

大气低频振荡在延伸期预报中的应用进展

孙国武^{1,2} 冯建英¹ 陈伯民² 信飞² 何金海³ 杨玮³

(1 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020; 2 上海市气候中心, 上海 200030; 3 江苏省气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044)

摘要: 延伸期预报是当前的服务重点, 又是预报技术难点。近年来, 根据大气低频振荡的特征, 我国延伸期预报的研究和应用取得了一定的成果。为此, 介绍了大气低频振荡与延伸期预报的一些进展。主要内容包括: (1) 大气低频振荡与延伸期预报的可行性分析; (2) 大气低频环流场的延伸期预报; (3) 大气低频振荡的延伸期降水趋势预报; (4) 大气低频振荡的延伸期天气过程预报。最后阐述了未来大气低频振荡研究前景的展望, 并提出了低频天气学和低频动力学问题。为了能从大气低频振荡角度研究延伸期降水过程预报问题, 特别介绍了一种新的预报方法——低频天气图, 及低频天气图的技术要点和技术方法。在低频天气图上, 低频天气系统(低频气旋和低频反气旋)以及它们的活动特征可以被用来定性地确定低频偏南(暖空气)和低频偏北(冷空气)气流的汇合, 引起降水过程。2008, 2009和2010年夏季上海地区延伸期降水过程预报表明, 强降水过程预报效果较好, 且预报时效为15~45d, 可以在延伸期业务预报中应用。

关键词: 大气低频振荡, 低频天气图, 延伸期预报, 天气过程

Advances in the Application of Atmospheric Low-Frequency Oscillation on Extended Range Forecast

Sun Guowu^{1,2}, Feng Jianying¹, Chen Bomin², Xin Fei², He Jinhai³, Yang Wei³

(1 Lanzhou Institute of Arid Meteorology/ Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province/ Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of CMA, Lanzhou 730020 2 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030 3 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing 210044)

Abstract: The extended range forecast is now a key point of meteorological service and is also a difficult point of predictable techniques. According to the characteristics of atmospheric low-frequency oscillation, some results are obtained on research appliance of extended range forecast in China. Therefore it is introduced to some research advances for extended range forecast. The main contents contain that (1) the analysis of feasibility on atmospheric low-frequency oscillation and extended range forecast, (2) the extended range forecast of the low-frequency circulation fields, (3) the precipitation trends forecast of extended range of atmospheric low-frequency oscillation and (4) the synoptic processes forecast of extended range of atmospheric low-frequency oscillation. Finally, the prospects in atmospheric low-frequency oscillation are expounded. In addition, the problems about low-frequency synoptic meteorology and low-frequency are also proposed. Especially, to study extended range forecast from the viewpoint of atmospheric low-frequency, a new approach using the forecasting method of low-frequency synoptic chart (LFSC) is introduced recently in this paper. The low-frequency synoptic systems (low-frequency cyclones and anti-cyclones) on LFSC and their action characteristics can be used to determine qualitatively the confluence between the south and north air current (warm and cool air), and cause precipitation processes. Using LFSC method, it shows that the forecast results are good in Shanghai areas from 2008 to 2010 and its forecast validity period is 15~45 days. So the LFSC method can be applied in extended range forecast.

Key word: atmospheric low-frequency oscillation, low-frequency synoptic chart, extended range forecast, precipitation process

1 问题的提出

气象部门肩负着减灾防灾保障人民生命财产安全的重任。随着我国社会的进步和经济的发展, 公

众和政府气象服务的要求越来越高。但是毋庸讳言, 气象服务内容与社会需求还存在一定差距, 特别是延伸期重大天气过程的预报。

众所周知, 有限区域中尺度数值天气预报模式的发展, 显著提高了短期天气预报的精度, 并将有效预报时效延长至3~5d。全球大气环流模式的发展则使天气预报时效进一步延长, 目前欧洲中期天气预报中心, 日本、美国和中国等气象业务中心均能提供全球大气环流模式的7~10d或以上的逐日形

收稿日期: 2011年5月17日; 修回日期: 2011年11月21日
第一作者: 孙国武(1937—), Email: guowusun@yahoo.com.cn
资助信息: 中国气象局行业科研专项“多尺度扰动相互作用对月-季节内尺度气候可预报性的应用研究”(GYHY201006020); 公益性行业(气象)科研专项“多时间尺度干旱监测与预警评估技术研究”(GYHY201006023)

势预报和物理量产品。与此同时，气候预测技术（如气候模式）也日渐发展，从汛期的短期气候预测到全球气候变暖的影响评估（如IPCC）都越来越离不开气候模式的应用。然而，目前气候模式产品的最小时间分辨率通常是月（预报量一般为月平均气温、月降水量等）。

显然，延伸期天气过程预报是衔接天气预报和气候预测之间的10~30d时间尺度的“时间缝隙”预报，是中期预报（10d以下）的延伸，在预报内容方面与中期预报一样，与长期天气预报（30d以上）主要预报气象要素的平均值和趋势则不同。所以，其时效是中期天气预报达不到，预报内容（天气过程日期、强度）又是长期预报做不到的。延伸期天气过程预报既是预报技术难点之一，也是气象服务的重点之一（图1）。

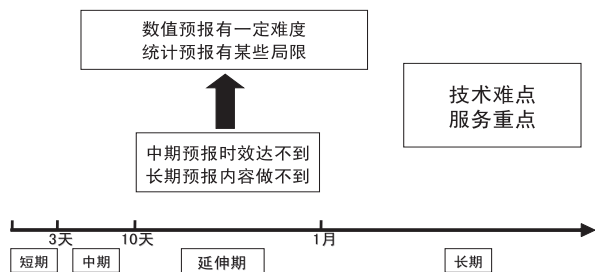


图1 延伸期天气过程预报示意图

其技术难点，一方面在于常用的相关指标和气候概率等用于月预报的方法，难以客观预报天气过程的强度和时段；另一方面在于逐日天气预报的能力受地球大气混沌运动和数值解对初值误差增长的依赖性，预报时效超过2周且准确率超过随机猜测水平的逐日数值天气预报不可能实现，即天气预报的理论极限为2周^[1-3]。而且，季节内变率介于逐日天气和季节平均气候两者之间，受海洋强迫与大气内部动力学的控制，在一定程度上具有混沌性和不可预报性^[4-5]。所以，美国国家海洋和大气管理局（NOAA）在其气候和预报产品中，把10d以上（2周、月、季和年）的预报称之为“评估”（assessment），认为是“不确定预报”（参看“NOAA Seamless Suite of Forecast Products Spanning Climate and Weather”）。

然而，大气低频振荡（简称LFO，下同）与延伸期预报的应用研究，仍然引起了国内外气象学家的广泛关注，尤其在得到了高度重视，并取得了相当的进展。从分析研究我国夏季降水与LFO的关联以及夏季风活动的低频特征^[6-15]，发展到对极端天气、气候事件，如：特大暴雨、强寒潮、持续异常低温、大范围冰冻雨雪和台风等的低频环流诊断分析^[16-23]，再进一步揭示LFO与夏季风爆发、副热带高压以及天气尺度涡旋与极锋急流等相联系的事实^[24-28]。国外学者

在LFO针对预报的研究方面也有类似工作^[29-34]。

尤应指出的是，根据LFO特性研制延伸期天气过程预报方法和延伸期大气低频环流系统预报方法以及延伸期降水趋势预报方法等方面，国内外都取得了一定的进展，并有了初步结果^[34-48]。本文将针对这一主题予以综述，内容为：（1）LFO与延伸期预报的可行性分析，（2）大气低频环流场的延伸期预报，（3）LFO的延伸期降水趋势预报，以及（4）LFO的延伸期天气过程预报等。

2 LFO用于延伸期预报的可行性分析

LFO用于延伸期预报是基于大气低频振荡客观存在的特征，利用滤波方法提取大气中的低频信号，制作10~30d时间尺度低频天气图进而作相应时效的降水过程预报。研究和实际应用表明，大气演变中有一些变化较慢的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，是有可能提取大气中的低频信号制作低频天气图，进而用来制作延伸期天气过程预报的。

丑纪范等从理论和实际角度描述了天气和气候可预报性的认识过程。天气和气候的可预报性，特别是10~30d预报依赖于空间和时间尺度，预报包含了可预报分量和混沌分量。可预报性研究的最大挑战，来自气象极端事件的可预报问题。同时也指出，大气环流异常信号的持续性能导致异常天气的持续性，为超过天气预报时效上限的10~30d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^[49-51]。

李建平、丁瑞强等^[52-55]引入非线性误差增长理论对大气可预报性和天气可预报性的时空分布进行了研究，其结果表明大气的可预报性可达20d，超出了洛伦兹等人提出的大气可预报性的极限，为延伸期预报提供了一定的物理依据。同时也认为，目前国内外关于可预报性及其物理基础方面已取得了一些重要进展，大大加深和丰富了人们对可预报性问题的认识，也深化了人们对大气系统本身运动和演化规律的理解。然而由于问题本身的难度和复杂性，关于可预报性仍有许多重要问题没有解决。

Jin等^[56-58]的低频动力学研究，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一定作用。

另外，从天气学意义分析，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

一些主要天气系统发生、维持、加强、移动和减弱过程的原因。例如，上海地区降水过程的发生与不同关键区低频反气旋和低频气旋的活动有关，反映出东亚夏季风的东南气流和源于印度夏季风的西南气流以及西北方的冷空气活动的偏西北气流、东北气流四股气流向该地区汇合引起降水天气过程^[36, 37, 39]。

又如，通过考察东亚梅雨季节内振荡的大尺度背景，发现东亚梅雨区季节内振荡的峰值位相降水与热带环流及中高纬环流的30~60d低频振荡密切相关。在梅雨区北侧，来自中高纬里海附近的冷空气（高位涡）低频波列向东传，以及鄂霍次克海高位涡向西南输送，共同影响东亚梅雨区。在梅雨区南侧，通过异常对流的北传，形成热带西太平洋到中国东北—鄂海的低层气旋—反气旋—气旋—反气旋的经向分布，进而导致梅雨区低层低频偏北风和偏南风的辐合。并且2010年7月中旬前期一次根据低频系统预报的降水过程的诊断分析表明，沿30°N做水平风辐散分量和垂直运动的合成（图略），发现850hPa以下中国副热带地区均为上升气流，而在112°E附近到了700hPa高度有两支上升气流汇合成一股自低空至高空略向东倾斜的强上升气流，之后在350hPa左右高度上分裂后继续上升。由此可见，低层辐合受到向东倾斜的垂直上升气流的影响，在110°—120°E高空辐散，加上充足的水汽，容易导致副热带110°—120°E附近形成降水^[40-41]。

再如，用2009年5—9月共15个强降水日的700hPa低频流场合成图和700hPa流场（即未经滤波处理）合成图（图略）进行比较，低频气旋和低频反气旋的分布表明，低频偏北气流与低频偏南气流在30°N附近汇合，同期的实况流场图上也是如此，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，便会造成降水过程。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30~50d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，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，而实况天气图上的环流系统有时存在与低频系统对应的气旋和反气旋中心；有时则不存在，只表现为槽和脊，但基本气流的走向是一致的^[37]。

3 大气低频环流场的延伸期预报

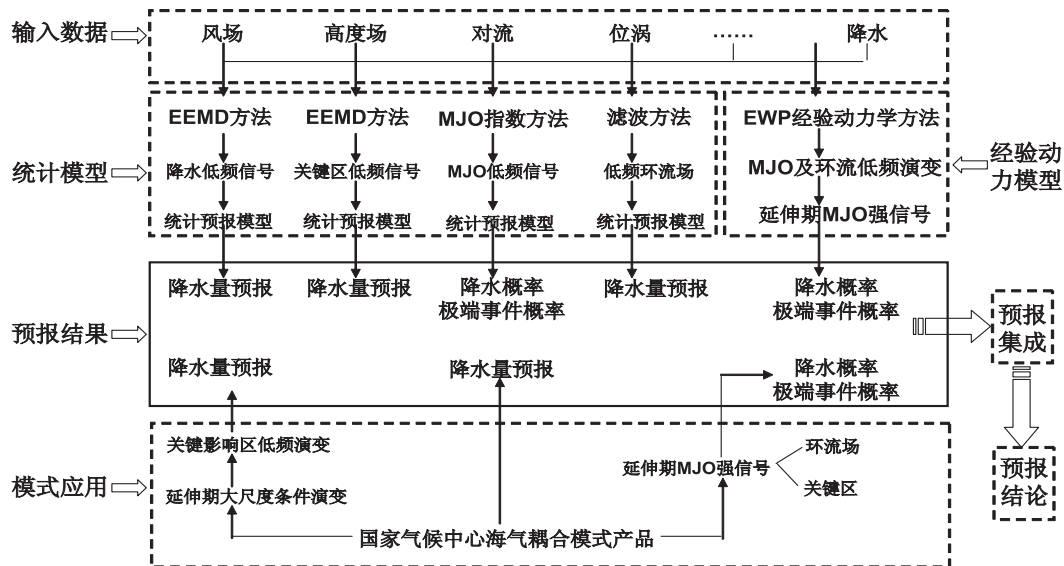
杨玮等运用中国气象局以9210广播方式下发的T639系统输出的资料产品，采用经验正交函数分解和滤波方法，分析欧亚大陆上空700hPa水汽输送通量流函数和势函数主要低频分量的分布特征，发现存在流函数和势函数低频环流系统变化的关键区。从统计学角度提出了低频环流系统的延伸期预报方法，预报未来10~30d关键区的低频环流系统（低频环流场）。并根据预报的关键区低频环流系统的演变情况，确定上海地区未来10~30d强降水过程相对应的预报指标^[40]。

信飞等参考Jones等的统计预报模型^[47]，利用1998—2007年的NCEP逐日700hPa风场资料，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（30~50d）统计模型，用最近5候的前五个主成分来预报未来5候的时间成分，最后将空间部分与所得的未来时间部分还原为低频风场，便得到未来5候的低频环流场预报图，为长江中下游的延伸期预报提供了一种预报方法^[38]。

Elizabeth等采用向量自回归模型对MJO(Madden-Julian Oscillation)进行预测。结果表明，向量自回归模型的延伸期预报可达15d^[45]。Wheeler等^[46]提出的实时MJO指数最突出的特点是解决了各种传统滤波方法不能用在实际业务监测中的问题，不使用传统滤波方法（如傅里叶滤波）而提取了MJO信号，开展MJO的监测预报，并用近赤道平均的850hPa纬向风、200hPa纬向风及OLR的多变量EOF方法，分解出描述近赤道MJO空间结构的前两个主模态EOF1和EOF2，由此得到的主成分RMM1、RMM2作为MJO实时监测与预测的指数。在RMM1、RMM2确定的位相分布图（图略）上可点出逐天的MJO的空间位相演变。MJO的强度则由RMM1、RMM2确定，当 $\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2}$ 大（小）于1时，即位于位相图中的圆圈外（内）时，为强（弱）MJO；从位相分布图上可看出MJO的自西向东移动及其强弱度的变化。Jones等^[47]建立热带季节内对流异常的统计模型，利用EOF将30~50d低频高度场展开为空间和时间系数，再以自回归和多元回归相结合的方法建立统计预报模型，预报3~5候的低频形势场。

4 LFO的延伸期降水趋势预报

梁萍等^[41-44]进行了基于MJO的梅雨区降水的延伸期预报方法试验研究，采用了降水低频信号、关键区低频信号、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，给出了梅雨区降水量和降水概率的延伸期预报的流程图（图2）。在延伸期

图2 基于诊断分析和预报试验的梅雨区降水延伸期预报综合流程图^[41]

梅雨趋势预报中具有一定的应用价值。

杨修群等^[23]通过“大气低频变化规律及其在气象预测中的研究”行业专项项目的研究，建成了MJO对中国气候影响监测业务系统：MJO监测相关的研究成果已经在国家气候中心延伸期预警预测业务中得以应用，包括不同月份或滑动季MJO不同位相的降水和气温等要素的合成，为气候诊断和预测业务提供了有力的技术支持。以下是他们众多研究成果中的一项，即冬季降水低频分量（ P ）的线性回归模型基于1979—2007年冬季拟合：

$$P(x, t) = c_1(x)a_1(t - \tau) + c_2(x)a_2(t - \tau) + c_3(x)a_3(t - \tau)$$

$$\tau = 10\text{d}$$

可以在冬季提前10d预报未来10d平均的低频降水。

Zhang等^[13]研究了MJO对中国东南部夏季降雨的影响，指出当MJO位于印度洋时，通过MJO相对加热，使Rossby波能量向东北传播，热带印度洋的低层西风波列传至中国东南部，引起低压增强，降水增加；当MJO位于西太平洋时，异常Hadley环流上升支北移到 10° — 20°N ，引起西太平洋副高东撤，导致影响中国东南部水汽输送减弱，降水减少。

Galín^[48]使用时变经验正交函数对大气环流的低频变化进行了研究，得到其时频谱特征为40~50d，为延伸期降水趋势预报提供低频背景条件。

此外，Xavier等^[59]、Seo等^[60]基于季节内振荡进行了延伸期降水预报的试验和研究。

5 LFO与延伸期天气过程预报

本节主要介绍低频天气图的延伸期强降水过程

预报方法^[36-37]。通过Batterworth带通（30~50d）滤波器处理的低频流场图、高度场图或其他要素场图，统称为低频天气图。绘制低频天气图，关键在于取前期150d逐日格点资料，采取逐日前减（1d）后加（1d）的处理方法，始终保持连续的150个样本而得到每日的低频天气图^[61]。低频天气图上可以分析出低频气旋、低频反气旋和低频低压、低频高压等。这些系统称为低频天气系统。低频天气系统具有时间的周期性，空间的连续性和生成源地的准定常性，低频天气系统的变化可分为两类：原地振荡和东西移动。图3就是一个原地振荡的例子。

从图3可以看出，在2010年9月21日到10月28日的700hPa低频流场图上，在 20° — 30°N ， 110° — 130°E 区域内，9月21日低频反气旋生成，10月4日消失；10月12日低频气旋生成，10月29日消失。这一对原地振荡的低频系统，活动周期近40d。整个夏半年，在同一区域生消的低频系统除原地振荡外，还有向东或向西移动的（图略）。因此，与常规天气图（即未进行滤波处理）相比，其优越性在于预测天气系统的变化要相对容易，且时效也长得多。因为低频天气系统的变化恰好与引起天气过程的某种天气系统的生成、维持、移动、加强和减弱过程相对应。这正是低频天气图在业务预报应用中最突出的优点。

低频天气图预报方法的思路类似于以天气学、动力学为基础的短期值班预报员做延伸天气过程预报的思路。就好像预报员做短期预报，有低压槽移来时，不是简单地根据低压槽移来时强降水的历史概率

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。但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。

早在1991年，章基嘉、孙国武等^[61]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。1991和1995年，分别在广州、南京举办过全国性的大气低频振荡预报方法学习班，但由于当时资料条件的限制而未能实施。

直到2007年，中国气象局新技术开发办公室以“低频天气系统预报技术业务化应用”立项，经2008，2009和2010年6—9月在上海市气候中心的业务应用，预报结果表明，强降水过程可以在10~45d前预报出来。

(1) 2010年上海世博期间的气象服务中，成功地预报了关键时期的重要天气过程：世博开幕日和开馆日；气象馆荣誉日；梅雨；8月30日—9月1日当年唯一的一次大暴雨过程（最大日雨量125.8mm）以及国庆节天气等。

(2) 自2008年（7—10月）、2009年（6—9月）到2010年（4—9月）上海地区的预报结果：三年内，上海地区中雨以上降雨过程共出现36次，提前15~40d预报出来33次，漏报3次，空报3次；三年内，上海地区暴雨过程（≥50mm）共出现17次，提前15~40d预报出

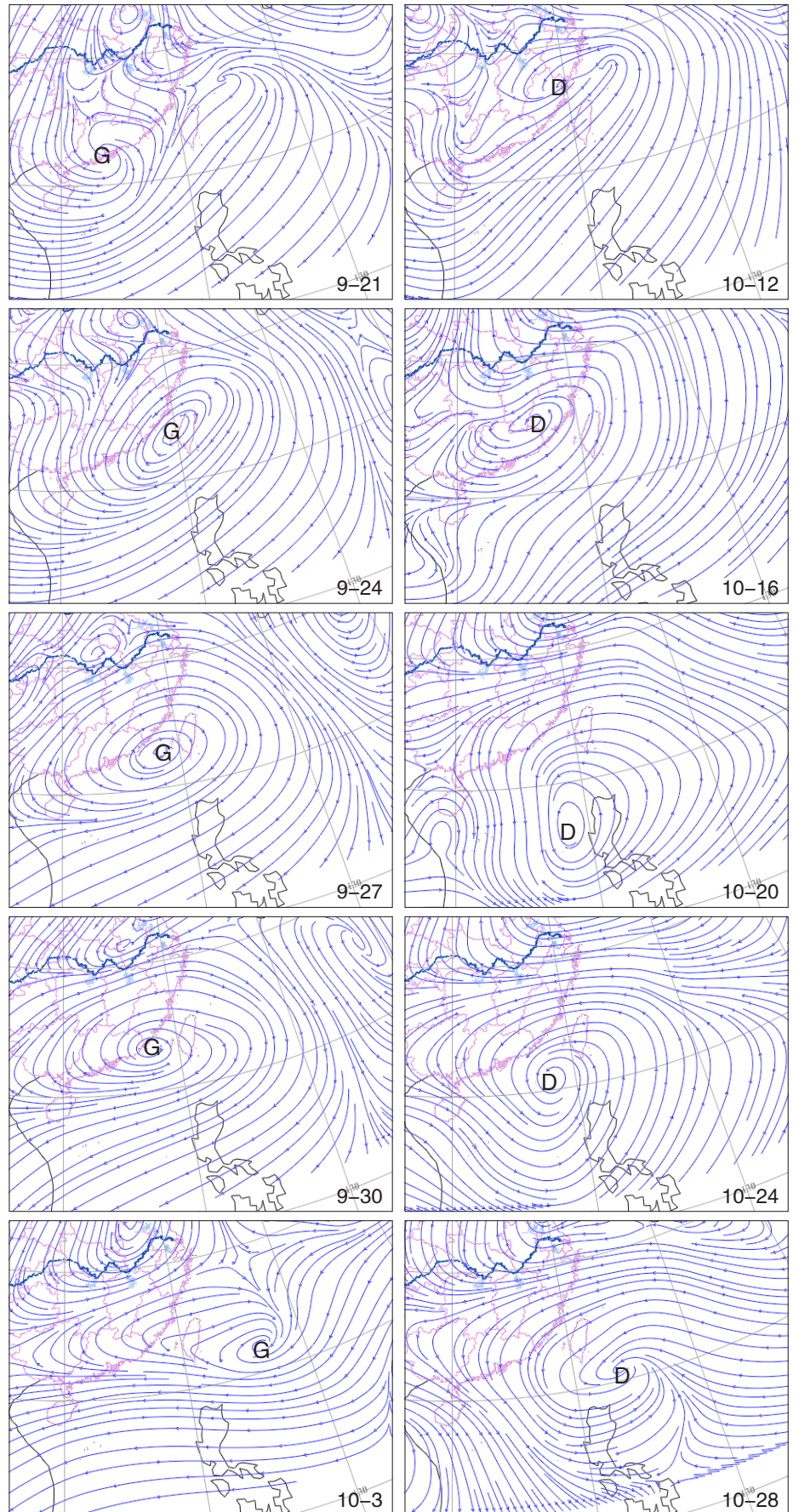


图3 2010年9月21日—10月28日的700hPa低频流场图

来, 16次正确, 漏报1次, 空报0次; 三年内, 上海地区共出现特大暴雨过程 ($\geq 100\text{mm}$) 5次, 提前15~40d预报出来5次, 漏报0次, 空报0次。

2011年, “月内重要过程趋势预测系统”被列为中国气象局现代气候业务建设试点任务, 先在个别省推广低频天气图方法。此外, 2009年以来在沈阳、兰州中心气象台预报值班中应用, 也取得了较好的结果。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试验; 海南气候中心也将在2011年的汛期应用低频天气图预报延伸期强降水过程等。

此外, 2011年又提前10~30d较好地预报了旱涝急转期的长江中下游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)。

6 展望

(1) 从实际应用方面来说, 大气低频振荡用于延伸期预报的方法之一——低频天气图预报方法, 目前已有近10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预报人员的参与, 可以预计到其发展趋势: 绘制低频天气图提取低频信号的滤波技术能进一步改进; 低频天气图的层次、要素和预报方法会进一步完善; 低频天气图的预报内容将不仅限于夏季强降水过程, 可能会包括寒潮、持续低温、冰冻雨雪、沙尘暴和干旱等天气过程。总之, 低频天气图预报方法有可能成为我国气象部门做延伸期天气过程预报的常用方法之一。

(2) 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。

(3) 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, 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、大气持续性和外强迫的深入研究等有可能发展成为一门低频动力学。

参考文献

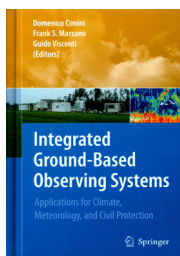
[1] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 1963, 20:130-148.
 [2] Lorenz E N. The predictability of hydrodynamic. *Trans New York Academy of Sciences, Ser II*, 1963, 25:409-433.
 [3] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002: 131-161.
 [4] Waliser D E. Intraseasonal variability. //Wang B. *The Asian*

Monsoon. New York: Springer/Praxis Publishing Ltd, 2006.
 [5] Palmer T N. Chaos and predictability in forecasting the monsoons. *Proc Indian Natl Sci Acad*, 1994, 60:57-66.
 [6] 何金海, 陈丽臻. 南北半球环流的准40天振荡与夏季风降水预报的可能途径. *低纬高原天气*, 1988, 1: 38-49.
 [7] 朱乾根, 徐国强. 1998年夏季中国南部低频降水特征与南海低频夏季风活动. *气象科学*, 2000, 20(3): 239-248.
 [8] 徐国强, 臧建升, 周伟灿. 1998年京津冀夏季风的低频振荡与降水的特征. *应用气象学报*, 2001, 12(3): 297-306.
 [9] 张秀丽, 郭品文, 何金海. 1991年夏季长江中下游降水和风场的低频振荡特征分析. *南京气象学院学报*, 2002, 25(3): 388-394.
 [10] 信飞, 肖子牛, 李泽椿. 1997年华南汛期降水异常与大气低频振荡的关系. *气象*, 2007, 33(12): 23-30.
 [11] 王遵娅, 丁一汇. 夏季长江中下游旱涝年季节内振荡气候特征. *应用气象学报*, 2008, 19(6): 710-715.
 [12] 梁萍, 陈隆勋, 何金海. 江淮夏季典型旱涝年的水汽输送低频振荡特征. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 84-91.
 [13] Zhang L N, Wang B Z, Zeng Q C. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in Southeast China. *J Climate*, 2009, 22: 201-215.
 [14] 刘冬晴, 杨修群. 热带低频振荡影响中国东部冬季降水的机理. *气象科学*, 2010, 30(5): 684-693.
 [15] Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al. Impacts of the Madden-Julian Oscillation on winter rainfall and circulation in China. *Adv Atmos Sci*, 待发表.
 [16] 陆尔, 丁一汇. 1991年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡. *气象学报*, 1996, 54(6): 730-736.
 [17] 李勇, 周兵, 等. 2007年淮河强降水时期低频环流特征. *气象学报*, 2010, 68(5): 740-747.
 [18] 马晓青, 丁一汇, 徐海明, 等. 2004/2005年冬季强寒流事件与大气低频波动关系的研究. *大气科学*, 2008, 32(2): 380-394.
 [19] 刘冬晴, 杨修群. 从低频变化看2008年1月我国南方持续性低温雨雪天气的成因. 待发表.
 [20] 贾小龙, 梁潇云. 热带MJO对2009年11月我国东部大范围雨雪天气的可能影响. *热带气象学报*, 待发表.
 [21] 田华, 李崇银, 杨辉. 大气季节内振荡对西北太平洋台风路径的影响研究. *大气科学*, 2010, 34(3): 559-579.
 [22] 杨秋明. 全球环流20~30d振荡与长江下游强降水. *中国科学D辑: 地球科学*, 2009, 39(11): 1515-1529.
 [23] 杨修群, 任福民, 周兵. 大气低频变化规律及其在气象预测中的应用研究. 上海: 延伸期(月内)过程预报研讨会, 2010-12.
 [24] 穆明权, 李崇银. 1998年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动. *气候与环境研究*, 2000, 5(4): 375-387.
 [25] 毛江玉, 吴国雄. 1991年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡. *气象学报*, 2005, 63(5): 762-770.
 [26] Ren X J, Yang X Q, Chu C J. Seasonal variations of the synoptic-scale transient eddy activity and polar-front jet over east Asia. *J Climate*, 2010, 23(12): 3222-3233.
 [27] Han R Q, Li W J, Dong M. Temporal and spatial characteristics of intra-seasonal oscillations in the meridional wind over the subtropical northern Pacific. *Acta Meteor Sinica*, 2010, 24(3): 276-286.
 [28] 韩荣青, 李维京, 董敏. 副热带北太平洋大气季节内振荡时空特征的诊断研究. *气象学报*, 2010, 68(4): 520-528.
 [29] Hendon H H, Liebmann B. The intraseasonal (30~50day) oscillation of the Australian summer monsoon. *J Atmos Sci*, 1990, 47: 2909-2923.
 [30] Mo K C, Higgins R W. Tropical influences on California precipitation. *J Climate*, 1998, 11: 314-430.
 [31] Paele J N, Byerle L A, Mo K C. Intraseasonal modulation of South American summer precipitation. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(3): 837-850.
 [32] Whitaker J S, Weickmann K M. Subseasonal variations of tropical convection and week-2 prediction of wintertime western North American rainfall. *J Climate*, 2011, 14: 3279-3288.
 [33] Jiang X N, Waliser D E, et al. Assessing the skill of an all-season

- statistical forecast model for the Madden-Julian Oscillation. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 1940-1956.
- [34] Lo F, Hendon H H. Empirical prediction of the MJO. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 2528-2543.
- [35] 何金海, 董敏, 韩荣青. 季节内振荡研究的过去、现在和将来//21世纪初大气科学前沿与展望. 北京: 气象出版社, 2006.
- [36] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 64-68.
- [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): 1142-1147.
- [38] 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(增刊): 69-75.
- [39] 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.
- [40] 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): 1-7.
- [41] 梁萍. 中国梅雨的季节内振荡分析和延伸预报. 中国气象科学研究院, 南京信息工程大学博士学位论文, 2010.
- [42] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸预报试验. *大气科学*, 2012, 待发表.
- [43] 梁萍, 丁一汇. 东亚梅雨季节内振荡的气候特征. *气象学报*, 2012, 待发表.
- [44] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸预报. *气象*, 2010, 36(7): 111-122.
- [45] Maharaj E A, Wheeler. Forecasting an index of the Madden-Oscillation. *Int J Climatol*, 2005, 25: 1611-1618.
- [46] 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): 1917-1932.
- [47] Jones C, Carvalho M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. *J Climate*, 2004, (17): 2078-2094.
- [48] Galin M B. Study of the low-frequency variability of the atmospheric general circulation with the use of time-dependent empirical orthogonal functions. *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2007, 43(1): 15-23.
- [49] 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.
- [50] 支蓉, 龚志强, 郑志海, 等. 基于矩阵理论的全局温度资料的尺度性研究. *物理学报*, 2009, 58(3): 2113-3119.
- [51] 丑纪范. 天气和气候的可预报性. *气象科技进展*, 2011, 1(2):12-14.
- [52] 李建平, 丁瑞强, 陈宝花. 大气可预报性的回顾与展望//21世纪大气科学前沿与展望. 北京: 气象出版社, 2006: 96-103.
- [53] 丁瑞强, 李建平. 非线性误差增长理论及可预报性研究. *大气科学*, 2007, 31: 571-576.
- [54] 丁瑞强, 李建平. 非线性误差增长理论在大气可预报性中的应用. *气象学报*, 2009, 67(2): 241-249.
- [55] 丁瑞强, 李建平. 天气可预报性的时空分布. *气象学报*, 2009, 67(3): 343-354.
- [56] Jin F F, Pan L L. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part I: A linear closure. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 1677-1694.
- [57] Jin F F, Pan L L. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part II: A theory for low-frequency modes. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 1695-1708.
- [58] Jin F F, Pan L L. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part III: Baroclinic model results. *J Atmos Sci*, 2006, 63:1709-1725.
- [59] Xavier P K, Goswami B N. Analog method for realtime forecasting of summer monsoon subseasonal variability. *Mon Wea Rev*, 2007, 135: 4149-4160.
- [60] Seo K, Wang W, Gottschalk J, et al. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models. *J Climate*, 2009, 22(9): 2372-2388.
- [61] 章嘉基, 孙国武, 陈葆德. 青藏高原大气低频变化的研究. 北京: 气象出版社, 1991.

《综合地基观测系统——在气候、天气学和灾害防御中的应用》评介

■ 张建磊



Springer, 2010年出版

研究天气学和气候学方面的重要问题必须对大气的变化过程及其相互间的联系有全面的认识。地基遥感为人们了解这些变化过程提供了很好的工具,但是每一种观测系统都有各自的优势和劣势,只有把这些观测系统综合起来,才能使它们更好地发挥

作用,从而满足用户的需求。2007年9月4—7日在意大利L'Aquila大学举办的第七期大气和海洋科学国际夏季学校的主题就是“综合地基观测系统在气候、天气和灾害防御中的应用”,旨在把地基遥感方面的专家和年轻学者聚集在一起,共同讨论综合地基观测系统的需求及其在天气预报、天气学、气候学、自然灾害监测和交通服务等各种应用中所发挥的作用。来自四大洲10个国家的70位专家学者参加了本期国际夏季学校。Thomas Ackerman等15位专家学者做了特邀报告。

《综合地基观测系统——在气候、天气学和灾害防御中的应用》

(*Integrated Ground-Based Observing Systems*)一书收录了本期国际夏季学校中的精彩报告。本书共分两个部分,第一部分收录了7篇文章,主要关注地基观测的基本仪器和集成技术,包括对流层辐射遥感原理、气象雷达系统、气溶胶雷达观测原理、声雷达和风廓线雷达的无线一声探测系统、雨量计和雨滴测量仪、大气成分观测原理和方法,以及观测仪器和方法综合的理念等。第二部分收录了9篇文章,侧重于介绍地基观测系统在各个领域的应用,包括云雨的微物理属性观测、地基观测资料在航空气象和

(下转62页)