

# MJO在延伸期预报中的应用进展

梁萍<sup>1</sup> 何金海<sup>2</sup> 穆海振<sup>1</sup>

(1 上海市气候中心, 上海 200030; 2 南京信息工程大学, 南京 210044)

**摘要:** 10~30d延伸期预报是介于天气预报和短期气候预测之间的一个预报期, 近年来已成为国际上天气-气候无缝隙预报体系的一个重要发展方向。基于Madden Julian Oscillation (MJO) 为主的大气低频振荡特征, 我国和国际上的一些天气-气候预报中心在延伸期预报的研究和应用中取得了一定的成果。从MJO的基本特征出发, 基于MJO与天气气候关系的最新研究成果, 重点介绍利用MJO开展实时监测和延伸期预报应用进展, 主要包括: MJO的延伸期预报; MJO在延伸期强降水、台风、寒潮及灾害预估中的业务应用。最后对MJO在延伸期预报应用中的发展趋势进行了展望。

**关键词:** MJO, 延伸期预报, 强降水, 台风, 寒潮, 灾害

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.005

## Application of MJO in Extended-Range Forecast

Liang Ping<sup>1</sup> He Jinhai<sup>2</sup> Mu Haizhen<sup>1</sup>

(Shanghai Climate Center, Shanghai 200030 2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

**Abstract:** 10–30d extended-range forecast (ERF) is a forecast “seam” between traditional weather forecast and short-term climate prediction. It has become an important research direction for the development of international weather-climate seamless forecast system in the last decades. Some national or international weather-climate forecast centers have made preliminary achievements on ERF research and application based on MJO. In this paper, according to latest studies related to associations between MJO and weather or climate, starting from basic features of MJO, development of MJO monitoring and ERF application are chiefly introduced. The developments mainly include: ERF of MJO and operational application of MJO in ERF of heavy rainfall, typhoon, cold wave and disasters. Finally, this paper discusses the developing trend of ERF based on MJO in the future.

**Keywords:** MJO, extended-range forecast, heavy rainfall, typhoon, cold wave, disaster

### 1 引言

我国是世界上遭受气象灾害最严重和最频繁的国家之一, 每年阶段性、持续性和频发性高影响天气气候事件导致的气象灾害都造成国民经济和生命财产的巨大损失。针对高影响天气气候事件在10~30d延伸期尺度上做出准确预报显得尤为重要和迫切。但10~30d延伸期预报是目前业务预报中的一个“缝隙”, 介于常规的10d以内逐日天气预报和月尺度以上短期气候预测之间。由于目前的动力模式难以提供准确描述大气的初始条件和缓变的海表面边界条件<sup>[1]</sup>, 10~30d延伸期预报的基础理论在国际气象科学发展前沿中还处于探索研究阶段。然而, 鉴于月内天气演变对农业生产和决策服务的重要性, 延伸期预报

已成为国际气象界关注的热点问题。

MJO是源于热带地区的30~60d准周期性季节内振荡现象, 具有纬向1波的全球尺度, 并以热带地区对流增强/减弱区的向东传播为主要特征。与热带对流异常相伴的, 近赤道地区(15°S—15°N)纬向风、海平面气压、云量、降水、海温和海表蒸发等也以30~60d为主要周期从西向东传播。尽管MJO具有全球尺度特征, 但在印度及西太平洋季风区表现得更为明显<sup>[2,3]</sup>。

作为目前发现的全球最强低频信号, 国内外普遍认为MJO可作为联系数值天气预报和季节预报的桥梁, 填补中期预报与短期气候预测之间的延伸期预报时段缝隙。总的来说, MJO的重要应用价值主要源于: (1) MJO与热带对流的密切关系, 且热带对流是全球天气和气候系统的强迫因子。要延长中高纬天气的预报时效主要应考虑来自热带的低频信号, 即MJO。而中高纬大气季节内振荡也通过波能量的传播对热带MJO和亚洲季风活动产生相互作用。(2) MJO具有准周期性, 故MJO活动有可能具

收稿日期: 2012年10月23日; 修回日期: 2012年12月6日  
 第一作者: 梁萍(1980—), Email: liangping1107@163.com  
 资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006020-04-01); 国家自然科学基金资助项目(41205060); 973项目(SQ2011CB046594)

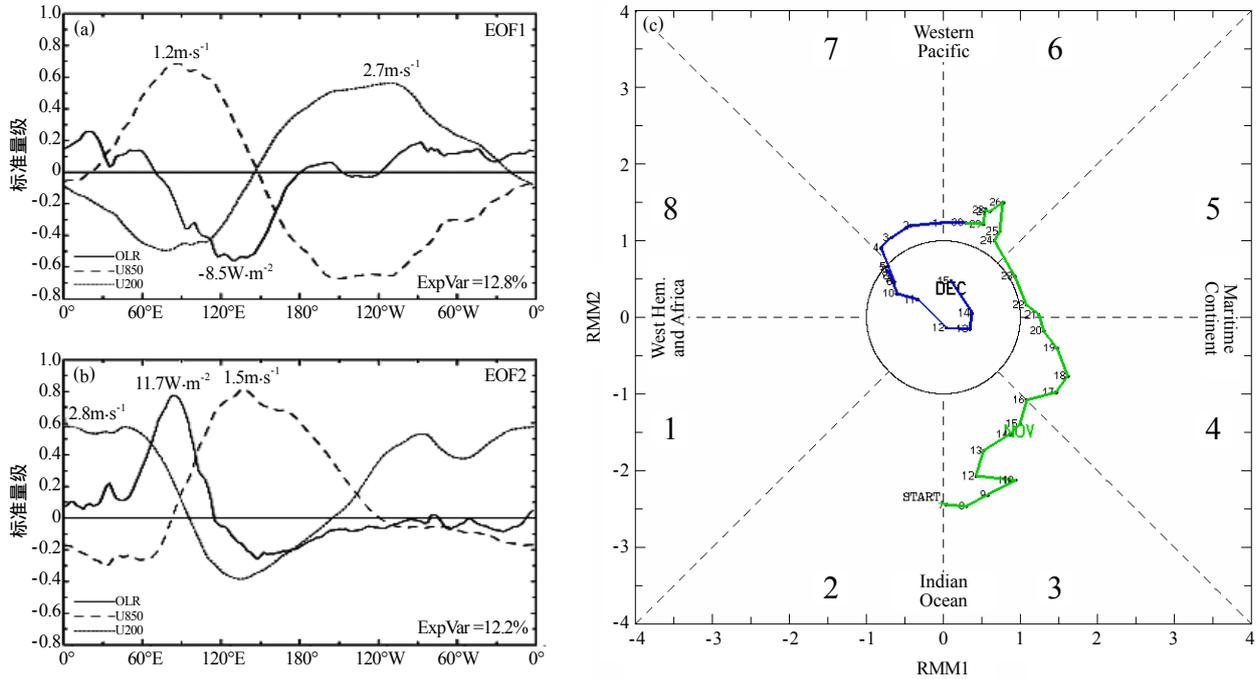


图1 (a) 和 (b) 由近赤道平均的OLR、U850、U200的联合多变量EOF获得的前2个模态空间结构；  
(c) 多变量MJO指数RMM1、RMM2确定的位相分布演变图<sup>[6]</sup> (曲线上标注的数字表示日期)

有提前15~20d左右的可预报性。(3) MJO的时间尺度介于月、季之间,而延伸期预报的时间尺度约为10~30d,二者在时间尺度上相匹配,至少可以预报4~5周期间的主要过程和事件。鉴于MJO的上述三个特点,目前比较有效的方法是根据以MJO为代表的季节内振荡的传播来制做延伸期预报。国际上一些天气-气候预报中心通过数年的业务试验已取得了初步结果。我国一些科研、业务单位近年来也分别利用MJO、低频天气图及动力模式等方法开展了10d以上的延伸期预报信息研判,并针对不同对象制做了预报产品,在业务实践中取得了一定的效果<sup>[4-16]</sup>。

本文从MJO的基本特征出发,基于MJO与天气气候联系的最新研究成果,着重介绍利用实时监测的MJO开展延伸期业务预报的应用进展,最后对MJO在延伸期预报中的发展趋势进行展望。

## 2 MJO基本特征及实时监测

MJO以热带降水增强或抑制区(特别是印度洋和太平洋)的向东传播为特征。伴随热带降水异常的东传,热带和副热带地区的低层和高层大气环流也出现显著异常型,且异常特征不仅局限于东半球,还延伸到整个全球。提高MJO缓变信号的监测能力,对于MJO位置和强度的确定以及对其后期演变的准确预测都非常重要。关于MJO的实时监测,以NCEP气候预测中心(CPC)<sup>[17]</sup>及澳大利亚气象局<sup>[18]</sup>为代表的国际

气象业务部门近年来已开发了诸多产品并用于实时业务发布。一方面,业务上采用时间-经度剖面图来监测MJO相关的基本物理量进而识别MJO的移动和强度,主要监测指标包括:(1)反映热带对流和降水特征的向外长波辐射(OLR);(2)对流层高层速度势;(3)对流层高层和低层风场异常;(4)反映中纬度响应的500hPa位势高度异常。上述监测应用表明,伴随MJO从印度洋向东传播,热带降水异常和对流层高层散度也从印度洋向东传播,而在降水增强区域前方(后方)的东风(西风)异常也向东移动贯穿整个热带。另一方面,各业务部门也多采用Wheeler和Hendon<sup>[19]</sup>定义的RMM1、RMM2指数作为MJO实时监测预报的指数。首先,对近赤道平均的850和200hPa纬向风及OLR通过多变量EOF分解,得到近赤道MJO空间结构的前两个主模态EOF1和EOF2(图1a和1b)。在MJO的实时监测中,将实时的多变量投影于上述两个主模态,得到主成分RMM1、RMM2,在由RMM1、RMM2确定的位相分布图(图1c)上可点出逐天的MJO空间位相演变;MJO强度由RMM1、RMM2平方和的算术根确定,当大(小)于1,即位于位相图中的圆圈外(内)时,为强(弱)MJO;由此可监测MJO的移动及强度变化。上述MJO监测方法避开了传统上采用时间滤波提取MJO信号不能用于实时预测的弊端,是提取MJO信号的有效方法。

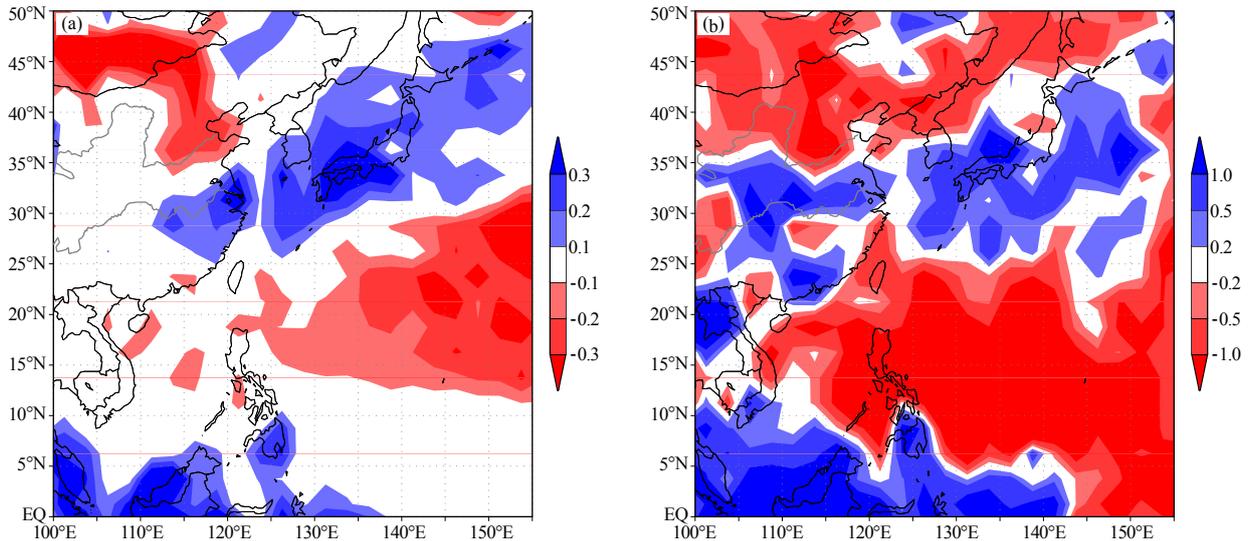


图2 夏季6—8月MJO位于3、4位相和6位相下降降水现象 (a) 和极端降水事件 (b) 的概率差异 (概率为与气候概率的比值)<sup>[8]</sup>

### 3 MJO的延伸期预报及应用

#### 3.1 MJO的延伸期预报

关于MJO的预报业务,目前主要采用动力模式和统计模型两种途径实现,预报时间长度从2周到40d不等。在经验统计模型方面,美国、澳大利亚等主要利用各种回归模型<sup>[20-22]</sup>、经验位相传播EWP<sup>[23]</sup>和组合相似法ANL<sup>[24]</sup>对MJO指数进行实时预报。韩国<sup>[25]</sup>在多元回归、小波分析和奇异谱分析三种统计方法的基础上对MJO进行集合预报,结果表明多元线性回归集合预报对MJO指数的预报时效可达15d左右,而单一统计方法的预报时效为10d左右。

在MJO的动力模式预报方面,美国将MJO指数用于其全球业务中心的动力模式,如CFS/NCEP<sup>[26]</sup>(气候预报系统)、GFS/NCEP(全球预报系统)、GEFS/NECP(全球集合预报系统),进行MJO实时业务预报。试验比较表明,GEFS比CFS对MJO的预报有更高的技巧。为了对比各国动力模式(或集合预报)对MJO的实时业务预报性能,美国、英国、加拿大、欧洲中心、澳大利亚、巴西、日本、台湾及印度等国家和地区都采用统一的MJO指数算法,将各自实时业务模式得到的未来1周~40d(以2周为主)的MJO指数预报,加入到CLIVAR、WCRP-WWRP工作组设计的实时预报发布平台<sup>[27]</sup>中,并计划采用统一的检验统计方法(双变量相关和均方根误差)对各家模式的MJO预报技巧进行检验<sup>[28]</sup>。而韩国<sup>[25]</sup>则应用多模式(AGCM和CGCM)集合预报方法开展了冬季MJO的30d延伸期的预报试验,对MJO两个指数的预报时效

可达20d;在此基础上进一步与统计预报相结合,使得预报技巧提高至22~24d。

#### 3.2 MJO在重要天气气候事件延伸期预报中的应用

MJO与全球天气气候有重要联系且具有与延伸期尺度相匹配的准周期性,这使得MJO成为延伸期预报性的重要来源,是全球延伸期预报的重要信号。在热带地区,MJO对天气气候的影响主要表现在:(1)改变区域降水分布型<sup>[29-31]</sup>; (2)增强或抑制热带气旋<sup>[32-37]</sup>; (3)调节季风爆发、中断、结束时间及季风强度<sup>[38,39]</sup>。在东亚地区夏季,以MJO为主要特征的热带印度洋和西北太平洋大气季节内振荡通过影响亚洲夏季风,进而对东亚地区的天气气候演变和阶段性、持续性异常事件的发生产生重要影响<sup>[40-52]</sup>。在冬季,MJO则可通过Rossby波列影响副热带大气环流,包括阿留申低压、西太平洋低层环流、副热带急流、天气尺度扰动及风暴轴等系统,从而影响到副热带地区的天气和气候。因此,基于以MJO为代表的季节内振荡制作延伸期预报可能是目前比较有效的方法。下面主要分强降水、台风、寒潮和灾害预估四个方面介绍基于MJO的延伸预报业务应用。

##### 3.2.1 MJO具有的强降水延伸期预报信号及业务应用

以MJO为主要特征的热带有组织性对流季节内变率对全球都有明显影响<sup>[53-58]</sup>。作为热带加热的大气响应,源自西太平洋的Rossby波列将向西传播,造成北美西海岸的异常强降水事件<sup>[53-54,59]</sup>。而当MJO活动位于位相3(7)时,即活跃于印度洋(西太平洋)时,印度洋对流正(负)异常和西太平洋对流负(正)异

常的热带强迫偶极子可对副热带环流异常产生明显影响<sup>[58]</sup>。Zhang等<sup>[50]</sup>关于MJO与中国东南部夏季降水的关系研究表明：当MJO位于印度洋时，副高西进，中国东南部的的水汽输送和上升运动增强、降水增加；当MJO进入西太平洋时，情况则相反；随着MJO从印度洋向西太平洋移动，中国东南部夏季降水则由增强变为减少。MJO对夏季降水的最大正异常和负异常影响可达气候平均降水的10%。对于冬季降水，Jia等<sup>[52]</sup>的研究表明，MJO通过影响孟加拉湾南支槽、西太平洋副高、东亚冬季风和西风带槽脊活动进而影响冬季降水异常。同夏季类似，当MJO自印度洋向西太平洋传播时，长江流域和华南冬季降水由增强转为减弱。

丁一汇等<sup>[8]</sup>研究表明，与气候概率相比，当MJO位于印度洋即3、4位相（西太平洋即6位相）时，降水事件（包括极端降水事件）的概率在东亚梅雨区（长江—韩日南部地区，图略）为一致性增大（减小）。对比MJO位于印度洋（3、4位相）和西太平洋（6位相）时的降水事件和极端降水事件的概率差异（图2）可明显看出，二者的差异呈现纬向分布特征，MJO位于3、4位相时东亚副热带地区出现降水/极端降水事件的概率明显增大，而其南北两侧则相反。这种非局地性差异反映出热带MJO对东亚副热带夏季降水的影响具有大尺度特征，而并非统计上的偶然性。

梁萍<sup>[9]</sup>将MJO信号应用于晴雨及极端降水事件的延伸期预报中，给出夏季MJO不同位相下的上海地区雨日及极端降水出现概率（图3）。当热带MJO位于3位相（印度洋东部）、4位相（海洋大陆西部）时，上海雨日出现的概率最大（较气候概率大1~2成），对应的平均降水量也最多（较气候平均偏多3~4成）；而当热带MJO位于6位相（西太平洋西部）时，上海雨日出现的概率最小（较夏季平均概率小近2成），对应的平均降水量也最少（较夏季平均降水量偏少3~4成）。热带MJO位于3、4位相和6位相

时，上海地区出现极端强降水的概率分别达最大（较气候概率大4~6成）和最小（较气候概率小3成）。由此表明，MJO的3、4位相和6位相可作为上海地区夏季降水事件延伸期预报的热带信号。

MJO信号对于江淮梅雨的延伸期预报也有一定的参考价值。在2009年江淮梅雨延伸期预报中，热带MJO信号发挥了积极的参考作用。其中，在5月23日和6月2日制作梅汛期延伸期预报的实时业务中，美国NCEP-GFS分别预报6月上旬—中旬前期MJO活跃于西太平洋地区的6、7位相，根据夏季MJO不同位相与江淮/上海地区降水的关系，给出不利于江淮/上海在6月中旬前期之前入梅的信号，与实况一致，为江淮地区梅汛期的实时延伸预报提供了依据<sup>[8]</sup>。

梁萍等<sup>[14]</sup>进一步的预报试验对比研究表明，热带低频信号对梅雨区降水季节内振荡演变的预报价值优于中纬度或中高纬度低频信号。因此，在上海市气候中心开展的副热带季风延伸期预报业务中，基于MJO活动关键区低频信号建立回归模型，进而对6-9月副热带季风区（以上海和江淮地区为代表）未来10~50d的逐候降水趋势进行实时准业务预报。以上海地区延伸期降水预报实时业务为例，选取对上海降水异常影响明显的MJO关键区（近赤道印度洋及西太平洋，如图4a）的实况低频OLR作为预报因子，将其应用于回归模型，给出延伸期逐候降水演变预报（图4b）。可以看出，在2012年5月24日预报的上海延伸期降水量演变中，预报与观测实况的对比表明，该方法既可较好预报出延伸期（未来20~45d）降水的峰值出现时段（6月14—18日和6月24—28日）和逐候降水量增加或减少的演变，同时对逐候降水量异常也有一定的参考（图中预报与实况的异常趋势一致率为60%）。

此外，吕俊梅等<sup>[60]</sup>研究了MJO传播规律对云南延伸期降水的影响，并利用MJO进行云南延伸期降水测试，较好地预测了延伸期（未来30d左右）大范

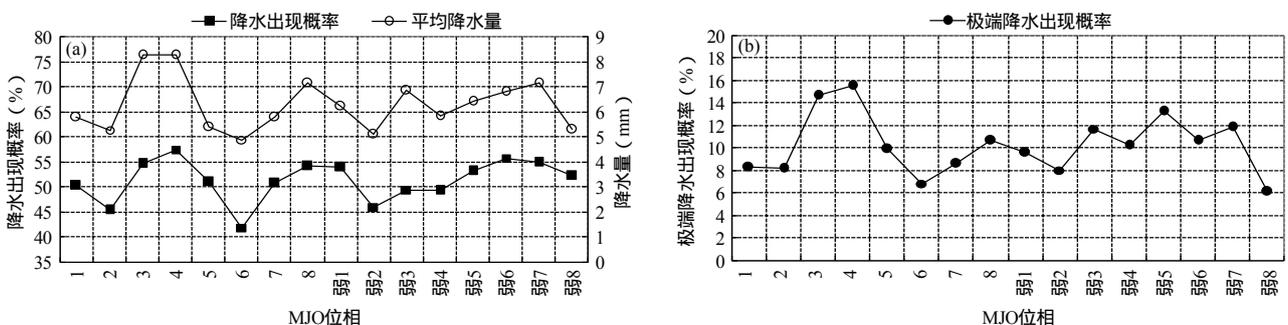


图3 夏季6—8月MJO不同位相合成的上海地区降水事件出现概率及平均降水量（a）和极端降水（降水百分位数 10%）出现概率（b）<sup>[9]</sup>

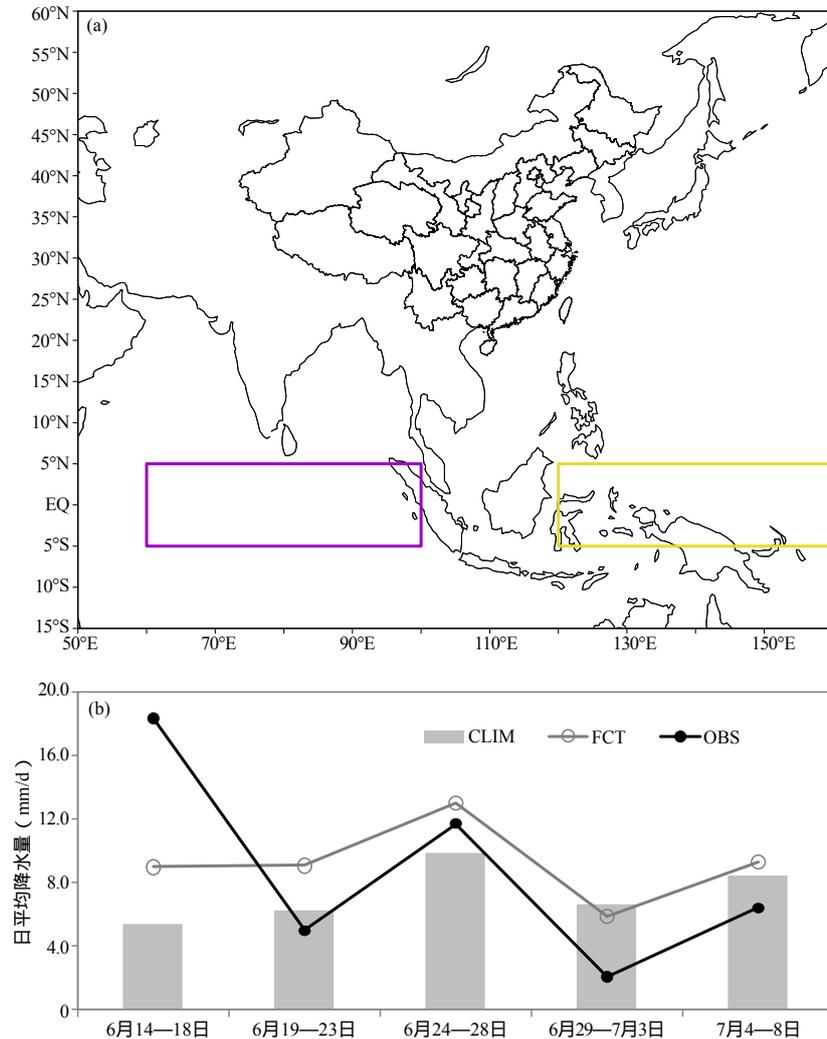


图4 (a) 基于MJO的延伸期降水统计预报模型的关键因子, 近赤道印度洋 (紫色方框) 及 西太平洋 (黄色方框) 的低频 OLR; (b) 2012年延伸期预报个例 (5月24日起报的上海地区延伸期降水演变, 空心圆折线为预报, 实心圆折线为观测, 阴影柱状图为1981—2010年平均, 单位: mm/d)

围干湿阶段的转换过程 (窗口期)。因此, 以MJO为主要特征的赤道印度洋和热带西北太平洋大气季节内准周期振荡通过影响亚洲夏季风进一步对东亚地区的天气气候演变和阶段性、持续性异常事件产生重要影响<sup>[8, 42-44, 48, 50-52, 61-64]</sup>, 可能成为包括江淮梅雨在内的东亚天气气候事件在10~30d延伸期时间尺度上的可预报信号。杨修群等<sup>[65]</sup>通过“大气低频变化规律及其在气象预测中的研究”行业专项的研究, 建成了MJO对中国气候影响监测业务系统, 相关成果已在国家气候中心延伸期预警预测业务<sup>[66]</sup>中得以应用, 包括不同月份或滑动季MJO不同位相的降水的合成, 为气候诊断和预测业务提供了有力的技术支持。

需要指出的是, MJO只是低频振荡在热带的重要表征, 全球各纬度带都存在低频振荡<sup>[41, 67, 68]</sup>。因此,

综合不同来源的低频信号进行延伸期预报效果可能更好。为此, 梁萍等<sup>[14]</sup>分别采用降水低频信号、关键区低频信号、MJO低频信号和低频环流场等多种统计模型并结合海-气耦合模式产品, 给出梅雨区降水量和降水概率的延伸期预报综合流程图 (图5), 在梅雨区降水延伸期预报中具有一定的应用价值。

### 3.2.2 MJO 具有的台风延伸期预报的信号及应用

谢义炳等<sup>[69]</sup>的早期研究指出, 亚洲季风的脉动具有季节内振荡的特征, 并与西太平洋台风的多寡有较好的统计关系。丁一汇等<sup>[70]</sup>发现南海和西北太平洋地区的热带辐合区中常常出现多个台风同时发展的现象, 表明台风活动具有集中性。Gray<sup>[32]</sup>的研究表明, 全球热带台风形成总数往往集中在2~3周的活跃期, 而相对不活跃期也常常持续2~3周左右。这样, 诸如MJO

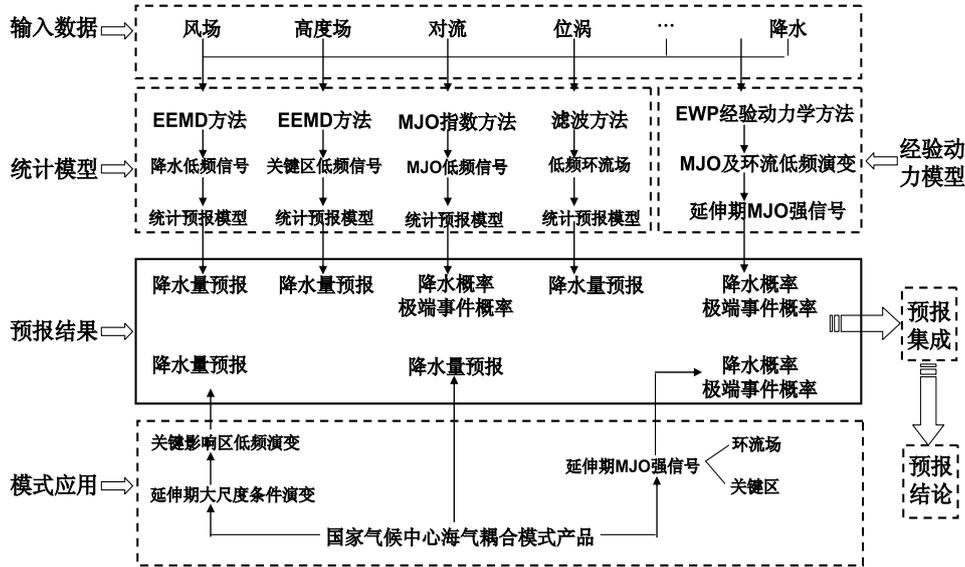


图5 基于诊断分析和预报试验的梅雨区降水延伸期预报综合流程图<sup>[14]</sup>

等的行星尺度季节内变率可通过提供有利于（不利于）热带气旋发展的大尺度环境场来调节热带气旋活动的不同阶段。文献[33-37, 71]的研究进一步证实，MJO的不同位相可调节热带气旋的活动，随着MJO对流的向东传播，台风路径的密集区也向东移动，进而影响到热带地区的台风活动。例如，在MJO的6和7位相下，太平洋地区的台风较活跃，而在2和3位相下，太平洋的台风活动则大大减弱。

MJO对台风活动的调制影响可提高台风延伸期预报的可预报性。法国气象局<sup>[72]</sup>基于Lorely等<sup>[73]</sup>提出的统计方法，应用包含MJO指数的5个因子开展了以南半球为主的逐周台风活动延伸期预报，结果表明台风活动的预报技巧最大可达3周，在MJO强振幅情况下甚至有更长的预报时效。在2007—2008年夏季南印度洋地区生成台风的实时预测（图略）中，大多数台风的实况生成时间与预测的台风生成概率峰值时段相对应。因此，基于该方法的南半球台风实时预测在一定程度上还是比较成功的。

近2年，我们尝试在上海区域气候中心开展基于MJO的西太平洋台风活动信息预判业务，也取得了较好的试验结果。例如，在2012年，基于美国CPC自7月15日以来对未来2周MJO活动的组合相似统计预报（7月底—8月上旬前中期，MJO位相东移至西太平洋地区，图略），结合MJO活动位相与西太平洋台风的关系，在实时逐周滚动的长期预报信息业务中提出：7月底—8月上旬前中期，MJO位相东移至西太平洋地区，有利于该地区对流异常活跃和台风发展。上述信息预判与8月3日在西北太平洋洋面上生成201211号

海葵台风的事实基本相符。上述实时业务试验结果表明，MJO对北半球台风活动的延伸期预报也有一定的应用价值。

此外，在2012年7月13日的实时延伸期预报应用中，根据上一节所述的基于MJO统计回归模型，我们给出江淮地区可能于8月上旬中后期—中旬前期出现明显降水阶段的预报，这与201211号海葵台风影响带来的降水实况（8月7—12日浙江、上海、江苏、安徽和江西出现强降水）一致，表明已建立的基于MJO的统计延伸预报方法可为台风影响强降水预报提供一定的参考。

### 3.2.3 MJO 具有的寒潮低温延伸期预报信号及应用

Jeong等<sup>[74]</sup>、Park等<sup>[75]</sup>的研究表明MJO与东亚寒潮频数显著相关。东亚寒潮常常发生在MJO位于印度洋的时候，且MJO相关的大气环流异常可使得一般寒潮加强至极端寒潮。He等<sup>[11]</sup>的最新研究发现，热带低频振荡的2个模态与我国冬季干（冷）和暖（湿）天气有显著相关，且有2候左右的预报时效，进一步指出了用MJO制作东亚冬季可能出现大范围“干冷”和“湿热”天气异常的区域。此外，国家气候中心延伸期预警预测业务<sup>[70]</sup>对冬季MJO不同位相下的气温要素进行合成，发现MJO位于2、3位相（特别是3位相）对中国大部气温负异常有预报指示意义，而在1、8位相时，则对中国大部气温正异常有预报指示意义，为我国冬季大范围低温事件的延伸期预报提供了信号。

### 3.2.4 基于 MJO 的灾害预估

美国CPC将MJO的实时预报产品应用于每周滚动的全球热带灾害预估<sup>[76]</sup>当中，根据ENSO、MJO及热

带季节内变率、与副热带环流的相互作用、数值预报、海温和土壤等下边界强迫、热带气旋发生发展统计模型,对未来2周全球热带灾害进行综合预估。内容包括:逐周降水增大或受抑制的可能区域,有利或不利于热带气旋生成的可能区域,以及预估的不确定性分析。如何综合各种统计/动力预报信息并将其转化为灾害预评估,上述基于MJO的灾害预估产品的发布为我们提供了范例。

#### 4 展望

(1) MJO为季节内尺度变化,比7~9d以下的高频天气扰动具有更长的可预报性,是改进东亚地区延伸预报的重要途径。就其预报业务应用而言,目前已在国家级、区域级和省级一些业务、研究单位进行了应用试验和研究。但目前基于MJO的业务预报内容主要为降水/气温异常、梅雨和降水阶段,随着预报研究的进一步深入,今后我国的MJO业务应用还可能包括台风、持续低温、干旱等事件及灾害预报。

(2) 就预报方法而言,当前动力模式对MJO关键区及传播等的模拟还存在一定问题,这是目前动力延伸预报方法的主要问题。目前,统计方法的预报时效多优于动力模式。但统计方法具有一定的局限性,而动力模式则存在很大的改进空间。随着动力模式在MJO多尺度结构模拟上的改进和分辨率的进一步提高,在其基础上采用多模式集成或动力与统计相结合的方法,将进一步提高降水、极端事件与高影响天气统计特征的预报能力,可成为改进季节内或延伸期预报的发展方向。此外,如何将MJO与动力模式及其他延伸预报方法(如低频天气图)相结合,值得进一步研究。

(3) 在预报机制机理方面,MJO有明显的年内变化和年际变化,在不同季节或不同ENSO背景下,其活跃程度及循环周期有所不同。MJO是热带季节内振荡(Intraseasonal Oscillation, ISO)的最显著部分,而ISO既具有多时间尺度特征(包括以10~20d和30~60d两类准周期为主的振荡),又具有全球性特征(不仅存在于热带,也出现于中高纬)。为进一步提高MJO在延伸期预报中的适用性,有必要在分析以MJO为代表的ISO多时间尺度变化的基础上,进一步研究不同时间尺度的ISO传播过程对不同时空范围的重要过程、事件及异常的影响机理,特别是MJO与中高纬环流或天气气候事件相联系的物理图像。另一方面,与MJO变率相一致的30~60d季节内振荡具有全球性,而10~30d准周期振荡也对亚洲天气气候产生重要影响,这种振荡也应考虑和应用。各种季节内振

荡如何从源地传播以及在传播过程中如何相互作用并影响季节内天气气候过程/事件的强度、持续性和范围,是值得深入研究的关键问题,这可进一步为基于MJO的延伸期预报提供合理的物理动力基础。

致谢:在本文的撰写过程中,丁一汇院士、孙国武研究员提出了诸多建议,并进行了认真细致的修改,作者在此表示由衷感谢。同时,感谢审稿专家及编辑部对本文提出宝贵建议。

#### 参考文献

- [1] Waliser D E. Predictability and forecasting// Lau W K M, Waliser D E, eds, Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System. Heidelberg: Springer-Praxis, 2005.
- [2] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40~50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 1971, 28(5):702-708.
- [3] Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40~50 day period. *J Atmos Sci*, 1972, 29(6): 1109-1123.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 孙国武, 孔春燕, 信飞, 等. 天气关键区大气低频振荡延伸期预报方法. *高原气象*, 2011, 30(3): 594-599.
- [7] 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.
- [8] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸预报. *气象*, 2010, 36(7):111-122.
- [9] 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.
- [10] 陈官军, 魏凤英, 巩远发. NCEP/CFS模式对东亚夏季延伸预报的检验评估. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 659-669.
- [11] He J H, Lin H, Wu Z W. Another look at influences of the Madden-Julian Oscillation on the wintertime East Asian weather. *J Geophys Res*, 2011, 116(2), D03109, doi:10.1029/2010JD014787.
- [12] 杨玮, 何金海, 孙国武. 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.
- [13] 钱维宏. 气候变化与中国极端气候事件图集. 北京: 气象出版社, 2011.
- [14] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸预报试验. *大气科学*, 2012, 36(1):102-116.
- [15] 梁萍, 丁一汇. 东亚梅雨季节内振荡的气候特征. *气象学报*, 2012, 70(3): 418-435.
- [16] 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.
- [17] <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/mjo.shtml>
- [18] <http://cawcr.gov.au/staff/mwheeler/maproom/RMM/>
- [19] Wheeler M, 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.
- [20] Maharaj E A, Wheeler M. Forecasting an index of the Madden-Oscillation. *Int J Climatol*, 2005, 25: 1611-1618.
- [21] Jiang X N, Waliser D E, Wheeler M C, et al. Assessing the skill of an all-season statistical forecast model for the Madden-Julian Oscillation. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(6): 1940-1956.
- [22] Jones C, Carvalho L M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. *J Climate*, 2004, 17(11): 2078-2095.
- [23] 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.
- [24] Peng P, van den Dool H. Forecast tropical sub-seasonal variability with the constructed analog method. *American Geophysical*

- Union, Fall Meeting 2007, abstract #A41B-04.
- [25] Kang I S, Kim H M. Intraseasonal prediction and predictability for boreal winter. The Global Monsoon System: Research and Forecast, Chang C P et al., Eds, World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, Vol 5. Singapore: World Scientific, 2011.
- [26] Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. The NCEP climate forecast system. *J Climate*, 2006, 19(15): 3483-3517.
- [27] [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/CLIVAR/clivar\\_wh.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/CLIVAR/clivar_wh.shtml)
- [28] Lin H, Brunet G, Derome J. Forecast skill of the Madden-Julian Oscillation in two Canadian atmospheric models. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(11): 4130-4149.
- [29] Knutson T, Weickmann K. 30-60 day atmospheric oscillations: Composite life cycles of convection and circulation anomalies. *Mon Wea Rev*, 1987, 115(7): 1407-1436.
- [30] Rui H, Wang B. Development characteristics and dynamic structure of tropical intraseasonal convection anomalies. *J Atmos Sci*, 1990, 47(3): 357-379.
- [31] Kayano M, Kousky V. Intraseasonal (30-60 day) variability in the global tropics: Principal modes and their evolution. *Tellus*, 1999, 51: 373-386.
- [32] Gray W M. Hurricanes: Their formation, structure, and likely role in the tropical circulation. *Meteorology over the Tropical Oceans*, 1979, 155-218.
- [33] Liebmann B, Hendon H H, Glick J D. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian Oscillation. *J Meteor Soc Japan*, 1994, 72(3): 401-412.
- [34] Maloney E D, Hartmann D L. Modulation of eastern North Pacific hurricanes by the Madden-Julian Oscillation. *J Climate*, 2000, 13(9): 1451-1465.
- [35] 张庆云, 彭京备. 夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响. *大气科学*, 2003, 27(1): 97-106.
- [36] Bessafi M, Wheeler M C. Modulation of south Indian Ocean tropical cyclones by the Madden-Julian oscillation and convectively coupled equatorial waves. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(2): 638-656.
- [37] 李崇银, 潘静, 田华, 等. 西北太平洋台风活动与大气季节内振荡. *气象*, 2012, 38(1): 1-16.
- [38] 王斌. 认识和预报亚洲季风气候: 前沿突破点和展望. *气象学报*, 2008, 66(5): 653-669.
- [39] Waliser D E. Intraseasonal variability. // Wang B, eds. *The Asian Monsoon*. New York: Springer/Praxis Publishing Ltd, 2006.
- [40] Krishnamurti I N, Subrahmanyam D. 1982. The 30-50 day mode at 850mb during MONEX. *J Atmos Sci*, 1982, 39(9): 2088-2095.
- [41] 李崇银. 大气中的季节内振荡. *大气科学*, 1990, 14(1): 32-45.
- [42] 李崇银, 龙振夏, 穆明权. 大气季节内振荡及其重要作用. *大气科学*, 2003, 27(4): 518-533.
- [43] Chen L X, Zhu C W, Wang W, et al. Analysis of characteristics of 30-60 day low frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(4): 623-638.
- [44] 陈隆勋, 高辉, 何金海, 等. 夏季东亚和印度热带季风环流系统动能和对流扰动的纬向传播特征. *中国科学(D辑):地球科学*, 2004, 34(2): 171-179.
- [45] 朱乾根, 何金海. 亚洲季风建立及其中期振荡的高空环流特征. *热带气象学报*, 1985, 1(1): 9-18.
- [46] 何金海, 智协飞, Nakazawa T. 中国东部地区降水季内变化的季节锁相. *热带气象学报*, 1995, 11(4): 370-374.
- [47] 据建华, 赵尔旭. 东亚夏季风区的低频振荡对长江中下游旱涝的影响. *热带气象学报*, 2005, 21(2): 163-171.
- [48] 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.
- [49] Krishnamurthy V, Shukla J. Seasonal persistence and propagation of intraseasonal patterns over the Indian monsoon region. *Climate Dynamics*, 2008, 30(4): 353-369.
- [50] Zhang L N, Wang B, Zeng Q C. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in southeast China. *J Climate*, 2009, 22: 201-215.
- [51] 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.
- [52] Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(3): 521-533.
- [53] Mo K C, Higgins R W. Tropical convection and precipitation regimes in the western United States. *J Climate*, 1998, 11(9): 2404-2423.
- [54] Higgins W, Schemm J, Shi W, et al. Extreme precipitation events in the western United States related to tropical forcing. *J Climate*, 2000, 13(5): 793-820.
- [55] Vecchi G. A, Bond N A. The Madden-Julian Oscillation (MJO) and northern high latitude wintertime surface air temperatures. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L04104, doi:10.1029/2003GL018645.
- [56] Donald A, Meinke H, Power B, et al. Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation on rainfall. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L09704, doi:10.1029/2005GL025155.
- [57] Lin H, Brunet G. The influence of the Madden-Julian oscillation on Canadian wintertime surface air temperature. *Mon Wea Rev*, 2009, 137(7): 2250-2262.
- [58] Lin H, Brunet G, Mo R. Impact of the Madden-Julian Oscillation on wintertime precipitation in Canada. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(10), 3822-3839.
- [59] Jones C, Waliser D E, Schemm J K, et al. Prediction skill of the Madden and Julian oscillation in dynamical extended range forecasts. *Climate Dyn*, 2000, 16: 273-289.
- [60] 吕俊梅, 据建华, 任菊章, 等. 热带大气MJO活动异常对2009—2010年云南极端干旱的影响. *中国科学(D辑):地球科学*, 2012, 42(4): 599-613.
- [61] 何金海, 宇婧婧, 沈新勇, 等. 有关东亚季风的形成及其变率的研究. *热带气象学报*, 2004, 20(5): 449-459.
- [62] 丁一汇, 刘芸芸. 亚洲-太平洋季风区的遥相关研究. *气象学报*, 2008, 66(5): 670-682.
- [63] 张瑛, 陈隆勋, 何金海, 等. 1998年夏季亚洲地区低频大气环流的特征及其与长江中下游降水的关系. *气象学报*, 2009, 66(4): 577-591.
- [64] 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.
- [65] 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. 延伸期(月内)过程预报研讨会, 上海, 2010.
- [66] [http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/Monitoring/moni\\_mjo.php](http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/Monitoring/moni_mjo.php)
- [67] Anderson J R, Rosen R D. The latitude-height structure of 40-50 day variation in atmospheric angular momentum. *J Atmos Sci*, 1983, 40(6): 1584-1591.
- [68] Krishnamurti T N. Summer monsoon experiment, a review. *Mon Wea Rev*, 1985, 112(9): 1590-1626.
- [69] 谢义炳, 陈受钧, 张一良, 等. 东南亚基本气流与台风发生的一些事实的统计分析. *气象学报*, 1963, 33(2): 200-217.
- [70] 丁一汇, 范惠君, 薛秋芳, 等. 热带辐合区中多台风同时发展的初步研究. *大气科学*, 1977, 2(2): 89-98.
- [71] Harr P A. Monsoon impacts on tropical variability. The 3rd International Workshop on Monsoon (IWM- ): ( )The Reviews on the Current State of Research/Forecasting of Monsoon. World Meteorological Organization (WMO), WMO Tropical Meteorology Research Program (TMRP) Commission for Atmospheric (CAS), 2004, 11: 255-287.
- [72] <http://www.meteo.nc/espro/previcycl/cyclA.php>
- [73] Leroy A, Wheeler M C. Statistical prediction of weekly tropical cyclone activity in the Southern hemisphere. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(11): 4130-4149.
- [74] Jeong J H, Ho C H, Kim B M, et al. Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia. *J Geophys Res*, 2005, 110, D11104, doi: 10.1029/2004JD005408.
- [75] Park T W, Ho C H, Yang S, et al. Influences of Arctic Oscillation and Madden-Julian Oscillation on cold surges and heavy snowfalls over Korea: A case study for the winter of 2009-2010. *J Geophys Res*, 2010, 115, D23122, doi: 10.1029/2010JD014794.
- [76] <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/ghazards/index.php>