

延伸期过程预报预测技术及应用

陈伯民¹ 梁萍¹ 信飞¹ 周坤¹ 李震坤¹ 孙国武^{1,2} 董广涛¹

(1 上海市气候中心, 上海 200030; 2 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020)

摘要: 对自主研发的低频图方法和低频波方法、延伸期过程预测客观检验指标(Zs和Cs评分)、月内重要过程与趋势预测系统(MAPFS 2.1)及其推广应用情况做了介绍。对近4年(2013—2016年)上海地区汛期延伸期强降水过程业务预测和近2年(2015—2016年)冬季延伸期强降温过程业务预测进行了客观检验。结果显示,汛期强降水过程、冬半年强降温过程(强冷空气过程)预测准确率分别为67.3%和43.2%,Zs/Cs评分分别为0.153/0.130、0.139/0.09。低频图方法对各年汛期最强降水过程均给出了较好的预测,说明预测方法具有一定的预测潜力。基于MJO(Madden-Julian Oscillation)活动的上海汛期逐候降水趋势预测方法2年(2014—2015年)的预测结果Ps评分平均达到58分,为汛期延伸期强降水过程预测和入梅、出梅延伸期预测提供了较有价值的预测背景信息。

关键词: 延伸期过程预测, 低频图预测方法, 低频波预测方法, 延伸期过程预测客观检验指标, MAPFS系统

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.010

The Extended-Range Process Prediction Technique and Application

Chen Bomin¹, Liang Ping¹, Xin Fei¹, Zhou Kun¹, Li Zhenkun¹, Sun Guowu^{1,2}, Dong Guangtao¹

(1 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

2 Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020)

Abstract: This paper introduces the Method on Low-Frequency Synoptic Weather Map and on low-frequency wave in key region, the verifying indices for extended-range weather process forecast, the related operational system(MAPFS 2.1) and their promotional application, and further works for verifying of the heavy rainfall processes during flood seasons in 2013-2016 and the heavy cooling processes (cold air processes) during winters in 2015-2016. The results indicate that the accuracy rate of the heavy rainfall process forecasts and of the strong cooling process forecasts were about percent of 67.3 and 43.2 respectively, and correspondingly their scores of Zs and Cs reached 0.153/0.130 and 0.139/0.09 in turn. The Low-frequency synoptic weather map method accurately forecasted the heaviest precipitation process for each year in 2013-2016. This suggested that the approaches have the advantage for predicting the extended-range weather process indeed and have tremendous room for improvement. The MJO-activity -depending approach of the pentad precipitation anomaly over Shanghai during flood seasons made a delightful encouraging performance for 2014-2015 with Ps score of 58 and supplied the valuable predicting background in determination of extended-range weather process and the beginning and the end of Meiyu rain.

Keywords: extend-range weather process prediction, method of low-frequency synoptic weather map, method of Low-frequency wave in key region, skill score of extend-range weather process forecast, MAPFS system

收稿日期: 2017年9月4日; 修回日期: 2017年10月31日
第一作者: 陈伯民(1963—), Email: chenbm1@163.com
资助信息: 中国气象局现代气候业务发展与改革工作及中国气象局气象新技术推广项目(CMAT G2008M22); 国家科技支撑项目(2009BAC51B05); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306030和GYHY201006020); 中国气象局关键技术集成与应用重点项目预报预测检验业务专项(CMAGJ2014Z04); 中国气象局关键技术发展专项(YBGJXM(2017)04); 中国气象局青年英才专项; 上海自然科学基金项目(12ZR1449400); 中国气象局次季节至季节气候预测和气候系统模式创新团队攻关任务; 上海市气象局研究型业务专项(YJ201604)

0 引言

随着经济社会的发展, 各界对延伸期及次季节尺度可用预报需求越来越迫切^[1-3]。然而, 受资料、模式及理论等多方面因素的制约, 即使是延伸期(10~30 d)时段的预报, 水平也一直不高。以欧洲中期预报中心(ECMWF)模式预报时效为例, 其逐日形势场(这里指500 hPa高度场)预报可用时效仅10 d左右^[4-8], 尚明显低于理论上的逐日可预报上限^[9-12]。虽然国内外学者在改进资料水平^[13-15]、预报模式性能^[16-18]以及动力—统计结合等策略运用^[19-20]等方面不懈努力并不断取得进展, 但数值模式目前直接

给出的要素可用预报时效仍相当短,尚无法直接提供可用的延伸期天气过程预报信息^[21-22]。为应对迫切的服务需求,国内学者和业务单位在延伸期天气过程预报预测领域持续努力,取得可喜成效^[23-47],其中包括上海市气象局/上海市气候中心近10年的工作^[36-47]。“十二五”以来,上海市气象局/上海市气候中心又通过牵头中国气象局现代气候业务发展与改革重点任务和上海率先实现气象现代化等建设工作,形成了以低频图/低频波预测方法为主,以MJO信号和数值模式预报结果为背景信息,聚焦延伸期重要天气过程的综合预测方法,同时开发了针对延伸期重要天气过程预测的客观检验指标和业务系统一月内重要过程与趋势预测系统(Monthly Anomaly and Process Forecast System, MAPFS)并投入业务化应用^[47]。这些工作进一步完善了上海无缝隙预报预测业务,也有力推动了全国省级延伸期重要过程预测业务的建设^[47-52]。本文是对2013年相关业务规定发布以来上海延伸期过程业务预测结果客观检验及技术推广成效的阶段性总结。

1 预测方法和资料

1.1 预测方法

1.1.1 汛期延伸期强降水过程和冬半年强降温过程预测方法

虽然以预报天气系统(或称天气过程)行为为主要预报对象的确定性预报存在上限(理论上约为2周)^[9-12],但天气过程受环流的缓变分量,如基本气流、超长波、季节内振荡(MJO、ISO)等制约,这些缓变波理论上具有更长的可预报时间^[53-59]。事实上,通过改进模式基本气流的预报,的确显著改善了模式天气波的预报,进而使模式的延伸期预报效果得到改善^[60-68],说明通过把握缓变波未来的演变特征,做出超越逐日预报理论上限的延伸期重要天气过程某些特征的预测是可行的。

大气中普遍存在的季节内振荡现象具有较好的周期性和持续性等特征,因此,可以利用这些特征及其与天气过程的密切联系,对延伸期时段天气过程的某些特征做出预测,这便是低频图和低频波预测方法的主要思路^[35-45, 47]。前者针对汛期(5—9月)延伸期强降水过程,后者主要针对冬半年(10月—次年3月)强降温过程。

(1) 过程标准及预报内容

目前延伸期过程预报主要涉及的是汛期强降水过程和冬半年强降温过程,以下是针对上海地区的过程

标准^[35, 47]。

上海汛期强降水过程是指11个地面气象站中,至少3个站(含3站)日(北京时间20时—20时)雨量 P 满足条件: $P \geq P_t$ (P_t 为强降水过程阈值。取: $P_t = 10 \text{ mm}$)。

冬半年强降温过程是指11个地面气象站中,至少3个站(含3站)24 h(北京时间20时—20时)降温 ΔT 和日最低温度 T_d 满足条件: $\Delta T \geq \Delta T_t$ (ΔT_t 为强降温过程阈值。 $\Delta T_t = 4^\circ\text{C}$),或 $T_d \leq 0^\circ\text{C}$ 。

预测内容主要包括:延伸期过程发生的时段(开始日和结束日)、强度(P_t 和 ΔT_t 等)及过程发生的频数。

(2) 低频图预测方法

借助带通滤波技术,将格点上的风场或位势高度场时间序列的低频分量分离出来(滤波器采用Butterworth带通(30~50 d)滤波器),并绘制成类似于日常天气图的分析图,即所谓的“低频图”(低频流场图、低频高度场图等)。在低频图上可分析出类似常规天气图的系统,称为“低频天气系统”(如低频气旋、反气旋,低频高、低压等)。低频天气系统具有显著的时空特征(时间上具有周期性和持续性、生成源地具有准定常性),与常规天气图上的天气系统(或称“天气实体”)存在密切的联系。低频系统的变化恰好反映的是影响天气过程(如降水过程)的缓变系统的演变(季节内振荡)。据此,通过追踪低频天气系统的演变,可以间接追踪天气系统的生消、演变,由此便可达到预测延伸期强降水过程的目的。

低频图方法的运用主要包括以下步骤:首先要确定过程预测区域;其次是预测建模,包括强降水过程标准的确定、低频流场图的绘制、低频系统关键区的确定、低频系统历史周期的统计(用以外推系统未来发生的状态),模型建立等;最后基于预测模型做过程预测(详见文献^[35-45, 47]及由上海市气象局牵头编写的中国气象局相关业务规定^①)。

利用多年历史资料总结出与上海地区强降水过程密切关联的700hPa低频系统活动8个关键区(图1),其位置和范围分别为:1区:10°—30°N, 120°—160°E; 2区:10°—30°N, 100°—120°E; 3区:10°—30°N, 80°—100°E; 4区:30°—50°N, 120°—160°E; 5区:30°—50°N, 100°—120°E; 6区:30°—50°N, 80°—100°E; 7区:50°—70°N, 120°—160°E; 8区:50°—70°N, 80°—120°E。分析显示,当南方关键区1、2区有低频反气旋活动,3区有低频气旋活动,北方关键区5、6、8区有低频气旋活动,4、7区有低频气旋或反气旋活动时,上海地区

① 中国气象局《月内强降水过程预测业务规定(试行)》(气预函(2013)43号文)。

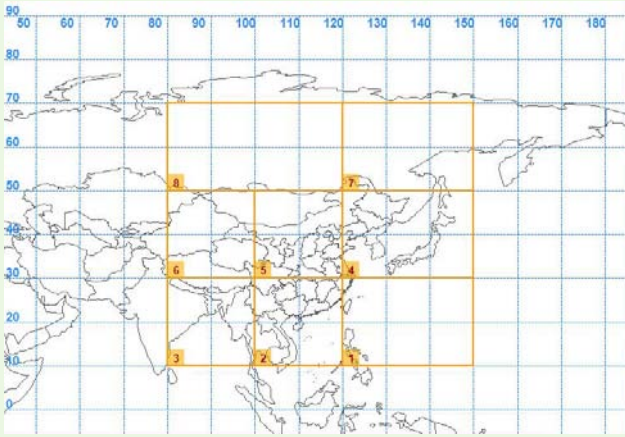


图1 与上海汛期强降水、冬半年强降温等过程关联的700hPa 8个低频系统活动关键区

Fig.1 Eight key regions of the low-frequency weather system activity associated with heavy rainfall in flood-seasons and strong cooling process in winters over Shanghai

常出现强降水过程。表1是上海地区汛期延伸期强降水过程低频预测模型。

表1 上海地区汛期延伸期强降水过程预测模型（关键区低频系统配置）

Table 1 The prediction model of the heavy rainfall in flood-seasons (Low-frequency weather system pattern in the key region) over Shanghai

低频关键区	北方关键区	南方关键区
低频系统配置	C5、A5、C6、C7、C8、A8	A1、A2、A3、C3

注：字母C和A分别代表低频气旋和反气旋，字母后面的数字代表关键区代号。统计得到的低频系统周期介于20~50d，业务预测中更新时间更新。

（3）低频波预测方法

将低频关键区（图1）中网格点上某一时段内逐日位势高度场进行平均，得到各关键区的平均高度场时间序列，再使用带通滤波器（Butterworth带通（30~50 d）滤波器）对关键区的平均高度场进行滤波，得到各关键区高度场的低频演变曲线，即所谓的低频波。低频波方法就是通过分析各关键区低频波的演变、位相配置及其与预测区域强降温过程的关系，从而达到预测强降水、强降温过程的目的。目前，低频波方法用于冬半年延伸期强降温过程预测，也作为汛期以外强降水过程预测的一种辅助预测方法^[45-47]。

低频波方法的使用步骤包括：确定预测区域、预测建模和利用预测模型做过程预测。建模过程中，首先需要确定降温过程标准，其次是绘制低频波，通过分析统计得到与强降温过程关联的关键区低频波位相配置及波峰、波谷的历史周期等，最后完成预测建模

（详见文献[45-47]及中国气象局相关业务规定^①）。

表2是通过统计、分析得到的上海冬半年强降温过程预测模型。其中，南方关键区1和3，以及北方5、6、8区的低频波特征是实际预测中的关注重点。当南方关键区1区处于低频波波峰（或波谷，或波峰到波谷的过度），3区处于波谷（或波峰，或波谷到波峰过度），同时，北方关键区的5、6、8区的低频波为表中所列的位相时，上海冬半年常常出现强降温过程。

表2 上海地区冬半年延伸期强降温过程预测模型（关键区低频波配置）

Table 2 The prediction model of the winter strong cooling process (low-frequency weather system pattern in the key region)

北方关键区	8区: H、H→L、L	6区: L、L→H、H	5区: H、H→L、L
南方关键区	3区: H、H→L、L、	1区: L、L→H、H	

注：字母H和L分别代表低频波波峰和波谷。符号“→”表示低频波波峰和波谷之间的过度段，如H→L表示某关键区处于低频波从波峰向波谷过度。低频波峰、波谷的周期介于20~50d，业务预报中更新时间更新。

1.1.2 逐候降水趋势预测方法

MJO作为季节内周期变化的强信号被广泛应用于延伸期预报^[69-81]，我国国家级和部分省级业务单位已开展相关监测预测业务^[82-86]。基于MJO信息建立上海汛期逐候回归物理模型预测模型，预测未来2~10候（约10~50 d）逐候降水趋势，一方面是为把握延伸期降水变化趋势，同时为汛期延伸期强降水过程及入梅、出梅预测提供背景预测信息。模型选取对上海降水异常影响明显的MJO关键区实况低频OLR作为预报因子，通过建立回归模型预测延伸期逐候降水演变趋势。

1.2 资料

低频图和低频波分析、延伸期过程预测和逐候趋势预测建模所用资料为美国NCEP 2.5°×2.5°逐日700 hPa再分析纬向、经向风场和高度场资料，以及上海11个地面站近10 a（2003—2013年）汛期（5—9月）逐日（北京时20时—20时）的雨量 and 日地面最低气温资料。

3 预测检验

3.1 检验指标

为检验延伸期过程预测的准确性，提出了三种评分指标：过程预测准确率、Zs评分和Cs评分。

3.1.1 过程预测准确率

预测过程正确是依据建模标准判定的。对强降水

① 中国气象局《月内强降温过程预测业务规定（试行）》（2）（气预函（2014）96号文）。

过程而言, 预报过程正确是指预测过程时段内上海地区11个地面气象站中, 至少3个站实际日雨量 $P \geq P_i$ 。对强降温过程而言, 是指至少3个站24 h (北京时20时—20时) 降温 $\Delta T \geq \Delta T_i$ 或 $T_d \leq 0^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{C}$)。这里, 预测的强降水过程和强降温过程与实况偏差1d均算作预测正确。若延伸期内实况未出现强降水过程(强降温过程), 也未预测延伸期内有强降水过程(强降温过程), 则此次预测不参与预测准确率检验。预测准确率可表达如下:

$$\text{预测准确率} = \text{预报正确的过程数} / \text{预报过程总数}。 (1)$$

3.1.2 Zs 评分

该评分方法针对过程预测正确、空报、漏报的过程数进行评分。既考虑服务的需求, 抓住最强的两次降水过程是否预测正确, 又确保评估简便易行。

对强降水过程而言, 若预测的降水过程强度 P_c 满足强降水过程条件: $P_c \geq P_i$ 或 $P_b \geq 3P_i$, ($P_i = 10 \text{ mm}$), 则认为本次过程预测正确, 记为正确1次; 否则不正确, 记为空报1次。

$$P_c = P_a(n)^{0.5}, (2)$$

$$P_a = \sum_i^n P_i / n, (3)$$

式中, P_i 为过程逐日雨量, P_b 为某过程内的最大日雨量, P_a 为过程日平均雨量, n 为过程日数。

关于过程漏报的判定。若预测的若干次强降水过程均包含月内最强两次日降水, 则无漏报。未包含最强两次日降水的次数, 则记为漏报次数。延伸期时段内漏报次数累计为漏报数, 最多记漏报两次。这里所指的两个最强降水日的实况降水量均要求不小于 P_i 。如果延伸期内没有日降水量大于或等于 P_i 的情况, 则记为无漏报数。

对强降温过程而言, 若预测的降水过程强度 ΔT_c 满足强降水过程条件: $\Delta T_c \geq \Delta T_i$ ($\Delta T_i = 4^\circ\text{C}$) 和 $T_d < 10^\circ\text{C}$, 则认为本次过程预测正确, 记为正确1次; 否则为空报, 记为空报1次。

$$\Delta T_c = \Delta T_a \sqrt{(n-1)}, (4)$$

$$\Delta T_a = (T_g - T_d) / (n-1), (5)$$

式中, T_g 和 T_d 分别为某降温过程内日最低气温的最大值和最小值, n 为过程日数。

所预测的若干次强降温过程时段内, 均包含月内最强和次强的两次24 h降温过程, 则无漏报。若未包含最强或次强24 h两次降温过程, 则漏1次算1次, 月内漏报次数累计为漏报数。最多记漏报两次。最强和次强24 h降温幅度的实况均要求不小于强降温强度阈值 ΔT_i 。如果延伸期内没有出现24 h降温幅度大于或等

于 ΔT_i 的情况, 则记为无漏报数。

对应单站Zs评分公式为:

$$\text{单站} = (\text{预测正确的过程数}) / (\text{预测正确过程数} + \text{空报过程数} + \text{漏报过程数}) (5)$$

如果预测正确过程数+空报过程数+漏报过程数=0, 即实况未出现强降水过程, 也未预测该站延伸期内有强降水过程, 则该站不作记分处理。

区域Zs评分公式为:

$$\text{区域Zs评分} = \text{区域内各考核站Zs的算术平均}。 (6)$$

3.1.3 Cs 评分

该评分方法是针对强降水过程(强降温过程)预测正确、空报、漏报的天数进行评分。预测正确的日数、空报日数和漏报日数按如下办法确定。

对强降水过程而言, 预测正确日数是指满足降水过程条件(日降水量 $P_i \geq P_i$)的降水日包含在降水过程预测时段内的日数(容许偏差1 d)。空报日数指过程预测时段内未出现满足降水条件等级的日数。漏报日数指未包含在过程预测时段内(偏差2 d及以上)的满足降水条件等级的日数。

对强降温过程而言, 预测正确日数是指满足降温过程条件(即24 h降温幅度 $\Delta T_i \geq \Delta T_i$)的降温日包含在强降温过程预测时段内的日数(允许偏差1d), 空报日数是指过程预测时段内未出现满足降温条件等级的日数, 漏报日数: 指未包含在过程预测时段内(偏差2 d及以上)的满足降温条件等级的日数。

对应单站Cs评分公式为:

$$C_s = (\text{预测正确日数}) / (\text{预测正确日数} + \text{空报日数} + \text{漏报日数})。 (7)$$

如果预测正确日数+空报日数+漏报日数=0, 也就是说实况未出现强降水过程, 也未预测该站有强降水过程, 则该站不作记分处理。

区域Cs评分公式为:

$$\text{区域Cs评分} = \text{区域内各考核站Cs的算数平均值}。 (8)$$

Zs和Cs评分的数值范围介于0~1, 最小为0, 最大为1。评分值越大, 表示预报效果越好, 越接近实况; Zs评分侧重评估最强过程的把握能力, Cs评分侧重评估预测结果客观性, 可作为判定预测结果是否具有预报技巧的一种依据。目前这两个评分指标已纳入前述业务规定。

3.2 汛期强降水过程和冬半年强降温过程预测检验

2013年起按照业务规定, 开展汛期4年(2013—2016年)5—9月强降水过程业务预测和2年(2015—2016年)冬半年(1—3月、10—12月)强降温过程业务预测。过程预测分别在每月上、中和下

旬进行并按业务规定上传预测。下面是对上海近4年240个强降水过程预测报文和近2年180个强降温过程报文所做的客观检验结果。

3.2.1 过程预测准确率

按照前述汛期强降水过程和冬半年强降温过程预测建模标准统计,近4年低频图方法对上海汛强降水过程预测的准确率平均为67.3%,4年中每年均高于50%。其中2013年最高为83.3%;需要指出的是该年一次空报过程虽不满足3站降水大于10 mm的标准,被记为预报不正确,但单站24h降水达到74.2 mm。2015年为58.8%,2016年为56.3%(表3)。低频波方法对近2年强降温过程预测的准确率总体较低,2015、2016年的准确率分别为36.3%和50%,平均为43.2%(表3)。

表3 上海2013—2016年汛期强降水过程和2015—2016年强降温过程预测准确率和准确率

Table 3 The predicting accuracy of heavy rainfall process during flood-seasons in 2013–2016 and the cooling process in winters in 2015–2016 in Shanghai

过程类型	2013年	2014年	2015年	2016年	平均
强降水过程	83.3%	70.6%	58.8%	56.3%	67.3%
强降温过程	-	-	36.3%	50%	43.2%

3.2.2 年度最强过程预测

低频图方法中对4年中汛期最强降水提前给出较准确的预测(表4),其中2013年5月23日提前17d预测6月9—14日上海出现强降水过程,实况降水过程出现在6月7—10日,单站日降水量达86.8 mm。2014年提前12d报出9月初单站日降水量达130.3 mm的大暴雨。2015年8月24日上海出现全年最强降水,10站日雨量超50 mm,嘉定站达211.4 mm,8月7日给出准确预报,时效为17 d。2016年8月31日也基本准确预报了9月14—17日的大暴雨。

表4 2013—2016年上海地区汛期最强降水过程预测

Table 4 The Prediction of the heaviest rainfall process and the reality for 2013–2016 over Shanghai

发布日期	预报时段	预报时效	实况
2013年5月23日	6月9—14日	17d	6月7—10日强降水过程,单站日降水量达86.8 mm
2014年8月19日	8月31日—9月2日	12d	9月1—3日,大到暴雨,局地大暴雨,单站日降水量达130.3 mm
2015年8月7日	8月24—26日	17d	8月24日,10站24小时累积雨量超50 mm,嘉定站达211.4 mm
2016年8月31日	9月12—14日	13d	9月14—17日,16日6站超100 mm,南汇站达156.4 mm

低频波方法对2016年1—3月、10—12月期间的最强降温过程给出了较好预测。2016年1月29日提前15d报出2月14日的强降温过程(10站24h降温平均达

7.4℃,崇明站最大达7.8℃),11月9日提前13 d报出11月23日强降温过程;但未报出2015年的最强降温过程(表5)。

表5 2016年上海地区冬半年最强降温过程预测

Table 5 The prediction of the strongest cooling process and the reality over Shanghai during 2015–2016

发布日期	预报时段	预报时效	实况
2015年1月9日	1月16—19日	未报出	1月23日,崇明站24h降温幅度最大达7.0℃,最低温度-4.0℃
2015年11月19日	11月28—30日	未报出	12月3日,奉贤站24h降温幅度最大达7.9℃,最低温度1.5℃
2016年1月29日	2月13—15日	15d	2月14日,10站24h平均降温7.4℃;崇明站24h,降温幅度最大达7.8℃,最低温度0.3℃
2016年11月9日	11月22—24日	13d	11月23日,5站24h降温幅度超4.0℃嘉定站最大为4.7℃,最低气温2.6℃

3.2.3 Zs 和 Cs 评分

表6和7为近4年汛期延伸期强降水过程业务预测和近2年冬半年延伸期强降温过程预测Zs和Cs评分。强降水过程预测10站4年的Zs、Cs总体平均为0.153和0.130,前者较后者略高,总体较为接近。从逐年评分结果看,2014年最高,分别达到0.227和0.191,2015、2016年其次,2013年最低。就不同台站而言,闵行站Zs平均值最高,为0.182,青浦站次高,崇明站最低。宝山站Cs评分最高,为0.142,次高为浦东站,奉贤站最低。虽然预测及评分范围仅限于上海地区,范围较小,但各站评分值还存在一定的空间差异。

近2年冬半年强温过程预测评Zs和Cs评分平均为0.139和0.09(表8-9)。就各年评分结果看,2016年分别达到0.22和0.120,远高于2015年的0.058和0.051。对比不同台站,奉贤站Zs评分平均值最高,为0.191,徐家汇站最低,为0.102。青浦站Cs评分最高,为0.109,金山站最低,为0.060。各站评分同样存在差异。

Zs和Cs评分值总体较低,明显低于理想预报(评分值为1),可能和评分的构造有关。该评分主要参考短期降水(暴雨)预报的Ts评分理念,只是把前者针对模式网格点(或站点)报对、空报和漏报的综合评估转化为对延伸期过程预测中过程数及预报日数这三种预报情形的评估。尽管如此,预测综合检验结果仍然显示出低频图对汛期延伸期强降水过程的预测能力和潜力。低频波方法对近2年冬半年强降温过程的预测准确率均低于50%,Zs和Cs评分也较汛期强降水过程预测评分低,可能和近2年冬季暖冬背景有关,其原因有待在积累更多预测个例基础上进一步分析。

3.3 汛期逐候降水趋势预测检验

2014年开始用MJO统计预测模型开展了两年

表6 上海地区2013—2016年汛期（5—9月）延伸期强降水过程预测Zs评分

Table 6 The Zs scores of prediction of the extended-range heavy rainfall process in flood-seasons (May to September) for 2013–2016

年份	闵行58361	宝山58362	嘉定58365	崇明58366	徐家汇58367	浦东58370	金山58460	青浦58461	松江58462	奉贤58463	平均
2013	0.115	0.077	0.058	0.051	0.026	0.026	0.026	0.167	0.026	0.026	0.060
2014	0.178	0.252	0.251	0.239	0.211	0.208	0.272	0.221	0.191	0.249	0.227
2015	0.234	0.125	0.099	0.083	0.182	0.161	0.168	0.193	0.193	0.219	0.166
2016	0.199	0.111	0.148	0.111	0.206	0.227	0.218	0.090	0.148	0.144	0.160
平均	0.182	0.141	0.139	0.121	0.156	0.156	0.171	0.168	0.140	0.160	0.153

表7 上海地区2013—2016年汛期强降水过程预测Cs评分

Table 7 The Cs scores of prediction of the extended-range heavy rainfall process in flood-seasons (May to September) for 2013–2016

年份	闵行58361	宝山58362	嘉定58365	崇明58366	徐家汇58367	浦东58370	金山58460	青浦58461	松江58462	奉贤58463	平均
2013	0.070	0.112	0.066	0.054	0.085	0.065	0.054	0.075	0.086	0.038	0.071
2014	0.192	0.185	0.196	0.215	0.194	0.200	0.178	0.190	0.175	0.185	0.191
2015	0.103	0.101	0.094	0.119	0.106	0.104	0.085	0.115	0.130	0.092	0.105
2016	0.162	0.168	0.143	0.143	0.158	0.189	0.139	0.159	0.146	0.123	0.153
平均	0.132	0.142	0.125	0.133	0.136	0.140	0.114	0.135	0.134	0.110	0.130

表8 上海地区2015—2016年冬半年（1—3月、10—12月）延伸期强降温过程Zs评分

Table 8 The Zs scores of prediction of the extended-range strong cooling process in winters (Jun to March and October to December) for 2015–2016

年份	闵行58361	宝山58362	嘉定58365	崇明58366	徐家汇58367	浦东58370	金山58460	青浦58461	松江58462	奉贤58463	平均
2015	0.067	0.094	0.031	0.028	0.067	0.083	0.052	0.049	0.063	0.049	0.058
2016	0.156	0.222	0.233	0.233	0.137	0.233	0.188	0.240	0.222	0.333	0.220
平均	0.112	0.158	0.132	0.131	0.102	0.158	0.120	0.145	0.143	0.191	0.139

表9 上海地区2013—2016年冬半年（1—3月、10—12月）延伸期强降温过程Cs评分

Table 9 The Cs scores of prediction of the extended-range strong cooling process in winters (Jun to March and October to December) for 2015–2016

年份	闵行58361	宝山58362	嘉定58365	崇明58366	徐家汇58367	浦东58370	金山58460	青浦58461	松江58462	奉贤58463	平均
2015	0.058	0.044	0.025	0.020	0.062	0.052	0.052	0.080	0.065	0.049	0.051
2016	0.083	0.198	0.152	0.146	0.110	0.131	0.068	0.137	0.122	0.142	0.129
平均	0.071	0.121	0.089	0.083	0.086	0.092	0.060	0.109	0.094	0.096	0.090

（2014—2015年）的上海汛期（6—9月）逐候降水趋势预测（2016年因故临时中断）。下面是这两年的预测结果的检验结果。

从汛期候降水量的整体预测效果来看，两年预测综合Ps评分分别达到62和54分（图2），平均为58

分，且各年均比气候概率预测评分高，平均高8.5分，显示MJO统计模型对汛期候降水趋势具有一定的预测技巧。

逐候降水趋势预测客观上也为延伸期强降水过程预测及入、出梅及梅雨期强降水过程预测提供了重要

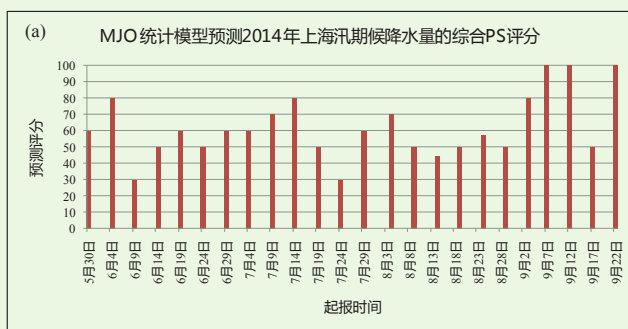


图2 2014年（a）和2015年（b）预报的未来2~10候降水量异常Ps评分

Fig. 2 The Ps scores of pentad anomaly of precipitation in flood-seasons for 2014 (a) and of 2015 (b).

参考。图3 给出了2012年上海汛期季节内逐候降水量演变预报业务应用个例，其中预报的未来20~45d降水的峰值出现时段（2012年6月14—18日和6月24—28日）与实况一致，预报的逐候降水量异常与实况的异常趋势一致率为60%。

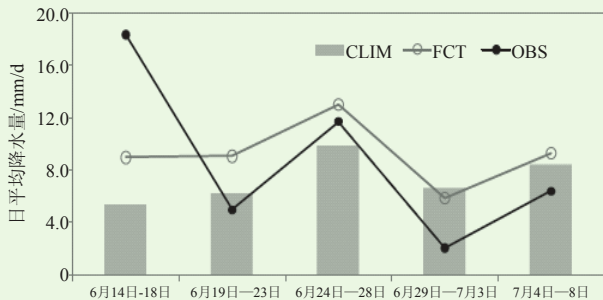


图3 基于MJO活动的逐候降水趋势预测物理模型预报个例（2012年5月24日起报的上海地区未来2~10候（10~50d）降水异常演变。空心圆折线为预报，实心圆折线为观测值，阴影柱状图为1981—2010年平均，单位：mm/d）

Fig. 3 The 2–10 pentad (10–50d) anomaly of precipitation over Shanghai forecasted by the MJO–activity–depending prediction model with the start date of May 24 2012. Hollow and solid circle lines stand for the prediction and the reality respectively, the shaded box denotes the climatology of pentad precipitation for 1981–2010

实际预报中，2014年5月30日给出“自6月20日起上海将进入多雨时段”的预报结论与实况的入梅日期一致，6月19日预报“7月10日起上海将进入少雨阶段”与出梅日期基本一致。同时，客观预测模型也给出江淮地区季节内逐候降水趋势预测情况。如2015年6月4日预报“上海/江淮地区将于6月中旬中期/下旬中期进入多雨期”的预测与实况的上海及江淮地区实际入梅时间基本一致（图略）。

4 系统开发和技术推广应用

4.1 MAPFS 系统开发

低频图和低频波方法及过程检验指标从2011年起先后纳入中国气象局现代气候业务发展改革重点工作一月内重要过程与趋势预测系统（MAPFS）建设中，其中2013年完成的MAPFS2.1是系统广为应用的一个版本（图4是系统主界面）。该系统由上海城市气候中心牵头，河北省气候中心、重庆市气候中心、甘肃省气候中心（西北区域气候中心）和云南省气候中心多家省级单位共同参与开发。系统采用C++语言开发人机交互界面作为主程序控制整个平台的运行，绘图采用MICAPS 3.3 部分绘图软件，核心计算模块采用FORTRAN 90/95语言编程。系统主要功能包括延伸过程预测、延伸期趋势预测及过程预测检验。过程

预测部分包括低频图和低频波方法模块、异常相似释用方法、环流相似方法和150d韵律方法四个模块，趋势预测部分包括EOF迭代释用方法和逐候趋势预测方法两个模块（详见文献[27-32, 48]及前述业务规定）。



图4 月内重要过程与趋势预测系统（MAPFS2.1）主界面
Fig. 4 The interface of monthly anomaly and process prediction system(MAPFS 2.1)

4.2 技术推广应用

技术推广由上述五家省级单位共同承担，主要推广MAPFS系统、过程预测方法和检验方法的原理和使用。2011年，MAPFS系统首先在上海、河北、甘肃、江苏、浙江5个试点省（市）业务单位实现业务化应用，2013年技术推广进一步扩大到全国范围，2014年MAPFS2.1系统实现全国省级业务化应用，同年所做的系统应用情况调查显示，90%省级业务单位在开展延伸期过程预测业务时不同程度使用MAPFS系统；所有的省级单位均使用过程检验方法模块，70%的单位使用低频图和低频波方法模块，异常相似释用方法、环流相似方法、150d韵律方法也在多个省份得到应用。MAPFS由此成为省级单位开展这项新型业务的重要支撑系统。图5—9为2014—2015年利用MAPFS系统所做的全国各省级单位强降水过程、强降温过程预测客观检验情况，Zs和Cs评分均已超0.10的水平,综合平均均达到0.12。

5 总结和讨论

本文对自主开发的冬半年低频图方法和低频波方法、延伸期过程预测客观检验指标、MAPFS系统及技术推广情况做了介绍。对2013—2016年4年的上海地区汛期延伸期强降水过程业务预测和2015—2016年两年的冬半年延伸期强降温过程业务预测进行了客观评分检验。结果显示，汛期强降水过程预测预测Zs和Cs评分分别为0.153和0.130；预测准确率平均为67.3%，已高于50%；冬半年强降温过程平均Zs和Cs评分分别为0.139和0.09；预测准确率为43.2%，尚低于50%。另外，低频图方法对近4年中各年汛期最强降水也给出

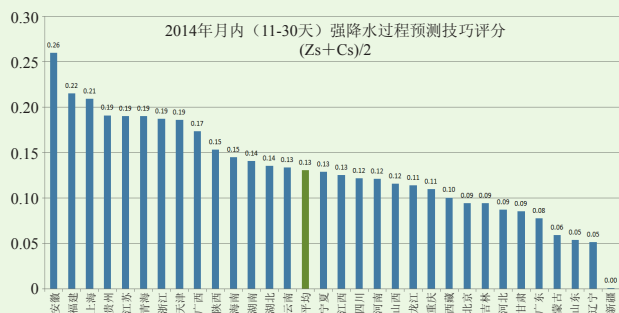


图5 2014年全国省级汛期强降水过程预测Zs和Cs综合评分 ((Zs+Cs)/2)

Fig.5 The synthetic Zs-and -Cs score ((Zs+Cs)/2) of heavy rainfall process prediction for all the thirty-one provincial climate centers in China in 2014

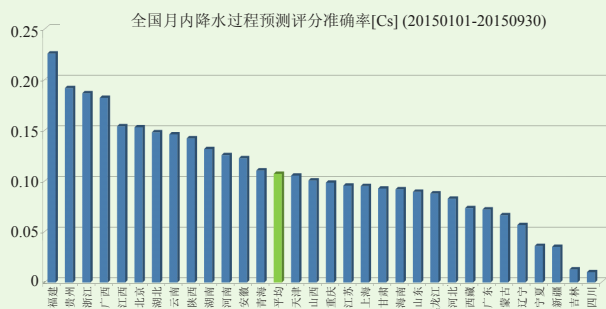


图6 2015年全国省级汛期强降水过程预测Zs评分
Fig. 6 As for Fig. 5, but for the Zs scores in 2015

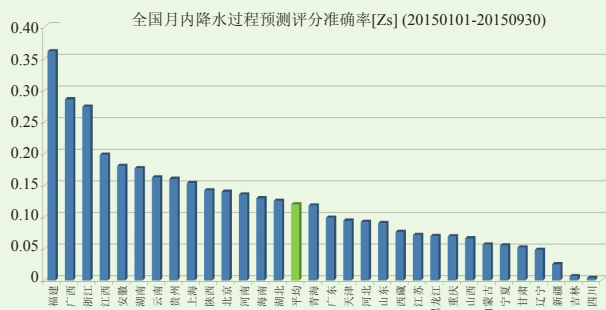


图7 2015年全国省级汛期强降水过程预测Cs评分
Fig. 7 As for Fig. 5, but for the Cs scores in 2015

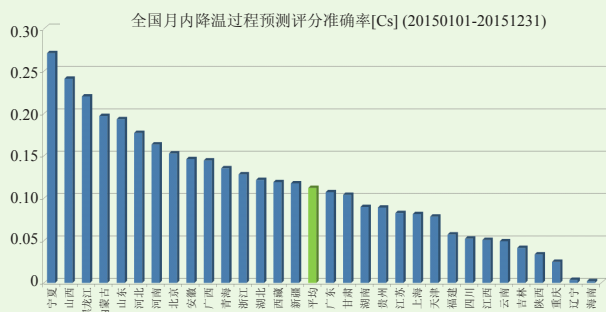


图8 2016年全国省级冬半年强降温过程预测Zs评分
Fig. 8 As for Fig. 5, but for the Zs scores in 2016

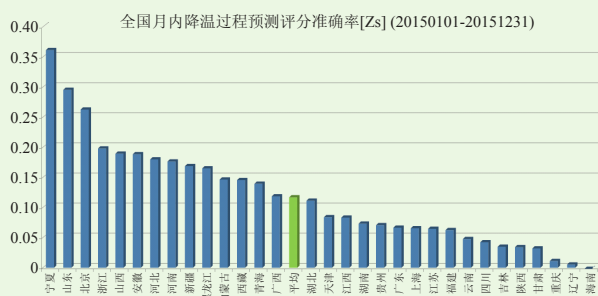


图9 2016年全国省级冬半年强降温过程预测Cs评分
Fig. 9 As for Fig. 5, but for the Cs scores in 2016

较理想的预测，显示出一定预报能力和潜力。低频波方法对2016年冬半年（1—3月、11—12月）的最强降温过程给出较好预测，未报出2015年冬半年的最强降温过程。

通过技术推广，MAPFS系统实现了全国省级业务化应用，目前已成为全国省级单位开展延伸期重要天气过程预测业务的重要支撑系统。全国省级单位的近三年延伸期强降水过程预测和近两年强降温过程业务预测Zs和Cs评分平均达到0.12，已高于0.10的水平。今后还将在广泛征求意见的基础上进一步对系统进行完善和升级，使之在延伸期预测业务中发挥更大的作用。

基于MJO活动的上海汛期逐候降水趋势预测方法对2014、2015年两年的汛期预测Ps评分平均达到58分，为汛期强降水过程及入梅、出梅的延伸期预测提供了颇有价值的背景参考信息，取得了良好的效果。今后将对方法进一步改进后纳入MAPFS系统中。

应该看到，延伸期重要天气过程预测还是个新生事物，尚处于起步阶段。所开发的预测方法和检验指标还很不完善，加上延伸期过程本身的困难，这些因素是导致Zs和Cs评分值较低的重要原因。后续工作将结合不同区域气候特点和不同气候背景，细致分析季节内振荡信号和过程的关系，最大限度地利用数值模式的可用预报信息^[87-91]，同时充分借鉴和吸收国内同行在这一领域积累的宝贵经验^[92-100]，更有针对性地改进预测方法，特别是冬半年强降温过程预测方法。目前，在模式信息应用方面，已利用高分辨率的WRF模式，通过和美国NCEP/CPC CFSv2全球模式嵌套，获得了9 km×9 km分辨率的未来45 d逐6 h环流和要素预报^①。未来将对WRF模式预测环流缓变分量信息进行有效信息识别和筛选，然后将其应用到低频预测方法中以改进过程预测效果。

① 见上海局业务网：61.152.122.124/ClimateCentralServiceGateWay/ClimateCentralWebGIS/index.html。

参考文献

- [1] Anderson D. Current capabilities in sub-seasonal to seasonal prediction. WWRP-WCRP-THORPEX Workshop on Sub-seasonal to Seasonal Prediction, Report and Recommendation, Met Office, Exeter, 1-30 Dec 2010.
- [2] 金荣花, 马杰, 毕宝贵, 等. 10~30d延伸期预报进展和业务现状. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(2): 1-5.
- [3] 朱玉祥, 俞小鼎, 赵亮, 等. 10~30d延伸期预报及其策略思考. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(4): 38-44.
- [4] Berner J. Uncertainty prediction across a range of scales: from short-range weather forecasting to climate uncertainty. Workshop on Representing Model Uncertainty and Error in Numerical Weather and Climate Prediction Models, ECMWF. Shinfield Park, Reading, UK, 20-24 June 2011.
- [5] Buizza R, Houtekamer P L, Toth Z, et al. A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP Global Ensemble Prediction Systems. *Mon Wea Rev*, 2005, 33(5): 347-357.
- [6] Richardson D S, Bidlot J, Ferranti L. Verification statistics and evaluations of ECMWF forecasts in 2009-2010. ECMWF Technical Memoranda, 2011, 635:2-5.
- [7] Richardson, D R, Bidlot J, Ferranti L, et al. Verification statistics and evaluations of ECMWF forecasts in 2011-2012. ECMWF Technical Memoranda, 2013, 688: 1-48.
- [8] Richardson, R S, Bidlot J, Ferranti L, et al. Evaluation of ECMWF forecasts, including 2012-2013 upgrades. ECMWF Technical Memoranda, 2014, 710: 1-49.
- [9] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 1965, 17(3): 321-333.
- [10] Lorenz E N. The predictability of a flow which processes many scales of motion. *Tellus*, 1969, 21(3): 289-307.
- [11] Lorenz E N. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, 1982, 34(6): 505-513.
- [12] Lorenz E N. Low-order models of atmospheric circulation. *J Meteor Soc Japan*, 1982, 60(1): 255-267.
- [13] 矫梅燕. 现代数值预报业务. 北京: 气象出版社, 2010.
- [14] 龚建东. 同化技术: 数值天气预报突破的关键—以欧洲中期天气预报中心同化技术演进为例. 气象科技进展, 2013(3): 6-13.
- [15] 马旭林, 陆续, 于月明. 数值天气预报中集合-变分混合资料同化及其研究进展. 热带气象学报, 2014, 35(6): 1188-1195.
- [16] Yu H, Huang J, Chou J. Improvement of medium-range forecast using the analogue-dynamical method. *Mon Wea Rev*, 142(4): 1570-1587.
- [17] Miller M, Buizza R, Haseler J, et al. Increased resolution in the ECMWF deterministic and ensemble prediction systems. ECMWF Newsletter, 2010, 124.
- [18] 任宏利, 丑纪范. 数值模式的预报策略和方法研究进展. 地球科学进展, 2007, 22(4): 376-385.
- [19] 于海鹏, 黄建平, 李维京, 等. 数值预报误差订正技术中相似-动力方法的发展. 气象学报, 2014, 72(5): 1012-1022.
- [20] 朱玉祥, 黄嘉佑, 丁一汇. 统计方法在数值模式中的应用的若干进展. 气象, 2016, 42(4): 456-465.
- [21] 康志明, 鲍媛媛, 周宁芳. 我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势. 气象科技进展, 2013, 3(1): 18-24.
- [22] 杜良敏, 柯宗建. 一种适用于延伸期过程事件预报的检验方法. 应用气象学报, 2013, 24(6): 686-694.
- [23] 杨鉴初, 归佩兰. 关于长期天气过程的划分. 气象, 1979, 4(6): 14-18.
- [24] 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. 天文气象学术讨论会文集. 北京: 气象出版社, 1986.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 林纾, 惠志红, 郭俊琴, 等. 150天韵律方法月内过程预测系统简介及应用检验. 气象科技进展, 2013(3): 48-51.
- [29] 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.
- [30] 周须文, 史印山, 史湘军, 等. 延伸期重要天气过程的异常相似释用方法. 中国气象学会第29届年会 S2—短期气候预测(论文摘要), 2012: 199-205.
- [31] 唐红玉, 李永华, 何慧根, 等. 前期环流相似法在重庆延伸期天气过程预报中的应用. 气象科技, 2017, 45(1): 71-77.
- [32] 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.
- [33] 钱维宏. 天气尺度瞬变扰动的物理分解原理. 地球物理学报, 2012, 55(5): 439-448.
- [34] 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, 2013, 29(6): 899-906.
- [35] 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.
- [36] 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(s): 69-75.
- [37] 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.
- [38] 信飞, 李震坤, 王超. 经验正交函数分解在上海地区低频天气图方法中的应用. 气象科技进展, 2013, 3(1): 52-56.
- [39] 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. 大气科学, 2013, 37(4): 945-954.
- [40] 李震坤, 孙国武, 信飞. 2011年5、6月长江中下游旱涝转折的大气低频振荡特征及其预报. 热带气象学报, 2014, 30(1): 194-200.
- [41] 孙国武, 李震坤, 信飞, 等. 用低频天气图方法进行延伸期预报的探索. 气象科技进展, 2013, 3(1): 6-10.
- [42] 信飞, 陈伯民, 王超, 等. 长三角盛夏-初秋强降水的延伸期过程预报探析. 气象科学, 2014, 34(6): 672-677.
- [43] 信飞, 陈伯民, 孙国武. 上海梅雨汛期强降水的低频特征及延伸期预报. 气象与环境学报, 2014, 30(6): 61-67.
- [44] 信飞, 陈伯民, 穆海振, 等. 上海地区汛期暴雨的延伸期预测方法及应用. 气象, 2016, 42(11): 1372-1378.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 陈伯民, 信飞, 沈愈, 等. 月内重要天气过程与气候趋势预测系统及应用进展. 气象科技进展, 2013, 3(1): 46-51.
- [48] 蒋薇, 孙国武, 陈伯民, 等. 江苏省汛期强降水过程的延伸期预报试验. 气象科学, 2011, 31(s): 24-30.
- [49] 马浩, 李正泉, 雷媛, 等. 热带气旋影响下浙江省强降水过程延伸期预报研究. 气象科学, 2016, 36(3): 374-380.
- [50] 胡春丽, 李辑, 陈伯民, 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. 气象科技进展, 2013, 3(1): 64-67.
- [51] 陈青, 廖玉芳, 杨书运, 等. 低频天气图方法在湖南省雨季强降水过程预报中的应用. 气象, 2014, 40(2): 223-228.
- [52] 孙昭壹, 马振峰, 杨小波, 等. 低频天气图方法在四川盆地夏季延伸期强降水预报中的应用. 高原山地气象研究, 2016, 36(1):20-26.
- [53] Namias J. Long-range weather forecasting. *Sci Am*, 1955, 193(1): 40-44.
- [54] Palmer T N. Medium and extended range predictability and the stability of the Pacific/North American mode. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1988, 114(481): 691-714.
- [55] Palmer, T N, Park S. Extended-range atmospheric prediction and the Lorenz model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(4): 49-65.
- [56] Shukla J. Dynamical predictability of monthly means. *J Atmos Sci*, 1981, 38(12): 2547-2572.
- [57] 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.
- [58] 郑志海. 动力延伸预报研究进展回顾. 气象科技进展, 2013, 3(1): 25-30.
- [59] 何金海, 梁萍, 孙国武. 延伸期预报的思考及其应用研究进展. 气象科技进展, 2013, 3(1): 11-17.
- [60] Saha S. Response of the NMC MRF model to systematic error correction within integration. *Mon Rev Wea*, 1992, 120(2): 345-360.

- [61] Baumhefner D B. Numerical extended-range prediction: forecast skill using a low-resolution climate model. *Mon Rev Wea*, 1996, 124(9): 1965-1980.
- [62] Lahoz W A. Predictive skill of the UKMO unified model in the lower stratosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125:558, 2205-2238.
- [63] 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.
- [64] Chen B M, Ji L R, Yang P C, et al. An approach to improving the dynamical extended-range(monthly) prediction, *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(7):696-703.
- [65] 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(s): 92-96.
- [66] Chen B M, Ji L R, Yang P C, et al. Systematic error of zonal-mean flow in dynamical monthly prediction and its improvement. *Adv Atmospheri Science*, 2003,20(1):17-27.
- [67] Chen B M, Ji L R, Yang P C, et al. Monthly extended predicting experiments with non-linear regional prediction I: prediction of zonal mean flow. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 20(3): 283-294.
- [68] Chen B M, Ji L R, Yang P C, et al. Monthly extended predicting experiments with non-linear regional prediction II: improvement of wave component prediction. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 20(3): 295-305.
- [69] 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(8): 1917-1932.
- [70] Maharaj E A, Wheeler M C. Forecasting an index of the Madden-Oscillation. *Int J Climatology*, 2005, 25(12): 1611-1618.
- [71] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸预报. *气象*, 2010, 36(7): 111-122.
- [72] 梁萍, 何金海, 穆海振. MJO在延伸期预报中的应用进展. *气象科技进展*, 2013, 3(1): 31-38.
- [73] 任宏利, 吴捷赵, 崇博, 等. MJO预报研究进展. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 658-668.
- [74] Xia X L, Chen L, Ren F M, et al. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(3): 521-533.
- [75] 李文铠, 何金海, 祁莉, 等. MJO对华南前汛期降水的影响及其可能机制. *热带气象学报*, 2014, 30(5): 983-989.
- [76] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸期预报试验. *大气科学*, 2012, 36(1): 102-116.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 陈彩珠, 高建芸, 黄丽娜. 大气低频变化对福建前汛期典型持续性暴雨影响. *应用气象学报*, 2016, 27(1): 75-84.
- [80] 高建芸, 陈彩珠, 周信禹. 2010年福建前汛期典型持续性暴雨过程的低频特征分析. *气象科技进展*, 2013, 3(1): 39-45.
- [81] 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(2): 201-216.
- [82] 贾小龙, 袁媛, 任福民, 等. 热带大气季节内震荡(MJO)实时监测预测业务. *气象*, 2012, 38(4): 425-431.
- [83] 李汀, 陶诗言, 琚建华. 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.
- [84] 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, 43(1): 62-65.
- [85] 杞明辉, 牛法宝, 严欣, 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. *气象科技进展* 2013, 3(1): 57-63.
- [86] Gao J, Lin H, You L. Monitoring early-flood season intraseasonal oscillations and persistent heavy rainfall in South China. *Climate Dyn*, 2016, 47(12): 3845-3861.
- [87] 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.
- [88] 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. *中国科学: D辑*, 2013, 43(4): 594-605.
- [89] Zheng Z H, Huang J P, Feng G L, et al. Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components. *Science in China (series D)*, 2013, 56(5): 878-889.
- [90] 王启光, 丑纪范, 封国林. 数值模式延伸期可预报分量提取及预报技术研究. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(2): 343-354.
- [91] 崔慧慧, 智协飞. 基于TIGGE资料的地面气温延伸期多模式集成预报. *大气科学学报*, 2013, 36(2): 165-173.
- [92] 杨秋明. 10~30d延伸期天气预报方法研究进展与展望. *地球科学进展*, 2015, 30(9): 970-984.
- [93] 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.
- [94] 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. *气象与减灾研究*, 2011, 34(3): 1-8.
- [95] 黄世成, 杨秋明, 李熠, 等. 基于时变关键区和时滞多变量的长江下游10~30d低频降水实时预报. *科学技术与工程*, 2014, 14(22): 1-6.
- [96] 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. *科技导报*, 2011, 29(32): 60-66.
- [97] 杨秋明. 基于20~30d振荡的长江下游地区夏季低频降水延伸期预报方法研究. *气象学报*, 2014, 72(3): 497-507.
- [98] 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.
- [99] 湛志刚, 王婷, 纪忠萍, 等. 广东降水延伸期预报的探索. *气象科学*, 2013, 33(3): 296-301.
- [100] 曾宇星, 叶天舒, 王阔, 等. 基于2013年8月中国中东部地区持续高温的延伸期稳定分量提取及改进研究. *物理学报*, 2015, 64(4): 1-12.

上海气象服务国家战略支撑体系进展评估

上海气象发展不仅要立足自身, 更要立足国家战略, 充分发挥在全国气象现代化中的引领带动和支撑作用。从本次评估看, 上海气象部门以“五个中心”建设为抓手, 加快推进气象服务国家战略支撑体系建设, 取得重要进展。现在长三角环境气象预警预报中心、区域高分辨率数值预报创新中心和气象卫星遥感应用中心等三个中心已经建成, 还有国家级气象业务应急备份中心以及中国气象局台风与海洋气象预警中

心建设正在加快推进, 2016年底基本建成。综合中国气象局相关职能司、华东六省气象部门和上海市气象部门自身的评价结果, 上海气象服务国家战略支撑体系一级指标和气象服务国家战略能力二级指标(唯一)得分均为88.4分。

——摘自《迈向国际一流的大都市气象现代化体系》: 上海率先实现气象现代化第三方评估, 肖林, 陈振林 主编, 气象出版社, 2016年