信飞,李德琳,王超,等. 2014. 利用经验正交函数绘制低频天气图的研究. 气象,40(8):940-947.

利用经验正交函数绘制低频天气图的研究*

信 飞[1] 李德琳[2] 王 超[3] 孙国武[4]

1 上海市气候中心,上海 200030
2 中国气象科学研究院,北京 100081
3 上海市松江区气象局,上海 201620
4 中国气象局兰州干旱气象研究所,兰州 730020

提 要: 根据 NCEP/NCAR1 再分析资料及 GFS 模式资料,利用经验正交函数分解及 Morlet 小波变换方法,制作 EOF 低频天气图。与 Butterworth 滤波方法提前设定低频周期不同,该方法遵从大气自身的时-频变化特征,能够及时调整显著周期,提取研究时段的主要低频振荡。跟踪分析表明:EOF 低频天气图上的低频系统的准周期性和准定常性都较为稳定,能够反映大气环流的主要特性。比较而言,在 EOF 低频天气图上,中低纬地区的主要低频系统的位置及气流的辐合区更接近实际大气的主要特征。而 Butterworth 低频图对中高纬低频系统的刻画能力更强。可综合两种低频图的特点加以利用。另外,利用 GFS 模式的预报场获取未来 1~10 d 的 EOF 低频预报图,将其用于延伸期预报,可增长低频天气图方法的预报时效。

关键词: 低频天气图,经验正交分解,Morlet 小波分析,延伸期预报时效

中图分类号: P456 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.08.004

Exploration of the Low-Frequency Synoptic Chart Used by EOF

XIN Fei[1] LI Delin[2] WANG Chao[3] SUN Guowu[4]

1 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030
2 China Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
3 Shanghai Songjiang Meteorological Office, Shanghai 201620
4 Lanzhou Institute of Arid Meteorology of CMA, Lanzhou 730020

Abstract: Based on NCEP/NCAR1 reanalysis data and GFS model data, using empirical orthogonal function (EOF) decomposition and Morlet wavelet transform to produce EOF low-frequency (LF) synoptic map. The method can adjust the LF cycle according to atmospheric own LF characteristics. Analysis showed that: EOF LF synoptic map seems better in terms of location and flow of the system's main LF low-latitude areas critical convergence zone while Butterworth LF synoptic map is good at high latitudes LF systems. Also, we try to use GFS model forecast fields to get the next 1—10 days EOF LF forecast map to increase the extended forecast by LF synoptic maps method.

Key words: low-frequency (LF) synoptic map, empirical orthogonal function (EOF), Morlet wavelet analysis, extended forecast

* 上海市自然科学基金(12ZR1449400)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306030)及国家自然科学基金项目(41205060)共同资助
2014 年 1 月 22 日收稿; 2014 年 4 月 12 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

延伸期预报主要指 10～30 d 的天气过程和气候趋势预报,是中期预报(10 d 以下)的延伸。它与短期气候预测主要预报气象要素的平均值和趋势有很大区别。近几年,频发的高影响天气事件导致的灾害越来越重(张强等,2010;沈洁等,2010)。延伸期预报,尤其是极端天气气候事件的延伸期过程预报在防灾减灾方面显得至关重要。然而目前针对这一时段的客观预报尤其是天气过程预报的方法和工具还不多(包括数值模式和统计类方法)(Anderson et al,1994;王绍武,1998;丑纪范等,2006;丑纪范,2010;郑志海等,2012;陈官军等,2012)。它已成为当前国内外气象学界研究工作关注的重点。

延伸期尺度内,大气低频振荡作为大气活动的强信号,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已成为一个重要的研究方向。这一方向主要包括 MJO、低频天气图和天气关键区大气低频波等方法。美国、欧洲中心等多国家将动力模式应用于对 MJO 的延伸期预报中。目前实时业务模式主要以发布未来两周的 MJO 指数预报为主。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。在我国,诸多学者(李崇银等,1991;丁一汇等,2010;梁萍等,2012;李汀等,2012;牛法宝等,2013)也开展了诸多针对 MJO 的研究及应用并取得了很多有意义的成果。20 世纪 90 年代初,孙国武等(1988)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 年该方法在上海气候中心率先本地化应用,近几年汛期的预报效果理想(孙国武等,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,借助“月内重要过程趋势预测系统(MAPFS 1.1)”平台,低频天气图预报方法已推广至多地,辽宁、甘肃、浙江和江苏等省气候中心均已利用低频天气图方法制作本地化预报。

低频天气图方法(孙国武等,2008;陈青等,2014)主要利用大气低频振荡的时空演变特性,提取大气中的低频信号,绘制“低频天气图”,它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的移动、生消等情况进行分析,制作延伸期强降水过程预报。实践表明,相较于实际天气图,低频天气图上的低频天气系统具有缓变特征,存在于天气噪音水平之上,可反映天气系统的演变规律。这些特点决定了可以用它来制作延伸期预报。目前的业务预报中,主要利用 Butterworth 滤波器提取大气的低频分量制作低频天气图。这种方法需提前预判低频周期,其时频自适应能力有限。本文利用 EOF 分解及 Morlet 小波变换方法获取 EOF 低频天气图,使之能够在一定程度上反映大气自身的时-频变化特征。并利用数值预报模式的输出结果,获得这种方法的低频预报图,以增长延伸期过程预报的时效。

1　资料及方法

文中使用的资料:(1)2007—2012 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°×2.5°经纬网格。(2)美国 NCEP/NCAR 全球预报系统(Global Forecasting System,GFS)资料,GFS 模式是一个耦合模式,预报时效为 0～360 h(15 d)。模式资料的起报时间为 00 时/12 时(世界时)每天两次滚动预报。分辨率为 2.5°×2.5°经纬网格。(3)2007—2012 年 6 月上海市 11 站逐日(20—20 时)降水资料。

利用向量场的经验正交函数分解(EOF),结合 Morlet 小波变换确定所研究阶段的低频振荡的主要周期,分离环流场的低频分量,构建低频流场,获得 EOF 低频天气图。引入 GFS 模式的集合预报结果,利用相同的方法可获得未来 n 天的 EOF 低频预报图。

2　构建 EOF 低频天气图

2.1　构建流程

图 1 为构建 EOF 低频天气图的流程。以经 EOF 分解后时间模态为研究对象,利用 Morlet 小波变换分析它们的显著周期特征,保留具有低频周期的模态,将周期相近的模态合并还原为低频流场。

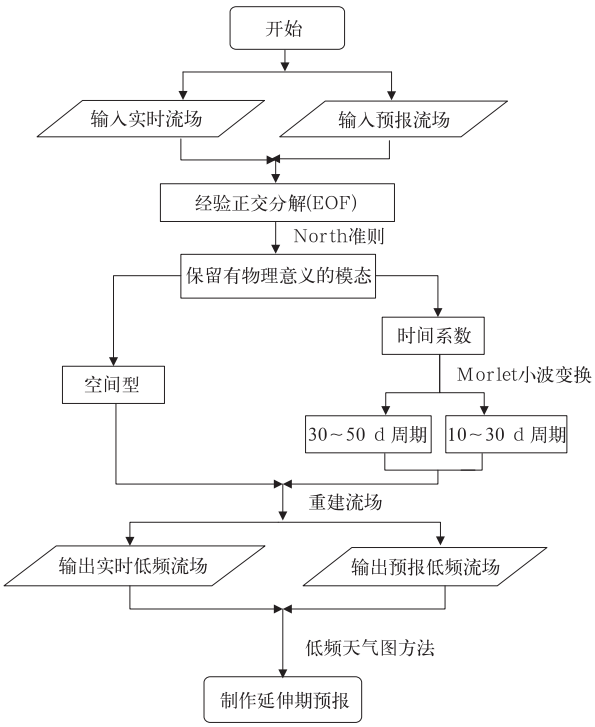

图 1 EOF 低频天气图的方法流程

Fig. 1 Methods and processes of EOF low-frequency chart

2.2 提取低频分量

利用低频天气图方法建立上海地区强降水模型时，综合考虑地形及气流演变等特征，根据实际业务需要，选取 700 hPa 经纬向风场为研究对象，预报效果较好(孙国武等，2010；信飞等，2013)。本文仍沿用 700 hPa 经纬向风场作为研究对象。下面采用定长滚动法(孙国武等，2013)，以绘制 2012 年 6 月 22 日的 EOF 低频天气图为例，说明具体步骤。利用 NCEP/NCAR1 的 700 hPa 流场的再分析资料，将 *UV* 场的标准化变量进行向量场的经验正交函数分解(EOF)，得到前 n 个模态，根据 North 准则(魏凤英，2007)，保留有物理意义的模态；即当相邻两个特征值 λ 满足公式(1)时，则认为模态具有物理意义。

$$\lambda_{j+1} \leqslant \lambda_j (1 - \sqrt{2/n}) \qquad (1)$$

式中，n 为输入数据时次，j 为模态数。$n=150$ 时，EOF 分解的前 10 个模态中有 6 个模态符合 North 准则，有物理意义。

小波分析又称多分辨分析，是近几年来国际上十分热门的一个前沿领域，被认为是傅里叶分析方法的突破性进展。小波变换的窗函数是缩放因子和平移因子的函数。这样的时-频窗表现了小波变换的时-频局部化能力(郑祖光等，2010)。由于它对信号处理的特殊优势，采用 Morlet 小波变换，分析经 EOF 分解得到的有物理意义的 6 个时间模态的周期性。这些模态的低频周期多出现在 10～50 d 之间(图 2)。以第一模态为例，5 月之前，该时间序列以 15～30 d 的振荡周期为主，进入 5 月下旬，40～50 d 振荡成为显著周期。此前多位学者(Krishnamurti，1985；李崇银，1990；肖子牛，2010；杨秋明，2009；杨文峰等，2009；张耀华等，2012)的研究发现，大气中普遍存在 10～30 及 30～50 d 天低频振荡现象。结合延伸期预报实际应用需要，将这些有物理意义的模态分为 10～30 和 30～50 d 两种振荡周期。以各模态近期的显著低频周期为依据，将 6 个模态分为两类：第一、第三、第四模态主要以 30～50 d 振荡为主；第二、第五、第七模态则归为 10～30 d 振荡(图 2)。

2.3 重建低频流场

将经 Morlet 小波变换提取的 10～30 和 30～50 d 周期的两类模态还原为具有相应周期的环流场，从而绘制得到两类(10～30 和 30～50 d)低频天气图。在制作延伸期过程预报时，比较各个周期的模态的累积贡献率，选择累积贡献率较大的一种低频图作为主要参考对象。图 3 为使用该种方法绘制的 2012 年 6 月 22 日 10～30 和 30～50 d 的 EOF 低频天气图。比较两种周期的累积贡献率，该时段应以 30～50 d 周期的 EOF 低频天气图为主。

3 EOF 低频天气图的性能

与 Butterwoth 低频天气图提前设定低频周期不同，EOF 低频天气图能够极大程度地遵从每段时间序列自身的周期演变特征，及时调整，提取当时最为主要的振荡分量。那么 EOF 低频天气图的性能如何？EOF 图上的低频系统在强降水发生时段的配置有何特征。下面从这两个方面对 EOF 低频天气图的性能进行评估。

3.1 低频天气图的对比分析

首先比较 EOF 和 Butterworth 两种低频天气图。下面以强降水日为例，说明 EOF 与 Butterworth 两种低频天气图在强降水发生时的低频环流

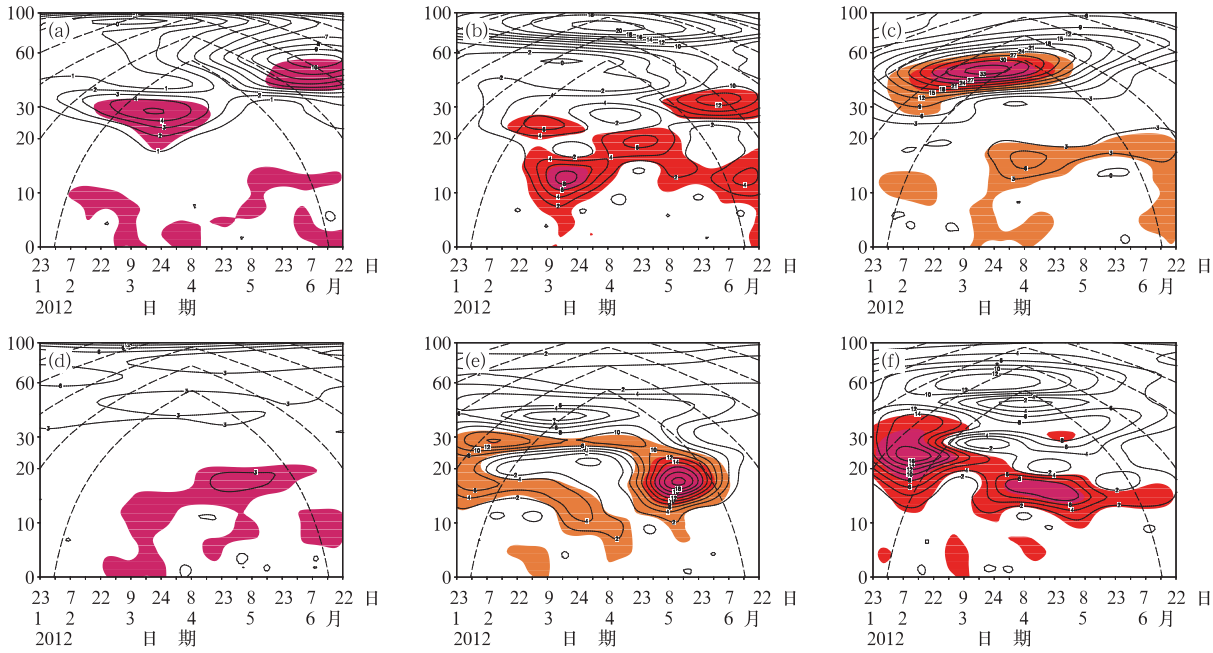

图 2　各主成分时间系数的 Morlet 小波变换

(a, b, c)依次为第一、第三、第四模态,(d, e, f)依次为第二、第五、第七模态

(阴影部分通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,虚线部分为头部效应区)

Fig. 2　Wavelet transform of the time-coefficients in each mode

(a, b, c) 1st, 3rd, and 4th modes; (d, e, f) 2nd, 5th, and 7th modes

(The shaded areas have passed the 0.05 significant level. The dashed lines represent the head effect area)

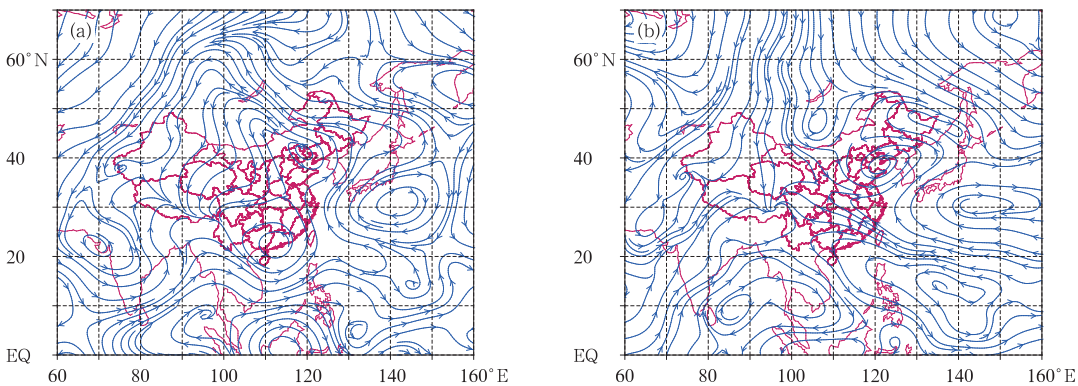

图 3　2012 年 6 月 22 日的 EOF 低频天气图

(a) 10～30 d, (b) 30～50 d

Fig. 3　The EOF low-frequency synoptic chart on 22 June 2012

(a) 10－30 d, (b) 30－50 d

配置。2012 年 6 月 17—18 日上海地区出现大—暴雨,其中金山站 17 日降水量达到 138.4 mm。本轮降水是 6 月的最强降水过程。这次强降水过程发生前后,热带西南季风强盛,副热带高压脊线位于 25°N 附近,主体位置偏东,较活跃的东北冷涡使冷空气频繁向南输送。中高纬偏北气流与热带西南季风正好交汇于上海附近,出现强降水(图 4a)。这样的气流交汇特征在 EOF 及 Butterworth 低频天气图上均有体现。EOF 低频图上(图 4b),强降水发生时,高纬的偏北低频气流和位于西太平洋的低频反气旋西侧的偏南低频气流辐合,造成上海地区强降水。与 Butterworth 低频天气图相比,EOF 低频图上中低纬主要环流系统及偏北气流的位置更接近实际大气。而在 Butterworth 低频图上(图 4c),中高纬地

区，特别是东北地区的主要低频特征更为清晰。实际预报中，可考虑两种低频天气图的优势，综合分析。

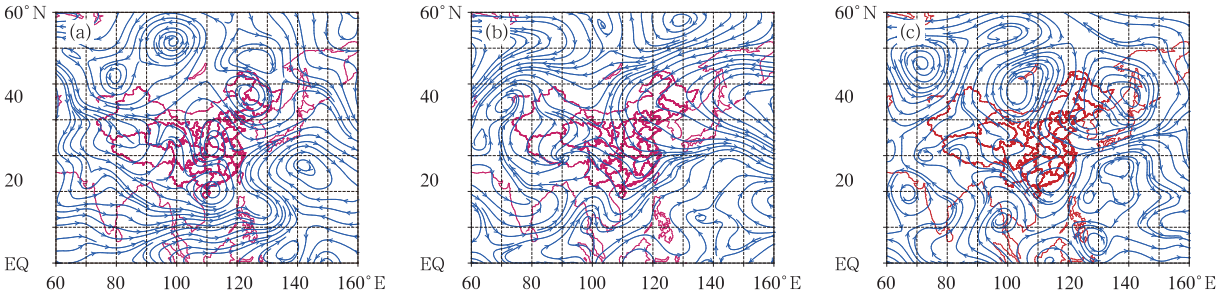

图 4 2012 年 6 月 17 日 700 hPa 流场图(a)，EOF(b)及 Butterworth(c)的 30～50 d 低频天气图

Fig. 4 Flow field on 17 June 17 2012 (a); real-time low-frequency chart of 30－50 days obtained by the method of EOF (b), and Butterworth (c)

3.2 强降水期 EOF 低频天气图的环流配置特性

为了更为全面地掌握强降水期 EOF 低频天气图上的低频系统配置特征，汇总 2007—2011 年上海地区强降水发生时段的 EOF 低频天气图做向量场的经验正交函数展开(图 5)。前 10 个空间模态大致分为两类。其一以第一模态的空间分布为代表，它体现了南北低频气流在上海附近的辐合，梅汛期强降水多表现为这一特征。其二以第二模态的空间分布为代表：我国东南沿海多有低频气旋移动发展，上海附近受低频气旋外围的偏东低频气流控制，上海地区出现强降水或大风天气。这与实际大气中的台风或其倒槽影响相对应。跟踪分析多年的 EOF 低频天气图上的低频系统，其强降水期低频配置型与上海地区低频天气图方法的强降水预报模型基本一致。

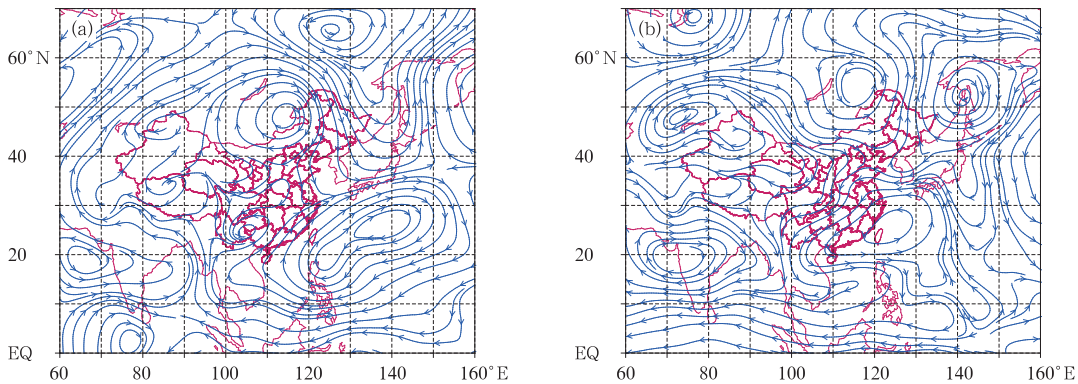

图 5 经 EOF 正交分解的强降水期 700 hPa 低频流场的前两个模态的空间分布

(a) 第一模态，(b) 第二模态

Fig. 5 Spatial distribution of the first two EOF modes of low-frequency flow field at 700 hPa during heavy rainfall period

(a) the first EOF mode, (b) the second EOF mode

低频天气图方法的主要思路为综合多个关键区的低频系统的生消、移动变化特征来预报延伸期强降水过程(孙国武等，2008)。关键区的划分考虑了各个区域在强降水过程发生时的显著特征。每个关键区具有基本一致的低频配置特性及准周期性。为了了解 EOF 低频天气图在各个关键区的低频特性，跟踪对比 2007—2011 年汛期(6—9 月)EOF 和 Butterworth 两种低频天气图上各关键区的低频系统。结果表明：EOF 低频图上，各个关键区的低频系统具有较好的准周期和准定常性。EOF 低频天气图能够体现强降水期低频系统的特性。与 Butterworth 方法相比，它在中低纬 3 个区的低频系统的完整性和准周期性方面占优势。而 Butterworth 低频图上中高纬低频系统的位置及演变路径更为清

晰。在实际业务中,可结合两种低频图的特点综合分析。

4　EOF 低频预报图

预报时效对延伸期预报至关重要,延长预报时效意义重大。近几年的业务应用表明,低频天气图方法的预报时效大多在 15～35 d。目前业务中使用实时低频天气图,并未涉及到低频预报图。如果结合模式输出数据制作 EOF 低频预报图并用于预报,应可在一定程度上增长预报时效。上一节的对比分析表明,利用 EOF 方法获取的天气图保留了环流的低频特性。接下来利用全球预报系统(GFS)输出的集合预报结果获取低频预报图,并简要分析强降水期间低频预报图的性能。

4.1　制作低频预报图

已有研究表明,GFS 模式在欧亚地区的可用预报时效为 10 d 左右(麻巨慧等,2011;段明铿等,2012)。低频天气图方法主要关注各关键区,特别是主要关键区的低频系统活动。下面简要分析 GFS 模式 700 hPa 经纬向风场集合预报的区域性能。图 6 为 700 hPa 纬向风和经向风的预报场和实况场。就北半球而言,在中高纬的主要关键区和中低纬地区的我国东南沿海(低频气旋多发区)及西太平洋(副热带高压位置)附近的区域,GFS 未来 1～10 d 的集合预报与实况的相关性高。可利用 NCEP 的逐日再分析资料结合 GFS 模式输出的未来 1～10 d 的逐日预报场,制作 EOF 低频预报图。具体制作方法与 EOF 低频天气图相同。

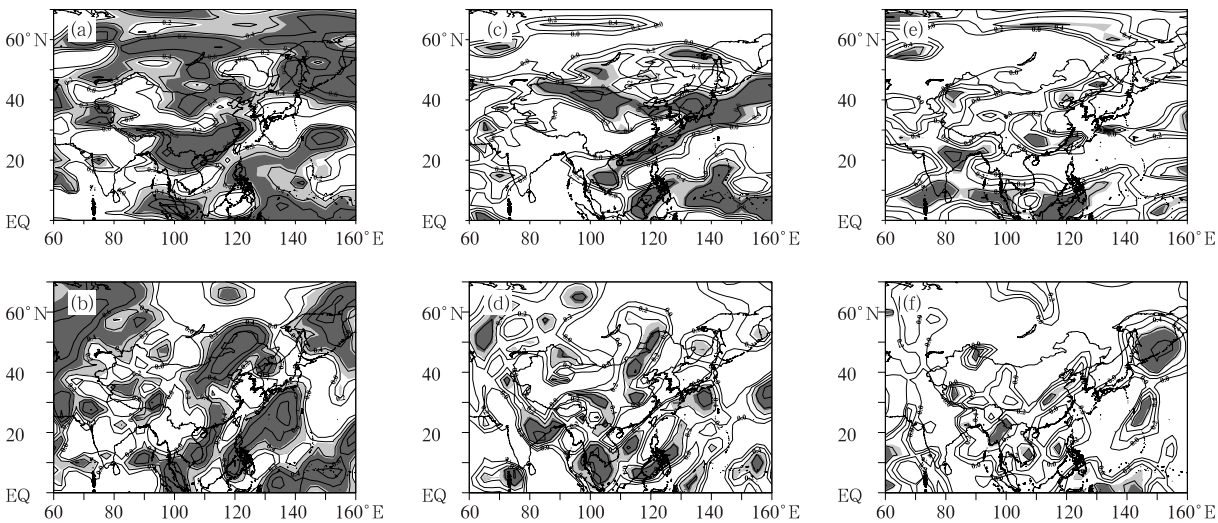

图 6　GFS 模式预报的 700 hPa 的 u、v 场与实况流场的相关

(a, b) 第 5 天 u、v 场, (c, d) 第 10 天 u、v 场, (e, f) 第 15 天 u、v 场

[深(浅)阴影部分通过 0.1(0.2)的显著性水平检验]

Fig. 6　The correlation coefficients between u, v fields from model prediction and real-time flow fields at 700 hPa on the 5th day (a, b), 10th day (c, d), 15th day (e, f)

[The dark (light) shaded areas have passed the 0.1 (0.2) significant level]

4.2　低频预报图性能浅析

下面以 2012 年 6 月最强降水过程为例分析低频预报图的性能。利用实况 700 hPa 流场及 GFS 模式输出的未来 1～10 d 预报流场,制作 6 月 12—21 日的 EOF 低频预报图。这一时期以 30～50 d 低频预报图为研究对象,分析 6 月 17 日强降水过程发生前后,低频预报图上显示的低频系统特性。图 7 给出强降水发生前—中—后的环流演变。强降水发生前(图 7a),上海附近受低频偏北气流控制;随后,南北气流共同夹击形成的气流辐合区北移至上海附近,强降水开始(图 7b);随着低频交汇区继续向东北方向推进,这轮强降水过程暂告一段落(图 7c)。EOF 低频预报图在低频系统的位置和低频气流的特征上接近低频实况图。

跟踪对比 2007—2012 年汛期 EOF 低频预报图

及实况图上的低频系统演变。结果表明，EOF 低频预报图能够清晰地反映出强降水前—中—后的低频环流的变化，且与 EOF 低频天气图上的主要低频系统基本一致。可试将低频预报图用于上海地区汛期强降水的延伸期预报中，以期在一定程度上提高延伸期的预报时效。

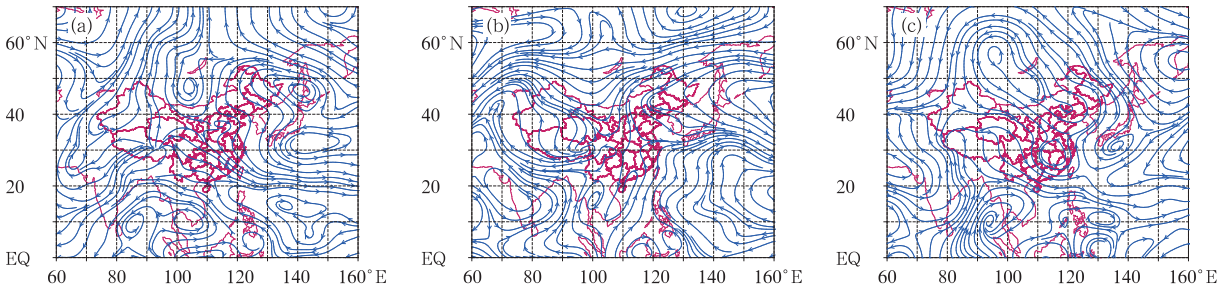

图 7 2012 年 6 月 13—20 日强降水发生前—中—后的低频预报图

(a) 6 月 13 日，(b) 6 月 17 日，(c) 6 月 20 日

Fig. 7 Low-frequency forecast chart before, during, after the heavy rainfall occurs in 2012

(a) 13 June, (b) 17 June, (c) 20 June

5 结论与讨论

(1) 利用经验正交函数分解(EOF)，结合 Morlet 小波变换，以近期大气的显著低频变化周期为依据，选取具有低频特性的模态，将其还原为低频流场，得到 EOF 低频天气图。在实际应用中，若存在多种周期并存的情况，可通过比较各周期模态的累积贡献率进行取舍。与 Butterworth 提前设定显著周期不同，EOF 低频天气图遵从大气自身的时-频变化特征，能够及时调整显著周期，提取当时最主要的振荡分量。

(2) 近 5 年汛期 EOF 与 Butterworth 低频天气图的比较分析表明：两者的低频环流配置基本一致。在 EOF 低频天气图上，中低纬地区主要低频系统的位置及气流的辐合区更接近实际大气的主要特征。而 Butterworth 低频图对中高纬低频系统的刻画能力更强。可综合两种低频图的特点进行分析利用。

(3) 利用 GFS 数值模式的集合预报结果制作未来 10 d 的低频预报图。跟踪分析 2007—2012 年汛期 EOF 低频预报图发现，降水前—中—后期低频环流的物理特征清晰，且与 EOF 低频实况图的主要低频系统基本一致。可将其用于汛期降水的延伸期预报中，以期增长预报时效。

(4) 目前仅制作单一层次、单一要素的 EOF 低频天气图，根据实际预报业务的需求，将考虑多个层次不同要素的 EOF 低频图。

(5) 对 EOF 低频预报图的性能需进一步深入研究，需在实际预报中对其进行效果评估及检验。

参考文献

陈官军，魏凤英. 2012. 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，36(3)：633-644.

陈青，廖玉芳，杨书运，等. 2014. 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，40(2)：223-228.

丑纪范. 2010. 10—30 d 延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌. 气象科学，30(5)：569-573.

丑纪范，谢志辉，王式功. 2006. 建立 6—15 天数值天气预报业务系统的另类途径. 军事气象水文，(3)：4-9.

丁一汇，梁萍. 2010. 基于 MJO 的延伸预报. 气象，36(7)：111-122.

段明铿，王盘兴，李驰钦. 2012. NCEP 集合预报系统在亚欧和北美区域的预报效果对比. 大气科学学报，35(6)：641-651.

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.

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.

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.

麻巨慧，朱跃建，王盘兴，等. 2011. NCEP、ECMWF 及 CMC 全球集合预报业务系统发展综述. 大气科学学报，34(3)：370-380.

牛法宝，杞明辉，杨素雨，等. 2013. MJO 不同活动中心位置对云南冬半年降水过程的影响. 气象，39(9)：1145-1153.

孙国武，陈葆德. 1988. 青藏高原上空大气低频波的振荡及其经向传播. 大气科学，12(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，陈伯民，等. 2008. 低频天气图预报方法. 高原气象，27(增刊)：64-68.

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.

沈洁,李耀辉,朱晓炜. 2010. 西北地区气候与环境变化影响沙尘暴的研究进展. 干旱气象,28(4):467-474.

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京:气象出版社.

王绍武. 1998. 短期气候预测的可预报性与不确定性. 地球科学进展,13(1):8-14.

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.

肖子牛. 2010. 我国短期气候监测预测业务进展. 气象,36(7):21-25.

杨秋明. 2009. 全球环流 2—30 d 振荡与长江下游降水. 中国科学 D:地球科学,39(11):1515-1529.

杨文峰,刘瑞芳,吴林荣,等. 2009. 陕西省 10—20 天降水预报方法及业务化试验. 气象,35(12):139-143.

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.

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.

张强,张存杰,白虎志,等. 2010. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响——总体暖干化,局部出现暖湿迹象. 干旱气象,28(1):1-7.

郑志海,封国林,黄建平,等. 2012. 基于延伸期可预报行的集合预报方法和数值试验. 物理学报,61(19):199-203.

郑祖光,刘丽红. 2010. 经验模态分解与小波分析及其应用. 北京:气象出版社.

Anderson J L,Van den Deal H M. 1994. Skill and return of skill in dynamic extended-range forecasts. Mon Wea Rev,122:507-516.

Elizabeth A M,Wheeler M C. 2005. Forecasting an index of the Madden-Oscillation. International J Clima,25(12):1611-1618.

Krishnamurti T N. 1985. Summer monsoon experiment:A Review. Mon Wea Rev,112:1590-1626.

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.