 上海地区梅雨与前期冬、春升温的关系. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 92-97.

利用MJO活动规律进行云南雨季开始期的延伸期预测试验

杞明辉¹ 牛法宝¹ 严欣² 琚建华³

(1 云南省气象台, 昆明 650034; 2 云南大学大气科学系, 昆明 650091; 3 云南省气象局, 昆明 650034)

摘要: 雨季开始期的早晚历来是云南天气气候预测中的一个重要课题, 特别是在近年来云南春季和初夏极端干旱事件频频发生的情况下, 以及在社会和政府决策需提前预知雨季来临早迟的“刚性”需求下, 对“雨季开始期”的延伸期预测显得极为迫切。为此, 在应用MJO活动规律开展云南冬半年延伸期降水预测试验的基础上, 结合前期对“热带低频振荡与云南雨季关系”的研究成果开展了本次“云南雨季开始期延伸期预测试验”, 并进行了认真的检验。通过检验, 认为: (1) 在预测中可根据MJO活动中心位置对应的影响云南水汽输送的干、湿窗口期, 较好地预测延伸期时段内云南的降水趋势; (2) 前期研究发现了影响云南多雨年、少雨年的对流活动关键区, 此关键区春季前兆信号指数对云南雨季开始期的预测是有效的。因此, 综合应用MJO移动规律和关键区前兆信号开展云南雨季开始期的预测是提高预测能力的一种有效途径。

关键词: MJO, 云南, 雨季开始期, 延伸期预测, 试验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.009

Extended-Range Forecast of the Beginning of the Rainy Season in Yunnan by Studying the MJO Action Regularity

Qi Minghui¹, Niu Fabao¹, Yan Xin², Ju Jianhua³

(1 Yunnan meteorological observatory, Kunming 650034; 2 Yunnan University, Kunming 650091;

3 Yunnan Province Meteorology Administration, Kunming 650034)

Abstract: When the rainy season begins is always a significant issue in Yunnan's forecast of weather and climate. The extended-range forecast for the beginning date of rainy season is urgent and necessary, especially in the case of extreme droughts in Spring and early Summer in Yunnan occurring frequently for the past few years. Thus, based on doing extended-range forecast of precipitation through the winter half-year in Yunnan using the patterns of MJO activity, and combined with early research findings about the relationship of the tropical low-frequency to the rainy season in Yunnan, the extended-range forecast for the beginning date of the rainy season has been fully studied and examined. The results suggest the points below: (1) The precipitation trends can be forecasted by the wet and dry windows phase that would impact water vapor transportation of Yunnan which corresponds to the position of the action center of MJO. (2) In our previous research we found some key areas which had exercised an influence on the convection of the wet or dry years in Yunnan. The index of spring's precursory signal in the key areas is effective to forecast the beginning of the rainy season. Thus, using both MJO moving regularity and precursory signal in the key areas is an effective way to improve prediction of the beginning date of the rainy season.

Keywords: MJO, Yunnan, the beginning of the rainy season, extended-range forecast, experiment

1 引言

云南作为一个青藏高原南延部分的高原山区省份, 整个地势西北高东南低, 山地面积占全省土地

面积的94%。特殊的地理位置决定了云南主要降水比较集中发生在汛期(5—10月)。当前, 在全球气候日趋变暖的背景下, 云南的干旱事件频频发生。基于社会和政府决策需提前预知雨季来临早迟的“刚性”需求, “雨季开始期”的延伸期预测研究显得极为迫切。在此情况下, 延伸期(20~30d)时段内对云南雨季开始期, 特别是首场全省性强降水天气过程出现时段的天气预报, 在云南的防灾减灾任务及农业生产安排等民生工作中显得极其重要。

收稿日期: 2012年9月27日; 修回日期: 2012年12月3日

第一作者: 杞明辉(1965—), Email: qifee@163.com

通信作者: 琚建华(1956—), Email: jujh@cma.gov.cn

基金项目: 公益性行业专项(GYHY201006023, GYHY201306050); 云南省社会发展科技计划(2009CA023); 云南省预报员专项(YB201202)

由于云南5月雨季对农业和社会生产用水的突出影响,对云南雨季开始期的研究成为了气象界多年来的一个热点、难点问题。从20世纪80年代以来,王裁云^[1]、秦剑等^[2]、许美玲等^[3]、严华生等^[4]、刘瑜等^[5,6]利用前期大气环流异常来分析影响云南5月雨季开始早晚的原因,晏红明等^[7]、赵尔旭等^[8]、陶云等^[9]、郑建萌等^[10]利用西南季风的建立来预测云南雨季的开始,陈艳等^[11]、刘瑜等^[12]、据建华等^[13,14]、肖子牛等^[15]、解明恩等^[16]、张小玲等^[17]利用前期海温异常和热带对流(OLR)活动异常来分析云南5月降水的多寡。2012年陈艳^[18]通过对“由春夏季节转换期间副热带西风急流活动对云南雨季开始的影响”研究,认为“云南雨季开始前后10天内东亚副热带西风急流有显著变化”;然而,通过用季节内振荡(ISO)的方法研究云南雨季开始期,目前还比较少,李汀等^[19]在研究热带地区OLR活动规律时发现:印度洋关键区低频对流ISO前兆信号在云南雨季开始期天气预报中有较强的指示意义。本文在进一步应用这些研究成果开展延伸期天气预报试验基础上,对该成果在“时效提前”或“时效延迟”方面,做了进一步完善。

MJO (Madden-Julian Oscillation) 是一种自西向东有规律传播的热带大气季节内振荡现象。近年来,利用MJO研究延伸期预报已经引起了国内外气象学者们的高度关注^[20-30]。何金海等^[22]、丁一汇等^[23]、李崇银等^[24]通过分析研究认为:MJO是热带大气季节内振荡的强信号,MJO的传播不仅对热带天气和气候产生影响,也会通过对流强迫或遥相关对热带以外天气和气候产生影响。之前,通过对MJO传播过程开展了一系列(4次)云南冬半年延伸期降水预测,取得了较好的效果^[29,30]。以此为基础,在2012年云南雨季来临之前,为解决当时云南由于连续三年遭遇的春季和初夏极端干旱所急需提前获取当年雨季开始期的强烈需求,面对社会需要在延伸期时段内预测云南雨季开始期的难题,在云南省气象台应用MJO活动规律并结合其他因素进行了云南雨季开始期的延伸期降水天气预测试验。

2 资料与方法

RMM指数(All-Season Real-Time Multivariate MJO Index,即全年实时多变量MJO指数)是由Wheeler等^[21]在2004年创建的一个描述MJO观测结果的逐日独立指数。采用近赤道地区(15°S—15°N)平均850hPa纬向风场、200hPa纬向风场和OLR场的合成场,在移除季节变化、年变化、年际变化以及更长时间尺度变化的成分之后,进行EOF(Empirical

Orthogonal Function,经验正交函数)分析,以第一模态和第二模态(EOF1和EOF2)的时间系数(PC1和PC2)作为多变量MJO序列1和2(RMM1和RMM2)。

RMM指数的应用使得MJO指数时间序列成为一个有效的实时指数,目前在国际上获得广泛使用。该MJO指数可由以下网址(澳大利亚气象局)获取:<http://www.bom.gov.au/bmrc/clfor/cfstaff/matw/maproom/RMM/>。

图1就是利用RMM指数对MJO活动强度与位置的描述。 $\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2}$ 是MJO的强度,而利用RMM1和RMM2的值确定的位相(1~8)则表示了MJO活动中心在热带地区的位置。其中2—3位相表示热带印度洋,4—5位相表示海洋性大陆(印尼群岛一带),6—7位相表示热带太平洋,8—1位相表示西半球和非洲。前期对MJO的研究^[20-28]表明:MJO振荡的中心传播(图1)进入第3,4,5,6位相后,有利于热带对流产生的水汽进入云南,可以明显对云南及周边地区产生影响,我们称之为MJO影响云南的“湿窗口”(下面简称“湿窗口”);MJO振荡的中心传播(图1)进入第7,8,1,2位相时,热带对流产生的水汽对云南及周边地区的影响较弱,称之为MJO影响云南的“干窗口”(下面简称“干窗口”)。

李汀等^[19]在研究“前期季节内振荡对云南5月降水的影响”时发现:在热带印度洋有一个关键区(5°—10°N,77.5°—82.5°E),其中平均的4月第2—3候低频(30~60d)OLR的活动情况对云南雨季开始期的影响最为显著,并定义Ikey值为关键区内低频OLR的区域平均值,当它为正(负)值时,表示关键区内的低频对流为强(弱),以此为前提统计总结出多雨年、少雨年4—5月关键区合成变化曲线,并将其看做影响云南雨季开始期的印度洋关键区对流ISO前兆信号(下同),用其可预测云南雨季开始期早或迟。

云南雨季一般于5月第5候开始。然而,由于亚洲季风年际变化的影响,云南雨季开始期往往会偏早或偏晚。如何在延伸期时段内把握、预测云南雨季开始期是本文需要研究的重点。为此,我们在利用MJO开展云南冬半年延伸期预测试验取得一定成效的基础上,针对汛期天气系统比较复杂的情况,仍然以MJO活动规律为基础,结合李汀等研究总结的雨季开始期印度洋关键区对流ISO前兆信号在延伸期天气预报中的作用等因素开展云南雨季延伸期天气预测试验,并利用云南省125站逐日降水数据及NCEP提供的逐日再分析资料(水平分辨率为1°×1°)对预测试验进行详细检验、总结。

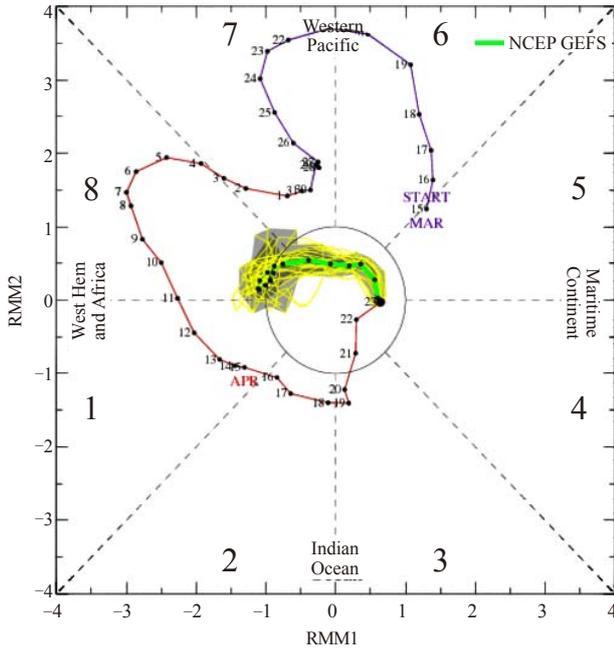


图1 CPC动力模式对MJO活动中心的预测 (选自CPC网站)

3 应用季节内振荡规律预测云南雨季开始期

3.1 MJO 活动中心位置振荡规律

为了预测出MJO活动中心可能对云南雨季开始影响的位置, 我们首先需要预测MJO活动中心何时进入影响云南的“湿窗口”和“干窗口”。目前, 我们主要采用美国气候预测中心(CPC)对MJO的几种预测方法结果进行加工, 分析MJO活动中心未来(10~30d)可能移动到的位置。图1是2012年4月24日CPC动力模式对MJO活动中心位置15d的预测结果。CPC的动力模式预测表明: 2012年4月28日MJO活动中心位置将进入7位相, MJO围绕赤道东传一周的平均周期需要45d左右, 据此判断MJO活动中心在一段时间内继续东传, 其在7, 8, 1, 2位相(干窗口)运行时间平均为23d左右, 因此MJO活动中心在延伸期时段的2012年5月中、上旬会位于“干窗口”。

依据2012年4月24日CPC波动经验模型对MJO活动中心位置40天的预测图(图2)分析, MJO活动中心位置波动经验模型预测是对不发生异常情况的MJO活动中心的平均移动情况的预测。由图可见, 2012年4月29日以后, MJO活动中心位置(绿色中心)从南海一带稳定东传, 中南半岛至南海一带的对流活动快速减弱, 一直到5月第4候MJO活动中心东传至赤道太平洋东部, 接着MJO抑制位相中心(橙色中心)从印度洋稳定东传, 直到5月底传到赤道太平洋东部。5月第6候, 一次新的MJO活动中心(绿色中心)进入印度半岛东侧至孟加拉湾一带。我们再考虑CPC的统计

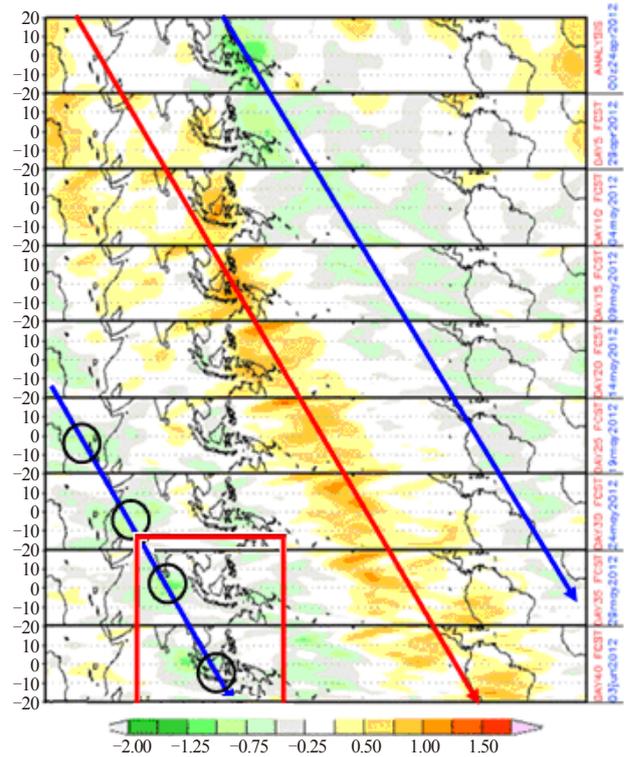


图2 CPC波动经验模式对MJO活动中心预测 (选自CPC网站)

模式对MJO活动中心的预测结果(图略), 并结合上一次的MJO活动中心移动过程的情况, 进行了MJO活动中心移动速度的综合分析。对此, 我们判断2012年4月29日—5月27日为MJO影响云南的“干窗口”期, 而MJO影响云南的“湿窗口”期可能出现在5月27日—6月12日, 在此阶段, 有利于云南出现大范围显著降水过程(汛期第一次全省性大雨过程), 从而使得云南雨季全面开始。

3.2 印度洋关键区对流 ISO 前兆信号

根据我们前期研究的结果^[19], 热带印度洋对流的季节内振荡对云南5月雨量的多寡有显著的影响。在印度洋赤道地区有一个关键区(5°—10°N、77.5°—82.5°E)的低频(30~60d)对流(OLR)活动与云南雨季开始的迟早有较好的对应关系, 我们定义该关键区的平均低频OLR值(Ikey)为云南雨季开始期的预测前兆指数。其中平均的4月第2—3候低频(30~60d)OLR的活动情况(强弱)对云南雨季开始期具有显著的影响, 以此为前提统计总结出云南5月多雨年、少雨年关键区低频对流(OLR)4—5月合成变化曲线(图3), 并可将其看做影响云南雨季开始期的印度洋关键区对流ISO前兆信号, 用其可以预测云南雨季开始期早或迟。依据多年的前兆信号曲线, 绘制了2012年的实况关键区Ikey值变化曲线(图

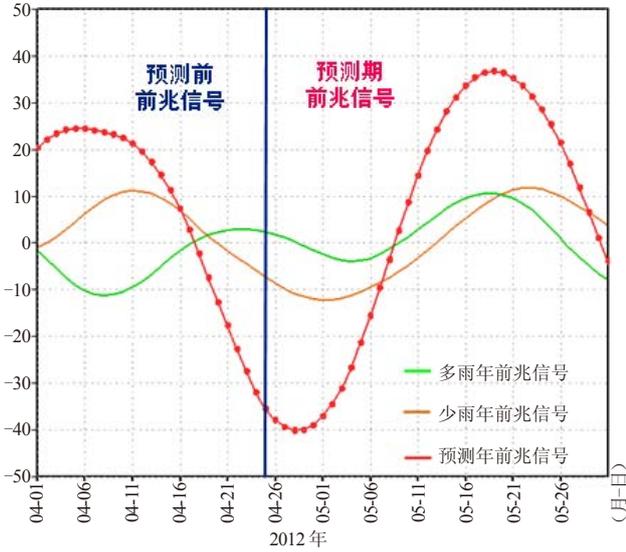


图3 延伸期时段内印度洋关键区对流ISO前兆信号(图中绿色为关键区多雨年4—5月合成Ikey值变化曲线,橙色为关键区少雨年4—5月合成Ikey值变化曲线,红色为关键区2012年4—5月实际Ikey值变化曲线)

3中的红色曲线), 其为2012年4月1—26日实际Ikey值变化曲线, 其量值显著大于两条合成的平均曲线, 但仍可以比较其演变位相。由图可见, 2012年雨季开始期关键区的前兆信号与少雨年雨季开始期的前兆信号(橙色)的位相十分相似, 在4月中旬以前为正位相。由此可以预计, 2012年云南5月出现大范围显著降水的时间可能明显偏晚^[19]。

3.3 综合预测结论

综合以上对MJO活动中心的东传预测情况及印度洋关键区对流ISO前兆信号的分析, 结合对MJO多年东传规律的研究及近年来开展的一系列延伸期天气预测试验经验, MJO在春季沿赤道的平均移速为 $6^{\circ}/d \sim 12^{\circ}/d$ 。MJO活动中心从4月28日进入中太平洋后大约需要23~45d可到达 $90^{\circ}E$ 。我们综合预测5月27日为2012年云南雨季延伸期天气预测的关键转折点, 即5月27日以后MJO活动中心将进入影响云南天气的“湿窗口”, 云南雨季可能于5月27日后建立, 以后, MJO在“湿窗口”可一直活动到6月12日。并在原“CPC网站MJO 15d动力预测图”的基础上给出了更长时效的MJO东移趋势预测线条(图4), 其中红色虚曲线为MJO在“干窗口”期的东移趋势, 黑色虚线为MJO在“湿窗口”期的东移趋势, 图右侧注明了黑色虚线的起始、终止时间。据此, 提前于4月25日得出如下延伸期时段内云南雨季开始期的具体预测结论:

(1) 2012年5月4—26日MJO活动中心位于“干窗口”, 短期降水预报应重点关注滇东南边缘局部短

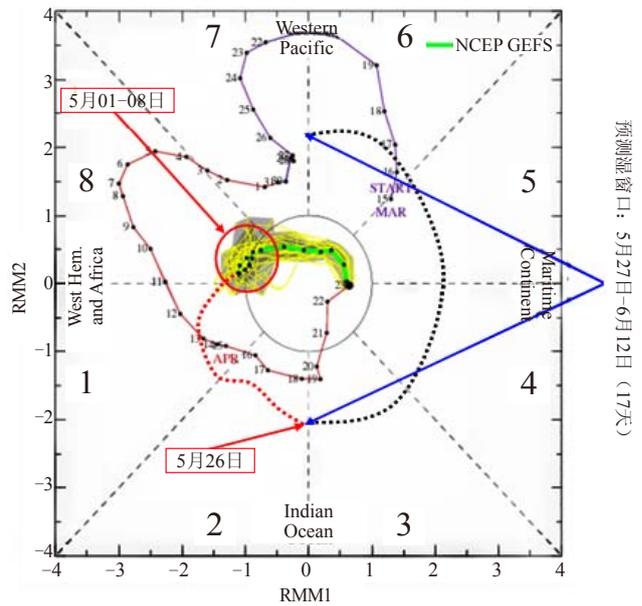


图4 延伸期时段内MJO活动中心位置综合预测示意图(原图选自CPC网站, 虚线为我们的预测曲线)

时对流性天气。

(2) 2012年5月27日—6月12日MJO活动中心位于“湿窗口”, 云南降水将逐步增多。短期降水预报应重点关注孟加拉湾季风低值系统(或印缅槽)及川滇切变引起的首场大雨。

(3) 综上, 从MJO目前活动发展趋势和ENSO(El Niño加速形成)的发展形势来看, 我们认为: 2012年云南雨季的开始期将比正常偏晚(5月底—6月初)。

(4) 延伸期预测的误差大概为3d左右。

4 对延伸期预测试验的检验分析

4.1 雨情分析

根据前面的预测试验, 我们对预测的结果进行了检验。云南2012年5月4—26日(预测的干窗口期)降水距平分布图(图5a)表明, 在本次延伸期天气预测试验干窗口期时段内, 除滇东南地区降水较往年同期略偏多外, 云南大部分地区的降水较往年同期明显偏少, 特别是滇西地区偏少50mm以上。可见, 4月25日做出的5月4—26日(延伸期时段干窗口期)降水趋势预测是可靠的(预测试验结论1正确)。

云南2012年5月27日—6月12日(预测的湿窗口期)降水距平图(图5b)表明, 该时段云南绝大部分地区的降水明显高于历史同期, 特别是滇西地区的降水偏多50mm以上, 这与“干窗口”的降水情况形成显著对比, 说明利用MJO“湿窗口”预测云南雨季开始期降水趋势有现实的实践意义, 进而表明对“湿窗口”降水趋势预测也是较为可靠的(预测试验结论2正

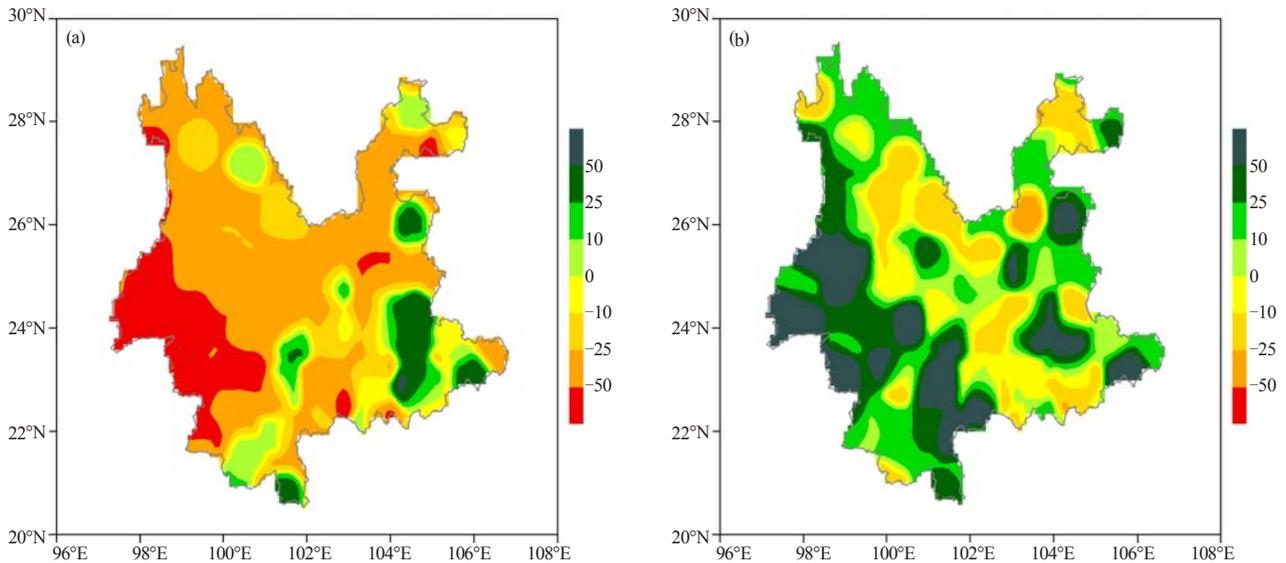


图5 (a) 云南2012年5月4日—5月26日降水距平 (mm) ; (b) 云南2012年5月27日—6月12日降水距平 (mm)

确)。

可见, 利用MJO活动规律通过对延伸期时段内“干、湿窗口期”的预测来开展云南雨季开始期的降水趋势预测有显著效果。

此外, 由本次延伸期天气预测试验时段云南逐日降水实况图(图6), 可以更为清楚地了解到此次延伸期降水天气预测的逐日降水趋势及“过程降水情况”, 具体情况如下。

在干窗口期(5月4—26日)云南有一定的降水出现, 但平均降水量几乎都在5mm以下, 而且整个干窗口期云南的降水几乎呈负距平; 与此相反, 在湿窗口期(5月27日—6月12日), 云南的降水强度明显增强, 转折点是5月27日(即预测进入湿窗口期的第1天)。

在湿窗口期云南出现了3次明显降水过程, 具体降水过程为: 5月27—30日降水过程(第一次), 5月31日—6月4日降水过程(第二次), 6月7—12日降水过程(第三次)。其中, 在第一次降水过程中于5月

29日出现2012年云南首场全省性强降水天气过程, 时隔2d于6月1日出现了2012年云南第二场全省性强降水天气过程。这两场全省性强降水过程分别出现在5月第六候和6月第一候(5月底—6月初), 表明云南雨季全面开始, 所以2012年云南雨季开始正常略偏晚。检验表明, 本次关于云南雨季开始前的延伸期天气预测试验的预测结论基本正确。

以上检验分析进一步表明: 通过对干、湿窗口期的预测开展的云南延伸期降水趋势天气预测试验是有效的。

4.2 MJO 活动中心位置预测情况检验

通过对MJO日常逐日监测数据(图略)分析知: 2012年5月4日MJO活动中心位置位于7位相, 5月26日东传至2位相, 5月4—26日MJO活动中心位置东传至7, 8, 1, 2位相, 所以5月4—26日为本次延伸期预测试验的干窗口, 与预测情况基本一致(预测试验结论1正确); 5月27日MJO活动中心位置由2位相进入3位

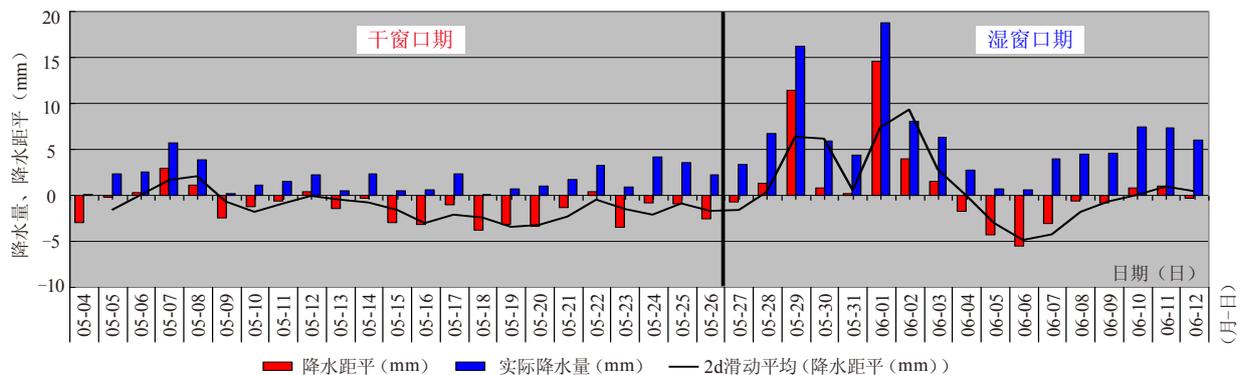


图6 2012年5月4日—6月12日云南省逐日降水趋势图(蓝色条为实际降水量; 红色条为降水距平值)

相, 6月9日东传至6位相, 5月27日—6月9日MJO活动中心位置东传至3, 4, 5, 6位相, 所以, 5月27日—6月9日为本次延伸期预测试验的湿窗口(预测试验结论2基本正确)。

以上情况表明, 6月10日由6位相进入7位相, 转入下一次干窗口期, 比预测的时间提前3d, 但仍在误差范围之内; MJO活动中心位置的东传过程自2012年4月29日至5月26日再至6月9日完成一次干、湿窗口的交替, 历时42d, 基本达到平均45d的平均周期; 干窗口期28d, 多于平均运行时间(22.5d); 湿窗口期14d, 少于平均运行时间(22.5d)。

4.3 关键区低频对流的检验

进一步对前述的图3进行分析, 表明: 关键区2012年4—5月实际Ikey值变化曲线的“波幅”明显大于多雨年、少雨年4—5月合成Ikey值变化曲线的“波幅”, 这是由于多雨年、少雨年4—5月Ikey值变化曲线是一个合成曲线, 代表的是一个平均状态, 属于正常情况。

从图3中曲线的走势及波的个数来看, 2012年雨季开始期关键区的前兆信号有3/4个波, 与“多雨年雨季开始期的前兆信号”完全不同, 而与“少雨年雨季开始期的前兆信号”较为相似, 但略超前3d左右, 所以致使2012年雨季开始期较“少雨年”略为偏早。故2012年云南雨季属于正常偏晚, 与“雨情分析”中得出的“2012年云南5月出现大范围显著降水的时间明显偏晚”结论一致。再次证实了利用关键区的前兆信号来预测云南5月出现大范围显著降水时段早晚的研究成果。

经过对本次延伸期天气预测试验时段内MJO活动中心位置、云南雨季开始期关键区低频对流前兆信号以及降水实况的分析检验表明:

第一、利用MJO东传规律预测云南雨季开始期延伸期时段的干、湿窗口是成功的;

第二、在云南4—6月应用MJO活动中心位置对应的干、湿窗口期来预测延伸期时段内云南的降水趋势是有效的;

第三、利用季节内振荡原理, 分析多雨年、少雨年关键区云南雨季开始期低频对流前兆信号4—5月合成Ikey值变化曲线, 与4月中上旬的对比进行预测4月底至5月实际Ikey值变化曲线是有效的。据此, 在4月中上旬开展延伸期时段预测云南雨季开始期有较好的指示意义。

第四、综合利用MJO活动规律及关键区云南雨季开始期低频对流前兆信号, 开展预测延伸期时段云南

雨季开始期在本次预测试验中获得成功。

5 结论及讨论

通过以上对本次云南雨季开始期延伸期天气预测试验及检验分析, 初步得到以下结论:

(1) 利用MJO东传规律预测云南雨季开始期延伸期时段的干、湿窗口是成功的;

(2) 在云南4—6月应用MJO活动中心位置对应的干、湿窗口期来预测延伸期时段内云南的降水趋势是有效的;

(3) 利用“关键区云南雨季开始期的低频对流前兆信号(Ikey值变化曲线)”规律, 通过分析“预测年份4月中上旬关键区云南雨季开始期前兆信号”属于“少(多)雨年”, 进而判断“预测年份”属于云南雨季开始期的迟(早)在延伸期天气预测中有显著效果;

(4) 在云南雨季开始期延伸期降水趋势预测中, 当表征MJO活动强度中心的位置东传到“湿窗口”以后对云南的大范围显著降水出现的时段确有较强的指示意义。应用MJO活动规律预测干、湿窗口及云南雨季开始期的延伸期降水趋势是一种有效的方法。

通过对MJO活动规律和印度洋关键区低频对流的研究, 并将季节内振荡理论用于指导云南雨季开始期的预测试验, 取得了较为成功的结果。特别是引入了MJO影响云南降水“干窗口”和“湿窗口”的概念, 对以往的一些传统预报经验进行了修正和完善, 为提高云南雨季的延伸期预测提供了理论依据。

参考文献

- [1] 王毅云. 影响云南5月雨季开始的天气原因分析. 全国热带夏季风会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 1983.
- [2] 秦剑, 琚建华, 解明恩. 低纬高原天气气候. 北京: 气象出版社, 1997.
- [3] 许美玲, 段旭, 杞明辉, 等. 云南省天气预报员手册. 北京: 气象出版社, 2011.
- [4] 严华生, 鲁亚斌, 尤卫红, 等. 云南省5月份雨量的天气气候成因探讨. 应用气象学报, 1995, 6(8): 124-128.
- [5] 刘瑜. 云南雨季早迟的气候特征分析. 气象, 2000, 26(7): 45-49.
- [6] 刘瑜, 马振锋, 陶云, 等. 云南2002年雨季偏早的环流特征分析. 高原气象, 2003, 22(增刊): 102-109.
- [7] 晏红明, 杞明辉, 肖子牛. 云南5月雨量与热带海温异常及亚洲季风变化的关系. 应用气象学报, 2001, 12(3): 368-376.
- [8] 赵尔旭, 吕俊梅, 琚建华. 东南亚地区夏季风爆发对云南雨季开始的影响. 热带气象学报, 2006, 22(3): 209-216.
- [9] 陶云, 郑建萌, 万云霞, 等. 云南雨季开始期演变特征分析. 气候与环境研究, 2006, 11(2): 229-235.
- [10] 郑建萌, 段旭. 云南雨季开始偏早与孟加拉湾季风爆发的关系. 气象, 2001, 31(2): 59-63.
- [11] 陈艳, 丁一汇, 肖子牛, 晏红明. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响. 大气科学, 2006, 30(1): 25-37.
- [12] 刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 初夏孟加拉湾低压与云南雨季开始期. 高原气象, 2007, 26(3): 572-578.
- [13] 琚建华, 李绚丽. 云南初夏降水与前期大气环流的关系. 高原气

- 象, 1999, 18(1): 63-70.
- [14] 琚建华, 叶乃青. 云南初夏雨量与前期热带OLR的联系. 热带气象学报, 1999, 15(1): 76-80.
- [15] 肖子牛, 温敏. 云南5月降雨量与前期季节内振荡活动相互关系的分析研究. 大气科学, 1999, 23(2): 177-183.
- [16] 解明恩, 鲁亚斌, 普贵明. 云南及其邻近地区OLR场的气候特征. 高原气象, 1999, 18(2): 185-191.
- [17] 张小玲, 琚建华, 王三杉. El Nino对云南初夏降水的影响. 热带气象学报, 1999, 15(2): 168-176.
- [18] 陈艳. 副热带西风急流对云南雨季开始的影响. 气象科技进展, 2012, 2(4): 42-43.
- [19] 李汀, 严欣, 琚建华. MJO 活动对云南5月降水的影响. 大气科学, 2012, 36 (6): 1101-1111.
- [20] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. J Atmos Sci, 1971, 28(5): 702-708.
- [21] Wheeler M C, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. Monthly Weather Review, 2004, 132(8): 1917-1932.
- [22] 何金海, 丁一汇. 亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 1996.
- [23] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸预报. 气象, 2010, 36(7): 111-122.
- [24] 李崇银, 李桂龙. 热带大气季节内振荡的进一步分析. 气候与环境研究, 1998, 3(1): 27-37.
- [25] 贾小龙, 袁媛, 任福民, 等. 热带大气季节内振荡(MJO)实时监测预测业务. 气象, 2012, 38(4): 425-431.
- [26] 琚建华, 钱诚, 曹杰. 东亚夏季风的季节内振荡研究. 大气科学, 2005, 29(2): 187-194.
- [27] 琚建华, 孙丹, 吕俊梅. 东亚季风区大气季节内振荡经向与纬向传播特征分析. 大气科学, 2008, 32(3): 523-529.
- [28] 琚建华, 刘一伶, 李汀, 等. 2010. 南海夏季风季节内振荡的年际变化研究. 大气科学, 34(2): 253-261.
- [29] 李汀, 陶诗言, 琚建华, 等. 云南地区2011年雨季结束期(10-11月)降水延伸期预报试验. 气象科技进展, 2012, 2(2): 42-43.
- [30] 牛法宝, 陶诗言, 琚建华, 等. 对云南2011年冬季降水的延伸期天气预测试验. 云南大学学报(自然科学版), 2012, 34 (1): 62-65.

新书架

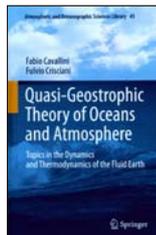
NEW BOOK

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



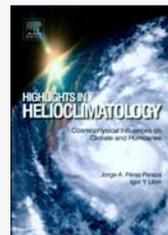
International Symposium on the Recent Progress of Ultra-High Energy Cosmic Ray Observation
《超高能宇宙射线观测最新进展国际研讨会》

编著者: Hiroyuki Sagawa等
出版者: AIP-Press
出版年: 2011



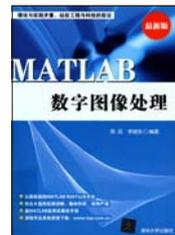
Quasi-Geostrophic Theory of Oceans and Atmosphere
《海洋和大气中的准地转理论》

编著者: Fabio Cavallini等
出版者: Springer
出版年: 2012



Highlights in Helioclimatology
《太阳气候学概要》

编著者: Jorge A. Pérez-Peraza等
出版者: Elsevier
出版年: 2012



《MATLAB数字图像处理》

编著者: 周品, 李晓东
出版者: 清华大学出版社
出版年: 2012



《未来10年中国科技发展战略·地球科学》

编著者: 国家自然科学基金委员会, 中国科学院
出版者: 科学出版社
出版年: 2012



Theory of Reflectance and Emissance Spectroscopy
《中期-延伸期天气预报原理》

编著者: 钱维宏
出版者: 科学出版社
出版年: 2012



《GIS数据结构与算法基础》

编著者: [英]Stephen Wise
出版者: 科学出版社
出版年: 2012



《极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究》

编著者: 封国林等
出版者: 科学出版社
出版年: 2012

低频天气图方法在辽宁夏季延伸期 强降水预报中的应用

胡春丽¹ 李辑¹ 陈伯民² 王瀛³ 袁子鹏⁴ 陆忠艳⁴

(1 辽宁省气象科学研究所, 沈阳 110016; 2 上海市气候中心, 上海 200030;

3 辽宁省气象局, 沈阳 110016; 4 沈阳中心气象台, 沈阳 110016)

摘要: 基于低频天气图预报方法, 分析夏季(6—8月)影响辽宁省强降水过程关键地区低频天气系统(低频气旋和低频反气旋)的活动特征, 并根据这些活动特征预报强降水过程, 在2011年夏季用该方法进行辽宁地区强降水过程预报表明, 预报效果较好, 且预报时效为10~20d, 可以在月内强降水过程预报中应用。

关键词: 低频天气图, 延伸期, 强降水过程

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.010

Precipitation Forecast from 10–20 Days by the Method of the Low-Frequency Synoptic Weather Map in Liaoning Province

Hu Chunli¹, Li Ji¹, Chen Bomin², Wang Ying³, Yuan Zipeng⁴, Lu Zhongyan⁴

(1 Institute of Meteorological Science of Liaoning Province, Shenyang 110016

2 Shanghai Climate Centre, Shanghai 200030 3 Liaoning Meteorological Bureau, Shenyang 110016

4 Liaoning Meteorological observatory, Shenyang 110016)

Abstract: A new forecasting method, the low-frequency weather map (LFSC), is applied in Liaoning precipitation forecast from 10 to 20 days. By using LFSC, the active characteristics of the low-frequency cyclones and anticyclones are analyzed. Based on their active characteristics, the precipitation processes are forecasted. The forecast results are good in Liaoning region from June to August 2011 and its forecasting period of validity is about 10-20 days. The LFSC method can be applied to predict the precipitation process in the extended-range forecast from 10 to 20 days.

Keywords: Low-frequency weather map, extended-range forecast, severe precipitation process

1 引言

现阶段, 我国气象部门的预报、预测业务根据时间可划分为1~3d的短期预报、4~10d的中期预报(二者又被称为常规天气预报)以及月尺度以上的气候预测, 而介于常规天气预报和气候预测之间的延伸期预报(10~30d), 为中期预报(10d以下)的延伸, 既超越了逐日天气预报的下限, 又小于气候预测的月、季时间尺度的上限, 是目前业务预报中的一个“盲点”, 做好该时段预报具有重要意义。

近年来开展的延伸期预报业务主要着重两个方面: 一是对气象要素的某段时间的平均值或距平值进

行预报; 二是针对持续性强的异常环流造成的重大过程进行预报。预报方法主要有天气气候学方法、概率统计学方法、动力—统计学方法以及数值产品的解释应用等^[1-10], 其中, 数值模式对某段时间的平均值或距平的预报为解决延伸期预报的主要途径。近年来, 中高纬度大气季节内振荡规律、热带大气季节内振荡(MJO)等在延伸期预报中的应用价值逐渐被关注, 但国内在此方面的研究并不多, 而美国、澳大利亚学者对MJO在天气预报的应用已有较多研究, 并将其有关的MJO产品应用于天气和气候预报中, 不过诸多工作是将其应用于降水趋势预报中, 尚未涉及降水过程预报^[11, 12]。1990年代, 章基嘉等^[13]提出用大气低频振荡特征来做延伸期预报的设想——低频天气图, 2008—2011年夏季上海市预报结果表明, 强降水过程可以在10~50d前预报出来, 因此低频天气图方法可能是初步解决“天气”和“气候”预报衔接的“时间

收稿日期: 2012年8月8日; 修回日期: 2012年12月5日

第一作者: 胡春丽(1980—), Email: huchunli0829@163.com

通信作者: 李辑, Email: cqlijj@sina.com

资助信息: 中国气象局气象关键技术集成与应用项目
(CMAGJ2011M14)

缝隙”问题的途径之一,关于低频天气图的延伸期预报方法,详见文献[14]。上海市气候中心牵头的月内重要过程趋势预测系统项目,被列为2011年现代气候业务建设试点任务,辽宁省气候中心作为该项目的试点单位,承担的主要任务是基于延伸期强降水过程预报方法(低频天气系统预报技术),将夏季月内降水重要过程预测系统平台本地化,并应用到业务。本文根据辽宁地区的地理和气候特点,对低频天气图预报方法在辽宁的应用情况及2011年夏季的预报结果做一简单介绍,以期探讨。

2 资料

包括NCEP/NCAR 2005—2010年5—9月逐日20时500hPa高度场再分析资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;欧洲中心2011年5—9月逐日500hPa高度场资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;辽宁省58站2005—2011年5—9月逐日降水量资料。

3 低频天气图预报方法

3.1 低频天气图制作

根据东北地区气候特点,选取500hpa等压面为研究对象,首先利用Butterworth带通滤波器^[15],对欧洲中心2005—2010年下半年(5月1日—9月30日共153d)逐日500hPa高度场格点资料进行10~20d滤波。值得一提的是北半球大气普遍存在30~60d振荡,在不同地区,30~60d振荡有很大差异,即有明显的地域差异,在较低纬度地区(如上海),用30~60d滤波,之后外推进行10~30d预报与东北地区方法有差异,实践发现东北地区滤波10~20d时间长度效果好于10~30d滤波。用滤波后的当天资料绘制低频天气图,范围为 $10^{\circ}—80^{\circ}N$, $60^{\circ}—160^{\circ}E$,滤波结果以MICAPS第四类数据格式保存,形成与常规高空图相类似的逐日低频高度场天气图(图略)。如果利用逐日风场格点资料,得到的是逐日低频流场图(上海地区选取700hPa流场)。低频流场图和低频高度场图,即低频天气图,将风场和高度场的10~20d的低频分量分离开来,并将其绘制在类似于日常天气图的地图上。基于低频天气图,可以清楚地分辨出低频高压和低频低压,以及低频气旋与反气旋等信息。

3.2 确定低频预报关键区

应用2005—2010年5—9月10~20d的低频天气图,统计出各网格点上低频高中心和低频低中心的出现次数,找出各区域低频天气系统的发生、发展规律。经过统计发现在欧亚地区存在着较为明显的低频振荡的高发区,主要位于乌拉尔山的东侧、巴尔喀

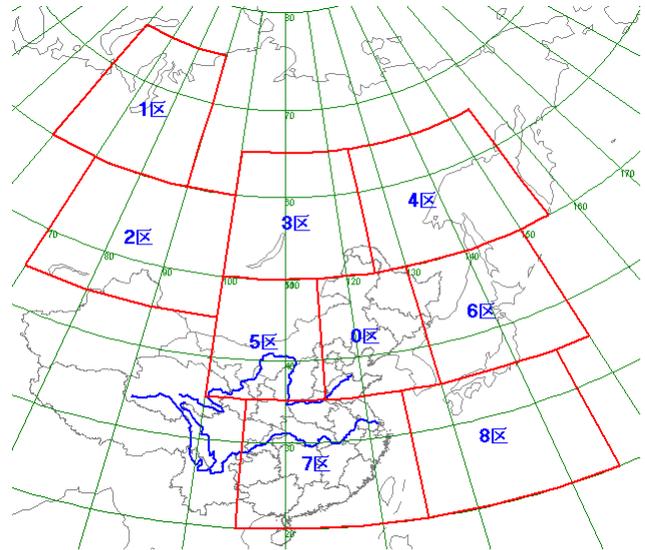


图1 低频天气系统关键区

什湖附近、贝加尔湖附近、鄂霍茨克海附近、西太平洋地区以及我国的华北至东北地区 and 江南至华南地区。根据10~20d低频中心的高发区域(图1),结合辽宁的天气和气候特点以及辽宁地区天气预报经验,总结出对辽宁降水有影响的9个低频预报关键区,即0区(中国东北地区): $35^{\circ}—50^{\circ}N$, $115^{\circ}—130^{\circ}E$;1区(乌拉尔山地区): $60^{\circ}—75^{\circ}N$, $60^{\circ}—90^{\circ}E$;2区(巴尔喀什湖附近): $45^{\circ}—60^{\circ}N$, $70^{\circ}—100^{\circ}E$;3区(贝加尔湖地区): $50^{\circ}—65^{\circ}N$, $100^{\circ}—125^{\circ}E$;4区(鄂霍茨克海地区): $50^{\circ}—65^{\circ}N$, $125^{\circ}—155^{\circ}E$;5区(中国河套地区): $35^{\circ}—50^{\circ}N$, $100^{\circ}—115^{\circ}E$;6区(日本海附近): $35^{\circ}—50^{\circ}N$, $130^{\circ}—150^{\circ}E$;7区(中国江淮至华南地区): $20^{\circ}—35^{\circ}N$, $105^{\circ}—125^{\circ}E$;8区(西太平洋地区): $20^{\circ}—35^{\circ}N$, $125^{\circ}—145^{\circ}E$ 。

3.3 关键区低频系统振荡周期特征分析

对2005—2010年5—9月10~20d的逐日低频天气图进行普查,记录各低频预报关键区内低频高低压中心出现和消失的时间,统计得到9个关键区的低频系统振荡周期(表1)。

表1 9个关键区低频系统的振荡周期

低频预报关键区	振荡周期
关键区0	10~15d
关键区1	11~16d
关键区2	13~18d
关键区3	11~15d
关键区4	12~18d
关键区5	12~16d
关键区6	10~15d
关键区7	13~18d
关键区8	10~16d

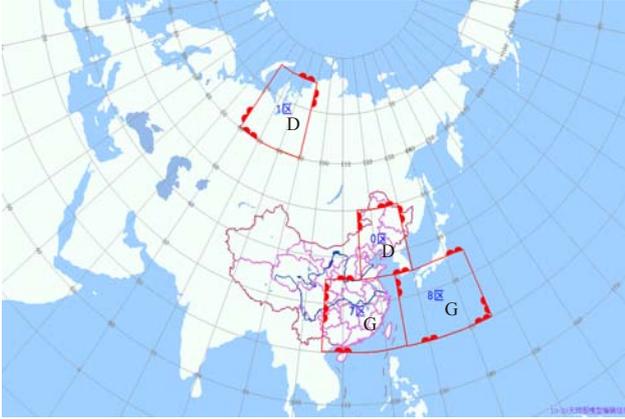


图2 低频预报概念模型 (10~20d滤波)

3.4 建立低频预报概念模型

实践发现低频天气系统具有周期性、移动路径相似性、空间平面的连续性、生成源地的准定常性等特性，此结论与孙国武等^[14, 16, 17]的结论基本一致。由于低频天气系统的上述特征，使得在低频天气图上追踪天气系统远比在一般天气图上要方便、容易得多，这种低频系统实际上代表大气低频振荡振幅最大的位相随时间的变化，显然与天气图上的天气系统不同，低频天气系统所反映的天气实体及其对应的天气学、动力学规律，是与某种天气系统的生成、维持、加强、移动和减弱过程相对应的，因此可利用低频天气图上的系统的移动变化与辽宁地区较强降水过程发生、发展的关联做出辽宁地区未来10~20d的降水过程预报。通过分析辽宁省较强降水与各个区域低频系统活动特征之间的联系，可以总结和建立低频天气图上的预测概念模型，具体为：选取2005—2010年5—9月辽宁省日平均降水量大于10mm的降水过程（强降水过程），对照分析降水过程期间各关键区低频系统的活动特征，总结和建立10~20d低频天气图预报概念模型。最终得到辽宁省10~20d低频天气图预报概念模型为：0区（中国东北地区）和1区（乌拉尔山地区）有低频低压出现，7区（中国江淮至华南地区）和8区（西太平洋地区）有低频高压出现时，辽宁省将有明显降水过程发生。预报概念模型见图2。

4 预报结果

4.1 2011年汛期结果

低频预报的制作时间为每候的最后一天（5，10，15，20，25，30或31日），预报内容为应用10~20d低频系统预报方法计算得到的延伸期降水过程预报日期。2011年5月下旬开始，低频天气图预报方法和预报业务投入沈阳区域气候中心业务试运行，此项工作由2011年汛期值班预报员独立完成。2011

表2 2011年6—8月10~20d低频天气图降水过程预报

起报日期	预报降水过程时间	降水实况（其中降水量为54站平均）
5月25日	6月6—7日	6月7日（2.6mm）
5月31日	6月10—13日	6月12日（12.6mm）
6月5日	无强降水	无强降水
6月10日	6月21—24日	6月23日（8.3mm）
6月15日	6月25—27日	6月27日（30.8mm）
6月20日	无强降水	无强降水
6月25日	7月5—8日	7月8日（3.7mm）
7月5日	无强降水	7月21日（15.8mm）
7月10日	7月21日	7月21日（15.8mm）
7月15日	无强降水	7月26日（27.9mm）
7月20日	7月30日—8月3日	7月31日（39.4mm）、8月3日（12.3mm）
7月25日	无强降水	8月8日（11.8mm）、8月9日（36.7mm）、8月10日（12.6mm）
7月31日	无强降水	8月16日（23.2mm）
8月5日	无强降水	8月16日（23.2mm）
8月10日	8月20—21日	无降水
8月15日	8月25—29日	8月25日（0.3mm）、8月28日（20.9mm）、8月29日（27.8mm）
8月20日	8月30日—9月1日	8月30日（10.5mm）

年汛期辽宁省的预报结果与实况对比如表2所示。可以看出，2011年5—9月，沈阳区域气候中心共发布10~20d低频预报17期，6—8月辽宁省共发生强降水过程（辽宁全省平均降水量 $\geq 10\text{mm}$ ）13d，提前10~20d预报8d，其中7月26日、8月8日、8月9日、8月10日、8月16日漏报，8月20—21日空报，总体预报效果较好。

4.2 典型降水个例分析

这里选取2011年汛期辽宁省较强的区域性降水做介绍。7月20日10~20d低频滤波中，低频天气图7月8日关键区0出现低频低压，7月18日关键区1出现低频低压，7月3日关键区7出现低频高压，7月19日关键区8出现高压。7月31日在关键区0和1有低频低压出现，在关键区7和8存在低频高压，这种低频配置有利于辽宁夏季强降水的发生（图3）。预报结果显示7月30日—8月3日有中等强度降水，实况是7月31日全省平均降水量为39.4mm（图4），与预测预报模型基本一致。

由上可见，低频天气图方法对于辽宁省延伸期降水过程有较好的预报能力，延伸期预报的结果可以为中短期预报员提供重要参考信息。

5 讨论与小结

低频天气图预报方法的思路就是以天气学、动力学为基础的短期值班预报员思路做长期天气（特别是极端天气、气候事件）的过程、时段预报。2011年夏季用低频天气图方法预报辽宁地区10~20d强降水过程预报效果较好，但由于投入业务运行时间较短，还

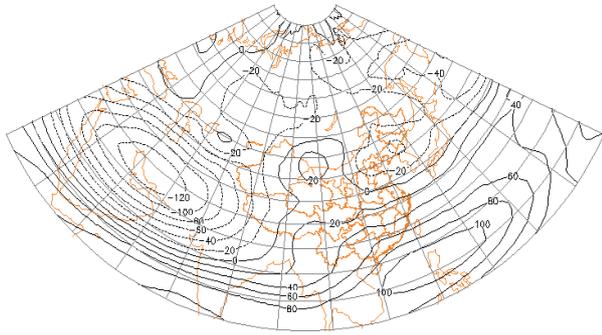


图3 2011年7月31日低频天气图(500hPa)

有大量问题未解决,需要进行下述主要工作来改进和提高低频天气图预报方法。

(1) 目前试用500hPa高度场,运用到其他层次效果如何,如700hPa, 200hPa风场、涡度场等。

(2) 低频天气系统影响降水过程的实体,需要从预报机理方面开展研究。

(3) 其他季节的天气气候过程,如:冬季暴雪、寒潮,春季干旱、春季第一场透雨、沙尘暴,秋季的初霜等,都可以使用低频天气图预报方法进行应用试验。

参考文献

- [1] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sc*, 1963, 20: 130-141.
- [2] Ritchie H. Application of the semi-Lagrangian method to a multilevel spectral primitive-equations model. *Q J R Meteorol Soc*, 1991, 117: 91-106.
- [3] 李维京, 陈丽娟. 动力延伸预报产品释用方法的研究. *气象学报*, 1999, 57(3): 338-345.
- [4] 李维京, 纪立人. 月动力延伸预报研究. 北京: 气象出版社, 2000.
- [5] 张道民, 纪立人. 月数值天气预报的试验研究. *大气科学*, 1996, 20(4): 429-438.
- [6] 金荣花, 马杰, 毕宝贵. 10~30d延伸期预报研究进展和业务现状. *沙漠与绿洲气象*, 2010, 4(2): 1-5.

2011年7月31日08时24小时降水量 新宾: 10.6mm
全省总降水量: 2287.5mm 全省平均降水量: 39.4mm

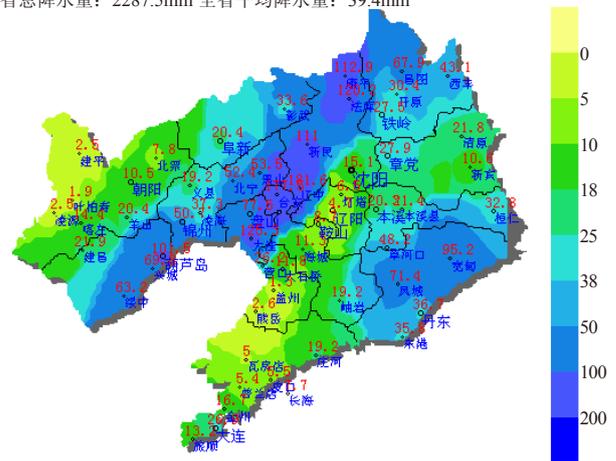


图4 辽宁省2011年7月31日降水实况

- [7] 信飞, 孙国武, 陈伯民. 自回归统计模型在延伸期预报中的应用. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 69-75.
- [8] 覃志年, 李维京, 何慧, 等. 广西6月区域性暴雨过程延伸预测试验. *高原气象*, 2009, 28(3): 668-693.
- [9] 陈丽娟, 陈伯民, 张培群, 等. T63模式月动力延伸期预报高度场的改进试验. *应用气象学报*, 2005, 16(增刊): 92-96.
- [10] 顾伟宗, 陈丽娟, 张培群, 等. 基于月动力延伸预报最优信息的中国降水尺度预测模型应用. *气象学报*, 2009, 67(2): 280-287.
- [11] Wheeler M C, Hendon H. An all-season real-time multivariate MJO Index: Development of an index for monitoring and predication. *J Climate*, 2004, 132: 1917-1932.
- [12] Jones C, Carvalho M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. *J Climate*, 2004, 17: 2078-2094.
- [13] 章嘉基, 孙国武, 陈宝德. 青藏高原大气低频变化的研究. 北京: 气象出版社, 1991: 105-106.
- [14] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 64-68.
- [15] Krishnamurti T N, Subrahmanyam D. The 30-50 day mode at 850mb during MONEX. *J Atmos Sci*, 1982 (39): 2088-2095.
- [16] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报. *高原气象*, 2010, 29(5): 1142-1147.
- [17] 孙国武, 冯建英, 陈伯民, 等. 大气低频振荡在延伸期预报中的应用进展. *气象科技进展*, 2012, 2(1): 12-18.

勘误

本刊 2012 年第 2 卷第 1 期, P38 左栏倒数第五行, 公式 “ $X_k' = \frac{X_k - X_{k\min}}{X_{k\max} - X_k}$ ” 有误, 更正为 “ $X_k' = \frac{X_k - X_{k\min}}{X_{k\max} - X_{k\min}}$ ”。

本刊 2012 年第 2 卷第 6 期, P57 左栏倒数第 18 行, 原文 “距今 300~3600 年” 有误, 更正为 “距今 3000~3600 年”。

特此更正, 并向作者与广大读者致歉!

极锋理论—长波理论—数值预报的发展和内在联系

■ 钟琦 张萌

20世纪上半叶是气象科学技术史辉煌和具有里程碑意义的时代，以皮叶克尼斯父子为首的挪威学派创建极锋理论，标志着气象学科脱离了过去全凭经验从事天气预报的状况；以罗斯贝和查尼为代表的芝加哥学派创立了长波理论、斜压不稳定理论和准地转理论等，是现代动力气象学的重要突破，标志着气象科学成为了现代科学；而冯·诺依曼领导的数值预报小组的成功则实现了气象学由定性向定量科学的划时代转换。这一系列成就紧凑地发生在短短50年间，它们之间有什么样潜在的联系和继承性？本文从气象科学技术历史发展的角度探讨了极锋理论—长波理论—数值预报这一发展脉络的内在学术联系。

一、斜压不稳定是气旋波产生的原因

V.皮叶克尼斯 (Vilhelm F.K. Bjerknes, 1862—1951年) 将流体力学引入到气象学，使气象学科从对现象的描述性工作走向由数学物理学和热力学描述的科学，是其对气象科学发展做出的巨大贡献。关于气旋生成的解释，挪威学派做出了自己的贡献 (图1)：极锋理论认为气旋的形成是不连续面 (即锋面) 上的小扰动、不稳定发展来的；而且他们提出的力管场理论中已经有了能量转换和热力释放的观念 (当斜面翻转，冷空气下沉，产生能量交换)。但是，从定量的角度看，这个解释并不正确，气旋并不是不连续面中的不稳定、小扰动发展而来的，因为定量地去算不连续面中最不稳定的波长，是积云的尺度，而不是气旋的尺度。这个错误在斜压理论中被纠正过来：建立在地转理论基础上的热成风原理，即由于南北温差造成了西风在北半球中纬度的垂直切变，当垂直切变增长到超过临界值之后，这个基本气流的不稳定形成了气旋。斜压不稳定这个最不稳定的波长才是气旋的尺度。从能量来源的角度来说，气旋的能量来源是有效位能的释放，有效位能转换成动能。

实际上，1946年赵九章先生首先提出了行星波斜压不稳定的概念 (图2)。赵先生用水平力管场引进斜压性，但为了推导简便，在数学上推导出了不稳定。将垂直速度设成了0，次年，查尼从风的垂直切变入手，用地转模式，假设大气为准无辐散，推出了

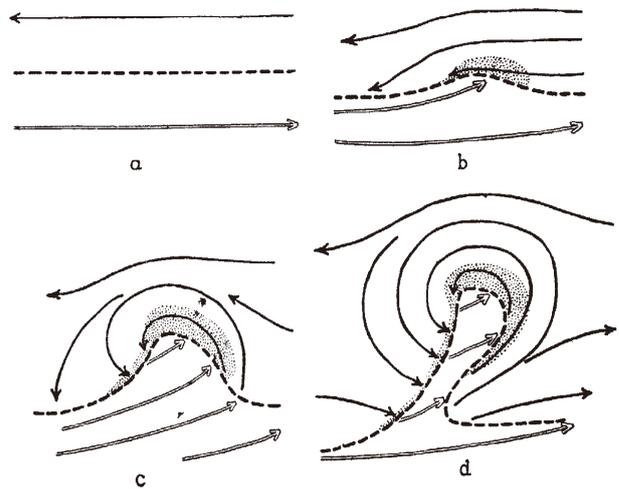


图1 挪威学派提出的气旋生成的模型

斜压不稳定。从本质上说，查尼对斜压不稳定的物理机制解释更加符合实际大气。

具体来说，斜压不稳定的过程是：因为地球是一个球面，所以赤道接收的辐射多、高纬度接收的辐射少，这就形成了经向的温度差，进而导致气流生成经向环流。由于地球的自转，在科氏力的作用下，这种环流逐渐演变成西风 (即平行于气压线的地转风)。西风随垂直方向的切变产生热成风，垂直切变随着温度的增加斜率越来越大，当地转西风切变大到一定程度，就导致了不稳定的产生，这样一个不稳定最大的波长就是气旋的波长。大气的这种不稳定扰动是地球高、低纬度之间热量交换和传递的重要机制。

二、准地转理论证明大气高空的长波是涡旋波

随着高空观测技术的发展，人们开始尝试绘制高空天气图，这为1939年罗斯贝 (Carl-Gustaf Rossby, 1898—1957年) 提出长波理论奠定了基础。罗斯贝长波理论中最重要的一点是地转适应理论，它有两个核心——西风平流和 β 效应 (即 β 随纬度的变化)。

在人类对气象学发展的认识中，非常重要的一点，即大气只要运动，动能就有耗散。20世纪40年代，在罗斯贝之前，人们就已认识到这一点。从理论出发，按现有的大气中的动能，耗散只能维持不到10天，而之所以实际大气能维持是由于太阳辐射造成的

THE FORMATION OF THE SEMIPERMANENT CENTERS OF ACTION IN RELATION TO THE HORIZONTAL SOLENOIDAL FIELD

By Jeou-jiang Jate¹

Institute of Meteorology, Academia Sinica, Nanking
(Manuscript received 15 January 1946)

ABSTRACT

The perturbation of the middle cell of the general circulation in a baroclinic atmosphere is investigated under the assumption of horizontal, divergence-free, isothermal motion. With the introduction of the horizontal solenoidal field the velocity of the trough does not differ very much from that obtained by Rossby, but the existence of a critical wave length, beyond which the perturbation will become unstable, explains to some extent the flow pattern of upper-air motions during weak-circulation weather and also provides a means of explaining how the large-scale mixing process of air masses between different latitudes takes place. It is shown that the assumption of non-divergent flow does not greatly affect the investigation of the disturbance of the horizontal motion. The inclusion of the divergence term in the perturbation equation adds to the frequency equation a term which may affect the magnitude of the critical wave length and the velocity of the disturbance by roughly ten per cent.

The approximate solution of a two-layer system leads to a trough velocity which, in weather of high zonal circulation, is greater than the zonal wind speed in the lower layer and less than the zonal wind speed in the upper layer, a phenomenon often observed in synoptic analysis.

The phase relationship between isobars and isotherms derived here is the same as that obtained by Rossby. The coincidence of the isobars and isotherms in the stationary disturbance eliminates any horizontal solenoidal field and leads to a stationary wave length equivalent to that in an anabotropic atmosphere, namely $L_s = 2\pi\sqrt{U/\beta}$. Here U is the speed of the undisturbed westerly flow and β is the derivative of the Coriolis parameter with respect to horizontal distance northward.

In the consideration of energy transformation an interrelationship between meridional and zonal circulation is established which is in fair accordance with the synoptic and statistical calculations by various authors.

1. Introduction

It was pointed out by J. Bjerknes [2] that, in a large-scale atmospheric disturbance, convergence and divergence must arise even if the wind field is gradient, owing to the increase of Coriolis force with latitude and to the variation of centrifugal force with the curvature of the isobars. From the amount of air transport across a section perpendicular to two consecutive sinusoidal isobars, it was found that the centrifugal force arising from the curved isobars causes the trough to travel eastward but that the variation of Coriolis force with latitude leads to a westward displacement of the perturbation. For perturbations actually observed in the free atmosphere these two effects are of approximately the same magnitude. It follows that long waves must travel westward and short waves eastward. There must be an intermediate wave length for which these two effects balance each other and the corresponding perturbation remains stationary.

¹ Visiting meteorologist in the United States at the invitation of the State Department under the international cultural cooperation program of 1946.

In a study based on the ideas stated above, Rossby [9] has found the stationary wave length for a perturbation of infinite width to be

$$L_s = 2\pi\sqrt{\frac{U}{\beta}}, \quad \beta = \frac{df}{dy}. \quad (1)$$

This follows from the integration of the perturbation equations for a homogeneous, incompressible, non-frictional atmosphere in purely horizontal motion. The result of this investigation, representing a first approximation only, affords a fairly good explanation of the formation and displacement of semipermanent centers of action.

In a later report [8], Rossby has superimposed a sinusoidal meridional disturbance of the form

$$v = v_0 \cos [(2\pi/L)(x - ct)] \quad (2)$$

on the constant zonal motion

$$U = \text{constant} \quad (3)$$

and thus derived the fundamental kinematic and hydrostatic characteristics of such long-wave perturbations by a very simple and ingenious method. The two types of waves he described differ markedly with respect

103

出现了缓变的旋转波（罗斯贝波），一边是地转和静力适应的过程，一边是罗斯贝的缓变的波长。这两个运动一叠加，气流和气压场之间就变成了准地转运动。

三、涡度方程是数值预报成功的基石

1922年，理查森（Lewis Fry Richardson，1881—1953年）用原始方程进行了数值计算（计算的是 $\partial u/\partial t$ 和 $\partial v/\partial t$ ），存在大量值的小差，造成了很大误差，是最终导致其数值预报失败的原因之一。而后来数值预报中的长波是一个涡旋波，是准地转的，由于 β 效应，所以为准无辐散。既然如此，大气500hPa大尺度西风运动就完全可以用流函数、涡度来表示，不需要考虑散度。长波理论揭示出大气高空的长波是一个涡旋波，大气运动是一个准无辐散、准地转的过程，散度方程就成了地转近似，原始方程就成为了涡度方程，而涡度方程里面的时间导数项不是大量的小差，这就是查尼的正压一层模式。正是采用这个模式，数值预报获得了成功。

从用斜压不稳定理论解释气旋波的产生，到罗斯贝的长波理论（长波理论重要基础是准地转理论）推导出大气高空的长波是涡旋波，从而把原始方程变成了正压涡度方程，最终取得了数值预报的成功。这就是极锋理论到长波理论再到数值预报成功这一发展脉络的内在学术联系。

致谢：本文是作者与丑纪范院士交流之后整理而成的，丑先生阅读了本文的初稿，并提出了宝贵的修改意见，特此致谢。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

图2 赵九章先生1946年发表在*Journal of Meteorology*的文章首页，该文第一次提出了行星波斜压不稳定的概念

南北的、海陆的温差。这样一来，大气科学的理论研究就变得非常困难，因为存在两个问题：一是热力的相互作用过程和动能的耗散过程，这是非常复杂的过程，直到现在，物理上对其都没有清晰的认识；另一个问题是，方程是非线性的，存在非线性的纯数学困难。为了突破这个困难，人们在后来的研究中不再研究那么长的时间尺度，改为只研究一天的变化，同时引进了绝热无耗散。假定没有热源也没有耗散，方程就变成了一个闭合的方程组。天气尺度的演变是在行星尺度的背景上的演变。把行星尺度作为已知的基本态对方程组进行线性化，即方程中的非线性项去掉了，平流项、非绝热项也没有了，再假定科氏力 f 是常数，方程组就变成了一个常系数的线性方程组（即地转静力的方程组），是可解的。这样，所研究的大气运动就变成了一个地转适应和静力适应的过程，即不管初始条件如何，气压场、温度场都在变化，最后变成一个定常的状态，这个定常的状态是地转的、静力的。若在这个定常状态上叠加平流项和 β 效应，就

深入阅读

- Bjerknes J, Solberg H. 1922. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geof Publ*, 3(1): 3-18.
- Charney J G. 1947. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *Journal of Meteorology*, 4(5): 135-162.
- Jaw J J(赵九章). 1946. The formation of the semipermanent centers of action in relation to the horizontal solenoidal field. *Journal of Meteorology*, 3: 103-114.
- 钱伟长. 2011. 20世纪中国知名科学家学术成就概览·地学卷. 北京: 科学出版社.

“延伸期预报”主题文献计量指标分析

胡英 李婧华

一、数据来源及统计方法

利用中国知网学术期刊网络出版总库(以下简称CNKI)和ISI Web of Science平台SCI-E数据库,检索统计国内外相关“延伸期预报”主题文献。选取主题检索方式,分别选择主题词“延伸期预报(预测)”、“延伸预报(预测)”、“10~30d”、“月预报”、“低频天气图”、“动力延伸预报”、“MJO预报”、“季节内预报”,以及“extended range forecast*”、“extended* forecast*”、“extended* predict*”、“extended* foreshadow”、“10-30d”、“week-2”、“intraseasonal forecast*”、“month* forecast*”、“month* predict*”进行组配检索式,学科类别限定为大气科学类,数据年限选择所有年,文献类型选择论文和综述,检索命中该领域SCI国际文献364篇(检索日期为2012年12月7日),CNKI国内文献328篇(检索日期为2012年12月5日)。

二、统计结果与分析

1. 论文产出年代分布

国内外有关“延伸期预报”相关研究文献的发表,始建于1960年代后期,SCI-E数据库检索到最早的2篇关于“延伸期预报”主题科技论文分别发表在1969年*BAMS*和*Monthly Weather Review*上。CNKI收录国内最早该领域的3篇主题论文均发表在1966年的《气象学报》上。

图1给出1966—2012年SCI和CNKI数据库相关“延伸期预报”主题文献产出时间分布。从20世纪60年代至80年代后期,SCI收录国际有关“延伸期预报”主题文献甚少,1989—2003年呈现小幅振荡增

国内“延伸期预报”主题文献发表略早于国外,并且国内和国际论文发表活跃周期基本同步。

长,显示国际上该领域研究仍处在徘徊期;从2004年开始整体呈现较快振荡增长趋势,并出现三次明显增长;2004年第一次明显增长,达到21篇,并以后逐年均维持在2位数以上,2008年达到29篇,2011年达到38篇。CNKI数据显示1980—1990年间国内在该领域研究比国际更早进入活跃期,且近20年振荡增长趋势与国际基本同步,国内总发文量(328篇)与SCI国际文献数量(364篇)相差不多。

2. 国家与机构产出和影响力分析

表1统计给出SCI-E“延伸期预报”主题文献产出排名前10国家/地区的总被引次数、篇均被引次数和h指数。发达国家优势明显,值得注意的是,韩国文献数量不大,但其影响远在中国之上,与日本相当。

表2分别列出中国和国际“延

伸期预报”主题文献产出量排序前15个机构。中国产出(CNKI)排名前15的机构中有3个研究所、3个国家级业务单位、3个省级业务单位和6所大学。中国气象局直属机构共发文78篇(占23.8%),兰州、武汉、江苏和上海4个省级气象研究所共发文22篇(占6.7%),上海市气候中心和云南省气象局等16个省级气象业务机构共发文60篇(占18.3%),上述省级机构合计发文82篇(占25%)。

国际排名前15的机构中,排在前三位的均为业务机构。中国科学院、印度热带气象研究所、韩国首尔国立大学和雷丁大学四家机构并列发文9篇,其余7个机构均为美国大学。

3. 论文高产学者和期刊分析

CNKI收录的国内发表相关“延伸期预报”主题文献2篇以上

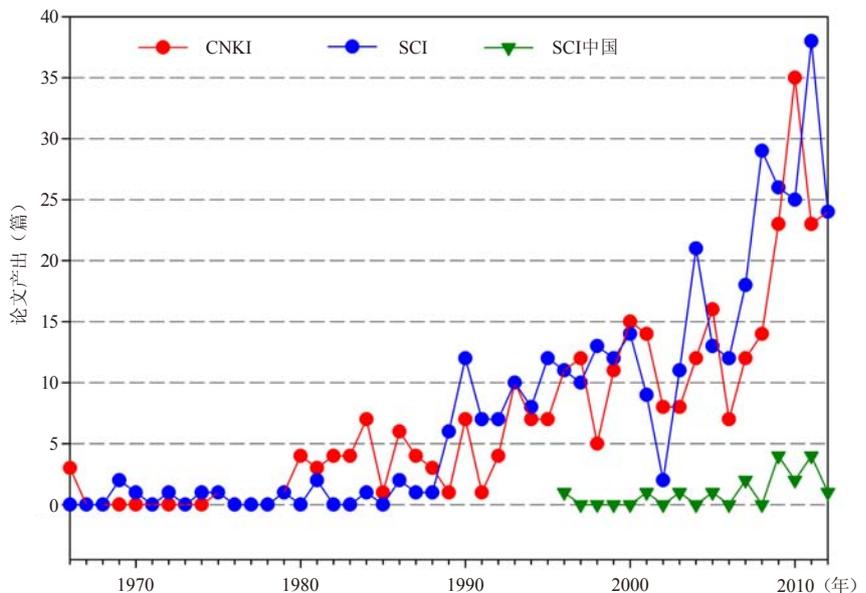


图1 1966—2012年SCI和CNKI“延伸期预报”主题文献年代分布

的作者有38人,国际发表SCI该主题文献2篇以上的作者有157人。表3给出前10位高产作者的排序。最有影响力文章排名见本期榜单(P3、P5)。表4给出国内外刊载“延伸期预报”相关主题文献最多的期刊排名。

三、结果讨论

(1) 国内外有关“延伸期预报”主题文献均始于20世纪60年代后期,国内相关文献发表略早于国外,并且国内和国际论文发表活跃周期基本同步。从文献产出量可以看出,国内外该领域的研究与应用尚处于发展初期,国际上美国和英国在该领域领先优势突出;中国在该领域虽然国内论文产出数量与国际SCI论文数量相差不大,但中国SCI国际论文数量相对较少,国际影响力较欠缺,还应加强该领域的国际合作与交流。

(2) 国内“延伸期预报”主题文献中,中国气象局系统发表3篇以上机构产出合计为160篇,占国内总发文量49%,其中省级机构发文82篇占一半以上,说明省级研究所和业务单位在该领域的科研与业务应用发展很快,并取得可喜成果。南京信息工程大学论文产出成果在大学中最突出,其次是兰州大

表1 国际“延伸期预报”主题文献产出量排名前10的国家/地区影响力(SCI-E)

序号	国家/地区	产出(篇)	总被引次数	篇均被引次数	h指数
1	美国	198	7062	35.67	42
2	英国	66	2218	33.61	24
3	澳大利亚	20	669	33.45	8
4	德国	20	620	31.00	11
5	加拿大	20	480	24.00	12
6	日本	19	481	25.32	9
7	印度	19	166	8.74	7
8	中国	17	93	5.47	4
9	韩国	15	323	21.53	10
10	法国	14	242	17.29	9

注:h指数——一个国家(学者机构)发表某学科的n篇论文中有h篇论文每篇至少被引用了h次,其余(n-h)篇论文每篇的被引次数均小于h。

表2 中国和国际“延伸期预报”主题文献产出量排序前15个机构

CNKI			SCI-E	
序号	机构	产出(篇)	机构	产出(篇)
1	中国科学院大气物理研究所	36	美国国家海洋和大气管理局	53
2	中国气象局国家气候中心	32	欧洲中期天气预报中心	40
3	南京信息工程大学	25	美国国家航空航天局	24
4	中国气象科学研究院	23	加州大学	24
5	中国气象局国家气象信息中心	17	美国国家大气研究中心	21
6	兰州大学	15	科罗拉多大学	16
7	北京大学	11	普林斯顿大学	15
8	中国气象局兰州干旱气象研究所	11	加州理工学院	11
9	上海市气候中心	9	纽约州立大学	11
10	南京大学	8	佛罗里达州立大学	10
11	中国气象局	6	佐治亚理工学院	10
12	解放军理工大学	6	中国科学院	9
13	云南省气象局	5	印度热带气象研究所	9
14	广西气候中心	5	首尔国立大学	9
15	云南大学	5	雷丁大学	9

学和北京大学。从美国高产论文机构排序中大学占了近半数,可以看出,进一步加强局校合作,加强院校科研与业务相结合,是促进科研成果

转化和提升业务创新的有效模式。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

表3 中国和国际“延伸期预报”主题文献高产前10位作者

CNKI			SCI-E		
序号	作者	产出(篇)	序号	作者	产出(篇)
1	李维京	15	1	Vitart F	18
2	陈丽娟	10	2	Palmer T N	14
3	孙国武	9	3	Jones C	12
4	陈伯民	9	4	Hendon H H	9
5	张道民	8	5	Molteni F	9
6	王绍武	7	6	Miyakoda K	8
7	郑庆林	6	7	Alves O	7
8	张培群	6	8	Kang I S	7
9	纪立人	6	9	Waliser D E	7
10	丁一汇	6	10	Wheeler M C	7

表4 中国和国际刊载“延伸期预报”主题文献数量最多的前5种期刊

CNKI			SCI-E	
序号	期刊	载文量(篇)	期刊	载文量(篇)
1	气象	32	<i>Monthly Weather Review</i>	66
2	应用气象学报	28	<i>Journal of Climate</i>	60
3	气象学报	24	<i>Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society</i>	26
4	大气科学	21	<i>Journal of Geophysical Research Atmospheres</i>	25
5	气象科技	19	<i>Climate Dynamics</i>	22

大展宏图正当时

——欧洲中期天气预报中心关于季节预报学术会评介

■ 贾朋群

2012年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)年度学术会议的主题是季节天气预报。在2012年9月3—7日,历时整整一周的会上,分别来自ECMWF和英国(各5人)、美国(4人)、法国(2人)以及巴西、瑞典、印度、WMO、瑞士、日本、韩国和澳大利亚(各1人)的24位报告人,就季节预报的原理以及相关的概率预报、耦合预报等领域的进展做了全面阐述,讨论了季节预报在防灾减灾中的应用。报告人的国别或机构格局,也是面对季节预报这一具有很大挑战性的题目,目前国际上发展态势的一种诠释:即发达国家,特别是数值预报和概率预报领先的国家或机构,在引领更多的国家积极参与。而无论是引领方还是参与方,对季节预报的需求是最根本的推动力量。

本次会议历时5天,每个报告都安排了1个小时的超长发言和研讨时间。与会者都以非常认真的态度,希冀通透地理解每一个报告。会议分为:基本原则(4个报告),可靠性、校准和验证(2个),用处和应用(4个),最新进展(9个)和系统和用户需求(5个)等5个专题,超过1/3的发言围绕新进展展开,凸显了该领域目前受到的重视和利好的发展趋势。

早在公元前300年左右,就出现了包括天气谚语在内的各种和季节天气预报相关的天气传说,人们利用这样的传说,安排时间较长久的劳作和生活内容。这些传说源于人们对自然的观察,其被提炼并流传本身,也是一种补充和验证过程。保留下来的虽仍然是经验性质的,却也揭示了天气作为一种自然现象存在的某种韵律和变化的节奏和规



展望未来10年,ECMWF还将致力于模式分辨率的提高,2015年前全球模式分辨率将达到10km,集合预报达到20km。

律。会上,来自牛津大学的学者,首先介绍了现代天气预报在20世纪初获得的突破,气象预报被纳入科学轨道后季节预报的发展。其中,世界上著名的长期预报专家Namias(Jerome Namias)和加州大学的Davis(Russ E Davis)从20世纪70年代开始的一段科学争议的“双簧”最具有戏剧性和推动意义。

■前者最先提出海气相互作用理念,并将其与气候尺度的预报联系在一起;后者认为那是仅凭直觉得到的,需要严格的验证,并在验证中得到SST(海表温度)在某种程度上是可以预报,但是未来的SLP(海面气压)无法从SST预报得到。

■前者指出,后者用年均值开展的工作无法对季节性进行探索,进而开展预报;后者改进方法后开展新的试验,发现SLP可以部分依据SST提前2~3个月进行预报,例如用7月SST预报秋季SLP、用10月SST预报冬季SLP等。

■前者指出了季节预报要到海上找线索的方向;而后者指出,所有SST和SLP距平都是外来影响的结果,而非它们动力耦合的结果。

■Davis随后建立了统计预报模式,开展季节预报。虽然预报技巧并不高,但是模式能成功预测一些气候事件的发生,充分说明了统计季节预报的价值所在。

两位学者的相互质疑和诊断及预报实践,不仅引导了最早的季节预报活动,也深刻地指出了季节预报是一个非常复杂的问题。Namias甚至将其称为位于预测人类活动之

后的“第二最复杂问题”。解决季节预报问题,线索来自整个星球,特别是热容量比大气层大很多的海洋上。包括ENSO等发生在海上的事件,通过TOGA和CLIVAR等大型科学试验,也逐步被气象学家所认识并利用,特别是从1980年代开始,科学家们逐渐可以预测El Niño等海上事件的发生,为随后的长期天气预报的改进提供了契机。

实际上,不仅海洋,包括大气高层乃至太阳活动等要素,都和大气季节变化密切相关。来自英国气象局哈德莱气候中心的学者,讨论了平流层与对流层交换和太阳活动的影响。借助该中心模式在垂直方向从40 km延伸到85km,从而包括了平流层平流下传信号,让模式在2009—2010年冬季主要海洋信号不好用时,可预报性获得了极大提升(图1),特别是成功地预报出北大西洋偏冷的情形。

来自瑞士的学者,在报告中探讨了陆地过程与季节预报之间的联系,他认为,如果说海洋最主要的作用是热存储的话,那么陆地的主要作用是水存储(图2)。观测表明,在气候干、湿过渡带,土壤湿度影响蒸发,从而对温度和降水产生作用。如果说土壤温度的影响是泛泛的,那么土壤湿度则有记忆性的特征,具有预报的潜力。为此,在气候变率与可预报性研究(CLIVAR)项目中特意设计了GLACE项目(Global Land-Atmosphere Coupling Experiment,全球陆气耦合试验),其目标就是

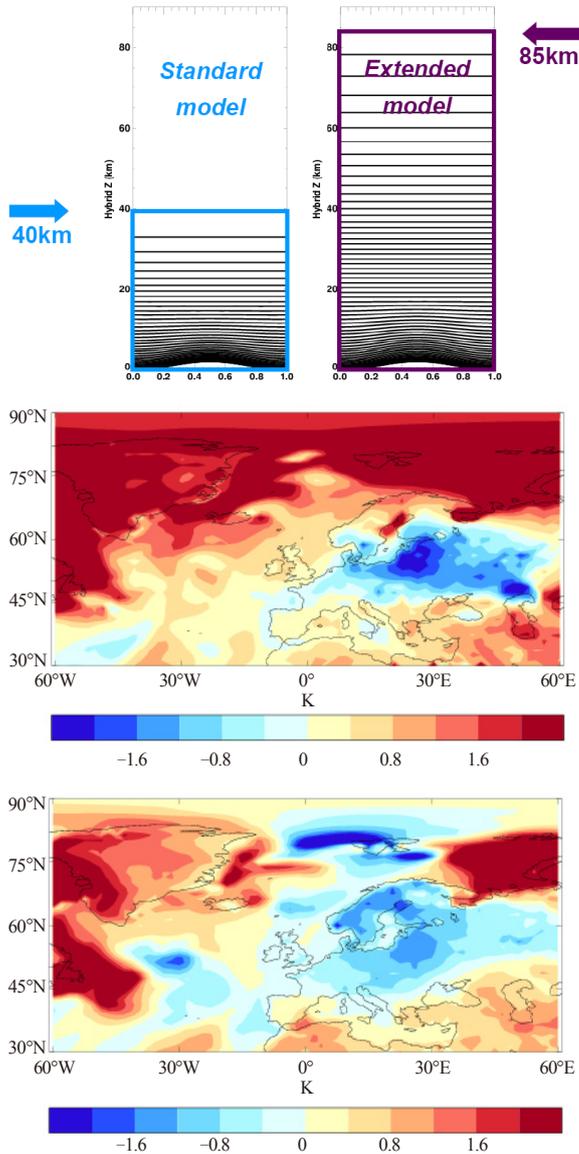


图1 当模式的垂直范围从0~40km扩展到0~85km(上)后,针对2009—2010年冬季原模式(中)和拓展模式(下)给出的不同回溯预报结果

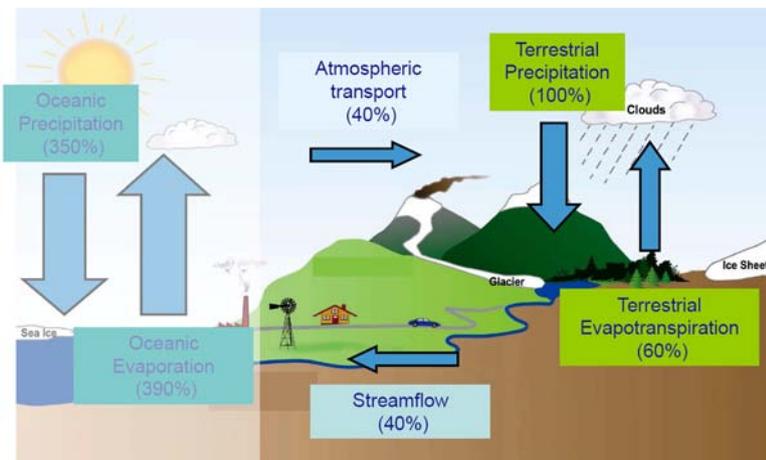


图2 全球陆地和海洋水汽循环示意图

确定在提前1~2个月的预报中,实际陆地表面(土壤湿度)初始条件对预报技巧的贡献有多大。试验表明,在中纬度海洋遥相关较弱的一些区域,提前2个月的温度和降水预报的技巧达到中等,而对温度和极端条件的预报则有最大的提升潜力。更加充分发挥土壤湿度在季节预报中的潜力,最大的挑战还是大多数区域资料覆盖不足导致初始值的质量不高。但无论怎样,科学家们还是对陆地信息在预报中的作用充满信心,特别是土壤湿度(包括地下水)对大气的反馈可能是独立的,其持续性的特征可以用于干旱的早期预警和预报。而土壤湿度的记忆方式,可以用一个通过径流观测校准的简单水平平衡模式进行估计获得,具有很好的可操作性。

来自斯德哥尔摩大学的学者带着“气溶胶是否会影响到季节预报”的问题参加会议,这个问题即是他寻求解决的问题,也是会议高度关注的。在分析了气溶胶影响的各种机理后,该学者梳理了人为气溶胶的主要影响:可能让南亚夏季风减弱;影响沃克环流及相关的降水分布;直接或间接影响热带降水并带来温带波形的改变;可能引起北半球热带加宽。为此,学者设计了交互式气溶胶—气候变化模式并开展更加深入的研究。

纵观整个会议,动力模式预报方面的内容占了绝对优势。正如与会的牛津大学学者在讨论参数化问题时指出的,30年前,当模式分辨率为100km的时候,动力和参数化泾渭分明,目前最好的模式分辨率可以达到10km,二者之间的界限开始模糊,而未来30年内,因为模式的分辨率有望达到1km,动力和参数化之间已经不存在界限。这时候,从数天到季节甚至更长时间的预报,都可以直接用模式做出。但当预报问题全部回归到动力问题的同时,天气和气候预报(模式)不确定性的关键来源,在模式分辨率不断提高的情况下,将主要转移到对反应

大气运动乃至地球环境系统运行机制的数学公式的可计算的表达上，而大气混沌本质和较大气运动本身更复杂的各种耦合过程，无疑需要更多理论上的新突破，期待更多的类似Namias和Davis式的相互质疑和争辩，才可能实现这样根本性的转变。

会议的主办方，ECMWF无疑是目前世界上公认的数值天气预报的引领机构。从名称上看，在其成立之初，就瞄准了较长时间段的预报（图3），即中期（提前2周以上）和长期（即季节）天气预报。这样的定义，实际上跨越了WMO定义的3个预报时间段：中期（3~7d）、延伸期（10~30d）和长期（30d~2a）预报。ECMWF更多用“月预报”的说法替代延伸期预报，而季节预报显然是WMO定义的长期预报中最重要的因素，ECMWF还是世界上12个长期预报全球产品中心之一。目前，ECMWF借助确定预报和业务化达20年的集合预报系统，发布中期、月和季节3个时段的天气预报，前者代表了最好的模式确定性预报技巧和时效的发展轨迹（过去15年，预报时效从不到7d延长到8d以上，图4），而后者则给出了预报的不确定性信息。作为开展长期预报的全球引领机构，展望未来10年，ECMWF还将致力于模式分辨率的提高，2015年前全球模式分辨率将达到10 km，集合预报达到20km。而技术新突破，例如用快速勒让德转化替代目前通用的谱转化技术，模式分辨率更有望达到T7999，即大约2.5km。随着分辨率的大幅度提高，不仅最有效地“消化”了未来大幅度提高的计算能力，转化为预报能力的持续提高。更加重要的是，让大气中和深对流相关的云系统、小尺度山丘地形、土地利用及变化以及海洋波和气象等关键过程，陆续解析进入模式，

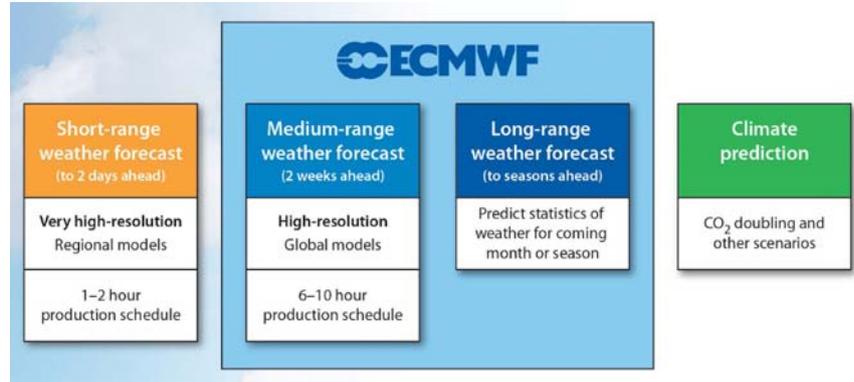


图3 预报时段及ECMWF的主攻领域

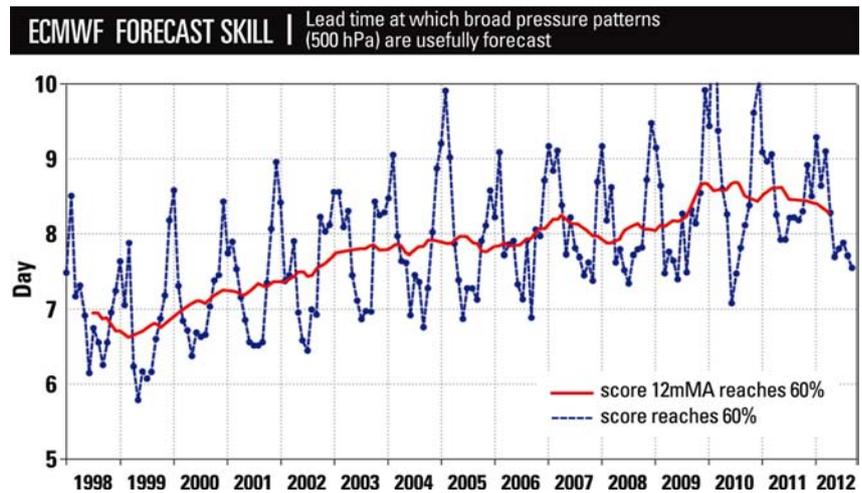


图4 1998年以来ECMWF模式预报技巧的提高带来预报时效的延长
(引自: Kerr R A. Weather forecasts slowly clearing up. Science, 2012, 338 (6108): 734-737)

这无疑会让预报长期过程的季节预报最先和更多地受益。当然，分辨率的进一步提高，也会导致控制方程，即非流体静力学方程组不再适用，而大气混沌本质的显现及其对预报技巧提高的阻挡，也将带来更严峻的挑战。

近年来，ECMWF每年召开的主题年度学术会，都集中在某个关键的学术问题上展开深入的探讨，越来越多地吸引全球一线研究人员的参与和关注。这些学术问题，不仅与模式相关（2011年：大气和海洋数据同化；2008年：物理参数化过程），还涉及到诊断（2009年：预报和数据同化系统的诊断）、观

测（2005年：全球地球系统监测；2007年：卫星观测在NWP中的应用）以及区域（2010年：欧洲和大西洋区域数天到数年可预报性；2006年：极地气象）等方面。主办方还配合年会出版系列主题论文集，都成为教科书式的最新进展权威报告。当年和以往的年会信息，包括文集和会议报告还可以通过网站下载（http://www.ecmwf.int/newsevents/meetings/annual_seminar/index.html），更是成为研究、业务和应用人员了解最新进展的权威平台，具有极高的参考价值。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

怀念陶诗言先生

“陶诗言和顾震潮一起，带领“联心”的同志学习国外的新成果，创造适合我国实际的天气预报方法和有中国特色的研究成果，丰富了我国的天气学理论。

陶诗言1918年8月12日出生于浙江嘉兴，1942年毕业于中央大学地理系。1950—1955年任军委气象局和中国科学院签订成立的联合天气分析预报中心副主任，1956年任中国科学院地球物理研究所研究员，1980—1984年任中国科学院大气物理研究所副所长、代所长，1980年当选为中国科学院学部委员（1994年改称为院士），1986年被选为第21届中国气象学会理事长、2006年被聘为第26届名誉理事长，他是第五届、第六届及第七届全国政协委员。

陶诗言先生是我国现代天气预报理论和方法的开拓者和奠基人之一，他从事大气科学研究工作七十余载，为中国当代天气预报理论和方法的研究做出了杰出的贡献。陶诗言先生不仅重视理论研究，同时也注重天气气候实践，在国家重大建设与国防需求等重要气象保障任务中，做出了具有历史意义的贡献。在他九十高龄的时候，每年还多次应邀到中国气象局、国家海洋局等业务部门参加重大天气事件发生、发展的会商会，并提出指导性的决策意见。

陶诗言出生在一个教师家庭。1938年，19岁的陶诗言离开家乡，只身到重庆，考入中央大学水利系，经过一年的学习，他预计到气象学将是门很有发展前途的学科，于是转到了地理系气象专业学习。在学习中，除了地理系的必修课程外，他还全修物理系的课程。陶诗言1942年毕业，获理学学士学位，并留校任助教。1944年，在涂长望推荐下，陶诗言来到了设在重庆北碚的气象研究所工作，在赵九章先生的指导下开始了科学研究。从此，他与气象事业结下了不解之缘。1949年10月1日中华人民共和国成立，陶诗言进入中国科学院地球物理研究所继续从事气象科学研究工作。1950年时任军委气象局局长的涂长望先生与赵九章所长，共同促成军委气象局和中国科学院签订建立了联合天气分析预报中心（简称“联心”），顾震潮为主任，陶诗言任副主任。1950年底由陶诗言率领中国科学院地球物理研究所气象组大批人员，从南京到北京参加“联心”工作。

陶诗言和顾震潮一起，带领“联心”的同志学习国外的新成果，创造适合我国实际的天气预报方法和有中国特色的研究成果，丰富了我国的天气学理论。他们克



陶诗言（1918—2012年）

服重重困难，领导建立了我国天气分析预报业务，承担了对全国天气预报工作的指导，在建国初期的国防和国民经济建设中起到了积极的作用，尤其在减少灾害性天气给人民生命财产造成损失方面起了重要作用。

陶诗言先生在长期实践和研究工作的基础上，对于影响我国大气的一些重要天气过程和天气系统提出了具有创见性的理论观点和开创了新领域的研究及其应用。概括起来有六个方面。（1）寒潮路径研究。陶诗言把东亚寒潮路径的划分大大地系统化和准确化了。他在寒潮爆发方面的研究，不但提高了寒潮预报的准确率，而且延长了预报时效（3天左右）；

（2）中国梅雨研究。陶诗言指出中国长江流域的梅雨与东亚和北半球大气环流的突变密切相关，尤其同亚洲夏季风的爆发和西风急流北跳的关系更大；（3）东亚大气环流的季节突变研究。陶诗言与叶笃正等研究指出的东亚大气环流季节突变观点，被国内外的大气环流数值试验所证实，并广泛地为国内外学者所引用；（4）开创我国卫星气象学的研究及其应用。陶诗言及其领导的研究组是我国利用气象卫星资料做天气分析和预报的开创者，他们获得的研究成果，自20世纪80年代后期以来，被国内省市级以上的气象台广泛应用；（5）暴雨研究。陶诗言在暴雨方面的研究成果都总结在由他主编的《中国之暴雨》一书中；（6）东亚季风理论与预测方法研究。陶诗言从20世纪50年代后期开始，特别是从1980年代以来，致力于研究东亚季风理论与预测方法研究，尤其是夏季风的活动及其对中国旱涝的影响。

除了科研工作外，陶诗言先生还将很大的精力放在培养青年科技人员方面，几十年来，他培养指导的一批又一批的研究生，活跃在国内外大气科学领域，他推荐的许多优秀的青年科学工作者到国外学习深造，其中有些人学成后回国在大气科学领域发挥着骨干作用。

陶诗言先生刻苦钻研，勤奋工作，严谨治学，为人正直，虚怀若谷，仁爱厚德，淡泊名利，是一位品格高尚的著名科学家。

陶诗言先生永远活在我们的心中！

（文字和图片摘自“深切悼念著名气象学家陶诗言先生”网页）

文摘 (中文文献)

气候变化背景下水资源脆弱性研究与展望——《气候变化研究进展》2012年第8卷第6期

夏军等论述了气候变化背景下水资源脆弱性概念、内涵及其与适应性管理的联系；综述了水资源脆弱性定量评估方法，包括指标权重法、函数及综合指标法等；介绍了减少水资源脆弱性的适应对策研究。分析表明，联系水资源供需矛盾的水资源脆弱性既有自然变化脆弱性的一面，又有气候变化影响导致水资源供需关系发生变化以及旱涝灾害影响加剧水资源脆弱性的问题。关键是要识别影响水资源脆弱性变化的主要调控变量，通过应对气候变化的适应性对策研究，最大限度地减少水资源脆弱性。未来气候变化背景下水资源脆弱性研究，将在进一步发展脆弱性影响与评估基础上，逐步转到适应性水资源管理与对策的研究。

面向气候变化的复杂地球系统建模——《自然杂志》2012年第34卷第3期

地球是开放系统的集合，在现实世界中，任何取自地球的模拟对象皆包含着耗散与回递的因子，所以它们亦是非线性的。非线性方程基本无解，这就是建模与数字化面临的难题。历来来动力学家们普遍相信，只要找出系统的偏微积分方程就能解决问题，但这些方程总会带着一点非线性。解这类公式就像在走迷宫，每走一步后迷宫的墙壁就会重组。这些方程经过电脑化不可避免的简化后，设计师们努力让模拟的结果与现况不至于太离谱。一旦二者差异太大，电脑设计师们就会尽力修正相关的资料库及附加一些子程式。然而最简单的模拟对象也会出现极复杂的现象，

让数百万条电脑程式束手无策。事实上，问题的关键不在于数据的搜罗与积累，而是数字的“本质”。答案也应该是直接根据自然律的代数性建立系统模式，而不是拐弯抹角去寻找方程式。北京大学数字地球工作室的李琦等撰文给出系统的严谨数学定义与其参数，透过自动化模式、线性机械线路、形式语言与其等价的文法规则及混沌系统理论，直接以时空拓扑结构及回递函数、量子方程式与化学反应式之本质，取代偏微积分方程式，以非线性离散数学直接描述所有取自于地球的模拟对象，令数字化模式与模拟对象一致，以解决建模问题，更为科学打开通往数学物理化的门扉，进而从根本上消弭数学与物理间不一致的基础危机。

春季Hadley环流与东亚夏季风环流年际对应关系的多模式预估——《地球物理学报》2012年第55卷第11期

观测事实揭示，春季Hadley环流在年际时间尺度上与东亚夏季风环流和降水具有密切联系。在未来全球变暖背景下，春季Hadley环流与东亚夏季风环流和降水的这种年际关系是否会发生变化？针对该问题，周波涛等在评估的基础上选取五个气候模式，分析了A1B排放情景下春季北半球Hadley环流年际变率的未来变化及其与东亚夏季风环流和降水的年际关系。多模式集合(MME)预估结果表明，在全球变暖背景下，与20世纪末期(1970—1999年)相比，到21世纪末期(2070—2099年)，春季北半球Hadley环流的年际变率强度将减弱，减弱幅度达32%。随着春季Hadley环流年际变率的减弱，其与夏季西太平洋副热带高压和东亚夏季风强度的联系将变弱。MME模拟结果还显示，春季Hadley环流与夏季东亚西风急流和降水的关系也降低，但各单个模式间存在较大差异。

两种可能演变情形下20世纪热盐环流演变特征的重建——《中国科学：地球科学》2012年第42卷第11期

作为气候系统中的重要成员，热盐环流在20世纪的演变特征对于其自身演变规律及其相应气候影响的研究十分关键。研究该问题两种途径(直接观测与间接重建)的结论存在显著差异(减弱与非减弱)，且可信度皆有待进一步提高。程军等基于热盐环流强度改变所引起的最显著气候影响——南北半球间海气界面温度(表面海温及气温)的“翘翘板”现象，在两种可能的演变情形下，由相应的模式试验建立海气界面温度“跷跷板”现象强度与热盐环流强度异常间的统计模型，继而由多个实测海气界面温度资料集对该时期热盐环流的强度异常进行重建。模式试验结果表明，减弱情形下热盐环流的强度异常与“跷跷板”现象的强度之间在10a以上尺度范围内显著相关，非减弱情形下两者在40a以上尺度范围内显著相关。两种情形下的重建结果相一致，同时指出工业革命以来热盐环流的演变经历了“减弱—增强—减弱—增强”4个阶段，且年代以上尺度范围内的变化幅度约1Sv。4个演变阶段的转换时间分别为20世纪10年代中期、20世纪40年代及20世纪70年代中期。结论进一步验证了前人的重建结果，指出该时期热盐环流可能未发生趋势性的减弱，还是以年代际波动为主。

不同分布型La Niña事件及热带大气的响应特征对比——《科学通报》2012年第57卷第34期

袁媛等利用NCEP风场、HadISST海温及PREC降水数据，将1950年以来的14次La Niña事件分为东部型和中部型两类，并进一步研究了两类La Niña事件的海温发展演变特征以及热带大气响应特征的差异。La Niña事件的分类基于的是成熟期标准化

的Niño3和Niño4指数及成熟期海温距平的空间分布特征。在东部型La Niña事件的成熟期,海温负距平绝对值的最大值主要分布在赤道东太平洋,而中部型La Niña事件达到成熟时海温负距平中心向西移动到赤道中太平洋日界线附近。中部型La Niña的强度比东部型强,并且赤道太平洋东西海温差异也较大。受中部型La Niña海温分布特征的影响,赤道东太平洋异常的下沉运动西移到日界线附近,低层异常辐散高层异常辐合的中心也相应西移,热带风场对两种分布类型La Niña的响应差异在对流层高层200hPa表现得更加显著。但是,两类La Niña成熟期热带降水异常的分布特征差异很小,只是中部型La Niña事件导致的赤道太平洋中部降水偏少和赤道东印度洋至西太平洋降水偏多的特征更明显。

大气模式CAM3.1对中国极端气候事件的模拟能力评估——《大气科学》2012年第36卷第6期

周晶等利用NCAR大气模式CAM3.1对中国区域近40年的极端气候事件进行了模拟试验。在此基础上,利用1961—2000年中国区域452站的逐日最高、最低气温和降水资料,从气候平均、年际变化和长期变化趋势等方面全面评估了该模式对中国极端气候事件的模拟能力。结果表明:(1)模式对中国区域极端气候指数气候平均态的大尺度空间分布特征具有一定的模拟能力;模式对极端降水指标空间分布的模拟能力较好,而对极端气温指标的模拟较差;模式对极端气候指标的模拟存在系统性的偏差,模拟的极端降水的系统性偏差要远大于对极端温度的模拟。(2)模式对极端气温指数的年际变化特征具有较

强的模拟能力,而对极端降水指数的年际变化基本没有模拟能力;模式模拟的各极端降水指标的年际变幅与观测存在较大的偏差。(3)模式较好地模拟出了暖夜和暖昼指数在中国大部分区域的增加趋势,但变幅较实测偏小;模式对热浪持续指数长期趋势的模拟则相对略差。模式对极端气温指标长期趋势的模拟能力总体优于对极端降水指标的模拟。模式对极端降水频次和中雨日数长期趋势的模拟尚可,但对持续湿期长期趋势的空间分布模拟较差。研究结果可为该模式用于极端气候的模拟研究提供一定参考。

2012年6—8月T639、EC及JP模式中中期预报性能检验——《气象》2012年第38卷第11期

赵晓琳通过对T639、EC及JP模式中中期时段预报产品的检验,得出以下几点结论。(1)三家模式在120h内500hPa西风指数的趋势预报与实况较为一致,能较准确地反映亚洲中高纬地区大尺度环流的调整和演变,对重大天气过程有较好的预报能力。其中,EC模式预报最接近实况,JP和T639模式次之。(2)对于副高脊线的位置,EC和T639模式都有较好的预报能力,EC、T639模式偏差小,预报与实况更加吻合;而T639模式在个别时间点偏差较大。对于副高西脊点的预报,在6月上旬,相对EC模式,T639模式表现更好;在6月下旬至8月中旬,T639模式对副高的西伸东退预报存在一个系统性偏差,预报较零场整体上偏东。(3)对于850hPa温度预报,EC和T639模式对北方代表格点基本都能预报出温度的转折性变化趋势;EC模式对南方代表格点的温度趋势预报与实况基本一致,对弱的降温过程有一定的预报能力,

T639模式对南方代表格点850hPa温度的预报振幅偏弱。总体来说,EC模式对南、北方850hPa温度预报的整体变化趋势把握较好,模式预报性能更好。(4)三家模式都没有预报出海上的块状副高,对副高主体的预报偏南,台风中心位置均较实况偏东,比较而言,EC模式对形势场和台风中心位置的预报最接近实况。

2003—2005年西北太平洋台风眼生成特征分析——《热带气象学报》2012年第28卷第5期

朱晓金等利用UW/CIMSS的AODT资料和TRMM等卫星反演的每日海温资料,对西北太平洋2003—2005年热带气旋出眼规律及出眼条件进行了分析,包括有热带气旋成眼时的发展阶段、时间分布特征;热带气旋成眼时大尺度环境场条件(海温、垂直风切变)进行了统计研究,结果表明2003—2005年西北太平洋这40个热带气旋绝大多数(90%)在加强阶段开始出眼,只有4个热带气旋在成熟期才开始出眼;近92.5%的热带气旋发展到台风以上级别才开始出眼,也有一小部分的热带气旋在强热带风暴阶段出眼;热带气旋出眼的时间存在日变化,晚上出眼的热带气旋远少于白天出眼的热带气旋。80%的热带气旋出眼时所在位置的海表面温度在28℃以上。65%的热带气旋出眼时的垂直风切变是在6m/s以下,只有4个热带气旋出眼时垂直风切变超过了10m/s。综合以上结果表明只有能够发展为台风或已经发展成为台风的热带气旋才会有眼,且较高的海温和较弱的水平风场垂直切变非常有利于台风眼的形成。

文摘 (英文文献)

基于多源卫星协同数据的全球地表土壤湿度变化趋势——Evaluating global trends (1988–2010) in harmonized multi-satellite surface soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, L18405.

维也纳技术大学的Dorigo等利用一套新的多源卫星数据,评价了1988—2010年间全球地表土壤湿度的变化趋势,发现全球近27%的区域的地表土壤湿度出现了显著的变化($p = 0.05$)。在这些区域中,73%的区域的地表土壤湿度出现了显著下降,27%的区域为显著上升。显著变干的区域主要分布于美国南部、南美中部、欧亚大陆中部、非洲北部、中东地区、蒙古、中国东北、西伯利亚北部和澳大利亚西部。显著变湿的区域主要位于非洲南部和亚北极地区。年内变化分析显示,不同季节的土壤湿度变化趋势并不相同。同其他数据对比发现,这套基于遥感的土壤湿度数据呈现的变化趋势,与GLDAS-Noah和ERA-Interim模拟的土壤湿度、以及GPCP的降水变化趋势具有相当的一致性,而与GIMMS-NDVI变化趋势之间的关系较为复杂。下一步的研究应该更多地关注模式和/或遥感产品在那些不一致区域的潜在不足。

午后降水更可能发生在较干土壤上——Afternoon rain more likely over drier soils. *Nature*, 2012, Vol. 489, No.7416.

土壤湿度和低层大气的温度、湿度之间存在反馈。在发生干旱时,土壤水分的缺乏会使蒸散受到限制,导致低层大气更干和更暖,从而影响对流的发展。但由于观测的缺乏和大尺度模式的不确定性,导致目前无法确定全球范围内土壤湿度是如何影响对流的。英国自然

环境研究委员会(NERC)生态和水文中心的Taylor等使用基于遥感的全球土壤湿度和降水数据,分析了二者之间的关系。研究发现,全球范围内,午后降水更容易出现在那些土壤相对较干(同周边区域相比)的区域。这种特征在半干旱区域特别明显,那些区域的地表通量对土壤湿度尤为敏感,对流性天气事件频繁出现。从机制上分析,该研究结果与干土壤上增加的感热通量导致水汽对流加强这种过程相一致。本研究没有发现在50~100km的空间尺度上降水更易出现在湿土壤上。相比,研究发现,在六个月目前最新的全球天气和气候模式(HadGEM2, CNRM-CM5, MRI-AGCM3-2H, INMCM4, MERRA, ERA-Interim)中,土壤湿度对模拟降水存在正反馈,这可能导致大尺度模式模拟的干旱会偏多。

过去60年全球干旱情况几乎没有变化——Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 2012, Vol. 491, No.7424.

以往研究指出,在20世纪末期至21世纪初的这段时间内,干旱加重现象在全球范围内可能已经普遍出现。特别是基于Palmer干旱指数(PDSI)的分析显示,自1970s以来,全球土壤湿度出现了下降,相对应的是干旱区域有所增加,出现这种情形的部分原因可归结于全球变暖。然而,普林斯顿大学的Sheffield等研究发现,由于PDSI中的潜在蒸散源于Thornthwaite方法,而这种方法认为潜在蒸散仅响应于温度的变化,在全球变暖背景下,这种简化的方法使得全球干旱的加重趋势被高估。进而,研究使用与实际情况更为接近的Penman-Monteith方法来估计蒸散,发现过去60年间,全球干旱状况基本没有发生变化。这个结果有助于理解全球变暖对水循环的影响,以及解释为什么基于树轮数据的古气候干旱重建和基于PDSI的干旱记录出现了分歧。

中国鄱阳湖区域严重洪水事件的水文气候分析——Hydroclimate analysis of severe floods in China's Poyang Lake region. *Earth Interactions*, 2012, Vol. 16, No. 14.

鄱阳湖是中国最大的淡水湖泊,在过去的几十年里,由于蓄洪区堤防建设,减少了洪水可利用的存储区,使得年最高湖水位与严重洪水事件的数量有所增加。自1950年以来,最严重的洪水发生在1954, 1973, 1983, 1995年和1998年。阿拉巴马大学的Shankman等研究发现,每一次这样的洪水,都伴随着影响亚洲季风和长江流域降水有直接联系的厄尔尼诺事件。在20世纪90年代以前,1954年的洪水是有记录以来规模最大的一次,那年的洪峰峰值在湖口站为21.6m,比之前的纪录高了1.6m以上。而在1998年的长江大洪水期间,尽管洪峰流量低于1954年,但洪峰峰值达到了22.5m。研究认为,最严重的洪涝灾害,包括发生在1954年和1998年的洪水,一般出现在两个条件下:1)高降水量和流入鄱阳湖的高的支流流量,2)长江湖口段的高流量和高水位,使洪水逆流入鄱阳湖或者减缓鄱阳湖的泄水能力。

灌溉对全球气候及印度夏季风开始时间的影响——Global effect of irrigation and its impact on the onset of the Indian summer monsoon. *Climate Dynamics*, 2012, Vol. 39, No. 6.

巴黎第六大学的Guimberteau等将陆面模式ORCHIDEE与GCM LMDZ4耦合,在全球尺度上模拟了灌溉对气候的影响,模拟时间为30年。模拟发现,灌溉考虑与否,对全球陆地区域气候的平均影响并不存在明显差异,但一些主要河流灌溉流域的水文变量受到了灌溉的显著影响。在密西西比河流域较为干旱的西部,随着灌溉引起的蒸散的加强,夏季降水出现了增长;而在湿润的东部,由于灌溉引起低层大气变冷,导致大气更为稳定、对流

被抑制, 夏季降水出现了下降。在印度半岛, 冬春季节灌溉强烈, 灌溉活跃时, 季风开始期平均延迟了6天, 导致5—7月的降水显著减少; 作物在6月具有最大的水需求, 也加剧了该区域的水缺乏; 灌溉活跃期陆面出现了显著的变冷, 导致了6月海陆热差异的下降, 从而使季风开始前期延迟。

美国大平原灌溉的大气响应模拟. Part I: 对降水和能量收支的影响——Modeling the atmospheric Response to irrigation in the Great Plains. Part I: General impacts on precipitation and the energy budget. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, Vol. 13, No. 6.

自第二次世界大战以来, 由于美国大平原灌溉面积的扩大, 导致Ogallala含水层的地下水位出现了显著的下降, 威胁到了该区域的长期可持续发展。研究已发现地表灌溉改变了潜热和感热的分配, 对地表水分和能量收支产生了影响。明显增加的潜热驱动了近表层的变冷和湿度的增加, 从而抑制了对流性降水。明尼苏达大学的Harding等使用WRF模式模拟了灌溉对降水的影响。研究使用基于卫星的灌溉数据集, 将地表划分为灌溉和非灌溉网格单元, 认为灌溉网格近地表土层的水分是饱和的。模拟时段包括九个4—10月的时段(其中, 三个为干旱年, 三个为正常年, 三个为多雨年)。模拟发现, 5—9月的降水平均增加了4.97 mm (0.91%), 局地的增长甚至达到了20%。由于夜间对流的增加, 灌溉区域的降水增加了7.86mm (1.61%)。最大的降水增加出现在多雨年(6.14mm, 0.98%), 最小的降水增加出现在干旱年(2.85mm, 0.63%)。灌溉区域显著的降水增加发生在正常年和多雨年, 而降低发生在干旱年。这表明在灌溉区域可能存在一个土壤水分阈值, 当土壤水分极低时, 灌溉抑制了对流, 而当先前的土壤水分相对较高时, 灌溉可加强对流。

美国大平原灌溉的大气响应模拟Part II: 灌溉引起的降水和降水再循环的改变——Modeling the Atmospheric response to irrigation in the Great Plains. Part II: The precipitation of irrigated water and changes in precipitation recycling. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, Vol. 13, No. 6.

明尼苏达大学的Harding等使用WRF模式在次网格尺度上模拟了灌溉对降水的影响。在该研究的Part II部分, 他们使用后向轨迹分析方法, 探讨了哪些灌溉区域的蒸散转化成了降水(即灌溉引起的降水), 以及灌溉如何影响降水再循环。分析发现, 在5—9月, 九个模拟时段平均只有15.8%的灌溉区蒸散量转化为降水返回至大平原。但就不同来源降水的变化来看, 再循环降水(定义为源于某区域蒸散发, 并转化成降水返回至同一区域的降水部分)增加了6.71mm, 灌溉引起的降水增加为5.11mm, 而平均总降水增加了4.97mm。再循环降水的增加大于总降水增加, 说明非循环降水有所减少, 这暗示灌溉减少了水汽向该区域的平流输送。其中, 内布拉斯加北部到中部观测到的降水增加最为剧烈, 这与灌溉引起的强烈蒸散有关。然而, 总体上, 蒸散引起的水损失远大于灌溉引起的降水和再循环降水的增加, 证明灌溉导致了大平原的水的净损失。

区分气候和CO₂变化对中国粮食产量的相对贡献——Untangling relative contributions of recent climate and CO₂ trends to national cereal production in China. *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 4.

中国农科院农业环境与可持续发展的熊伟等使用气候观测数据和CO₂强迫的不同组合作为输入, 基于CERES-Rice, CERES-Wheat等系列作物模型模拟了1961—2000年间中国粮食作物的产量, 以寻找不同气候变量和CO₂浓度增加对作物产量的相对贡献。研究表明, 1961—2000

年间, 在CO₂浓度增加以及温度、辐射、降水三种气候变量的共同强迫下, 作物产量呈现出轻微但并不显著的变化(-0.9%); 不考虑CO₂浓度增加时, 气温、降水和辐射变化会导致作物产量下降8.6%。改变其中任一气候变量, 其他变量维持在1961年水平的情形下: 温度上升对作物产量几乎没有影响(0.01%), 降水使产量下降了1.2%, 辐射变化使产量下降了7.0%。模拟结果暗示, 过去50年中国粮食产量增加主要依靠技术进步, 气候变化对粮食产量为负面影响, CO₂浓度增加减缓了气候变化对粮食产量的负面影响。由气溶胶浓度以及其他大气污染物增加导致的辐射减少, 对中国粮食生产的影响比气候变暖更为显著。

区域气象和气候模拟中次网格尺度云—辐射反馈的引入——Introducing subgrid-scale cloud feedbacks to radiation for regional meteorological and climate modeling. *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, L24808.

对流系统、云以及云反馈过程直接影响了区域和局地的大气辐射收支。然而, 在区域天气和气候模式中, 许多次网格尺度的对流参数化方案并未考虑积云对辐射的反馈, 导致一些气象参数存在偏差。美国环境保护署的Alapaty等将关键的反馈过程融入到WRF模式的一个对流参数化和一个辐射方案中, 评价了包含这个过程后模式对短期天气和多年气候的模拟效果。次网格尺度对流云—辐射反馈的引入, 使得对向下地表短波辐射衰减的模拟更加切合实际。减少的地表短波辐射减缓了对流的地表强迫, 从而明显减少了降水的模拟偏差。研究认为, 在区域气象/气候和空气质量模式中, 需要更深入地考虑次网格尺度上云对辐射、光解作用、气溶胶间接效应的影响。

《气象科技进展》2012年主要内容回顾

张建云, 等: 用频域滤波和双PRF技术提高新一代天气雷达数据质量
 孙国武, 等: 大气低频振荡在延伸期预报中的应用进展
 温娜, 等: GEFA海气相互作用估计方法研究进展
 杨萍, 等: 城市热岛效应的研究进展
 魏敏, 等: “天河一号”系列超级计算机系统气象领域适用性分析
 张爱英, 等: 相似高度在北京市道面结冰预报中的初步应用
 邹晓蕾: 气候变化趋势计算及其对观测精度的敏感性
 孙健, 等: 网络气象服务分析与展望
 沈文海: 网格计算在气象高性能计算领域的应用前景探讨

陈功, 等: 近20年来青藏高原低涡的研究进展
 胡永红, 等: 陆气相互作用中普通双源模型与ALEXI模型比较
 马雁军, 等: 辽宁中部城市群大气环境研究进展
 齐丹, 等: 2009年7月珠江流域暴雨致洪成因分析
 韩佳芮, 等: 面向用户的未来天气气候预报系统
 邹晓蕾: 极轨气象卫星微波温度探测仪资料的分辨率
 李汀, 等: 云南地区2011年雨季结束期(10—11月)降水延伸期预报试验
 彭启明, 等: 防灾事业产业化之发展策略——以台湾气象产业为例
 沈文海: 从云计算看气象部门未来的信息化趋势

陶祖钰, 等: 天气预报的理论基础——准地转理论概要及其业务应用
 任福民, 等: 近30年ENSO研究进展回顾
 王绍武: 月平均大气环流与短期气候预测
 李莹, 等: 2011年华西秋雨特征及其成因分析
 杨霏云, 等: 作物模型、遥感和地理信息系统在国外农业气象服务中的应用进展及启示
 姚秀萍, 等: 气象服务效益评估研究和业务进展
 邹晓蕾: 极轨气象卫星微波成像仪资料
 冀文彬, 等: 一种基于复杂网络社团的CDN性能优化模型
 张菊芳, 等: 中美气象灾害题材影片的对比如分析



第2卷第1期



第2卷第2期



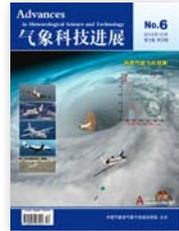
第2卷第3期



第2卷第4期



第2卷第5期
(现代天气业务 专辑)



第2卷第6期

张鹏, 等: 风云三号卫星的定量遥感应用能力
 董海萍, 等: 冷空气强度对云南初夏强降雨天气的影响
 王林, 等: 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征
 陈艳: 副热带西风急流对云南雨季开始的影响
 宋燕, 等: 华北地区4月降水异常的环流特征及其与海温异常的联系
 侯美亭, 等: 中国东部植被物候变化及其对气候的响应
 吴星霖, 等: 热带季节内振荡对滇东北一次罕见冰冻雨雪天气的影响
 彭贵芬, 等: 2009—2010年云南特大干旱动态风险分析
 沈文海: 向气象数据中心演进

端义宏, 等: 我国现代天气业务现状及发展趋势
 赵声蓉, 等: 我国精细化客观气象要素预报进展
 毛冬艳: 我国强对流天气监测和预报业务
 宗志平, 等: 定量降水预报技术研究进展
 钱传海, 等: 我国台风业务现状及其关键技术
 钱维宏: 瞬变涡扰动法在极端天气事件预报中的应用
 邹晓蕾: GPS无线电掩星资料特点
 王刚, 等: 广州白云机场一次秋季大暴雨成因及上游对流的触发机制
 张萌, 等: “天气业务”主题文献计量学指标分析
 周建华, 等: 现代民航气象业务进展
 周庆亮: 美国“强对流预报哲学与技术思维方法”简述
 王亚光, 等: 气象科研成果应用效益评估指标设计与试验初探
 周琰, 等: 国家级气象园区骨干网络的规范化调整

钱传海, 等: 国际热带气旋飞机观测综述
 尹尽勇, 等: 我国海洋气象预报业务现状与发展
 刘春霞, 等: 热带海气边界层观测研究若干进展
 郑彬, 等: 南海夏季风监测预测研究与业务现状评述
 邓涛, 等: 珠三角灰霾数值预报模式与业务运行评估
 李国栋, 等: 全球变暖和城市化背景下的城市热岛效应
 陈国森, 等: 大气Rossby长波理论的建立和发展
 周京平, 等: 中国古代天文气象风向仪器: 相风鸟——起源、文化历史及哲学思想探析
 王春玲, 等: 气象条件对冬小麦生长发育和产量影响的研究进展

《自然》杂志 2012年11月29日

配合多哈会议的召开，本期杂志瞄准后《京都议定书》时代，盘点取得的成果，梳理人类减排行动和气候变化状况。

《京都议定书》中，37个工业化国家和欧盟承诺到2012年底将温室气体排放量相对于1990年降低5%，那么，2012年即将成为过去的时候，排放情况怎样，更重要的是2012年以后采取什么更加有力的行动，本期用4篇特写文章和2篇评述文章，帮助读者一起进行了深入探讨。



《降温：为什么必须避免 4℃变暖》 2012年11月

为了呼吁人们采取行动，世界银行发表了这篇报告。报告解读了如果世界升温达到4℃会产生什么样的后果，而这样的温度升幅，就是科学家们预测得到的如果没有严厉的政策改变，21世纪前地球达到的升温幅度。这样的升温无疑是毁灭性的，除了已知的灾害和分析，更重要的是还有很高的不确定性和新的风险。报告分7章，分别介绍观测的气候变化和影响、21世纪预测、海平面变化、极端气温、行业影响和风险评估等内容。

《标准化降水指数用户指南》 2012年

世界气象组织以1090号出版物的形式发表的这个指南，主要针对的是近年来很多关于干旱指数及其应用的讨论，而这份指南的出版，也受益于2009年召开的区域间干旱指数和早期预警学术会议。会上来自全球22个国家的54位专家给出了不同地区使用的各种干旱指数，提出了标准化降水指数（SPI），建议各国气象水文部门应用。在2011年6月第十六届世界气象大会上，SPI被采用。这本指南的发表，无疑会推进全球SPI的应用，用SPI衡量的各区域干旱状况，也将具有更好的可比性。



《科学世界》 2012年12月

南水北调成为这期的主题。国务院南水北调工程建设委员会办公室、中国大坝协会等机构策划的这一主题，用大众化的语言解释了中国南方水多，北方水少的事实。特别是黄淮海流域城市众多，人口、耕地、工业均占全国1/3，而水资源仅占7.2%，水资源供求矛盾日益突出。既然南方水资源较丰富，何不借一点水来解决北方极度缺水的困境。南水北调，让珍贵的水资源穿越众多河流山川，构成迄今为止世界上规模最大的调水工程。中国的南水北调工程，整体上分为东线、中线、西线三条线路，横穿长江、淮河、黄河等河流，终成我国版图图上“四横三纵”的水网。

媒体扫描

MEDIA SCAN

《新科学家》 2012年11月

气候变化再次成为这本科普杂志封面内容，本期编辑语的题目就很直白：奥巴马应该履行他在2008年的承诺。杂志编辑认为，气候变化不应该成为抛给未来的挑战，正在发生的全球变暖引起的极端事件比我们想像的要来得早，现在是当选总统采取行动的时候了。本期围绕“气候降级”主题，系列特写文章描述了北极变暖、极端天气、食品生产、海面上升、行星反馈、人类排放和热压力等气候变化带来的诸多问题的全景。

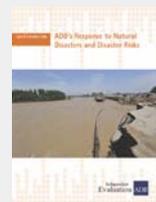
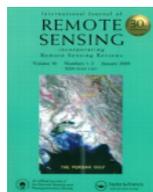


《地球艺术》 2012年

进入卫星时代，让人类用“天眼”看世界的愿望成真。NASA出版的这本图册，收集了陆地卫星等5颗卫星拍摄的地球各地75幅图像，真实见证和记录了地球之美。其中来自中国疆界的2幅图像，分别是新疆冲积平原和艾丁湖附近的景观。整个图集最迷人的是地球高山、海洋、冰川等要素之绚丽的色彩和奔放的形状。

《国际遥感杂志》 2012年23期

本期杂志为专辑，主题是泛海洋遥感：将区域影响和全球环境变化联系到一起。专辑收录的18篇论文，是2010年10月在中国台湾召开的第十届双年泛海洋遥感会议（PORSEC）交流的部分论文。PORSEC自1992年以来每二年召开一次学术会议并开展相应的培训课程，旨在深入认识地球环境过程。会议专注于卫星遥感技术这一独特视角，试图在保护环境和大气、促进可持续发展方面获得科学的启示。会议期间，台风梅姬正在靠近台湾（封面图），更加鲜活地诠释了区域变化和全球环境之间的动态联系。



《ADB应对自然灾害和灾害风险》 2012年10月

世界上每5个快速发展的城市就有4个位于亚洲，过去20年世界上灾害造成的损失有一半也来自该区域。为此，亚洲开发银行（ADB）发表了这份独立的评估研究报告，用7个章节梳理了亚太地区的自然灾害、灾害管理、灾害项目和技术支持、灾后恢复行动的评估、防灾业务评估和政策实施评估等内容，并对未来的发展提出了建议。报告还指出，防灾和灾后恢复分别占投入的 $\frac{1}{3}$ 和 $\frac{2}{3}$ ，但每在防灾上投入1块钱，可以在灾后恢复中至少节省4块钱。

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

Honorary Editor Chou Jifan

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng

Associate Editors

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

Managing Editors

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

Editors

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

Overseas Editors

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

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Hu Ying, Chen Zhongmei

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

Printed by

Beijing Baochang Color Printing Limited Corporation

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

Main Contents

(Special Issue: Extended-Range Forecast)

Message from the Editor-in-Chief

Article

- 6 Sun Guowu et al/ Exploration of the Low-Frequency Synoptic Map for Extended-Range Forecast
11 He Jinhai et al/ Consideration on Extended-Range Forecast and Its Application Study
18 Kang Zhiming et al/ Current Situation and Development of Medium-Range and Extended-Range Weather Forecast in China
25 Zheng Zhihai/ Review of the Progress of Dynamical Extended-Range Forecasting Studies
31 Liang Ping et al/ Application of MJO in Extended-Range Forecast
39 Gao Jianyun et al/ Analysis of Low-Frequency Features on Typical Persistent Heavy Rainfall during Pre-flood Season in Fujian Province in 2010
46 Chen Bomin et al/ Monthly Anomaly and Weather Process Forecast System and Its Application
52 Xin Fei et al/ The Empirical Orthogonal Function for the Predicting Method on the Low-Frequency Synoptic Weather Map
57 Qi Minghui et al/ Extended-Range Forecast of the Beginning of the Rainy Season in Yunnan by Studying the MJO Action Regularity
64 Hu Chunli et al/ Precipitation Forecast from 10-20 Days by the Method of the Low-Frequency Synoptic Weather Map in Liaoning Province

Forum

- 68 Zhong Qi et al/ On the Development of and Their Internal Relations between the Polar Front Theory, Long-Wave Theory and NWP

Reading

Meeting Review

- 72 Jia Pengqun / On ECMWF 2012 Annual Seminar on Seasonal Prediction

Information

- 63 New Publication
76 Selected Papers

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

- 70 Hu Ying et al/ Bibliometric Analyses on the Papers Related with Extended-Range Forecast

History

People

- 75 Remembering Tao Shiyan