

张耀华,周兵,张耀存. 2010 年南方持续暴雨期大气环流异常及其低频特征研究 [J]. 气象,2012,38(11):1367-1377.

# 2010 年南方持续暴雨期大气环流异常 及其低频特征研究<sup>\*1</sup>

张耀华<sup>1,2</sup> 周 兵<sup>2</sup> 张耀存<sup>1</sup>

1 南京大学大气科学学院,南京 210093

2 国家气候中心,北京 100081

**提 要:** 利用 NCEP/NCAR 逐日再分析资料以及国家气候中心台站降水资料等,应用多变量经验正交函数展开(MV-EOF)等方法,对 2010 年南方持续暴雨期大气环流异常及其低频特征进行了分析。结果表明:2010 年东亚夏季风异常偏弱、西太平洋副热带高压位置异常偏南、三次季风涌的出现和高空急流与散度场活动异常及其相互配合,是南方降水异常的主要影响系统;对风场和降水场 MV-EOF 空间型分布的分析显示,低频降水中心与 200 hPa 的气流辐散中心和 850 hPa 辐合中心相关联;降水的第一模态反映了东亚夏季风的气候态演变,第二、三模态反映了夏季风在季节性推进过程中不同尺度的低频振荡,7 月前半月和 6 月中下旬,第二、三模态分别处于低频振荡的正位相,使长江中下游梅雨和华南前汛期延迟结束,并且增强了江南的梅雨降水,夏季风的气候态演变和低频振荡相叠加导致 2010 年我国南方暴雨频发。

**关键词:** 持续暴雨, 环流异常, 低频振荡, MV-EOF

## Abnormality of General Circulation with LFO During the Torrential Rainstorms over Southern China in 2010

ZHANG Yaohua<sup>1,2</sup> ZHOU Bing<sup>2</sup> ZHANG Yaocun<sup>1</sup>

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

2 National Climate Centre, Beijing 100081

**Abstract:** By using NCEP/NCAR daily reanalysis data and NCC station precipitation data, the authors analyze the abnormality of general circulation with LFO during the torrential rainstorms over southern China in 2010 with the application of multivariate empirical orthogonal function (MV-EOF). Results show that: the East Asian summer monsoon to be exceptionally weak, the West Pacific subtropical anticyclone to be exceptionally southerly, the emergence of three monsoon surges, the abnormal activities of upper level westerly jet and divergence field and their interactions with one another, are the main affecting systems of precipitation abnormality over southern China in 2010. To the MV-EOF spatial distributions of wind and precipitation fields, the centers of low-frequency precipitation always correspond to those of 200 hPa flow divergence and 850 hPa convergence. The first MV-EOF mode of precipitation field reflects the climatic evolution of East Asian summer monsoon, while the second and third modes reflect the LFOs on different time scales of summer monsoon during the seasonal advancing process. The second mode is in positive phase of LFO during the first half of July while the third mode during the middle and later part of June, so that the ends of Jiang-huai Meiyu season and early flood season of southern China are put off and Meiyu precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River is enhanced. The climatic evolution of summer monsoon coincided

\* 国家科技支撑计划项目(2009BAC51B05)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006019,GYHY200806004)共同资助  
2011 年 10 月 20 日收稿; 2012 年 7 月 30 日收修定稿  
第一作者:张耀华,主要从事东亚季风气候研究.Email:zhangyh41@sina.com

with LFO ultimately leads to the frequent rainstorms over southern China in 2010.

**Key words:** torrential rainstorms, abnormality of circulation, low-frequency oscillation (LFO), MV-EOF (multivariate empirical orthogonal function)

## 引 言

我国南方季风区尤其是长江中下游地区梅雨期降水与东亚季风活动直接相关,夏季降水具有显著的 30 d 和准 2 周低频振荡特征<sup>[1-5]</sup>。涝年准 2 周振荡十分活跃,低频降水阶段常表现为区域性暴雨和暴雨群等形式,低频振荡与季节变化的相互作用对于我国东部地区夏季风向北推进的阶段性的有着重要作用,这一特征也为降水中长期预报提供了一条思路<sup>[6]</sup>。

暴雨的发生发展有其特殊的环流条件,已有的研究表明对流层高层的辐散是对流层低层的辐合、低空急流以及暴雨发生发展的先决条件<sup>[7-8]</sup>,而大气低频振荡对暴雨期持续异常环流的形成和维持具有十分重要的作用。涝年的低频环流明显强于早年,而这种低频环流场的差异正是造成涝年低频降水强于早年的一个重要原因<sup>[9]</sup>。分析 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡关系时发现,我国东部夏季降水与低频振荡现象有密切关系<sup>[10]</sup>。东亚大气环流异常主要表现在中纬度出现异常阻塞高压,此时西太平洋副热带高压(简称副高)和高空西风急流位置持续偏南,伴随有来自我国南方明显的季风涌<sup>[11-14]</sup>,可见东亚夏季风异常与季风区暴雨有密切的关系。

2010 年 5—7 月我国南方暴雨频发,江南和华南地区出现了数次连续的强降水过程,引发了严重的洪涝灾害,降水具有明显的阶段性特征。本文将着重分析 2010 年南方持续暴雨期大气环流的异常特征,讨论东亚夏季风的气候态演变及其低频振荡对持续暴雨期的作用和影响。

## 1 资料和方法

本文选用资料包括:(1) 国家气候中心提供的 2010 年 5—7 月 CCOS(中国气候观测系统)逐日降水量资料;(2) NCEP/NCAR-1 逐日再分析数据资料集,包括纬向风、经向风、气温、比湿和位势高度场等要素;(3) 国家卫星气象中心提供的同期 FY2D-TBB 资料。

主要采用了 MV-EOF<sup>[15]</sup>、Butterworth 带通滤波和合成分析等方法。其中,MV-EOF 是多变量经验正交函数展开,该方法可以得到具有同一时间系数的不同变量场的空间型分布,适用于研究不同变量场随时间演变的相互作用。

## 2 2010 年南方降水实况

2010 年 5—7 月 14 次强降水轮番袭击南方,汛情严重<sup>[16]</sup>。南海夏季风于 5 月第 5 候爆发后,我国南方地区先后经历了 9 次暴雨过程(表 1),持续时间均在 3 d 及以上,单站的最大日降水量在 180 mm 以上,6 月 19 日进贤站的降水量达到 329.0 mm,对流活动中心 TBB 值在 212 K 及以下,最低可达 196 K,主要影响系统包括高空槽、高原槽、低涡、西南涡和东北冷涡等。

图 1 逐一给出了 9 次暴雨过程累计雨量的空间分布,可以清楚地看到,强降水有 1 个或多个中心,过程最大降水量在 50~200 mm 以上不等。随着东亚夏季风的季节性推进,暴雨过程在空间分布上逐渐向北移动,主要影响系统中的西南涡转换成东北冷涡。

表 1 2010 年我国南方的 9 次暴雨过程

Table 1 Nine rainstorms over southern China in 2010

编号	过程日期	主要影响系统	最大日降水量/mm	TBB 中心强度/K
a	5 月 26—29 日	低涡、西南涡、高空槽	182.8(电白)	204
b	5 月 31 日至 6 月 3 日	高原槽、西南涡	300.4(来宾)	208
c	6 月 7—10 日	高空槽、高原槽、西南涡	283.3(东兴)	204
d	6 月 13—16 日	华北低涡、高空槽	327.0(龙门)	208
e	6 月 18—22 日	西南涡、高空槽	329.0(进贤)	196
f	6 月 23—26 日	西南涡、低涡、高空槽	275.8(上川岛)	196
g	6 月 27—29 日	低涡、高空槽	192.9(凌云)	212
h	7 月 3—7 日	低涡、东北冷涡、高空槽	182.0(固始)	208
i	7 月 8—15 日	低涡、高空槽、东北冷涡	287.2(英山)	208

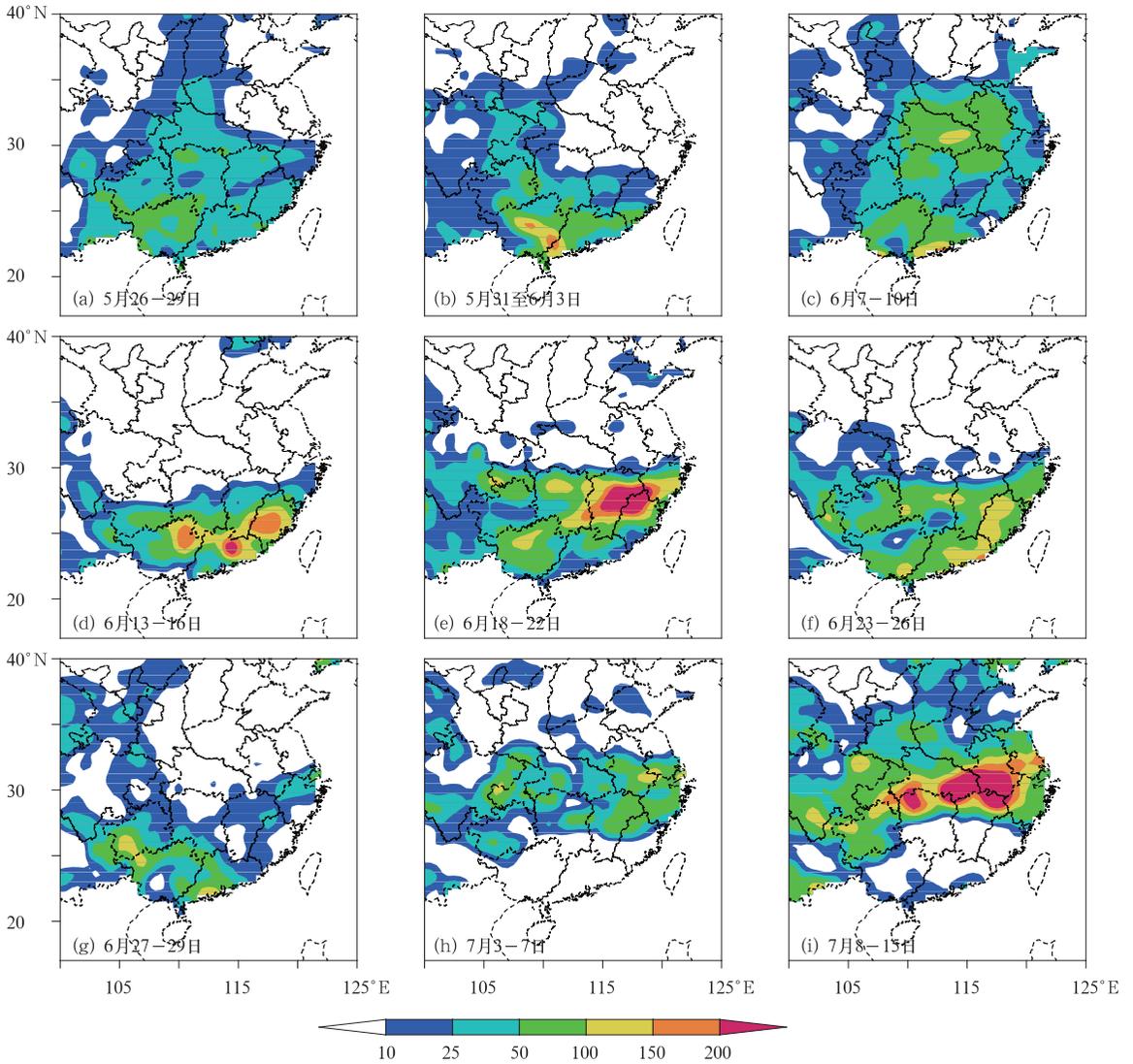


图 1 9 次暴雨过程累计雨量的空间分布(单位:mm)

Fig. 1 Spatial distributions of accumulated precipitation for 9 rainstorms (unit:mm)

结合表 1 和图 1 可以发现,在 5 月底至 6 月初,我国南方地区出现一次较短的连续强降水时段,包含 a、b 两次暴雨过程,降水中心主要位于华南地区;在 6 月中下旬,出现一次较长的连续强降水时段,包含 d、e、f、g 四次暴雨过程,降水中心北移至东南和江南地区;7 月前半月,又出现一次较长的连续强降水时段,包含 h、i 两次暴雨过程,降水中心继续向北移动,位于长江中下游地区。

### 3 大气环流的异常特征分析

2010 年 5 月 26 日至 7 月 15 日之间,我国南方出现三次连续强降水时段,而导致异常降水的根本原因是受到大尺度环流乃至行星尺度环流异常的制

约。大气环流主要有 4 个明显的异常特征。

首先,2010 年东亚夏季风异常偏弱。夏季我国南方的天气气候状况主要受东亚夏季风环流制约,降水多寡与夏季风环流强弱密切相关。图 2a 和 2b 分别是南海夏季风强度指数<sup>[17]</sup>和副热带夏季风强度指数<sup>[18]</sup>,当指数为正(负)时表明夏季风强度偏强(弱),可以看出,夏季风强度指数有显著的年际变化。

李崇银等<sup>[19]</sup>发现,在弱南海夏季风年,我国东部汛期降水量在江淮偏多,反之亦然。由图 2a 可见,2010 年南海夏季风强度指数为 50 年以来最低值,南海夏季风异常偏弱,我国长江中下游地区降水偏多。张庆云等<sup>[18]</sup>定义的副热带季风的强弱能较好地反映我国夏季雨带的位置变化,副热带季风越

弱,表征西太平洋副热带高压位置偏南,东亚梅雨锋强度较强,长江流域梅雨锋降水比常年偏多,反之亦然。由图 2b 可见,副热带夏季风强度指数在 2010 年为显著的负值,副热带夏季风异常偏弱,我国长江中游及江南降水偏多。

大气环流的第二个异常特征是发生在三次夏季风连续强降水时段伴随大气低频活动而产生的季风涌( $\theta_{se}$ 和偏南风加强)。丁一汇<sup>[10]</sup>结合  $\theta_{se}$ 和经向风来描述季风涌的活动,850 hPa 经向风和  $\theta_{se}$ 沿  $115^{\circ} \sim 120^{\circ}E$  平均的时间演变特征(图 3)显示:在 6 月中

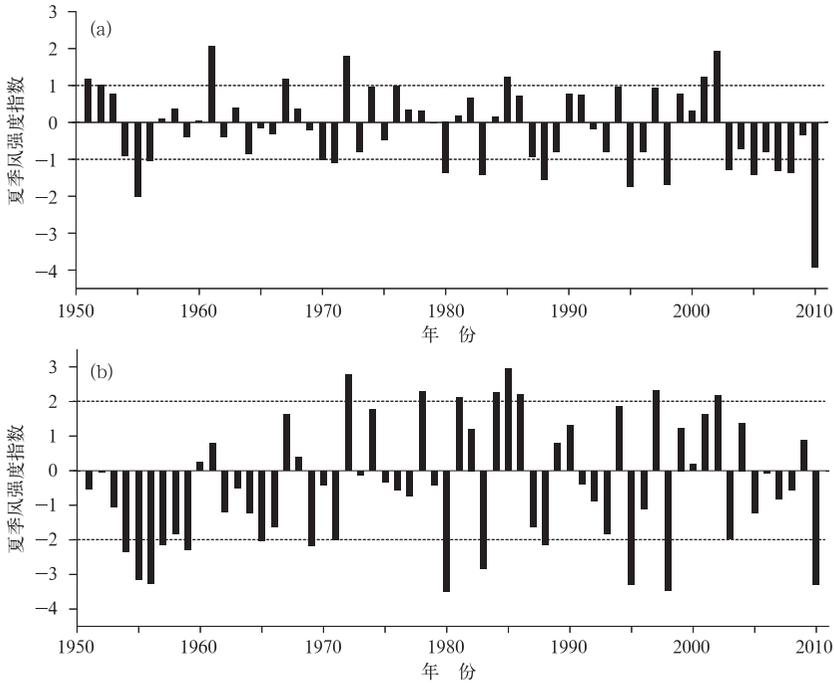


图 2 1951—2010 年南海夏季风强度指数(a)和副热带夏季风强度指数(b)(来源:NCC 季风监测)

Fig. 2 Annual series of South China Sea monsoon index (a) and subtropical monsoon index (b) from 1951 to 2010 (source: NCC monsoon monitoring)

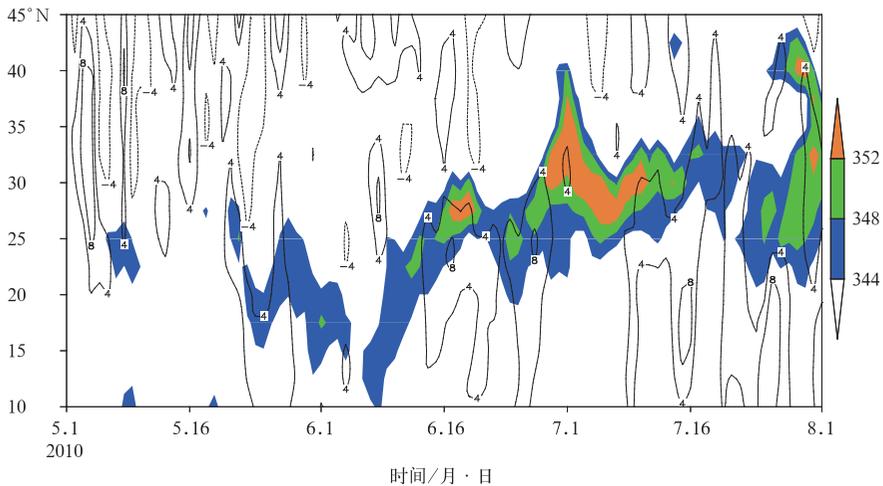


图 3 850 hPa 经向风(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )和  $\theta_{se}$ (阴影区,单位:K)沿  $115^{\circ} \sim 120^{\circ}E$  平均的时间-经向剖面图

Fig. 3 Time-latitude section of 850 hPa mean meridional wind (unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) and  $\theta_{se}$  (shaded areas, unit: K) along  $115^{\circ} - 120^{\circ}E$  during May to July 2010

下旬,344 K 的  $\theta_{sc}$  前沿区向北推进到江南一带,经向风速随之增大,超过  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在个别日期达到  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,同时有来自北方的冷空气向南侵袭;7 月前半月长江中下游又处于高温高湿区,偏南风得到加强。在 5 月底至 6 月初,前汛期同样出现  $\theta_{sc}$  和偏南风加强过程,344 K 的  $\theta_{sc}$  前沿区到达华南地区,但强度较弱,季风涌持续时间较短。

大气环流的第三个异常特征是西太平洋副热带高压活动异常,  $110^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$  平均副高脊线较气候平均位置总体偏南,且南北摆动较大(图 4)。王晓芳等<sup>[20]</sup>分析了 2010 年 5—6 月南方持续性暴雨的成因,指出副热带高压位置稳定偏南,为华南持续暴雨天气建立了有利的稳定大尺度环流背景。5 月副高脊线在  $10^{\circ} \sim 15^{\circ} \text{N}$  附近围绕气候平均位置振荡,振幅约 5 个纬度,华南前汛期维持。自 5 月底到 6 月初副高脊线持续向北推进,在 6 月中旬越过  $20^{\circ} \text{N}$  后又突然南撤到达  $15^{\circ} \text{N}$ ,直到 6 月底才稳定在  $20^{\circ} \text{N}$  以北。7 月前半月副高脊线维持在  $23^{\circ} \text{N}$  附近,7 月 15 日左右开始,副热带高压明显加强北进,其脊线位置约在  $25^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$  之间,使得长江中下游地区梅雨降水停止。对于三次夏季风连续强降水时段,5 月底至 6 月初和 7 月前半月,副高脊线相对气候平均位置阶段性偏南分别约 4 个和 2 个纬度,6 月中下旬,副高脊线相对气候平均位置由正距平转为持续异常的负距平,出现一次突然南撤过程,这是导致华南前汛期延续和江南梅雨降水增强的重要环流形势。

高空急流与散度场的活动异常是大气环流的第四个异常特征。徐海明等<sup>[21]</sup>对 1983—1991 年发生在长江中游的 8 次大暴雨过程的合成分析清楚地表明,在大暴雨发生前,高空急流轴出口处右侧存在强辐散并配合有较强的上升运动出现,大暴雨将发生在高空急流轴出口处右侧强辐散区的下方。200 hPa 气候距平风场和散度场沿  $110^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$  平均的时间演变特征(图 5)显示:在三次夏季风连续强降水时段,特别是在 6 月中下旬,我国南方出现了明显的高空辐散区,辐散中心基本位于降水中心上空,并且在辐散区的北部伴随有偏西风距平,最大偏西风距平所在纬度对应着西风急流轴的位置。在 5—7 月间,随着高空西风急流轴和辐散区位置的北移,降水中心也逐渐北移。

## 4 风场和降水场的 MV-EOF 分解

### 4.1 MV-EOF 结果分析

对 2010 年 5—7 月距平化的 200、850 hPa 风场  $U$ 、 $V$  分量和距平化的降水场进行 MV-EOF 分解,其特征值和方差分布见表 2,前 6 个特征值的累计方差接近 50%,其中第一个达到 17.5%,说明风场和降水场的空间分布形式比较集中。

MV-EOF 分解第一模态(图 6)的降水场上,东南地区为降水变化的显著正值区,正值中心位于广东

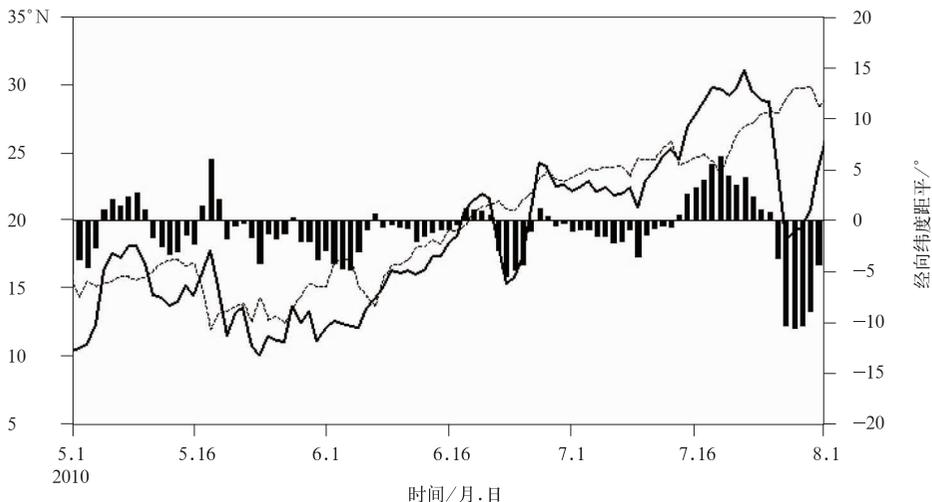


图 4 2010 年 5—7 月副高脊线  $110^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$  平均(实线)和气候平均(虚线)位置及其距平(直方图)

Fig. 4 The mean location ( $110^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$ ) of subtropical high ridge line (solid line) and climatic value (dashed line) as well as the anomaly (histogram) during May to July 2010

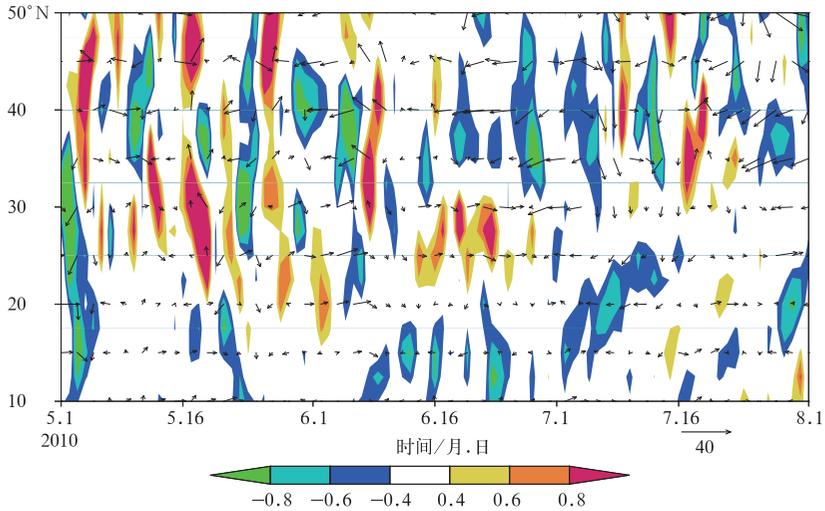


图 5 2010 年 5—7 月 200 hPa 距平风场(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )和散度场(阴影区,单位:  $10^{-6} s^{-1}$ )沿  $110^{\circ} \sim 120^{\circ}E$  平均的时间-经向剖面图

Fig. 5 Time-latitude section of 200 hPa mean wind (unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) and divergence (shaded, unit:  $10^{-6} s^{-1}$ ) anomaly fields along  $110^{\circ} \sim 120^{\circ}E$  during May to July 2010

表 2 风场和降水场 MV-EOF 分解前 6 个特征值的大小和方差及累计方差贡献  
Table 2 Magnitudes of the first 6 eignvalues in MV-EOF analysis of wind and precipitation fields and contributions by variance and accumulated variance

序号	特征值	方差/%	累积方差/%	序号	特征值	方差/%	累积方差/%
1	4216731	17.5	17.5	4	1215688	5.0	36.4
2	1735361	7.2	24.7	5	1078658	4.5	40.8
3	1597336	6.6	31.3	6	978055	4.1	44.9

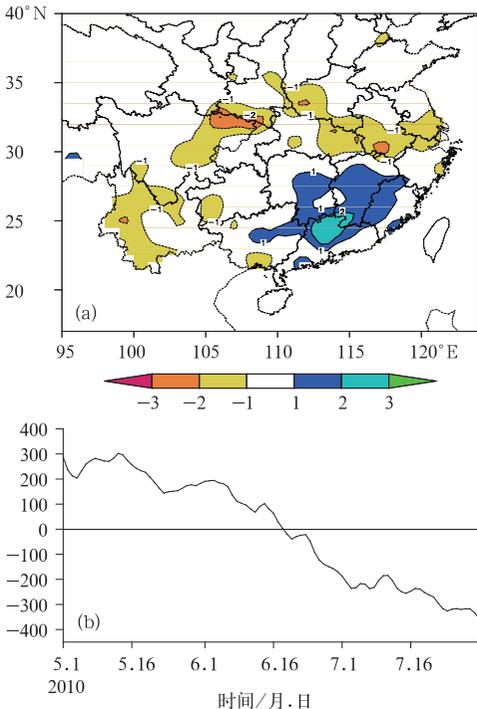


图 6 MV-EOF 分解第一模态的降水场(a)和时间系数(b)(降水场系数放大了 100 倍)  
Fig. 6 Precipitation field (a) and time coefficient (b) of first MV-EOF mode

北部,同时长江流域和江淮地区为显著负值区,负值中心主要位于四川东北部。第一模态的时间系数在 5—7 月持续下降,并且在 6 月中、下旬由正转负。

MV-EOF 分解第一模态反映了东亚夏季风的气候态演变。在气候平均状况下,每年 6 月以前,副高脊线位于  $20^{\circ}N$  以南,高压北缘是沿副高脊线北上的暖湿气流与中纬度南下的冷空气相交汇地区,锋面、气旋活动频繁,形成大范围阴雨天气,受其影响华南进入前汛期;到 6 月中、下旬,副高脊线北跳,并稳定在  $20^{\circ} \sim 25^{\circ}N$  之间,雨带随之北移,长江中下游地区进入雨季,即梅雨;7 月上、中旬,副高脊线再次北跳,摆动在  $25^{\circ} \sim 30^{\circ}N$ ,这时黄河下游地区进入雨季,长江中下游地区的梅雨结束,进入盛夏。第一模态的时间系数在 5—7 月间持续下降,反映了东亚夏季风环流和雨带的季节性推进,在 6 月中、下旬由正转负,对应着副高脊线的第一次北跳和雨带的北移,华南前汛期基本结束,长江中下游梅雨开始。

MV-EOF 分解第二模态空间型分布的降水场上(图 7a),长江中下游和江淮地区为降水变化的显著正值区,正值中心位于湖北、安徽和江西三省交界处,华南和东南沿海地区为显著负值区。200 hPa

高度上(图 7c),中国东部地区出现一个闭合的反气旋性环流,在其北部的江淮和华北地区位于高空西风急流轴的右侧,出现显著的正散度距平,在其东南

部的南方沿海和西太平洋地区风速呈气旋性切变,出现显著的负散度距平;850 hPa 高度上(图 7e),江淮地区出现显著的负散度距平,华南沿海出现显著

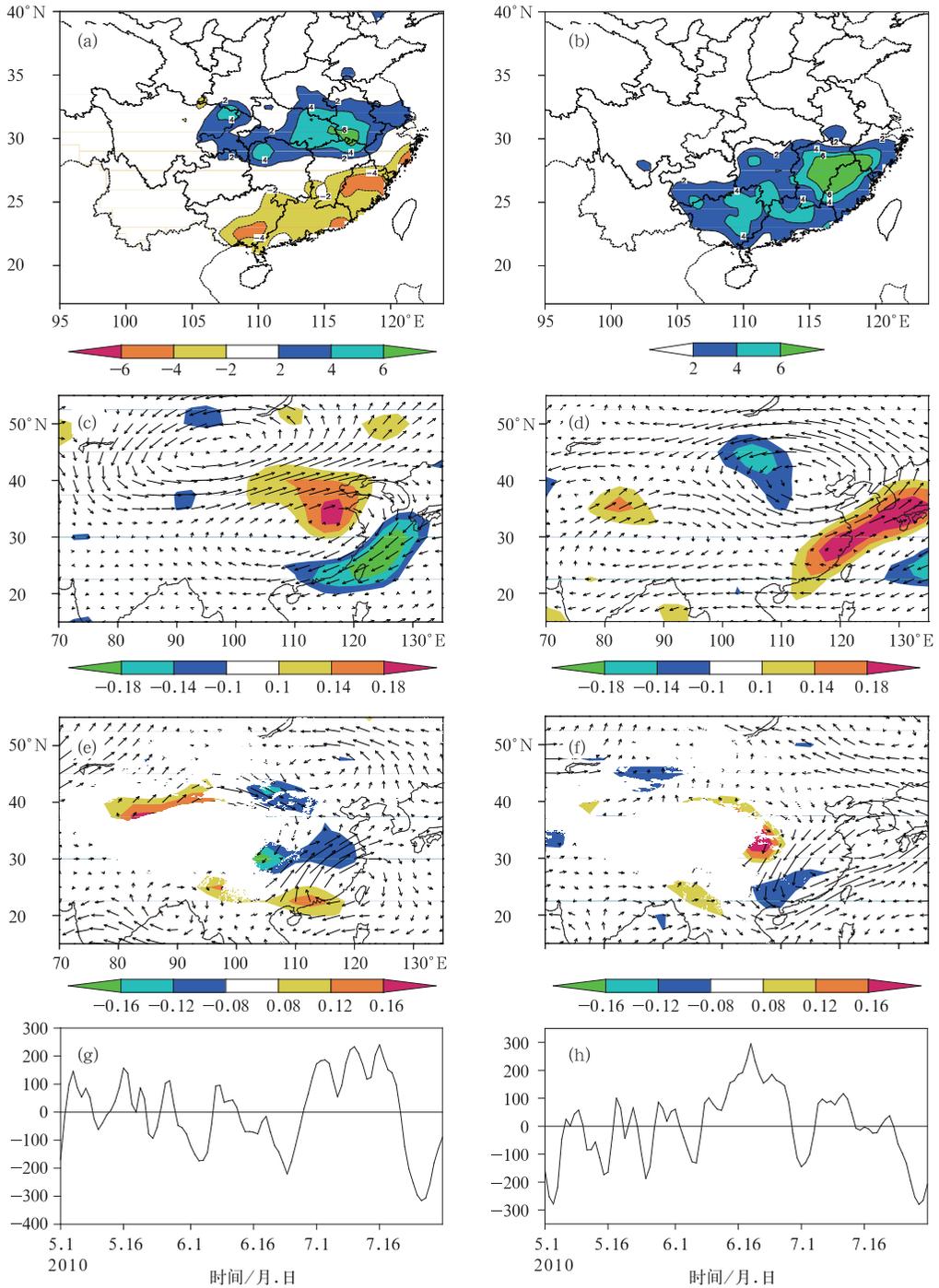


图 7 MV-EOF 分解第二、三模态:(a,b)为空间型分布的降水场,(c,d)为 200 hPa 风场和散度场,(e,f)为 850 hPa 风场和散度场,(g,h)为时间系数(空间型分布系数放大了 100 倍)

Fig. 7 Second and third MV-EOF modes:(a) and (b) denote precipitation field of spatial distribution;(c) and (d) denote 200 hPa wind and divergence fields;(e) and (f) denote 850 hPa wind and divergence fields;(g) and (h) denote time coefficient (magnified by 100)

的正散度距平;这种高低空的环流配置在扰动发生时,容易形成低层辐合上升、高层辐散的垂直环流圈,进而在长江中下游和江淮地区引起降水。第二模态的时间系数(图 7g)表现出明显的低频振荡特征,并且在 7 月前半月处于显著的正位相。

MV-EOF 分解第三模态的降水场上(图 7b),整个长江以南地区均为降水变化的显著正值区,正值中心位于江西、浙江、福建三省交界处,没有显著负值区出现;200、850 hPa 风场和散度场(图 7d, f)具有与第二模态类似的特征,低频降水中心始终与 200 hPa 的气流辐散中心和 850 hPa 的辐合中心相关联。第三模态的时间系数(图 7h)也表现出明显的低频振荡特征,并且在 6 月中下旬处于显著的正位相。

MV-EOF 分解第二、三模态反映了东亚夏季风在季节性推进过程中不同尺度的低频振荡。据建华等<sup>[22]</sup>的研究指出,1998 年我国长江中下游地区出现了二度梅现象,两个梅雨阶段正好对应着东亚夏季风低频振荡(30~60 d)的两个最强的峰值,这两段

时间也正是东亚季风在副热带地区最活跃的两段时间。与之相似,2010 年 5 月底至 6 月初的连续性强降雨时段之后,由于 MV-EOF 分解第三模态在 6 月中下旬处于低频振荡的正位相,整个长江以南地区处于低频强降雨期,华南前汛期没有结束,出现了新一轮的连续强降雨过程,同期江南的梅雨降水也得到增强。7 月前半月,由于 MV-EOF 分解第二模态处于低频振荡的正位相,长江中下游和江淮地区处于低频强降雨期,梅雨延迟到 7 月中旬之后结束,出现第三次连续强降雨时段。

综上,东亚夏季风的气候态演变与低频振荡相叠加导致 2010 年我国南方暴雨频发。

## 4.2 大气环流异常变化特征

6 月中下旬,副高脊线相对气候平均位置由正距平转为持续异常的负距平,出现一次突然南撤过程,对应第三模态低频降水持续的时段。6 月底,副高脊线迅速北进,稳定地跃过 20°N,低频降水由第三模态转换为第二模态。图 8 是两个低频降水时段

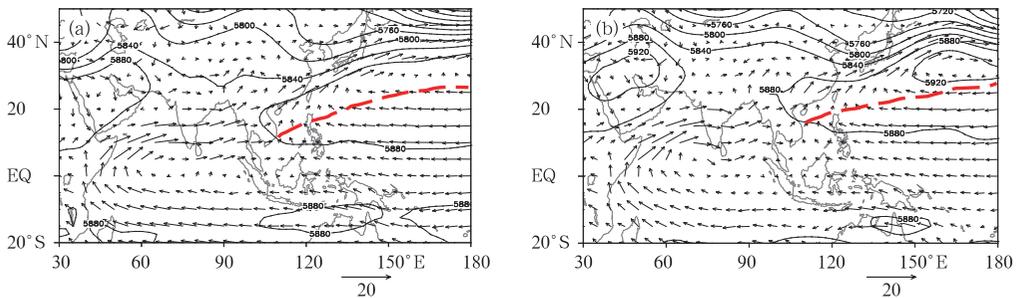


图 8 2010 年 6 月中下旬(a)、7 月前半月(b)平均 850 hPa 风场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:gpm;虚线表示副高脊线)

Fig. 8 The 850 hPa mean wind field(vector, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and 500 hPa mean geopotential height field (contour, unit: gpm) during the middle and later part of June (a) and the first half of July (b), 2010 (The dashed line denotes subtropical high ridge line)

大气环流的主要异常变化。

图 8a 中 500 hPa 上,表征副高主体的 5880 线西伸脊点位于中南半岛东部,副高西北侧的夏季风雨带位于我国南方地区。850 hPa 上,索马里附近的越赤道气流强盛,它先汇入孟加拉湾地区的季风气流中,在中南半岛与副高西北侧的西南暖湿气流汇合,向东北方向输送,进入我国南方地区,为该阶段的持续暴雨提供了充沛的水汽供应。图 8b 中 500 hPa 上,副高明显西伸北进,西伸脊点位于我国

西南地区,华南地区为副高主体控制。850 hPa 上,孟加拉湾西南气流受副高影响,一部分向东越过中南半岛,汇入南海的偏南风气流中。该阶段副高西北侧的西南风水汽输送相对比较强盛,是长江中下游地区持续性暴雨的主要水汽和能量来源。

## 5 夏季风环流的低频变化

MV-EOF 分解第二模态降水变化的显著正值

区位于 30°N 附近的长江中下游和江淮地区,时间系数表现出明显的低频振荡特征,下面我们来分析同期该区域对流层高、低层夏季风环流的低频变化。

由图 9a 和 9b 可以看出,6 月中旬之前,200 hPa 纬向风和散度的低频分量自西向东传播,太平洋上空成为低频汇,6 月中旬之后,低频分量改为自

东向西传播,太平洋上空成为低频源。6 月中旬前后低频纬向风和散度沿相反方向传播,反映了东亚夏季风环流的季节性调整。6 月中旬之前,西太平洋副热带高压脊线位于 20°N 以南,沿副高脊线北上到达 30°N 附近的暖湿气流相对较弱,东亚的天气气候形势主要受中高纬度冷空气活动的影响,我

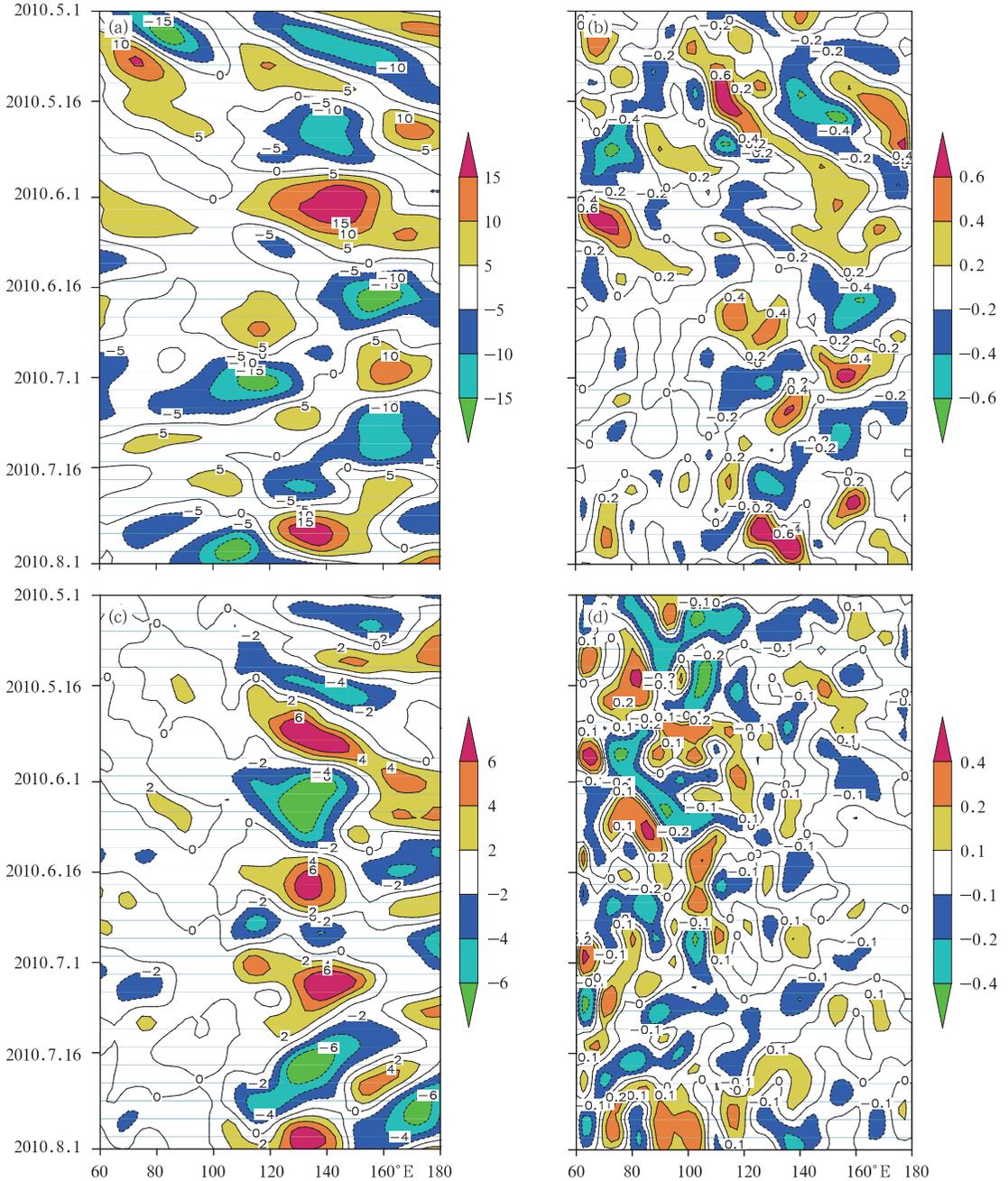


图 9 2010 年 5—7 月 200 hPa 纬向风(a)和散度(b)、850 hPa 纬向风(c)和散度(d)沿 27.5°~32.5°N 平均 10~60 天滤波分量的纬向-时间剖面图

Fig. 9 The longitude-time section of 10-60 d filtered components of mean 200 hPa zonal wind and divergence (a,b) as well as 850 hPa zonal wind and divergence (c,d) along 27.5°-32.5°N from May to July in 2010

国东部地区以副热带降水为主,冷空气的活动主要由高空西风带驱动,纬向风和散度的低频分量也呈现自西向东的传播特征;6月中、下旬,副高脊线北跳,并稳定在 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间,雨带随之北移,长江中下游地区梅雨开始,此后东亚的天气气候形势主要受夏季风环流形势的影响,来自热带太平洋上空的暖湿气流沿副高西南侧北上西进,使得纬向风和散度的低频分量也呈现自东向西的传播特征。占瑞芬等<sup>[23]</sup>的研究也指出,西太平洋暖池附近的对流扰动激发出不同形式的低频环流,在 Rossby 波和环境流的共同作用下向西北方向移动,使得副热带夏季风降水达到峰值或谷值。中国东部副热带夏季风降水的准双周振荡与西太平洋对流扰动及其激发的低层低频环流有密切关系。

结合同期 850 hPa 纬向风的低频演变(图 9c)可以看出,6月中旬之前,纬向风低频分量在对流层高、低层的分布基本相反,说明在冷空气活跃的时期大气斜压性比较显著;6月中旬之后,纬向风低频分量在对流层高、低层的分布基本一致,说明夏季风降水尤其是长江中下游地区梅雨期降水主要由强暖湿气流和弱冷空气相互作用而产生,大气基本呈现正压性。

尹洁等<sup>[24]</sup>对一次梅雨锋特大暴雨的过程分析表明,强盛水汽及辐合上升运动和高层强辐散等多种因素的共同组合叠加作用导致了特大暴雨发生。与之相似,MV-EOF 分解第二模态在 7 月前半月处于低频振荡的正位相,与此相对应,图 9b 中我国东部 $30^{\circ}\text{N}$ 附近地区 200 hPa 散度在 7 月前半月也处于低频振荡的正位相,同时图 9d 中 850 hPa 散度处于低频振荡的负位相,对流层高层的辐散较强,促发了对流层低层的辐合以及暴雨的发生发展,对应着第三次连续强降水时段。对 MV-EOF 分解第三模态的分析可以得到类似的结论。

## 6 结 论

通过分析 2010 年南方持续暴雨期大气环流异常及其低频特征,可以得到以下主要结论:

(1)2010 年 5—7 月我国南方暴雨频发,江南和华南地区出现了数次连续的强降水过程,引发了严重的洪涝灾害,降水具有明显的阶段性特征。东亚

夏季风异常偏弱、西太平洋副热带高压位置异常偏南、三次季风涌的出现和高空急流与散度场活动异常及其相互配合,是南方降水异常的主要影响系统。

(2)对风场和降水场 MV-EOF 空间型分布的分析显示,低频降水中心始终与 200 hPa 的气流辐散中心和 850 hPa 辐合中心相关联。

(3)MV-EOF 分解第一模态反映了东亚夏季风的气候态演变。第一模态的时间系数在 6 月中、下旬由正转负,对应着副高脊线的第一次北跳和雨带的北移,华南前汛期基本结束,长江中下游梅雨开始。MV-EOF 分解第二、三模态反映了东亚夏季风在季节性推进过程中不同尺度的低频振荡。第二、三模态在 7 月前半月和 6 月中下旬分别处于低频振荡的正位相,使长江中下游梅雨和华南前汛期延迟结束,并且增强了江南的梅雨降水。东亚夏季风的气候态演变和低频振荡相叠加导致 2010 年我国南方暴雨频发。

(4)2010 年 6 月中旬之前,东亚的天气气候形势主要受中高纬度冷空气活动的影响,大气斜压性比较显著,200 hPa 纬向风和散度的低频分量自西向东传播;6月中旬之后,主要受夏季风环流形势的影响,大气基本呈现正压性,低频分量改为自东向西传播。

## 参 考 文 献

- [1] Krishnamurti T N, Subrahmanyam D. The 30—50 day mode at 850 mb during MONEX[J]. *J Atmos Sci*, 1982, 39: 2080-2095.
- [2] Lau K M, Yang G J, Shen S H. Seasonal and intraseasonal climatology of monsoon rainfall over East Asia[J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116, 18-37.
- [3] 陈隆勋. 夏季东亚季风系统中二个半球环流的相互作用[C]//东亚夏季风学术会议文集. 昆明:云南人民出版社, 1982:204-217.
- [4] 缪锦海, 刘家铭. 东亚夏季风降水中 30—60 天低频振荡[J]. *大气科学*, 1991, 15(5): 65-71.
- [5] 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[J]. *低纬高原天气*, 1988, 1: 38-49.
- [6] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风[M]. 北京:气象出版社, 1991:102-161.
- [7] 斯公望, 杜立群. 南亚高压北缘的高空气流发散与梅雨锋暴雨发展的关系[J]. *杭州大学学报*, 1987, 14(2): 233-244.
- [8] 俞樟孝, 翟国庆, 王泽厚, 等. 长江中下游低空急流中心产生暴雨的条件[J]. *气象学报*, 1983, 41(3): 365-371.
- [9] 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[J]. 应用气象学报,2008,19(6):710-715.
- [10] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京:气象出版社,1993:47-68.
- [11] 陶诗言,徐予红. 东亚季风的年际变化与长淮河流域的夏季降水[C]//海峡两岸天气与气候学术研讨会论文集,台北,1994:1.
- [12] 陶诗言,朱文妹,赵卫. 论梅雨的年际变异[J]. 大气科学,1988,12(特刊):13-21.
- [13] 潘琦,王作台. 东亚夏季风年际变化:江淮及台湾地区观点之探讨[J]. 大气科学(台湾),1996,24(2):89-122.
- [14] 周兵,文继芬. 1998 年夏季我国东部降水与大气环流异常及其低频特征[J]. 应用气象学报,2007,18(2):129-136.
- [15] Wang B. The vertical structure and development of the EN-SO abnormality mode during 1979—1989[J]. J Atmos Sci, 1992,49(8):698-712.
- [16] 贾小龙,陈丽娟,龚振淞,等. 2010 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J]. 气象,2011,37(4):446-453.
- [17] 何敏,许力,宋文玲. 南海夏季风爆发日期和强度的短期气候预测方法研究[J]. 气象,2002,28(10):9-13.
- [18] 张庆云,陶诗言,陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流[J]. 气象学报,2003,61(4):559-568.
- [19] 李崇银,张利平. 南海夏季风活动及其影响[J]. 大气科学,1999,23(2):257-266.
- [20] 王晓芳,黄华丽,黄治勇. 2010 年 5—6 月南方持续性暴雨的成因分析[J]. 气象,2011,37(10):1206-1215.
- [21] 徐海明,何金海,周兵. 夏季长江中游大暴雨过程中天气系统的共同特征[J]. 应用气象学报,2001,12(3):317-326.
- [22] 据建华,钱诚,曹杰. 东亚夏季风的季节内振荡研究[J]. 大气科学,2005,29,187-194.
- [23] 占瑞芬,孙国武,赵兵科,等. 中国东部副热带夏季风降水的准双周振荡及其可能维持机制[J]. 高原气象,2008,27(S1):98-108.
- [24] 尹洁,郑婧,张瑛,等. 一次梅雨锋特大暴雨过程分析及数值模拟[J]. 气象,2011,37(7):827-837.