

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 [J]. 大气科学, 37 (4): 945-954, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12125. Sun Guowu, Li Zhenkun, Xin Fei, et al. 2013. Low-frequency synoptic map: New method for extended range forecasting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 945-954.

延伸期天气过程预报的一种新方法 ——低频天气图

孙国武^{1,2} 李震坤² 信飞² 何金海³

1 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020

2 上海市气候中心, 上海 200030

3 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘 要 本文主要介绍低频天气图延伸期预报方法。低频天气图是一种不同于统计学预报方法、数值预报方法和天气学预报方法的延伸期天气过程预报的新方法, 可以用于延伸期(10~30 天)天气过程预报。低频天气图的技术要点是大气低频系统(低频气旋和低频反气旋)及其相应的低频气流。低频天气图的天气学意义是能反映造成天气过程的天气系统的生消、维持和移动及其大气环流演变过程。其优越性在于其特征: 时间上的周期性(30~50 天)、持续性和空间上的连续性、相似性以及地域上的准定常性, 预报天气系统相对容易且时效长。2008~2012 年在上海市气候中心业务应用的结果表明, 可以提前 15~45 天预报上海地区的强降水过程。

关键词 低频天气图 低频天气系统 延伸期天气过程预报 大气低频振荡

文章编号 1006-9895(2013)04-0945-10

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12125

Low-Frequency Synoptic Map: New Method for Extended Range Forecasting

SUN Guowu^{1,2}, LI Zhenkun², XIN Fei², and HE Jinhai³

1 Lanzhou Institute of Arid Meteorology, Lanzhou 730020

2 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

3 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract A method of extended range forecasting, the low-frequency synoptic map (LFSM), is introduced in this paper. Unlike statistical forecasting, numerical prediction, and synoptic forecasting, the LFSM is a new approach that can be used for extended range weather process forecasts. The key technical points of the LFSM are the low-frequency system (low-frequency cyclone and low-frequency anticyclone) and the corresponding low-frequency airflow. Its synoptic significance is that the LFSM can reflect the formation, dissipation, maintenance, and motion of synoptic systems that cause weather processes, as well as the evolution of atmospheric circulation. Its advantage lies in its characteristics, including temporal periodicity and persistence, spatial continuity and similarity, and the quasi-steady properties in an area, so the LFSM can easily predict weather processes and has a longer forecast validity period. Operational practice using the LFSM in the Shanghai Climate Center from 2008 to 2012 indicates that it can predict strong precipitation processes 15-45 days in advance.

收稿日期 2012-08-09, 2012-12-13 收修定稿

资助项目 中国气象局公益性行业(气象)科研专项GYHY201006023、GYHY201006020, 国家自然科学基金资助项目41205060, 上海市自然科学基金课题12ZR1449400, 上海市气象局项目TD201206

作者简介 孙国武, 男, 1937 年出生, 研究员, 主要从事青藏高原气象、干旱气候、大气低频振荡和季风等研究。E-mail: guowusun@yahoo.com.cn

通讯作者 李震坤, E-mail: lizhenk@yeah.net

Keywords Low-frequency synoptic map, Low-frequency weather system, Extended range forecast, Low-frequency oscillation

1 低频天气图概述

低频天气图——一种有别于统计学预报方法和数值预报方法以及天气学预报方法但又与之存在一定关联的延伸期天气过程预报的新方法。

在我国，随着国家建设的高速发展，政府和公众对气象服务的要求越来越高，加之频发的高影响天气事件导致的气象灾害越来越严重，而气象部门开展的预报预测业务，如 10 天以内的中、短期天气预报和 30 天以上的月、季、年尺度的长期趋势预报，都难以完全满足气象服务的需要。而延伸期预报是指中期预报（10 天以下）的延伸，是 10~30 天期间的天气过程预报，在预报内容方面和中短期天气预报一样，与长期预报（月以上）主要预报气象要素的平均值和趋势则不同。延伸期天气过程预报是气象业务预报中的缺口和空白，但它能为政府部门的抗灾部署预留更多的准备时间，使防灾减灾工作更有针对性。

气候预测和长期预报是预测或预报气候要素的平均值；中短期预报是预报具体天气现象发生的日期和强度。而低频天气图预报方法介于上述两者之间，主要是作延伸期天气过程预报，预报时效 10~30 天，是中期天气预报时效达不到；其预报内容（天气过程的日期、强度）又是长期预报做不到的。所以，低频天气图可能是衔接“天气预报”和“气候预测”之间的 10~30 天时间段的“时间缝隙”的预报方法。是基于大气低频振荡客观存在的特性，利用滤波方法提取大气中的低频信号，绘制低频天气图，制作延伸期天气过程预报。因为延伸期天气过程预报可能与低频天气系统有关，低频天气图可能是延伸期天气过程预报的较为合适的工具之一。

早在 20 世纪 80 年代末、90 年代初，Sun and Chen (1989)、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，并与何金海教授致力于大气低频振荡预报方法在气象业务部门的业务应用研究。直到 2008 年和 2009 年，“低频天气系统预报技术业务化应用”项目作为中国气象局新技术开发实施，2011 年和 2012 年，中国气象局预报与网络司以“月内重要过程趋

势预测系统”立项，列为中国气象局现代气候业务建设试点任务，先在辽宁、甘肃、浙江和江苏等省气候中心推广低频天气图方法。2012 年进一步扩大推广单位，共 11 个单位：上海、辽宁、江苏、浙江、甘肃、福建、江西、安徽、山东、河北和重庆等气候中心。中国气象局兰州干旱气象研究所从 2009 年开始，用低频天气图进行沙尘暴、干旱过程的延伸期预报业务。福建、海南气候中心也在 2011 年的汛期应用低频天气图预报延伸期强降水过程等。

经过 2008~2012 年 5~9 月在不同单位的应用，对强降水过程提前 10~45 天预报的结果是比较好的。

另外，从国内外在延伸期预报领域应用大气低频振荡的现状看，大致可归纳为以下三方面：

(1) 大气低频环流形势的延伸期预报。

早在 20 世纪 80 年代，Miyakoda et al. (1983) 率先利用数值模式成功预报了未来 10~30 天的阻塞高压，这一工作被看作是延伸期数值预报的开端。杨玮等 (2011) 运用实时的 Micaps 资料，采用经验正交函数分解和滤波方法，从统计学角度提出了低频环流系统的延伸期预报方法，预报未来 10~30 天关键区的低频环流系统。信飞等 (2008) 参考 Jones et al. (2004) 的统计预报模型，使用向量场的自然正交分解所得的主成分，结合自回归及多元回归等统计方法，建立低频 (30~50 天) 统计模型，得到未来 5 候的低频环流场预报图。Wheeler and Weickmann (2001)、Wheeler and Hendon (2004) 利用多变量经验正交函数分解，得到近赤道 MJO (Madden-Julian Oscillation) 空间结构的前两个主模态，由此得到的主成分 RMM1、RMM2 作为 MJO 实时监测与预测的指数。Maharaj and Wheeler (2005) 采用向量自回归模型、多变量滞后回归模型对 MJO 进行预测，预报时效可达 15 天。Goswami and Xavier (1966) 发现印度夏季风由活跃状态转为中断状态的可预报性达 20 天，而由中断状态转为活跃状态的可预报性仅为 10 天左右，进一步提出了对印度夏季风季节内振荡进行延伸期预报的经验统计模型，等等。

(2) 大气低频振荡的延伸期降水趋势预报。

丁一汇和梁萍 (2011)、梁萍和丁一汇 (2012)

基于 MJO 低频信号和低频环流场等统计模型并结合海—气耦合模式产品，给出了梅雨区降水趋势的延伸期预报的流程图。牛法宝等（2012）的研究表明 MJO 振荡的传播进入第 4、第 5 位相后，对云南及周边地区的降水有影响，并发布冬季延伸期降水趋势预报。李维京和陈丽娟（1999）主要基于月动力延伸预报模式进行了 10~30 天的温度距平和降水距平百分率预报。Galín（2007）使用时变 EOF 方法对天气的低频变化进行了研究，得到其时频谱特征为 40~50 天，为延伸期降水趋势预报提供低频背景条件。此外，Xavier and Goswami（2007）和 Seo et al.（2009）基于季节内振荡进行了延伸期降水趋势预报的试验和研究。

（3）大气低频振荡的延伸期降水过程预报。

在 10~30 天的延伸期预报时效内预报强降水过程发生的时段（具体到“天”），主要是使用低频天气图方法（孙国武等，2008，2010，2011，2012），这在国内外比较少见（被推广使用该方法的 10 余个省市气象部门除外）。本文在作者原有工作的基础上，较全面、深入地介绍低频天气图及其技术方法、预报流程和业务预报结果，并进一步论述它的天气学意义。

2 低频天气图技术方法

2.1 关键技术点

关键技术点是分析每日低频天气图上低频系统（低频气旋和低频反气旋）的演变（生成、维持、消失和振荡周期）及与之相适应的低频气流。

2.2 技术要点

（1）了解低频天气图的预报思路。低频天气图预报方法的思路类似于以天气学、动力学为基础的中、短期预报员做天气过程预报的思路。预报员作中、短期预报时，如低压槽移来时，不是简单地根据低压槽移来时降水的历史概率来预报，而是分析低槽的强度、移动、演变及其与上下游天气系统的联系、物理量的分布特征等，综合分析做出预报。所不同的是，低频天气图预报方法所用的工具是低频天气图，分析对象是缓慢变化的低频气旋（反气旋）等低频系统。

（2）了解低频天气系统的特性。低频天气图方法是基于大气低频振荡客观存在的特征，利用统计学中的滤波方法提取大气中的低频（30~50 天）信号，制作低频天气图做延伸期（10~30 天）的降水

过程预报。这种低频系统代表了大气低频振荡振幅最大和最小的位相随时间的变化。根据 2000~2012 年 5~9 月共 1989 张逐日低频天气图的分析结果，发现低频天气系统有的时段是原地振荡，另一些时段是东西（或南北）位移，并且具有 3 个明显的特性：1）时间周期性（30~50 天）、缓变性；2）空间连续性、相似性；3）生成源地的准定常性（以下简称“三性”）。而且它们分布的地理位置也大多集中在西伯利亚—贝加尔湖、新疆和蒙古人民共和国—河套等 30°N 以北地区；以及 30°N 以南的西太平洋、中南半岛—华南和印度—孟加拉湾等地区。

（3）了解低频天气图的天气学意义，即低频系统反映的天气实体及其大气环流演变过程（详见本文第 3 节论述）。

2.3 技术步骤

在理解并掌握了上述技术要点的基础上，具体的技术方法按以下步骤操作：

（1）滤波绘图

利用 NCEP/NCAR 或 Micaps 风场（或其他要素）格点资料（700 hPa 或 500 hPa 或其他层次），范围取 0~80°N，60°E~160°E（对上海地区而言，不同地区和不同预报对象，应有不同的范围），经过 Butterworth 带通（30~50 天）滤波器处理后，得到每日的低频天气图。该滤波器可自由选择通过频带，滤波后的结果在资料序列的两端不丢失（吴洪宝和吴蕾，2005）。如图 1 即为 2007 年 10 月 9 日 700 hPa 低频天气图，图中“C”和“A”分别表示低频气旋和低频反气旋。

（2）分析低频系统

在低频天气图上，分析低频天气系统（低频气旋和低频反气旋）生成、移动和消失的地理位置（中心经纬度）。低频系统有时是原地振荡，有时是有规律地移动（东、西或南、北），并进一步分析它们逐日的移动轨迹。

（3）确定天气关键区

在不破坏低频系统的地域性和完整性的前提下，在低频天气图范围内，划分若干个区域。以上海地区强降水过程为例，因为上海地区位于副热带（30°N 附近），按地区分为：30°N 以北的贝加尔湖、新疆和河套地区；30°N 以南的西太平洋、华南及以南和印度孟加拉湾地区（图 2a）。另一种是按经纬度划分为 8 个关键区（图 2b），即 1 区：<30°N，>120°E；2 区：<30°N，100°E~120°E；3 区：<30°N，80°E~

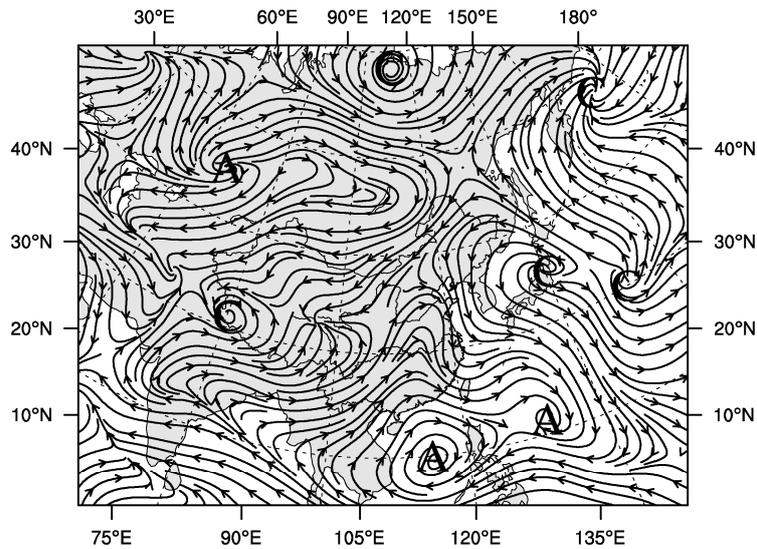


图 1 2007 年 10 月 9 日 700 hPa 低频天气图
Fig. 1 Low-frequency synoptic map at 700 hPa on 9 October 2007

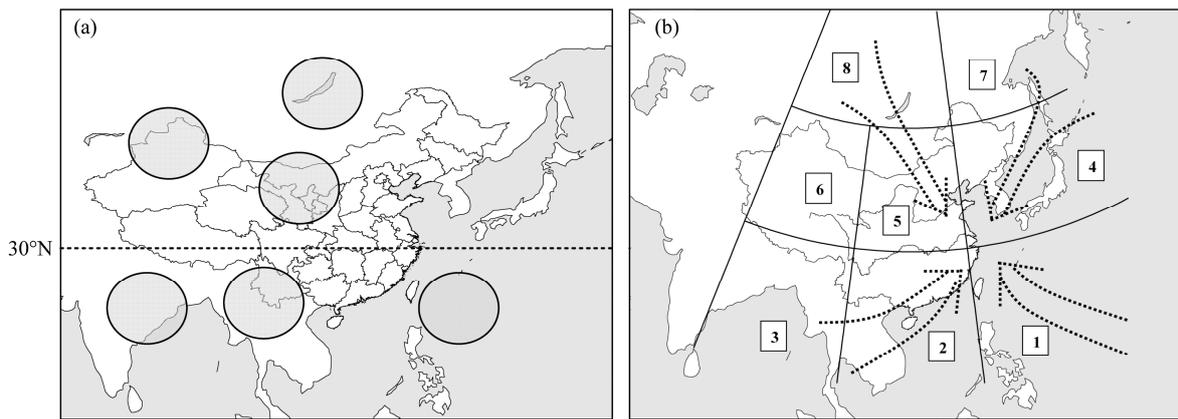


图 2 低频天气系统关键区：(a) 按地区划分；(b) 按经纬度划分
Fig. 2 The key regions of low-frequency weather systems according to geographical partition (a) and the latitude and longitude partition (b)

100°E; 4 区: 30°N~50°N, >120°E; 5 区: 30°N~50°N, 100°E~120°E; 6 区: 30°N~50°N, 80°E~100°E; 7 区: >50°N, >120°E; 8 区: >50°N, 80°E~120°E。划分关键区的依据：一是统计结果，如自然正交分解，即低频系统分布集中的区域，二是天气预报员的经验，即影响本地天气的天气系统常在哪些区域生成。

(4) 归纳整理

归纳整理各个关键区低频系统逐日生成、维持、位移和消失的地理位置及周期，得到不同区域的低频系统在 30~50 天的时间段内的振荡，有时先出现低频气旋（或低频反气旋），再出现低频反气旋（或低频气旋），又出现低频气旋（或低频反气旋）……，但各个区域的低频系统是不同步的。

(5) 确定预报对象

如夏半年的强降水过程和降水集中时段，或其它季节的重要天气过程等。

(6) 分析低频系统与预报对象的对应关系

分析预报对象出现时，各个区域低频系统的演变特征，即低频系统是低频气旋或低频反气旋及其它们发生、持续、移动、消失和周期，以及各关键区低频系统的分布和配置，把低频系统的活动和降水过程的发生联系在一起。

(7) 建立预测模型

低频天气图延伸期预报方法不是一个区域的低频系统活动对应降水过程的相关指标，而是各个区域低频系统的分布和相互配置，有利于冷、暖空气在本地区汇合，才可能使预报对象发生（图 3）。

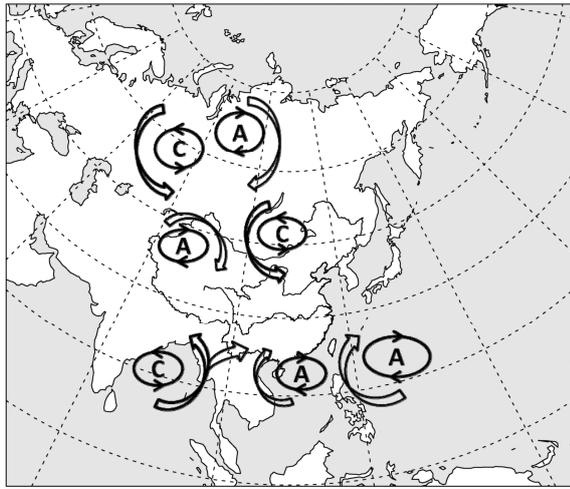


图3 上海地区夏季强降水过程预测模型示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the prediction model for summer strong precipitation over Shanghai

该预测模型是根据 2008~2012 年 5~9 月上海地区 49 次强降水过程的低频系统的活动特征合成分析得到的。从图中可以看出，上海地区发生强降水过程时，在南、北各关键区有相应的低频系统活动，有利于偏北方向（N，NW，W）和偏南方向（SE，SW）的偏北和偏南气流在副热带地区汇合。

(8) 预报对象的预报

根据低频系统的活动特性，特别是“起报日”各关键区低频系统的动态，按照预测模型提供的思路，利用低频系统具有的“三性”，外推低频系统，做出 10~45 天的预报。

综合以上 8 个步骤的业务预报流程图（图 4）概括了低频天气图方法具体应用时的逐步的流程。

3 低频天气图的天气学意义

实际经验表明，大气演变中有一些变化较慢的

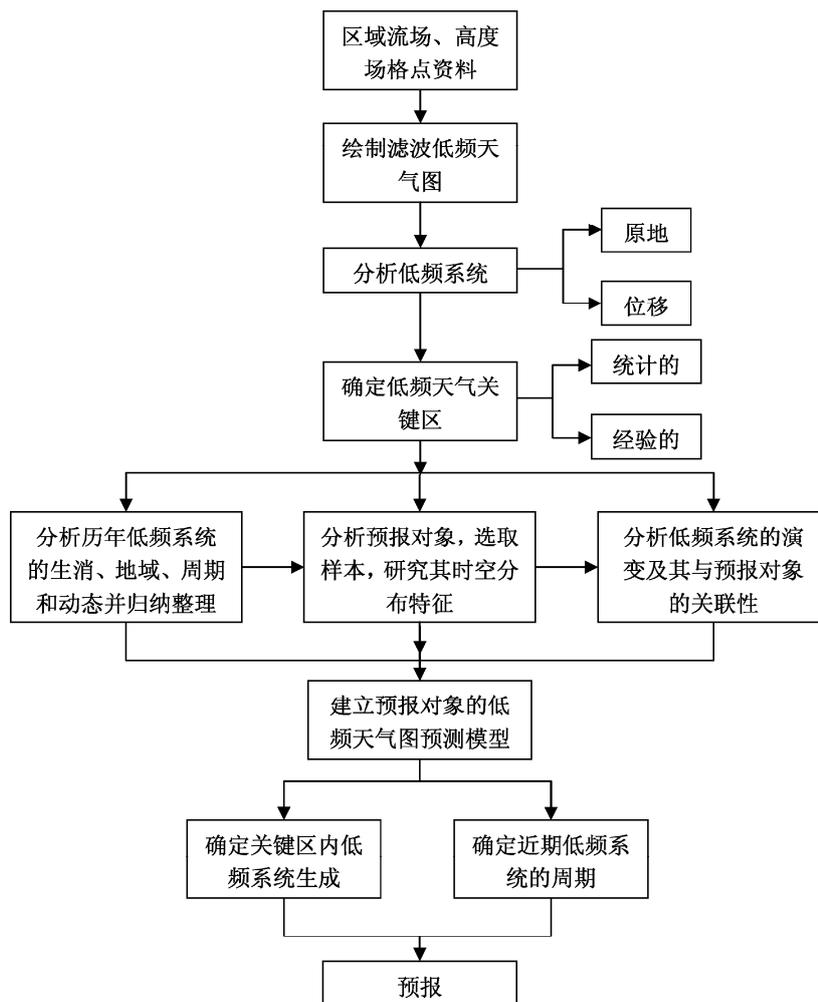


图4 低频天气图业务预报流程图
Fig. 4 Operational forecast flow chart using low-frequency synoptic map

过程存在于天气噪音水平之上, 这些缓变过程是和大尺度大气运动和低频外强迫相联系的, 其时间尺度达数周, 持续性比根据非线性流体动力学所估计的持续性要长得多。因此, 基于大气低频振荡的特征, 利用滤波方法, 是有可能提取大气中的低频信号制作低频天气图, 分析低频系统, 用来制作延伸期天气过程预报的。低频天气图上的低频天气系统与日常天气图上的天气系统虽有差别, 但有密切联系。低频天气系统恰好是造成某种天气过程的一些主要天气系统的发生、维持、加强、移动和减弱过程的原因。为了进一步分析, 绘制了 2007~2010 年每年 6~9 月上海地区强降水日 700 hPa 低频流场和实况 (这里指 NCEP/NCAR 再分析资料) 流场的合成图 (图略)。这 5 年的合成图上, 低频系统的分布基本相似, 反映出强降水发生时, 低频系统的相互配置具有共性。这里给出 2011 年的低频流场图和实况流场图 (图 5)。

从图 5 可以看出, 低频气旋和低频反气旋的分布及其相应的低频偏北气流与低频偏南气流在上海地区所在的 30°N 附近汇合, 同期的实况流场图上 (图 5b) 也是如此, 同样反映出偏北、偏南气流在此地区汇合。偏北气流反映出中高纬地区冷空气南下, 而偏南气流则反映出暖湿气流 (一支源自东亚夏季风; 另一支源自印度夏季风) 北上。冷、暖空气在该地区汇合, 引起降水过程。而且, 低频流场图上的低频系统与实况流程图上的环流系统是有联系的。低频气旋和低频反气旋所对应的恰好是实况天气图上的气旋和反气旋等大气环流系统。只不过比较起来, 低频系统存在 30~50 天的周期振荡, 而且变化缓慢, 持续性和连续性明显; 而实况

天气图的环流系统不具备低频系统的这些特征, 因而不可能在 30 天前做出大气环流系统的预报。这正是低频系统能做延伸期天气过程预报的关键所在, 同时也表明低频系统能反映大气环流系统的变化。低频系统均为闭合的低频气旋和低频反气旋 (图 5a), 而实况天气图上的环流系统有时有与低频系统相对应的气旋和反气旋闭合中心, 有时则无, 只表现为“槽”和“脊”。如图 5a 上, 在西太平洋有闭合的低频反气旋, 图 5b 中, 则仅出现“脊”, 没有闭合中心。但是, 两者都有一支偏南气流影响我国东部地区。

下面再给出一个例子, 分析低频系统与实况图上环流系统的联系。2011 年 5 月长江中下游地区严重干旱, 而 6 月暴雨成灾。图 6 是 5 月干旱时段 (5 月 1~15 日、16~31 日) 700 hPa 低频流场 (图 6a、c) 和实况流场 (图 6b、d) 的合成图。在图 6 中, 西太平洋地区 5 月上半月为一西风带低频反气旋, 下半月为一低频气旋, 相应的在长江中下游地区先为一致的低频偏南气流, 后为一致的低频偏北气流。而且孟加拉湾的低频西偏南气流也没有抵达长江中下游 (图 6a、c), 无南北气流汇合, 难以形成降水。实况图上的环流系统 (图 6b、d) 与图 6a、c 基本对应, 只是实况图有时是槽和脊对应低频气旋和反气旋。

6 月暴雨过程主要集中在上中旬, 可以看出, 图 7a 的环流系统及其相应的气流均与 5 月相反, 随着西太平洋的低频反气旋的北移和孟加拉湾低频气旋的建立, 相应的低频南偏东和低频南偏西两支气流与低频偏北气流在长江中下游汇合, 停留, 形成暴雨过程。图 7b 与图 7a 在环流系统及气

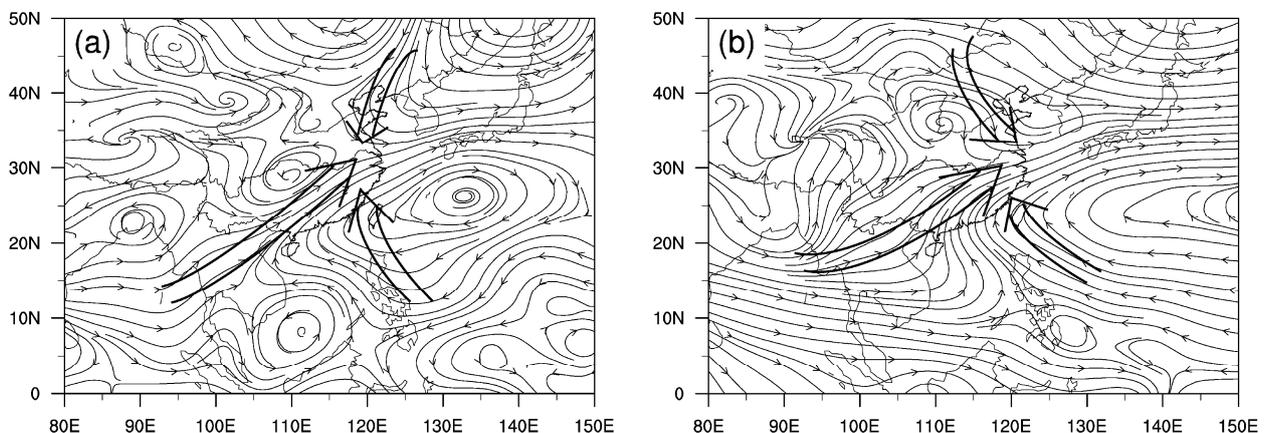


图 5 2011 年 6~9 月上海地区强降水日 700 hPa 低频流场 (a)、实况流场 (b) 合成图

Fig. 5 Composition of (a) the low-frequency streamline fields and (b) the observed streamline fields at 700 hPa for the strong precipitation days from May to September 2011

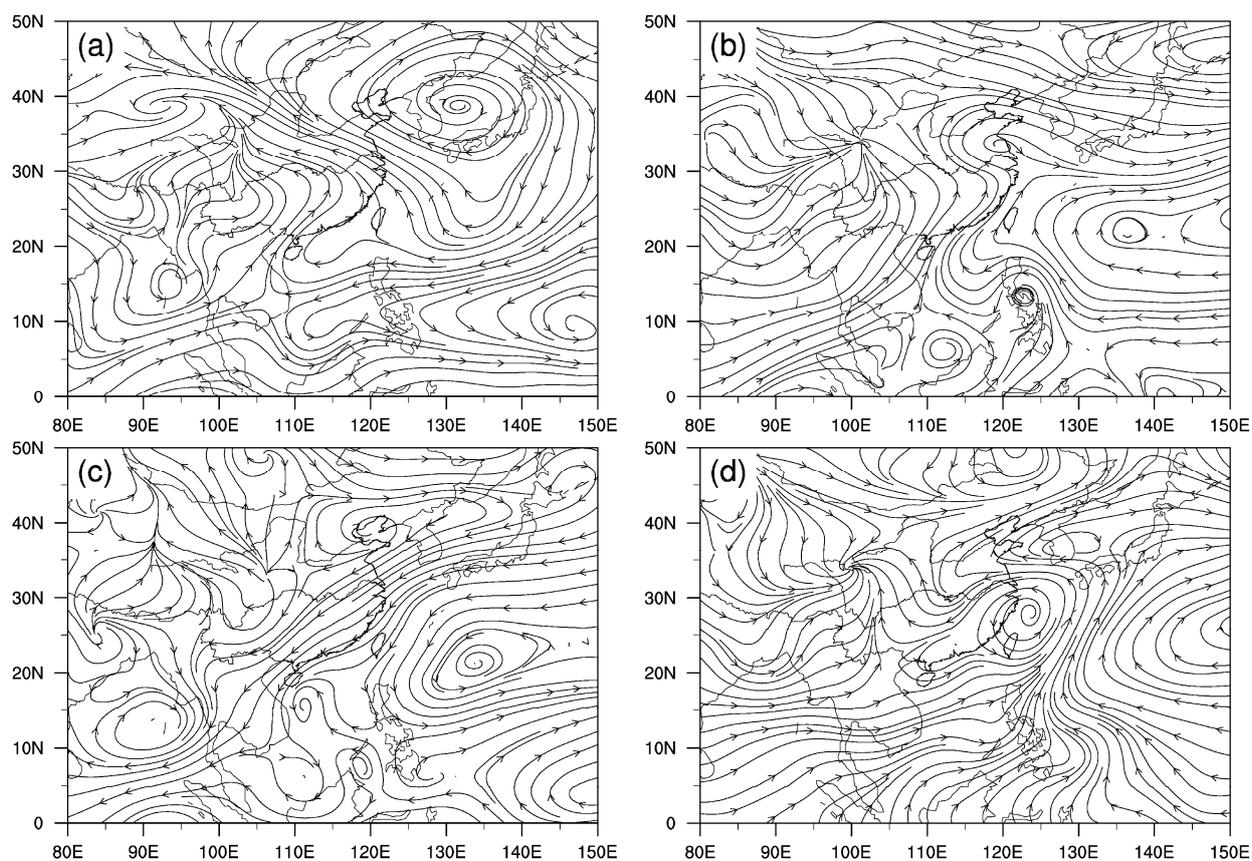


图 6 2011 年 5 月干旱时段低频流场 (a, c) 和实况流场 (b, d) 合成图: (a, b) 1~15 日; (c, d) 16~31 日

Fig. 6 Composition of (a, c) the low-frequency streamline fields and (b, d) the observed streamline fields at 700 hPa for the (a, b) first half and (c, d) second half of May 2011

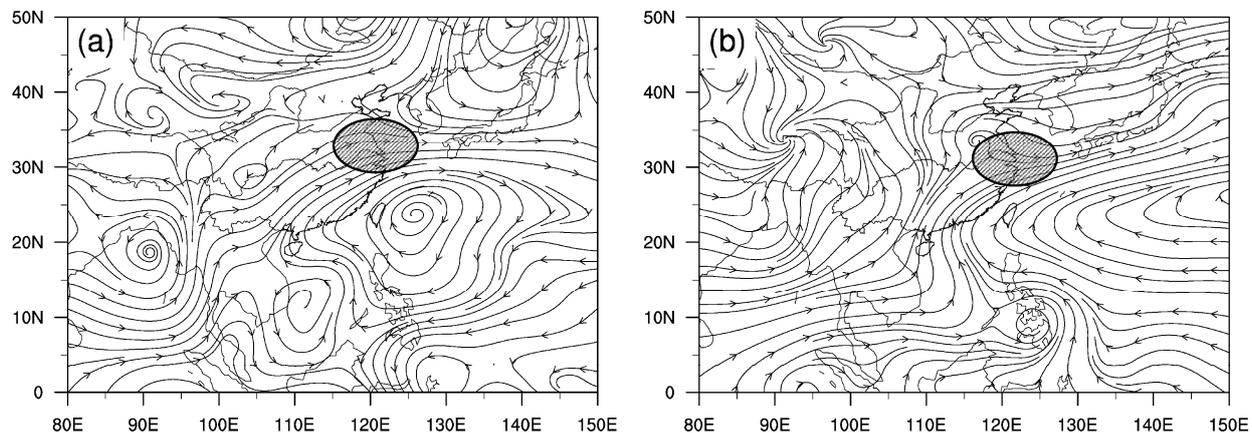


图 7 2011 年 6 月暴雨时段 (a) 低频流场和 (b) 实况流场合成图, 图中斜线椭圆表示气流的辐合区

Fig. 7 Composition of (a) the low-frequency streamline fields and (b) the observed streamline fields at 700 hPa for the first half of June 2011. Diagonal ellipses denote air flow convergence zones

流方面, 两者基本相似。

4 低频天气图业务预报结果

4.1 上海气候中心 4 年的预报

自 2008 年 (7~10 月)、2009 年 (6~9 月)、

2010 年 (4~9 月) 到 2011 年 (6~9 月) 上海地区的预报结果: 4 年的上述夏季时段内, 上海地区中雨以上降水过程共出现 44 次, 提前 15~40 天预报出来 37 次, 漏报 5 次, 空报 2 次。其中暴雨过程 (≥ 50 mm) 18 次, 特大暴雨过程 (≥ 100 mm) 6

次,均出现在预报的强降水过程时段内。需要说明的是,延伸期过程预报结果的评定,目前尚没有制定标准,我们规定:在所预报的时段内,出现强降水(区域性中雨以上)则认为预报正确,如表1,5月28日预报6月24~28日有强降水过程,6月24~25日和27~29日实况出现了中到大雨;否则评为不正确,如6月18日预报7月6~10日有强降水过程,实况7月9日有降水,但强度不够,而在7月11日出现了中雨,与预报范围相差了1天。

值得一提的是,低频天气图延伸期预报方法对极端天气事件和转折天气的反应比较敏感。2011年比较好地提前10~30天预报旱涝转折期的长江中下游6月3个时段的强降水过程(上海市气候中心11期气候公报)。

4.2 上海世界博览会期间的预报

(1)2010年5~9月,共发布“上海地区未来10~50天强降水过程预报”11期,其中6~9月预报13次降水过程,11次正确,漏报2次,空报1次,另外2次无雨过程也都正确(表1)。

(2)2010年上海世博会期间的气象服务中,成功地预报了关键时期的重要天气过程:世博会开幕日和开馆日的无雨过程、气象馆荣誉日和梅雨期的强降水过程、8月30日至9月1日当年唯一的一次大暴雨过程(最大日雨量125.8 mm)以及国庆节

天气等。

4.3 中国气象局兰州干旱气象研究所3年的预报

(1)2010年3月上旬比较好地预报2009~2010年我国西南地区严重干旱的结束时段。

(2)2012年2月底比较好地预报5月云南旱情缓解。

(3)从2009~2011年,试做了春季沙尘暴和夏季西北区东部的干旱延伸期预报。

5 小结与讨论

延伸期(10~30天)天气过程预报,既有应用价值,又有科学价值,从而成为国内外气象科学研究的重点领域之一。本文着重论述延伸期天气过程预报方法之一的低频天气图及其技术要点、技术步骤和预报流程:滤波绘图→分析低频系统→确定天气关键区→整理各关键区低频系统的活动→确定预报对象→研究低频系统与预报对象的对应关系→建立预测模型→做出未来10~30天的天气过程发生的预报(具体到“天”)。并进一步分析了低频天气图的天气学意义,揭示了低频气旋和低频反气旋与实况天气图上大气环流系统相互联系和对应的天气学事实。还给出了近4年在不同地区的应用结果。应该说低频天气图方法具有它独特的优势:其一是普适性。低频天气图方法通过将普通天

表1 2010年上海地区强降水过程预报统计表

Table 1 Statistics of strong precipitation processes forecast over Shanghai in 2010

发布预报时间	预报降水过程发生时段	降水实况	评定
4月2日	明确指出4月30日至5月1日出现强降水的可能性不大	5月1日无降水	正确
5月7日	6月中旬中期(6月13日至6月18日)	6月13~14日,中雨,最大雨量19.9 mm	正确
5月28日	6月下旬中期(6月24日至6月28日)	6月24~25日、27~29日,中到大雨,最大雨量27.8 mm	正确
6月4日	6月底至7月初(6月30日至7月4日)	7月2~5日,中雨,局部大到暴雨,最大雨量90.9 mm	正确
6月18日	7月上旬中后期(7月6日至7月10日)	7月9日,5.8 mm;7月11日,中雨,最大雨量18.3 mm	不正确
	7月下旬中期(7月24日至7月28日)	7月26日,局部中雨,最大雨量10.0 mm	正确
7月2日	7月中旬中后期至7月下旬前期(7月18日至7月23日)	7月16日,中到大雨,最大雨量40.6 mm;7月21日,9.8 mm	不正确
	7月底至8月上旬前期(7月29日至8月3日)	7月29日、8月3~4日,中雨,最大雨量25.7 mm	正确
7月9日	8月上旬后期至8月中旬前期(8月8日至8月12日)	8月6日,中雨,最大雨量17.8 mm;8月10日,4.8 mm,台风“电母”北上	空报
7月16日	8月中旬后期至8月下旬前期(8月17日至8月23日)	8月17~18日,大到暴雨,88.2 mm	正确
8月13日	8月底至9月初(8月28日至9月3日)	8月27日,中到大雨,局部暴雨;8月30日至9月1日,大到暴雨,局部大暴雨,最大雨量125.8 mm(“圆规”和“狮子山”倒槽的共同影响)	正确
8月20日	9月上旬后期至9月中旬前期(9月7日至9月12日)	9月10~13日,中到大雨,局部暴雨,最大雨量64.4 mm	正确
8月27日	9月下旬中后期(9月24日至9月29日)	9月26日,中到大雨,最大雨量28.2 mm	正确
9月3日	9月中旬后期至9月下旬前期(9月17日至9月22日)	9月22日,中雨,最大雨量10.6 mm	正确
9月10日	国庆节前后无强降水过程	9月30日至10月1日基本无雨	正确

气图转化为低频天气图,使传统的天气学原理和方法可以应用于低频天气图的分析。其二是简洁性。低频天气图方法的物理架构清晰,将延伸期预报问题转化为发掘低频天气系统活动规律与强降水过程之间的有机联系。其三是实时性。由于低频天气图方法的依托工具为逐日低频天气图,而 Micaps 实时资料每天由中国气象局下发,从而保证了延伸期预报制作的实时性(马浩等,2012)。

尽管低频天气图方法在长达4年的业务预报应用中,对重大天气过程延伸期预报显示出较强的预报能力,而且国外还无人提出这种方法,更谈不上业务应用,但是还要从以下几方面进行深入研究:

(1) 在实际应用方面,低频天气图预报方法,目前已有近10多个区域中心、省气象局的业务、研究单位进行应用试验和研究,随着越来越多的气象业务、科研人员的参与,可以预计低频天气图方法将会得到改善、完善和发展。因为作为一种新的预报工具,还需要时间来检验,天气学的发展经历了漫长岁月,从第一张天气图的雏形问世,二三百年的时间过去了,才发展成今天的一门学科——天气学。作者设想低频天气图有可能成为延伸期预报的一种有用工具,进而在应用的基础上有可能为延伸期预报的理论建立提供启发。

(2) 低频天气图方法在实际应用中,大气低频振荡系统振荡周期的确定,虽按历史资料的统计结果和当年前期的周期规律,但仍然避免不了人为、经验的因素,需研究改进。在强降水过程预报中,尚不能区别中到大雨和暴雨的降水强度,我们也正在探索中。

(3) 随着低频天气系统的演变特征和规律的深入研究及其与所反映的天气实体(即未进行滤波处理的大气环流系统)的对比分析,将更多揭示低频系统及其相对应的天气实体的大气环流演变过程。如亚洲夏季风及其夏季风系统、青藏高原季风系统、南亚高压、东亚大槽、西太平洋副热带高压和AO、ENSO等。可以预计,通过广泛的应用和大气环流演变过程的深入分析,有可能发展为一门学科——我国的低频天气学。

(4) 随着低频系统机理研究的开展,如大气波动理论、低频系统的准定常性与下垫面的作用,外强迫与大气内部动力学过程,天气尺度涡旋与低频气流的相互反馈等方面进行诊断、模拟和理论分析,以及大气可预报性、大气持续性的深入研究,

将大大丰富大气低频动力学的内容。如丑纪范等(2010)的研究指出,大气环流异常信号的持续性能够导致异常天气的持续性,为超过天气预报时效上限的10~30天延伸期预报提供了可能性,并且提出了延伸期可预报分量的提取方法。以及丁瑞强和李建平(2007,2009a,2009b)、Ding and Li(2010,2011)和Li and Ding(2011)对大气的可预报性进行了深入的研究,其结果表明大气季节内振荡有35天左右的可预报性,这为延伸期预报提供了一定的物理依据。Jin et al.(2006a,2006b)的研究在天气尺度涡动与低频气流相互作用的动力学方面得到了有科学意义的结果,这无疑对大气低频变化的深入研究有重要作用。

参考文献 (References)

- 丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 2010. 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, 30 (5): 569-573. Chou Jifan, Zheng Zhihai, Sun Shupeng. 2010. The think about 10-30 d extended-range numerical weather prediction strategy—Facing the atmosphere chaos [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 30 (5): 569-573.
- 丁瑞强, 李建平. 2007. 误差非线性增长理论及可预报性研究 [J]. 大气科学, 31 (4): 571-576. Ding Ruiqiang, Li Jianping. 2007. Nonlinear error dynamics and predictability study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 571-576.
- Ding R Q, Li J P, Seo K H. 2010. Predictability of the Madden-Julian oscillation estimated using observational data [J]. Mon. Wea. Rev., 138: 1004-1013.
- Ding R Q, Li J P, Seo K H. 2011. Estimate of the predictability of boreal summer and winter intraseasonal oscillations from observations [J]. Mon. Wea. Rev., 139: 2421-2438.
- 丁瑞强, 李建平. 2009a. 非线性误差增长理论在大气可预报性中的应用 [J]. 气象学报, 67 (2): 241-249. Ding Ruiqiang, Li Jianping. 2009a. Application of nonlinear error growth dynamics in studies of atmospheric predictability [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (2): 241-249.
- 丁瑞强, 李建平. 2009b. 天气可预报性的时空分布 [J]. 气象学报, 67 (3): 343-354. Ding Ruiqiang, Li Jianping. 2009b. The temporal-spatial distributions of weather predictability of different variables [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (3): 343-354.
- 丁一汇, 梁萍. 2011. 基于MJO的延伸预报 [J]. 气象, 36 (7): 111-122. Ding Yihui, Liang Ping. 2011. Extended range forecast basing on MJO [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (7): 111-122.
- Galini M B. 2007. Study of the low-frequency variability of the atmospheric general circulation with the use of time-dependent empirical orthogonal functions [J]. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 43 (1): 15-23.
- Goswami B N, Xavier P K. 1966. Potential predictability and extended range prediction of Indian summer monsoon breaks [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (18): doi:10.1029/2003GL017810.

- Jin F F, Pan L L, Watanabe M. 2006a. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part I: A linear closure [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63: 1677–1694.
- Jin F F, Pan L L, Watanabe M. 2006b. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part II: A theory for low-frequency modes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63: 1695–1708.
- Jones C, Carvalho M V, Higgins R W, et al. 2004. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies [J]. *J. Climate*, 17: 2078–2094.
- Li J P, Ding R Q. 2011. Temporal-spatial distribution of atmospheric predictability limit by local dynamical analogs [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139: 3265–3283.
- 李维京, 陈丽娟. 1999. 动力延伸预报产品释用方法的研究 [J]. *气象学报*, 57 (3): 338–345. Li Weijing, Chen Lijuan. 1999. Research on reexplanation and reanalysis method of dynamical extended range forecast products [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57 (3): 338–345.
- 梁萍, 丁一汇. 2012. 基于季节内振荡的延伸预报试验 [J]. *大气科学*, 36 (1): 102–116. Liang Ping, Ding Yihui. 2012. Extended range forecast experiment based on intraseasonal oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (1): 102–116.
- 马浩, 毛燕军, 雷媛, 等. 2012. 10–30 天延伸期天气预报研究进展综述 [J]. *干旱气象*, 30 (4): 511–520. Ma Hao, Mao Yanjun, Lei Yuan, et al. 2012. A review of advance in 10–30 days extended range weather forecast research [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 30 (4): 511–520.
- Maharaj E A, Wheeler M C. 2005. Forecasting an index of the Madden-Oscillation [J]. *Int. J. Climatol.*, 25: 1611–1618.
- Miyakoda K, Gordon T, Carerly R, et al. 1983. Simulation of a blocking event in January 1977 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111: 846–849.
- 牛法宝, 李汀, 陶诗言, 等. 2012. 对云南 2011 年冬季降水的延伸期天气预测试验 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 34 (1): 62–65. Niu Fabao, Li Ting, Tao Shiyang, et al. 2012. Extended range weather forecast experiment to winter precipitation over Yunnan in 2011 [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences)* (in Chinese), 34 (1): 62–65.
- Seo K H, Wang W Q, Gottschalk J, et al. 2009. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models [J]. *J. Climate*, 22 (9): 2372–2388.
- 孙国武, 信飞, 陈伯明, 等. 2008. 低频天气图预报方法 [J]. *高原气象*, 27 (增刊): 64–68. Sun Guowu, Xin Fei, Chen Bomin, et al. 2008. A predicting method on the low-frequency synoptic weather map [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (supplement): 64–68.
- Sun G W, Chen B D. 1989. Oscillation characteristics and meridional propagation of atmospheric low frequency waves over Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 12: 250–256.
- 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 2010. 大气低频振荡与延伸期预报 [J]. *高原气象*, 29 (5): 1142–1147. Sun Guowu, Xin Fei, Kong Chunyan, et al. 2010. Atmospheric low-frequency oscillation and extended range forecast [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (5): 1142–1147.
- 孙国武, 孔春燕, 信飞, 等. 2011. 天气关键区大气低频波延伸期预报方法 [J]. *高原气象*, 30 (3): 594–599. Sun Guowu, Kong Chunyan, Xin Fei, et al. 2011. Method of extended range forecast of atmospheric low-frequency wave in key region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (3): 594–599.
- 孙国武, 冯建英, 陈伯明, 等. 2012. 大气低频振荡在延伸期预报中的应用进展 [J]. *气象科技进展*, 2 (1): 12–18. Sun Guowu, Feng Jianying, Chen Bomin, et al. 2012. Advances in the application of atmospheric low-frequency oscillation on extended range forecast [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2 (1): 12–18.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2005. 气候变率诊断和预测方法 [M]. 北京: 气象出版社, 204–208. Wu Hongbao, Wu Lei. 2005. *Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 204–208.
- Wheeler M C, Weickmann K M. 2001. Real-time monitoring and prediction of modes of coherent synoptic to intraseasonal tropical variability [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 2677–2694.
- Wheeler M C, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132: 1917–1932.
- Xavier P K, Goswami B N. 2007. Analog method for realtime forecasting of summer monsoon subseasonal variability [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 4149–4160.
- 信飞, 孙国武, 陈伯明. 2008. 自回归统计模型在延伸期预报中的应用 [J]. *高原气象*, 27 (增刊): 69–75. Xin Fei, Sun Guowu, Chen Bomin. 2008. An autoregressive statistical model for extended-range prediction [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (supplement): 69–75.
- 杨玮, 何金海, 孙国武, 等. 2011. 低频环流系统的一种统计预报方法 [J]. *气象与环境学报*, 27 (3): 1–5. Yang Wei, He Jinhai, Sun Guowu, et al. 2011. A statistical forecasting method of low-frequency circulation systems [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 27 (3): 1–5.
- 章基嘉, 孙国武, 陈葆德. 1991. 青藏高原大气低频变化的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 105–106. Zhang Jijia, Sun Guowu, Chen Baode. 1991. *Research on Atmospheric Low Frequency Variations over the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 105–106.