

许乐心, 张人禾, 齐艳军. 2017. 长江中游和下游夏季降水季节内振荡的差异 [J]. 大气科学, 41 (6): 1125–1140. Xu Lexin, Zhang Renhe, Qi Yanjun. 2017. Differences in intraseasonal summer rainfall oscillation between the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (6): 1125–1140, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.17112.

长江中游和下游夏季降水季节内振荡的差异

许乐心¹ 张人禾^{2, 1} 齐艳军¹

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 复旦大学大气科学研究院, 上海 200433

摘 要 利用 1979~2013 年中国站点逐日降水资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 对长江中下游夏季降水的季节内振荡最显著周期进行了分析研究。结果表明长江中游最显著周期为 10~30 天, 长江下游最显著周期为 30~60 天。为了揭示这种差异产生的物理原因, 进一步利用位相合成的方法对这两个区域不同周期的季节内振荡降水、高低空风场和高度场以及垂直结构和水汽等循环过程的演变特征进行分析。在 200 hPa 环流场上, 长江中游的降水主要受到高纬度自西向东传播的波列影响, 而长江下游的降水与鄂霍次克海的高度场的变化相关。在风场的垂直涡度和散度的位相结构演变过程中, 10~30 天的垂直涡度和散度有自北向南的移动, 30~60 天的垂直涡度和散度在长江以南地区有自南向北的传播。水汽输送的位相发展过程表明, 长江中游的水汽分别来自于南海的向北输送和长江以北地区向南的水汽输送; 长江下游地区的水汽则主要来自于热带东印度洋经孟加拉湾的向东输送并在南海的北向输送, 以及西太平洋水汽向西输送到南海再向长江下游的输送。从高层大尺度环流场和整层积分的水汽通量输送上解释了长江中游 10~30 天降水的自北向南移动, 和长江下游 30~60 天降水自南向北传播的原因。

关键词 长江中下游 夏季降水 季节内振荡 最显著周期

文章编号 1006-9895(2017)06-1125-16

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.17112

Differences in Intraseasonal Summer Rainfall Oscillation between the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

XU Lexin¹, ZHANG Renhe^{2, 1}, and QI Yanjun¹

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433

Abstract The most significant climatological intraseasonal oscillation (ISO) periods of summer rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River (M-LYR) are investigated by using the gauge-based daily precipitation analysis data of China and the NCAR/NCEP reanalysis data from 1979 to 2013. It is found that the oscillation periods of summer rainfall at the intraseasonal timescale show remarkable difference between the MYR and LYR. The 10–30-day oscillation is the primary mode over the MYR, while the longer period of 30–60-day dominates the LYR. The phase composite analysis is applied to reveal evolutions of intraseasonal circulation and vertical structure associated with these two periods

收稿日期 2017-01-18; 网络预出版日期 2017-03-16

作者简介 许乐心, 女, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事夏季降水的季节内振荡研究。E-mail: xlxcams@163.com

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) 2015CB453203, 国家重点研发计划 2016YFA0600602、2016YFA0601504, 国家自然科学基金项目 41675068, 中国气象科学研究院基本科研业务费 2015Z001

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2015CB453203), National Key Research and Development Program Approved by Ministry of Science and Technology (Grants 2016YFA0600602, 2016YFA0601504), National Nature Science Foundation of China (Grant 41675068), Basic Research Fund of the Chinese Academy of Meteorological Sciences (Grant 2015Z001)

of climatological ISO precipitation over the Yangtze River. In the upper troposphere at 200 hPa, it shows that a wave train over the mid-high latitudes propagates eastward, affecting the summer rainfall over MYR, while the southwestward propagation of the weakened Okhotsk blocking high is associated with the 30–60-day rainfall oscillation over LYR. The vertical structures of wind vorticity and divergence/convergence exhibit different features during their moving toward the Yangtze River. 10–30-day anomalous vorticity and divergence/convergence move southward toward the MYR; however, the 30–60-day anomalies move northward from the tropics. Atmospheric moisture from the South China Sea and from north of the Yangtze River converges over MYR, leading to favorable condition for the occurrence of rainfall. In contrast, the moisture in the LYR primarily comes from the tropics. Large amounts of atmospheric moisture originate from the eastern Indian Ocean, move through the Bay of Bengal and the South China Sea, converge with moisture transported westward from the western tropical Pacific, and then move northward, reaching the LYR. The results explain from the perspective of upper-level circulation and vertically integrated moisture flux why the 10–30-day oscillation mode of rainfall over MYR propagates southward, while the 30–60-day oscillation mode of rainfall over LYR propagates northward.

Keywords Middle–lower reaches of the Yangtze River, Summer rainfall, Intraseasonal oscillation (ISO), Most significant period

1 引言

季节内振荡 (Intraseasonal Oscillation, 简称 ISO) 是大气变异中最显著的一种周期振荡现象, 最早是 Madden and Julian (1971, 1972) 发现的周期为 40~50 天、从热带印度洋东传至东太平洋的大气低频振荡现象, 命名为 MJO (Madden-Julian Oscillation)。之后大量的研究指出大气季节内振荡在时间上有较宽的频谱, 在热带周期主要集中在 20~90 天 (Murakami and Nakazawa, 1985; Lau and Chan, 1986; Wang and Rui, 1990), 在亚洲夏季风区还存在 10~20 天的准双周振荡 (Krishnamurti and Ardanuy, 1980; Lau and Lau, 1990; Wen and Zhang, 2008)。因此, 将 10~90 天大气要素的周期变化统称为大气季节内振荡 (ISO)。

很多学者研究了中国夏季降水和季节内振荡的关系。Lau and Yang (1988) 证实了中国夏季降水存在显著的季节内振荡特征, 发现从华南的季风爆发前降水、梅雨期降水、东北降水, 以及 9 月之后的台风降水, 都存在明显的 40 天振荡。不仅中国夏季降水的主雨带存在季节内振荡, 而且季节内振荡活动的锁相与雨带的季节性移动和北跳也有密切关系 (Lau et al., 1988; 何金海等, 1995)。Chen et al. (2001) 更进一步指出季风的爆发、入梅日期和暴雨的产生都与低频气旋的活动有关。华南前汛期降水存在明显的准双周振荡的特征 (唐天毅等, 2007; 纪忠萍等, 2011; 曹鑫等, 2012; Hong and Ren, 2013), 但对个例年份的研究指出华南前汛期降水也具有 30~60 天的振荡特征 (胡娅敏等, 2014; 李丽平等, 2014)。东亚强季风年, 准 30~60 天振

荡的影响显著, 容易造成长江中下游多雨; 东亚弱季风年, 10~20 天低频振荡为主要的振荡周期, 容易造成长江中下游干旱 (毛江玉和吴国雄, 2005; 据建华和赵尔旭, 2005; 王遵娅和丁一汇, 2008)。也有不少针对黄河流域夏季降水季节内振荡的研究, 指出 30~60 天季节内振荡主要集中在黄河中下游地区, 10~20 天季节内振荡降水呈现出整体性的分布 (黄嘉佑和符长锋, 1993; 王文等, 2013)。针对我国东北地区, 刘慧斌等 (2012) 通过对东北冷涡季节内振荡的研究, 发现东北冷涡的季节内振荡会对夏季降水的季节内振荡也存在影响。

夏半年季风的爆发、中断与 ISO 及其传播关系密切, 且不同年份季风爆发的日期较为固定。有研究指出, 夏季风季节内变率与季风降水的 ISO 存在明显的锁相特征 (Nakazawa, 1992; 何金海等, 1995)。Wang and Xu (1997) 将这种存在于气候平均资料中的 ISO 称为气候季节内振荡 (Climatological intraseasonal oscillation, 简称 CISO), 且证明了 CISO 在统计上的显著性和动力上的协调性。王遵娅和丁一汇 (2008) 对 1951~2003 年中国 740 站逐日降水资料进行分析, 发现气候季节内振荡在全国范围内均有存在。30~60 天周期振荡主要集中在长江中下游至华南一带; 而在中国北部及西部的大范围地区, 则以 10~30 天周期为主。

以上研究表明, 我国夏季降水存在着明显的季节内振荡特征, 且不同区域夏季降水季节内振荡的显著周期存在差异。长江中下游位于亚洲季风区, 受季风影响旱涝频发, 是研究的重点区域。Yang et al. (2010) 对长江中下游流域地区准双周和 21~30 天季节内振荡的来源路径和循环演变过程进行了

诊断分析, 指出准双周振荡主要受对流层高层向东南方向传播的欧亚大陆波列的控制, 而 21~30 天振荡主要和西太平洋副热带高压的季节内振荡有关。鄂霍次克海阻塞高压也有利于中高纬低频气旋南下并与低纬系统发生作用, 进而导致长江中下游低频降水的产生 (韩荣青等, 2006)。

对于长江中下游来说, 以上所述的不同研究者得到了不同周期的季节内振荡, 如 10~20 天、15~35 天、20 天、21~30 天、40 天、30~60 天等。在长江中下游区域, 如此之多的季节内振荡周期不仅对认识长江中下游的季节内振荡现象带来了复杂性、同时也对短期气候预测带来了极大的不便。本文将针对这一问题, 分析长江中下游地区 1979~2013 年平均的夏季 (5~10 月) 降水的气候季节内振荡 (以下简称为季节内振荡, ISO) 特征, 厘清长江中下游主要不同周期季节内振荡现象的区域分布及其物理成因。本文第 2 节给出了资料和方法, 第 3 节分析了长江中下游夏季降水季节内振荡的区域差异, 第 4~6 节从大气环流和水汽输送探讨了长江中下游夏季降水季节内振荡区域差异的产生原因, 第 7 节为本文的结论。

2 资料与方法

本文采用的资料包括: (1) 中国气象局国家气象信息中心提供的全国地面气候资料日值数据集 (V3.0) 逐日降水资料, 时间选取 1979~2013 年, 共包含 824 个台站。(2) 美国环境预报中心的 NCEP-DOE Reanalysis I 逐日再分析资料, 要素场包括位势高度, 水平 u 、 v 风场, 比湿等。要素水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 选取时段与台站资料相同。

本文将长江中下游区域取成 ($27^{\circ} \sim 32^{\circ}N$, $106^{\circ} \sim 123^{\circ}E$), 在该区域内共有 130 个站点。采用功率谱分析、墨西哥帽小波分析法提取长江中下游区域对应台站夏季 (5~10 月) 降水季节内振荡的显著周期, 依据显著周期的差异分析了长江中下游季节内振荡的分布特征, 并利用位相合成的方法讨论不同区域降水季节内振荡周期对应高低空环流场的差异。

3 长江中下游夏季降水季节内振荡的区域差异

为了讨论长江中下游区域夏季季节内时间尺度降水的特征, 利用 35 年的台站降水数据, 对该

区域 130 个台站气候平均的逐日夏季降水进行 10~90 天 Lanczos 带通滤波, 提取各台站夏季季节内尺度降水分量。利用功率谱依次提取长江中下游区域夏季降水的最显著振荡周期, 对各个台站通过 95% 显著性检验的周期值打点显示 (图 1)。

从图 1 可以很清楚地发现, 在长江中游和下游两个区域的显著周期存在明显差异, 长江中游降水的主要周期集中在 10~30 天, 而长江下游降水周期为 30~60 天。为了更进一步讨论这两个区域不同周期降水的差异, 选取长江中游 ($27^{\circ} \sim 32^{\circ}N$, $106^{\circ} \sim 115^{\circ}E$) 和长江下游 ($27^{\circ} \sim 32^{\circ}N$, $115^{\circ} \sim 123^{\circ}E$) 来对比分析两个区域的不同周期季节内振荡特征。为提取这两个区域夏季降水的季节内信号, 本文采用“墨西哥帽”小波分析方法对区域平均的季节降水进行处理, 讨论这两个区域夏季降水的季节内振荡周期特征。

小波分析的结果显示, 在区域平均的长江中游和下游夏季降水存在显著不同的季节内振荡周期。在长江中游地区 (图 2), 5~8 月夏季降水的季节内振荡强度最强 (图 2a), 季节内振荡的周期主要集中在 10~30 天 (通过 95% 置信水平检验), 而其他周期的季节内振荡在统计上不显著 (图 2b、2c)。在长江下游地区 (图 3), 区域平均降水的振荡周期要明显长于长江中游 (图 3b), 30~60 天是长江下游的主振荡周期, 10~30 天的季节内振荡在统计上不显著 (图 3c)。

为了更进一步揭示长江中游和下游不同降水周期的季节内振荡差异, 本文对这两个区域的夏季降水采用分位相合成的办法, 对完整的季节内振荡循环进行对比分析。从图 4 可以看出降水的原始序列与滤波序列的极值有很好的对应关系, 其中这两个序列在长江中游地区相关系数为 0.32, 在长江下游为 0.42, 均通过了 99% 的置信水平检验。5~8 月份是长江中游和下游降水最集中的时段, 此时 ISO 也最强。

对这两个区域, 对滤波序列选取振幅大于 1 个标准差的循环进行位相合成, 来分析两个区域不同周期季节内降水的时空演变特征。由图 4a 可以看出, 在长江中游共有 8 个完整的振荡循环, 在长江下游有 1 个完整的循环。将每个循环分为 8 个位相, 如图 4a 所示, 其中第 3 为最干位相, 第 7 为最湿位相, 第 1、5 为转换位相, 2、4、6、8 则表示低频振荡达到该循环振幅最大值或最小值一半。

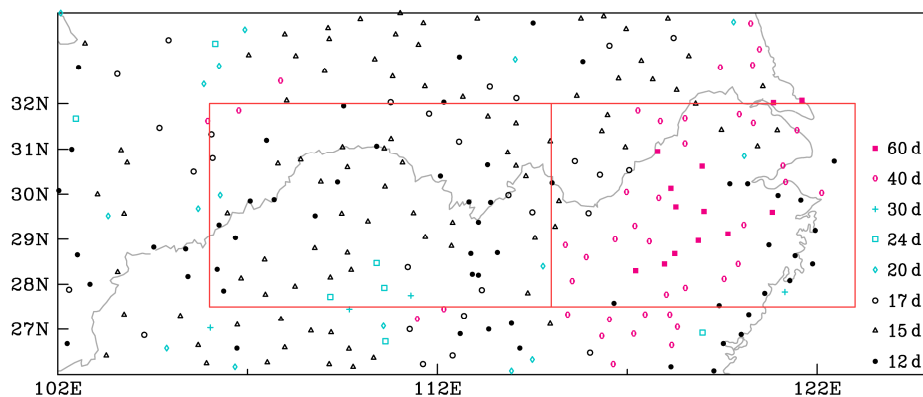


图 1 1979~2013 年长江中下游区域夏季降水季节内振荡最显著周期分布, 其中红色方框区域为本文选取的长江中游 (27°~32°N, 106°~115°E) 和长江下游地区 (27°~32°N, 115°~123°E)

Fig. 1 Distribution of the most significant intraseasonal oscillation periods of summer rainfall over the middle reaches of the Yangtze River (MYR) (the left red box; 27°~32°N, 106°~115°E) and the lower reaches of the Yangtze River (LYR) (the right red box; 27°~32°N, 115°~123°E)

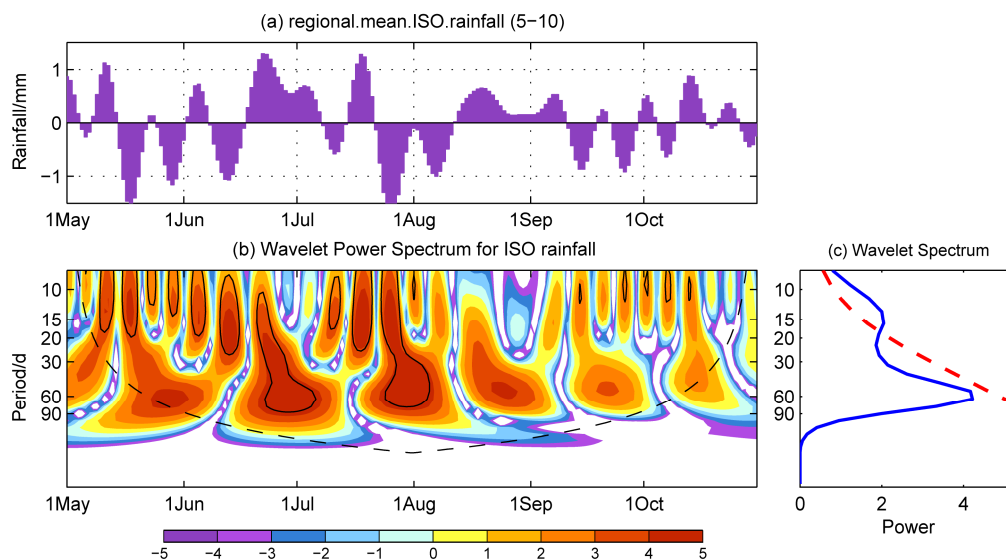


图 2 长江中游季节内尺度降水序列的小波图: (a) 逐日季节内尺度降水序列; (b) 季节内尺度降水序列的小波分析频谱; (c) 小波全谱

Fig. 2 Wavelet spectra of the time series of intraseasonal rainfall over the MYR: (a) Time series of the ISO (Intraseasonal Oscillation) rainfall; (b) wavelet power spectrum of intraseasonal rainfall; (c) full wavelet spectrum

根据上文中对长江流域夏季降水 CISO 周期循环及位相的定义, 分别讨论长江中游和下游不同周期的季节内降水的位相演变特征。图 5 给出了 10~30 天滤波全国夏季降水的各位相合成演变图。图中黑色方框为长江中游区域, 从图 5 可看出, 全国夏季降水 10~30 天周期变化最显著的区域出现在长江中游。第 3 位相是 10~30 天降水的最干位相, 对应着长江中游降水的负异常中心, 此时长江中游地区处于干旱少雨阶段。第 4~5 位相, 降水负异常中心南移, 强度也有所减弱。从第 5 位相开始, 在华北地区开始出现正降水异常, 随着位相演变,

降水正异常的强度向南增加, 到达长江流域, 同时负降水异常明显在华南地区减弱。第 7 位相时, 长江中游地区被降水正异常中心占据, 对应于长江中游的最大湿位相。自此从第 3 位相至第 7 位相, 完成了从干到湿的位相转换。从第 8 位相至第 3 位相则对应着从湿到干的位相转换, 长江中游地区的降水也由正异常转换为负异常。从图 5 中各位相的演变, 长江中游 10~30 天的季节内降水表现出从北向南发展增强的特征。

图 6 给出的是经过 30~60 天滤波后的全国夏季降水的各位相合成图。图中黑色方框指前文中定

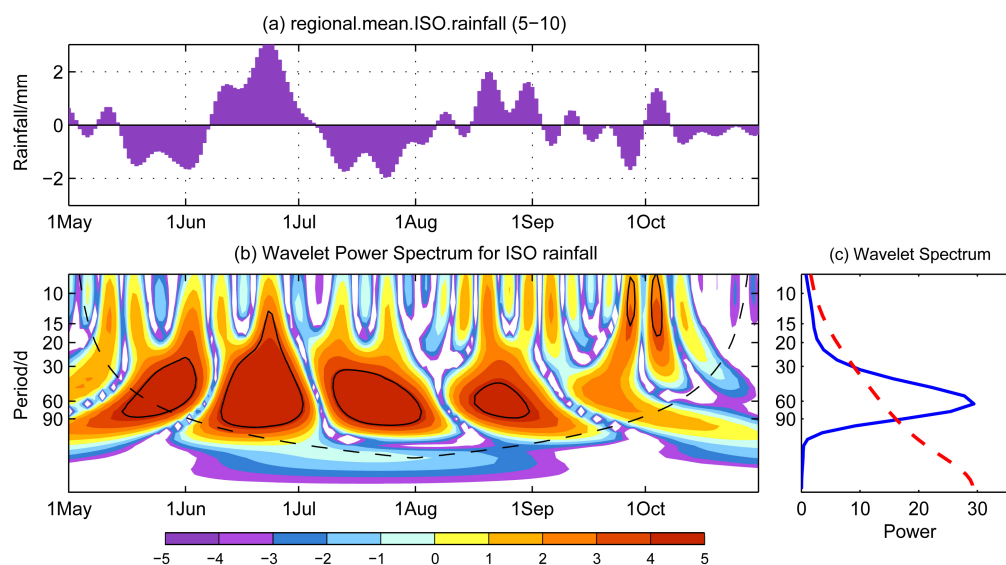


图3 长江下游季节内尺度降水序列的小波图: (a) 逐日季节内尺度降水序列; (b) 季节内尺度降水序列的小波分析频谱; (c) 小波全谱

Fig. 3 Wavelet spectra of the time series of intraseasonal rainfall over the LYR: (a) Time series of the ISO rainfall; (b) wavelet power spectrum of intraseasonal precipitation; (c) full wavelet spectrum

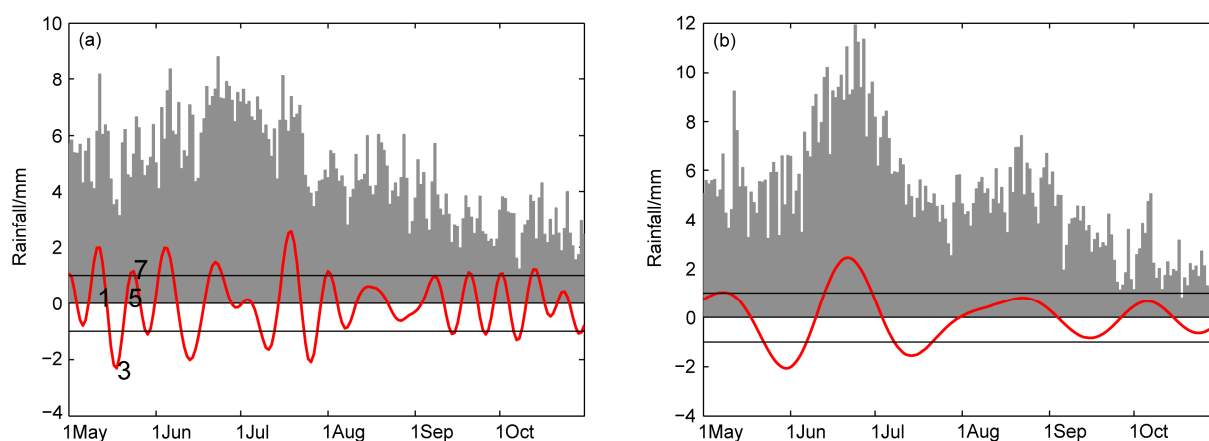


图4 1979~2013年5~10月降水原始序列(直方图,单位:mm)和标准化的滤波序列(红色曲线,单位:mm): (a) 长江中游地区(10~30天滤波); (b) 长江下游地区(30~60天滤波)。黑线为正/负1倍标准差,数值表示准双周振荡位相

Fig. 4 Time series of daily rainfall in summer (gray bars; units: mm) and standardized series of the filtered rainfall anomaly (red solid line; units: mm): (a) Over the MYR (10-30-day filtered); (b) over the LYR from 1979 to 2013 (30-60-day filtered). Black lines represent ± 1.0 times of standard deviation of the ISO rainfall, numbers represent the phase of the biweekly oscillation

义的长江下游区域,该区域为30~60天周期全国夏季降水变化最大的区域。与图5类似,最干的第3位相,对应着长江下游地区的负降水异常,下游处于少雨阶段。第4位相,负降水中心逐步向北移动,干旱范围也随之减小,同时在华南地区出现降水正异常。第5~6位相时,降水正异常从华南向北扩展增强,此时负异常已北移到30°N以北地区。到第7位相,长江下游地区完全被降水正异常控制,该地区产生强降水,长江以北的负异常继续减弱直

到消失。长江下游地区的季节内降水从第3到第7位相完成了降水负异常到正异常的一次转换。从第8位相到第3位相,长江下游地区的降水正异常以及华南地区的降水负异常中心逐渐北移,从而完成长江下游地区降水从正到负的循环。由此可看出,长江中游10~30天降水与长江下游30~60天降水的移动完全不同,前者由北向南移动,而后者主要表现出自南向北的移动特征,这是受到30~60天对流层低层环流从热带地区向北传播的影响(齐艳

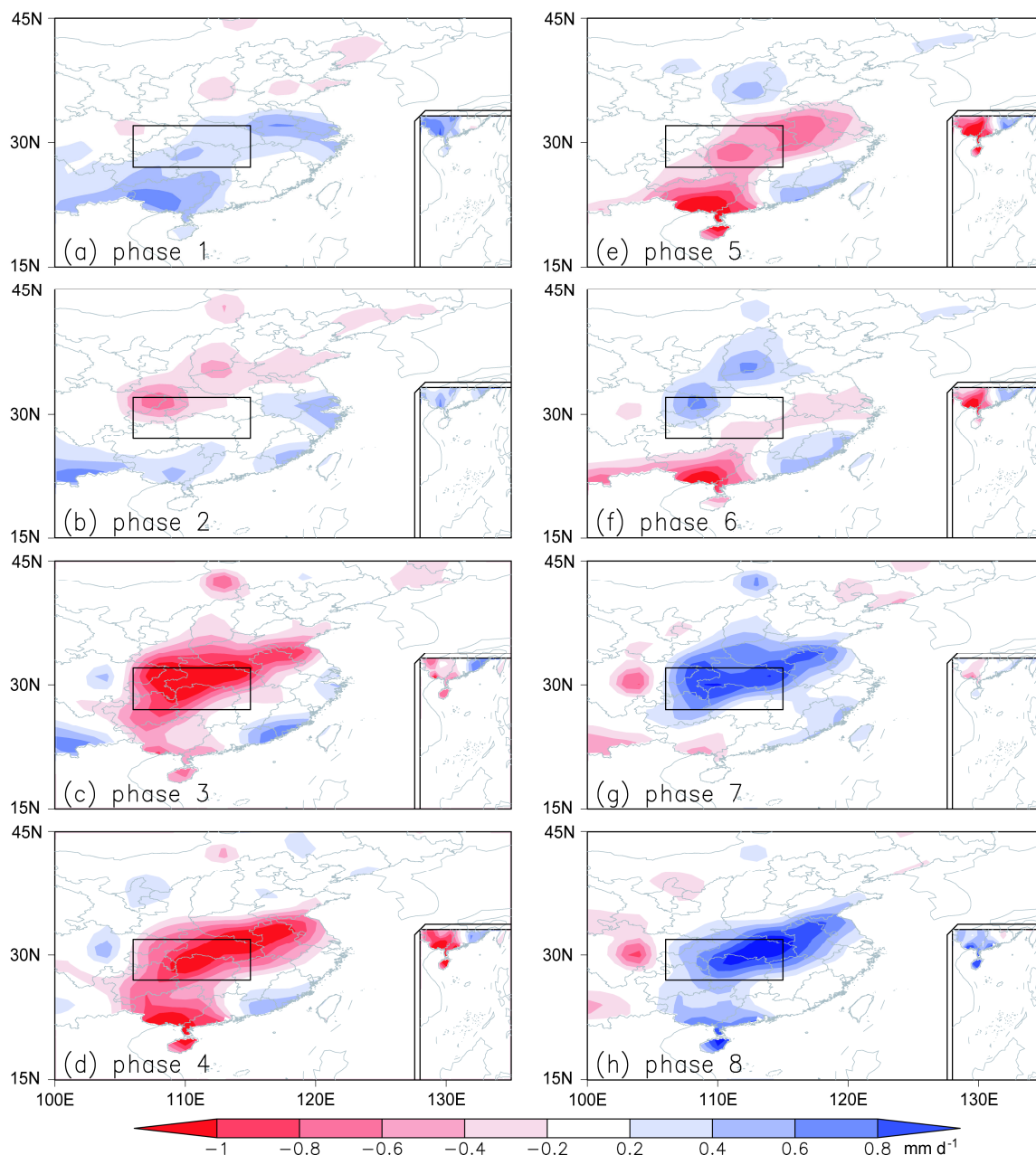


图5 10~30天夏季降水的各位相合成(单位: mm d^{-1}), 黑色方框代表长江中游地区

Fig. 5 Composite 10–30-day filtered summer precipitation (units: mm d^{-1}). The black box represents the MYR region

军等, 2016)。

4 与季节内降水相对应的环流演变特征

4.1 长江中游 10~30 天季节内振荡的环流特征

环流形式的不同往往会造成降水落区的差异, 针对长江中下游流域夏季降水表现出的不同振荡周期, 重点讨论对流层高低层高度场和风场的季

节内位相演变特征, 并分析造成长江中游和下游季节内降水差异的大尺度环流背景。图 7 是 10~30 天滤波的 850 hPa 高度场和风场的 8 个位相合成图。在长江中游干位相发展阶段(第 1 到第 3 位相), 乌拉尔山地区以西和以东分别有高压和低压系统发展, 并随位相的推移不断东伸并南移。低压系统东部的南风异常, 到第 3 位相时出现在长江中游以北, 减弱了北方冷空气, 不利于长江中游降水的发

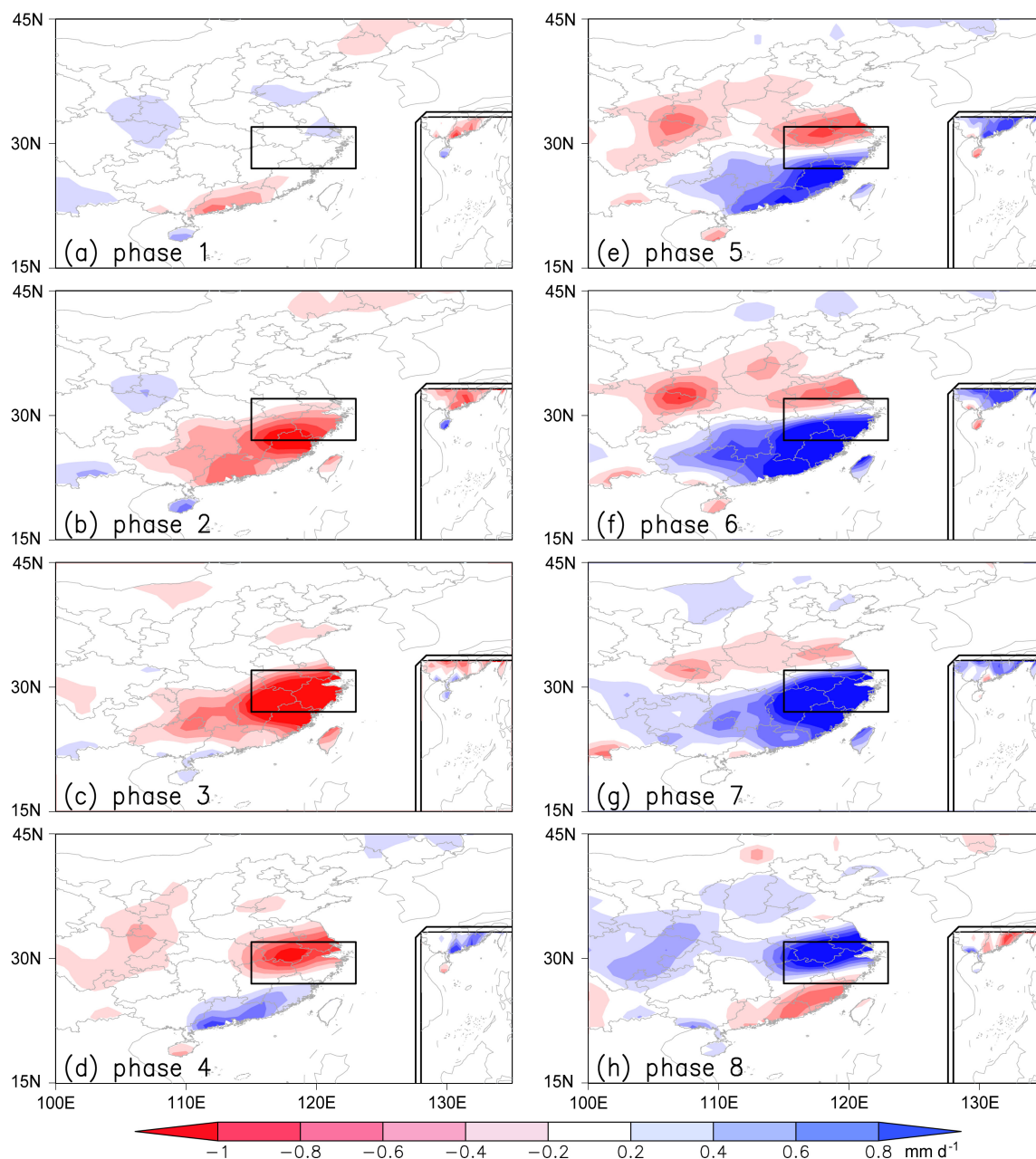


图 6 30~60 天夏季降水的各位相合成 (单位: mm d^{-1}), 黑色方框代表长江下游地区

Fig. 6 Composite 30~60-day filtered summer precipitation (units: mm d^{-1}). The black box represents the LYR region

生, 因此形成了最干位相。而在长江中游湿位相发展阶段 (第 5 到第 7 位相), 乌拉尔山以东有高压系统发展, 其东部为北风异常, 到第 7 位相时出现在长江中游以北, 增强了北方冷空气, 有利于长江中游降水的发生, 因此形成了最湿位相。

在高层 10~30 天的 200 hPa 环流场上 (图 8), 高纬地区存在着波列结构。长江中游地区的气旋和反气旋中心表现出局地振荡的特征。在第 3 位相时,

长江中游地区上空对应气旋式环流异常, 引起高层辐合, 产生下沉运动, 使得该时段干旱少雨。第 7 位相时, 长江中游上空是反气旋异常, 低层是气旋式环流异常, 高层辐散低层辐合的有利配置, 导致该地区产生降水。

4.2 长江下游 30~60 天季节内振荡的环流特征

图 9 给出了对应长江下游地区 30~60 天降水的 850 hPa 高度场和风场的合成位相演变过程。在

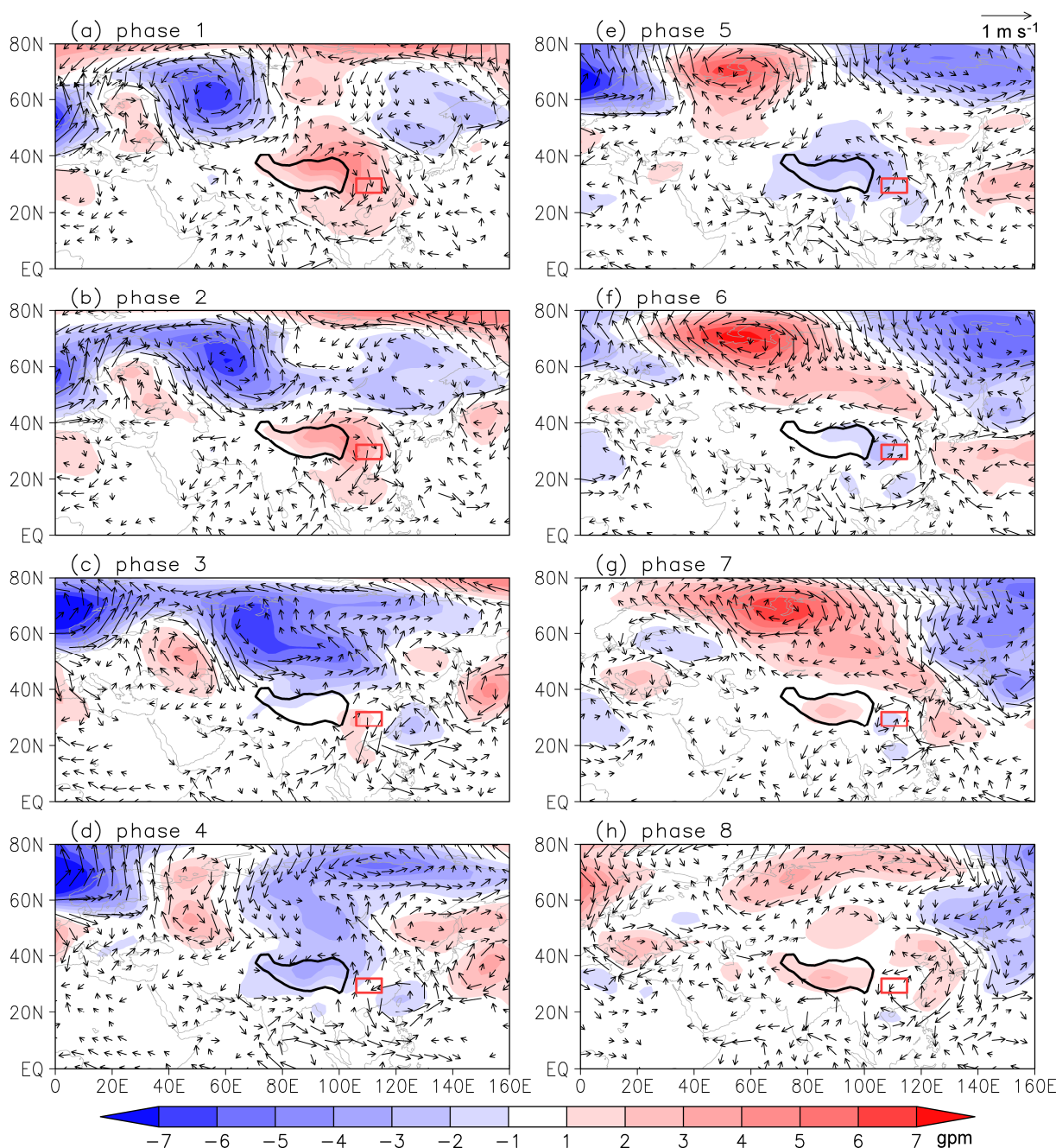


图7 长江中游(红色方框)降水10~30天振荡各位相合成的850 hPa低频位势高度场(阴影, 单位: gpm)与850 hPa低频风场(矢量, 单位: m s^{-1}), 只画出大于 0.1 m s^{-1} 的风矢量, 黑线代表青藏高原高度大于3000 m的部分

Fig. 7 Composite 10–30-day filtered 850 hPa geopotential height (shading; units: gpm) and wind (vectors; units: m s^{-1}) over the MYR (the red box). Only wind speeds larger than 0.1 m s^{-1} are shown. The black contour indicates the Tibet Plateau region with elevations exceeding 3000 m

长江下游干位相发展阶段(第1到第3位相), 印度半岛的高值系统随位相推移向东北移动, 同时伴随着鄂霍次克海地区的低值系统中心分裂为两个中心, 其北部低值中心迅速西退, 南部低值中心南压。到第3位相时, 南部低值系统被限制在 30°N 附近的西北太平洋海域, 长江下游以南受到高低值

系统之间的北风控制, 不利于南方暖湿空气向长江下游的输送, 导致降水减少。在长江下游湿位相发展阶段(第5到第7位相), 印度半岛的低值系统向东北移动, 同时鄂霍次克海高值中心分裂, 两者共同作用, 导致了在第7位相时我国大范围的位势高度负异常和其西北太平洋海域的位势高度正异

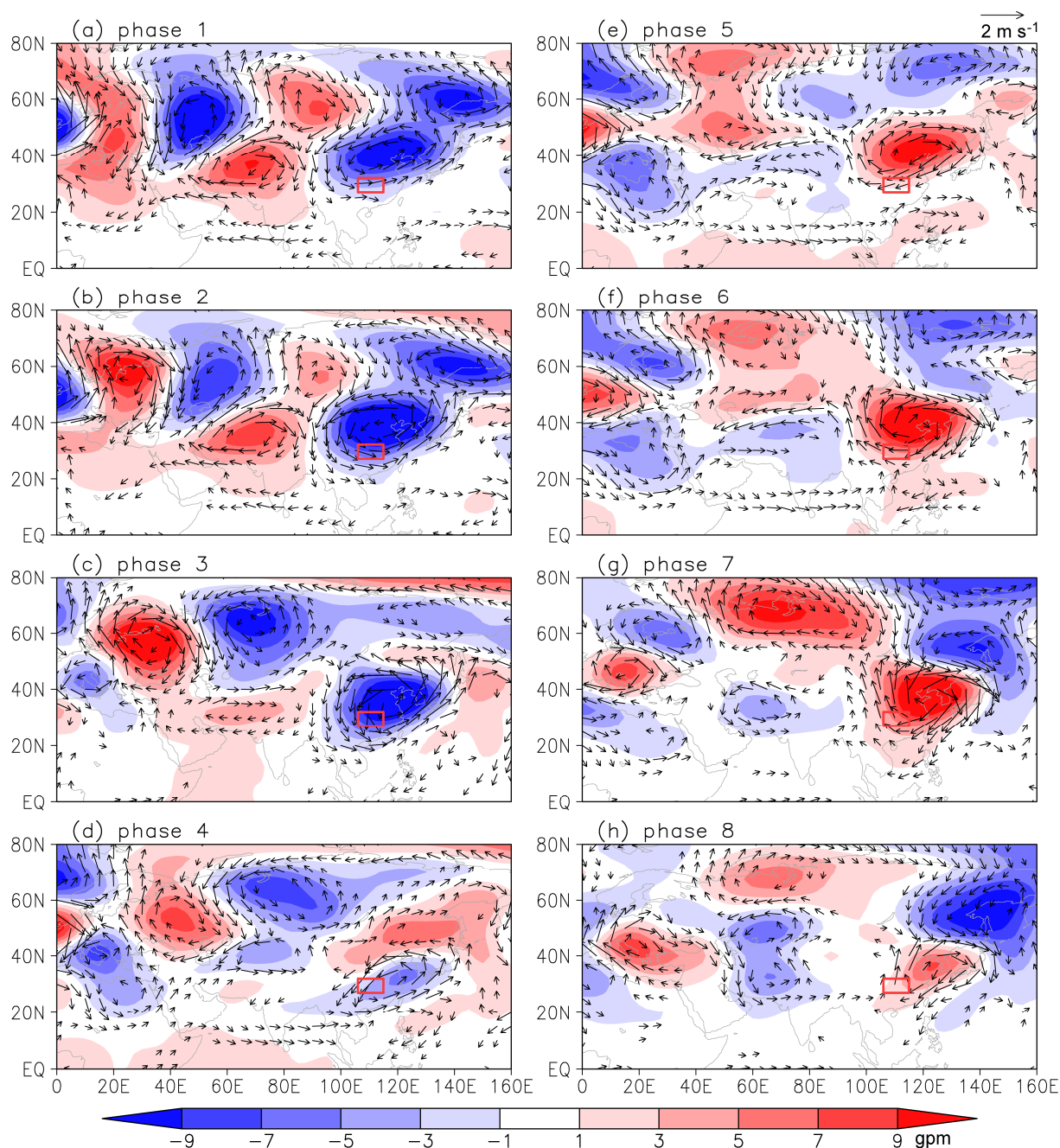


图 8 长江中游 (红色方框) 降水 10~30 天振荡各位相合成的 200 hPa 的低频位势高度场 (阴影, 单位: gpm) 与低频风场 (矢量, 单位: m s^{-1}), 只画出大于 0.2 m s^{-1} 的风矢量

Fig. 8 Composite 10–30-day filtered 200 hPa geopotential height (shading; units: gpm) and wins (vectors; units: m s^{-1}) over the MYR (the red box). Only wind speeds larger than 0.2 m s^{-1} are shown

常, 在长江下游以南两个系统之间的南风异常将南方暖湿空气向长江下游输送, 有利于降水的产生。

对应长江下游 30~60 天降水的 200 hPa 低频环流场和风场的演变如图 10 所示。在长江下游干位相发展阶段 (第 1 到第 3 位相), 鄂霍茨克海附近存在的低值系统不断加强并向西向南移动; 在长江

下游最干位相 (第 3 位相) 时, 该低值系统移动到长江下游的东北部, 引起空气质量辐合, 产生下沉运动, 对应降水负异常。在长江下游湿位相发展阶段 (第 5 到第 7 位相), 鄂霍茨克海地区的位势高度正异常西移南压。在第 7 位相时, 该位势高度正异常移动至长江下游的东北侧, 引起空气质量辐

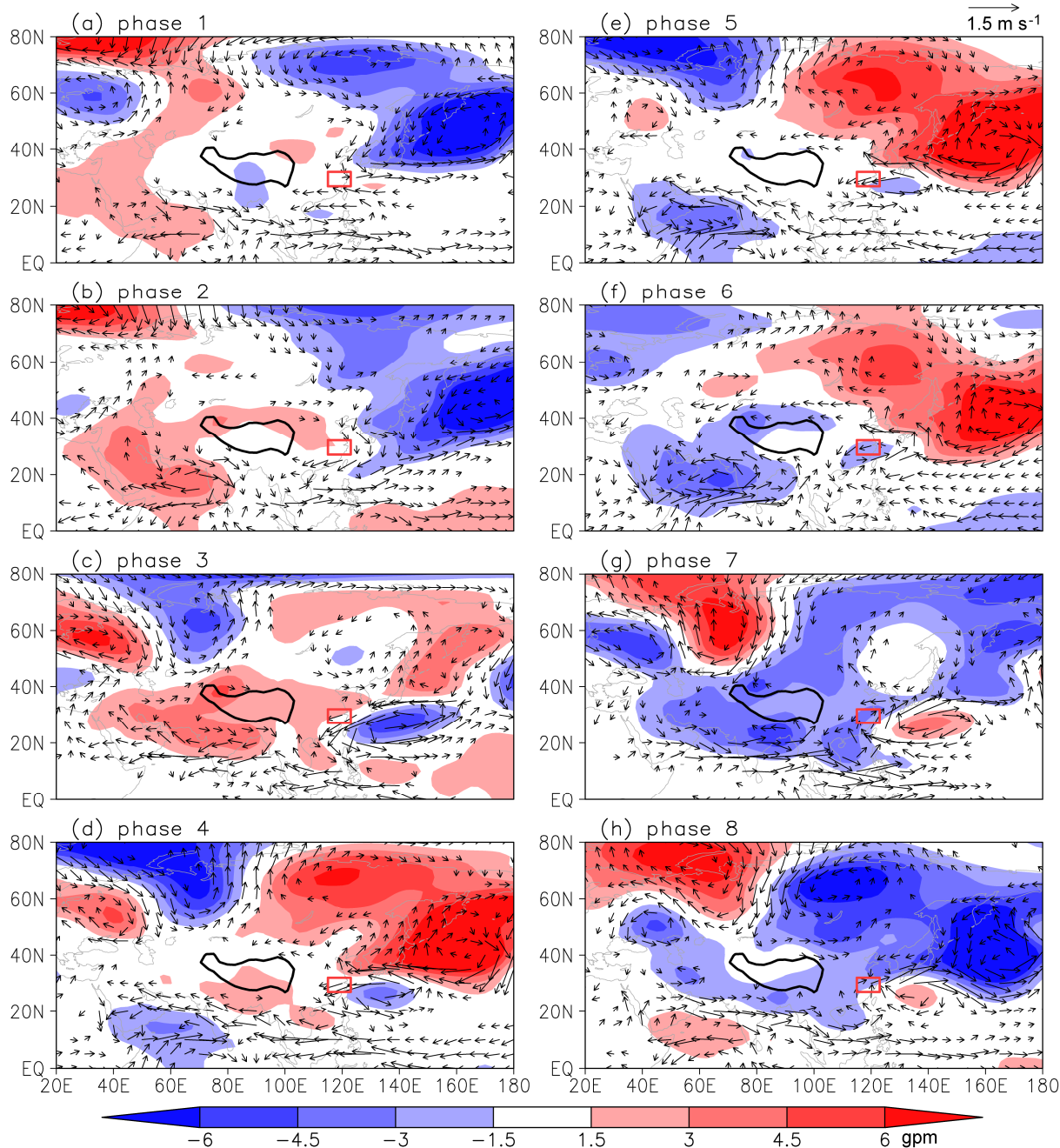


图9 长江下游(红色方框)降水30~60天振荡各位相合成的850 hPa的低频位势高度场(阴影,单位:gpm)与低频风场(矢量,单位: m s^{-1}),只画出大于 0.15 m s^{-1} 的风矢量,黑线代表青藏高原高度大于3000 m的部分

Fig. 9 Composite 30–60-day filtered 850 hPa geopotential height (shading; units: gpm) and wind (vectors; units: m s^{-1}) over the LYR (the red box). Only wind speeds larger than 0.15 m s^{-1} are shown. The black contour indicates the Tibet Plateau region with elevations exceeding 3000 m

散,产生上升运动,对应降水正异常。

5 与季节内降水相对应的涡度和散度的垂直结构

为了了解在季节内振荡尺度上,与长江中游和下游两个区域夏季季节内尺度降水相对应的大气

垂直结构的差异,分别给出了这两个区域经过10~30天和30~60天滤波的风场涡度和散度的高度—纬向的位相合成图。在长江中游地区的涡度和散度剖面图中(图11),在最干的第3位相,对流层低层850 hPa以下是风场辐散并伴随负涡度,而在对流层中上层表现为一致的正涡度和辐合中心。对流

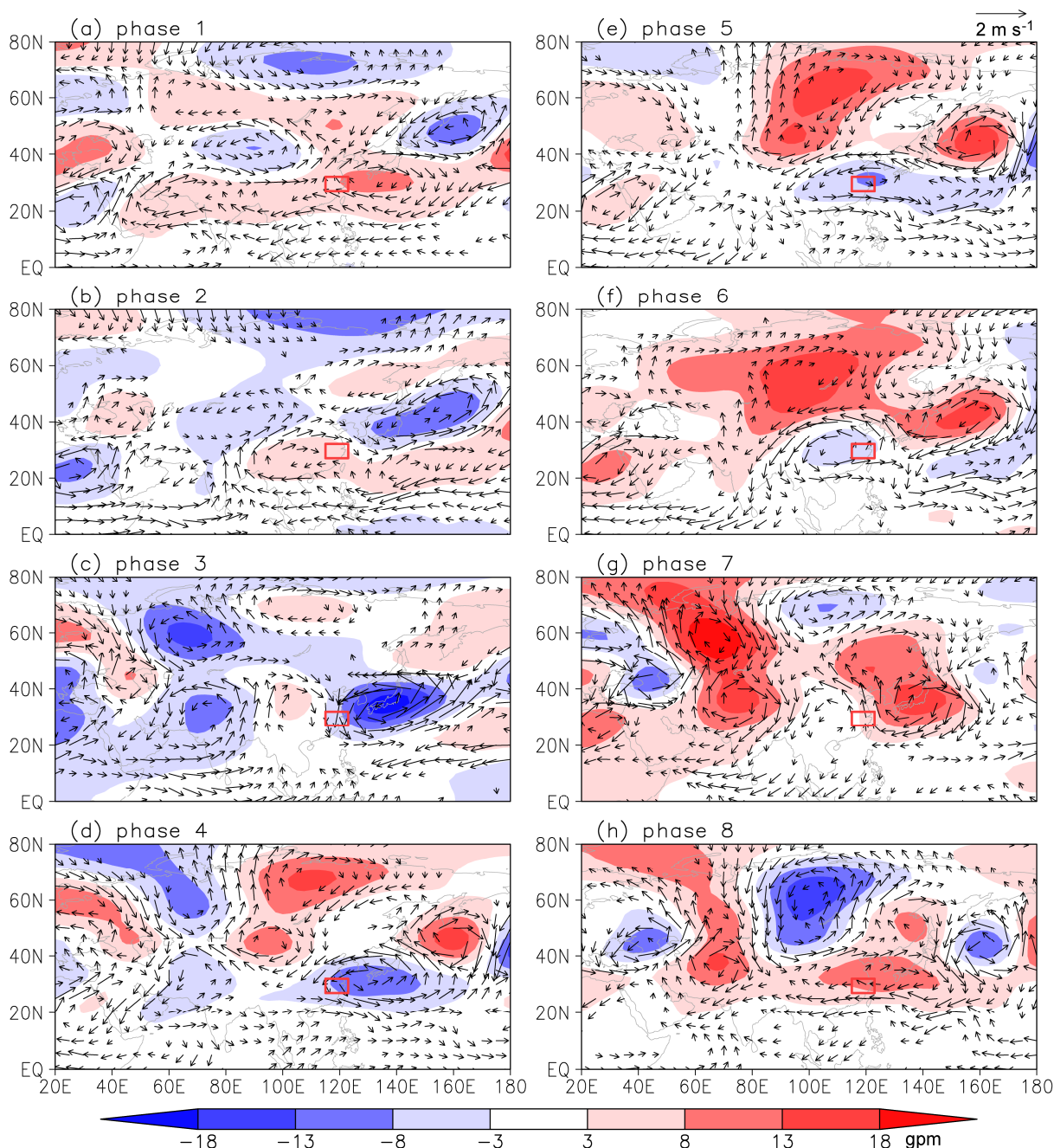


图 10 长江下游(红色方框)降水 30~60 天振荡各位相合成的 200 hPa 的低频位势高度场(阴影, 单位: gpm)与低频风场(矢量, 单位: m s^{-1}), 只画出大于 0.2 m s^{-1} 的风矢量

Fig. 10 Composite 30-60-day filtered 200 hPa geopotential height (shading; units: gpm) and wind (vectors; unit: m s^{-1}) over the LYR (the red box). Wind speeds larger than 0.2 m s^{-1} are shown

层高低层的涡度和散度异常配置, 导致了长江中游地区降水的负异常。最大降水的第 7 位相则表现出反相的结构配置, 对流层低层风场辐合, 高层辐散, 有利于降水发生。从各位相的发展演变看, 散度场和涡度场在低层和高层都表现出自北向南的移动特征, 与降水的演变过程相对应。

对于长江下游地区 30~60 天的散度与涡度垂

直结构(图 12), 其位相发展与演变和长江中游 10~30 天的垂直结构相类似, 在最干位相时, 对流层低层为负涡度, 低层辐散高层辐合; 而最湿位相的对流层低层为正涡度且低层辐合高层辐散, 为长江下游的上升运动提供了充足的动力条件。同时注意到, 与长江中游 10~30 天各位相演变不同的是, 长江下游 30~60 天风场垂直结构有自南向北的传

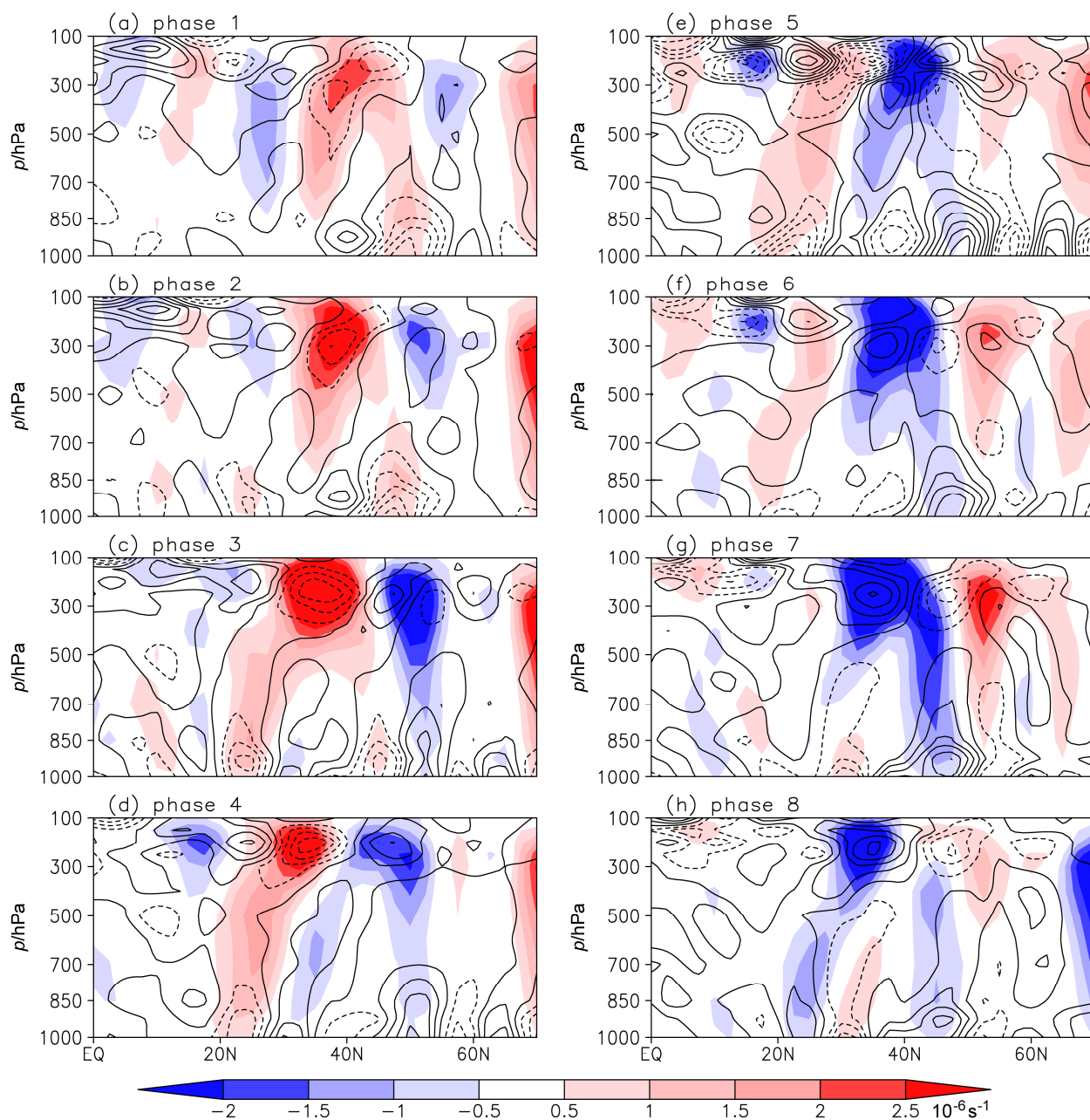


图 11 经过 ($106^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 平均) 剖面的 10~30 天滤波的涡度场 (阴影, 单位: 10^{-6} s^{-1}) 和散度场 (等值线, 实线为正值, 虚线为负值, 单位: 10^{-6} s^{-1} , 等值线间隔为 10^{-7} s^{-1}) 的各位相合成

Fig. 11 Composite vertical cross sections of 10–30-day filtered vorticity (shading; units: 10^{-6} s^{-1}) and divergence (contours; solid lines represent divergence and dotted lines represent convergence; units: 10^{-6} s^{-1} . The contour interval is 10^{-7} s^{-1} .) averaged over the region of $106^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$

播特征, 这说明长江下游地区的季节内降水变化更多的是受到热带向北移动系统的影响, 这与齐艳军等 (2016) 的结论相一致。

6 与季节内降水对应的水汽条件

降水的发生不仅与动力条件有关, 水汽条件也是必不可少的。为此计算了低频风场在长江中游和

下游在最干和最湿位相整层积分的低频水汽通量及其散度。长江中游地区 (图 13a、b), 最干位相的水汽辐合主要集中在其东南侧 20°N 的洋面上, 而在长江中游的北部存在水汽向东北方向输送, 在长江中游南部水汽向南部输送, 导致了长江中游地区水汽辐散。在最湿位相时, 南海地区东北向的异常水汽与菲律宾海西北向的水汽通量输送在南海

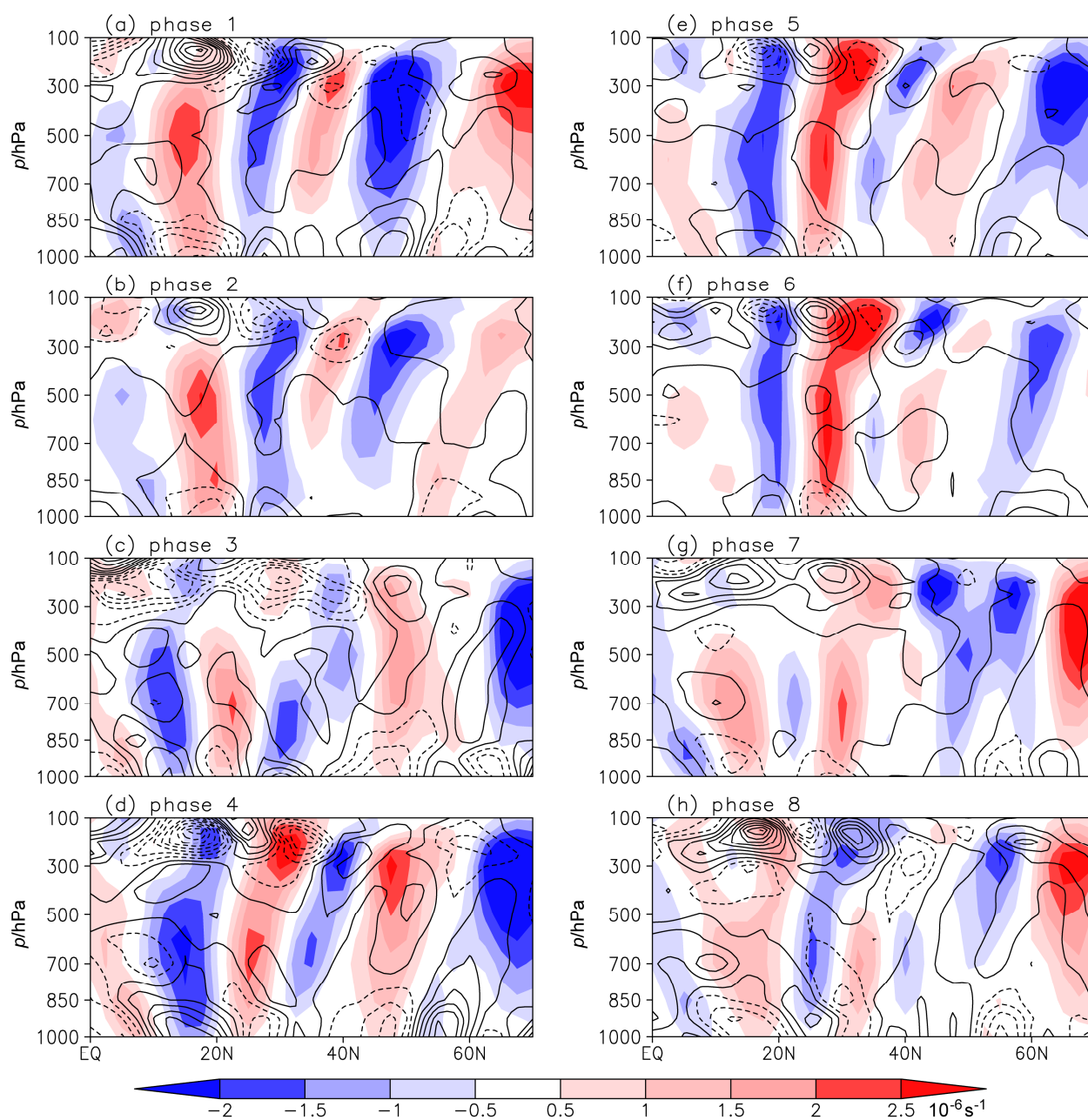


图 12 经过 ($115^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 平均) 剖面的 30~60 天滤波的涡度场 (阴影, 单位: 10^{-6} s^{-1}) 和散度场 (等值线, 实线为正值, 虚线为负值, 单位: 10^{-6} s^{-1} , 等值线间隔为 10^{-7} s^{-1}) 的各位相合成

Fig. 12 Composite vertical cross sections of 30–60-day filtered vorticity (shading; units: 10^{-6} s^{-1}) and divergence (contours; solid lines represent divergence and dotted lines represent convergence; units: 10^{-6} s^{-1} . The contour interval is 10^{-7} s^{-1} .) averaged over the region of $115^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$

北部汇合增强并向北输送, 同时长江以北的水汽向南输送, 造成了长江中游地区的水汽在南北方向上辐合, 为长江中游降水提供了充足的水汽条件。结合前文对垂直环流的分析, 最湿位相低层辐合、高层辐散的动力学条件与水汽条件相配合, 共同导致了长江中游的降水正异常。

对于长江下游 30~60 天滤波的合成结果, 如

图 13c、d 所示, 在最干位相时, 最大水汽辐合区位于长江下游地区东南部洋面, 中心位于 140°E 附近。最大水汽辐散中心位于长江下游东部地区, 长江下游地区水汽辐散, 没有来自南方的水汽输送。在最湿位相时, 从赤道 100°E 处的热带印度洋, 到孟加拉湾和南海地区都存在明显的一条水汽通道, 同时长江下游地区的东南部存在水汽向西输

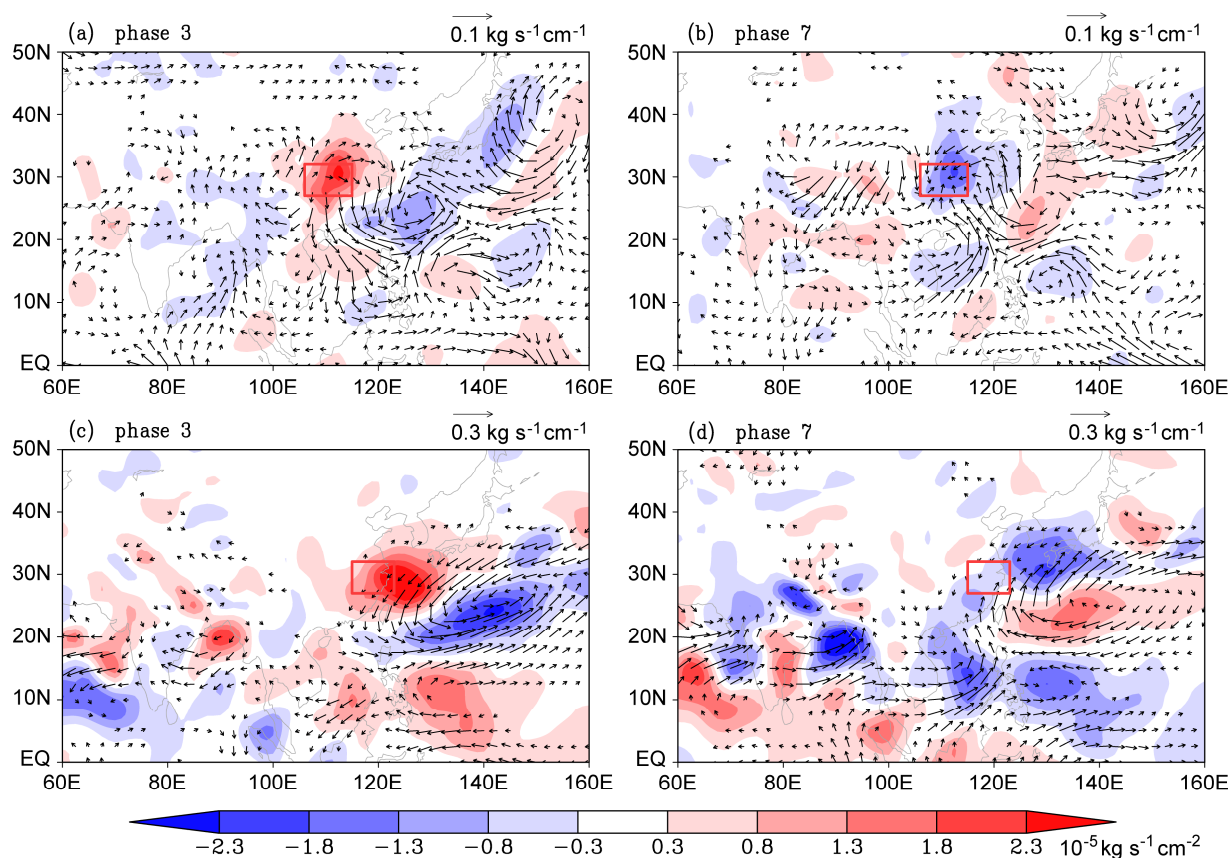


图 13 位相合成的整层积分的低频水汽通量输送(矢量, 单位: $\text{kg s}^{-1} \text{cm}^{-1}$)及其散度(阴影, 单位: $10^{-5} \text{kg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$): (a、b) 长江中游地区; (c、d) 长江下游地区。红色方框表示所讨论区域; 只画出大于图上角标值 10% 的水汽通量输送矢量

Fig. 13 Composite vertically integrated moisture fluxes (vectors; units: $\text{kg s}^{-1} \text{cm}^{-1}$) and their divergence (shading; units: $\text{kg s}^{-1} \text{cm}^{-1}$): (a, b) Over the MYR region (the red box); (c, d) over the LYR region (the red box). Integrated moisture fluxes larger than 10% of the vector scale are shown

送, 与来自印度洋自西向东的水汽在南海和菲律宾地区汇合, 水汽向北方的长江下游地区输送, 在有利的上升运动和高低空辐合辐散等动力条件下, 造成该时段的强降水。此外值得指出的是, 由于海陆水汽条件、表面摩擦力的差异, 最大水汽辐合中心并不在长江下游地区。

7 结论和讨论

通过对 35 年资料分析, 发现我国长江流域的不同区域夏季降水具有不同的气候季节内振荡周期, 长江中游以 10~30 天振荡周期为主, 而长江下游的主振荡周期是 30~60 天。通过分析不同振荡周期长江中游和下游的位相合成演变图, 得出了这两个区域 ISO 降水的时空演变特征, 及其对应的高低空环流背景、垂直结构以及水汽条件之间的差异。

从季节内降水的时空演变看, 长江中游 10~30

天为主的 ISO 降水存在自北向南的移动趋势, 而长江下游地区 30~60 天为主的 ISO 降水则表现出自南向北的移动传播。在环流场上, 中高纬度地区高空自西向东移动的波列是影响长江中游地区降水的主要系统。而对于长江下游, 在鄂霍茨克海地区高压的崩溃西退并南压, 加强了高层长江下游北侧的高压系统, 高空辐散, 有利于上升气流的产生和维持。在 ISO 的垂直结构演变上看, 对流层低层正涡度以及低层辐合高层辐散的配置有利于上升运动的产生。水汽条件方面, 长江中游的水汽主要来自南海地区, 同时也有来自长江以北的水汽在该区域辐合。长江下游的水汽主要源自于热带地区, 即来自印度洋、孟加拉湾至南海的水汽通道以及西太平洋自东向西的水汽输送。

本研究针对中纬度长江中游和下游区域, 提出了两个区域夏季降水具有不同的最显著气候季节内振荡周期, 并说明了长江中游 10~30 天振荡周

期和长江下游的 30~60 天振荡周期具有不同的物理成因。但对于低纬度热带地区, 已有研究表明不同尺度季节内振荡可以同时具有显著性, 如南海夏季风低频振荡就表现为 30~60 天和准双周都显著的特点(陈尚锋等, 2011)。因此, 中、低纬度不同尺度季节内振荡物理成因之间的差异需要进一步深入研究。另外, Huang et al. (2003) 强调了季节内振荡从南向北的影响, 本文则指出长江中游从北向南的影响, 来自南方和北方的季节内振荡对长江中下游不同区域夏季降水影响的相对重要性, 也是需要进一步研究的问题。

参考文献 (References)

- 曹鑫, 任雪娟, 杨修群, 等. 2012. 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 [J]. 气象学报, 70 (4): 766–778. Cao Xin, Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, et al. 2012. The quasi-biweekly oscillation characteristics of persistent severe rain and its general circulation anomaly over Southeast China from May to August [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70(4): 766–778, doi:10.11676/qxxb2012.062.
- Chen L X, Zhu C W, Wang W, et al. 2001. Analysis of the characteristics of 30–60 day low-frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (4): 623–638, doi:10.1007/s00376-001-0050-0.
- 陈尚锋, 温之平, 陈文. 2011. 南海地区大气 30~60 天低频振荡及其对南海夏季风的可能影响 [J]. 大气科学, 35 (5): 982–992. Chen Shangfeng, Wen Zhiping, Chen Wen. 2011. Tropical low frequency oscillations with 30–60 day period and its possible influence on the South China Sea summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 982–992, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.05.17.
- 韩荣青, 李维京, 董敏. 2006. 北半球副热带—中纬度太平洋大气季节内振荡的纬向传播与东亚夏季旱涝 [J]. 气象学报, 64 (2): 149–163. Han Rongqing, Li Weijing, Dong Min. 2006. The impact of 30–60 day oscillations over the subtropical Pacific on the East Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (2): 149–163, doi:10.3321/j.issn.0577-6619.2006.02.003.
- 何金海, 智协飞, Nakazawa T. 1995. 中国东部地区降水季内变化的季节锁相 [J]. 热带气象学报, 11 (4): 370–374. He Jinhai, Zhi Xiefei, Nakazawa T. 1995. Seasonal interlock of the intraseasonal variations of rainfall in East China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 11 (4): 370–374.
- Hong Wei, Ren Xuejuan. 2013. Persistent heavy rainfall over South China during May–August: Subseasonal anomalies of circulation and sea surface temperature [J]. Acta Meteorologica Sinica, 27 (6): 769–787, doi:10.1007/s13351-013-0607-8.
- 胡娅敏, 翟盘茂, 罗晓玲, 等. 2014. 2013 年华南前汛期持续性强降水的大尺度环流与低频信号特征 [J]. 气象学报, 72 (3): 465–477. Hu Yamin, Zhai Panmao, Luo Xiaoling, et al. 2014. Large scale circulation and low frequency signal characteristics for the persistent extreme precipitation in the first rainy season over South China in 2013 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72 (3): 465–477, doi:10.11676/qxxb2014.042.
- 黄嘉佑, 符长锋. 1993. 黄河中下游地区夏季逐候降水量的低频振荡特征 [J]. 大气科学, 17 (3): 379–383. Huang Jiayou, Fu Changfeng. 1993. The representations of the low-frequency fluctuation for the pentad precipitation in summer in the middle–lower reaches of the Yellow River valley [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 17 (3): 379–383, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1993.03.16.
- Huang R H, Zhou L T, Chen W. 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes [J]. Adv. Atmos. Sci., 20 (1): 55–69, doi:10.1007/BF03342050.
- 纪忠萍, 胡丽甜, 谷德军, 等. 2011. 西江流域致洪暴雨的准双周振荡及大气环流模型 [J]. 热带气象学报, 27 (5): 775–784. Ji Zhongping, Hu Litian, Gu Dejun, et al. 2011. The quasi-biweekly oscillation of flood-causing torrential rain in Xijiang River region and its atmospheric circulation models [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 27 (5): 775–784, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.05.021.
- 据建华, 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 [J]. 热带气象学报, 21 (2): 163–171. Jü Jianhua, Zhao Erxu. 2005. Impacts of the low frequency oscillation in East Asian summer monsoon on the drought and flooding in the middle and lower valley of the Yangtze River [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 21 (2): 163–171, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.02.006.
- Krishnamurti T N, Ardanuy P. 1980. The 10 to 20-day westward propagating mode and “Breaks in the Monsoons” [J]. Tellus, 32 (1): 15–26, doi:10.1111/j.2153-3490.1980.tb01717.x.
- Lau K M, Chan P H. 1986. Aspects of the 40–50 day oscillation during the northern summer as inferred from outgoing longwave radiation [J]. Mon. Wea. Rev., 114 (7): 1354–1367, doi:10.1175/1520-0493(1986)114<1354:AOTDOD>2.0.CO;2.
- Lau K H, Lau N C. 1990. Observed structure and propagation characteristics of tropical summertime synoptic scale disturbances [J]. Mon. Wea. Rev., 118 (9): 1888–1913, doi:10.1175/1520-0493(1990)118<1888:OSAPCO>2.0.CO;2.
- Lau K M, Yang G J, Shen S H. 1988. Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia [J]. Mon. Wea. Rev., 116 (1): 18–37, doi:10.1175/1520-0493(1988)116<0018:SAICOS>2.0.CO;2.
- 李丽平, 许冠宇, 柳艳菊. 2014. 2010 年华南前汛期低频水汽输送对低频降水的影响 [J]. 热带气象学报, 30 (3): 423–431. Li Liping, Xu Guanyu, Liu Yanju. 2014. Influences of low-frequency moisture transportation on low frequency precipitation anomalies in the annually first rain season of South China in 2010 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 30 (3): 423–431, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.03.003.
- 刘慧斌, 温敏, 何金海, 等. 2012. 东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响 [J]. 大气科学, 36 (5): 959–973. Liu Huibin, Wen Min, He Jinhai, et al. 2012. Characteristics of the Northeast cold vortex at intraseasonal time scale and its impact [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 959–973, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11167.
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40–50 day oscillation in the

- zonal wind in the tropical Pacific [J]. *J. Atmos. Sci.*, 28 (5): 702–708, doi:10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2.
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period [J]. *J. Atmos. Sci.*, 29 (6): 1109–1123, doi:10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2.
- 毛江玉, 吴国雄. 2005. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡 [J]. *气象学报*, 63 (5): 762–770. Mao Jiangyu, Wu Guoxiong. 2005. Intraseasonal variability in the Yangtze–Huaihe River rainfall and subtropical high during the 1991 Meiyu period [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (5): 762–770, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.05.020.
- Murakami T, Nakazawa T. 1985. Tropical 45 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere summer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42 (11): 1107–1122, doi:10.1175/1520-0469(1985)042<1107:TDODTN>2.0.CO;2.
- Nakazawa T. 1992. Seasonal phase lock of intraseasonal variation during the Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, 70 (1B): 597–611, doi:10.2151/jmsj1965.70.1B_597.
- 齐艳军, 张人禾, Li T. 2016. 1998 年夏季长江流域大气季节内振荡的结构演变及其对降水的影响 [J]. *大气科学*, 40 (3): 451–462. Qi Yanjun, Zhang Renhe, Li T. 2016. Structure and evolution characteristics of atmospheric intraseasonal oscillation and its impact on the summer rainfall over the Yangtze River basin in 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 40 (3): 451–462, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15107.
- 唐天毅, 吴池胜, 王安宇, 等. 2007. 1999 年广东汛期降水的季节内振荡 [J]. *热带气象学报*, 23 (6): 683–689. Tang Tianyi, Wu Chisheng, Wang Anyu, et al. 2007. An observational study of interseasonal variations over Guangdong Province China during the rainy season of 1999 [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 23 (6): 683–689, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.06.025.
- Wang B, Rui H. 1990. Synoptic climatology of transient tropical intraseasonal convection anomalies: 1975–1985 [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 44 (1–4): 43–61, doi:10.1007/BF01026810.
- Wang B, Xu X H. 1997. Northern Hemisphere summer monsoon singularities and climatological intraseasonal oscillation [J]. *J. Climate*, 10 (5): 1071–1085, doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1071:NHMSMA>2.0.CO;2.
- 王文, 李伟, 李耀辉. 2013. 黄河中下游地区夏季旱涝年低频振荡特征分析 [J]. *冰川冻土*, 35 (4): 1007–1014. Wang Wen, Li Wei, Li Yaohui. 2013. Analysis of the LFO characteristics during summer drought/flood years over the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 35 (4): 1007–1014, doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0113.
- 王遵娅, 丁一汇. 2008. 中国雨季的气候学特征 [J]. *大气科学*, 32 (1): 1–13. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic characteristics of rainy seasons in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (1): 1–13, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.01.
- Wen M, Zhang R H. 2008. Quasi-biweekly oscillation of the convection around Sumatra and low-level tropical circulation in boreal spring [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (1): 189–205, doi:10.1175/2007MWR1991.1.
- 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]. *J. Climate*, 23 (5): 1146–1159, doi:10.1175/2009JCLI3005.1.