

信飞, 陈伯民, 穆海振, 等. 2016. 上海地区汛期暴雨的延伸期预测方法及应用. 气象, 42(11):1372-1378.

上海地区汛期暴雨的延伸期预测方法及应用^{*}

信 飞¹ 陈伯民¹ 穆海振¹ 孙国武²

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

提 要: 本文利用 700 hPa 低频流场的演变分析上海暴雨过程的主要低频静态模型及大暴雨过程的主要低频动态模型。根据 2005—2015 年近 10 年的 112 个暴雨日样本建立低频系统静态预测模型, 即一种是北方低频反气旋南方低频气旋型, 另一种是北方低频气旋南方低频反气旋型。进一步研究发现, 24 h 雨量 ≥ 100 mm 的大暴雨主要表现为低频气旋型, 约占大暴雨总日数的 60%。这种低频模态的大暴雨在发生前 30 d 至发生时的低频系统移动路径具有较好的一致性, 即源自高纬度的低频反气旋在大暴雨发生前 30 d 左右逐渐向东南方向移动, 在暴雨发生前 20 d 左右热带洋面进入低频气旋活跃期, 随后低频气旋向西北方向移动, 当两者交汇于上海附近地区时, 产生大暴雨过程。利用这种移动路径的一致性建立大暴雨的动态预测模型。将静态及动态模型相结合用于业务预报, 利用该方法较为准确地预报出近 5 年汛期的最强降水, 时效均在 12 d 以上。

关键词: 延伸期预报, 暴雨, 低频系统, 动态模型

中图分类号: P457

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.11.009

Exploration and Application of the Extended Period Rainstorm Forecast in Shanghai

XIN Fei¹ CHEN Bomin¹ MU Haizhen¹ SUN Guowu²

¹ Shanghai Climate Centre, Shanghai 200030

² Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020

Abstract: Based on the wind field and vapor field at 700 hPa of NCEP/NCAR daily reanalysis dataset, and the precipitation data of 11 stations in Shanghai, this paper applies the method of the extended period rainstorm forecast in Shanghai. Based on the data of 112 rainstorm days in the past 10 years, the static prediction model of low frequency system is established. One is the type of northern low-frequency anticyclone and the south low-frequency cyclone, while the other is the type of northern low-frequency cyclone and the south low-frequency anticyclone. Further research shows that rainstorms with a daily rainfall of 100 mm or more are mainly low-frequency cyclones, accounting for 60% of the total number of rainstorms. Low-frequency cyclone-type mobile characteristics are very consistent in the 30 days before the occurrence of rainstorms. This consistency can be used to establish the dynamic prediction model of heavy rain. Using this method, the heaviest rainfalls in the flood season in the last 5 years are forecasted accurately, and the lead time is more than 12 days.

Key words: extended forecast, rainstorm, low frequency weather system, dynamic model

^{*} 中国气象局 2016 年小型基建项目“全国预测预报业务系统建设(二期)”资助

2016 年 1 月 31 日收稿; 2016 年 9 月 1 日收修定稿

第一作者: 信飞, 从事气候预测及延伸期过程预测研究. Email: xifei010@aliyun.com

引 言

暴雨是我国主要的气象灾害之一,由于其突发性和局地性,常常导致城市内涝,对人民生命财产和经济建设造成严重影响。上海地区夏季暴雨过程多发,且影响严重,如 1999 年 6 月上旬至 7 月初的梅雨期,上海和长三角地区出现历史上罕见的连续性暴雨天气,多个水文站水位均突破历史最高纪录,河道堤坝险情不断。全市受淹农田超过 127 万亩($1 \text{ 亩} \approx 666.6 \text{ m}^2$),100 多条交通干线积水,直接经济损失 8.7 亿元。2001 年 8 月 5—9 日上海连续暴雨造成市区 476 个路段积水,1 万公顷农田被淹,280 多公顷绝收。

就暴雨的预报时效而言,分为短中期和长期两种。短中期预报主要针对暴雨天气过程,预报时效在 10 d 以内;长期预报的时效虽可达月际年的时间尺度,但仅能做趋势预报。而 10 d 以上的暴雨过程预报方法少之又少。若能建立长时效的暴雨过程预报方法,则可为防汛争取宝贵时间,尽力减轻暴雨灾害对生产生活造成的损失。

自 Madden 等(1971;1972)发现热带地区 MJO 以后,大气中普遍存在的季节内振荡现象逐渐被认识。我国学者在大气低频振荡与降水的关系的研究方面取得了丰硕的成果(李崇银,1990;Yang 等,2003;琚建华等,2005;孙国武,2010;张耀华等,2012)。目前,MJO 的监测、预测及其应用已成为热点问题,Wheeler 等(2004)定义的 RMM1、RMM2 作为 MJO 实时监测预报的指数,被广泛应用于天气及气候预报领域。美国、欧洲中心、澳大利亚等国也已将动力模式应用于对 MJO 的延伸期预报中。近几年,我国诸多学者(李崇银等,1991;丁一汇等,2010;梁萍等,2012)也对 MJO 进行了深入研究及应用,取得了许多有意义的成果。

我国的一些学者很早提出利用低频演变解决过程预报的思想。杨鉴初等(1979)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方法。这一思想为研发长期天气过程预报方法提供了有益的参考。20 世纪 90 年代初,孙国武(1998)和章基嘉等(1991)就提出用大气低频振荡来预报中长期天气过程的方法——低频天气图。2007 年起,上海气候中心开始研发延伸期降水预报方法。经过几年的努力,建立了低频天气图方法,并与 2010 年开始发布上海地区汛期延伸期(10~30 d)强降水过程预报专

报。该方法在重大天气气候服务及异常天气气候的预报方面均表现出稳定的预报性能。同时上海市气候中心牵头研发了月内重要过程和趋势预报系统(MAPFS)(陈伯民等,2013)。在国家科技支撑项目和中国气象局现代气候业务发展与改革试点工作的推动下,目前“月内重要过程趋势预测系统(MAPFS 2.1)”平台已推广至全国,多个省市气候中心已利用低频天气图方法制作本地化预报。

目前低频天气图方法已被多家省级业务部门应用,用其预测强降水的延伸期过程的预报效果较好(胡春丽等,2013)。随着应用的不断深入,存在的难题是该方法能否对强降水预报的量级加以区分。本文在总结多年实际预报经验的基础上,利用低频天气图方法分析暴雨以上量级发生前后大气低频信号的变化特征,进而建立暴雨及以上量级的延伸期过程预报模型。

1 资料及方法

文中使用的资料:(1)2005—2015 年 NCEP/NCAR1 的 700 hPa 经、纬向风场的逐日再分析资料,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 经纬网格。(2)2005—2015 年上海市 11 个观测站 6—9 月逐日(20—20 时)降水资料。

绘制低频流场图时利用定长滚动法(孙国武等,2013)。利用 Butterworth 带通滤波器滤波,保留 30~50 d 周期信息。利用向量场的经验正交函数分解 EOF 对暴雨期环流进行分型分析(信飞等,2013),用以获取上海地区暴雨的延伸期预报模型。

2 上海地区暴雨的延伸期预报模型

2.1 暴雨期主要低频配置模态

低频天气图方法对强降水过程的预报能力依赖于低频系统的演变规律。因此获取暴雨预测模型的前提是掌握暴雨期低频系统的配置。暴雨日的定义为:上海 11 个观测站中至少 3 站或以上出现 24 h 雨量 $\geq 10 \text{ mm}$ 降水,且至少 2 站或以上出现 24 h 雨量 $\geq 50 \text{ mm}$ 降水。统计结果为:2005—2014 年 6—9 月上海共出现 112 个暴雨日。6 和 8 月是暴雨发生最为频繁的时期,均占总暴雨日数的 30% 以上。这两个峰值对应上海汛期强降水多发的两个主要时段:梅雨期强降水与盛夏—初秋强降水。

取 2005—2014 年 6—9 月上海地区暴雨日的 700 hPa 低频风场进行经验正交函数分解。所得的前两个主成分的累积贡献率为 52.1%。第一主成分的方差贡献率为 32.8%，其空间分布主要表现为 30°N 北侧为低频反气旋，南侧为低频气旋，北侧低频反气旋南部及南侧低频气旋北部的气流交汇于上海附近，导致暴雨过程的发生，将这类模型定义为低频气旋型(图 1a)。第二主成分的方差贡献率为 19.3%(图 1b)，其空间分布恰与第一类相反，即低

频反气旋型，30°N 以北为低频气旋，以南为低频反气旋。如此分布造成低频西北及西南气流辐合于长江中下游地区，引起暴雨过程。不论是低频气旋型还是低频反气旋型均有利于低频气流在上海附近辐合，产生暴雨过程。此外，两种类型低频系统的空间分布特征均表现出由南至北低频气旋与反气旋交替出现的特征。第一类配置表现为一十一的波列分布。第二类配置表现为相反的十一十的特征。

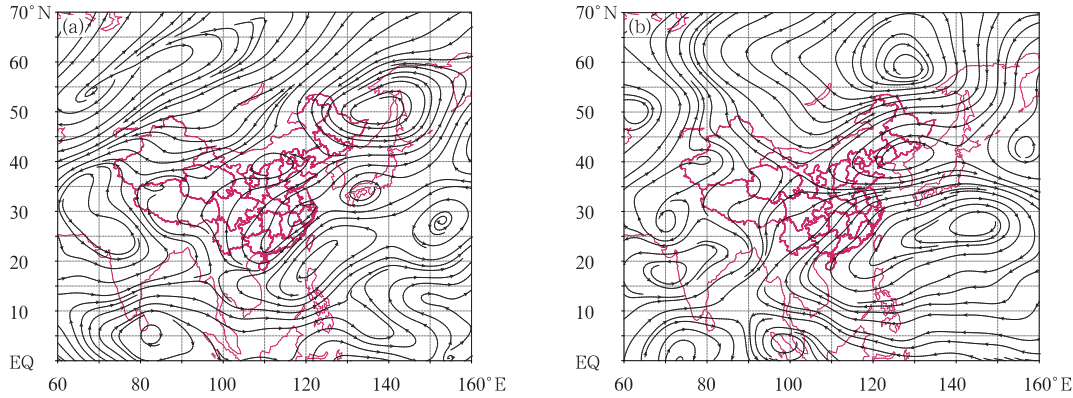


图 1 经 EOF 正交分解得到的 2005—2014 年汛期暴雨日低频风场
第一(a)、第二(b)主成分的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the 1st (a) and 2nd (b) components of the low-frequency wind field
by EOF orthogonal decomposition over the rainstorm day in flood seasons from 2005 to 2014

统计分析表明，低频气旋型及低频反气旋型是上海地区暴雨期间的主要低频配置型，两类之和占暴雨总日数的 60%左右。其余暴雨日的低频配置无明显一致性。在大暴雨日(100 mm 以上)中，低频气旋型占 61%，为大暴雨发生时期的最主要的低频配置型。气旋型配置多发生在 7—9 月的盛夏期，尤以 7 月底至 9 月初最盛。这类强降水型多为北上的气旋(台风)与北方的低频反气旋共同作用引起的。

2.2 静态概念模型

在经验正交分解主要模态分型的基础上，综合分析近 10 年暴雨期 700 hPa 流场的低频配置特征，总结出暴雨的静态低频预报模型(图 2)。图 2a 为低频气旋预报型，若预测未来某一时段在低纬度关键区(0°~30°N、120°~160°E)可能出现低频气旋，同时在中纬度关键区(30°~50°N、100°~150°E)可能出现低频反气旋，则将该时段确定为暴雨期。在

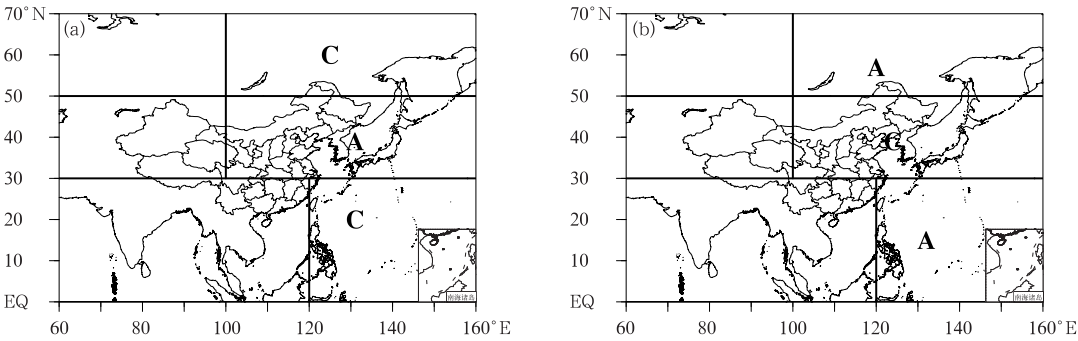


图 2 暴雨的静态低频气旋(a)和反气旋(b)预报模型

Fig. 2 Static prediction model of rainstorm for low-frequency cyclone (a) and anticyclone (b)

低频气旋型配置中,中低纬的低频气旋起决定性作用,为关键低频系统;中高纬低频反气旋为次关键系统。图 2b 为低频反气旋预报型,预报中,未来某一时段低纬度关键区出现低频反气旋,中纬度关键区出现低频气旋,则预测该时段有暴雨发生。若南北波列排列分布清晰,则出现暴雨的可能性更大。

2.3 大暴雨的动态概念模型

在建立暴雨期的低频静态模型的基础上,进一步分析暴雨发生前后低频系统的演变规律,提炼低频系统的动态模型,便可跟踪分析低频系统的移动变化,并作出预报。在分析中发现,暴雨发生前期低频系统的演变较为复杂,若将研究范围进一步缩小至大暴雨过程,则低频系统在大暴雨发生前的移动变化则有较为一致的规律可循。统计上海地区 2005—2015 年大暴雨过程(24 h 降水量 ≥ 100 mm)发生前约 30 d 高(低)纬度地区 700 hPa 低频系统的演变规律,建立大暴雨的低频动态概念模型。

研究表明上海地区 2005—2015 年大暴雨期的最主要的低频模态为低频气旋型,这种类型约占大暴雨总日数的 60%。并且低频气旋型在大暴雨发生前 30 d 至发生时的动态移动路径较为一致。在统计 2005—2015 年低频气旋型大暴雨过程的基础上,总结出低频系统动态演变的概念模型(图 3)。源自高纬度的低频反气旋在大暴雨发生前 30 d 左右生成于乌拉尔山以东西西伯利亚地区。其后便逐渐向东或东南方向移动,若是向东移动,−20 d 左右大致移至新疆及以北地区;若是向东南方向移动,−20 d 左右大致移至蒙古地区。大暴雨过程发生期间低频反气旋位于我国东部。低纬地区热带洋面在−20 d 左右进入低频气旋生成发展活跃期,−10 d 时菲律宾以东洋面有低频气旋盘踞并逐渐向

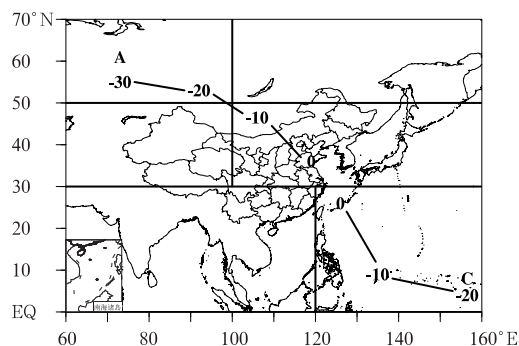


图 3 动态概念模型

Fig. 3 Dynamic conceptual model

我国东部沿海靠近。大暴雨发生期间移至我国东南沿海附近,此时东部的低频配置符合低频气旋型静态预报模型。

由于低频系统在移动路径和周期变化上具有准周期性,因此对低频系统的外推要比天气系统稳定。实际预报中,在充分掌握逐日低频天气图上低频系统变化特征的基础上,利用各个区域低频系统的显著周期进行外推,预测未来低频环流的配置。若逐日跟踪分析低频系统演变时,发现源自高纬度的低频反气旋稳定发展且逐渐南下,如再配合热带洋面低频气旋活跃,则需注意加密跟踪低频反气旋和气旋的移动路径,对未来的配置进行预判,当预判某一时段低频系统的配置及波列分布既符合静态模型又符合动态模型时,便可利用此强信号预报大暴雨过程。

3 大暴雨过程的预测个例及效果

2015 年 8 月下旬前期,受西风槽和 201515 号台风天鹅外围云系共同影响,上海出现强降水过程,本次过程从 20 日开始,至 25 日结束。24 日降水最盛,市中心徐家汇站的 24 h 雨量达 151 mm,雨量最大的嘉定站为 211.4 mm(图 4)。这是 2015 年汛期最强的降水过程。

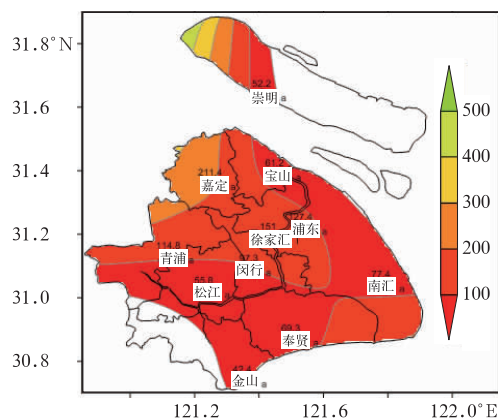


图 4 2015 年 8 月 23 日 20 时至 24 日 20 时上海市 11 个观测站累积雨量(单位:mm)

Fig. 4 Accumulated rainfall of 11 stations in Shanghai from 20:00 BT 23 August to 20:00 24 August 2015

3.1 大暴雨过程的主要影响系统

201515 号台风天鹅于 8 月 15 日在南海生成。

21 日,“天鹅”路径由西移转为北上,25 日经过上海同纬度(31.6°N、130.0°E)。同时,南下东移影响华东中北部的西风槽受副热带高压南侧“天鹅”的阻挡,在华东中北部停滞少动。由于“天鹅”移动缓慢,

中尺度辐合线 23—24 日在上海附近维持(图 5),并且,由于台风路径在此期间出现了东西向的摆动,中尺度辐合线也出现了东西向的摆动,形成了上海强降水过程。

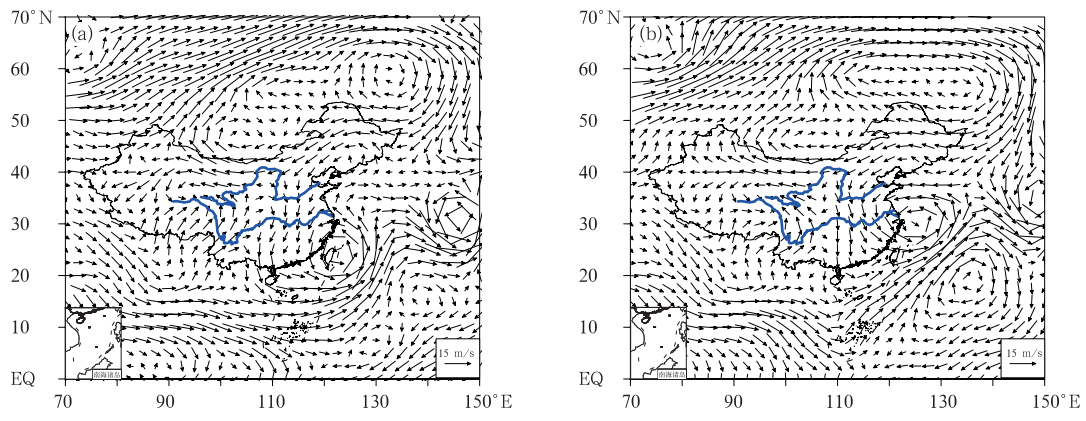


图 5 2015 年 8 月 23 日(a)和 24 日(b)700 hPa 风场图
Fig. 5 Wind field at 700 hPa on 23 (a) and 24 (b) August 2015

3.2 本次过程的延伸期预报

2015 年 8 月 7 日发布的《上海地区 10~30 d 强降水预报》中预测 8 月 24—26 日上海地区将出现强降水过程,预报时效为 17 d。虽然预测时段与实况相比稍有滞后,但考虑到提前 17 d 的预报时效,本次预报较为成功。预报中利用动态和静态模型相结合的方法。7 月下旬起跟踪 700 hPa 低频流场的演变,根据低频系统的周期特征进行外推,8 月上旬预测 8 月下旬中期将出现符合暴雨静态模型的低频配置(低频气旋型),确定 8 月 24—26 日为暴雨发生时段。

实况天气图上低频系统的演变与预测基本一致。7 月下旬开始监测到乌拉尔山以东的低频反气旋逐渐形成并向东南方向移动。此时东部的低纬度及中纬度关键区的低频配置符合低频反气旋型(图 6a),实况显示 7 月 24—25 日上海经历了一场单日最大降水量达 74 mm 的暴雨过程。8 月 24 日大暴雨发生前 20 d 高纬低频反气旋移至蒙古高原(图 6b),随后继续南下,在 8 月中旬与东部北上的低频

反气旋合并(图 6c)。同时西太平洋上的低频气旋进入活跃期,热带低纬低频气旋逐渐发展并向西移动。8 月下旬前期(图 6d),来自北方的低频反气旋与来自南方的低频气旋逐渐交汇,低频气旋携带的大量水汽与低频反气旋带来的冷空气在长江下游相遇,造成上海地区 2015 年最强降水过程。

3.3 近 5 年汛期最强大暴雨过程的预报效果检验

近 5 年低频天气图方法在暴雨预报方面体现出一定的预报能力。表 1 统计了 2011 年以来上海各年最强大暴雨过程及其延伸期预报效果。利用动静态模型相结合的方法成功预报出近年汛期最强降水过程,预报时效在 12~27 d。如 2011 年 5 月 30 日提前 18 d 预报出 6 月 17—21 日的强降水过程,实况显示 6 月 17—19 及 6 月 21 日分别出现强降水,3 个站点 24 h 累积雨量超 100 mm,单站日最大雨量达 126.3 mm,最小雨量也达到 76 mm。近 5 年低频方法对上海地区汛期延伸期强降水过程的预测效果较好。统计表明:近 5 年该方法的准确率为 62%,空报

表 1 2011—2015 年汛期最强降水的预报效果

Table 1 Forecasting effect of the most intensive precipitation in flood season in 2011—2015			
发布日期/年、月、日	预报时段/月、日	预报时效/d	实况
2011.5.30	6.17—21	18	6 月 17—19,6 月 21 日分别出现强降水单站日最大雨量达 126.3 mm
2012.7.6	8.2—7	27	8 月 8 日受 1211 号台风海葵影响全市普降大-暴雨,局地大暴雨,嘉定日降水量达 205.6 mm
2013.5.23	6.9—14	17	6 月 7—10 日上海出现强降水过程,单站日降水量达 86.8 mm
2014.8.19	8.31 至 9.2	12	9.1—3 日,大~暴雨,局地大暴雨,单站日降水量达 130.3 mm
2015.8.7	8.24—26	17	8 月 24 日 10 站 24 于 h 累积雨量超 50 mm,嘉定站达 211.4 mm

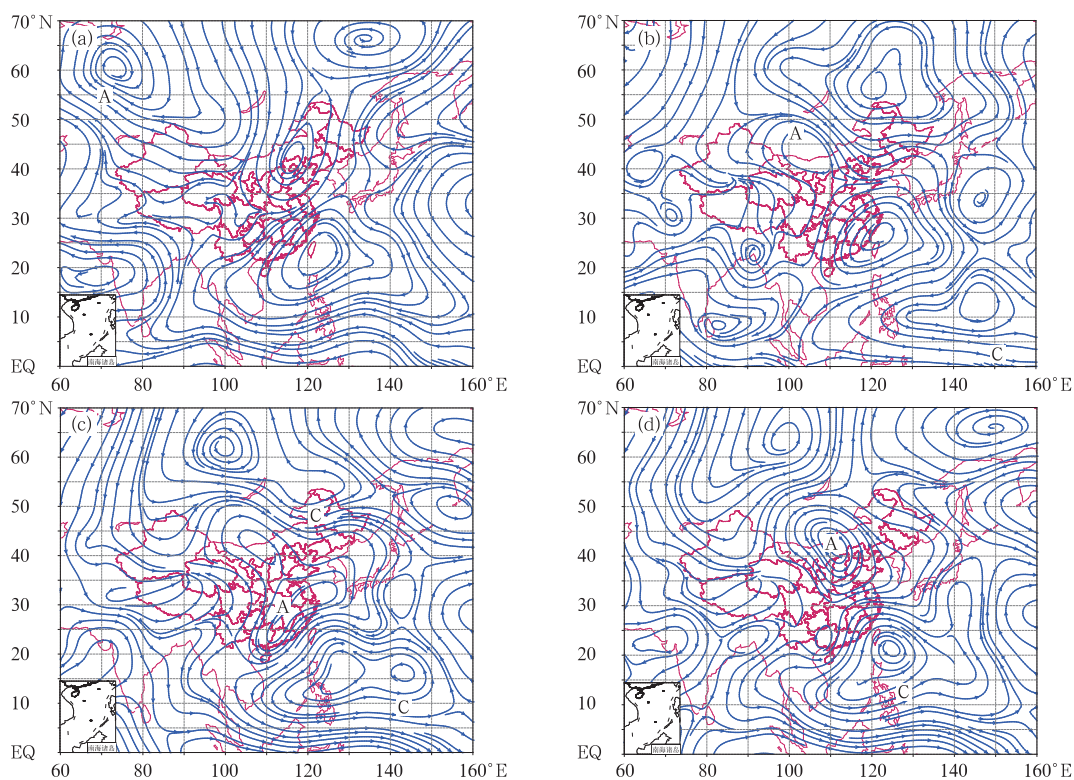


图 6 2015 年 8 月 24 日大暴雨过程发生前中后的低频流场变化

(a) -30 d、(b) -20 d、(c) -10 d 及 (d) 大暴雨过程发生时 700 hPa 低频风场演变

Fig. 6 The Change of low-frequency flow field during the rainstorm of Agu24, the low-frequency wind field evolution at 700 hPa occurred at -30 d (a), -20 d (b), -10 d (c) and the rainstorm (d)

率为 27%。

4 结论和讨论

本文利用低频天气图方法建立暴雨的延伸期预报模型,并将该模型用于近几年的延伸期预报中。

(1)取 2005—2014 年 6—9 月上海地区出现的 112 个暴雨日的 700 hPa 低频风场进行经验正交函数分解。前 10 个主成分的空间分布大致可分为两种类型,第一种类型为以长江中下游为界,北侧为低频反气旋,南侧为低频气旋,北侧低频反气旋南部及南侧低频气旋北部的偏北气流辐合于上海附近,导致暴雨过程的发生。第二类空间分布特征是长江中下游以北为低频气旋,以南为低频反气旋。低频西北及西南气流辐合于长江中下游地区,造成暴雨过程。两种类型低频系统在空间分布上表现出低频气旋与反气旋交替出现的特征。第一类配置的低频系统表现为一十一的波列分布。第二类配置表现为相反的十一十的特征。

(2)在经验正交分解主要模态分型的基础上,综

合分析 2005—2015 年近 10 年暴雨期 700 hPa 流场的低频配置特征,总结出暴雨的静态预报模型,即低频气旋型和低频反气旋型。预报中,若预测未来某一时段在低纬度关键区出现低频气旋,同时在中纬度关键区出现低频气旋,则符合低频静态预测模型,将该时段确定为暴雨期。若此时高纬度地区再配合以低频气旋组成波列,则更有利于暴雨发生。若未来某一时段低纬关键区出现低频反气旋,中纬关键区出现低频气旋,则为低频反气旋静态预测模型。

(3)研究表明上海地区近 10 年的大暴雨期最主要的低频模态为低频气旋型,这种类型约占总日数的 60%,对这一类型的低频过程进行跟踪分析得到,大暴雨过程发生 -30~0 d 期间低频系统演变具有较为一致的特征。具体表现为:源自高纬度的低频反气旋在大暴雨发生前 30 d 左右生成于乌拉尔山以东西西伯利亚地区。随后逐渐向东或东南方向移动。大暴雨发生当天(0 d)移至我国东部。低纬地区在 -20 d 左右进入低频气旋活跃期,0 d 时移至我国东南沿海附近,此时上海附近地区为低频气旋及反气旋辐合区,即低频气旋型静态预报模型。

(4)将动静态模型相结合预测暴雨特别是大暴雨过程取得了较好的效果。2015年8月23—24日上海遭受大暴雨袭击,城市内涝严重。预测中,从7月下旬起跟踪700 hPa低频流场的演变,根据低频系统的周期特征进行外推,8月上旬预测8月下旬中期将出现符合暴雨静态模型的低频配置(低频气旋型),确定8月24—26日为暴雨发生时段,预测时效达17 d。近5年的实际预报结果显示,该方法对汛期暴雨过程的预报效果良好,特别是各年汛期最强降水过程,预报时效在12~27 d。

(5)本文仅针对最易引起大暴雨的低频气旋型建立动态预报模型,对占大暴雨20%的低频反气旋型的动态模型的研究工作以及除大暴雨外的暴雨过程的动态模型的研发工作仍在继续。

(6)本文仅从低频风场角度建立模型。所涉及的延伸期预报方法本身及研究对象仍存在很多局限和不足。暴雨的影响因子众多,如暴雨分布模型中气旋、反气旋的纬向分布特征体现了低频能量的传播。后续对低频能量的传递对产生暴雨的作用还将进行深入研究。另外对低频高度场、水汽场等的分析也在进行中。以求建立更为多元化的低频天气图预报模型。

参考文献

- 陈伯民,信飞,沈愈,等. 2013. 月内重要天气过程与气候趋势预测系统级应用进展. 气象科技进展, 3(1): 46-51.
- 丁一汇,梁萍. 2010. 基于MJO的延伸预报. 气象, 36(7): 111-122.
- 胡春丽,李辑,陈伯民,等. 2013. 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, 3(1): 64-67.
- 据建华,赵而旭. 2005. 东亚夏季风区的低频振荡对长江中下游旱涝的影响. 热带气象报, 21(2): 163-171.
- 李崇银. 1990. 大气中的季节内振荡. 大气科学, 14(1): 32-45.
- 李崇银,肖子牛. 1991. 赤道太平洋增暖对全球大气30~60天振荡的激发. 科学通报, 36(15): 1157-1160.
- 梁萍,丁一汇. 2012. 基于季节内振荡的延伸期预报试验. 大气科学, 36(1): 102-116.
- 孙国武,陈葆德. 1998. 青藏高原上空大气低频波的振荡及其经向传播. 大气科学, 22(3): 250-256.
- 孙国武,李震坤,信飞,等. 2013. 延伸期天气过程预报的一种新方法—低频天气图. 大气科学, 37(4): 945-954.
- 孙国武,信飞,孔春燕,等. 2010. 大气低频振荡与延伸期预报. 高原气象, 29(5): 1142-1147.
- 信飞,李振坤,王超. 2013. 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, 3(1): 52-56.
- 杨鉴初,归佩兰. 1979. 关于长期天气过程的划分. 气象, 4(6): 14-18.
- 章基嘉,孙国武,陈葆德. 1991. 青藏高原大气低频变化的研究. 北京: 气象出版社, 105-106.
- 张耀华,周兵,张耀存. 2012. 2010年南方持续暴雨期大气环流异常及其低频特征研究. 气象, 38(11): 1367-1377.
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. J Atmos Sci, 28(5): 702 - 708.
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. J Atmos Sci, 29(6): 1109-1123.
- Jones C, Carvalho L M V, Higgins R W, et al. 2004. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. J Climate, 17: 2078-2095.
- Wheeler M, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. Mon Wea Rev, 132(8): 1917-1932.
- Yang Hui, Li Chongyin. 2003. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Changjiang-Huaihe River basin. Adv Atmos Sci, 20(4): 540-553.