0577-6619/2012/70(4)-0766-78 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

中国东南部5—8月持续性强降水和环流异常的准双周振荡*

曹 鑫 任雪娟 杨修群 房佳蓓
CAO Xin REN Xuejuan YANG Xiuqun FANG Jiabei

南京大学大气科学学院,南京,210093
School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, *China*
2011-07-03 收稿,2011-11-22 改回.

Cao Xin, Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Fang Jiabei. 2012. The quasi-biweekly oscillation characteristics of persistent severe rain and its general circulation anomaly over southeast China from May to August. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4): 766-778.

Abstract The low frequency characteristics of persistent severe rain from May to August over southeast China (SC) and its associated low frequency general circulation are studied using the daily rainfall station data in China, the OLR data and the NCEP/NCAR reanalysis data. The source and propagation of the low frequency signal are also investigated by the composite analysis. The results show that the summer rainfall over SC has the characteristics of quasi-biweekly oscillation. The number of persistent severe rain events gets its peak around June 10 and July 1. The precipitation of five-day low frequency rain events takes up the largest ratio of all low frequency events. In the lower atmosphere a strong low frequency cyclonic circulation is located over SC, while a strong low frequency anticyclone is over the South China Sea (SCS) to the western North Pacific region. The persistent low frequency water vapor is supplied from the Bay of Bengal, SCS and the Philippine Sea, and converges to the south of the Yangtze River. At the same time, a low frequency anticyclone controls northeast China in the upper troposphere. This circulation coordinating with a low frequency anticyclone west of it and a low frequency cyclone located around the coastal waters, is favorable to a divergence environment over SC. Thus, the upward motion is enhanced. About 7 days before the low frequency rainfall, there was a low frequency anticyclone over about 150°E in the lower levels and it strengthened and propagated to the coastal waters of southeast China, while the low frequency cyclone over the SCS propagated northwestward to SC. At the same time, the western Pacific subtropical high had an apparently westward extension. The lower and upper circulations coordinating with each other resulted in the low frequency rainfall over SC.

Key words Southeast China, Persistent severe rain, Low frequency rainfall, Low frequency circulation

摘 要 利用1979—2009年夏季(5—8月)中国站点逐日降水资料、NCEP/NCAR大气再分析资料以及向外长波辐射(OLR)资料,分析了中国东南部夏季持续性强降水的低频特征及其伴随的低频大气环流形势,利用超前滞后合成的方法对该低频信号的来源和传播特征进行了研究。结果表明:中国东南部夏季降水存在明显的准双周低频振荡,低频降水事件(持续性强降水)在6月10日前后和7月1日前后发生的次数较多,持续5 d的低频降水事件降水量占总低频降水事件的比例最大。在低频降水事件发生时期,中国东南部在低层是很强的低频气旋式环流,而在中国南海至西太平洋一带则是强大的低频反气旋,同时低频的水汽从孟加拉湾北部以及中国南海、菲律宾海一带输送到长江以南地区强烈辐合上升;此时在高层一个低频反气旋控制中国东北部地区,该低频反气旋与其西侧的低频反气旋以及位于中国东南沿海的低频气旋相互配合,使得长江以南地区高层强烈地辐散,加强了低层的上升运动。在超前低频降水7 d左右时,大气低层在150°E洋面附近开始出现低频反气旋,

* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806004)、973计划(2012CB417203)和国家科技支撑计划项目(2009BAC51B01)。
作者简介:曹鑫,主要从事东亚气候异常研究。E-mail: renxuej@nju.edu.cn

逐渐加强并向西移动到达中国东南沿海,而在中国南海一带的低频气旋则向西北移动到长江以南地区,与此同时,副热带高压有一个明显的西伸过程,高低层相互配合最终导致低频降水的发生。

关键词　中国东南部,持续性强降水,低频降水,低频大气环流

中图法分类号　P461

1　引　言

持续性强降水是对中国影响范围大、影响程度深的灾害性气象事件之一。如1991年江淮持续性暴雨长达13 d之久(丁一汇,1993);1998年夏季,长江流域先后发生了两次分别长达10和6 d的持续性强降水(周兵等,2007)。鲍名(2007)通过分析近50 a中国持续性暴雨时空特征表明,中国持续性强降水最易发生在东南部的5—8月,多数持续3—5 d,个别可长达8—13 d。持续性强降水最易造成大范围严重洪涝,给国民经济和人民生产生活带来的损失无法估量。持续性强降水具有显著的低频振荡特征,通常位于低频振荡的活跃位相(Yang, et al, 2010),因而对持续性强降水的研究,可以通过提取低频降水的活跃位相(低频降水事件)来进行。Lau等(1988)指出,15—20 d准双周低频振荡是中国东部降水的主要模态。这一结论在随后许多年的降水低频特征分析中得到证实(丁一汇,1993;朱乾根等,2000;Yang, et al,2003;陈晓红等,2005;周兵等,2007;Liu, et al, 2008)。李崇银等(1995)在对全球热带大气中季节内振荡进行较系统的研究后指出,热带大气准双周振荡是一种重要低频系统,其动能可能比30—60 d振荡还要大。Lau等(1996)利用气候的10 d平均降水量分析了东亚季风降水的周期特征,发现东亚夏季风降水具有明显的40和20 d振荡。占瑞芬等(2008)指出中国东部副热带夏季风降水具有显著的准双周振荡特征,在年际尺度上,准双周振荡偏强,则中国东部副热带夏季风降水偏多,反之亦然。Yang等(2010)对长江中下游地区1979—2002年夏季季节内尺度的降水进行功率谱分析,结果表明在15 d准双周尺度以及20—30 d尺度上有两个峰值,且占总低频降水的57%,以上研究都充分说明了准双周低频降水的重要性。

大气环流的持续性异常是造成持续性强降水的主要原因,而大气低频振荡对持续性异常环流的形成和维持具有十分重要的作用(Lau, et al,1988;朱乾根等,2000;周兵等,2007;Liu, et al,2008;Yang, et al, 2010;刘冬晴等,2010;Jia, et al, 2011;章丽娜等,2011;He, et al,2011)。占瑞芬等(2008)的研究表明,中国东部副热带夏季风降水的准双周振荡特征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。黄静等(1996,1997)讨论了与长江流域旱涝相联系的低频环流场的分布和差异,指出长江流域涝年是由南北方低频涡旋相向运动,旱年降水则由热带西太平洋低频涡旋西北向移动影响长江流域所造成的。陈丽臻等(1994)发现长江流域典型旱涝年在低频流场的配置和低频波的传播方向上均有明显的差异。陆尔等(1996)对1991年江淮大暴雨期间东亚大气低频振荡活动分析后发现,低纬度地区低频波虽有不同的传播方向,但都将暖湿空气以低频形式输送到江淮以南,并与北侧的低频冷空气在江淮地区相互作用,从而导致该地区以低频形势出现3场特大暴雨。张庆云等(2003)的研究也指出夏季东亚中高纬度环流系统出现20—30 d的低频振荡,有利于中高纬度冷空气南下到长江流域,是长江流域暴雨洪涝的重要原因之一。

目前有关持续性强降水的低频特征及其相伴随的低频环流形式研究多为个例年研究,本文则利用1979—2009年NCEP/NCAR再分析资料、中国站点降水资料以及向外长波辐射(OLR)资料,在气候意义上分析了中国东南部地区5—8月持续性强降水的准双周特征,在此基础上研究了与低频降水事件相伴随的大气低频环流特征,特别揭示了这些低频环流的演变和传播情况。

2　资料和方法

2.1　资　料

本文所使用的资料包括:美国环境预测中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)发布的全球再分析日平均资料、NOAA逐日向外长波辐射资料集以及中国国家气象信息中心提供的全中国756站的地

面气候资料日值数据。其中,NCEP/NCAR 再分析资料的水平分辨率为 2.5°×2.5°,包括水平风(u,v)场、垂直速度(ω)场、比湿(q)、10 m 水平风场以及地表的气压场。所有资料使用的时间范围为 1979—2009 年夏季,本文中夏季是指 5—8 月。另外,为了保证数据的连续性,对有缺测降水资料的站点进行了剔除,用于分析的共有 461 个站点逐日降水资料。

2.2 方 法

为了得到中国东南部地区夏季降水的显著性周期,首先对 1979—2009 年中国东南部逐年 5—8 月降水分别进行功率谱分析,然后再对得到的 31 a(1979—2009 年)的结果取平均(图 1)。对降水资料进行功率谱分析之前,去除了其气候态,即去掉了季节循环的影响,然后又进行 8 d 的滑动平均,滤掉了高频天气时间尺度的影响。可以看到,10—45 d 周期都非常显著,且通过了红噪声检验,在 16 和 30 d 左右有两个峰值。表明中国东南部夏季降水具有显著的准双周振荡以及季节内振荡。本文只针对中国东南部夏季降水显著的准双周特征进行研究,因而利用傅里叶带通滤波对原始降水资料进行了 10—30 d 滤波,以便突出准双周振荡。对其他常规要素场同样进行了 10—30 d 滤波。在此基础上,利用经验正交函数(EOF)分析和合成分析揭示持续性强降水的低频特征以及相应的大气低频环流型。

在分析大气水汽输送时,利用以下公式计算水汽含量(W) 以及水汽输送通量(F_x,F_y):

$$W = \frac{1}{g}\int_{p_t}^{p_s} q\,\mathrm{d}p$$

$$F_x = \frac{1}{g}\int_{p_t}^{p_s} qu\,\mathrm{d}p$$

$$F_y = \frac{1}{g}\int_{p_t}^{p_s} qv\,\mathrm{d}p$$

其中,g 为重力加速度,q 为某一气压面 p 上的比湿,p_s 是地面气压,p_t 是大气层顶气压(取为 300 hPa),u、v 分别是纬向和经向风速。所有计算都采用国际制单位。水汽含量的单位是 kg/m^2,水汽输送通量的单位是 kg/(m·s)。F_x、F_y 分别是东西和南北方向的水汽输送通量。下文给出的水汽输送通量以及水汽含量都是整层积分的结果,即从地表到 300 hPa 的积分。

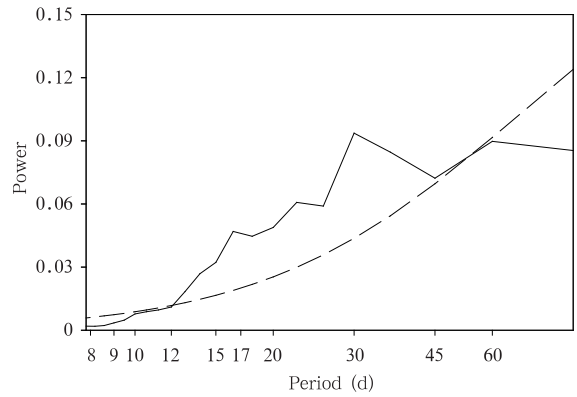


图 1 1979—2009 年中国东南部地区夏季降水功率谱分析
(虚线代表红噪声检验)

Fig. 1 Power spectral analysis of the summer rainfall over southeast China during 1979 to 2009
(The dashed line is for the red noise spectrum)

3 中国东南部低频降水特征

为了揭示中国区域准双周低频降水的时空特征,对 1979—2009 年夏季低频降水资料进行经验正交函数分解,得出前两个模态的方差贡献分别为 20.2%和 9.7%。图 2 给出了经验正交函数分解得到的前两个模态的空间分布。可以看到,第 1 模态的低频降水主要集中分布在长江以南整个中国东南部区域,且为一致性变化,第 2 模态的低频降水主要分布在长江中下游和华南地区,这两个区域呈反相变化。对这两个模态的时间系数(称为 PC1 和 PC2)分别求超前滞后自相关后(图略)表明,两者都在超前或滞后 7 d 左右时自相关系数为负的最大值,表明两者都具有显著的准双周振荡周期,但对 PC1 同 PC2 求超前滞后相关则发现两者并没有很好的超前滞后关系,说明这两个模态是相对独立的,不是传播模态。由于第 1 模态所占方差贡献远大于第 2 模态,因此,本文针对第 1 模态进行研究。

根据经验正交函数分解得到第 1 模态的时间序列选取低频降水事件,事件选取的方法是:将 PC1 进行标准化,若标准化后的时间序列中连续不小于 3 d 时间系数不小于 1,则定义为一个低频降水事件。利用该方法,从 31 a 夏季共得到 126 个低频降水事件。为了进一步分析降水事件主要发生在什么时间,将低频降水事件发生的日期记为 1,未发生的则为 0,对 1979—2009 年夏季的结果取气候平均,

如图3所示。从图3中可以看到,低频降水事件在6月10日和7月1日前后有两个峰值,分别对应于前汛期末期和梅雨期,其他时间段发生次数差异不大。

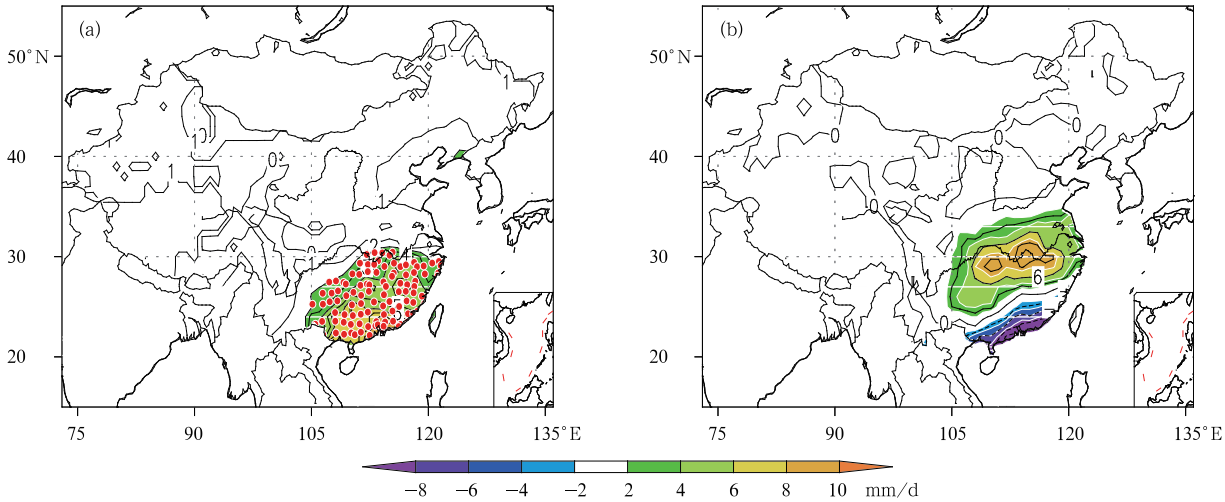


图2　中国区域1979—2009年夏季低频降水EOF分解第一(a)和第二(b)模态空间分布

Fig. 2　Spatial pattern of the first (a) and second (b) EOF modes for the low frequency rain in summer (May to August) of 1979－2009 over China

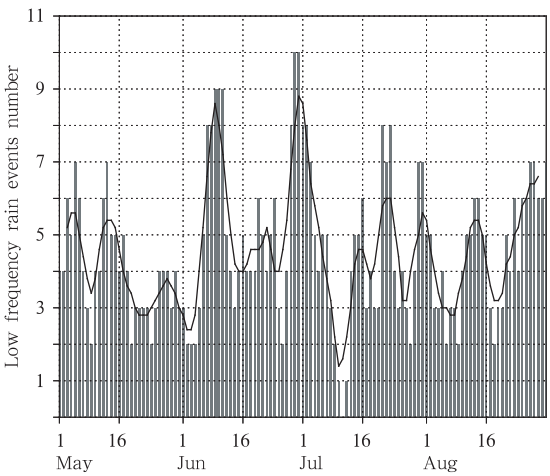


图3　1979—2009年夏季低频降水事件在不同月份发生的次数

(黑色曲线表示5 d滑动平均后的值)

Fig. 3　Number of the low frequency rain events in May－Aug of 1979－2009

(The abscissa axis is time and the ordinate is the number of low frequency events The bold curve is 5 d running mean)

对上述126个低频降水事件进行统计发现,低频降水事件对应的原始降水量占夏季总降水的26.2%。平均而言,一个低频降水事件持续4.5 d,其平均降水强度(长江以南地区105个站点(图2a)的红色实心圆圈示的降水平均)是12.3 mm/d。实际上,各低频降水事件的持续时间和强度有差别,表1进一步统计了不同持续天数的低频降水事件的特征,低频降水事件持续天数的范围为3—7 d,持续3—5 d的低频降水事件发生的次数较多,6和7 d的较少。从不同持续天数的低频事件的降水量来看,持续5 d的低频事件的降水量占总低频事件降水量的比例最大,达到33.4%,而持续3和7 d低频事件的降水量所占比例很小。持续3 d的低频事件主要发生在5月,而6月发生次数最少;持续4 d的低频事件则在8月发生次数最多,6月最少;降水量最大的持续5 d的低频事件则集中在6和7月,5和8月发生很少;持续6 d的低频事件5和6月发生相对较多,持续7 d的低频事件发生次数较少。从表中还可以看到,每次低频降水事件的降水强度,随着持续天数的增加而递增,持续6和7 d的低频降水事件降水强度很大,这说明依本文的统计标准,持续降水的天数越长,低频降水事件越极端,长江以南整个地区的总降雨量也越大。

表 1 1979—2009 年夏季低频降水事件的特征统计

Table 1 The statistics of the low frequency rain events in summer for 1979－2009

持续天数(d)	总次数	5 月	6 月	7 月	8 月	每次事件降水强度(mm/d)	降水量占总事件降水量的比例
3	30	12	4	7	7	9.7	12.5%
4	37	9	5	10	13	11.7	24.7%
5	36	4	14	10	8	13.0	33.4%
6	17	7	5	2	3	13.9	20.4%
7	6	0	2	3	1	14.9	9.0%

图 4 给出了不同持续天数低频降水事件降水强度的空间分布。可以看到,无论是所有低频降水事件的平均,还是不同持续天数的低频降水事件,其降水强度的大值区都分布在长江以南,长江以北非常小,这与图 2a 得到的结果非常一致。从降水强度上看,从长江中下游到华南沿海都呈现递增的趋势,最大值中心位于华南沿海地区。还可以看到,从持续 3 到 7 d 降水强度有一个明显的增强过程,在持续 7 d的低频事件中部分地区降水强度达到 27 mm/d,这在一定意义上验证了表 1 中降水强度的变化。另外,从持续 3 到 7 d 的低频降水事件降水强度的大值区由华南地区向长江中下游地区扩展,在持续 3 d 的低频降水事件中,大于 12 mm/d 的区域位于华南沿海很小的一部分地区,而后随着持续时间的增长,华南沿海地区的降水强度逐渐增加并且向北扩展。

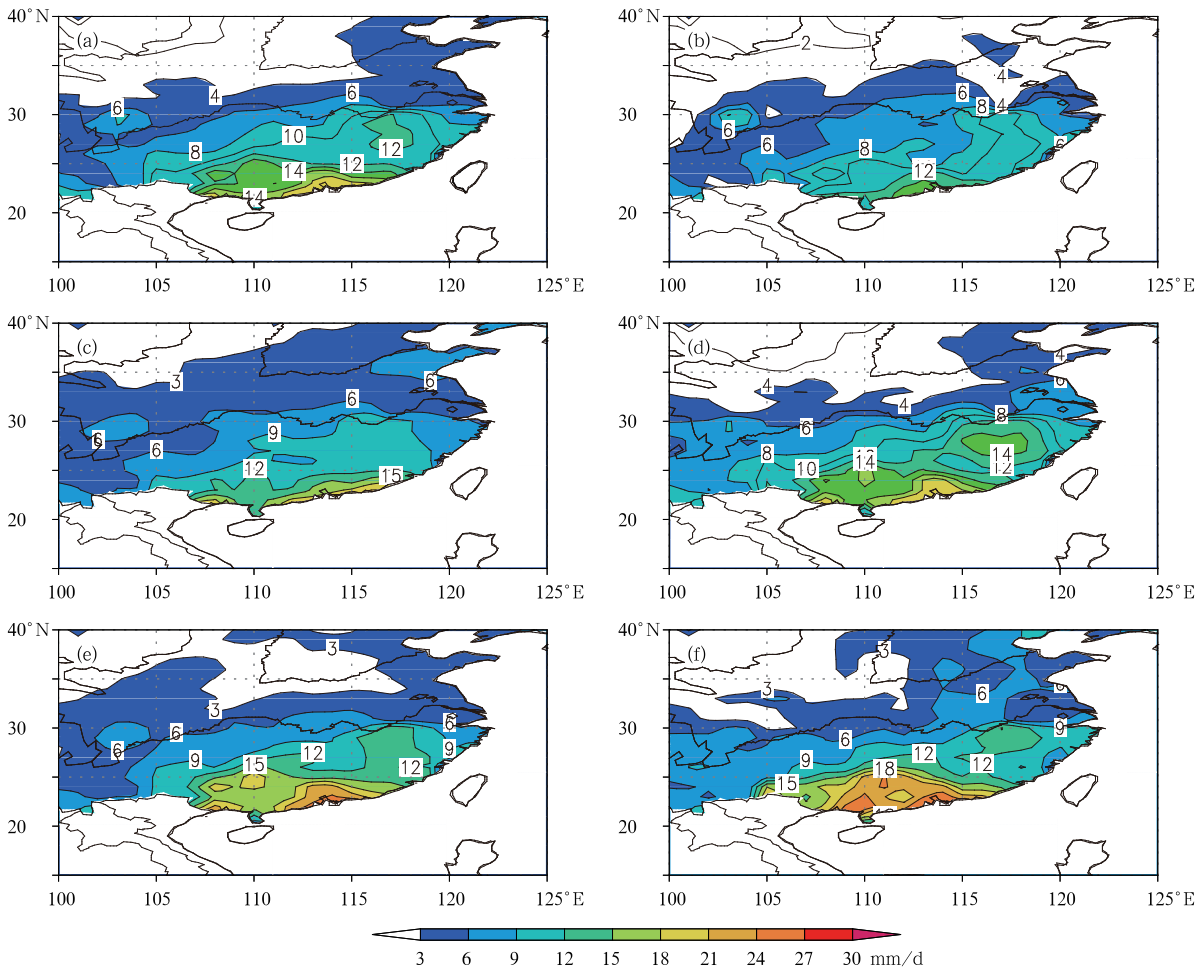


图 4 不同持续天数的低频降水事件降水强度的空间分布

(a. 所有低频降水事件的平均,b—f. 分别代表持续 3—7 d 的低频降水事件)

Fig. 4 Spatial distribution of the precipitation intensity of the low frequency rain events which last the different days

(a. the average over all low frequency rain events, b－f. the one over the low frequency events lasting 3 d to 7 d, respectively)

4　持续性强降水伴随的低频大气环流场时间演变分析

图5是850 hPa低频风场以及低频向外长波辐射场对降水事件的超前滞后合成，给出了从超前降水10 d到滞后8 d的时间演变，包括了低频降水的整个周期。在合成时，同期是对低频降水事件发生时段的要素场取平均，例如一个持续时间为3 d

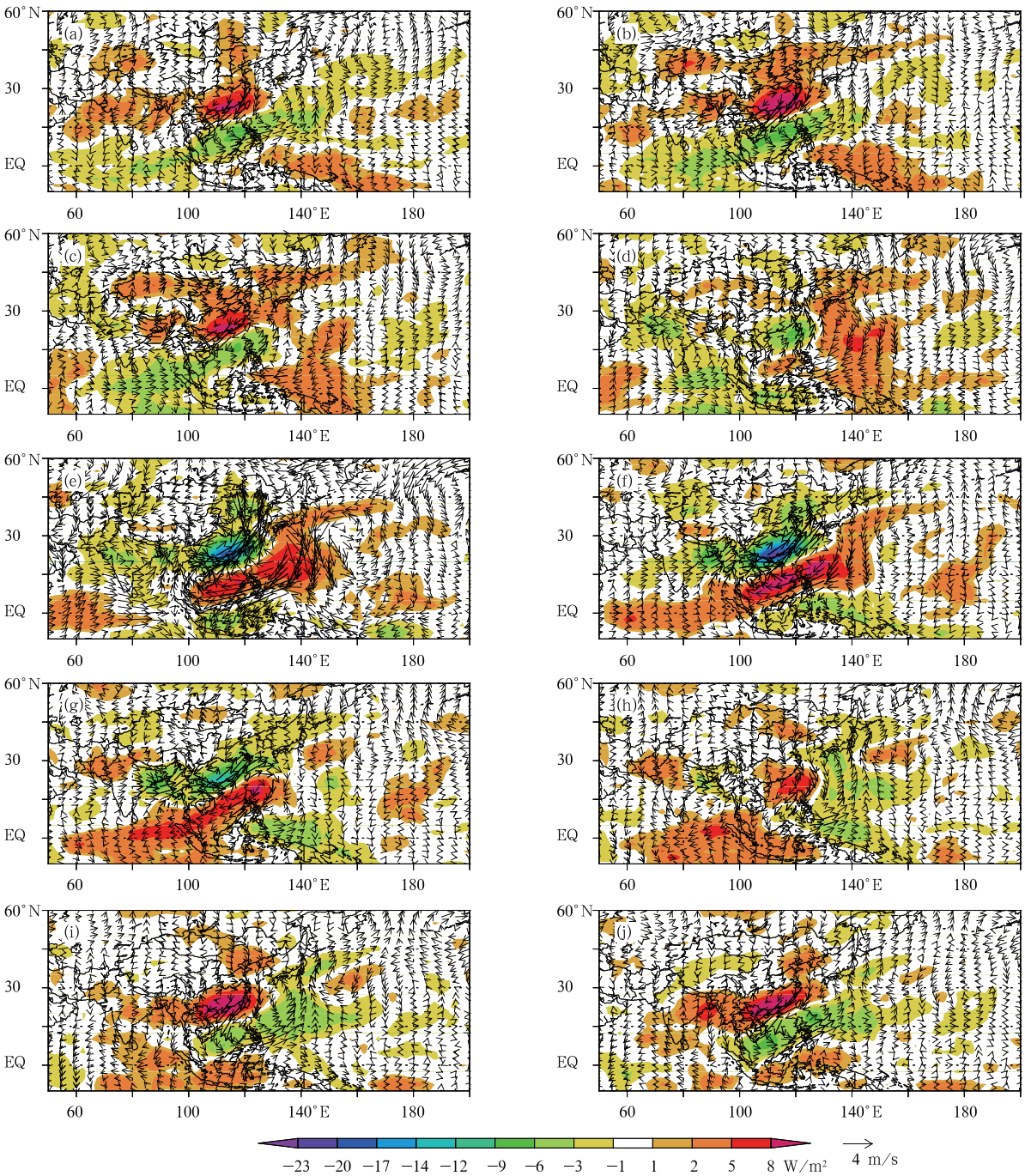


图5　850 hPa低频风场(矢线)以及低频OLR场(填色区)超前滞后低频降水事件的合成图

(a、b、c、d、e、f、g、h、i、j. 超前10、8、6、4、2 d、同期、滞后2、4、6、8 d，黑色代表风场通过95%信度检验)

Fig. 5　Lead/lag compositions of the 850 hPa low frequency wind (vector, m/s) and OLR (shaded, W/m²) anomalies by low frequency rain events. The black vectors are statistically significant at the 95% confidence level

(a, b, c, d and e are for a lead of 10, 8, 6, 4 and 2 d, respectively; f is for the day on which the event occurs, and g, h, i, j are for a lag of 2, 4, 6 and 8 d, respectively)

的低频降水事件,则取这 3 d 要素场的平均;超前于降水场,是将同期时段向前平移所要超前的天数后进行平均得到的;滞后时段则与超前时段相反。

从图 5a 可见,在超前 10 d 至超前 8 d 时,中国长江以南区域 850 hPa 由一个较强的低频反气旋控制,整个中国东南部对流活动均不活跃,此时,在中国东南沿海上空存在一个弱的低频气旋式环流,伴随较旺盛的对流活动,与此低频气旋紧邻的东南侧是一个弱的低频反气旋,在西北太平洋同样为一个弱的低频反气旋。至超前 6 d 时(图 5c),长江以南的低频反气旋和中国东南沿海上空的低频气旋均减弱,而菲律宾群岛以东洋面以及西北太平洋上的低频反气旋仍存在并略有加强。在超前 4 d 时(图 5d),长江以南的低频反气旋已消失,其上空变为由来自中国东南沿海弱的低频南风控制,且对流开始异常活跃,而在超前 10—6 d 盘踞在菲律宾群岛以东洋面上的低频反气旋与西北太平洋上空的低频反气旋融合为一个低频反气旋,并西移北抬到了接近南海一带,范围和强度均加大。在随后的 3 d 里长江以南上空迅速形成一个低频气旋,西移来到南海一带的低频反气旋也逐渐加强,同时这两个区域的对流活动分别加强和抑制,到达同期时(图 5f),以上的低频气旋和低频反气旋都达到最强,由低频气旋和低频反气旋汇聚成的低频西南风正好位于长江以南至东南沿海,其上空是异常活跃的对流,为降水提供了有利的环流条件。在低频降水发生期间,长江以南地区强大的低频气旋式环流以及南海地区的低频反气旋式环流始终维持,直到滞后 4 d 左右时(图 5h)才衰亡消散,维持持续性降水的低频风场和向外长波辐射场形势也不复存在。从滞后 6 到 8 d 时(图 5i、j),环流形势又逐渐变为超前 8—10 d 时的状态。

对图 5 的分析表明,长江以南地区的低频风场信号在低层主要来源于西北太平洋的西传,以及菲律宾海、赤道太平洋低频信号的西北向传播。为了进一步揭示低频风场信号的来源以及传播路径,图 6 给出了 850 hPa 低频相对涡度场的时间-经度(图 6a,沿 25°N)和时间-纬度剖面(图 6b,沿 120°E)。

从图 6a 可以看到低频涡度明显的西传现象,西北太平洋上的低频负涡度(低频反气旋)从超前 7 d 左右由 150°E 开始向西传播,直至传播到中国东南沿海一带并出现一次增强过程,其发生的时间超前于低频降水 1—2 d,在低频降水发生后,此低频负涡度继续向西传播,一直延伸到 103°E,达到中国中部地区。在其西侧,有一个低频正涡度(低频气旋)的西传,这种传播对应的是图 5a 南海上空的低频气旋在随后时间的西北向传播。这种传播到同期降水时,达到最大值,其所处经纬度刚好是长江以南降水发生区域,而后该低频正涡度一直在此处维持至滞后 4 d,之后不再向西传播。

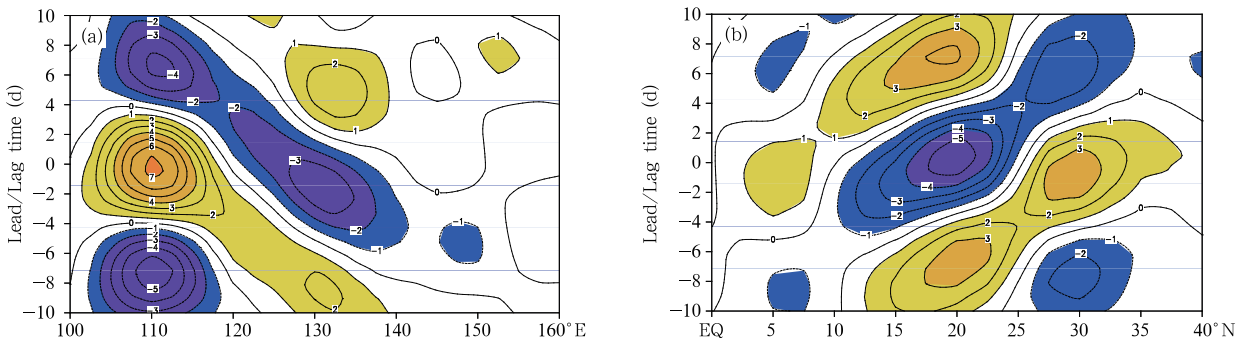


图 6 850 hPa 低频相对涡度场的剖面

(a. 沿 25°N 的时间-经度剖面图,b. 沿 120°E 的时间-纬度剖面;

负值表示低频相对涡度场超前低频降水事件,

0 为同期,正值表示低频相对涡度场滞后低频降水事件单位:$10^{-6}s^{-1}$)

Fig. 6 Cross section of the 850 hPa low frequency relative vorticity, unit: $10^{-6}s^{-1}$.

The abscissa is for lead/lag days, and the negative value denotes the low frequency relative vorticity leading the low frequency rain events. Zero is for the simultaneity and the positive value indicates lag days

(a. time-longitudinal cross section along 25°N, and b. time-latitudinal cross section along 120°E)

图6b旨在揭示图5a—c中,中国东南沿海上空低频气旋及其南侧的低频反气旋的北传过程,在超前10 d时,沿120°E的约10°—25°N均为低频正涡度控制,这正是中国东南沿海上空低频气旋对应的低频涡度,此低频正涡度随时间向北传播并且逐渐加强,在超前8 d至超前6 d和超前3 d至同期里都有明显的增强过程,随后迅速减弱。在以上低频正涡度北传的超前低频降水事件6—4 d里,其紧邻的南侧的低频负涡度也很快进入南海所处的纬度,在超前2 d至滞后2 d时已北传到达长江以南所处的纬度并达到最强,在低频降水发生后继续北传,强度也迅速减弱。

图7给出的是伴随低频降水事件的500 hPa上588 dagpm线的时间演变,用来揭示在低频降水事件发生前后西北太平洋副热带高压的变化。图7a给出的是超前低频降水事件588 dagpm线的演变过程,可以看到,从超前低频降水事件10 d到超前2 d,588 dagpm线明显西伸,即从超前10 d的140°E以东持续西移到接近130°E。从超前2 d至同期,588 dagpm线开始略有东退,这一东退过程一直持续到滞后低频降水事件2 d(图7b),退到140°E左右,而后至滞后低频降水事件8 d过程中又开始轻微的西伸,该西伸过程相对缓慢且幅度不大。

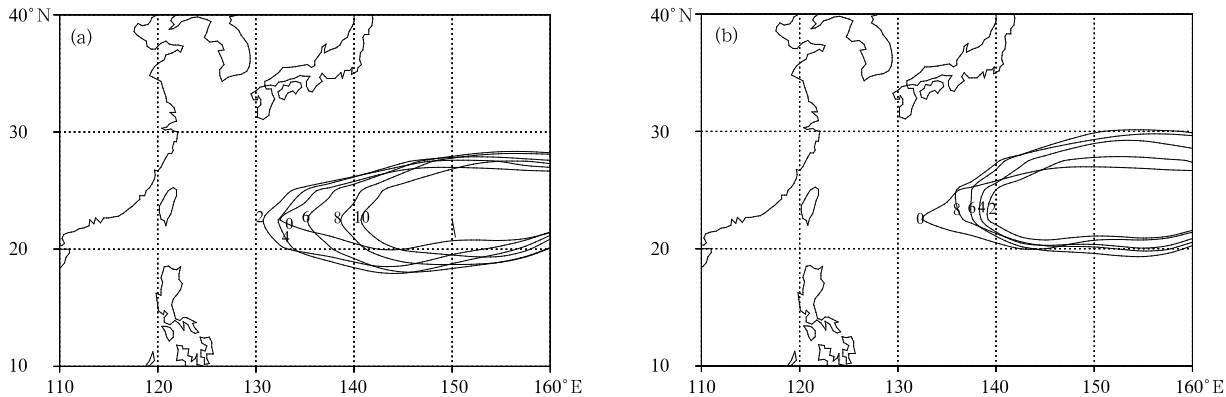


图7　588 dagpm线超前滞后低频降水事件的演变

(a.超前低频降水事件,b.滞后低频降水事件;等值线上的数字代表超前/滞后天数)

Fig.7　Evolution of the isoline of 588 dagpm by low frequency rain events

(a. Lead the low frequency rain events, and b. Lag the low frequency rain events

The numbers marked on the isoline is lead or lag day numbers)

图8是200 hPa低频风场以及相应低频散度场的超前滞后合成图。从图8e(超前2 d)、8f(同期)中可以看到在西太平洋一带存在一个非常强的低频气旋,其西北侧的中国东北部和朝鲜上空则是低频反气旋式环流,在中国东南沿海一带是强烈的低频北风。从超前时刻的图看,降水同期时控制中国东北部上空的低频反气旋来源于超前10—8 d时(图8a、b)中心位于(30°N,150°E)上空的低频反气旋,其随后到降水前的几天中逐渐西移北上并加强,到超前4 d时已经移到中国东北部上空。而降水同期时位于西太平洋上空的低频气旋,在超前6 d时位于150°E左右菲律宾以东洋面上空,而后同样的西移加强,同期,强度达到最大,维持到大约滞后2 d时开始消亡。

从图8中还可以看到,在超前10 d时,(30°—45°N,50°—70°E)上空存在一个弱的低频反气旋式环流,从超前8 d到超前4 d时,此低频反气旋在南北方向上位置变动不大,但有向东延伸的趋势,且强度经历了从增强到略微减弱并维持的过程,在超前2 d时,继续东伸,同时南压。该低频反气旋式环流的东移南压使得100°E及其以东地区的自北向南穿越中国中部的低频北风得到维持和加强,从而将中高纬度的冷空气输送到中国东南沿海地区,该低频北风维持时间从超前4 d至滞后2 d,到滞后4 d时已基本消失。该低频反气旋与中国东北部的低频反气旋以及东部沿海上空低频气旋西侧北风相互配合,使得持续性强降水发生期间,中国东南部高空处于非常强的辐散环境中,这种辐散环境不但可以使上升运动更加强烈,又使得低层的辐合得到加强。

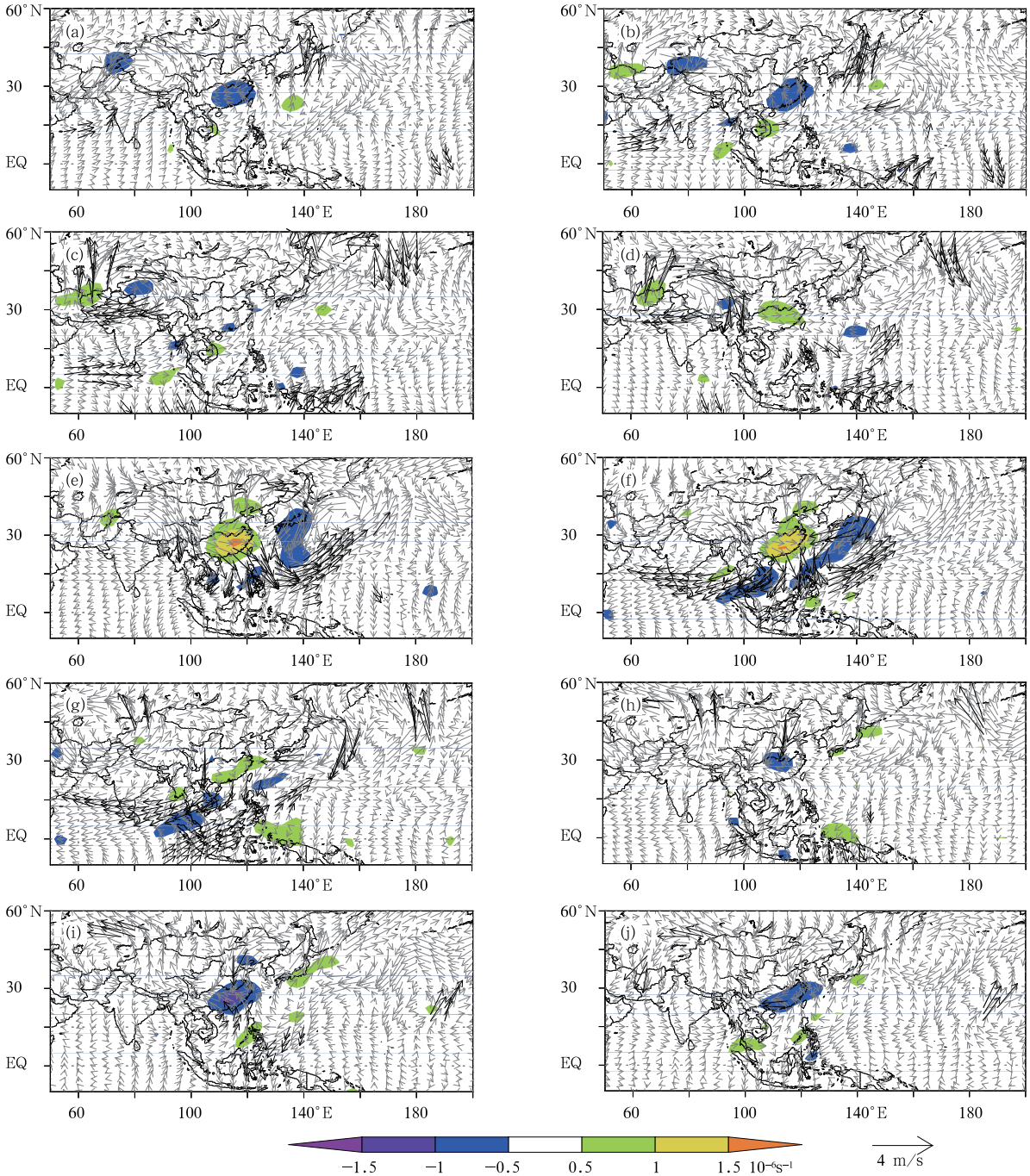


图 8 同图 5,但为 200 hPa 低频风场(矢线)以及低频散度场(填色区)

Fig. 8 As in Fig. 5 but for 200 hPa low frequency wind (vector, m/s) and divergence fields (shaded, $10^{-6}\,s^{-1}$)

高层辐散和低层辐合的配合必然会使得降水区域的上升运动显著,对低频垂直速度 ω 场的超前合成可以说明降水事件发生之前的垂直运动情况。图 9 是对低频垂直速度在 100°—120°E 取纬向平均后得到的高度-纬度剖面,在超前 10—6 d 时,长江以南区域都是低频下沉运动,不利于降水,超前 6 d 时在低频下沉气流的南北两侧都是比较弱的低频上升运动。随后到超前 5 和 4 d 时,中国东南部上空的低频下沉气流迅速减弱消失,来自南海北部的低频上升运动增强并向北扩展到中国东南部上空。到超前 3—2 d 时,该低频上升运动完全北移到中国东南部上空,而此时在中国南海区域则变为低频下沉运

动,这意味着来自西北太平洋地区的低频反气旋开始逐渐延伸到中国南海、菲律宾海一带(图5e),而后该低频下沉运动逐渐增强北移,最后维持在中国南海一带。在同期时,位于中国东南部的低频上升运动和位于中国南海上空的低频下沉运动都达到最强盛。

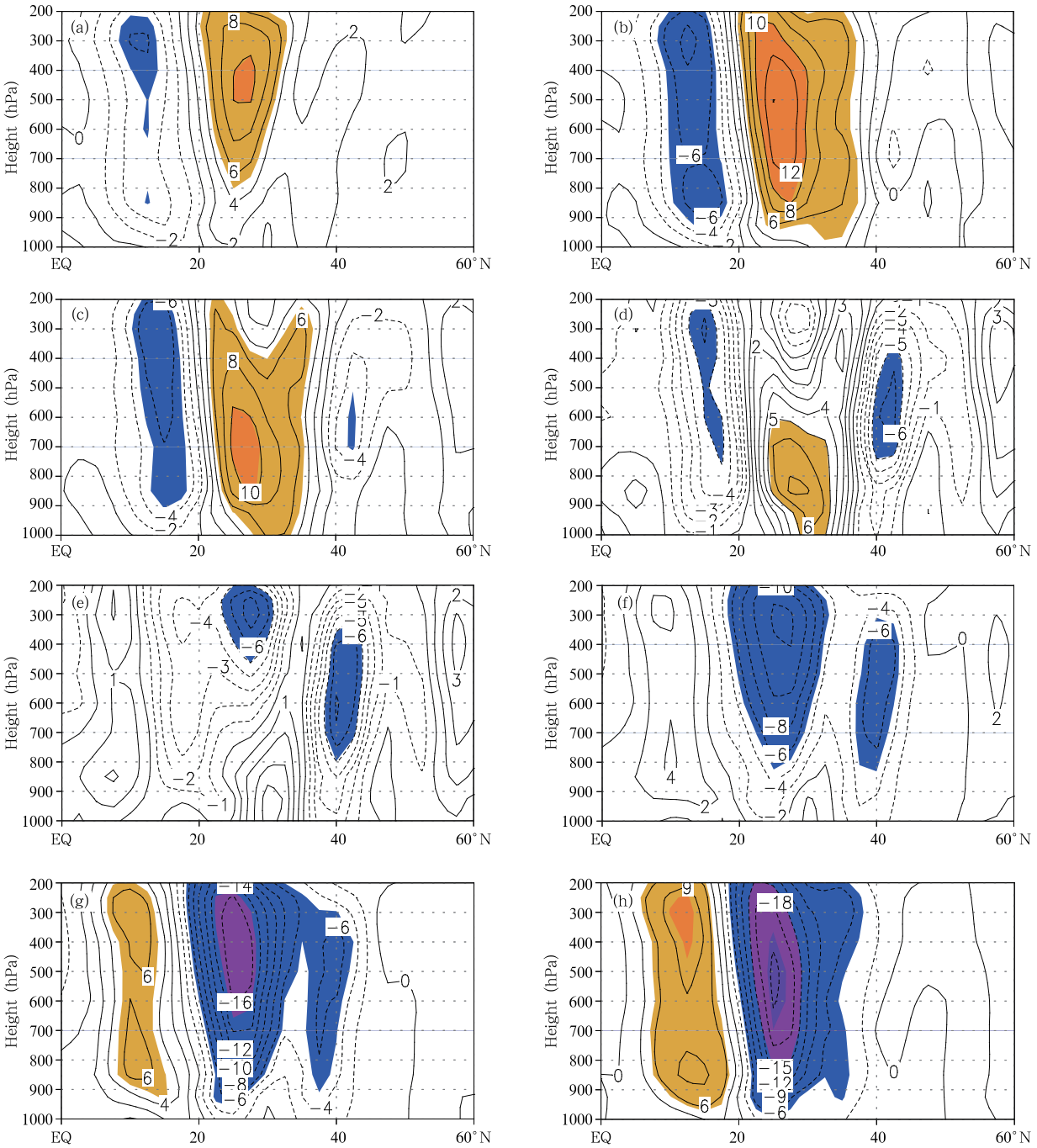


图9　超前低频降水事件的低频ω场高度-纬度剖面

(a—h. 超前10、8、6、5、4、3、2、0 d,100°—120°E平均;负值表示上升运动,正值为下沉运动)

Fig. 9　Height-latitudinal cross section of the low frequency ω that leads the low frequency rain events averaged zonally over 100°－120°E(a－h. are for a lead of 10, 8, 6, 5, 4, 3, 2, 0 d, respectively, the negative value denotes upward motion and the unit is 10^{-2} m/s)

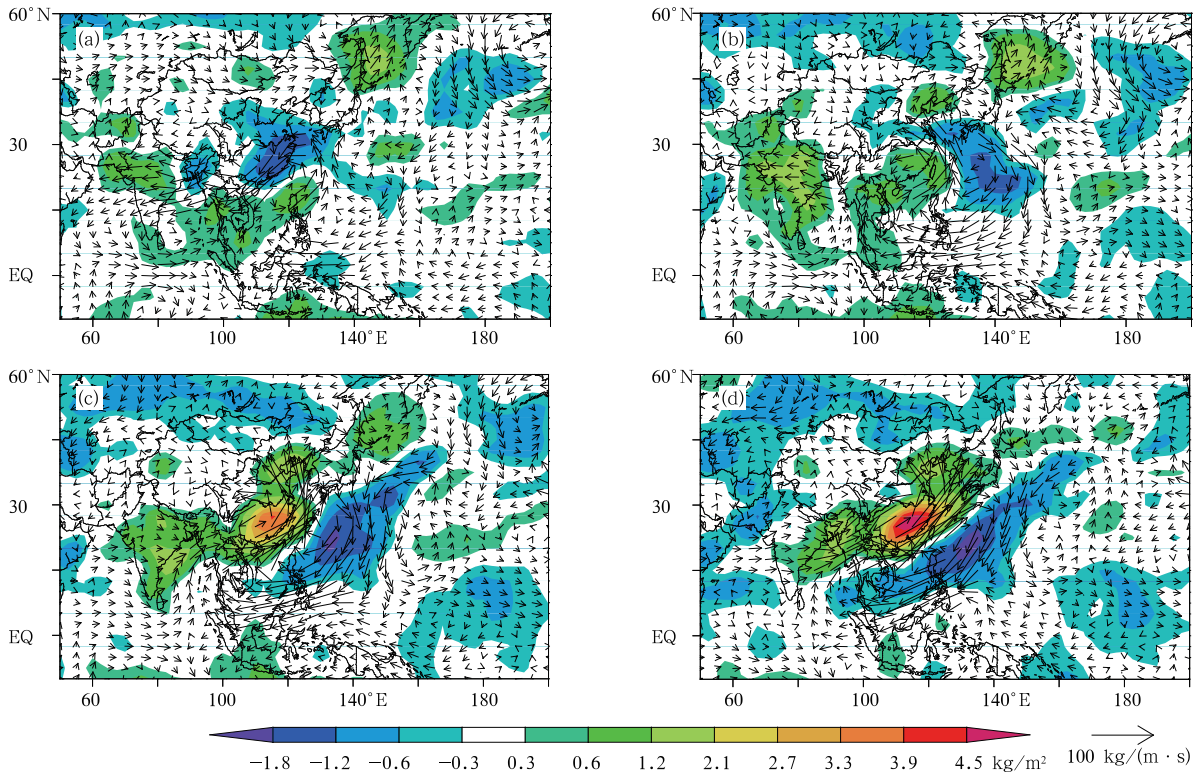


图 10 整层大气低频水汽输送通量(矢量)
以及低频水汽含量(填色区)对低频降水事件的超前合成图
(a、b、c. 超前 6、4、2 d, d. 同期)

Fig. 10 Lead compositions of the low frequency water vapor transport (vector, unit: kg/(m·s))
and low frequency water vapor (shaded, unit: kg/m²)
for the total column by low frequency rain events (a, b, c and d are for a lead of 6, 4, 2 and 0 d, respectively)

持续性的降水不但需要强烈的上升运动,充足的水汽同样也是必不可少的条件(Zhou, et al, 2005;江志红等,2011)。对整层大气从地表到300 hPa的低频水汽输送通量以及低频水汽含量进行超前滞后低频降水事件进行了合成,在这里只给出了超前和同期的结果(图 10)。可以看到,图 10与图 5 在空间分布型上非常相似,这说明低频水汽输送以及水汽含量的变化主要集中在对流层低层。在超前 6 d 时,中国东南部地区低频水汽含量为负异常,低频水汽输送通量方向为自东北向西南输送,在孟加拉湾和中国南海一带低频水汽输送通量是低频气旋式环流的形式,且低频水汽含量为正异常,而后该处的低频气旋以及正异常的低频水汽含量逐渐向中国东南部北移同时增强。与之相配合的西北太平洋处的低频反气旋形式的水汽输送通量和负异常的低频水汽含量在超前 4 d 时开始加强西移。到降水同期时,长江以南整个区域低频水汽含量为显著的正异常,而在其东南侧,即中国南海、西太平洋一带刚好与之相反。在长江以南地区的低频水汽输送的气旋式环流表明该处水汽的强烈的辐合,中国南海一带低频水汽输送强烈辐散。这样就使得水汽源源不断的从孟加拉湾北部—中国南海以及西太平洋上空输送到长江以南地区,从而使低频降水得以维持。

5 结论和讨论

本文利用 1979—2009 年 5—8 月的逐日中国站点降水观测资料、NCEP/NCAR 大气再分析资料以及向外长波辐射资料等,通过经验正交函数分解、合成分析等统计方法,对中国东南部持续性强降水的低频特征以及伴随的低频大气环流型进行了分析,结果表明:

(1)中国 5—8 月在长江以南地区存在显著的准双周低频降水。对准双周低频降水的经验正交函数

分解结果表明,第一模态主要分布在长江以南整个地区,且整个区域一致变化,该模态对应的低频降水事件在6月10日和7月1日前后发生的次数较多。低频降水事件中主要为持续3—5 d的事件,且持续5 d的低频降水事件在降水量上所占比重最大。

(2)对流层低层的准双周低频信号主要来源于西北太平洋以及菲律宾海上空。对低频降水事件所伴随的低层大气低频环流场进行超前滞后合成分析表明,在超前低频降水10—8 d时,西北太平洋出现对流抑制现象,并且存在一个较弱的低频反气旋式环流,而后逐渐加强向西延伸到达中国南海、菲律宾海一带;而与此同时中国东南沿海到菲律宾海上空较弱的低频气旋式环流则是向北移动,在移动过程中同样逐渐增强,最终到达长江以南地区,引起强烈的辐合上升运动。在超前低频降水10—2 d,副热带高压有一个明显的西伸过程,从超前10 d的140°E以东持续西移到接近130°E。

(3)在对流层高层,超前低频降水10—8 d时位于(30°—45°N,50°—70°E)区域上空的低频反气旋式环流在低频降水发生前东移南压,引导北方的冷空气不断深入到中国长江以南地区。在降水事件发生前夕,中国东北部存在一个低频反气旋式环流,与其西南侧上空东移南压的低频反气旋以及西太平洋上空的低频气旋相互配合使得中国东南部整个地区处在辐散的环境中,这样不但让低层的辐合更强,并且让上升运动也得到加强。

(4)低频降水的水汽来源主要是孟加拉湾北部—中国南海以及西太平洋一带。对低频水汽输送通量以及水汽含量的超前合成分析可以看到,在低频降水发生之前,长江以南地区低频水汽含量就开始明显增加,且水汽输送为低频气旋式环流的形式,而在中国南海、菲律宾海一带则是刚好相反,水汽含量减少,且为辐散。在东南沿海地区的西南向低频水汽输送将南部的低频水汽源源不断的输送到了长江以南地区,使低频降水得以维持。

本文基于准双周低频降水经验正交函数分解的第1模态,对中国近30年来5—8月持续性强降水低频特征进行了分析,实际上,5—8月包含了如梅雨、前汛期以及台风等降水影响系统,因此今后还需要分别进行深入研究。另外,从功率谱的分析(图1)中还可以看到显著的季节内振荡(ISO)。琚建华等(2005)指出,季节内振荡的传播对中国长江中下游地区的降水有显著影响。琚建华等(2008)对东亚季风区季节内振荡传播的研究表明,其经向传播主要为热带地区季节内振荡的向北传播,纬向传播则是分别起源于印度季风区的季节内振荡东传和起源于西太平洋海域的季节内振荡西传。而热带太平洋40—50 d振荡是热带大气信号最为显著的季节内振荡,其对中国东南部夏季降水有显著的影响(Jeong, et al,2008;Zhang, et al,2009;章丽娜等,2011)。因而,中国东南部夏季持续性强降水的季节内振荡特征和热带太平洋40—50 d振荡对中国东南部夏季持续性强降水影响也是需要深入的研究。

参考文献

鲍名. 2007. 近50年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景. 大气科学, 31(5): 779-792

陈丽臻, 张先恭, 陈隆勋. 1994. 长江流域两个典型旱、涝年大气30—60天低频波差异的初步分析. 应用气象学报, 5(4): 483-488

陈晓红, 张娇. 2005. 2004年安徽省梅汛期三次暴雨过程的大气低频振荡背景. 应用气象学报, 16(6): 754-762

丁一汇. 1993. 1991年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 255pp

黄静, 朱乾根. 1996. 长江流域旱涝年低频风场分布和演变的差异. 南京气象学院学报, 19(3): 276-282

黄静, 朱乾根, 李爱武. 1997. 与长江流域旱涝相联系的全球低频环流场. 热带气象学报, 13(2): 146-157

江志红, 梁卓然, 刘征宇等. 2011. 2007年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析. 大气科学, 35(2): 361-372

琚建华, 赵尔旭. 2005. 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, 21(2): 163-171

琚建华, 孙丹, 吕俊梅. 2008. 东亚季风区大气季节内振荡经向与纬向传播特征分析. 大气科学, 32(3): 523-529

李崇银, 周亚萍. 1995. 热带大气中的准双周(10—20天)振荡. 大气科学, 19(4): 435-444

刘冬晴, 杨修群. 2010. 热带低频振荡影响中国东部冬季降水的机理. 气象科学, 30(5): 684-693

陆尔, 丁一汇. 1996. 1991年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡. 气象学报, 54(6): 730-736

占瑞芬, 孙国武, 赵兵科等. 2008. 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. 高原气象, 27(增刊): 98-108

章丽娜, 林鹏飞, 熊喆等. 2011. 热带大气季节内振荡对华南前汛期降水的影响. 大气科学, 35(3): 560-570

张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件. 大气科学, 27(6): 1018-1030

周兵, 文继芬. 2007. 1998年夏季我国东部降水与大气环流异常及其低频特征. 应用气象学报, 18(2): 129-136

朱乾根, 徐国强. 2000. 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, 21(3): 239-248

He J H, Lin H, Wu Z W. 2011. Another look at influences of the Madden-Julian Oscillation on the wintertime East Asian weather. J Geophys Res, 116: D03109, doi: 10.1029/2010JD014787

Jeong J H, Kim B M, Ho C H, et al. 2008. Systematic variation in wintertime precipitation in East Asia by MJO-Induced extratropical vertical motion. J Climate, 21(4): 788-801

Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al. 2011. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. Adv Atmos Sci, 28(3): 521-533

Lau K M, Yang G J, Shen S H. 1988. Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia. Mon Wea Rev, 116(1): 18-37

Lau K M, Yang S. 1996. Seasonal variation, abrupt transition, and intraseasonal variability associated with the Asian summer monsoon in the GLA GCM. J Climate, 9(5): 965-985

Liu H B, Zhang D L, Wang B. 2008. Daily to submonthly weather and climate characteristics of the summer 1998 extreme rainfall over the Yangtze River Basin. J Geophys Res, 113: D22101, doi: 10.1029/2008JD010072

Yang H, Li C Y. 2003. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Changjiang-Huaihe River Basin. Adv Atmos Sci, 20(4): 540-553

Yang J, Wang B, Wang B, et al. 2010. Biweekly and 21-30-day variations of the subtropical summer monsoon rainfall over the Lower Reach of the Yangtze River Basin. J Climate, 23(5): 1146-1159

Zhang L N, Wang B Z, Zeng Q C. 2009. Impact of the Madden-Julian oscillation on summer rainfall in southeast China. J Climate, 22(2): 201-216

Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. J Geophys Res, 110: D08104, doi: 10.1029/2004JD005413