

齐艳军, 张人禾, Tim Li. 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. Qin Yanjun, Zhang Renhe, Tim Li. 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.

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

齐艳军¹ 张人禾¹ Tim LI²

¹ 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

² International Pacific Research Center and Department of Meteorology, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA

摘 要 利用中国逐日降水格点资料和 NCAR/NCEP 再分析资料, 对 1998 年发生在我国东部长江中下游流域的夏季持续性强降水过程中显著的大气季节内振荡 (ISO) 的三维结构演变等活动特征进行了分析。1998 年夏季长江及江南地区的异常强降水对应着该地区强的 ISO 活动。利用位相合成方法, 对长江流域两个典型的季节内循环周期的 ISO 降水、850 hPa 水平风场以及水汽和垂直速度等循环过程的时空分布特征进行了诊断分析。在低频环流场上, 对流层低层的低频气旋和反气旋环流表现出交替在热带西北太平洋增强并向西偏北方向移动发展的特征, 当异常气旋环流移动到长江流域上空时, 长江流域正好位于气旋环流西南侧的东北风异常和西北太平洋上向西移动的反气旋环流西北侧的西南风异常环流汇合处的下方, 引起该地区强降水的发生。在强降水阶段的 ISO 的垂直结构上, 上升运动和水汽表现出从华南到长江流域自南向北移动的特征, 强烈的垂直上升运动以及来自南方充足的水汽为增强长江流域地区的降水起到了重要作用。

关键词 中国东部夏季降水 大气季节内振荡 结构演变特征

文章编号 1006-9895(2016)03-0451-12 中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15107

Structure and Evolution Characteristics of Atmospheric Intraseasonal Oscillation and Its Impact on the Summer Rainfall over the Yangtze River Basin in 1998

QI Yanjun¹, ZHANG Renhe¹, and Tim LI²

¹ State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² International Pacific Research Center and Department of Meteorology, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA

Abstract The spatial and temporal structures of intraseasonal oscillation (ISO) associated with the summer rainfall of 1998 over the middle–lower reaches of the Yangtze River basin (YRB) are investigated using China gauge-based daily precipitation analysis data and NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) reanalysis data. It is found that summer rainfall over the YRB exhibits marked ISO activities in 1998. Based on phase-composite analysis, the alternating cyclonic–anticyclonic circulation pattern propagates

收稿日期 2015-01-12; 网络预出版日期 2015-07-30

作者简介 齐艳军, 女, 1971 年出生, 副研究员, 主要从事亚洲季风及季节内振荡研究。E-mail: qiyj@camsma.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) 2015CB453203、2012CB417205, 中国气象科学研究院基本科研业务费 2015Z001, 国家自然科学基金项目 41221064

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grants 2015CB453203, 2012CB417205), Basic Research Fund of the Chinese Academy of Meteorological Sciences (Grant 2015Z001), National Nature Science Foundation of China (Grant 41221064)

northwestward from the western North Pacific. A maximum rainfall anomaly occurs over the YRB when an anomalous low-level cyclone appears in situ. An anticyclonic circulation anomaly, with pronounced southwesterlies, appears to the south of the YRB. The vertical motion and specific humidity anomalies associated with ISO exhibit notable northward propagation from the tropics all the way to the latitude of the Yangtze River during the summer of 1998. The enhanced upward motion, low-level vorticity and moisture favor strong precipitation over the YRB.

Keywords Summer rainfall in eastern China, Intraseasonal oscillation, Structure and evolution characteristics

1 引言

在北半球夏季, 大气季节内振荡 (ISO, Intraseasonal Oscillation) 活动与亚洲夏季风循环的密切联系自从上世纪七十年代末被人们发现以来 (Yasunari, 1979), 随着诊断方法的不断改进和完善, 以及各种观测资料尤其是高分辨率卫星资料的不断补充和丰富, 人们对 ISO 的产生源地及其传播规律和发展演变等活动特征有了更深入的认识和研究 (Krishnamurti and Subrahmanyam, 1982; Murakami et al., 1984; 李崇银, 1995; Jiang and Li, 2005; Li and Wang, 2005; Wang et al., 2005; 据建华等, 2008; Qi et al., 2008, 2013; Hsu and Li, 2012; Li, 2014)。由于 ISO 活动对季风区的天气气候异常有直接的影响, 在天气业务的延伸期预报中, ISO 的异常变化逐渐被视为一个重要的考虑因素。世界气候研究计划 (WCRP) 下属的气候变化及可预报性研究计划 (CLIVAR) 将大气季节内振荡作为它的主要研究内容之一, 在 CLIVAR 的积极组织与倡导下于 2006 年成立的 MJO (Madden-Julian Oscillation) 工作组的主要任务就是借助于数值模式将大气季节内振荡研究应用于长期天气和短期气候的业务预测中 (Seo et al., 2007; Vitart et al., 2007; 贾小龙等, 2012; 梁萍和丁一汇, 2012)。尤其日前, 在 WMO/WWRP-THORPEX (World Meteorological Organization/World Weather Research Programme – The Observing System Research and Predictability Experiment) 和 WCRP 的共同协作下开展并实施了“次季节—季节预测研究计划”, 在该计划项目中作为热带大气季节内变率的主要模态, MJO 被认为是预测全球次季节时间尺度的主要来源 (齐艳军和容新尧, 2014)。因此, 深入研究大气季节内振荡的活动及其规律, 不仅对认识亚洲季风系统极为重要, 而且对于季风区的天气气候预测都具有实际意义。

起源于热带地区的大气季节内振荡对西北太平洋的台风活动具有调节作用 (李崇银等, 2013),

同时大气季节内振荡的发展强度与传播也和南海夏季风活动有着密切联系 (穆明权和李崇银, 2000; Lin et al., 2006; 据建华等, 2010; 陈尚锋等, 2011), ISO 通过对西北太平洋台风和南海夏季风活动的影响引起我国华南气候的异常。在我国东部地区, 东亚副热带夏季风的异常降水往往会导致东部地区的洪涝或干旱等极端天气和气候事件发生, 以长江中下游流域为代表的中国东部地区的夏季降水异常变化除了直接与东亚地区的环流异常和水汽输送外 (Zhang, 2001), 也常常受到大气季节内振荡 ISO 活动的影响 (Lau and Chan, 1986; Yang and Li, 2003)。例如, 1991 年夏季江淮流域的强降水, 1998 年长江流域的特大洪涝以及 2003 年江淮流域强降水都与 ISO 活动密切相关 (Zhu et al., 2003; 毛江玉和吴国雄, 2005; 夏芸等, 2008), 研究表明在夏季降水较强的年份 ISO 活动尤其活跃, 对我国东部地区的强降水有重要的贡献。Yang et al. (2013) 从中高纬对流层高层风场的低频波列活动解释了大气季节内振荡在 2011 年 6 月初长江中下游地区的旱涝转折过程中的作用。从气候意义上, ISO 活动对东亚夏季风也具有显著的调制作用 (Wang and Xu, 1997), 特别是我国东部长江中下游及淮河地区的降水与 ISO 的强度及其传播有着密切的联系 (据建华等, 2005; 王遵娅和丁一汇, 2008; Yang et al., 2010)。Lau and Chan (1986, 1988) 的研究显示, 我国长江流域梅雨雨带的南北移动与南海地区 40~50 天的 ISO 从南向北的传播有密切联系。东部地区夏季降水的多寡不仅受到从南海向北传播的 ISO 的调制作用, 同时也受到来自赤道印度洋和青藏高原南麓印度季风区自西向东北传播的 ISO 以及从西太平洋自东向西北传播的 ISO 的影响 (何金海等, 1984; Chen et al., 2001; 韩荣青等, 2006)。近年来的研究结果显示长江中下游夏季降水的活跃期与中断期的交替出现源自于西太平洋副高的季节变化, 而副高的季节变化受到南海和菲律宾海附近类似于 Rossby 波向北和向西北传播的低频对流—环流耦合系统的影响 (Mao et al., 2010)。杨

秋明等(2012)对影响长江流域持续性暴雨的全球大气季节内振荡的研究进展进行了回顾,概括性地评述了全球热带内外不同时间尺度的大气 ISO 的空间变化和年际变化与长江流域持续性降水之间的紧密联系。

以上研究结果表明,ISO 活动对长江流域地区夏季降水异常有着重要的影响。1998 年夏季长江中下游流域发生的持续性强降水具有显著的季节内振荡特征,ISO 循环在强降水过程阶段的水平和垂直结构分布特征如何,以及 ISO 活动又将如何对长江流域的降水产生影响。本文将利用位相合成等诊断方法对 1998 年与我国东部夏季强降水相联系的 ISO 三维时空结构特征进行分析,并通过 ISO 水平和垂直结构的发展演变来揭示对分层低层风场以及水汽和垂直运动的低频环境场在长江流域强降水的产生和维持过程中所起的作用。

2 资料和方法

文中采用的资料包括:(1)中国气象局信息中心提供的中国逐日降水格点资料(Shen and Xiong, 2015),分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,这套分析资料是基于全国加密观测网的逐日 2400 个雨量计观测,通过最优插值算法建立的一套融合降水资料;(2)NCEP/NCAR 的纬向风和经向风、垂直速度、比湿等在各标准等压面层上的资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。以上变量资料的时间序列长度均为 1979~2007 年共 29 年。

文中主要采用位相合成等方法对 ISO 的时空演变及其三维结构特征进行分析。

3 1998 年夏季降水分布及其季节内活动特征

1998 年夏季中国长江流域发生了四十多年以来全流域性的特大洪水,同年夏季在东北地区的嫩江和松花江流域也频降大雨和暴雨,导致该区域出现了百年不遇的大洪水。图 1a 所示是 1998 年夏季 5~8 月累积降水分布,在四川东部、重庆、湖北西南、湖南北部、江南北部等地区 5~8 月的降水量一般都达到 800~1000 mm,尤其是长江中下游的江南地区,降水量超过 1200 mm,湖北东南部和江西北部地区的 5~8 月份累积降水甚至高达 1600 mm 以上。和常年相比,1998 年夏季长江全流域的降水都是正距平,特别是 110°E 以东的江南地区比

气候平均的降水偏多 400 mm 以上,在湖南东北部和江西北部的降水偏多 600 mm 及以上,持续的强降雨带稳定地维持在江西、湖南、浙江、广西和福建等省区,造成这些区域连续性的暴雨至特大暴雨天气(图 1b)。

1998 年夏季,显著地降水正距平主要分布在 110°E 以东长江中下游流域的江南地区,从纬度—时间的经向剖面图上看出,长江流域地区经历了两次强持续性降水过程(图 2),第一降水阶段,雨带从我国华南地区有明显的向北移动,在 5 月中旬到 6 月初,雨带位于大约 22°N 的华南地区,6 月 11~12 日开始,雨带突然向北推进到 30°N 以南的长江流域,6 月中下旬雨带稳定地维持在江南地区,降水增幅,致使包括湖南、江西、安徽、浙江、福建等地在内的江南地区出现连续性暴雨或大暴雨天气过程。7 月下旬开始,长江流域再次出现持续性强降雨,和第一次降雨过程相比,本次降雨过程具有局地突发性的特点,而不是由华南地区向北传播的雨带。该雨带从 8 月初到 8 月中旬向北移动到 35°N 的位置。

以上分析可看出,1998 年我国东部地区的长江中下游流域夏季降水具有明显的季节内变化特征。利用 1998 年的逐日降水资料对长江中下游流域做功率谱分析,如图 3 所示,在长江中下游地区夏季降水具有显著的周期为 30~60 天的季节内振荡特征,这一典型的 30~60 天季节内振荡活动与该地区的持续性强降水之间的联系以及季节内振荡对强降水的发生有着怎样的促进作用。以下所分析的大气季节内振荡(以下简称为 ISO)都将指经过 30~60 天带通滤波这一频段范围内的振荡。

从 1998 年夏季降水的 ISO 标准差分布图上(图 4a), 110°E 以东长江以南的我国东南部地区都是 ISO 振荡强度较大的地区,ISO 最为活跃的区域不仅仅局限于沿长江流域及其以南的邻近地区,同时在湖南东部、江西和福建北部也是 ISO 的活动中心。对比图 1b 和图 4b 可以看到,1998 年夏季降水异常偏多的地区长江中下游及其以南地区,也是 ISO 活动异常偏强的地区,这说明 1998 年夏季降水异常偏多可能与该地区的 ISO 振荡偏强有密切联系。下面我们从揭示沿长江流域两次大暴雨过程期间的 ISO 位相的发展演变等三维结构来分析 ISO 在 1998 年持续性强降水过程中的作用。

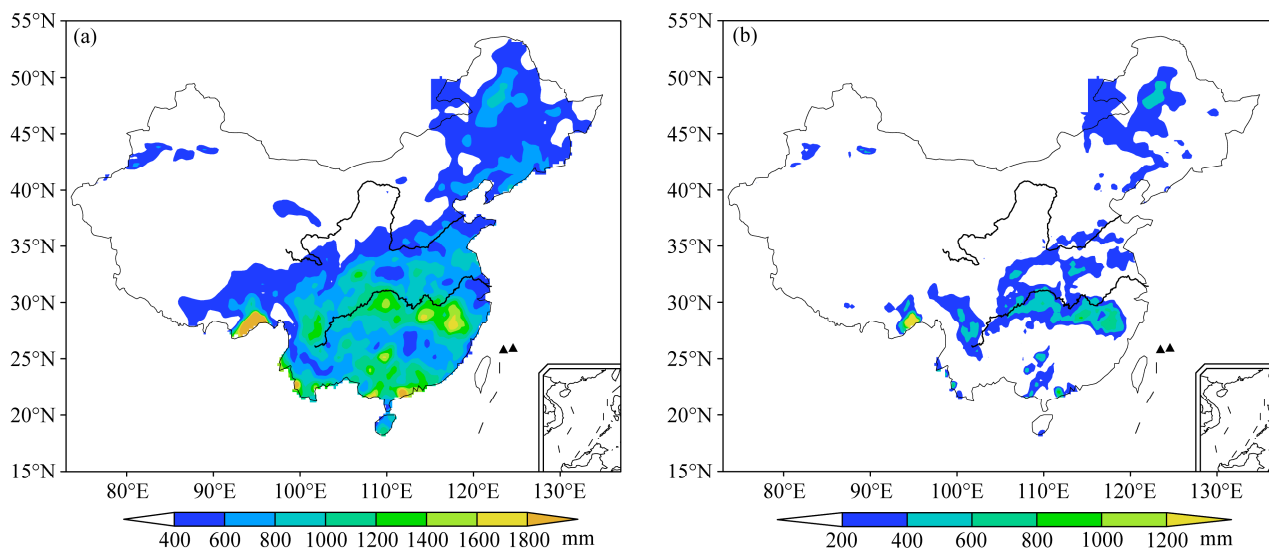


图1 (a) 1998年夏季5~8月份的累积降水(单位: mm), (b) 1998年相对于1979~2007年夏季5~8月份累积降水的偏差(单位: mm)

Fig. 1 (a) Distribution of cumulative rainfall for the period 1 May to 31 August 1998 (units: mm); (b) departure of cumulative summer (May–August) rainfall in 1998 from the climatology of 1979–2007 (units: mm)

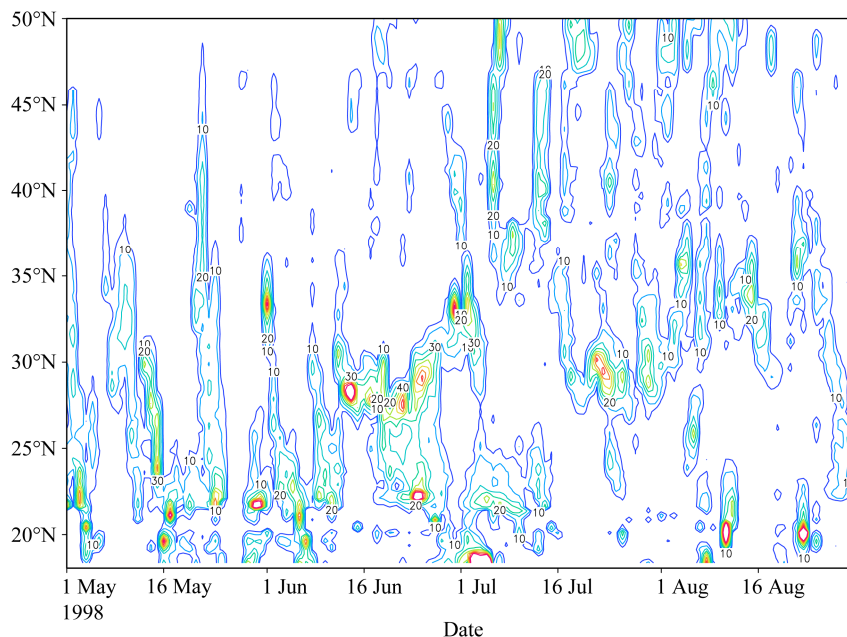


图2 1998年夏季逐日降水经过110°~120°E的纬度—时间剖面

Fig. 2 Latitude–time cross section of daily precipitation (mm) in 1998 averaged in the longitude range between 110°E and 120°E

图4b中方框所示长江中下游以南地区的逐日降水和经过30~60天滤波的降水时间序列如图5所示。1998年夏季长江中下游地区的总降水量为949 mm, 超过气候平均值(704 mm)大约35%, 在整个夏季长江中下游地区有两次明显的强降水过程, 一是发生在6月中旬至7月初的降水过程, 另一个是7月中旬至7月底的降水, 这两次强降水

时段分别对应着30~60天ISO的两个异常降水峰值, 图5的降水时间序列可以清楚的看到长江中下游地区明显的季节内振荡特征及其峰值所对应的两次强降水过程。

4 ISO循环的三维结构特征

以上的分析结果显示, 长江中下游及其以南地

区夏季降水异常偏多的地区也是 ISO 振荡最为活跃的地区, 为了解强降雨过程中 ISO 的时间和空间演变结构以及 ISO 对强降雨的影响, 对该地区 ISO 的周期循环进行位相合成, 分析降水过程中 ISO 的时空分布特征及其三维结构演变对强降雨的产生和维持所起到的作用。

4.1 ISO 循环位相的选取

在 1998 夏半年 (5~10 月), 长江中下游地区的降水主要经历了 2 个完整且振荡显著的周期循环, 选择这两个振荡循环并将每一个循环分成 8 个连续位相, 对每个循环中的各个位相做合成来分析 ISO 各要素在 1998 年夏季的位相发展及结构演变

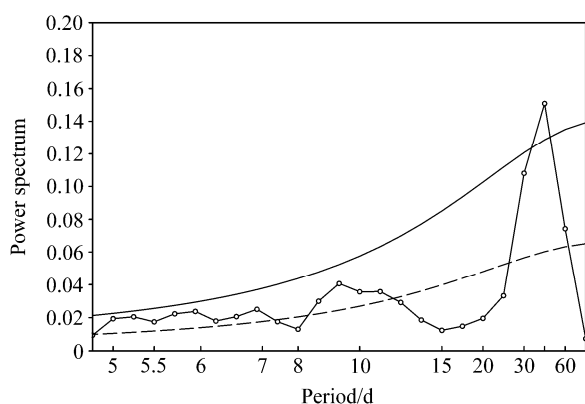


图 3 长江中下游地区 (27°~30°N, 110°~120°E) 1998 年夏季降水量的功率谱分布 (带圆圈的曲线)。虚线代表红噪声谱, 实线是红噪声谱的 95% 检验水平

Fig. 3 Power spectrum (curve with circles) of summer rainfall in 1998 over the middle-lower reaches of the Yangtze River (dashed line indicates red noise spectrum; solid line indicates the 95% confidence level)

特征。8 个连续位相的定义如下: 以 1998 年夏季第一个最大正位相 (波峰) 为参考点 (如图 5 所示), 其前一个最小值到紧邻其后的一个最小值之间的时间间隔为一个振荡周期。对一个选中的 ISO 循环, 选取降水异常的最大负位相为其第 1 位相, 接着每隔八分之一周期依次选取第 2, 3, ..., 8 位相 (图 5 中所标数字)。位相 1、3、5 和 7 分别对应着当降水异常在最小值、由负值转为正值、最大值和由正值转为负值的时间。因此, 第 1 位相和第 5 位相分别代表长江中下游地区 ISO 的最干和最湿位相。从图 5 中可以看出, 每个 ISO 循环的周期没有一定的规律, 这两个循环的振荡周期分别为 32 天和 33 天, 平均每个位相之间大约相差 4 天左右。

4.2 ISO 异常降水和 850 hPa 环流场的周期演变特征

根据以上 ISO 周期循环的选取和位相定义, 对 1998 年长江中下游流域地区 ISO 各位相的降水、850 hPa 风场以及垂直速度、水汽等气象要素进行位相合成, 来诊断和分析该地区 ISO 的发生、发展及传播演变等三维结构的时空分布特征。

4.2.1 ISO 异常降水的初始生成阶段 (第 1~3 位相)

在夏季长江流域降水异常偏多的 1998 年, 30~60 天 ISO 循环的降水和 850 hPa 风场的连续 8 个位相合成图如图 6 所示。在第 1 位相, 长江中下游及其以南地区处于干旱少雨阶段, 江南大部被负降水异常所控制, 最大的负降水异常主要分布在 110°E 以东的江南地区, 此时该地区处于最大干位相阶段 (图 6 中第 1 位相), 日本岛南部也有明显的负降

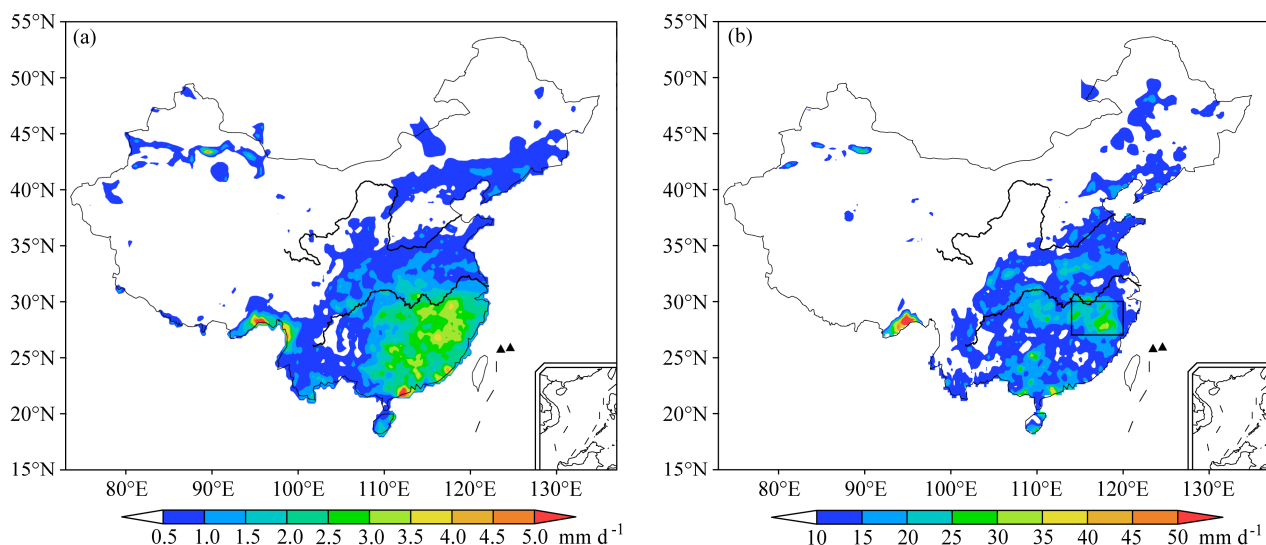


图 4 (a) 经过 30~60 天滤波的 1998 年夏季 (5~8 月) 降水标准差分布; (b) 1998 年夏季降水的标准差分布。单位: mm d^{-1}

Fig. 4 Standard deviations of (a) 30-60-day filtered summer rainfall in 1998 and (b) May-August rainfall in 1998 (units: mm d^{-1})

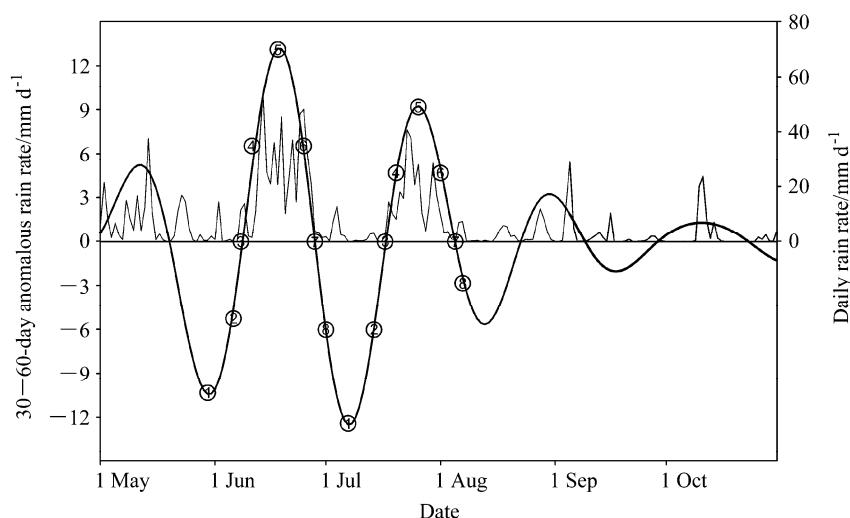


图5 1998年长江中下游地区夏季(5~8月)逐日降水量(细实线, y 轴右侧坐标, 单位: mm d^{-1})和经过30~60天滤波的ISO异常降水量(粗实线, y 轴左侧坐标, 单位: mm d^{-1})时间序列, 图中带圆圈的数字表示ISO的8个连续位相

Fig. 5 Time series of daily rain rate (thin solid line; right-side y -axis) and 30-60-day filtered anomalous rain rate (thick solid line; left-side y -axis) over the Yangtze River basin in summer 1998 (the circled numbers 1-8 mark the timing of phases 1-8 for each oscillation cycle selected for the composite analysis)

水异常。从风场上看, 江南地区和日本南部正好处于该地区上空对流层低层 850 hPa 上一个弱的反气旋式环流异常的控制下, 在日本东南方向的西北太平洋上是一个较强的气旋式环流异常, 长江下游及其以南地区的东部边缘正好位于东西方向上这两个异常环流接壤处东北气流的下方, 在浙江、江西和湖北北部的江南地区则是一致的东风异常, 而长江以北是西风异常, 这种环流形势的分布解释了长江流域处于最大干位相的原因。第2位相, 长江中下游流域和日本的负降水异常有明显的减弱并伴有向北移动。该地区上空 850 hPa 的反气旋异常环流减弱消失, 西北太平洋上气旋式异常环流明显向西移动同时增强, 但中国大陆东部地区仍然处在东北风异常环流的控制下(图6中第2位相)。到第3位相阶段, 负降水异常继续向北移动, 同时长江以南地区和日本岛南部出现了正降水异常, 西北太平洋上的气旋式异常环流继续向西移动增强, 并伴有缓慢的北移(图6中第3位相), 气旋中心移到日本大陆最南端。

4.2.2 ISO 异常降水的发展及成熟阶段(第4~5位相)

在ISO降水发展的第3位相, 负降水异常已经北移到长江以北地区, 干旱的强度有所减弱, 面积收缩, 日本南部的负降水异常也减弱, 同时向北偏西移动到朝鲜半岛南部。在江南地区出现了强度为

3 mm d^{-1} , 甚至 6 mm d^{-1} 的降水, 在日本南端的正降水异常也同时出现。我们注意到, 长江中下游流域和日本岛南部地区的ISO负、正降水异常同步变化, 说明这一纬度带的季节内降水变化受到同一种天气系统或者扰动的调制作用。从一个ISO循环的8个连续位相看, 第4~5位相是ISO降水的成熟位相阶段, 也是最大湿位相阶段, 即在该位相长江流域地区的正降水异常处于这一循环的最大峰值阶段。如图6所示, 第4位相长江以北的负降水异常继续向北减弱, 江南和日本南部地区的降水区域增大, 强度开始增强。对流层低层 850 hPa 上的气旋式环流异常进一步增强, 其中心向西偏北移到 130°E 的日本最南端西侧, 此时江南降水区域上空主要是气旋式环流西侧的东北风异常。从第4到第5位相, 长江中下游以北的负降水异常减弱并消失, 预示着长江以北地区开始出现降水, 但显著的强降水仍然分布在江南地区, 最强的降水出现在长江中下游的湖北、江西北部及浙江一带, 强度达到最大, 中心值超过 15 mm d^{-1} , 主要分布在 110°E 以东的江南地区(图6中第5位相)。第5位相的正降水异常与第1位相的负异常所覆盖的区域范围以及最大或最小的降水异常值相一致, 只是符号相反。本文中第5位相是ISO振荡的最强正位相, 也是长江中下游地区的最大湿位相, 此阶段对流层低层的环流形势与最大干位相的第1位相的环流形势相反。从

第 4 到第 5 位相, 中国东部地区到朝鲜半岛和日本上空的气旋环流向西快速收缩并减弱, 同时西北太平洋上反气旋异常环流逐渐形成, 长江中下游及其

以南地区最强的降水正好位于对流层低层减弱的气旋环流东北风异常转向西南风的下方, 在长江中下游流域的纬度上向东延伸一直到日本南部都处

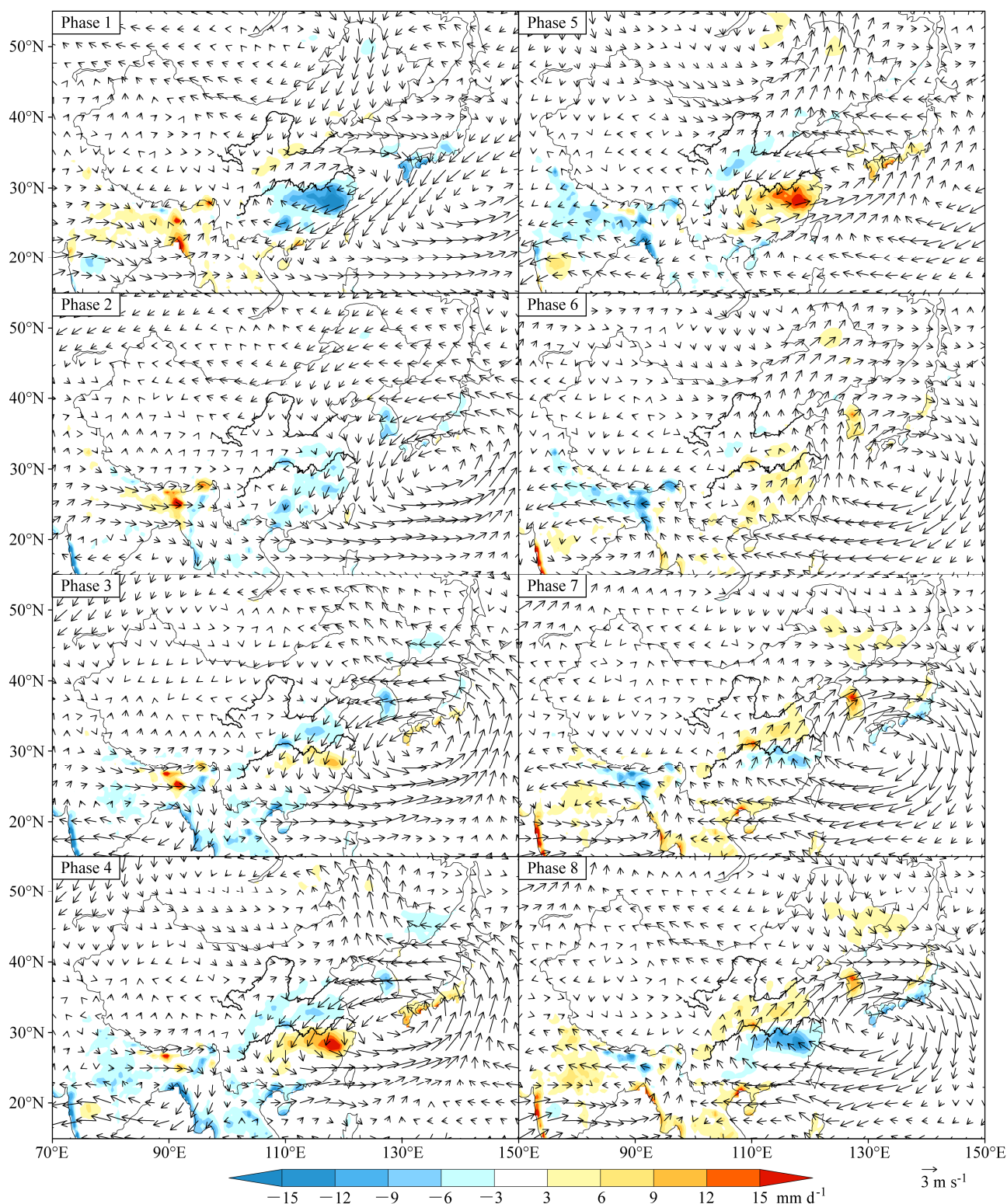


图 6 1998 年 30~60 天滤波的降水量和 850 hPa 风场的位相合成演变。阴影代表 ISO 降水异常 (单位: mm d^{-1}), 箭头是 850 hPa 风场异常 (单位: m s^{-1})

Fig. 6 Composite of 30~60-day filtered anomalous precipitation and 850 hPa wind in 1998 [shading denotes precipitation anomalies (units: mm d^{-1}); vectors denote the circulation anomalies at 850 hPa (units: m s^{-1})]

于这种有利于降水发生的环流形势下。

4.2.3 ISO 异常降水的减弱阶段 (第 6~8 位相)

第 6 位相开始, ISO 降水开始减弱, 并伴随向北传播 (图 6, 第 7、8 位相), 在 ISO 降水异常向

北减弱移动的同时, 负异常从第 7 位相的长江以南地区出现并开始发展增强 (第 8 位相), 降水负异常的演变形势与正异常 (第 3、4 位相) 非常类似。从环流场分布形势, 降水开始减弱的第 6 位相, 西

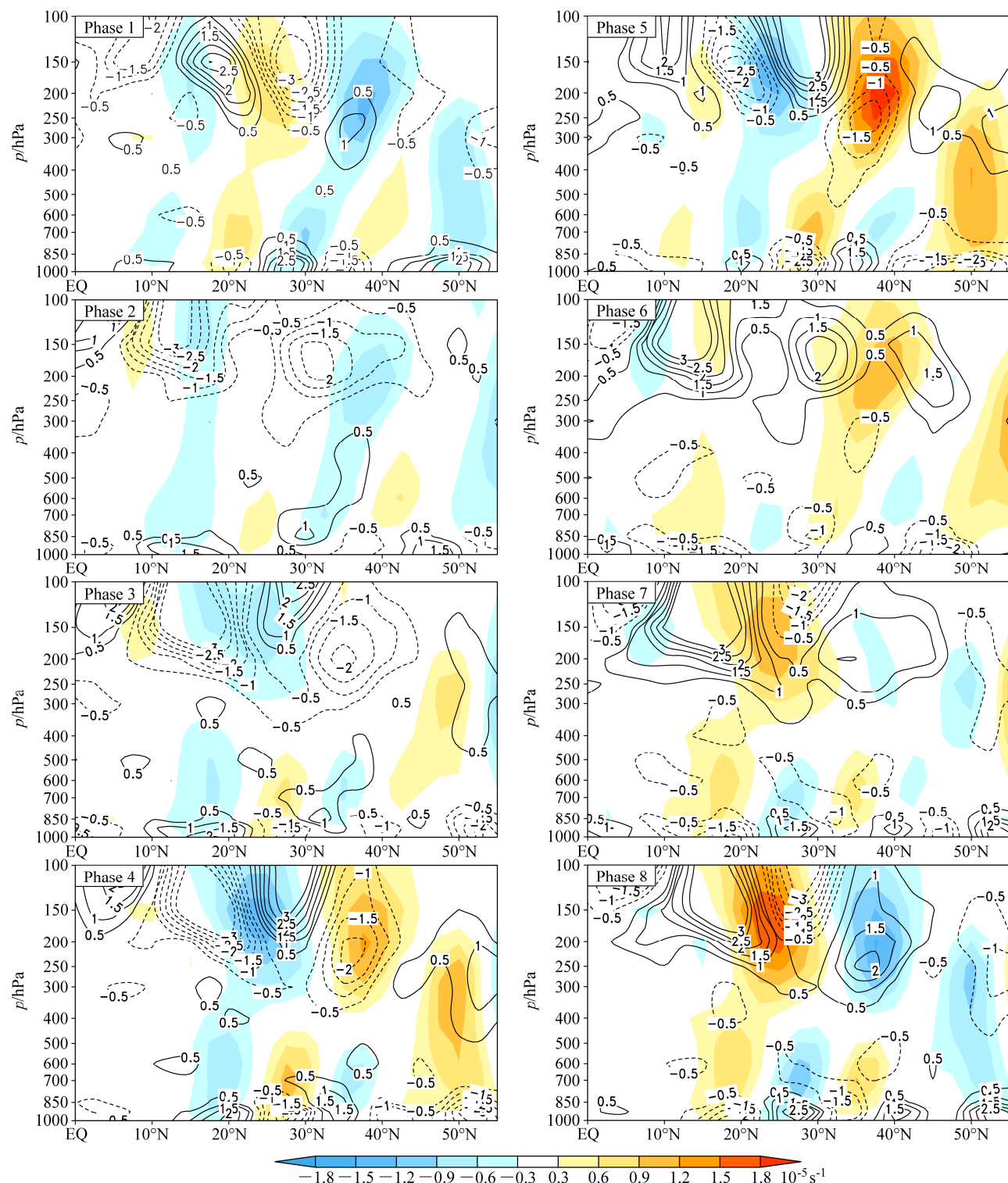


图 7 经过 $(110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$ 剖面的 30~60 天的风场涡度场和散度场的位相合成演变。阴影是涡度 (单位: 10^{-5} s^{-1}), 等值线是辐散/辐合 (单位: 10^{-6} s^{-1})
Fig. 7 Composite vertical structure of 30~60-day filtered wind vorticity (shading; units: 10^{-5} s^{-1}) and convergence/divergence (contours; units: 10^{-6} s^{-1}) averaged over the region of $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ in 1998

北太平洋上形成闭合的反气旋环流异常,并向西移动增强(第 6、7、8 位相),大陆上的气旋环流完全消失,中国东部地区上空是反气旋环流西侧的西南风气流,处于高压控制下(图略),因此从第 7 位相开始,长江及其以南地区开始处于降水的间歇期。随着时间的推移,海洋上的反气旋环流逐渐向西移动到我国大陆的东部地区上空,开始重复下一个 ISO 周期的循环。

从对流层低层 850 hPa 水平风场的结构演变来看,1998 年影响长江流域地区夏季降水的环流主要是来自西北太平洋上空向西北方向移动和发展的低频气旋,并配合其他动力和热力因素,造成长江中下游地区降水增多。以上位相分析显示,夏季长江流域降水异常偏多,对应着 ISO 降水的振荡幅度增强,热带西太平洋热源激发的低频气旋和反气旋式环流交替向西北方向移动传播到我国东部地区上空,长江流域夏季的强降水就是在对流层低层大陆上气旋和东南部海洋反气旋异常的耦合发展演变过程中产生的,这样的环流背景场为长江中下游地区上空南北气流的汇合提供了有利条件,引起该阶段长江流域的持续性强降水的发生。

4.3 ISO 垂直结构的周期演变

通过合成分析以上 30~60 天季节内降水和 850 hPa 风场的一个循环周期的演变过程,在长江流域中下游地区,低频降水经历了从最大干位相的负降水异常到最大湿位相的正降水异常,随后降水逐渐减弱,再回到干位相的周期循环。对流层低层的低频环流形势的分布与演变对引起 1998 年夏季长江流域降水异常偏多提供了有利的大尺度背景场。下面从季节内的垂直速度、水汽分布以及风场的散度、涡度等要素的垂直结构演变来分析致使长江流域产生持续性强降水的动力热力条件。

4.3.1 风场的散度和涡度

为了了解在 1998 年夏季长江中下游地区强降水期间 ISO 的垂直结构,制作 1998 年经过我国东部地区的 30~60 天滤波的风场散度和涡度的 8 个连续位相的高度—纬向垂直剖面图(图 7)。在 ISO 循环的初始位相阶段(图 7,第 1、2 位相),30°N 附近的长江流域地区对流层低层呈现出负涡度异常以及低层辐散高层辐合的分布特征,从第 1 到第 2 位相,低层的负涡度以及低层辐散高层辐合的这种分布逐渐减弱。第 3 位相开始,伴随着对流层低层长江以南地区正涡度异常和弱的风场辐合的出

现,长江地区开始产生降水(图 7 和图 6,第 3 位相)。第 4~5 位相,长江及江南地区对流层低层的正涡度继续增强并达到最大值,该位相阶段低空辐合高空辐散的配置为长江流域降水的发生提供了有利的动力条件。在 ISO 的衰减阶段,长江地区上空的正涡度以及低空辐合高空辐散都减弱,并在第 7 位相取而代之的是负涡度异常及低空出现辐散特征。从风场的辐合辐散及涡度场的各位相演变来看,配合 ISO 降水自南向北的移动传播(图 6),低频散度场和涡度场也有自南略微北移的特征。

4.3.2 垂直速度和水汽

除了风场的辐合辐散及涡度场是降水产生的重要动力条件外,垂直上升运动和水汽条件也是降水产生和得以维持的必不可少的重要动力和热力条件。为此,我们给出垂直运动和水汽的 ISO 位相发展及垂直结构在长江流域的演变情况。图 8 是经过长江中下游流域经度范围的 30~60 天滤波的垂直速度和比湿在各位相的高度—纬向垂直剖面图。在初始阶段的第 1 位相,长江及其以南地区处于大面积干旱和大范围的下沉运动阶段,到第 2 位相,30°N 附近的长江流域地区干旱强度有所减弱,同时干旱面积向北收缩,下沉运动也明显减弱并表现出略微北移的特征,同时注意到,长江以南地区的边界层出现少许水汽(图 8,第 2 位相)。第 3 位相,下沉运动和水汽负异常继续向长江以北移动,此时长江及其以南地区的上升运动开始增强,并伴随着充足的水汽从边界层迅速向高空发展增加。到长江流域降水强盛的第 4~5 位相,长江流域及其以南地区的上升运动迅速增加达到最大强度,强烈的上升气流携带着大量的水汽继续向高空发展,水汽层次变得深厚,最大的上升运动出现在对流层中层的 500 hPa 附近,最大的比湿分布在 700~850 hPa,此时强烈的上升运动与丰富的水汽覆盖了中国东部长江中下游及其以南的大部分地区,配合低空辐合高空辐散的动力条件,引起该时段长江流域持续性强降水的发生。在 ISO 降水的减弱阶段(第 6、7、8 位相),长江地区的上升运动逐渐减弱,水汽层变得浅薄,并向北传播,该地区的降水逐渐减少直到停止。

5 总结和讨论

1998 年夏季发生在我国东部长江流域及其以南地区的持续性强降水具有显著的 30~60 天大气

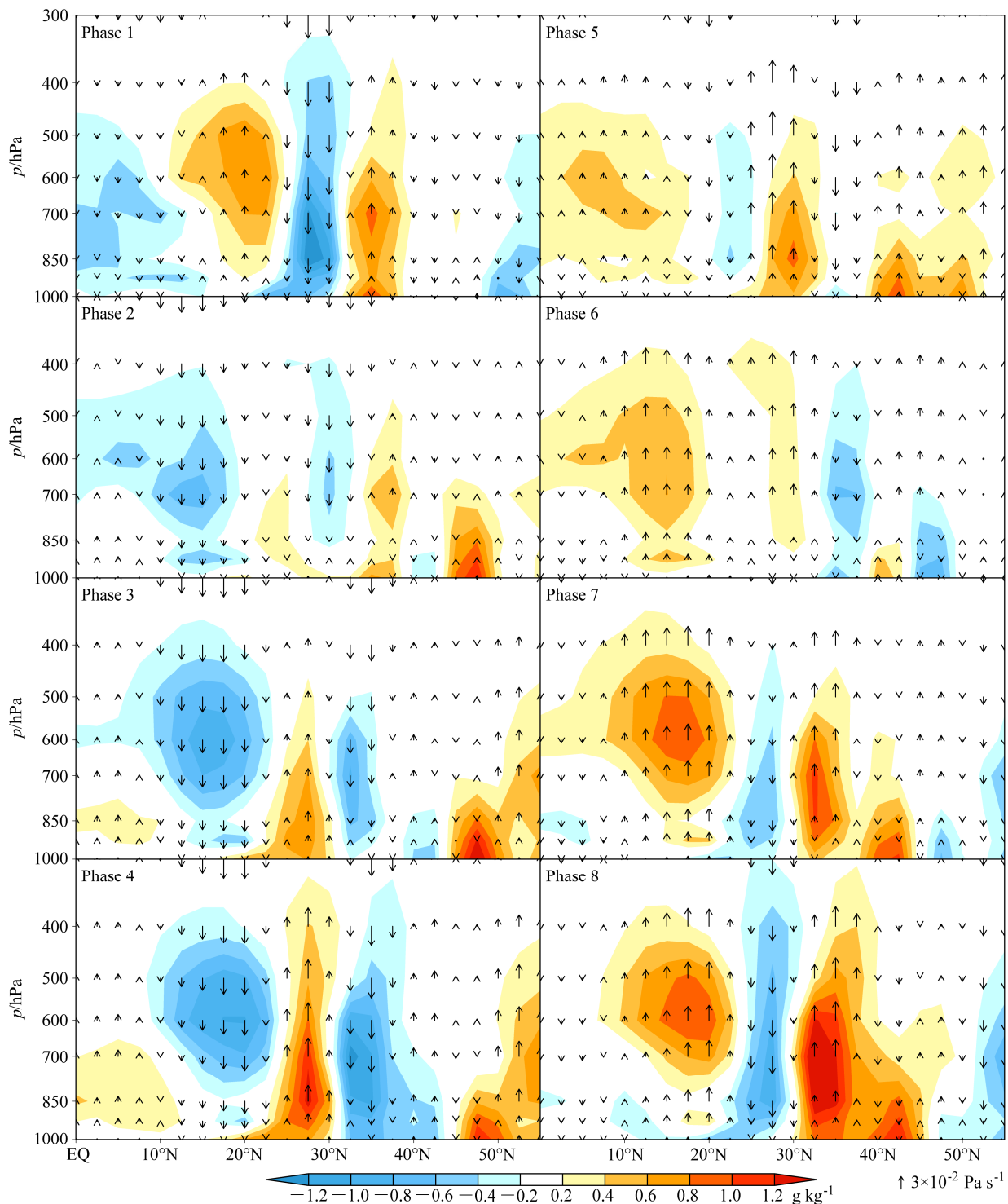


图 8 经过 $(110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$ 剖面的 30~60 天滤波的比湿 (阴影, 单位: g kg^{-1}) 和垂直运动 (箭头, 单位: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$) 的位相合成演变
Fig. 8 Composite vertical structure of 30~60-day filtered specific humidity (shading; units: g kg^{-1}) and vertical velocity (arrows; units: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$) averaged over the region of $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ in 1998

季节内振荡活动 (ISO) 特征, 长江中下游以南地区最大的降水正距平和最强的 ISO 活动区域重合, 说明 1998 年夏季长江地区的强降水对应着较强的 ISO 活动。

通过分析 1998 年夏季长江地区强降水期间 30~60 天 ISO 降水的位相合成演变图, 详细描述了东亚副热带季风区 ISO 降水的发生、发展演变等循环过程的时空分布特征, 从 ISO 位相的发展演变等

三维结构对长江中下游流域强降水的产生和维持进行了分析。在环流场上, 对流层低层的低频气旋和反气旋环流表现出交替从热带西北太平洋向西偏北方向移动发展并增强的特征。当中国大陆东部地区上空是弱的反气旋环流, 以东的西北太平洋洋面上是气旋环流时, 长江中下游及其以南地区处于季节内振荡降水的间歇期, 即最大干位相阶段; 随着时间的推移, 当向西移动的气旋环流到达中国东部地区上空时, 西北太平洋上的反气旋环流开始发展起来, 我国东部地区正好位于气旋环流西南侧的东北风异常和西北太平洋上向西移动的反气旋环流西北侧的西南风异常环流汇合处的下方, 引起长江流域持续性降水的发生。

从 ISO 的垂直结构演变来看, 长江流域地区水汽伴随上升运动的增强从边界层向高空扩展, 对流层低层正涡度以及低层辐合高层辐散的低频环境场配置有利于该地区水汽的辐合加深, 深厚的水汽层与强烈的上升运动为 1998 年夏季长江流域持续性强降水的发生和维持创造了更为有利的动力和热力条件。本文主要分析和讨论了夏季发生在长江流域的一个典型降水异常偏多年 ISO 的三维结构演变特征, 而对于该地区降水偏多的其他年份或是干旱少雨年, ISO 周期有何变化, 以及对应此周期的季节内振荡三维结构是否仍然遵循本文总结出的演变特征和规律, 需要进一步进行分析, 此外 ISO 活动通过何种物理机制来影响长江流域地区的降水, 是重点需要研究的内容。

参考文献 (References)

- 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.
- Chen Longxun, Zhu Congwen, Wang Wen, 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.
- 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:0577-6619.2006.02.00.
- 何金海, Murakami T, Nakazawa T. 1984. 1979 年夏季亚洲季风区域 40-50 天周期振荡的环流及其水汽输送场的变化 [J]. 南京气象学院学报, (2): 163-175. He Jinhai, Murakami T, Nakazawa T. 1984. Circulation with 40-50 day oscillation and changes in moisture transport over monsoon Asia in 1979 summer [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), (2): 163-175.
- Hsu P C, Li T. 2012. Role of the boundary layer moisture asymmetry in causing the eastward propagation of the Madden-Julian oscillation [J]. J. Climate, 25 (14): 4914-4931, doi:10.1175/JCLI-D-11-00310.1
- 贾小龙, 袁媛, 任福民, 等. 2012. 热带大气季节内振荡(MJO)实时监测预测业务 [J]. 气象, 38 (4): 425-431. Jia Xiaolong, Yuan Yuan, Ren Fumin, et al. 2012. The real-time MJO monitoring and prediction operation in NCC [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (4): 425-431.
- Jiang X A, Li T. 2005. Re-initiation of the boreal summer intraseasonal oscillation in the tropical Indian Ocean [J]. J. Climate, 18 (18): 3777-3795, doi:10.1175/JCLI3516.1.
- 据建华, 钱诚, 曹杰. 2005. 东亚夏季风的季节内振荡研究 [J]. 大气科学, 29 (2): 187-194. Ju Jianhua, Qian Cheng, Cao Jie. 2005. The intraseasonal oscillation of East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 187-194, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.02.03.
- 据建华, 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 [J]. 大气科学, 32 (3): 523-529. Ju Jianhua, Sun Dan, Lu Junmei. 2008. The relay character analysis of the zonal and longitudinal propagations of the atmospheric intraseasonal oscillation in the East Asian monsoon region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 523-529, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.09.
- 据建华, 刘一伶, 李汀, 等. 2010. 南海夏季风季节内振荡的年际变化研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 253-261. Ju Jianhua, Liu Yiling, Li Ting, et al. 2010. Research on interannual variation of intraseasonal oscillation of the South China Sea summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 253-261, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.02.
- Krishnamurti T N, Subrahmanyam D. 1982. 30-50 day mode at 850 mb during MONEX [J]. J. Atmos. Sci., 39 (9): 2088-2095, doi:10.1175/1520-0469(1982)039<2088:TDMAMD>2.0.CO;2
- 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 M, Chan P H. 1988. Intraseasonal and interannual variations of tropical convection: A possible link between the 40-50 day oscillation and ENSO [J]. J. Atmos. Sci., 45 (3): 506-521, doi:10.1175/1520-0469(1988)045<0506:IAIVOT>2.0.CO;2
- Li T, Wang B. 2005. A review on the western North Pacific monsoon: Synoptic-to-interannual variabilities [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 16 (2): 285-314.
- Li T. 2014. Recent advance in understanding the dynamics of the Madden-Julian oscillation [J]. J. Meteor. Res., 28(1): 1-33, doi:10.1007/s13351-014-3087-6.
- Lin Ailan, Liang Jianyin, Li Chunhui. 2006. Characteristics of frequency spectrum variation of intraseasonal oscillation of convection during

- South China Sea summer monsoon [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 12 (1): 34–40.
- 李崇银. 1995. 热带大气季节内振荡的几个基本问题 [J]. *热带气象学报*, 11 (3): 276–288. Li Chongyin. 1995. Some fundamental problems of intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 11 (3): 276–288.
- 李崇银, 潘静, 宋洁. 2013. MJO 研究新进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 229–252. Li Chongyin, Pan Jing, Song Jie. 2013. Progress on the MJO research in recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 229–252, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.1231.
- 梁萍, 丁一汇. 2012. 基于季节内振荡的延伸预报试验 [J]. *大气科学*, 36(1): 102–116. Liang Ping, Ding Yihui. 2012. Extended range forecast experiment based on intraseasonal oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (1): 102–116, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.09.
- 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.
- Mao J Y, Sun Z, Wu G X. 2010. 20–50-day oscillation of summer Yangtze rainfall in response to intraseasonal variations in the subtropical high over the western North Pacific and South China Sea [J]. *Climate Dyn.*, 34 (5): 747–761, doi:10.1007/s00382-009-0628-2.
- Murakami T, Nakazawa T, He J. 1984. On the 40–50 day oscillation during the 1979 Northern Hemisphere summer. Part I: Phase propagation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 62: 440–468.
- 穆明权, 李崇银. 2000. 1998 年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动 [J]. *气候与环境研究*, 5 (4): 375–387. Mu Mingquan, Li Chongyin. 2000. On the outbreak of South China Sea summer monsoon in 1998 and activity of atmospheric intraseasonal oscillation [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 5 (4): 375–387, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2000.04.005.
- 齐艳军, 容新尧. 2014. 次季节—季节预测的应用前景与展望——“次季节—季节预测 (S2S)”会议评述 [J]. *气象科技进展*, 4 (3): 74–75. Qi Yanjun, Rong Xinyao. 2014. Application prospects and outlook of sub-seasonal to seasonal prediction [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 4 (3): 74–75.
- Qi Y, Zhang R, Li T, et al. 2008. Interactions between the summer mean monsoon and the intraseasonal oscillation in the Indian monsoon region [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35: L17704, doi:10.1029/2008GL034517.
- Qi Yanjun, Zhang Renhe, Zhao Ping, et al. 2013. Comparison of the structure and evolution of intraseasonal oscillations before and after onset of the Asian summer monsoon [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 27 (5): 684–700, doi:10.1007/s13351-013-0511-2.
- Shen Y, Xiong A Y. 2015. Validation and comparison of a new gauge-based precipitation analysis over mainland China [J]. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.4341.
- Seo K H, Schemm J K E, Wang W Q, et al. 2007. The boreal summer intraseasonal oscillation simulated in the NCEP Climate Forecast System (CFS): The effect of sea surface temperature [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (5): 1807–1827, doi:10.1175/MWR3369.1.
- Vitar F, Woolnough S, Balmaseda M A, et al. 2007. Monthly forecast of the Madden-Julian Oscillation using a coupled GCM [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (7): 2700–2715 doi:10.1175/MWR3415.1.
- 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.
- Wang B, Webster P, Teng H Y. 2005. Antecedents and self-induction of active-break South Asian monsoon unraveled by satellites [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (4), doi: 10.1029/2004GL020996.
- 王遵亲, 丁一汇. 2008. 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*, 19 (6): 710–715. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic features of intraseasonal oscillations of summer rainfalls over mid-lower reaches of the Yangtze River in the flood and drought years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 19 (6): 710–715.
- 夏芸, 管兆勇, 王黎娟. 2008. 2003 年江淮流域强降水过程与 30–70 d 天低频振荡的联系 [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.
- 杨秋明, 宋娟, 李熠, 等. 2012. 全球大气季节内振荡对长江流域持续暴雨影响的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 27 (8): 876–884. Yang Qiuming, Song Juan, Li Yi, et al. 2012. Review of impacts of the global atmospheric intraseasonal oscillation on the continuous heavy rainfall over Yangtze River valley [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 27 (8): 876–884.
- Yang Hui, Li Chongyin. 2003. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Changjiang–Huaihe River basin [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (4): 540–553, doi:10.1007/BF02915497.
- 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:10.1175/2009JCL13005.1.
- Yang Shuangyan, Wu Bingyi, Zhang Renhe, et al. 2013. Relationship between an abrupt drought–flood transition over mid-low reaches of the Yangtze River in 2011 and the intraseasonal oscillation over mid-high latitudes of East Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 27 (2): 129–143, doi:10.1007/s13351-013-0201-0.
- Yasunari T. 1979. Cloudiness fluctuations associated with the Northern Hemisphere summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 57 (3): 227–242.
- Zhang Renhe. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (5): 1005–1017.
- Zhu C W, Nakazawa T, Li J P, et al. 2003. The 30–60 day intraseasonal oscillation over the western North Pacific Ocean and its impacts on summer flooding in China during 1998 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30(18), doi:10.1029/2003GL017817.