

10~30 d 延伸期天气预报研究进展综述

马浩¹, 毛燕军¹, 雷媛¹, 樊高峰¹, 蒋薇²

(1. 浙江省气候中心, 浙江 杭州 310017; 2. 江苏省气候中心, 江苏 南京 210008)

摘要:开展10~30 d延伸期天气预报对于气象防灾减灾具有重要意义,也是填补短中期天气预报和短期气候预测之间的时间缝隙、构建完备性预报体系的必然要求。本文从延伸期天气预报的预报对象、基本方法和相关原理以及国内外业务实践3方面回顾了延伸期预报的科学进展和业务现状,从数值方法、大气低频信号演变方法和数理统计方法3个角度比较分析了延伸期预报的各种主流方法,详细探讨了各种方法的优势和不足,在此基础上对目前延伸期预报领域存在的问题进行了梳理和总结。

关键词:延伸期天气预报;可预报分量;MJO;低频天气图;天气过程

中图分类号:P45

文献标识码:A

引言

延伸期天气预报是指10~30 d时间范围内的天气预报。现阶段,我国气象部门的预报预测业务按时间尺度可以划分为1~3 h的短临预报、1~3 d的短期天气预报、4~10 d的中期天气预报、10~30 d的延伸期天气预报和月尺度以上的短期气候预测^[1]。在各种尺度的预报预测中,延伸期天气预报具有重要而特殊的意义。

首先,延伸期预报对于气象防灾减灾至关重要。近年来,随着我国国民经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,政府和公众对气象服务的要求越来越高,与之形成鲜明对比的,是频发的高影响天气事件导致的气象灾害越来越重^[2-4]。2008年我国南方地区的持续低温雨雪冰冻天气、2009年2月长江中下游地区的持续阴雨天气、2010年春季我国西南地区的持续干旱、2011年6月长江中下游地区的旱涝急转等,影响范围广、灾害程度重、持续时间长,使人民生命财产遭受巨大损失^[5-6]。然而令人遗憾的是,虽然气象部门比较准确地预报了持续性异常天气事件的每一次过程,但限于当前天气预报的技术水平,我们对一周以后的天气还难以作出肯定的

预报,也不能对天气的持续性及其衍生的气象灾害作出精准的估计。如何对持续性异常天气事件作出较为准确的预报,是横亘在气象部门面前的一大难题。这一难题的解决,需要我们深入研究延伸期天气预报的机理和方法。

其次,从气象预报的完备性来说,我国很早就建立了1~3 d和4~10 d的短中期天气预报体系,自1980年代开始逐步建立短期气候预测体系,而10~30 d之间的延伸期预报,则一直是业务预报中的缺口和空白。从构建“无缝隙预报”的全局观点出发,也需要不失时机地开展延伸期天气预报,从而使整个预报预测体系结构完整、不留“盲点”。

1 延伸期天气预报的预报对象

关于延伸期预报的预报对象,这似乎是一个“不是问题”的问题,然而其中大有学问,因此我们一开始首先讨论这一问题。顾名思义,延伸期天气预报,预报对象应当是未来10~30 d的天气状况,这一点毋庸置疑。然而问题在于,延伸期预报是像短中期天气预报那样,对天气进行逐日预报,还是预报其它内容?

收稿日期:2012-07-13;改回日期:2012-08-05

基金项目:中国气象局现代气候业务发展与改革试点项目“月内重要过程趋势预测业务系统”、浙江省气象局一般项目“浙江省10~30天天气气候展望预测技术研究”(2008TG05)、浙江省科技厅面上项目“浙江省气象灾害评估及风险区划技术研究”(2009C33053)共同资助

作者简介:马浩(1984-),男,安徽省合肥市人,理学博士,工程师,主要从事短期气候预测和海洋-大气相互作用研究。E-mail: ma-hao20032003@yahoo.com.cn

逐日预报面临的困难是显而易见的,因为按照大气可预报性理论^[7],逐日天气可预报时效的理论上限一般为2周^[8-9],超过理论上限的预报水平不优于随机猜测水平,即失去可预报性。大气可预报性的存在依据,是初始预报误差在达到理论上限之后急剧增长,从而使真实气象信息被误差信息所淹没。由于地球大气是一个非线性系统,混沌效应始终存在^[7],故初始误差的不断积累与放大也始终存在,由此看来,在延伸期尺度上进行全局气象要素的逐日预报似乎是不可能的。然而,丑纪范等指出^[10],可以通过数学物理方法将大气变量分解为可预报分量和混沌分量、在延伸期尺度上针对可预报分量开展逐日预报,这一新颖的思路为逐日预报带来了希望。

除此之外,另一种观点认为,既然逐日预报困难重重,不如放弃这一途径,将天气过程作为延伸期天气预报的预报对象。这一观点抓住了延伸期预报的核心问题,即持续性异常天气事件(特别是极端天气事件),只要能预测出延伸期时段内的主要异常天气过程(如强降水),则认为延伸期预报取得了成功。这种思路既切合延伸期预报的实际需求,也化解了逐日预报面临的困难,有着广阔的发展前景。

此外,还有一种观点,也认同逐日预报的困难,提出延伸期尺度的预报对象应当是延伸期时间段内的要素平均值(如平均气温和平均降水量)^[1]。这一观点将原有问题大大简化,就预报内容而言向短期气候预测靠拢,在实际业务中易于实现,且预测结果的可信度有一定保证,但问题是,这种做法是否偏离了延伸期预报的“题中应有之义”?即:得到的预测结果是否具有很强的针对性?能否有效地指导气象防灾减灾?值得学术界进一步深入探讨。

2 延伸期天气预报的基本方法和相关原理

对延伸期预报的预报对象的理解决定了开展预报的思路和方法。总体而言,延伸期天气预报的基本方法有动力模式、大气低频信号演变、数理统计3个角度。

2.1 利用数值预报产品的延伸期预报方法

若立足于进行逐日或时间段平均气象要素的预报,则数值模式成为主要的预报工具,如何科学合理地运用数值方法实现延伸期预报是需要解决的核心科学问题,主要的预报方法有集合预报法、可预报分

量提取法、动力和统计结合法3种。

2.1.1 集合预报法

集合预报方法在气象学研究中由来已久,其核心思想是,选取一定数量的初始场,在相同的控制条件下向前积分,预报场的平均值高于单个模式的预报期限^[11]。Epstein 首先提出了应用集合预报方法来弥补数值天气预报时效不足的思想^[12]。为减小由于资料误差、模式误差和大气系统的非线性特征引起的数值预报的不确定性,根据误差的概率分布生成的初值数据,制作出预报集合,称之为集合预报方法,它与传统的数值预报的最大不同在于初值不是“一个”,而是满足某一误差分布概率的数据集,因此预报结果也是“一组”数据的集合^[1]。金荣花等认为^[1],从数值预报的角度来看,延伸期预报水平的提高主要取决于模式预报时效的延长。Miyakoda 等率先利用数值模式成功预报了未来10~30 d的阻塞高压,这一工作被看作是延伸期数值预报的开端^[13]。然而丑纪范指出^[14],数值模式的预报技巧主要取决于前10 d,10 d之后预报技巧迅速下降^[15];近年来,尽管数值模式的预报能力大大增强,但10 d以上的预报效果几乎没有改进^[14]。因此,延长数值模式的预报时效还有很长的路要走,现阶段用集合预报法来制作延伸期天气预报仍然面临很大的困难。

2.1.2 可预报分量提取法

如前所述,尽管逐日天气可预报时效的理论上限为2周左右,然而这并不意味着时间尺度超过逐日天气预报理论上限的大气运动没有可预报的分量^[16]。观测和理论研究表明,在10~30 d的时间尺度,客观存在可预报的分量^[17-19]。对初始误差的敏感性体现了大气的混沌特征,从数值模式的逐日输出结果出发,可以运用数学物理方法将模式结果分解为对初值不敏感的可预报分量和对初值敏感的不可预报分量(即混沌分量)(具体方法可参见文献^[10]),并在此基础上构建针对可预报分量的数值预报模式。丑纪范等的研究表明^[10],可预报分量模式的构建可以在原数值模式基础上运用变分同化方法得到,而无需构建新的模式,从而使问题大为简化。同时,可预报分量模式也会不可避免地存在预报误差,针对这一问题,丑纪范等^[20-21]提出了一种运用历史数据改进模式预报结果的新颖思路,改变数值预报的提法,将微分方程的初值问题转化为求解微分方程的反问题,在实际应用中取得了良好的

效果^[22-23]。

2.1.3 动力和统计结合法

动力和统计结合法的实质是将统计方法用于动力模式结果的分析,旨在通过合理可行的模式产品解释应用,对未来天气进行延伸预报;或者以模式预报结果为平台,结合历史规律进行相似映证,预测延伸期内的天气系统演变过程。总体而言,动力和统计结合法对模式预报结果的精度有着较高的要求。

徐光洁^[24]早在1994年就提出可以利用欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECWMF)的数值预报产品开展春季延伸期预报,主要思路如下:首先利用春季各主要天气指标群建立适当的相关区,再结合ECWMF每天发布的24~144 h的500 hPa位势高度场预报,比照历史资料进行相似过滤,从而建立春季延伸期主要天气过程预报模型。吴曼丽等^[25]也基于ECWMF预报的500 hPa位势高度场,借鉴相似分析理论,采用概率统计和相似离度等方法,建立了8~17 d辽宁地区关键区环流相似预报模型。这2份工作是动力和统计相结合开展延伸期预报的有益尝试,然而将500 hPa位势高度场的预报结果作为主要参考依据是否合理,需要在实践中进一步加以检验^[24]。

钱维宏和符娇兰^[26]对2008年初江南冻雨过程的湿大气锋生研究表明,江南冬季持续的冻雨天气是准静止锋活动的结果。相当温度梯度可以提前5~10 d预报降水天气过程的开始,也能提前预报降水过程的结束。将ECWMF的7~10 d数值预报产品和湿大气锋生过程相结合,可将冰冻雨雪天气过程的湿大气锋生预报提前10~15 d。

陈豫英等^[27]基于国家气候中心下发的动力延伸预报产品,采用逐步回归的模式输出统计(Model Output Statistics, MOS)方法,对宁夏24个测站未来40 d逐候平均气温进行预报。结果表明:MOS预报效果较模式直接输出结果有显著提高,同时该方法能够在一定程度上预报极端候平均气温,具有良好的应用价值。

在动力与统计相结合的预报思路中,模式预报性能检验是一个至关重要的问题。陈官军等^[28]检验和评估了NCEP的气候预报系统(Climat Forecast System, CFS)对夏季东亚大气环流的预报技巧和系统误差,在此基础上通过提取模式预报结果的低频分量并与观测进行比较,重点对我国南方3次

典型持续性暴雨过程的预报技巧进行检验和诊断分析。结果表明:CFS 10 d以上预报的系统性误差大小和空间分布趋于稳定;CFS对低频分量的延伸期预报技巧好于其对整体大气环流的预报技巧,且在典型持续性暴雨过程中,CFS对影响强降水过程的主要环流系统的低频振荡特性有一定预报能力,从而说明CFS是良好的预报工具,具有和统计方法相结合开展延伸期预报的潜力。

2.2 利用大气低频活动信号的延伸期预报方法

延伸期天气预报之所以是一大难题,主要是因为它超出了逐日天气预报的理论上限,短期天气预报理论不再适用;同时气候系统的多数外强迫因子尚未发挥作用,基于大气遥相关过程的短期气候预测理论也不再适用。相关理论的缺失,为延伸期预报带来了很大的阻力。从物理上来说,在延伸期尺度内,大气低频振荡既是大气活动的强信号,也是诱发大气环流演变的重要因子,因此基于大气低频活动信号开展延伸期预报成为除数值方法之外的另一个重要方向。该方法物理意义鲜明,预报思路简洁,近年来受到日益广泛的关注。宏观而言,大致可分为MJO法和低频天气图法2类。

2.2.1 利用MJO的延伸期预报方法

大气季节内振荡(Intraseasonal Oscillation, ISO)(其中热带ISO又称Madden-Julian Oscillation, MJO)^[29-30]是延伸期时段内大气环流变异最为可靠的时间尺度来源之一。

Madden和Julian^[29-30]首先发现MJO存在于热带地区,具有自西向东的传播特征,周期约为40~50 d,具有纬向1波的全球尺度特征。MJO起源于热带印度洋和西太平洋,与移动性Walker环流有联系。此后,Yasunari把MJO同印度季风的活动联系起来^[31],并指出印度季风区存在周期为15 d和40 d左右的季节内振荡,进一步推动了MJO的研究^[5]。Krishnamurti等^[32]分析得出,南亚季风槽脊的活动存在周期约为30~50 d的振荡且有向北缓慢传播的特征,这一结论得到了Murakami等^[33]的证实,并提出了与之相关的扰动能量频散问题。自1980年代开始,季节内振荡的全球性分布特征逐渐得到揭示,学术界开始用“ISO”这一名称来指代全球范围内的大气季节内振荡现象。Anderson和Rosen^[34]通过对西风角动量的研究,发现了中纬度ISO的存在。李崇银的研究^[35]也揭示了中高纬度ISO的存在,李崇银等^[36]还进一步指出,中高纬度ISO

和 MJO 之间主要通过欧亚—太平洋 (Eurasia - Pacific, EUP) 和太平洋—北美 (Pacific - North America, PNA) 2 个低频波列发生相互作用。此外,季风区的 ISO 也得到了揭示^[37]。

关于 MJO 的形成机理,已有研究表明,积云对流加热反馈^[38]、非线性相互作用^[35]、大气对外源强迫的响应^[39-40]、蒸发—风反馈^[41]和海洋—大气耦合作用^[42]等是激发 MJO 的主要原因。然而,关于中高纬度 ISO,目前仍然缺乏足够的了解,对其产生机理尚未获得较为清晰的认识。

从气候角度来说,ISO 既是高频天气变化的直接背景,又是月、季气候的主要构成分量,它是“天气—气候界面”,是连接天气和气候的直接纽带^[2]。因此,利用 ISO 来进行延伸期天气预报从物理上来说是完全可行的。由于对中高纬度 ISO 的了解较为有限,目前的研究重点为基于 MJO 的延伸期预报。

当前,借助 MJO 开展延伸期预报的主流方法是根据 MJO 的时间尺度特征进行带通滤波或主模态提取,对滤波后的信息或得到的主模态进行分析^[43-44]。其中,Wheeler 等^[45]采用的方法具有代表性并简洁实用,在气象业务上有广泛的发展前景。Wheeler 等对近赤道平均的 850 hPa 纬向风、200 hPa 纬向风和射出长波辐射 (Outgoing Longwave Radiation, OLR) 进行多变量经验正交函数 (Multi - Variate Empirical Orthogonal Function, MV - EOF) 分解,得到描述近赤道 MJO 空间结构的前 2 个主模态,其对应的时间系数表现出显著的季节内振荡特征。在 MJO 的实时监测中,将实时的多变量投影于前 2 个主模态,由此得到的主成分 RMM1、RMM2 即可作为 MJO 实时监测与预测的指数,在这 2 个指数确定的位相分布图上可绘出 MJO 的逐日空间位相演变, MJO 的强度也可由这 2 个指数基本确定,同时该计算方案可以应用于一年中的各个季节,是提取 MJO 的有效方法;其不足之处是滤波效果并不彻底,指数中仍包含了某些高频信号,在监测诊断和预测分析中形成了噪音^[5]。Wheeler 方案的最大优点在于可以用于 MJO 的实时监测,这是时间滤波方案无法解决的难题,从而在世界各国的 MJO 监测诊断业务中得到了广泛的应用。

在 Wheeler 等工作的基础上,Elizabeth 等^[46]和 Jiang 等^[47]分别采用向量自回归 (Vector Autoregression, VAR) 模型、多变量滞后回归模型对 MJO 进行了预测,表现出一定的预报技巧。Jones 等^[48]利用

EOF 方法将 30~50 d 大气低频位势高度场展开为时间和空间的函数,建立了热带季节内对流异常的统计模型,用来预报未来 3~5 候的低频高度场。Galín^[49]基于时变 EOF 方法对一月大气环流的低频变化进行了研究,得到了季节内尺度的谱特征周期。针对季风的季节内振荡,Goswami 等^[50]研究了印度夏季风状态突变 (活跃—中断过程) 的可预报性,发现印度夏季风由活跃状态转为中断状态的可预报性达 20 d,而由中断状态转为活跃状态的可预报性仅为 10 d 左右,并在此基础上进一步提出了对印度夏季风季节内振荡进行延伸期预报的经验统计模型。丁一汇和梁萍^[5]指出 MJO 对江淮地区夏季降水的季节内演变有重要贡献,且具有较长时间的可预报性;梁萍和丁一汇^[51]进一步通过对梅雨季节内振荡进行延伸期预报和试验,发现 MJO 可能是联系梅雨区天气过程和气候异常的重要系统。He 等^[52]在最新的研究中发现, MJO 的 2 个模态与我国冬季干 (冷) 和暖 (湿) 天气之间存在显著相关,且有 2 候左右预报时效,从而提出了利用 MJO 制作东亚冬季延伸期预报系统的思路^[53]。

总体而言,在国内外的延伸期预报实践中, MJO 法是应用最为广泛的方法之一。值得注意的是,最近有研究提出利用统计和动力相结合的方法进行基于 MJO 的延伸期天气预报^[5],这一方法可行的前提是动力模式能够正确模拟出 MJO 的多尺度结构,且对 MJO 的传播特征有一定预报技巧。发展高分辨率数值模式可能是实现这一目标的途径之一^[5]。由于 MJO 主要存在于热带,因此 MJO 法适用于对我国低纬度地区开展延伸预报,对纬度较高的北方地区则显得无能为力,这不能不说是 MJO 法的一大遗憾。

2.2.2 低频天气图的延伸期预报方法

低频天气图法是近年来涌现出的新兴方法,在延伸期预报业务实践中取得了显著的成果。此方法最早由孙国武和陈葆德^[54]提出,2007 年以来在中国气象局新技术开发项目的支持下不断成熟和完善。低频天气图法的核心思想是在逐日天气图上进行 30~50 d Butterworth 带通滤波,从而将普通天气图转化为“低频天气图”,将普通天气图上的气旋、反气旋转化为“低频天气图”上的“低频气旋”、“低频反气旋”,通过对低频气旋和低频反气旋造成的南北气流辐合情况进行分析来开展延伸期强降水过程的预报^[55],其主要预报对象是天气过程。

低频天气图法的具体预报流程是:首先对逐日天气图进行 30 ~ 50 d Butterworth 带通滤波,分析低频天气系统(主要是低频气旋和低频反气旋)的生消和移动规律,在此基础上,在不破坏低频系统的地域性和完整性的前提下,进行低频天气图分区;对各个区域内低频系统的生消和移动规律进行归纳整理,根据低频系统的周期性、连续性和准定常性特征,预报各个区域内的低频系统,再根据低频系统与区域降水之间的对应关系,预报降水过程;最终建立基于低频天气图的预报模型^[55-56]。近年来,孙国武等^[57]又发展了“天气关键区大气低频波预报方法”,根据各个天气关键区内大气低频波的演变和配置,推断南、北低频气流在我国东部副热带地区的辐合情况,以此来预测降水过程,从而进一步提高了低频天气图法的使用技巧。

低频天气图法具有显著的优势:其一是普适性。低频天气图法并不依赖于某些具体的大气动力过程(如 MJO)来开展预报,通过将普通天气图转化为低频天气图,使传统的天气学原理和方法可以应用于低频天气图的分析,方法本身不受区域限制,也比较容易实现。其二是简洁性。低频天气图法的物理架构非常清晰,将延伸期预报问题转化为发掘低频天气系统活动规律与强降水过程之间的有机联系。一直以来基于物理信号追踪开展延伸期天气预报之所以是一个难点问题,很大程度上是由于其具有“间接性”,即如何利用大气低频系统活动规律来开展延伸期预报?一方面,对大气低频系统的活动规律了解有限,并无确定的把握;另一方面,大气低频系统的活动规律与延伸期天气预报之间的联系究竟如何?这种确定性联系的缺失往往为气象部门制作业务预报带来巨大的障碍。低频天气图法的可贵之处在于走出了这一困境,不强调分析真实大气中低频天气系统的活动规律,着眼于分析低频天气图上的低频系统,由于可以借鉴天气学分析工具,且低频系统活动造成的气流辐合辐散对于延伸期降水过程有着很好的指示意义,从而将问题大大简化。其三是实时性。由于低频天气图法的依托工具为逐日低频天气图,而 MICAPS 实时资料每天由中国气象局下发,从而保证了延伸期预报制作的实时性。其四是验证性。逐日低频天气图的获得使我们可以不同时间对预报时段内的天气过程分别展开预报,分析各次预报结果并进行比较订正,有助于获得确定性的认识,提高预报的精度。正因为低频天气图法有

着诸多优点,因此在上海市气候中心的业务应用中取得了显著的成果,并且在兰州和沈阳中心气象台的推广应用中也收到了很好的成效^[57]。

2.3 利用数理统计的延伸期预报方法

除了动力模式和大气低频活动信号演变 2 条预报思路,数理统计也是延伸期天气预报领域广为使用的一大方法。与前 2 种方法相比,数理统计方法不拘泥于某种预报框架,思路灵活、手段多样,在针对特定问题的研究和分析中往往能收到奇效。

信飞等^[58]基于 Jones 等^[48]建立的统计预报模型,结合我国东部地区实际情况,通过自然正交分解、自回归及多元线性回归等统计方法,建立了低频大气环流统计模型。实践证明,该模型对汛期未来 3 ~ 5 候长江中下游大气环流演变预测有一定参考价值。覃志年等^[59]基于 NCEP/NCAR 再分析资料,利用 Lamb 环流分型,提取造成广西区域性暴雨的主导系统,在此基础上应用动态相似集成预测方法,制作延伸期区域性暴雨过程预测,在实际应用中精度较高。杨玮等^[60]根据实时 MICAPS 资料,采用 EOF 分解和滤波方法,统计分析了欧亚大陆上空 700 hPa 水汽输送通量流函数和势函数主要低频分量的分布特征,并提取出流函数和势函数低频环流系统变化的关键区。根据关键区环流系统演变,确定与上海地区未来延伸期时段强降水过程相对应的预报指标,并对上海地区 2010 年 7 月降水过程进行了预报检验和机制分析。

3 国内外延伸期天气预报业务的开展现状

随着气象防灾减灾的呼声越来越高,延伸期天气预报也日益成为国内外气象部门的业务重点。目前,国外延伸期天气预报业务主要基于数值模式和 MJO 的监测诊断 2 条思路展开。

在数值模式方面,ECWMF 主要基于海—气耦合模式和集合预报方法开展延伸期预报;英国气象局主要参考大气环流模式的集合预报结果;NCEP 的主要预报工具也是海—气耦合模式;加拿大气象局的预报工具为 T63L23 全球大气谱模式。

在 MJO 的监测诊断方面,美国气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC)建立了 MJO 的监测和预测工具,除采用经验统计模式预报热带 MJO 外,还将 Wheeler 等定义的 MJO 指数用于全球业务中心的动力模式资料上,对 MJO 进行实时业务预

报^[5]。澳大利亚气象部门也将 Wheeler 等定义的 MJO 指数作为对 MJO 进行实时监测与诊断的工具,并在此基础上利用统计模型进行热带 MJO 的实时预测;同时,还将 MJO 指数用于台风的盛期频数预测^[5]。印度气象部门主要采用相似法^[61]对印度地区 OLR 异常进行 20 d 左右的延伸期实时业务预报;韩国气象部门则采用动力和统计结合法开展了冬季 30 d 延伸期预报试验^[5]。

我国的延伸期天气预报业务开展时间不长,但发展迅速。国家层面的延伸期预报以趋势预报为主。国家气候中心主要基于月动力延伸预报模式进行 10~30 d 的温度距平和降水距平百分率预报^[62]。此外,上海市气候中心采用孙国武等提出的低频天气图法,在延伸期天气过程预报方面取得了很好的进展,成为我国延伸期过程预报的代表性工作。在中国气象局新技术开发项目“低频天气系统预报技术及业务化应用”的支持下,2008 年和 2009 年低频天气图法在上海市气候中心正式进入业务化应用,预报结果表明,强降水过程可以提前 10~45 d 预报出来^[55]。低频天气图法近几年在兰州和沈阳中心气象台进行了推广应用,效果良好。实践证明,该方法不仅能够应用于强降水预报,在高温、冷空气活动、沙尘暴和干旱等多种天气过程的预报中也表现出较好的性能。2011 年,以低频天气图法为核心的月内重要过程趋势预测系统被列为现代气候业务发展与改革试点项目,上海市气候中心同河北省气候中心及江苏省气候中心进行业务系统建设,同时向华东 5 省(浙江省、福建省、安徽省、江西省和山东省)以及甘肃、辽宁、广西、重庆等省市进行推广应用。可以想象,未来几年低频天气图法必将成为我国延伸期天气过程预报的主流方法,成为气象部门开展延伸期预报的有力工具。

此外,我国各省市气象部门也发展了一些有特色的延伸期预报方法。山东省气象台^[63]基于国家气候中心月动力延伸集合预报结果,经过本地化分析,形成了山东省延伸期预报业务系统,该系统对 10 d 以上的天气过程展现出一定的预报技巧。陕西省气象台^[64]将 ECWMF 预报的全球 500 hPa 位势高度格点场与历年同期 NCEP 再分析资料中的 500 hPa 高度场进行相关分析,提取出相关最好的 3 个年份,再利用历年逐日降水实况推算各个级别降水的出现频率,以此作为背景概率,在背景概率控制下获取 3 个相似较好年份中最有可能出现的年份作为

最终相似年份,以此为基础对未来 10~20 d 的降水进行预报。业务化试验表明,该方法的预报效果有较高精度。

4 小结和讨论

10~30 d 延伸期天气预报对于经济社会的快速稳定发展和气象防灾减灾具有重要意义,也是填补短中期天气预报和短期气候预测之间的时间缝隙、构建完备性预报体系的必然要求,既有突出的科学价值,也有很高的应用价值,从而成为近几年气象科学研究的重点领域之一^[55]。本文从延伸期天气预报的预报对象、基本方法和相关原理、国内外业务开展现状 3 个角度回顾了延伸期预报的科学进展和业务实践情况,从动力模式、大气低频信号演变、数理统计 3 个视角重点分析了延伸期预报的各种主流技术方法,比较和探讨了各种方法的优势和不足。总体而言,目前延伸期天气预报领域较为成熟的 2 大方法是 MJO 法和低频天气图法,此外可预报分量提取法、动力和统计结合法也表现出很强的生命力,然而没有解决的科学问题还有很多,概括起来约有以下几点:

(1)从时间尺度来源来说,大气准双周振荡(Quasi-Biweekly Oscillation, QBWO)^[65]也是延伸期尺度内的大气强信号。然而可惜的是,QBWO 在延伸期预报中尚未得到很好的应用,这可能是由于对 QBWO 的了解还十分有限,应用于延伸期预报还有很长的路要走;

(2)可预报分量提取法目前尚处于理论探索阶段,尽管该方法被证明是进行延伸期预报的强有力的数学工具^[10],但真正应用于业务实践还要经历相对较长的过程;

(3)MJO 在低纬地区的传播和演变规律已有大量的研究工作,然而中高纬地区 ISO 的活动规律和传播特征究竟如何还不十分清楚,这在很大程度上制约着利用 ISO 对我国纬度较高的北方地区开展延伸期预报;

(4)低频天气图法是近年来制作延伸期天气预报较成功的方法之一,然而该方法本身还有待于进一步完善。低频天气图上的低频气旋和低频反气旋的活动规律是进行延伸期强降水预报的关键所在,然而低频气旋和低频反气旋对应的天气实体是什么?连接大气低频系统与真实大气环流系统的物理桥梁是什么?天气关键区的选取是进行延伸期预报

的前提,然而如何选取天气关键区很大程度上取决于预报员的经验,能否制定出客观性判据、以普适的标准来确定天气关键区? 这些问题有待于进一步探究;

(5)针对国家气候中心发布的月动力延伸预报产品,已经开展了关于模式释用的大量理论研究^[27,62,66-68],然而面向实际业务需求,怎样的释用方法才能最有效地提取出延伸期信息并以其为基础开展延伸期天气预报? 这是动力与统计结合法亟待解决的一个重要问题,需要借鉴理论工具、数模工具、统计工具等多种手段方能有所突破。

当前,延伸期天气预报在世界各国蓬勃开展,然而除了 MJO 法,真正行之有效、能够用于业务运行的预报方法屈指可数;低频天气图法是我国科学家提出的独特构想,整体框架清晰、物理意义明确、业务流程简洁,为延伸期预报开辟了新的道路。尽管该方法仍有待于进一步完善,需要解决的科学问题还有很多,然而“低频天气图”这一思路无疑是正确的,具有广阔的发展前景。基于低频天气图法构建适用于多种灾害性天气过程、具有较高精度的业务预报体系应当是延伸期天气预报未来的发展方向之一。

参考文献:

- [1] 金荣花,马杰,毕宝贵. 10~30d 延伸期预报研究进展和业务现状[J]. 沙漠与绿洲气象,2010,4(2):1-5.
- [2] 杨秋明. 10-30 天延伸期天气预报及发展趋势[J]. 中国新技术新产品,2008(7):96-97.
- [3] 张强,张存杰,白虎志,等. 西北地区气候变化新常态及对干旱环境的影响——总体暖干化,局部出现暖湿迹象[J]. 干旱气象,2010,28(1):1-7.
- [4] 沈洁,李耀辉,朱晓炜. 西北地区气候与环境变化影响沙尘暴的研究进展[J]. 干旱气象,2010,28(4):467-474.
- [5] 丁一汇,梁萍. 基于 MJO 的延伸预报[J]. 气象,2010,36(7):111-122.
- [6] 琚建华,吕俊梅,谢国清,等. MJO 和 AO 持续异常对云南干旱的影响研究[J]. 干旱气象,2011,29(4):401-406.
- [7] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963,20(2):130-141.
- [8] Lorenz E N. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model[J]. Tellus, 1982,34(6):505-513.
- [9] Chou J F. Predictability of the atmosphere[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1989,6(3):335-346.
- [10] 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[J]. 气象科学,2010,30(5):569-573.
- [11] Ripler E A, Archibold O W. Accuracy of Canadian short- and medium-range weather forecasts[J]. Weather, 2002,57(12):448-457.
- [12] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction[J]. Tellus, 1969,21(6):739-759.
- [13] Miyakoda K, Gordon T, Carerly R, et al. Simulation of a blocking event in January 1977[J]. Monthly Weather Review, 1983,111(4):846-849.
- [14] 丑纪范. 短期气候预测的现状、问题与出路(一)[J]. 新疆气象,2003,26(1):1-4.
- [15] 王绍武. 短期气候预测的可预报性与不确定性[J]. 地球科学进展,1998,13(1):8-14.
- [16] 穆穆,李建平,丑纪范,等. 气候系统的可预报性理论研究[J]. 气候与环境研究,2002,7(2):227-235.
- [17] Barnett T P, Preisendorfer R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperature determined by canonical correlation analysis[J]. Monthly Weather Review, 1987, 115(9): 1825-1850.
- [18] Plaut G, Vautard R. Spells of low-frequency oscillations and weather regimes in the Northern Hemisphere[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1994,51(2):210-236.
- [19] Yang H, Zhang D, Ji L. An approach to extract effective information of monthly dynamical prediction - The use of ensemble method[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18(2): 283-293.
- [20] 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[J]. 军事气象水文,2006(3):4-9.
- [21] 丑纪范,任宏利. 数值天气预报——另类途径的必要性和可行性[J]. 应用气象学报,2006,17(2):240-244.
- [22] 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[J]. 物理学报,2009,58(10):7359-7367.
- [23] 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[J]. 应用气象学报,2010,21(2):139-148.
- [24] 徐光洁. 用欧洲数值预报产品制作中期延伸预报[J]. 黑龙江气象,1994(3):50-52.
- [25] 吴曼丽,陆忠艳,王瀛. 中期延伸天气预报方法研究[J]. 气象与环境学报,2007,23(2):6-10.
- [26] 钱维宏,符娇兰. 2008 年初江南冻雨过程的湿大气锋生[J]. 中国科学(D 辑):地球科学,2009,39(6):787-798.
- [27] 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[J]. 应用气象学报,2011,22(1):86-95.
- [28] 陈官军,魏凤英,巩远发. NCEP/CFS 模式对东亚夏季延伸预报的检验评估[J]. 应用气象学报,2010,21(6):659-670.
- [29] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1971,28(5):702-708.
- [30] Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1972,29(6):1109-1123.
- [31] Yasunari T. Cloudiness fluctuations associated with the Northern Hemisphere summer monsoon[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1979,57(3):227-242.
- [32] Krishnamurti I N, Subrahmanyam D. The 30-50 day mode at 850

- mb during MONEX [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982, 39(9):2088-2095.
- [33] Murakami T, Nakazawa T, He J. On the 40-50 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere summer. Part II: Heat and moisture budget [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1984, 62(3):469-484.
- [34] Anderson J R, Rosen R D. The latitude-height structure of 40-50 day variation in atmospheric angular momentum [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(6):1584-1591.
- [35] 李崇银. 大气中的季节内振荡 [J]. *大气科学*, 1990, 14(1):32-45.
- [36] 李崇银, 龙振夏, 穆明权. 大气季节内振荡及其重要作用 [J]. *大气科学*, 2003, 27(4):518-533.
- [37] 王斌. 认识和预报亚洲季风气候: 前沿突破点和展望 [J]. *气象学报*, 2008, 66(5):653-669.
- [38] Li C. A further inquiry on the mechanism of 30-60 day oscillation in the tropical atmosphere [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1993, 10(1):41-53.
- [39] 李崇银, 肖子牛. 赤道太平洋增暖对全球大气 30-60 天振荡的激发 [J]. *科学通报*, 1991, 36(15):1157-1160.
- [40] 杨修群. 大气对热带热源低频响应的数值研究 [J]. *气象科学*, 1990, 10(4):384-393.
- [41] Neelin J D, Held I M, Cook K H. Evaporation-wind feedback and low-frequency variability in the tropical atmosphere [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(16):2341-2348.
- [42] 蒋国荣, 刘庭杰, 何金海. 热带季节内振荡研究新进展 [J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(2):281-288.
- [43] Waliser D E, Jones C, Schemm J K, et al. A statistical extended range tropical forecast model based on the slow evolution of the Madden-Julian Oscillation [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(7):1918-1939.
- [44] Jones C, Waliser D E, Schemm J K, et al. Prediction skill of the Madden-Julian oscillation in dynamical extended range forecasts [J]. *Climate Dynamics*, 2000, 16(4):273-289.
- [45] Wheeler M, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction [J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(8):1917-1932.
- [46] Elizabeth A M, Wheeler M C. Forecasting an index of the Madden-Oscillation [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(12):1611-1618.
- [47] 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 [J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(6):1940-1956.
- [48] Jones C, Carvalho M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(11):2078-2094.
- [49] Galin M B. Study of the low-frequency variability of the atmospheric general circulation with the use of time-dependent empirical orthogonal functions [J]. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2007, 43(1):15-23.
- [50] Goswami B N, Xavier P K. Potential predictability and extended range prediction of Indian summer monsoon breaks [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18):1966, doi:10.1029/2003GL017810.
- [51] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸预报试验 [J]. *大气科学*, 2012, 36(1):102-116.
- [52] He J, Lin H, Wu Z. Another look at influences of the Madden-Julian Oscillation on the wintertime East Asian weather [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116, D03109, doi:10.1029/2010JD014787.
- [53] 黄海燕, 何金海, 朱志伟. 大气季节内振荡的研究进展及其在延伸期预报中的应用 [J]. *气象与减灾研究*, 2011, 34(3):1-8.
- [54] 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 [J]. *大气科学*, 1988, 12(3):250-256.
- [55] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报 [J]. *高原气象*, 2010, 29(5):1142-1147.
- [56] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法 [J]. *高原气象*, 2008, 27(增刊):64-68.
- [57] 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 [J]. *高原气象*, 2011, 30(3):594-599.
- [58] 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 [J]. *高原气象*, 2008, 27(增刊):69-75.
- [59] 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 [J]. *高原气象*, 2009, 28(3):688-693.
- [60] 杨玮, 何金海, 孙国武, 等. 低频环流系统的一种统计预报方法 [J]. *气象与环境学报*, 2011, 27(3):1-5.
- [61] Xavier P K, Goswami B N. An analog method for realtime forecasting of summer monsoon subseasonal variability [J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(12):4149-4160.
- [62] 李维京, 陈丽娟. 动力延伸预报产品释用方法的研究 [J]. *气象学报*, 1999, 57(3):338-345.
- [63] 王文青, 王咏青, 周雪松. 山东省延伸期预报业务初探 [J]. *山东气象*, 2011(3):22-25.
- [64] 杨文峰, 刘瑞芳, 吴林荣, 等. 陕西省 10~20 天降水预报方法及业务化试验 [J]. *气象*, 2009, 35(12):139-143.
- [65] Krishnamurti T N, Bhalme H N. Oscillation of a monsoon system. Part I. Observational aspects [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1976, 33(8):1937-1954.
- [66] 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 [J]. *应用气象学报*, 2005, 16(增刊):92-96.
- [67] 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 [J]. *气象学报*, 2009, 67(2):280-287.
- [68] 许晓光, 李维京, 任宏利, 等. T63L16 气候模式预报能力的空间尺度分布研究 [J]. *气象学报*, 2009, 67(6):992-1001.

(下转第 554 页)

- [17] 赵强, 严华生. 近 48 年陕西夏季降水的时空变化特征[J]. 陕西气象, 2012, 3: 15 - 18.
- [18] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter[J]. Mon Wea Rev, 1981, 109: 784 - 812.
- [19] 孙力, 安刚. 东亚地区春冬季与夏季大气环流异常相互关系的研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(6): 650 - 660.
- [20] 张庆云, 陶诗言. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征[J]. 大气科学, 2003, 27(3): 369 - 380.
- [21] 李崇银. 气候动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 2000. 246 - 250.
- [22] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状况及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学, 1994, 18: 141 - 151.
- [23] 严华生. 气候变化分析预测[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 193 - 204, 120 - 122.

Preceding Atmospheric Circulation Characteristics over Northern Hemisphere Influencing on Droughts and Floods in Summer of Shaanxi

ZHAO Qiang¹, YAN Huasheng², ZHANG Jinwen³

(1. Shangluo Meteorological Bureau of Shaanxi Province, Shangluo 726000, China;

2. Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091, China;

3. Yunnan Institute of Meteorological Science, Kunming 650034, China)

Abstract: Based on NCEP/NCAR monthly global reanalysis data from 1961 to 2008, west Pacific subtropical high index information from National Climate Center and summer precipitation data of Shaanxi, the influence of preceding atmospheric circulation anomalies on summer rainfall in Shaanxi and its mechanism were discussed. Results showed that there were close relationship between droughts (floods) in summer of Shaanxi and westerly belt circulation anomalies at low and high latitude in the preceding autumn, winter and spring. When positive PNA atmospheric teleconnection distribution was appeared in preceding atmospheric circulation, the western Pacific subtropical high would strengthen and extend westward in summer, and the Balkhash Lake and Okhotsk Sea block high would also be stronger, which resulted in abnormal southwest wind transporting water vapour over the central and southern Shaanxi, and abnormal north wind bringing cold air over the northern Shaanxi, there would be flooding in summer of Shaanxi, whereas, it would be drought. The location of the subtropical high ridge mainly affected the move of rainfall belt in north and south direction in summer of Shaanxi. When SST in the middle east equatorial Pacific was higher, western Pacific subtropical high was stronger and moved westward in the coming summer, then there would be more rain in summer of Shaanxi.

Key words: droughts/floods in summer of Shaanxi; the preceding atmospheric circulation anomalies; western Pacific subtropical high index; Pacific - north America teleconnection (PNA)

(上接第 521 页)

Advances in the Study on 10 - 30 Days Extended - Range Weather Forecast

MA Hao¹, MAO Yanjun¹, LEI Yuan¹, FAN Gaofeng¹, JIANG Wei²

(1. Climate Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310017, China;

2. Climate Center of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China)

Abstract: Developing extended - range weather forecast from 10 to 30 days is very important for preventing and reducing meteorological disasters, which is also necessary to fill the gap between short - to - medium range weather forecast and short - term climate prediction. In this paper, the forecast object, basic methods and related mechanisms, and operational applications at home and abroad about extended - range weather forecast are reviewed. Several methods about extended - range weather forecast are compared and analyzed from three aspects of numerical modeling, development of low - frequency atmospheric oscillation and numerical statistics, and the advantages and disadvantages of all kinds of prediction methods are discussed in detail. Finally, the scientific problems in the field of extended - range weather forecast are summarized.

Key words: extended - range weather forecast; predictable components; MJO; low - frequency synoptic chart; synoptic processes