

焦敏, 管兆勇. 2014. 中国东南部与川渝陕甘地区夏季降水 30~60 天 CISO 的反相现象 [J]. 大气科学, 38 (1): 45–60, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12116. Jiao Min, Guan Zhaoyong. 2014. Out-of-phase relationship of 30–60 day oscillations of mean climatological summertime rainfall between southeastern China and the Sichuan–Chongqing–Shaanxi–Gansu region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 45–60.

中国东南部与川渝陕甘地区夏季降水 30~60 天 CISO 的反相现象

焦敏^{1,2} 管兆勇¹

¹ 南京信息工程大学大气科学学院气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 辽宁省气象科学研究所, 沈阳 110166

摘要 利用 1979~2010 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料和我国 753 站逐日降水资料, 研究了中国东南部和川渝陕甘地区夏季降水 30~60 天气候季节内振荡 (Climatological IntraSeasonal Oscillation, CISO) 的反相现象。结果显示两个区域夏季降水 CISO 在 7 月中旬之前存在显著的反相关系, 且在传播特征上有明显差异。川渝陕甘地区降水局地低频振荡显著, 中国东南部降水 CISO 北传特征清晰。低频环流分析表明, 对流层低层低频槽、脊的更替形成了川渝陕甘地区降水 CISO 的“驻相”振荡, 低频气旋式、反气旋式环流位置的移动则产生了中国东南部降水 CISO 的北传。CISO 垂直环流显示上升支与下沉支正好处于川渝陕甘地区与中国东南部, 较好地反映了低频降水在两区域的相反变化。中国东南部、长江中下游与川渝陕甘地区三者之间存在动力学上的关联, 这可部分地解释川渝陕甘地区和中国东南部之间降水 CISO 的反相关系。这种反相关系的形成还与气候态下的西太平洋副热带高压和贝加尔湖附近大陆高压脊的季节内变化有关。揭示中国东南部与川渝陕甘地区之间降水 CISO 的反相现象对于丰富人们对我国夏季风区低频振荡局地特征的认识和理解降水季节内振荡产生机制有重要意义。

关键词 气候季节内振荡 (CISO) 夏季降水 反相 川渝陕甘地区 中国东南部

文章编号 1006-9895(2014)01-0045-16

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12116

Out-of-Phase Relationship of 30–60 Day Oscillations of Mean Climatological Summertime Rainfall between Southeastern China and the Sichuan–Chongqing–Shaanxi–Gansu Region

Jiao Min^{1,2} and Guan Zhaoyong¹

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Institute of Meteorological Sciences of Liaoning Province, Shenyang 110166

Abstract Mean climatological intra-seasonal (i.e., 30–60 day) oscillations in rainfall (hereafter, CISO) have been investigated using the NCEP/NCAR daily reanalysis and daily rainfall data of 753 stations from 1979 to 2010. The results demonstrate an interesting phenomenon: an out-of-phase relationship exists between the intra-seasonal oscillations (ISO) of rainfall in southeastern China (SEC) and the Sichuan–Chongqing–Shaanxi–Gansu region (CYSG). In particular, strengthening of rainfall in SEC is accompanied by weakening of rainfall in CYSG. The low-frequency oscillation of

收稿日期 2012-07-27, 2013-04-08 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 项目) 2013CB430202, 国家自然科学基金项目 41175062, 江苏省青蓝工程创新团队项目, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPD

作者简介 焦敏, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 研究方向为季风动力学。E-mail: minminjiao2006@163.com

通讯作者 管兆勇, E-mail: guanzzy@nuist.edu.cn

summertime rainfall in CYSG appears to vary locally, whereas that in SEC appears to propagate in the meridional direction. No zonal propagation of CISO in rainfall was found in either area. The CISO in rainfall in both SEC and CYSG were found to be related to migratory low-frequency circulations that traverse the southeastern part of China. However, the CISO in rainfall in the CYSG are associated with replacement of low-frequency circulations between an anticyclonic ridge and a cyclonic trough northeast of the Tibetan Plateau. Vertical motion facilitates the out-of-phase variations of the CISO in rainfall between SEC and CYSG. Furthermore, examinations of Rossby wave propagation using the Rossby wave theory show that the energy of low-frequency eddies propagates intrinsically westward to CYSG from the middle-lower reaches of the Yangtze River (MLYR), indicating a dynamic relationship between SEC, MLYR, and CYSG in terms of CISO rainfall. This relationship may partly explain the out-of-phase relationship between SEC and CYSG. This out-of-phase relationship is also associated with both the temporal variation of the western Pacific subtropical high and the ridges around Lake Baikal at 500-hPa geopotential height. Phase locking of ISO occurs in East Asian monsoon activity and the contributions of CISO rainfall to total rainfall are non-negligible; therefore, knowledge of the out-of-phase relationship of CISO in rainfall between SEC and CYSG is of great importance for better understanding of the local characteristics of ISO and the mechanisms underlying ISO in rainfall.

Keywords Climatological intra-seasonal oscillation (CISO), Summertime rainfall, Out-of-phase relationship, Sichuan–Chongqing–Shaanxi–Gansu region, Southeastern China

1 引言

自从 Madden and Julian (1971, 1972) 发现全球热带地区存在显著的 40~50 天振荡现象以来, 季节内振荡 (IntraSeasonal Oscillation, ISO) 便受到国内外众多气象工作者的广泛关注。研究表明北半球夏季风的爆发和中断与 ISO 及其传播密切相关 (Murakami and Nakazawa, 1985)。另外一个事实是季风爆发日期在气候上较为固定, 不同年份差异不大 (何金海等, 1995)。上述两点说明 ISO 存在季节锁相特征 (何金海等, 1995)。Lau et al. (1988)、缪锦海和刘家铭 (1991) 的分析指出, 降水中的 ISO 的季节变化与总的季风降水的季节变化明显锁相, 对季风雨带位置的出现起重要调制作用。Nakazawa (1992) 揭示了北半球夏季风季节内变率的季节锁相特征。正因为存在锁相现象, 在多年平均的资料中 ISO 仍具有相当的振幅 (管兆勇和赵辉, 1995)。Wang and Xu (1997) 将这种存在于气候平均资料中的 ISO 称之为气候季节内振荡 (Climatological IntraSeasonal Oscillation, CISO), 且充分论证了 CISO 在统计上的显著性和动力上的协调性, 指出了 CISO 的极端位相表征了夏季风奇异点。

亚洲夏季风区存在显著的 CISO。Kang et al. (1999) 通过对高云资料的分析发现, 韩国的梅雨 (Changma) 云带与时间尺度约为两个月的 CISO 的北传有关。Ho and Wang (2002) 进一步将亚洲—太平洋夏季风显著的 CISO 命名为快的年循环 (fast annual cycle), 指出慢的年循环 (slow annual

cycle) 叠加上快的年循环便构成了亚洲—太平洋夏季风的基本气候特征, 其中快的年循环主要有两次季风爆发过程组成, 每次过程都包含各具特色的干湿循环。王慧等 (2005) 发现西北太平洋夏季风区的季风降水、对流和西风的活跃—中断循环在很大程度上受 10~20 天和 30~60 天 CISO 的调制。Liu and Ding (2007) 的研究表明来自不同源地的 30~60 天 CISO 和 10~20 天 CISO 于 5 月中旬前后在南海及其邻近地区发生锁相, 从而激发了南海夏季风的迅速爆发。Liu et al. (2008) 指出东亚副热带降水的季节进程可以由 CISO 描述, 并且在经向上表现为北传。计算表明, 我国东部夏季降水中 CISO 的方差约占 ISO 总方差的 10%~30% (赵崇博等, 2011)。邢雯等 (2012) 分析了 1990 年代际转型前后南海季风系统的 CISO 特征, 指出转型前季风活动主要受 10~20 天 CISO 的控制, 而转型后季风活动则以 30~60 天 CISO 为主。于群等 (2011) 和 Yu et al. (2012) 分析发现山东夏季降水明显地受到 CISO 的调制。CISO 的部分观测特征在数值模式中也得到了再现。Yang et al. (2009) 和赵崇博等 (2011) 均成功模拟出了夏季降水 CISO 的经向北传特征。

中国南方夏季降水多寡与 ISO 关系十分密切。许多研究都从个例分析 (陆尔和丁一汇, 1996; Chen et al., 2001; 毛江玉和吴国雄, 2005; 鲍名, 2008; 张瑛等, 2008) 和旱涝异常角度 (陈丽臻等, 1994; 黄静和朱乾根, 1997; 杨秋明, 2001; 瑚建华和赵尔旭, 2005) 进行过阐述。王遵娅和丁一汇 (2008) 分析指出 30~60 天 CISO 对长江中下游及

其以南地区降水有重要调制作用。刘芸芸和丁一汇 (2009) 的研究表明西北太平洋夏季风存在显著的 30~60 天 CISO，并通过大气 CISO 的经向传播和纬向传播与长江流域降水发生相互作用。尽管有上述研究，但对我国南方降水 CISO 的时空变化特征及其机理并未完全弄明。近期，我们分析发现中国东南部和川渝陕甘地区夏季降水 30~60 天 CISO 存在反相现象。研究这一现象对于丰富人们对我国夏季风区低频振荡局地特征的认识和理解降水季节内振荡产生机制有重要意义。

2 资料与方法

2.1 资料

所用资料包括: (1) NCEP/NCAR 逐日再分析资料 (Kalnay et al., 1996)，水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，要素包括水平风速、垂直速度、比湿、位势高度和地表气压，其中水平风速和垂直速度的垂直层次为 12 层 (从 1000 hPa 到 100 hPa)，比湿为 8 层 (从 1000 hPa 到 300 hPa)，位势高度为 1 层 (500 hPa)。(2) 中国气象局国家气象信息中心整编的我国 753 站的逐日降水量资料。

所有要素的时间序列长度均截取为 1979~2010 年共 32 年，夏季指 6~8 月共 92 天。

2.2 方法

考虑到站点的缺测和迁移影响，站点降水量资料在使用前做了预处理，缺测处理的结果是仅保留了含有从 1979~2010 年连续且完整记录的站点，在此基础上剔除了迁站距离超过 20 公里的站点，最后选取了其中 518 个站点用于分析使用。

对各个要素先求出其逐日的气候平均值。所有要素低频资料的获取均是对气候逐日 365 天时间序列进行带通滤波，然后再提取出夏季 92 天资料进行分析。

文中用到的方法主要是功率谱分析 (黄嘉佑, 2004)、Butterworth 带通滤波 (吴洪宝和吴蕾, 2005) 及 \mathbf{E} 矢量诊断 (Hoskins et al., 1983) 等方法。

\mathbf{E} 矢量的表达式为: $\mathbf{E} = (\sqrt{v'^2 - u'^2}, -\bar{u}'v')$ ，其中 u' 和 v' 取为 30~60 天扰动风场，“—”表示夏季 92 天的时间平均。 \mathbf{E} 矢量是 Hoskins et al. (1983) 在研究波流相互作用时得到的，Hoskins 曾将这一工作推广至三维空间中。这里使用的 \mathbf{E} 矢量仅是其水平分量。本文利用 \mathbf{E} 矢量的性质来考虑水平方向上 ISO 扰动是否存在能量传播。一般而言， \mathbf{E} 矢量的

方向与 Rossby 波动固有的群速度方向平行，当 $v'^2 - u'^2 < 0$ 时，扰动纬向伸长；当 $v'^2 - u'^2 > 0$ 时，扰动经向伸长 (Hoskins et al., 1983)。

3 夏季降水 CISO 的主周期分布

为了得到夏季降水 CISO 的主周期分布，对所关心区域范围内所有站点的气候逐日夏季降水时间序列进行了功率谱分析，给出了通过 90% 信度 F 检验的降水 CISO 主周期站点分布 (图 1)。由图可见，30~60 天降水 CISO 主要分布在长江中下游及其以南地区。王遵娅和丁一汇 (2008) 对中国各站 4~9 月气候逐日降水量的小波分析曾指出，长江中下游至华南一带以 30~60 天周期为主。这与本文分析结果基本一致。Wang and Xu (1997) 也曾利用向外长波辐射资料分析了北半球夏季风区 CISO 的主要周期。10~20 天降水 CISO 主要分布在长江及其以北地区和华南沿海一带。此外，有一些站点 10~20 天和 30~60 天降水 CISO 都显著。

用降水 CISO 的方差比上原始降水扰动的方差得到降水 CISO 的方差百分比 (图 2a)，发现大值区有两个，一个位于川渝陕甘地区，最大值达到 7%；另外一个位于中国东南部，最大值可达到 10.5%。王遵娅和丁一汇 (2008) 指出虽然气候季

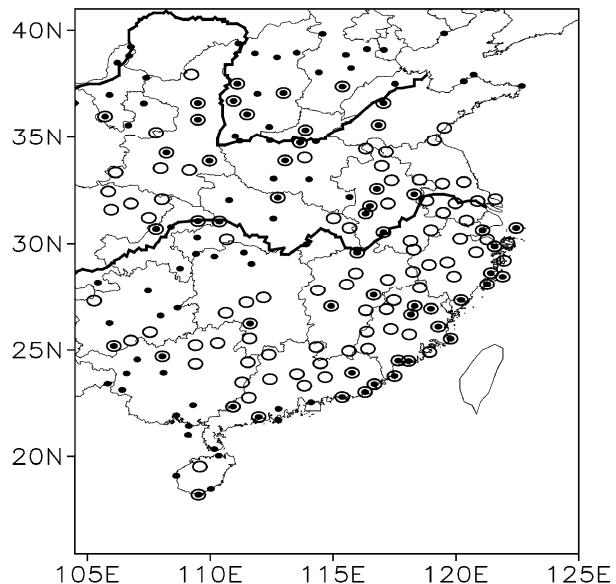


图 1 气候逐日夏季降水 CISO 主周期分布 (仅给出了通过 90% 信度 F 检验的站点)

Fig. 1 The scattered station sites where the CISO (Climatological IntraSeasonal Oscillation) periods of multi-year mean daily rainfall in summer are 30~60 d (opened circles, 129 stations) and 10~20 d (closed circles, 114 stations) above 90% level of confidence using F -test

节内振荡的方差仅占气候降雨时间序列方差的很小一部分，但是其调制作用却非常显著。在滤除 CISO 之后，并不再出现双峰或三峰的降雨分布形态，因此他们认为 CISO 对降水除了具有加强振幅作用之外，还可使雨季出现活跃—中断—再活跃的循环变化。说明这两个区域降水 CISO 在解释夏季降水的气候变率中具有重要作用。用降水 CISO 的绝对值累计值作为 CISO 降水扰动总量，则夏季 CISO 降水扰动总量占夏季总降水的百分比（图 2b）显示出了与前述一致的分布特征，只是大值中心数值有所不同，但也同样说明了两个区域降水 CISO 的重要性。

4 夏季降水 30~60 天 CISO 的反相关系

对图 2a 中两个区域内所有站点的气候逐日夏

季低频降水分别进行区域平均，得到两区域夏季逐日降水 CISO 时间序列（图 3）。川渝陕甘地区（图 2a 中 A 区域）与中国东南部（图 2a 中 B 区域）夏季降水 CISO 表现出随时间近乎反相的变化特征（图 3）。当川渝陕甘地区低频降水为正值时，中国东南部低频降水则为负值；反之亦然。两者之间的相关系数为 -0.831。采用高自相关变量间相关系数的统计检验方法（Chen, 1982）可知，两者之间的负相关通过 95% 信度的 *t* 检验，表明两者间的负相关显著。

这种反相关现象在 7 月中旬之前表现得尤为明显。为了突显这种特征，参考贾燕和管兆勇（2010）的做法，选取了低频降水完成一次循环过程的 8 个位相（图 3 中 8 个小方形实心点所示），其中 1、5 为转换位相，位相 3 表示活跃期的波峰，位相 7 表示中断期的波谷，而位相 2、4、6、8 表示低频振

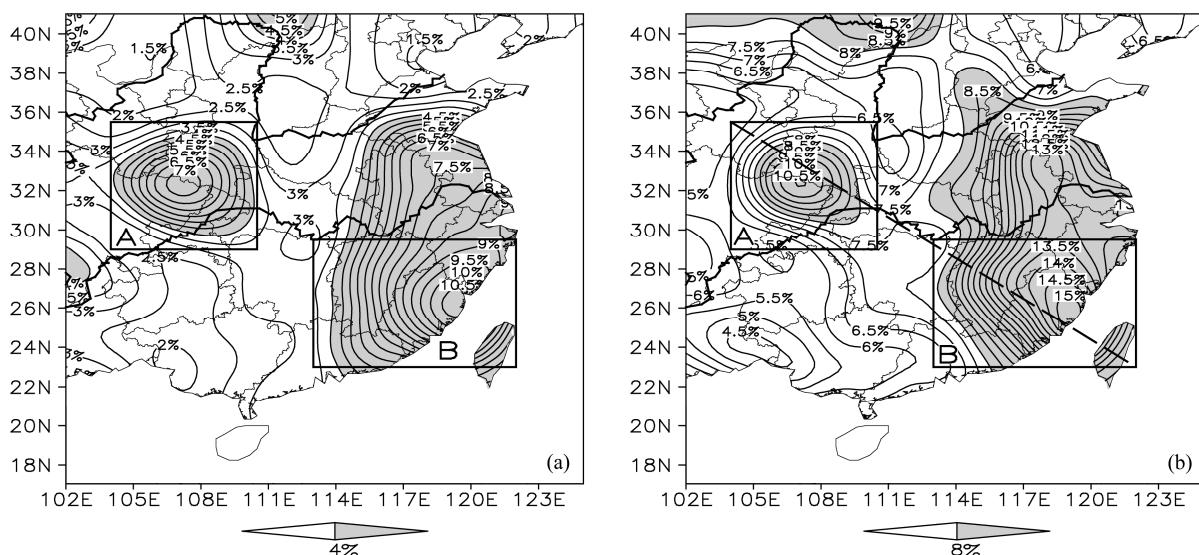


图 2 (a) 夏季降水 30~60 天 CISO 方差占夏季降水总扰动方差的百分比，(b) 夏季 30~60 天 CISO 降水扰动总量占夏季总降水的百分比。A 区域为川渝陕甘地区 ($29^{\circ}\text{N} \sim 35.5^{\circ}\text{N}$, $104^{\circ}\text{E} \sim 110.5^{\circ}\text{E}$)，B 区域为中国东南部 ($23^{\circ}\text{N} \sim 29.5^{\circ}\text{N}$, $113^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$)

Fig. 2 Ratio of variance of 30–60 day CISO summer rainfall to total disturbance variance of summer rainfall (a), and ratio of total disturbance quantity (sum of the absolute value) of 30–60 day CISO summer rainfall to total summer rainfall (b). Box A denotes the key region for the Sichuan–Chongqing–Shaanxi–Gansu region (CYSG) ($29^{\circ}\text{N}–35.5^{\circ}\text{N}$, $104^{\circ}\text{E}–110.5^{\circ}\text{E}$), and B for southeastern China (SEC) ($23^{\circ}\text{N}–29.5^{\circ}\text{N}$, $113^{\circ}\text{E}–122^{\circ}\text{E}$)

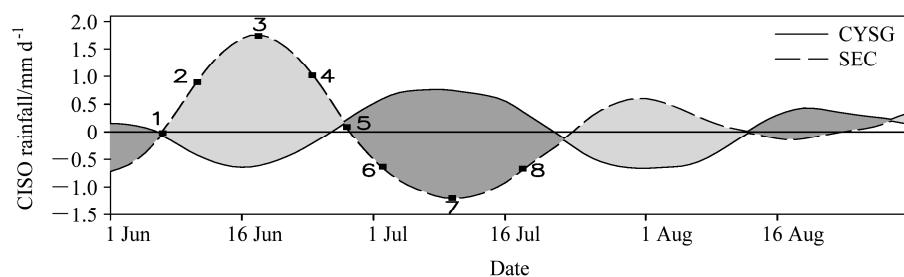


图 3 中国东南部与川渝陕甘地区夏季逐日降水 30~60 天 CISO 时间序列，单位： mm d^{-1} 。实线：川渝陕甘地区；长虚线：中国东南部

Fig. 3 Time series of 30–60 day CISO of summer daily rainfall (unit: mm d^{-1}) averaged over regions of the CYSG (solid line) and SEC (long dashed line)

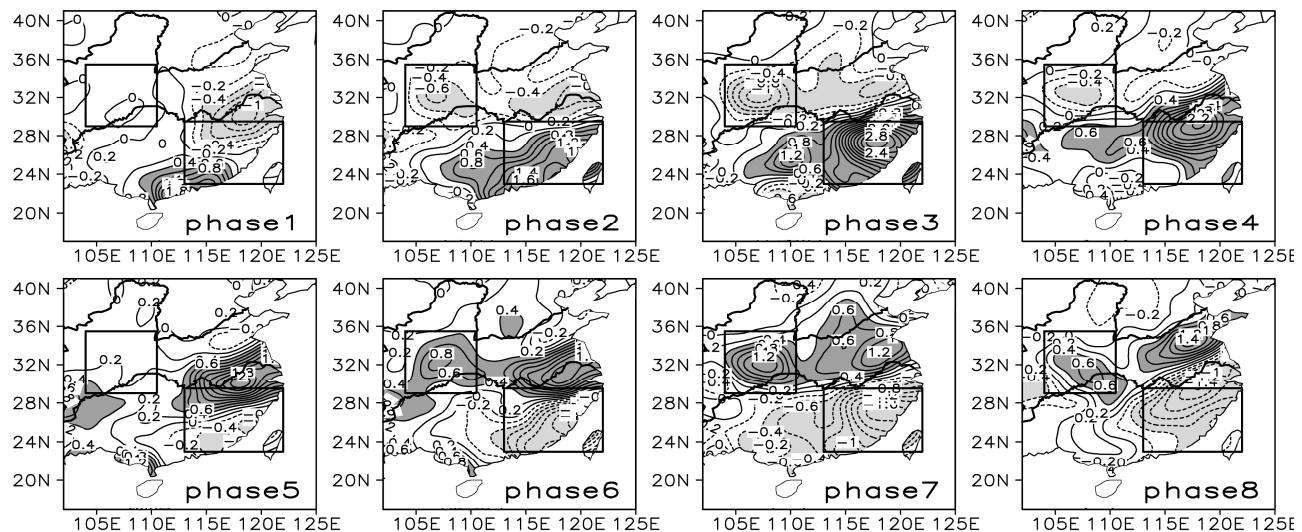


图4 图3中所选 30~60 天 CISO 各位相上低频降水分布, 单位: mm d^{-1} , 阴影表示绝对值大于 0.4

Fig. 4 Low-frequency rainfall (unit: mm d^{-1}) at different phases of the 30–60 day CISO as displayed in Fig. 3. The absolute values larger than 0.4 are shaded

荡的振幅值达到该循环的最大值或最小值一半的时间。绘制了 8 个位相上低频降水的空间分布(图 4)。川渝陕甘地区低频降水经历了由负到正的变化过程, 而中国东南部低频降水则经历了由正到负的变化过程, 反相变化特征十分明显。此外, 川渝陕甘地区主要表现出降水 CISO 的局地振荡, 中国东南部在经向上则表现出明显的北传(纬向传播不明显)。

夏季降水 CISO 的时间—纬度和时间—经度剖面显示: 两个区域的降水 CISO 都经历了两次明显的振荡过程。经向方向上, 川渝陕甘地区(图 5a)无明显传播, 只表现出降水位相的振荡。第一次降水 CISO 正位相出现在 6 月末至 7 月中旬, 最大值中心位于 32°N 附近; 第二次降水 CISO 正位相出现在 8 月中旬至 8 月末, 与前一次相比, 振荡强度明显减弱。对于中国东南部(图 5b), 北传特征十分显著。第一次降水 CISO 正位相出现在 6 月初, 然后随时间向北传播, 于 6 月中旬到达 28°N 附近并在该处产生强振荡中心, 而后继续北传并于 7 月中旬左右到达 35°N 附近。第二次降水 CISO 正位相出现在 7 月中下旬, 于 8 月初在 25°N 附近形成一个相对弱的振荡中心, 而后北传并一直持续到 8 月末。图 5c、d 显示川渝陕甘地区与中国东南部降水 CISO 在纬向方向并无显著传播。但注意到图 5c 中长江中下游地区存在自东向西的传播。沿图 2b 中长虚线上降水 CISO 的时间—经度变化(图 5e)进一步说明了降水 CISO 在斜线方向上主要反映出两地反相振荡现象。

综上, 川渝陕甘地区与中国东南部降水 CISO 呈反相关系。川渝陕甘地区降水局地低频振荡显著, 中国东南部降水 CISO 北传特征清晰。缪锦海和刘家铭(1991)、Liu et al. (2008) 的观测分析及 Yang et al. (2009)、赵崇博等(2011) 数值模拟都曾表明我国东部夏季风区降水 CISO 存在显著的北传。本文关于中国东南部降水 CISO 的传播分析所得结果与前人一致。

5 夏季降水 30~60 天 CISO 反相的内在联系及可能的形成机制

为了探究中国东南部与川渝陕甘地区夏季降水 30~60 天 CISO 反相的内在联系及可能的形成机制, 将从水平环流、垂直运动、水汽、扰动能量传播及大尺度环流等角度进行分析。其中水平环流、垂直运动、水汽和大尺度环流针对图 3 中所选取的 8 个位相进行。

5.1 水平环流

降水的低频变化受低频环流的制约。在 850 hPa 上(图 6), 1 位相时, 川渝陕甘地区处于弱低频脊区控制中; 东海—西太平洋地区有一低频气旋, 中国东南部处于其西侧槽区内。2 位相, 控制川渝陕甘地区的脊因反气旋式涡度的增强而增强; 东海—西太平洋地区的气旋明显西伸并稍有北抬, 控制中国东南部的槽因气旋式涡度的增强而增强。到峰值 3 位相时, 控制川渝陕甘地区脊的反气旋式涡度达到最强, 从而脊达到最强, 相应低频降水达到最弱; 东海—西太平洋地区的气旋进一步西伸, 受此气旋

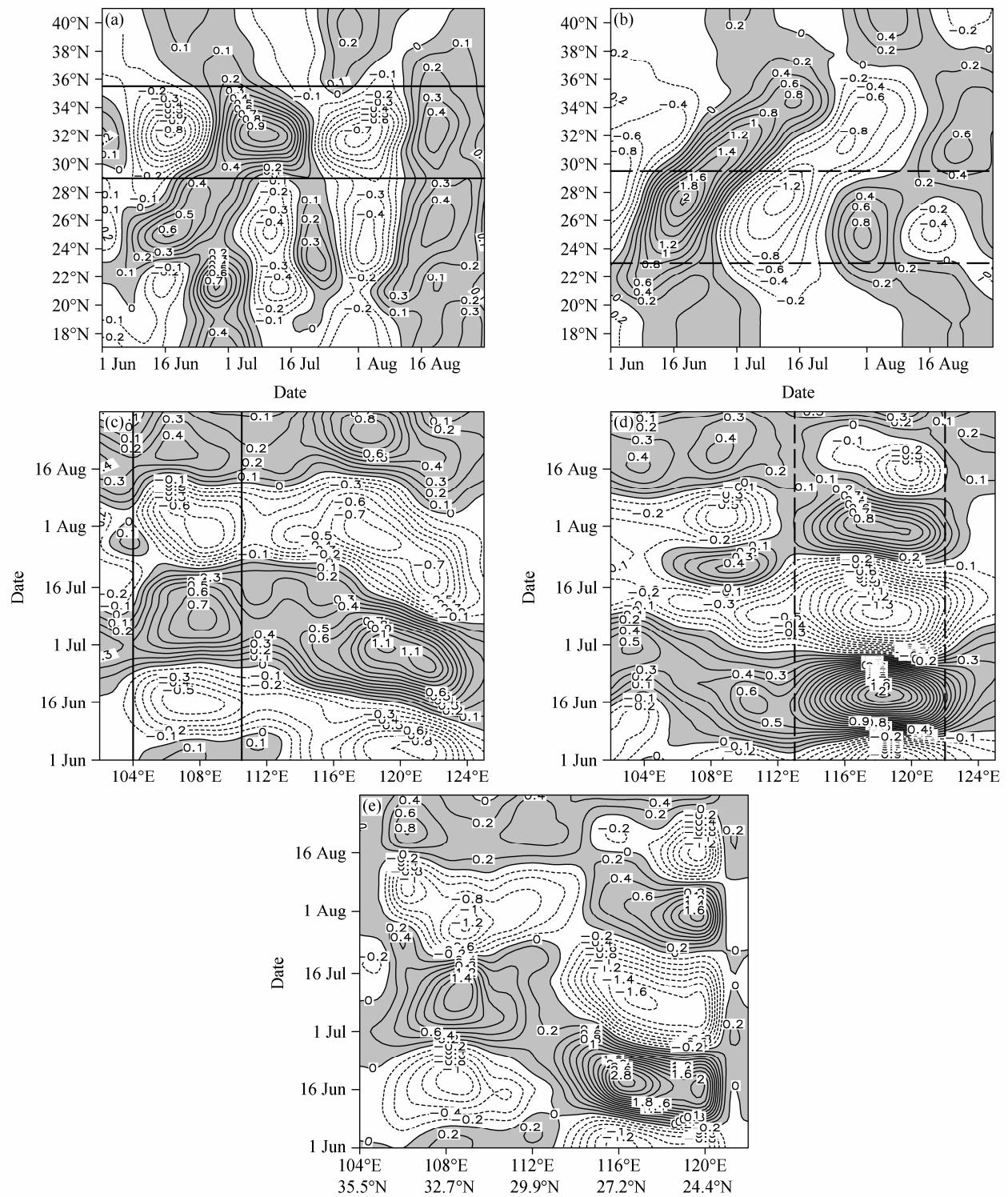


图 5 夏季降水 30~60 天 CISO 的时间—纬度剖面: (a) 川渝陕甘地区, 取 $104^{\circ}\text{E} \sim 110.5^{\circ}\text{E}$ 平均; (b) 中国东南部, 取 $113^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$ 平均。夏季降水 30~60 天 CISO 的时间—经度剖面; (c) 川渝陕甘地区, 取 $29^{\circ}\text{N} \sim 35.5^{\circ}\text{N}$ 平均; (d) 中国东南部, 取 $23^{\circ}\text{N} \sim 29.5^{\circ}\text{N}$ 平均; (e) 沿图 2b 中长虚线的夏季降水 30~60 天 CISO 的时间剖面。a-d 中两条实线之间为川渝陕甘地区, 两条长虚线之间为中国东南部, 阴影部分表示正值, 单位: mm d^{-1}

Fig. 5 (a, b) The time-latitude cross sections for 30~60 day CISO summer rainfall averaged over (a) ($104^{\circ}\text{E} \sim 110.5^{\circ}\text{E}$) for the CYSG and (b) ($113^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$) for SEC. (c, d) The time-longitude cross sections for 30~60 day CISO summer rainfall averaged over (c) ($29^{\circ}\text{N} \sim 35.5^{\circ}\text{N}$) for the CYSG and (d) ($23^{\circ}\text{N} \sim 29.5^{\circ}\text{N}$) for SEC. (e) The time cross section for 30~60 day CISO summer rainfall along the long dashed line in Fig. 2b. The zonal lines in (a) and (b) and the meridional lines in (c) and (d) are the border lines of boxes A and B as defined in Fig. 2. The positive values are shaded. The units are in mm d^{-1}

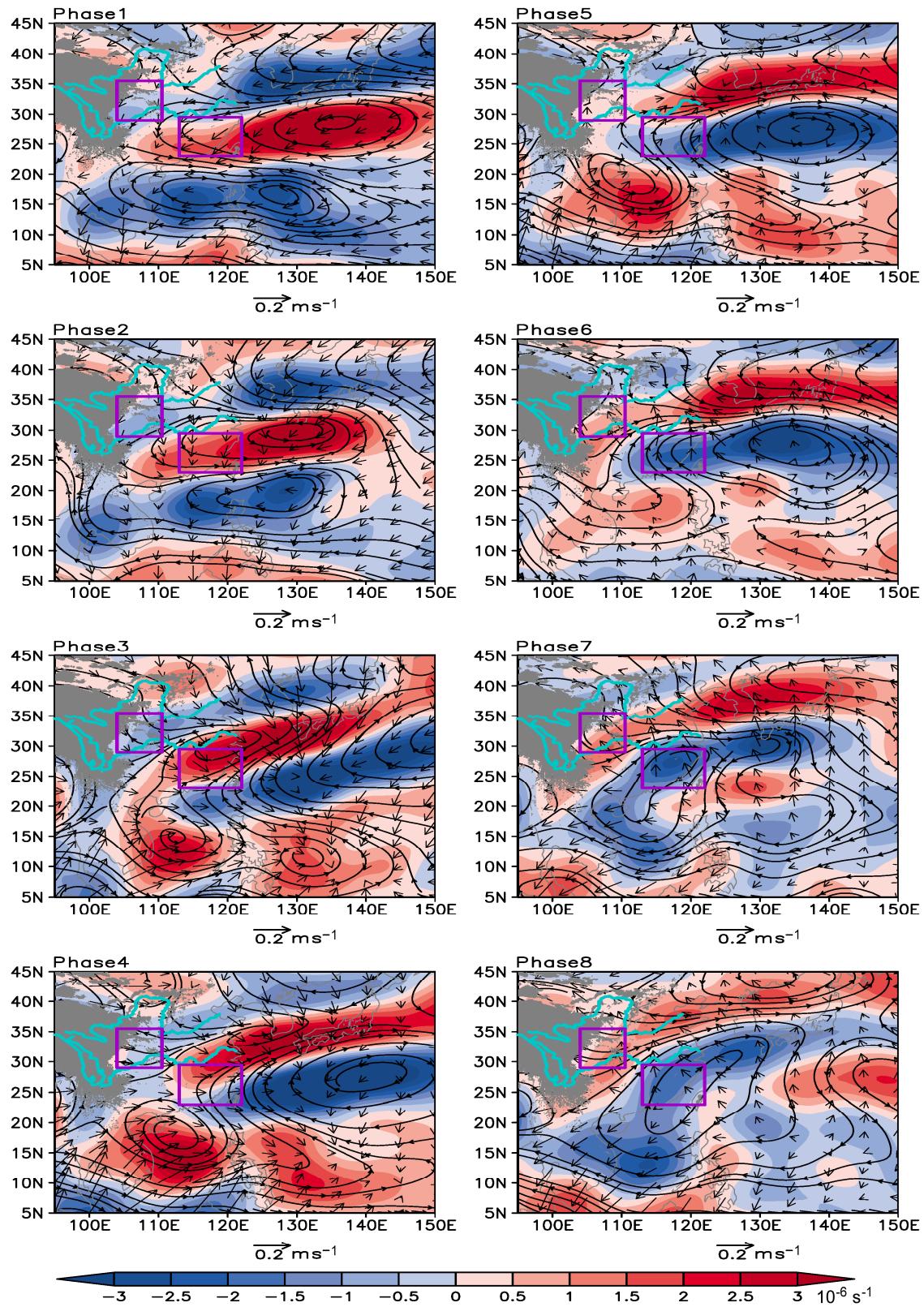


图 6 850 hPa 环流变化。流线表示 30~60 天 CISO 旋转风场, 矢量表示 30~60 天 CISO 辐散风场(单位: $m s^{-1}$)。阴影区表示 850 hPa 30~60 天 CISO 涡度, 单位: $10^{-6} s^{-1}$

Fig. 6 Circulations at 850 hPa. Streamlines are for the 30–60 day CISO rotational wind component as derived from the stream function and vectors are for divergent wind component as derived from the velocity potential. The shadings denote the 30–60 day CISO vorticity at 850 hPa, whose units are in $10^{-6} s^{-1}$

式环流影响中国东南部低频降水达到最强。4位相，川渝陕甘地区脊减弱；源自东海—西太平洋地区的气旋较前一位相已经向东北方向移出，此时东海—西太平洋地区出现一个较强的低频反气旋，中国东南部则处于低频气旋和低频反气旋的共同控制之中。

在 5~8 位相时，两个区域环流形势几乎与位相 1~4 时相反。5 位相，川渝陕甘地区处于环流调整时期；东海—西太平洋地区的反气旋明显西伸，中国东南部处于其脊区控制中。6 位相，川渝陕甘地区经环流调整后已经处于低频槽区控制中；东海—西太平洋地区的反气旋进一步西伸，受此影响控制中国东南部的脊进一步增强。到谷值 7 位相时，川渝陕甘地区槽区气旋式涡度达到最强，与此相伴随低频降水达到最强；中国东南部此时受反气旋环流控制，低频降水达到最弱。8 位相，控制川渝陕甘地区的槽已经减弱；控制中国东南部的反气旋环流已经减弱，西太平洋地区出现气旋式涡度，意味着下一次循环的开始。

综上，1~4 位相，川渝陕甘地区主要处于脊区控制中，低频降水处于负位相阶段；而中国东南部主要处于槽区或气旋环流控制中，低频降水处于正位相阶段。5~8 位相，几乎与 1~4 位相相反，川渝陕甘地区主要处于槽区控制中，低频降水处于正位相阶段；而中国东南部主要处于脊区或反气旋环流控制中，低频降水处于负位相阶段。

200 hPa 环流（图 7）与低层 850 hPa 有所不同。在 200 hPa 上，除了对低频降水起作用的辐合辐散风分量外，可见在位相 1~4 时，在日本南部上空有一低频气旋中心并不断向西北方向移动，而在 5~8 位相时，有一低频反气旋环流中心沿着川渝陕甘地区向东移动。这种环流中心的形成与移动和辐合辐散导致的涡度转变有关。

综合 1~8 位相，高低层低频环流的配置及其演变过程较好地解释了低频降水完成一次位相循环所需要的相应环流背景。在对流层低层，川渝陕甘区域内，要么处于低频反气旋式环流的脊区内（1~4 位相），要么处于低频气旋式环流的槽区内（5~8 位相），由此形成了降水 CISO 的“驻相”振荡；而中国东南部，源自东海—西太平洋地区低频气旋式、反气旋式环流在区域内出现位置的西伸和北移，于是有降水 CISO 的传播。贾燕和管兆勇（2010）研究指出 ISO 强年存在于南海—西北太平

洋地区的低频气旋、反气旋系统的交替活动影响了副热带高压的进退，从而引起江淮流域夏季降水异常。夏芸等（2008）对 2003 年江淮流域强降水过程的分析也指出 30~70 天振荡在低空以异常反气旋（异常气旋）性环流型自日本北部以东洋面向中国东南沿海传播，调控西太平洋副高进入（退出）南海，形成有利（不利）江淮流域降水的环流形势。这里从 CISO 角度分析所得结果与上述从 ISO 强度年际变化和 ISO 个例分析所得结果有相同之处。

5.2 垂直运动

从中国东南部（113°E~122°E 平均）30~60 天 CISO 垂直环流的高度—纬度剖面（图略）可以看出，随着降水 CISO 的向北传播，中国东南部的 CISO 经圈环流相应地由南向北推进，垂直上升（下降）运动区同降水 CISO 的正（负）位相十分吻合。

为了揭示川渝陕甘地区与中国东南部之间垂直环流的联系，绘制了沿图 2b 中长虚线的 CISO 垂直环流剖面和 CISO 水平辐散风速的垂直剖面，见图 8。首先由垂直环流（流线）可见，在转换位相 1 时，环流处于调整期，无明显完整垂直环流。位相 2 时，垂直环流中心大致位于 114°E，其左侧为下沉运动区，右侧为上升运动区。到峰值位相 3 时，垂直环流中心在 112°E 附近。位相 4 时，垂直环流中心移至 110.5°E 附近。对于转换位相 5，环流同样处于调整时期。位相 6~8 时环流中心位置依次大致位于 115.5°E、112.5°E 和 112°E。尽管环流中心位置在位相转换过程中有移动，但是通过对比两两相反位相可以发现，其位置移动并不是很大，可以说位相 6~8 时的上升和下沉运动区基本与位相 2~4 时相反。说明 CISO 垂直环流的上升和下沉支正好出现在这个斜线路径的两端，反映了低频降水在这两处的相反变化。从 CISO 水平辐散风速的垂直剖面（等值线，阴影表示正值）可以看出，沿着斜线，对于每两个相反位相，CISO 水平辐散风速的垂直剖面均表现出近乎反相的变化特征，这也进一步反映了两地区降水 CISO 的反相关系。

5.3 水汽

降水 CISO 过程中的水汽环境见图 9。CISO 水汽通量的旋转分量分布形势与图 6 给出的 850 hPa 的旋转风场分布形势非常相似。这说明水汽以低频波形式输送。陆尔和丁一汇（1996）曾指出低频波的向西传播可以将热带西太平洋上的水汽和暖湿空气以低频形式输送到江淮地区。对于中国东南

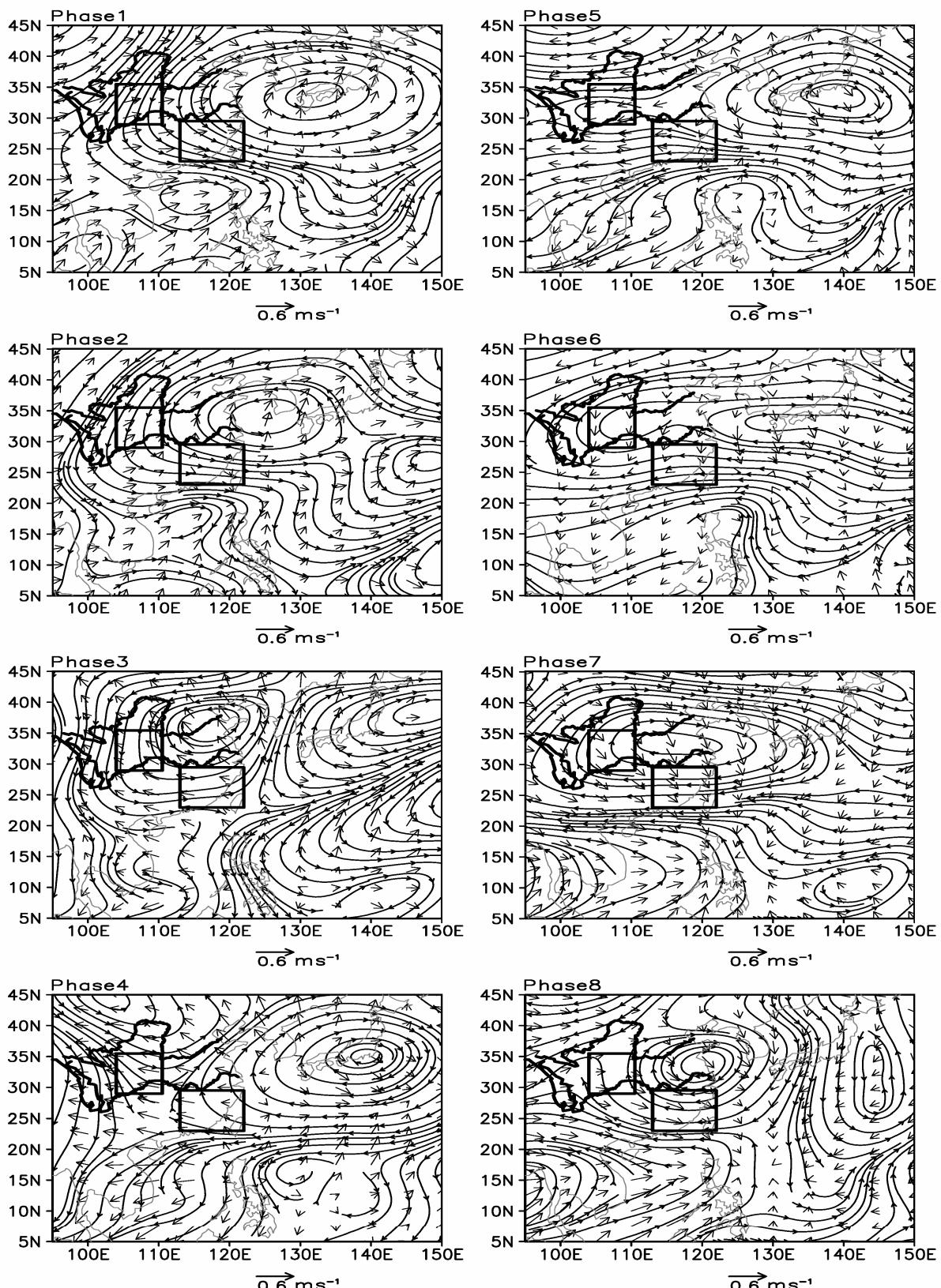


图 7 200 hPa 环流变化, 单位: m s^{-1} 。流线表示 30~60 天 CISO 旋转风场, 矢量表示 30~60 天 CISO 辐散风场

Fig. 7 Circulations at 200 hPa. Streamlines are for the 30–60 day CISO rotational wind component as derived from the stream function and vectors are for divergent wind component as derived from the velocity potential

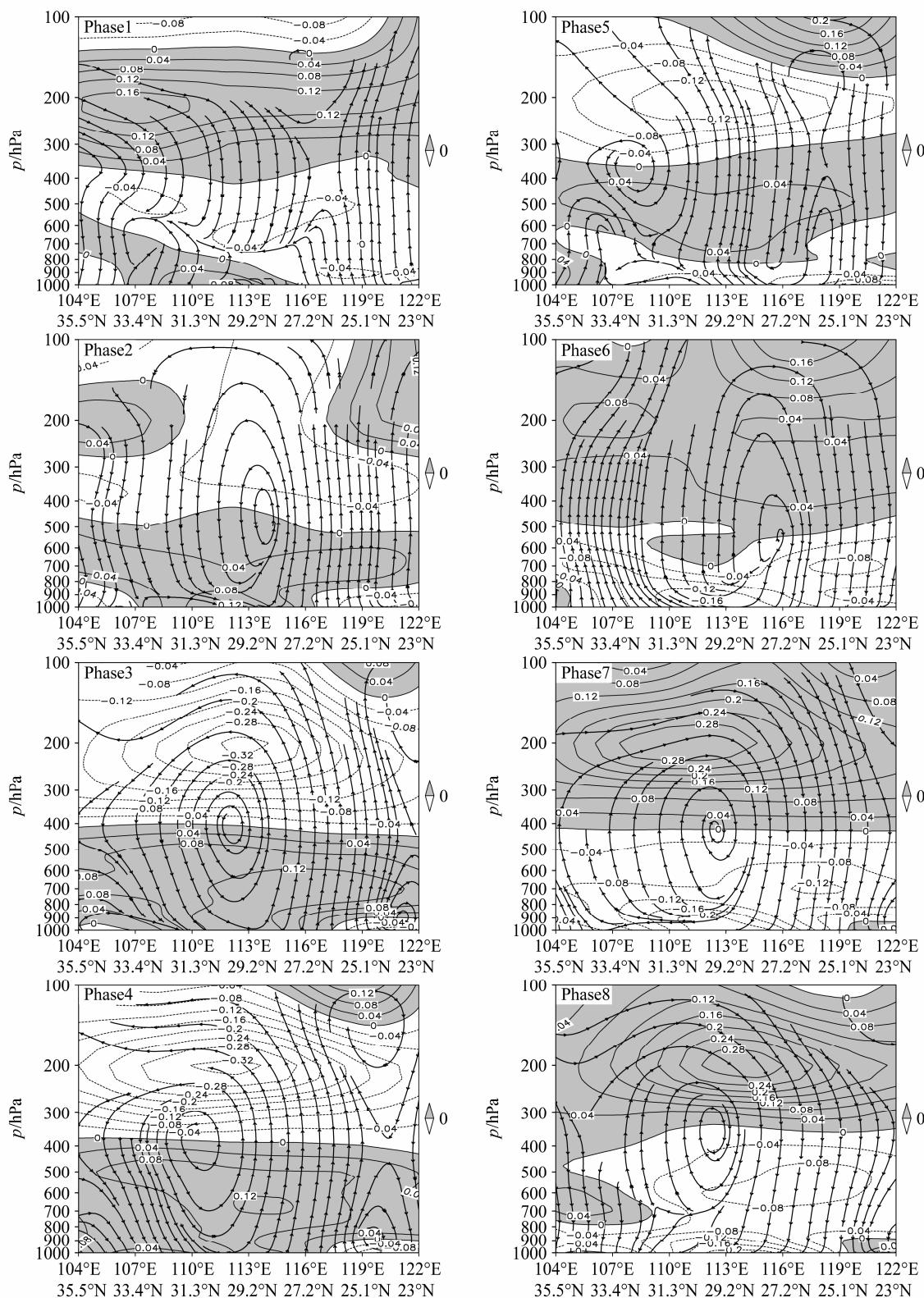


图 8 沿图 2b 中长虚线的 30~60 天 CISO 垂直环流剖面(流线,两个分量分别为投影到长虚线方向上的水平辐散风速和垂直速度)和 30~60 天 CISO 水平辐散风速投影到长虚线方向上的分量的垂直剖面(等值线, 阴影表示正值)。水平辐散风速单位: m s^{-1} , 垂直速度单位: -0.01 Pa s^{-1}

Fig. 8 The 30–60 day CISO cross sections for vertical circulations along the long dashed line in Fig. 2b. The horizontal divergent winds are projected onto the slanted line for constructing the vertical circulations. The contours denote the horizontal divergent winds. The positive values are shaded. Units for the horizontal divergent winds are in m s^{-1} and for the vertical velocities are in -0.01 Pa s^{-1}

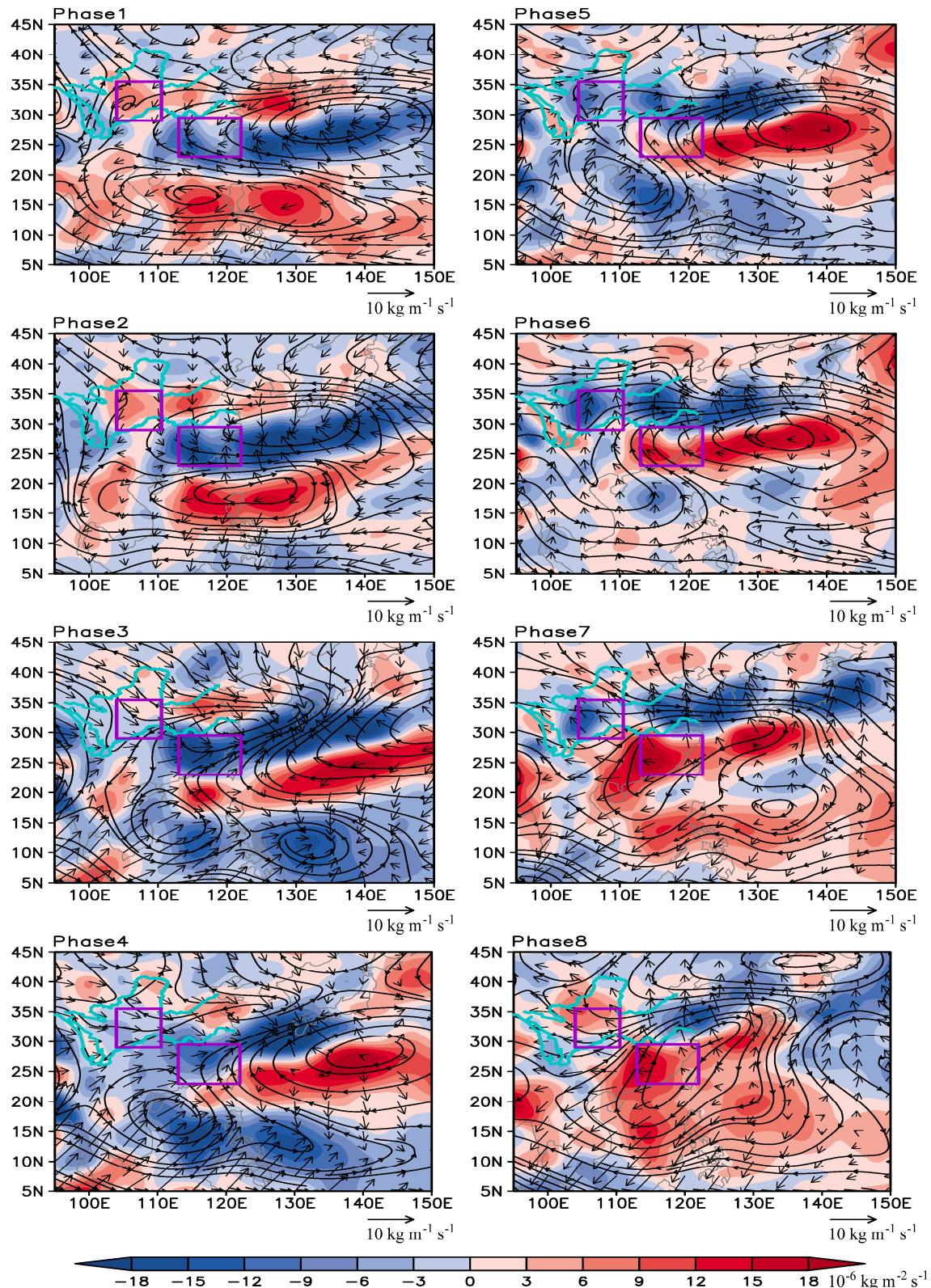


图 9 30~60 天 CISO 整层 (地面积分到 300 hPa, 下同) 水汽通量的旋转分量 (流线, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)、辐散分量 (矢量, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 及其散度 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Fig. 9 The rotational (streamlines) and divergent (vectors) components of 30–60 day CISO moisture flux which are vertically integrated from the earth surface to 300 hPa. Units are in $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$. The shadings denote the moisture flux divergence, whose units are in $10^{-6} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

部, 1位相时处于偏北风和偏南风的水汽辐合区; 2位相时, 偏北与偏南的水汽辐合增强。在3位相时, 偏北与偏南水汽辐合达到最强, 对应低频降水达到最强。4位相时, 中国东南部处于偏南水汽辐合区, 但强度明显减弱。从5~8位相, 整个形势几乎与1~4位相反相。5位相时, 中国东南部处于水汽辐合与辐散的交汇区, 表明水汽已经减少。到6位相时, 中国东南部主要处于水汽辐散区控制中。在7位相时, 中国东南部完全处于水汽辐散区中, 同时辐散达到最强, 对应低频降水达到最弱。到8位相时, 中国东南部的水汽辐散有所减弱。可见, 对于中国东南部, 8个位相上低频水汽的演变可较好反映低频降水完成一次位相循环所需的水汽条件。但是对于川渝陕甘地区要复杂一些, 这可能是由于NCEP再分析资料有地理位置偏差。关于这方面问题有待于进一步研究。

5.4 扰动能量传播

采用Hoskins et al. (1983)给出的 E 矢量来分析川渝陕甘地区与中国东南部之间降水CISO反相的可能联系。图10给出了 E 矢量在对流层高(200 hPa)、中(500 hPa)和低(850 hPa)层上的分布。 E 矢量的方向所指为在不考虑基本气流时的Rossby波动的扰动能量传播的主要方向。不论在对流层的高层、中层还是低层, 长江中下游地区均存在由东指向西的 E 矢量, 表明Rossby波固有群速度存在向西的分量(Hoskins et al., 1983), 进而表明长江中下游与川渝陕甘地区的扰动存在联系。当长江中下游地区扰动增强时, 由于能量的向西频散, 川渝陕甘地区的扰动亦将增强。又因中国东南部的降水CISO存在经向传播(图5b), 而川渝陕甘地区与中国东南部之间降水CISO存在反相振荡, 表明中国东南部与川渝陕甘地区之间的扰动存在间接联系。而联系两者的正是长江中下游地区。

总之, E 矢量显示出长江中下游与川渝陕甘地区之间存在自东向西的Rossby波扰动能量传播, 而长江中下游和中国东南部之间降水CISO在经向上密切联系, 因此三者之间存在动力学上的关联, 这可部分地解释川渝陕甘地区和中国东南部之间降水CISO的反相关系。

5.5 与大尺度环流的联系

低频降水的形成除了受季节内振荡场的制约外, 大尺度大气环流也会对降水CISO的形成产生重要影响。图11给出的是气候态的500 hPa位势高

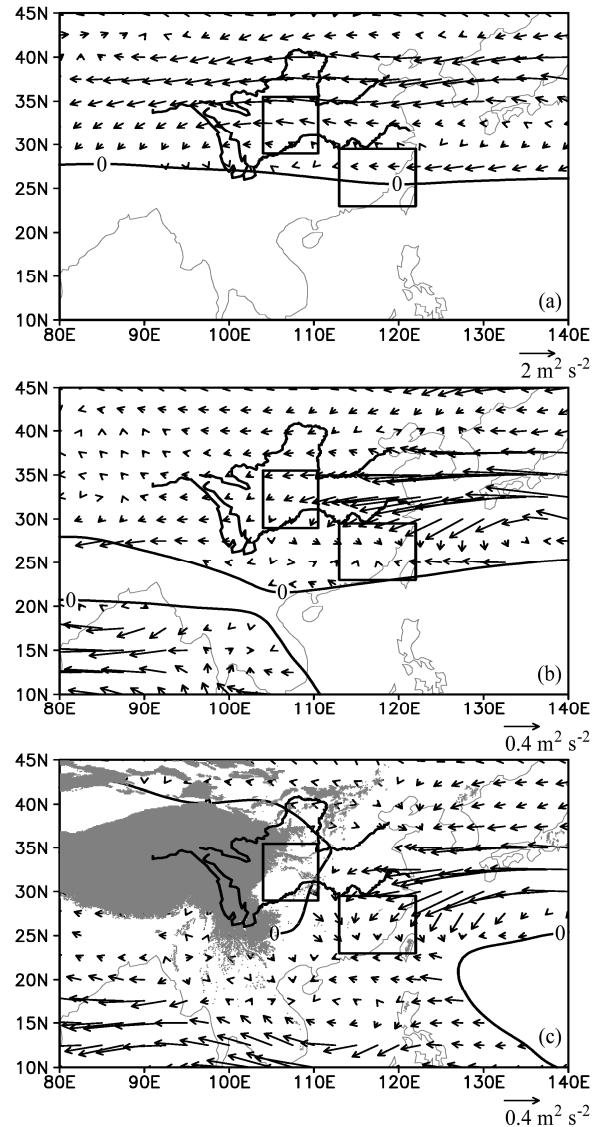


图10 (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 850 hPa E 矢量分布, 单位: $m^2 s^{-2}$ 。粗实线给出气候平均且夏季平均的东西风分界线所在位置

Fig. 10 The E vectors at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 850 hPa respectively, units are in $m^2 s^{-2}$. The thick solid lines stand for the boundaries of easterly and westerly winds in summer mean climatology

度场。它反应了降水CISO完成位相循环时相应的大尺度环流的演变过程。在中国东南部降水CISO的正位相(川渝陕甘地区降水CISO负位相)时期(1~4位相), 西太平洋副热带高压基本呈东北—西南走向, 中国东南部恰好位于其西北侧, 西南气流利于水汽输送, 有利于降水的产生; 川渝陕甘地区受西太平洋副热带高压的影响较小, 更多的是受到中纬度西风带环流系统中贝加尔湖附近大陆高压脊前西北气流的影响, 不利于产生降水。在中国东南部降水CISO的负位相(川渝陕甘地区降水

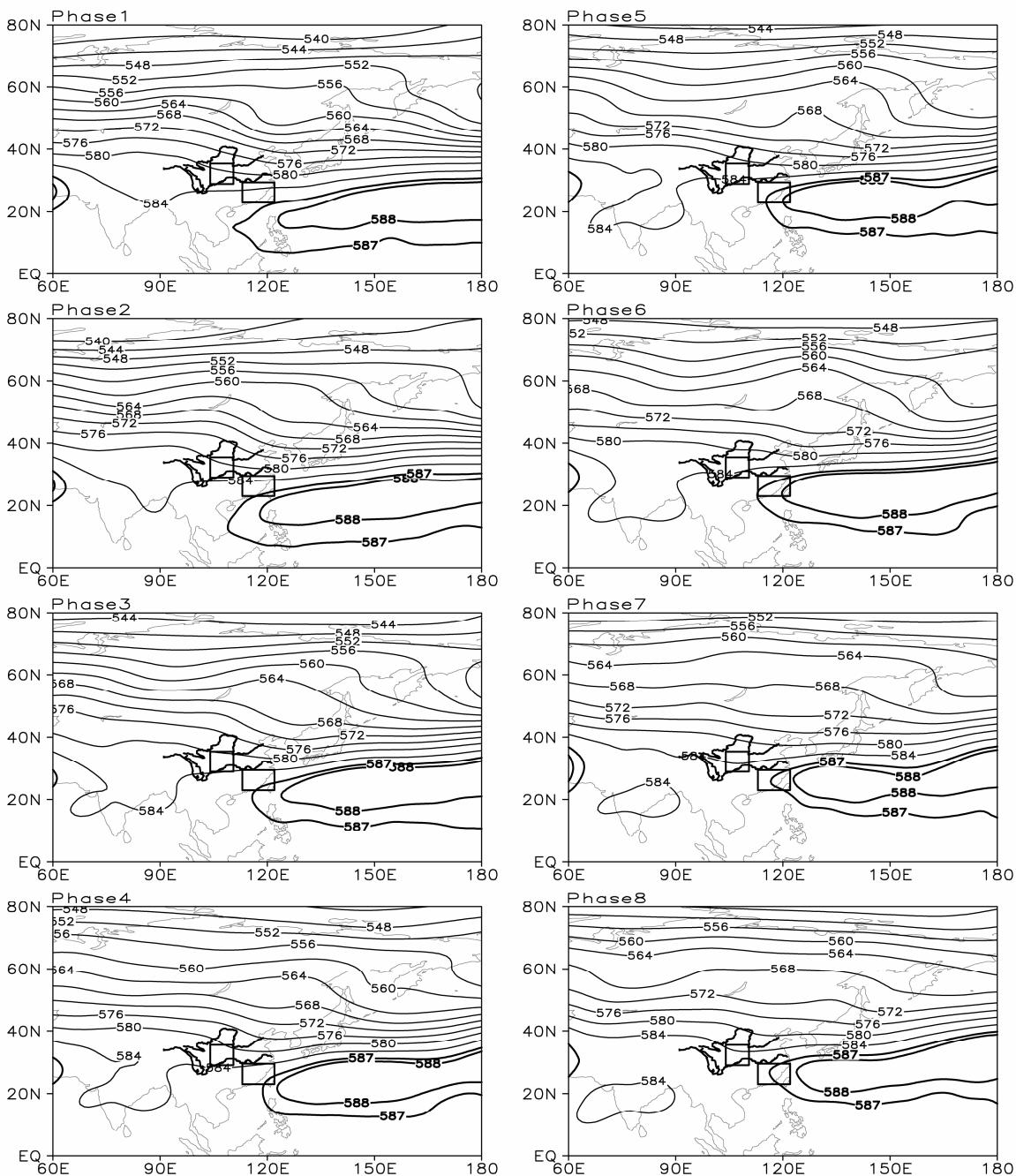


图 11 500 hPa 气候平均位势高度场在 30~60 天 CISO 各位相上的分布 (单位: dagpm)

Fig. 11 The 500-hPa mean climatological geopotential height at different phases of 30–60 day CISO. Units are in dagpm

CISO 正位相)时期(5~8位相),随着整个行星风带的季节性北移,西太平洋副热带高压也随之北推,变成东西走向,脊线位置由原来的 20°N 以南变成 20°N 以北,与此相随,整个雨带北进,不利于中国东南部降水的产生;中纬度西风带环流变得平直,贝加尔湖附近大陆高压脊明显减弱,川渝陕甘地区位于西太平洋副热带高压西北侧,出现西南气流,有利于降水的产生。

总之,中低纬环流系统之间相互作用的结果是,当中国东南部主要受西太平洋副热带高压影响而易产生降水时,川渝陕甘地区则受贝加尔湖附近大陆高压脊影响而少降水(1~4 位相);当西太平洋副热带高压北进,贝加尔湖附近大陆高压脊明显减弱时,中国东南部受西太平洋副热带高压控制而不易产生降水,川渝陕甘地区转为受西太平洋副热带高压的影响而易产生降水(5~8 位相)。

在影响我国夏季降水的诸多因子中, 西太平洋副热带高压无疑是影响中国东部夏季降水季节内变化的最直接和最主要原因(陈烈庭等, 2007), 同时注意到贝加尔湖附近大陆高压与我国夏季气候关系亦十分密切(谭桂容等, 2008)。这里的分析结果显示, 气候态下的西太平洋副热带高压和贝加尔湖附近大陆高压脊的季节内变化, 是中国东南部和川渝陕甘地区夏季降水CISO反相关系形成的环流基础。

6 结语

经过上述分析, 得到以下结论:

(1) 功率谱分析和方差分析结果显示, 显著的30~60天夏季降水CISO主要存在于川渝陕甘地区和中国东南部, 且这两个区域夏季降水CISO在7月中旬之前存在显著的反相现象。川渝陕甘地区与中国东南部夏季降水CISO在传播特征上存在显著差异。川渝陕甘地区降水局地低频振荡显著, 中国东南部降水CISO北传特征清晰。

(2) 低频环流分析显示, 对流层低层低频槽、脊的更替形成了川渝陕甘地区降水CISO的“驻相”振荡, 低频气旋式、反气旋式环流位置的移动则产生了中国东南部降水CISO的北传。CISO垂直环流显示上升支与下沉支正好处于川渝陕甘地区与中国东南部, 较好地反映了低频降水在两区域的相反变化。

(3) E 矢量显示出长江中下游与川渝陕甘地区之间存在自东向西的Rossby波扰动能量传播, 而长江中下游和中国东南部之间降水CISO在经向上密切联系, 因此三者之间存在动力学上的关联, 此可对川渝陕甘地区和中国东南部之间降水CISO的反相现象进行部分解释。

(4) 中国东南部和川渝陕甘地区夏季降水CISO反相关系的形成与气候态下的西太平洋副热带高压和贝加尔湖附近大陆高压脊的季节内变化有关。受西太平洋副热带高压脊线位置和贝加尔湖附近大陆高压脊强度的共同影响, 当中国东南部主要受西太平洋副热带高压西北侧的西南气流影响而易产生降水时, 川渝陕甘地区则主要受贝加尔湖附近大陆高压脊前西北气流影响而少降水(1~4位相); 当西太平洋副热带高压控制中国东南部而使其不易产生降水时, 贝加尔湖附近大陆高压脊明显减弱, 川渝陕甘地区转为受西太平洋副热带高压西北

侧西南气流影响而易产生降水(5~8位相)。

要说明的是, 本文着重从CISO角度对我国南方夏季降水进行了分析。由于CISO反映了ISO的锁相现象, 表明一般而言在季节内尺度上当中国东南部降水增多时, 川渝陕甘地区降水减少, 反之亦然。显然ISO还存在年际差异, 对于川渝陕甘地区与中国东南部降水ISO年际变化特征的分析将是未来要进行的工作。

致谢 中国气象局国家气象信息中心及南京信息工程大学地球科学部南京大气资料服务中心提供了资料服务; NCEP/NCAR再分析资料取自NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (<http://www.cdc.noaa.gov>); 文中诸图均用GrADS软件绘制。

参考文献 (References)

- 鲍名. 2008. 两次华南持续性暴雨过程中热带西太平洋对流异常作用的比较 [J]. 热带气象学报, 24 (1): 27~36. Bao Ming. 2008. Comparison of the effects of anomalous convective activities in the tropical western Pacific on two persistent heavy rain events in South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (1): 27~36.
- 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 [J]. 应用气象学报, 5 (4): 483~488. Chen Lizhen, Zhang Xiangong, Chen Longxun. 1994. A study of the difference of low-frequency oscillation between the typical flood/drought years in Changjiang valley [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5 (4): 483~488.
- 陈烈庭, 宗海锋, 张庆云. 2007. 中国东部夏季风雨带季节内变异模态的研究 [J]. 大气科学, 31 (6): 1212~1222. Chen Lieting, Zong Haifeng, Zhang Qingsyun. 2007. The dominant modes of intraseasonal variability of summer monsoon rain belt over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1212~1222.
- Chen W Y. 1982. Fluctuations in Northern Hemisphere 700 mb height field associated with southern oscillation [J]. Mon. Wea. Rev., 110: 808~823.
- 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.
- 管兆勇, 赵辉. 1995. 夏季多年平均及个别年份低层流场的准周期扰动分析 [J]. 南京气象学院学报, 18 (4): 518~522. Guan Zhaoyong, Zhao Hui. 1995. Analysis of quasi-periodic disturbance of summer low-level flow field with ECMWF long-term mean and 1980 data [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 18 (4): 518~522.
- 黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社. Huang Jiayou. 2004. Meteorological Statistical Analysis and Forecasting Methods (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 黄静, 朱乾根. 1997. 与长江流域旱涝相联系的全球低频环流场 [J]. 热带气象学报, 13 (2): 146~157. Huang Jing, Zhu Qian'gen. 1997. The characters of low-frequency circulation around the globe and its relationship with the flood/drought in the Changjiang River valley [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 13 (2): 146~157.

- 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.
- Ho L, Wang B. 2002. The time-space structure of the Asian-Pacific summer monsoon: A fast annual cycle view [J]. J. Climate, 15 (15): 2001–2019.
- Hoskins B J, James I N, White G H. 1983. The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems [J]. J. Atmos. Sci., 40 (7): 1595–1612.
- 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 [J]. 热带气象学报, 21 (2): 163–171. Ju 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.
- 贾燕, 管兆勇. 2010. 江淮流域夏季降水异常与西北太平洋副热带 30~60 天振荡强度年际变化的联系 [J]. 大气科学, 34 (4): 691–702. Jia Yan, Guan Zhaoyong. 2010. Association of summertime rainfall anomalies over the Changjiang–Huaihe River valley with the interannual variability of 30–60-day oscillation intensity in the northwestern Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 691–702.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471.
- Kang I S, Ho C H, Lim Y K, et al. 1999. Principal modes of climatological seasonal and intraseasonal variations of the Asian summer monsoon [J]. Mon. Wea. Rev., 127: 322–340.
- 陆尔, 丁一汇. 1996. 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡 [J]. 气象学报, 54 (6): 730–736. Lu Er, Ding Yihui. 1996. Low frequency oscillation in East Asia during the 1991 excessively heavy rain over Changjiang–Huaihe River basin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (6): 730–736.
- 刘芸芸, 丁一汇. 2009. 西北太平洋夏季风对中国长江流域夏季降水的影响 [J]. 大气科学, 33 (6): 1225–1237. Liu Yunyun, Ding Yihui. 2009. Influence of the western North Pacific summer monsoon on summer rainfall over the Yangtze River basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1225–1237.
- Liu Y J, Ding Y H. 2007. Analysis of basic features of the onset of the Asian summer monsoon [J]. Acta Meteor. Sin., 21 (3): 257–276.
- 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: 18–37.
- Liu J, Wang B, Yang J. 2008. Forced and internal modes of variability of the East Asian summer monsoon [J]. Climate Past, 4: 225–233.
- 缪锦海, 刘家铭. 1991. 东亚夏季风降水中 30~60 天低频振荡 [J]. 大气科学, 15 (5): 65–71. Miao Jinhai, Lau K M. 1991. Low frequency oscillation (30–60 day) of summer monsoon rainfall over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmosferica Sinica) (in Chinese), 15 (5): 65–71.
- 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.
- 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: 702–708.
- 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: 1109–1123.
- Murakami T, Nakazawa T. 1985. Tropical 40–50 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere summer [J]. J. Atmos. Sci., 42: 1107–1122.
- Nakazawa T. 1992. Seasonal phase lock of intraseasonal variation during the Asian summer monsoon [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 70 (1): 597–611.
- 谭桂容, 孙照渤, 林朝晖, 等. 2008. 贝加尔湖南侧大陆高压与东亚夏季风和中国夏季气候的关系 [J]. 气候与环境研究, 13 (6): 791–799. Tan Guirong, Sun Zhaobo, Lin Zhaohui, et al. 2008. Land high over area south to Lake Baikal and its relation with East Asian summer monsoon and climate anomalies of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(6): 791–799.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2005. 气候变率诊断和预测方法 [M]. 北京: 气象出版社.
- Wu Hongbao, Wu Lei. 2005. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 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.
- 王慧, 丁一汇, 何金海. 2005. 西北太平洋夏季风的气候学研究 [J]. 气象学报, 63 (4): 418–430. Wang Hui, Ding Yihui, He Jinhai. 2005. The climate research of summer monsoon over the western North Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (4): 418–430.
- Wang B, Xu X H. 1997. Northern hemisphere summer monsoon singularities and climatological intraseasonal oscillation [J]. J. Climate, 10: 1071–1085.
- 夏芸, 管兆勇, 王黎娟. 2008. 2003 年江淮流域强降水过程与 30~70 d 低频振荡的联系 [J]. 南京气象学院学报, 31 (1): 33–41. Xia Yun, Guan Zhaoyong, Wang Lijuan. 2008. Association of 30–70 d oscillations with the heavy rainfall over Changjiang–Huaihe River valley in summer 2003 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (1): 33–41.
- 邢雯, 黄菲, 王宏, 等. 2012. 1990s 年代际转型前后南海季风系统的气候季节内振荡 (CISO) 特征 [J]. 热带气象学报, 28 (1): 31–40. Xing Wen, Huang Fei, Wang Hong, et al. 2012. Climatological intraseasonal oscillation of the South China Sea monsoon system before and after the decadal shift in 1990s [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28 (1): 31–40.
- 杨秋明. 2001. 长江下游旱涝与夏半年欧亚环流 30~60 天振荡的年际变化 [J]. 气象学报, 59 (3): 318–326. Yang Qiuming. 2001. The drought/flood in the low reaches of Yangtze River and the interannual variations of the 30–60 day oscillation of Eurasian circulation during summer half year [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (3): 318–326.
- 于群, 黄菲, 王启, 等. 2011. 山东雨季季内降水分型及旱涝并存与急转—气候特征 [J]. 热带气象学报, 27 (5): 690–696. Yu Qun, Huang Fei,

- Wang Qi, et al. 2011. Intraseasonal precipitation patterns and coexistence of droughts and floods and abrupt alternation in Shandong Province in rainy seasons—Climatology [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 27 (5): 690–696.
- Yang J, Bin W, Wang B, et al. 2009. The East Asia–Western North Pacific boreal summer intraseasonal oscillation simulated in GAMIL 1. 1. 1 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (3): 480–492.
- Yu Q, Wu W, Zhou F X, et al. 2012. Study on the main climate modes of Shandong precipitation and their relations with the East Asian westerly jet [J]. *J. Trop. Meteor.*, 18 (1): 72–80.
- 张瑛, 陈隆勋, 何金海, 等. 2008. 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 [J]. *气象学报*, 66 (4): 577–591.
- Zhang Ying, Chen Longxun, He Jinhai, et al. 2008. A study of the characteristics of the low-frequency circulation on Tibetan Plateau and its association with precipitation over the Yangtze valley in 1998 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (4): 577–591.
- 赵崇博, 周天军, 李博, 等. 2011. 夏季中国东部降水季节内振荡的区域模式模拟 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1033–1045. Zhao Chongbo, Zhou Tianjun, Li Bo, et al. 2011. Intraseasonal oscillation of summer rainfall over eastern China simulated with a regional climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (6): 1033–1045.