

杨秋明. 10~30 d 延伸期天气预报方法研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(9): 970-984, doi: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2015. 09. 0970. [Yang Qiuming. Prospects and progresses in the research of the methods for 10~30 days extended-range weather forecast[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(9): 970-984, doi: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2015. 09. 0970.]

10~30 d 延伸期天气预报方法研究进展与展望^{*}

杨秋明

(江苏省气象科学研究所, 江苏 南京 210009)

摘 要: 10~30 d 延伸期预报是国际大气科学关注的研究热点。这一时间段的预报对开展防灾、救灾工作具有极其重要的价值和意义, 该工作需要结合初始气象条件、海洋、大气以及气候的影响因素, 其中观测资料具有复杂性、综合性、全球性等, 这些科学大数据反映和表征着复杂的自然现象与关系, 具有高度数据相关性和多重数据属性, 预测过程十分复杂。分析了延伸期预报的各种主流方法, 其中重点介绍了动力模式、经典统计和大数据方法3类预报方法的研究现状, 并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讨论和总结。对延伸期预报方法的未来发展方向和应用前景给以展望。

关 键 词: 延伸期预报方法; 集合预报; 统计预报; 大数据预报; 可预报性

中图分类号: P456.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2015)09-0970-15

1 引 言

在目前的天气气候预报业务中, 10~30 d 的延伸期预报是“无缝隙预报”中的难点。由于理论研究尚不完备, 使得延伸期的准确预报还存在较多困难。但对10~30 d 延伸期预报业务迫切的社会需求, 使其成为国际关注的研究热点之一^[1]。限于当前天气气候预报的技术水平, 对10 d 以上和30 d 以内(月尺度)的重要天气过程还难以做出比较准确的预报。然而, 恰恰是这一时间段的预报, 对于开展防灾减灾工作, 强化极端气候灾害风险防范措施, 促进经济社会可持续发展具有极其重要的价值和意义。

世界气象组织规定的延伸期是指10~30 d, 这是根据目前数值天气预报的能力所作的界定。延伸期预报对象主要有气象要素的趋势预报(预报未来10~30 d 某要素相对于同期气候平均状态的异常

情况)和极端天气过程的趋势(预报未来10~30 d 强降水、持续高温和强降温发生的时段等)预报。10~30 d 延伸期预报是近20多年来的国际大气科学研究的难点, 很多气象专家从不同的角度对延伸期预报方法进行了研究。延伸期预报困难的原因在于其预报时效超越了确定性预报的理论上限(2周左右)^[2], 而预报对象的时间尺度又小于气候预测的月、季时间尺度。

在大气环流模式(General Circulation Model, GCM)建立之后, 尤其是Miyakoda等^[3]利用GCM对1977年1月的阻塞提前1个月进行了再现, 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(Dynamic Extended Range Forecast, DERF)试验^[4,5]。但从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。随着对气候系统的认识不断加深, 尤其是对

* 收稿日期: 2015-05-03; 修回日期: 2015-08-03.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“SCGT与夏季东亚ISO相互作用研究及其在长江下游强降水延伸期预报中的应用”(编号: 41175082)资助.

作者简介: 杨秋明(1963-), 男, 江苏武进人, 高级工程师, 主要从事天气气候预测研究. E-mail: yqm0305@263.net

延伸期可预报信息源的认识不断深入,如10~90 d 低频信号等,为延伸期预报提供了发展基础。最近10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^[6,7]。在国外探索利用GCM试做月平均预报的同时,20世纪70年代末,巢纪平等^[8]创造性地提出一种距平滤波模式的理论和方法,为30 d 动力延伸期数值预报开辟了一条新路。史久恩^[9]考虑大气具有确定性和随机性的双重性质,基于大气动力模式,根据蒙特卡洛预报和滞后平均预报的思想,开展了利用动力—统计模式进行月平均环流集合预报的试验。1995年以后,国内DERF研究也全面展开,基于GCM对月平均环流进行大量试验研究,发展出数字滤波、自记忆原理、4D-Var 同化集合、非线性时空序列和大气相似性原理与谱模式相结合的月环流预报方法,特别是发展了采用历史资料的动力相似预报的策略和方法,取得了较显著的效果^[10],并于20世纪90年代后期建立了试验性月DERF业务系统。但由于数值预报模式预报受到逐日大气可预报上限(2~3周)的制约,尽管中外学者进行了大量努力和尝试,但基于数值模式的热带外大气环流预报技巧总体偏低,对与大尺度环流相联系的强天气过程及异常事件的延伸期预报仍存在较大难度。

另一方面,天气是任何人不能逾越的自然现象。随着社会、经济和军事不断发展,天气影响着越来越多的行业。早在公元前300年左右,就出现了包括天气谚语在内的各种与季节天气预报有关的天气传说。人们利用这样的传说,预先安排时间较长的工作和生活内容。这些传说源于人们对自然变化的观察,其被提炼并流传,本身也是一种补充和验证过程。它们中被保留下来的一部分尽管是经验性质的,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律。20世纪70年代,Madden等^[11]发现热带地区存在显著的30~50 d 振荡(Madden and Julian Oscillation, MJO)以后,全球大气中普遍存在的季节内振荡(Intraseasonal Oscillation, ISO)现象逐渐被认识^[12]。后来人们开始利用这些信息制作2周及以上时间尺度的降水预测,取得了显著效果并在全球范围得到广泛应用。1990年以来,国外基于MJO的统计方法以及对其可预报

性的研究和预报试验逐渐增多,预报时效也逐步延长。近15年来,这些试验研究迅速增加,成为国际关注的一个研究热点,部分方法已用于实时预测。这些方法主要有时滞回归分析和各种时间序列分析等,一般平均预报时效逐步达到20~30 d。只是到现在,这类预报的对象还基本上停留在降水的趋势上,尚未涉及到降水过程^[13]。在我国,20世纪60年代中期就有学者开始利用大气中存在的韵律现象做季节内的降水过程定性预报试验^[14]。20世纪70年代后期,国内学者更多地研究关注延伸期到季节内时间尺度的天气过程预报。杨鉴初等^[15]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,他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10 d 以上到季节内的天气过程预测试验,如任振球等^[16,17]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等。20世纪80年代末和90年代初,孙国武等^[18]和章基嘉等^[19]提出了“低频天气图”的概念,并初步用于中期和延伸期天气预报试验研究。20世纪90年代,杨秋明^[20]用基于数据驱动的含灰参数的非线性微分方程做冷空气活动的20 d 预测,并用同时具有多元统计分析和时间序列分析功能的主振荡型(Principal Oscillation Pattern, POP)模型做西太平洋地区200 hPa的30~50 d 低频纬向风变化的15 d 预测试验^[21],并于1995—2005年应用于江苏省气象台5 d 以上中期天气预报业务,取得了较好的效果。由于可预报性理论、资料和技术条件的限制,1995—2006年,国内关于延伸期预报其他方法的试验研究和业务应用很少。与此同时,国外基于MJO的延伸期预报方法和业务应用十分活跃^[13]。2007年以后,随着气候变化背景下全球持续性异常事件频繁发生,防灾减灾的巨大需求推动了国内学者对延伸期预报方法的新一轮研究热潮。在国内,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10 d 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^[22],并在业务实践中取得了一定的效果,同时还进行一些有意义的理论探索。

虽然理论基础尚不完备,但对延伸期预报的研究还是存在很多可用的预报因子。根据现有的研究成果,ISO^[12],MJO^[11]和平流层的信号^[23]等低频信

号是 10 ~ 30 d 延伸期天气的主要可预报性来源。随着卫星遥感等多种观测手段进步,近 10 年来气候观测获得的各种数据迅速增加,这些科学大数据^[24,25]反映和表征着复杂的自然现象与关系,从海量数据中提取出部分有效数据,可以获得比过去的抽样分析更全面的低频变化信息。这种小数据带来的极端天气讯息的警示和洞察,可以看做是一种新的延伸期天气变化信号。本文将主要评述近 20 多年来国内外各种延伸期预报方法的研究进展,重点介绍了动力模式、经典统计和大数据方法 3 类预报方法的研究现状,同时进一步讨论了相关问题。

2 延伸期预报方法

大气系统的可预报性是其固有属性,不同时空尺度有不同的可预报性,若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。处于短中期天气预报和气候预测之间的 10 ~ 30 d 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。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,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^[26],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^[27]。丑纪范等^[28]进一步指出,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,在延伸期尺度上仍然可以针对特定的可预报分量开展逐日预报。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,可以对这些可预报的特征进行有针对性的预报。10 ~ 30 d 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(图 1)。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,这些缓变外强迫与大气的耦合所形成的大气内部过程,如大气 ISO 的变化,也有助于提高可预报期限。从物理上来说,在延伸期尺度内,ISO 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。它在天气气候的演变中扮演着重要角色,对持续性异常极端天气事件的发生有重要影响,是联系天气与气候的纽带,这些缓变的外强迫及其影响下的大气低频变化(如 MJO, CGT^[29]: Circum Global Teleconnection), SCGT^[30]: Southern Circum Global

Teleconnection wave train 等)都为延伸期预报提供了有用的低频信息,进而使得做延伸期预报成为可能。

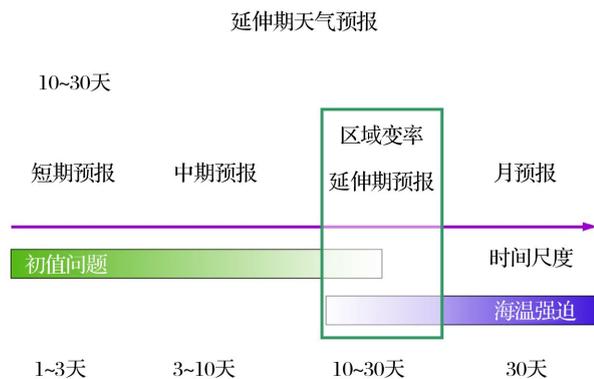


图 1 10 ~ 30 d 延伸期天气预报

Fig. 1 10 ~ 30 days extended range weather forecast

总体而言,延伸期天气预报的基本方法主要有动力模式、经典统计和大数据方法 3 类。动力模式有集合数值模式、可预报分量提取、相似—动力以及采用数值模式预报资料的动力—统计方法等^[3,28,31~46],经典统计有基于大气低频信号演变的统计方法和采用多种观测资料的统计方法等^[21,22,47~75],而大数据主要有多变量时滞回归模型(Multivariate Lagged Regressive model, MLR),扩展复数自回归模型(Extended Complex Autoregressive model, ECAR)和多变量时滞回归/主成分复数自回归模型(Multivariate Lagged Regressive/Principal Component-Complex Autoregressive model, MLR/PC-CAR)等预测方法^[76~78]。另外还有低频天气图^[79],神经网络模型方法^[80~82],基于灰参数的非线性微分方程^[20],基于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的统计方法^[83,84],经验波传播(Empirical Wave Propagation, EWP)方法^[85],大气变量物理解析法^[86]以及各种定性和定量模型^[87]的综合方法。

2.1 动力学方法

2.1.1 集合数值模式预报方法

Miyakoda 等^[3]首先利用数值模式成功预报了未来 10 ~ 30 d 的阻塞高压的变化,这一工作被看作是延伸期数值预报的开端。近 20 年来,采用集合数值模式,使得全球大尺度环流变化的预报能力大大提高。用集合预报的方法把数值模式中不可避免的不确定因素包括在模式的积分过程中来定量描述预报的不确定性变成预报的一部分,估计预报误差的

分布和预报的可信度,逐步提高预测的稳定性。集合预报现在已经不仅仅是对数值模式的初始场进行扰动,还包括对物理参数过程的集合以及边界条件扰动的集合。多模式的超级集合方法,也已经在越来越多的业务和科研单位使用^[31~37]。特别是集合预报能够给出延伸期降水、温度等要素预报的概率预报,这有利于做出科学准确的预报结果,欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)在这方面的全球领先^[31,32,35],预报时效已达到15 d左右,对10~15 d振荡预报能力有很大提高,更长时间尺度的各种低频振荡型的预报需进一步改进。另外,基于对大气运动中随机过程及其与可预报性的认识,从非线性随机过程的角度,Palmer等^[38]提出了一个能够快速实现云解析天气气候模拟的解决方案。“随机”模拟或让动力气象回归简单,即明确随机过程在多大程度上充满和规范着大气运动,同时要在模式的每一步积分运算中将这样的随机内容体现出来。因而通过引入“随机动力”可以较显著改进天气气候模式性能,提高10 d以上数值模式预报的稳定性。由于天气和气候数值预报模式存在各种不确定性,2周以上的预报误差仍然增长较快。这些不确定性的来源以及大气混沌本质和复杂的各种耦合过程也尚待深入研究。无疑需要更多理论和技术上的新突破,从根本上改进天气气候模式性能,才可能有效地做出较长预报时效的10~30 d延伸期动力预测。

2.1.2 可预报分量提取法

观测和理论研究表明,在10~30 d的时间尺度上,客观存在可预报的分量。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)^[28,39,40],并在此基础上构建针对可预报分量的数值预报模式。王阔等^[41]采用滤波并结合EOF方法,提取延伸期预报的稳定分量,提供了一种新的思路和解决问题的途径。

2.1.3 相似—动力方法

过去的分析表明,误差的相似程度与初值的相似程度成正比,相似初值提供的预报误差信息很接近于实际的预报误差。初值越相似,其短期误差演变的相似性也越高,这证实了相似—动力方法的有效性,为进一步提高数值预报技巧提供了支持。这类途径可不从正面改进数值模式的动力框架、物理过程、计算方案等,而从历史资料的角度亦能有效获

得数值模式的预报误差信息,达到提高预报技巧的目的。郑志海等^[42]通过经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解压缩自由度的方法,在历史时空资料中分离出在实际大气和数值模式中均具有较强可预报的分量,并利用历史资料信息对可预报分量进行相似误差订正,继而采取集合预报的方法,较好地提高了6~15 d中长期数值预报技巧。

2.1.4 基于延伸期可预报性的集合预报方法(Predictability-Based Extended-range ensemble Prediction method, PBEP)

大气系统的混沌性质使得用集合预报给出未来概率估计成为必然,但对具有不同特性的可预报分量和随机分量,应采用不同的集合方式对具有不同特性的可预报分量和随机分量采用不同的集合预报方案和策略,郑志海等^[43]发展了一种基于延伸期可预报性的PBEP,该方法以延伸期数值预报模式为平台,对可预报分量采用多个模式误差订正方案,从考虑模式不确定性的角度进行集合;而对随机分量则利用历史资料从气候概率的角度给出集合概率分布,避免模式误差对随机分量概率分布的影响。试验结果表明,相比于国家气候中心的业务动力延伸集介预报系统,该方法的确性检验效果在减小预报误差上有明显的优势,显示出良好的性能。该方法不需对参数化方案进行扰动,通过利用不同历史相似提供的误差信息来达到减小模式由于参数化方案、计算方法等与模式相关的不确定性的目的;同时,不再需要产生最优初值的扰动,只需由相似的外强迫信息估计随机分量最大可能的概率分布。这种方法将可预报性、数值模式、历史资料和集合预报方法有机的联系起来,具有坚实的理论基础和广阔的应用前景,并具有很好的可移植性,可随着数值模式的改进而发展。

2.1.5 动力统计方法

动力统计方法主要是使用延伸期数值模式产品的统计释用方法。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,对未来极端天气变化进行延伸预报^[44~46];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。在动力与统计相结合的预报思路中,模式预报性能检验(如海温、雪盖强迫,平流层环流变化和ISO强度变化对模式性能的影响及其时间变化)是一个至关重要的问题。

2.2 统计学方法

2.2.1 基于 ISO 的统计方法

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。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。由于不同时间尺度的季节内低频振荡对天气气候的重要影响有显著差异,近 25 年来,对其可预报性的研究和预报试验逐渐增多,主要以统计方法为主,比如相关分析和回归分析^[47-59]、时间序列分析^[60,61]、奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)^[62,63]、POP 分析^[21,64-66]等方法。利用大气低频振荡动力机制分析可传播信号的放大和对预报区域的影响,可以作出远高于随机判断和单纯依靠统计计算的有效 10~30 d 延伸期天气预报。目前,统计模式对 ISO 的预报能力优于动力模式,预报时效平均达到 20~25 d,其中热带 MJO 的预报时效可达到 25~30 d。在动力模式进一步得到改进之前,这种小数据时代的经典统计是一种研究 ISO 可预报性的更加有效的途径。

此外,随着基于引入随机动力的全球数值预报模式性能的提高^[38],可以逐步提高未来 15~20 d 逐日高度场和风场主要低频变化的预测精度。这时经典统计模式仍可以利用其 15~20 d 预报场作为新的初始场,再作 30 d 预报,得到未来 45~50 d 的主要低频分量预测,将极端天气预报时效进一步延长到 45 d 左右。因此,基于 ISO 建立的经典统计预报模式还具有较好的预报时效的可扩展性。

2.2.2 基于观测资料的统计方法

基于历史资料的经典统计方法不拘泥于某种预报框架,具有思路灵活、数据处理方法多样的特点。对于一定的季节,在针对特定区域的分析和预测中,若观察资料中的相关关系稳定(不随时间变化),用样本数据进行验证性分析,可以建立固定的统计模型进行实时预报,能收到较显著的效果。例如,可以根据低频振荡的周期或准周期性(低频周期外推法)^[67],用相似韵律、时间序列分析等方法做 10~30 d 延伸期预报。Mo^[68]用奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)提取热带地区观测的向外辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)资料的主要低频模态,由时间序列模型作主要模态对应时间系数的延伸期预报,也有较好的预报效果。该方法可以识别资料中的不规则时间变化模态,反映低频模态的非线性时间变化,其预报可为实时延伸

期业务预报提供重要参考。

2.2.3 物理统计方法

对延伸期天气过程进行物理机制分析,选取与延伸期天气变化关系密切的具有物理机制的各种大气因子和非大气因子,采用回归、典型相关(SVD)等物理统计预报模型制作延伸期预报。关键是抓住预报因子和预报量之间的本质联系,基于数据驱动建立给定的简化的线性或非线性动力模型,使得预报模型性能保持较好的稳定性。Newman 等^[69]采用一个统计的线性逆模(Linear Inverse Model, LIM)做延伸期预报,发现在北半球的一些地区有较强的预报能力,主要反映大气内部动力过程的作用。另外,这种 LIM^[70]和改进的低阶随机模式^[71]还在一定程度上延长了 MJO 延伸期预报的时效。当 MJO 活跃时,预报时效达到 30 d 左右。进一步,Wang 等^[72]采用高阶向量自回归模型(High-order Vector Autoregressive model, HVAR),考虑热源强迫作用对低频变化的影响,发现在北半球副热带的部分地区预报时效可达 35 d。此外,张韧等^[73]和洪梅等^[74]基于环流观测资料用动力预报模型反演作西太平洋副热带高压延伸期预报,预报时效可达 20~25 d。这种反演动力统计模型的预报方法同时具备经典统计预报和数值预报方法的优点,但预报准确率仍对初值和预报积分时效有一定的依赖性,会限制较长时效(大于 25 d)的预报效果。

2.2.4 相似方法

该方法主要利用天气过程模式、持续性天气过程的相似性、大气环流或大气活动中心特征量时间序列的持续性来做延伸期预报。相似预报方法的基本原理是,如果在历史资料中能够找到和大气现在的初始条件相似的个例,那么可以用历史相似个例的发展演化过程作为现在时刻对未来的预报。Xavier 等^[75]用二步相似法,较好地预报未来 20~25 d 印度夏季风的变化。这种方法,也在一定程度上反映了外强迫作用下的非线性过程对预报效果的影响。

2.3 大数据预测方法

地球中纬度地区的大气环流大部分以波的形式在环绕地球运动(即罗斯贝(Rossby)波),主要表现为极显著的 20~30 d 振荡。这种 ISO 的传播具有多样性(物理机制尚不完全清楚),带来了两半球热带外不同区域的极端天气,并且增强了其强度。它与极端天气之间的联系存在时变性,表明了地球系统敏感因素之间的多层次相互关联。随着卫星遥感等多种观测手段进步,近年来气候观测获得的各种

全球数据迅速增加,这些具有高度数据相关性和多重数据属性的科学大数据反映和表征着复杂的自然现象与关系。采用数据分解、扩展和变换等技术,从大量数据中提取出部分有效数据,可以获得比过去抽样分析更全面的两半球中纬度大气低频变化信息,为极端天气事件10~30 d 延伸期预报提供了更好的发展基础,并形成从天气到气候的无缝隙业务体系。直接从多变量、超长序列、高度耦合相关的大量观测资料中提取与特定区域(如长江流域等)极端天气事件关系密切的主要的全球ISO型,约简系统复杂度,由动态数据来驱动复杂低频变化过程与系统的构建,可以显著延长区域极端天气过程预报时效。杨秋明^[76~78]建立了一系列简化的时变线性预测模型(如MLR, ECAR, MLR/PC-CAR等),明显延长了预测时效,可以较好地预测未来40~50 d 内长江下游地区降水20~30 d 低频分量的变化。其中基于独立回归方程组的MLR低频分量预报模型(Low Frequency Component Forecast model, LFCF)称为LFCF1.0;基于复数自回归递推的ECAR预报模型称为LFCF2.0;而通过独立回归方程和复自回归递推时间耦合的MLR/PC-CAR预报模型是LFCF3.0。这些大数据下的延伸期预报方法在预报时效和稳定性方面优于基于集合数值模式、经典统计等小数据时代的主要延伸期预报方法,它将延伸期预报理论研究和实践应用实时地联系在一起,通过数据的动态更新显著改进预报精度。

2.3.1 多变量时滞回归模型(Multivariate Lagged Regressive model, MLR)

对于大量观测资料,通过较复杂的高维数据分析,从这些观测资料中合理识别和提取影响区域极端天气(如长江下游地区强降水等)的主要简化动力过程,把大数据变为小数据,揭示低维空间中少数主要低频分量的变化规律,可以构建预测能力较强的一组随时间变化的MLR模型预测低频分量未来30 d 的变化^[76](<http://www.lcjrefr30.org/>)。通过历史大数据分析(非整数波功率谱分析和相关分析),发现ISO对长江下游地区强降水过程的作用具有时间尺度上的选择性,仅20~30 d ISO强度与长江下游强降水(暴雨)存在最显著的稳定的正相关^[30,88],而且与全球环流20~30 d 振荡型(主要是南半球中纬度地区东移的绕球遥相关型(Southern Circum Global Teleconnection wave train, SCGT)和西太平洋热带地区南移的季节内振荡型(Tropical Western Pacific, TWP))变化密切相关;其中与

SCGT^[30]有关的南半球热带外20~30 d 振荡也表现在半球尺度的涡动动能变化上,即斜压环状模(Baroclinic Annular Mode, BAM)^[89,90],与斜压性和涡动热通量之间的双向反馈有关。通过全球大气遥相关,可以间接影响长江下游地区20~30 d 降水低频分量变化和强降水(暴雨)过程的形成,是长江下游地区强降水延伸期预报的可预报性重要来源之一。这种20~30 d 降水低频振荡强度存在明显的年际变化,与前期春季西北太平洋海温变化正相关显著,但与ENSO关系不密切。而长江流域的其他地区(如长江中游或长江以南地区等)强降水主要与热带地区MJO影响下的季风雨带30~60 d 变化有关^[91,92]。基于与南半球热带外地区类似SCGT波列(图2)变化相关的850 hPa 经向风的低频主要模态,建立一组时变MLR预报模型,预测初夏长江下游降水20~30 d 低频分量未来30 d 的变化,并可以由预测的降水20~30 d 振荡强度预测强降水发生频率的变化。在2001—2013年初夏91次回报试验的平均预报技巧是0.78,其中20~30 d 振荡较强年份的可预报性较大。所以这种完全基于数据驱动的MLR模型组能较好预报6~7月长江下游地区未来25~30 d 内多(少)雨时段的变化,为强降水过程延伸期预测提供主要信息。这种时变参数的MLR模型,反映缓变的外强迫及其影响下的大气低频特性变化,从观测数据增加获取的预测信息的增量来显著改进延伸期预测精度,在一定程度上反映低频振荡时空结构变化的非线性特征。另外,通过时变系数时滞回归和动态关键区自动筛选方法,建立了时变因子的MLR实时预报系统,对1979年和2013年5~8月进行预报试验^[93],也取得较好的效果。

2.3.2 扩展复数自回归模型(Extended Complex Autoregressive model, ECAR)

通过对长序列全球历史资料进行高维数据分析,噪声滤除,约简系统复杂度,将大数据集合变为小数据集,得到影响区域极端天气的主要简化动力过程,揭示出低维实空间中主要低频分量的部分变化规律。然后通过傅里叶变换,将实空间中低频主分量变换到复数空间,在较大的扩展复数数据空间中发现全球环流主要低频主分量和降水低频分量之间的复杂时滞相关变化新规律,更全面地描述气候系统的主要分量在低维空间中的非线性变化信息,可以构建带有较高预测能力的简单ECAR。杨秋明^[77]基于全球逐日环流主要低频模态(资料时间是1979—2011年,序列长度是12 053 d)的变化和长江

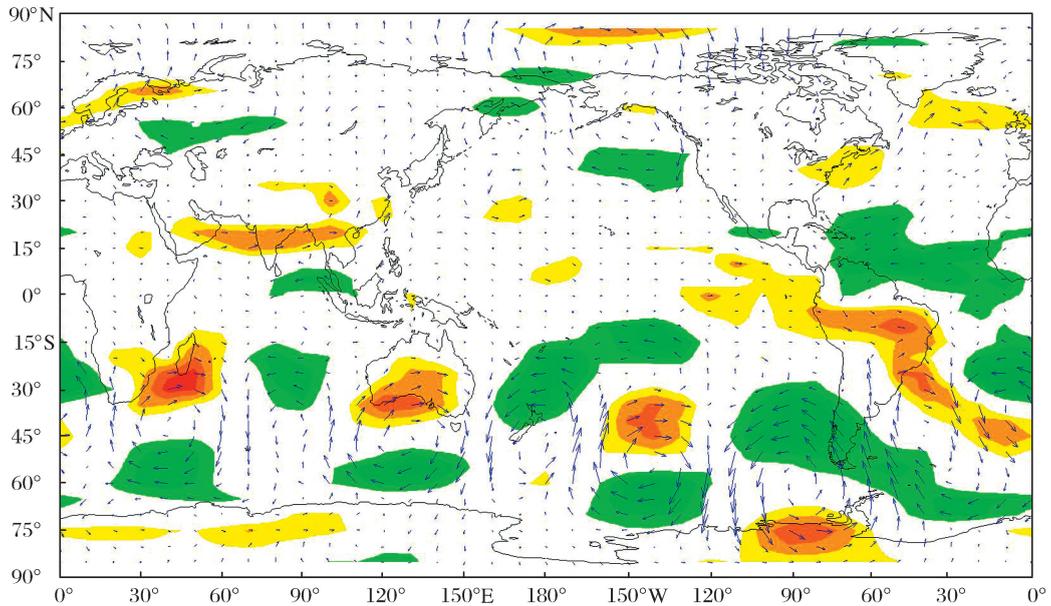


图2 SCGT的20~30 d振荡中全球850 hPa低频风场(单位:m/s)的演变^[30](第4位相合成图)

Fig.2 Evolutions of the low frequency wind of the global 850 hPa in Phase 4 for the 20~30-day oscillation in association with SCGT (unit:m/s)^[30]

下游逐日降水低频分量构造随时间变化的ECAR模型,对2013年1~12月长江下游20~30 d降水低频分量进行延伸期逐日变化实时预报试验。在预报中,通过对长序列历史资料用SSA对原始序列作低通滤波,滤去高频噪声和非周期弱信号,得到不规则变化的时间尺度为20~30 d环流和降水的低频分量。将最新数据投影到这种基于历史大数据分析得到的低频模态,可以得到精确的实时低频分量的演变。2013年ECAR的实时预测结果表明,20~30 d时间尺度的长江下游低频降水预测时效可达43 d左右,能较好地预测与暴雨过程对应的低频分量的非线性增长过程,预报能力明显优于自回归模型(Autoregressive model, AR)。这种通过构造主要低频率序列组成的扩展复数矩阵(Extended Complex Matrix, ECM)进行复数自回归(Complex Autoregressive model, CAR)建模的ECAR方法,也为展现气候系统内部分量之间相互作用的动力学过程提供了崭新的描述。

由于气候系统具有部分无法拆分还原、不确定性较大、难以无限逼近等复杂特征,在一定条件下即使在给定当前状态与控制条件的情况下,理论上系统下一步的状态也无法通过求解而准确地获得,从而较长时效的系统的行为也就难以被精确地预测。本质上难以对其直接控制,只能间接地对宏观现象(如大尺度低频流型的变化等)进行计算、解析、建

模实现知识的合成和预测。大数据可以代表全局,揭示出全局特有的宏观信息,这些综合信息是过去较小规模数据难以挖掘的。因此,充分利用开放流动的气象科学大数据资源,进一步识别有效关键数据,构造复数空间中的虚拟数据扩展有效数据规模,基于虚实数据之间的可能联系和协同演化新规律,由数据驱动构建各种更好地描述大气低频信息的简化的复数延伸期预测模型进行预测,是有效提高低频分量的延伸期预报精度的重要途径之一。它在一定程度上突破了物理世界资源有限的约束,实现气候系统中主要低频模态的多样性更有效的描述、解析和预测评估,从而减少预测的不确定性,将多样化归一,使复杂变简单。

2.3.3 多变量时滞回归/主成分复数自回归模型(Multivariate Lagged Regressive/ Principal Component-Complex Autoregressive model, MLR/PC-CAR)

为了显著延长极端天气事件预报的时效,基于降水低频分量和全球(或区域)环流低频主成分之间的相关关系及其变化,杨秋明^[78]构造了一种随时间变化的MLR和主成分复数自回归模型(PC-CAR)的混合预报方法(MLR/PC-CAR),对20~30 d振荡较强的13年夏季(6~8月)长江下游地区20~30 d降水低频分量进行延伸期逐日变化回报试验,在基于观测低频资料时滞关系的一组线性预测

方程(MLR)的降水低频分量30 d 预报和环流低频主成分的复数自回归模型的20 d 预报的基础上,用MLR/PC-CAR模型可将降水低频分量预报时效进一步延长20 d,达到50 d左右,显著延长了预报时效。随时间变化的MLR/PC-CAR混合预报方法能使预测模型更好地体现低频时滞相关,较准确地描述外强迫作用下的准线性低频动力过程的时间演变。这种复数时间序列统计方法,能在复平面上描述低频波的传播特征,得到比实空间波动更多的信息,更稳定地揭示波动的时间演变,有利于进一步延长环流ISO的预测时效。通过MLR和CAR 2种不同类型数据空间的预测模型的时间耦合,基于实数和复数据空间中环流低频变化的各种线性或非线性联系,较好地预测与环流主要低频模态密切相关的低频降水动态变化过程,体现了科学大数据与小数据之间的相互作用。

上述基于大量长序列的全球气象资料,建立随时间变化的实数和复数多变量时滞回归以及自回归预测方程(组)(即LFCF1.0,2.0和3.0),能较准确地描述外强迫影响下的准线性低频动力过程的演变,将长江下游地区20~30 d 低频降水分量的预报时效从原来的20 d左右显著延长到30~40 d以上,特别是20~30 d 振荡显著年份可达50 d左右,明显提高了夏半年长江下游地区暴雨(强降水)的延伸期预报能力。它们是不需要预先编入任何预定的规则,接近于无理论支撑的,基于数据中隐藏的多种时间滞后的相关关系,完全由动态数据驱动构建的预测模型(组)。这种方法跳出既定思维的框架,从具有复杂性、综合性、全球性的大量历史和实时资料找到能够更好地佐证现有预测和决策的数据。把数据激活,从静态数据变成动态数据,并不断更新关键的数据,适应主要相关关系变化的新常态,形成一个崭新的数字化的数据环境,关键信息不需要专家预先规定。基于大小数据的相互关系和物理世界与虚拟世界的无缝连接,有效地全面描述多样化的中纬度大气低频变化规律,能显著提高其影响区域的未来10~50 d 极端天气事件预测能力。

大数据预测完全依赖大数据来源,大数据模型则是通过寻找海量数据与算法的对应关系而确定,是具体的数据运算,并无抽象过程,不是经典理论模型和确定性或随机性数值计算模型以及经典统计模型。它的特征与价值体现在容量可扩充、类型可多样、动态可积累这3个维度上。大数据最大的价值在于通过数据的不断叠加而增加发现事物规律或关

联关系的可能性,通过多种观测数据增加获取的预测信息的增量来显著改进预测精度。充分利用气象科学大数据的资源,从不同角度去研究发现一些新的大气环流变化的多种不同时间尺度的(经典)统计规律,可以得到更多的表征延伸期极端天气变化的小数据变化信号。着眼大数据、分析小数据,揭示大小数据之间的可能联系和变化。在全球遥相关的框架下,分析东亚地区不同ISO型及其年际和年代际变化的差异,分析全球海温、雪盖等外强迫与ISO强度变化的时变相关,可以得到更多的不同区域极端天气和不同时间尺度的ISO之间的联系和变化的新规律。基于多尺度、多层次的资料中全球大气遥相关性(部分过程物理机制未知或不能用经典理论表示或各个组成部分之间相互有影响其因果关系具有多样性),以全球历史和实时观测大数据为样本,完全由数据驱动建立简化的随时间变化的延伸期预测模型(组),其延伸期预测精度和时效可以显著优于传统的小数据时代的动力模式或统计模式,而且其超前性是经典方式所无法比拟的。

此外,大数据是一定条件下的全体数据,并且数据量必须达到一定的规模,数据容量可扩充,是由小数据构成的。数据再大也是相对的,数据规模(时间和空间)是针对所要研究的问题而言。对于时间尺度是10~90 d的ISO和10~30 d的延伸期预报而言,历史资料序列大于 10^4 d,空间范围是全球范围内格点数大于 10^4 个的数据集,即可进行大数据分析得到相应的有预测能力的数据分析解。大数据分析就是要通过对各种类型小数据的分解、整合与集成处理,从中挖掘出潜在的有预测意义的信息。可以说,大数据是小数据的再次利用和多次重复利用。从经典的气候统计研究的角度提出气象科学大数据筛选、分类、聚类、规律发现、关联分析、因果探究等的基本思想,并在多学科知识与新技术的融合中构造新统计分析(小数据)方法也是进一步改进延伸期预报的一个重要方面。

2.4 其他方法

2.4.1 低频天气图方法

孙国武等^[79]引入了一种新的预报方法——低频天气图法。在低频天气图上,低频天气系统(低频气旋和低频反气旋),以及它们的活动特性可以被用来定性的确定南、北气流(冷、暖空气)的汇合,引起降水过程,并不强调分析真实大气中天气系统的活动规律。2008—2012年在上海市气候中心业务应用的结果表明,该方法对上海地区延伸期强降

水预报效果较好,且预报时效为 15~45 d,该方法可以在延伸期预报中应用。当关键区低频系统活跃时,延伸期极端天气预报时效较长。

2.4.2 神经网络模型方法

气候系统是复杂的非线性系统,且各因素的相互作用具有很大的不确定性,很多情况下缺乏充足的数据,致灾机理也不太明确,传统的数理模型很难圆满地解决这类问题。人工神经网络具有较强的自组织、自适应和自学习能力,可以在不必完全弄清极端天气事件变化机理的情况下,实现变量与自变量的非线性映射,其容错性具有一定的弥补信息不全的能力,可从不完整的样本中提取信息特征(小数据)对问题进行预测评估,人工神经网络的这些特点决定其在延伸期预报中的较大潜力。Love 等^[80]用神经网络模型预报 MJO(热带 ISO)的延伸期变化,改进了预报精度。Chattopadhyay 等^[81]和 Borah 等^[82]用自组织神经网络(Self-Organizing Map, SOM)识别热带印度洋地区对流 ISO 位相的非线性变化型,作印度夏季风活跃(中断)期的 3~4 周预报,预测准确率有明显提高。当 ISO 非线性空间模态较显著及其与影响区域的极端天气之间的非线性联系增强时,这种方法预报精度稳定。

2.4.3 基于灰参数的微分方程模型方法

由于控制延伸期天气变化的动力过程具有一定的不确定性,其过程部分已知,部分未知。针对获取的部分的不规则变化的有效数据,通过适当的数据生成和变换,得到极端天气时间变化的新序列,这种小数据可以作为延伸期天气变化的显著信号。对于这种生成的新序列,考虑建立灰参数的微分方程模型模拟其动态变化过程,也是作延伸期天气过程预报的一种较好的方法。杨秋明^[20]建立了含灰参数的非线性微分方程作南京地区延伸期冷空气活动的预测试验,取得了较好效果,预报时效可达 10~20 d。

2.4.4 基于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的统计方法

EMD 可将不同时间尺度的波动从原信号中逐级分离出来,它适合于非平稳、非线性信号的分解,在部分情况下是从观测资料中分离 ISO 信号的另一种较好方法。Love 等^[83]用改进的 EMD 提取 MJO 信号(一定程度上抑制了 EMD 的边界效应),建立 VARMA 时间序列模型,作实时 MJO 延伸期的变化的预报。梁萍等^[84]发现利用或集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, 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 30 d 对江淮地区汛期降水量进行延伸期预报。但是由于非平稳信号的复杂多样性,EMD 算法是基于经验的方法,仍然缺乏严格的理论基础,EMD/EEMD 分解的不稳定性仍较明显。如何更好地克服边界效应,减少实时 EMD 分解误差是尚需深入研究的问题。

2.4.5 经验波传播(Empirical Wave Propagation, EWP)方法

对大尺度观测资料分解并识别主要低频波动及演变的 EWP^[85]方法,也是预报影响区域中极端天气的大尺度波动 10 d 以上变化趋势的有用方法。它是一种解析预报方法,即对给定的初始时刻,利用傅里叶分析技术,采用纬圈谐波展开方法,把大气波动分解为各种谐波的叠加,并根据已经得到的观测资料计算出大气波动的传播速度和振幅,对未来预报时刻进行外推;然后,对未来大气波动进行傅立叶变换,即可得到未来大气变化的解析预报。当 MJO 较活跃时,这种方法可以预报未来 20~40 d MJO 位相和振幅的变化,为对应的影响区域延伸期天气变化预报提供部分重要依据。

2.4.6 大气变量物理分解法

目前 ECMWF 的中期数值模式 T1279L91 可用时效已达 10 d,对 10~15 d 振荡预报能力有较大提高,为 10 d 左右的极端天气中期预报提供了有效的预报信号,更长时间尺度振荡型的预报需逐步改进。为了延长极端天气事件预报的时效和准确率,钱维宏^[86]提出大气变量物理分解法,把观测的多时空尺度变化的气象资料中正常的日循环变化和年循环季节变化的气候态分量从观测的大气变量中分离掉,提取出对极端降水或气温事件有指示意义的大气扰动分量信号,用于分析强降水、热浪和低温出现时的大气变量扰动分布,并追踪区域极端降水或气温事件的早期信号。这种方法把大气变量分解为瞬变气候与瞬变扰动 2 个部分,用瞬变扰动建立与异常天气之间的联系;然后,结合 ECMWF 的 10 d 预报格点资料,可以提前 10~20 d 预报相关影响区域极端天气的变化。当早期信号显著并且 ECMWF 环流的扰动分量的中期预报稳定时,预报效果较好。

2.4.7 综合集成方法

采用定性和定量相结合的方法,对几种方法进行综合集成,可以更好地体现各种低频信号对不同区域极端天气形成的作用的差异。这时可以采用权重线性集成、线性回归集成等方法进行集成^[87],需

注意各种方法的独立性问题,更有效地综合不同方法得到表征极端天气变化的信号(小数据),使得延伸期预报结果更加合理,预报稳定性有所提高。

3 讨论和展望

10~30 d 延伸期天气预报对我国抗旱防汛、农业、电力生产、旅游、高速铁路、航海、航天等与气候变化密切相关的产业行业具有较强提示和指导意义。虽然延伸期预报难度很大,但这个时间段的预报存在巨大的社会需求。在识别季节内时间尺度的各种可预报性的信号及其时空变化规律的基础上,近20年来关于10~30 d 延伸期预报的集合数值预报方法、经典统计方法研究以及近5年来大数据方法研究有了新的进展。由数据分析新技术产生多种创新性的数据产品,并通过数据和模型的集成,明显延长了大尺度平均环流和各种ISO的预报时效。

气象多平台探测数据,尤其是遥感数据;气象模式各种输出,尤其是同化技术让更多不同来源数据通过模式得到各种要素场,更使动态变化的气象信息在延伸期预报中发挥着重要影响(如2014年EC-MWF每天获得130个资料源的3亿条观测信息,数据档案可直接检索的数据信息达到 10^{14} 条)。在理论基础尚不成熟的情况下,制作10~30 d 的延伸期预报面临着巨大挑战。单一的经典分析(小数据)方法已经不能全面、高效地胜任这些大数据分析的工作,采用交叉和综合多种数据分析方法和技术,从海量数据中可以提取出更全面的反映各种主要低频模态动态变化信息的部分有效数据。这些小数据及其变化,可以作为新的延伸期区域极端天气变化信号。

对于越来越多的各种历史和实时观测数据以及再分析和模式预报数据及其变化,将其去冗分类、去粗取精,把大数据变成小数据,基于隐藏在大数据中的主要相关关系及其时间变化建立简化线性模型(组),预测影响区域极端天气的主要低频分量的变化,可以显著延长预报时效,其中大数据理念和背景下的观测资料的更新(动态数据)是构建时变简化的低频分量预测模型并获得更好预报的最主要的途径之一,它能适应复杂系统中各主要分量之间相关关系变化的新常态。

基于大数据的延伸期预报技术的发展决定10 d 以上的天气预报精度的改进,从大量历史和实时资料中找到能较好地佐证现有预测和决策的数据是需要研究的主要问题。基于PBEP是延伸期数值预报有效的方法和途径之一,它将可预报性、数值模式、

历史资料和集合预报方法有机的联系起来,但预测结果对模式预测能力仍有一定依赖性。数值模式是大气实际行为的一种近似,现有的模式离足够精确还相距甚远(近10年来,对MJO的预测能力逐步提高,但对两半球热带外20~30 d 振荡等模态的模拟预测能力仍然十分有限),而历史资料就是这些数值模式中可预报变量的部分特解之一。所以,需要从大量历史资料中,对相似年份各系统之间相关关系的空间分布的多样性及其年际变化等进行多种视角的综合分析,才能更好地从不同历史相似提供有效的各种误差信息,减小模式的不确定性,延长实时集合预报时效。此外,注重有质量的信息片段,并不断更新关键的数据,才能提高预测的稳定性。例如,对于基于观测资料的实时ISO的延伸期预报,由于用传统的滤波方法提取ISO特征的过程中会在序列的前后各损失10 d 左右的资料,需深入研究抑制滤波边界效应的综合数据分析方法,减小初始时间滤波值的误差,使得各种经典统计模型或大数据简化模型(如LFCF1.0,2.0和3.0等)的低频分量变化预报时效稳定延长。

由于不同时段中不同地区的极端天气气候事件与不同时间尺度的ISO型的关联有明显差异,需针对特定的振荡特性及其变化构建延伸预报方案。对于东亚地区,需跳出既定思维的框架,探索出适合这个区域气候特点的预测方法。例如,对于长江下游地区,夏季强降水与大气20~30 d 振荡密切相关(如SCGT和TWP型等),这些振荡模态具有全球特征;华北地区10~20 d 振荡与7~8月强降水的相关更显著,而华南地区,10~20 d,20~30 d 和30~60 d 振荡均对4~6月强降水的形成起到重要作用;另外,MJO与春夏季长江以南地区持续强降水、秋冬季云南地区持续降水有显著相关。因此,采用各种大数据分析技术,定性和定量相结合,可以更详细地描述这些外强迫作用下的ISO演变的多样性及其年际变化,提取更多的低频变化信息。不同的方法,当数据规模小的时候,分析预测性能往往有较大差异;但当数据规模增大时,性能都会逐渐提升且差异逐渐减小。在实时延伸期预报方法的研究和应用中,需要进一步改进从观测资料中分离出的不同类型ISO变化特征多样性的识别。选择特征比选择算法更重要,较好的特征会带来更好的分类和预测结果。因此,可以根据可视化分析和数据挖掘的结果对ISO与极端天气事件相关的时间尺度选择性等问题的深入理解,提取各种低频振荡的多样化变化特

征,进一步提高预测性分析能力(Predictive Analytic Capabilities, PAC)。此外,还需要从不同视角对关键数据进行有针对性的归纳和分析,不断从动态数据中获得新信息和知识,构成动态变化的知识体系,发现隐藏在大量数据中的多层次相关过程。即使部分机制不能用确定的物理过程描述,没有被理论推导或因果关系存在不确定性和多样性,也能针对一定时间尺度的低频分量,建立完全由数据驱动的、随时间变化的近似简化模型(组)以及不同模型间的简单耦合,得到更精确的数据分析解,显著延长延伸期天气预报时效。同时,通过动态数据分析,还能从不同角度进一步揭示天气—气候相互作用机制,改进月季气候预报精度,加深对气候系统年际和年代变化规律的认识。

参考文献(References):

- [1] Hoskins B. The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: A stimulus for our science [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139: 573-584.
- [2] Lorenz E N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion[J]. *Tellus*, 1969, 21: 1-19.
- [3] 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.
- [4] Tracton M S, Mo K, Chen W, et al. Dynamical Extended Range Forecasting (DERF) at the National Meteorological Center [J]. *Monthly Weather Review*, 1989, 117: 1 604-1 635.
- [5] Palmer T N, Brankovic C, Molteni F, et al. Extended-range predictions with ECMWF models: Interannual variability in operational model integrations [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1990, 116: 799-834.
- [6] Vitart F. Monthly forecasting at ECMWF [J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132: 2 761-2 779.
- [7] Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. The NCEP climate forecast system [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19: 3 483-3 517.
- [8] Chao Jiping, Ji Jinjun, Zhu Zhihui, et al. Filtering method for the long range numerical weather prediction [J]. *Science in China*, 1979, 9(1): 75-84. [巢纪平, 季劲钧, 朱志辉, 等. 长期数值天气预报的滤波方法 [J]. *中国科学*, 1979, 9(1): 75-84.]
- [9] Shi Jiuen. The application and uncertainty of the probability and statistics in meteorology [J]. *Chinese Journal of Applied Probability and Statistics*, 1981, 4: 26-37. [史久恩. 概率统计在气象学中的应用和问题 [J]. *应用概率统计* 1981, 4: 26-37.]
- [10] Zheng Zhihai. Review of the progress of dynamical extended-range forecasting studies [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(1): 25-30. [郑志海. 月动力延伸预报研究进展回顾 [J]. *气象科技进展*, 2013, 3(1): 25-30.]
- [11] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40 ~ 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1971, 28: 702-708.
- [12] Li Chongyin. Recent progress in atmospheric intraseasonal oscillation research [J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(7): 734-741. [李崇银. 大气季节内振荡研究的新进展 [J]. *自然科学进展*, 2004, 14(7): 734-741.]
- [13] Waliser D E, Lau K M, Stern W, et al. Potential predictability of the Madden-Julian oscillation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(1): 33-50.
- [14] Wuxi Meteorological Station in Jiangsu Province. Middle and long term rainfall forecast by the important omen for the different length [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1966, 36(1): 54-65. [江苏省无锡县气象服务站. 以不同长度的前期征兆制作中长期降水预报 [J]. *气象学报*, 1966, 36(1): 54-65.]
- [15] Yang Jianchu, Gui Peilan. On the classification of the long-term weather processes [J]. *Meteorological Monthly*, 1979, 4(6): 14-18. [杨鉴初, 归佩兰. 关于长期天气过程的划分 [J]. *气象*, 1979, 4(6): 14-18.]
- [16] Ren Zhenqiu, Zhang Suqin. Verification on the predictive capability of long-term processes for severe rainstorm by astronomical factors [M] // Symposium on Meteorology and Astronomy. Beijing: China Meteorological Press, 1986: 196-198. [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 [M] // 天文气象学术讨论会文集. 北京: 气象出版社, 1986: 196-198.]
- [17] Ren Zhenqiu, Zhang Suqin, Li Songqin. Verification on the predictive capability of the dry-hot weather processes in North China during flood season in 1989 [J]. *Meteorological Monthly*, 1990, 16(5): 43-45. [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 [J]. *气象*, 1990, 16(5): 43-45.]
- [18] Sun Guowu, Chen Baode. Oscillation characteristics and meridional propagation of atmospheric low frequency waves over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1988, 12(3): 250-256. [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.]
- [19] Zhang Jijia, Sun Guowu, Chen Baode. Study on the Atmospheric Low Frequency Variation over the Qinghai-Xizang Plateau [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991. [章基嘉, 孙国武, 陈葆德. 青藏高原大气低频变化的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1991.]
- [20] Yang Qiuming. The fitting for grey nonlinear differential equation [J]. *Applied Mathematics*, 1990, 3(3): 60-67. [杨秋明. 非线性灰色微分方程的拟合 [J]. *应用数学*, 1990, 3(3): 60-67.]
- [21] Yang Qiuming. Forecast experiments for low frequency oscillation of tropical circulation in west Pacific using principal oscillation pattern analysis [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1998, 9(3): 345-351. [杨秋明. 西太平洋热带地区环流低频变化的主振荡型预测试验 [J]. *应用气象学报*, 1998, 9(3): 345-351.]
- [22] He Jinhai, Liang Ping, Sun Guowu. Consideration on extended-

- range forecast and its application study[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(1): 11-17. [何金海, 梁萍, 孙国武. 延伸期预报的思考及其应用研究进展[J]. 气象科技进展, 2013, 3(1): 11-17.]
- [23] Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, *et al.* Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts [J]. *Science*, 2003, 301: 636-640.
- [24] Overpeck J T, Meehl G A, Bony S, *et al.* Dealing with data: Climate data challenges in the 21st century[J]. *Science*, 2011, 331: 700-702.
- [25] Sue N. Big data: The Harvard computers [J]. *Nature*, 2008, 455: 36-37.
- [26] Shukla J, Gutzler D S. Interannual variability and predictability of 500 mb geopotential heights over the northern hemisphere [J]. *Monthly Weather Review*, 1983, 111: 1 273-1 279.
- [27] Li J P, Ding R Q. Temporal-spatial distribution of atmospheric predictability limit by local dynamical analogs [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 3 265-3 283.
- [28] Chou Jifan, Zheng Zhihai, Sun Shupeng. The think about 10 ~ 30 days extended range numerical weather prediction strategy facing the atmosphere chaos [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2010, 30(5): 569-573. [丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 10~30 d 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.]
- [29] Ding Q, Wang B. Circumglobal teleconnection in northern hemisphere summer [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18: 3 482-3 505.
- [30] Yang Qiuming. The 20-30-day oscillation of the global circulation and heavy precipitation over the lower reaches of the Yangtze River Valley [J]. *Science in China (Series D)*, 2009, 52(10): 1 485-1 501, doi:10.1007/s11430-009-0156-2. [杨秋明. 全球环流 20~30 d 振荡与长江下游强降水 [J]. 中国科学: D 辑, 2009, 39(11): 1 515-1 529.]
- [31] Miller M, Buizza R, Haseler J, *et al.* Increased resolution in the ECMWF deterministic and ensemble prediction systems [J]. *ECMWF Newsl*, 2010, 124: 10-16.
- [32] Vitart F, Molteni F. Simulation of the Madden-Julian oscillation and its teleconnections in the ECMWF forecast system [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 136: 842-855.
- [33] Miura H, Satoh M, Nasuno T, *et al.* A Madden-Julian Oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model [J]. *Science*, 2007, 318: 1 763-1 765.
- [34] Jones C, Carvalho L M V, Liebmann B. Forecast skill of the South American monsoon system [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25: 1 883-1 889.
- [35] Lee S S, Wang Bin, Waliser D E, *et al.* Predictability and prediction skill of the boreal summer intraseasonal oscillation in the intraseasonal variability hindcast experiment [J]. *Climate Dynamics*, 2015, doi 10.1007/s00382-014-2461-5.
- [36] Zhu H, Wheeler M C, Sobel A H, *et al.* Seamless precipitation prediction skill in the tropics and extratropics from a global model [J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 1 556-1 569.
- [37] Alessandri A, Borrelli A, Cherchi A, *et al.* Prediction of Indian summer monsoon onset using dynamical subseasonal forecasts: Effects of realistic initialization of the atmosphere [J]. *Monthly Weather Review*, 2015, 143: 778-793.
- [38] Palmer T, Dübén P, McNamara H. Stochastic modelling and energy efficient computing for weather and climate prediction [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2014, 372: 20140118.
- [39] Wang Qiguang, Feng Guolin, Zheng Zhihai, *et al.* The preliminary analysis of the procedures of extracting predictable components in numerical model of Lorenz system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(3): 539-550. [王启光, 封国林, 郑志海, 等. 基于 Lorenz 系统提取数值模式可预报分量的初步试验 [J]. 大气科学, 2012, 36(3): 539-550.]
- [40] Zheng Zhihai, Huang Jianping, Feng Guolin, *et al.* Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components [J]. *Science in China (Series D)*, 2013, 56: 878-889. [郑志海, 黄建平, 封国林, 等. 延伸期可预报分量的预报方案和策略 [J]. 中国科学: D 辑, 2013, 43(4): 594-605.]
- [41] Wang Kuo, Feng Guolin, Sun Shupeng, *et al.* Study of the stable components in extended-range forecasting for the coming 10-30 days during the snow storm event in January 2008 [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(10): 109-201. [王阔, 封国林, 孙树鹏, 等. 基于 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻事件 10~30 天延伸期稳定分量的研究 [J]. 物理学报, 2012, 61(10): 109-201.]
- [42] Zheng Zhihai, Feng Guolin, Chou Jifan, *et al.* Compression for freedom degree in numerical weather prediction the error analogy [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(4): 139-148. [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(4): 139-148.]
- [43] Zheng Zhihai, Feng Guolin, Huang Jianping, *et al.* Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(19): 199-203. [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 [J]. 物理学报, 2012, 61(19): 199-203.]
- [44] Chen Guanjun, Wei Fengying. An extended-range forecast method for the persistent heavy rainfall over the Yangtze-Huaihe River valley in summer based on the low-frequency oscillation characteristics [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2012, 36(3): 633-644. [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 [J]. 大气科学, 2012, 36(3): 633-644.]
- [45] Pattanaik D R, Ashok K D. Prospect of application of extended range forecast in water resource management: A case study over the Mahanadi River basin [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75, doi: 10.1007/s11069-015-1610-4.
- [46] Li Weijing, Chen Lijuan. Research on reexplanation and reanalysis method of dynamical extended range forecast products [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 57(3): 338-345. [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.]
- [47] Jones C, Carvalho L M V, Higgins W, *et al.* A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17: 2 078-2 095.
- [48] 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): 1 940-1 956.
- [49] Wheeler M C, 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): 1 917-1 932.
- [50] Ju Jianghua, Liu Yiling, Li Ting, *et al.* A new method for predicting summer intra-seasonal oscillation over the South China Sea [J]. *Journal Tropical Meteorology*, 2010, 26(5): 521-525. [琚建华, 刘一伶, 李汀, 等. 预测夏季南海季节内振荡的一种新方法[J]. 热带气象学报, 2010, 26(5): 521-525.]
- [51] Cassou C. Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation [J]. *Nature*, 2008, 455: 523-527.
- [52] Leroy A, Wheeler M C. Statistical prediction of weekly tropical cyclone activity in the Southern Hemisphere[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 3 637-3 654.
- [53] Kang I S, Kim H M. Assessment of MJO Predictability for boreal winter with various statistical and dynamical models[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 2 368-2 378.
- [54] Lo F, Hendon H. Empirical extended-range prediction of the Madden-Julian Oscillation[J]. *Monthly Weather Review*, 2000, 128: 2 528-2 543.
- [55] Nathaniel C J, Dan C C, Steven B F, *et al.* Skillful wintertime North American temperature forecasts out to 4 weeks based on the state of ENSO and the MJO[J]. *Weather and Forecasting*, 2014, 29(1): 23-38.
- [56] Webster P J, Hoyos C. Prediction of monsoon rainfall and river discharge on 15 ~ 30-day time scales[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85: 1 745-1 765.
- [57] Goswami B N, Xavier P. Potential predictability and extended range prediction of Indian summer monsoon breaks[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30 (18): 196, doi: 10. 1029/2003GL1017, 1810.
- [58] Rodney M, Lin H, Derome J. Subseasonal prediction of wintertime North American surface air temperature during strong MJO events[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 2 897-2 909.
- [59] Yao W, Lin H, Derome J. Submonthly forecasting of winter surface air temperature in North America based on organized tropical convection[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2011, 49: 51-60.
- [60] Maharaj E A, Wheeler M C. Forecasting an index of the Madden-Julian Oscillation[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 1 611-1 618.
- [61] Zhu Hongrui, Jiang Zhihong, Zhang Qin, *et al.* MJO index forecasting based on SSA-AR model[J]. *Journal Tropical Meteorology*, 2010, 26(3): 371-378. [朱红蕊, 江志红, 张勤, 等. 基于 SSA-AR 方法的 MJO 指数预报模型试验[J]. 热带气象学报, 2010, 26(3): 371-378.]
- [62] 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): 1 918-1 939.
- [63] Hsu P-C, Li T, You L, *et al.* A spatial-temporal projection method for 10 ~ 30-day forecast of heavy rainfall in Southern China [J]. *Climate Dynamics*, 2014, doi: 10. 1007/s00382-014-22154.
- [64] 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[J]. *Climate Dynamics*, 1990, 4: 175-190.
- [65] Yang Qiuming. Extended range forecast experiments of the low frequency circulation for the period of the heavy precipitation over the lower reaches of the Yangtze River Valley in mid-July 2011 [J]. *Science and Technology Review*, 2011, 29(32): 60-66. [杨秋明. 2011 年 7 月中旬长江下游地区强降水期间低频环流延伸期预报试验[J]. 科技导报, 2011, 29(32): 60-66.]
- [66] Yang Qiuming, Li Yi, Song Juan, *et al.* Extended-range forecasts of the principal 20 ~ 30-day oscillation of the circulation over East Asia during the summer of 2002[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 26(5): 554-565. [杨秋明, 李熠, 宋娟, 等. 2002 年夏季东亚地区环流 20 ~ 30 d 主振荡型延伸期预报研究[J]. 气象学报, 2012, 70(5): 1 045-1 054.]
- [67] Gu Dejun, Ji Zhongping, Lin Ailan, *et al.* The oscillation of Guangzhou daily precipitation and its simple harmonic wave model for extended-range forecast[J]. *Journal Tropical Meteorology*, 2013, 29(6): 899-906. [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[J]. 热带气象学报, 2013, 29(6): 899-906.]
- [68] Mo K C. Adaptive filtering and prediction of intraseasonal oscillations[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129: 802-817.
- [69] Newman M, Prashant D S, Christopher R, *et al.* A study of sub-seasonal predictability[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131: 1 715-1 732.
- [70] Cavanaugh N R, Teddy A, Subramanian A, *et al.* The skill of atmospheric linear inverse models in hindcasting the Madden-Julian Oscillation [J]. *Climate Dynamics*, 2014, doi: 10. 1007/s00382-014-2181-x.
- [71] Kondrashov D, Chekroun M D, Robertson A W, *et al.* Low-order stochastic model and “past-noise forecasting” of the Madden-Julian Oscillation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40: 5 305-5 310.
- [72] Wang L, Ting Mingfang, Chapman David, *et al.* Prediction of northern summer low frequency circulation using a high order vector auto regressive model[J]. *Climate Dynamics*, 2015, doi: 10. 1007/s00382-015-2607-0.
- [73] Zhang Ren, Hong Mei, Liu Kefeng, *et al.* Dynamic model reconstruction and corresponding abnormal characteristics anatomy of subtropical high based on actual data series samples[J]. *Advances*

- in *Earth Science*, 2014, 29:1 250-1 261. [张韧,洪梅,刘科峰,等.基于副热带高压异常活动个例的动力模型重构与变异性剖析[J].地球科学进展,2014,29:1 250-1 261.]
- [74] Hong Mei, Chen Xi, Zhang Ren, *et al.* The analysis of impact factors of abnormal Western Pacific subtropical high years based on fuzzy systems and the dynamical forecast model inversion[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(2):355-367. [洪梅,陈希,张韧,等.基于模糊系统的西太平洋副热带高压异常年份的影响因子检测分析和动力预报模型反演[J].气象学报,2015,73(2):355-367.]
- [75] Xavier P K, Goswami B N. An analog method for real-time forecasting of summer monsoon subseasonal variability[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(12):4 149-4 160.
- [76] Yang Qiuming. Multivariable lagged regressive model of low frequency rains over the lower reaches of Yangtze River Valley for extended-range forecast in the early summer of 2013[J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(7):881-889. [杨秋明.2013年初夏长江下游降水低频分量延伸期预报的多变量时滞回归模型[J].气象,2015,41(7):881-889.]
- [77] Yang Qiuming. Extended complex autoregressive model of low frequency rainfalls over the lower reaches of Yangtze River valley for extended-range forecast in 2013[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63, doi: 10.7498/aps.63.199202. [杨秋明.2013年长江下游降水低频分量延伸期预报的扩展复数自回归模型[J].物理学报,2014,63,doi: 10.7498/aps.63.199202.]
- [78] Yang Qiuming. Study of the method of the extended-range forecast for the low frequency rainfall over the lower reaches of the Yangtze River in summer based on the 20-30 day oscillation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(3):494-507. [杨秋明.基于20~30 d 振荡的长江下游地区夏季低频降水延伸期预报方法研究[J].气象学报,2014,72(3):494-507.]
- [79] Sun Guowu, Li Zhenkun, Xin Fei, *et al.* Low-frequency synoptic map: New method for extended range forecasting[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2013, 37(4):945-954. [孙国武,李震坤,信飞,等.延伸期天气过程预报的一种新方法——低频天气图[J].大气科学,2013,37(4):945-954.]
- [80] Love B S, Matthews A J. Real-time localised forecasting of the Madden-Julian Oscillation using neural network models[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2009, 135:1 471-1 483.
- [81] Chattopadhyay R, Sahai A K, Goswami B N. Objective identification of nonlinear convectively coupled phases of monsoon intraseasonal oscillation: Implications for prediction[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65:1 549-1 569.
- [82] Borah N, Sahai A K, Chattopadhyay R, *et al.* A self-organizing map-based ensemble forecast system for extended range prediction of active/break cycles of Indian summer monsoon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(16):9 022-9 034, doi: 10.1002/jgrd.50688.
- [83] Love B S, Matthews A J, Janacek G J. Real-time extraction of the Madden-Julian oscillation using empirical mode decomposition and statistical forecasting with a VARMA model[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(20):5 318-5 335.
- [84] Liang Ping, Ding Yihui. Extended range forecast experiment based on intraseasonal oscillation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2012, 36(1):102-116. [梁萍,丁一汇.基于季节内振荡的延伸期预报试验[J].大气科学,2012,36(1):102-116.]
- [85] Qin J, Van den Dool H M. Simple extension of an NWP model[J]. *Monthly Weather Review*, 1996, 124: 277-287.
- [86] Qian Weihong. Physical decomposition principle of regional-scale atmospheric transient anomaly[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(5):1 439-1 448. [钱维宏.天气尺度瞬变扰动的物理解析原理[J].地球物理学报,2012,55(5):1 439-1 448.]
- [87] Huang Jiayou. *Meteorological Statistics and Forecast Method* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004. [黄嘉佑.气象统计与预报方法[M].北京:气象出版社,2004.]
- [88] Yang Qiuming, Song Juan, Li Yi, *et al.* Review of impacts of the global atmospheric intraseasonal oscillation on the continuous heavy rainfall over the Yangtze River valley[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(8):876-884. [杨秋明,宋娟,李熠,等.全球大气季节内振荡对长江流域持续暴雨影响的研究进展[J].地球科学进展,2012,27(8):876-884.]
- [89] Thompson D W J, Barnes E A. Periodic variability in the large-scale Southern Hemisphere atmospheric circulation[J]. *Science*, 2014, 343: 641-645.
- [90] Thompson D W J, Woodworth J D. Barotropic and baroclinic annular variability in the Southern Hemisphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71:1 480-1 493.
- [91] Gao Tao, Xie Li'an. Study on progress of trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5):577-589. [高涛,谢立安.近50年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J].地球科学进展,2014,29(5):577-589.]
- [92] Shao Xie, Huang Ping, Huang Ronghui. A review of the South China Sea summer monsoon onset[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(10):1 126-1 137. [邵颀,黄平,黄荣辉.南海夏季季风爆发的研究进展[J].地球科学进展,2014,29(10):1 126-1 137.]
- [93] Huang Shicheng, Yang Qiuming, Li Yi. 10-30 d Extended-range low frequency rainfall real-time forecast for lower Yangtze region based on time-varying key area and multivariable lagged regressive model[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(22):1-6. [黄世成,杨秋明,李熠.基于时变关键区和时滞多变量的长江下游10~30 d 低频降水实时预报[J].科学技术与工程,2014,14(22):1-6.]

Prospects and Progresses in the Research of the Methods for 10 ~ 30 Days Extended-range Weather Forecast

Yang Qiuming

(*Jiangsu Meteorological Institute, Nanjing 210009, China*)

Abstract: The 10 ~ 30 days extended-range weather forecast has attracted great attention from academic communities around the world, and this forecast plays a significant role in the decision-making process of disaster prevention and reduction. The extended-range forecast shall be combined with the initial meteorological conditions and influencing factors of ocean, atmosphere and climate, in which the observation data feature complexity, comprehensiveness and globalization. All of these scientific big data reflect and present complicated natural phenomena and relations, and are characterized by high data dependency and multiple data attributes, as well as extremely complicated forecast processes. Several methods involving extended-range weather forecast are analyzed from the numerical modeling, statistics and big data methods based on the intraseasonal oscillation and other methods, and the advantages and disadvantages of various types of prediction methods are also compared. Next, the scientific problems in the field of extended-range weather forecast are discussed and summarized. Finally, this paper gives a future prospective of the research for the methods of extended-range weather forecast and its applications.

Key words: Extended-range weather forecast methods; Ensemble forecast; Statistics forecast; Big data forecast; Predictability.

2015 年第 10 期要目

辉煌的成就,更高的使命——写在第 33 届国际地理学大会在北京召开之前 陆大道
 AquaCrop 作物模型应用研究进展 王连喜,吴建生,李 琪,顾嘉熠,薛红喜
 中国风云卫星与海洋卫星近海 SST 资料融合技术及应用研究 苗春生,程 远,王坚红,王兴
 岩石风化碳汇研究进展:基于 IPCC 第五次气候变化评估报告的分析 蒲俊兵,蒋忠诚,袁道先,章程
 深水湖泊增氧理论与技术研究进展 兰 晨,陈敬安,曾 艳,郭建阳,张润宇,王敬富,杨海全,计永雪