

孔晓宇, 毛江玉, 吴国雄. 2017. 2002 年夏季中高纬大气准双周振荡对华南降水的影响 [J]. 大气科学, 41 (6): 1204–1220. Kong Xiaoyu, Mao Jiangyu, Wu Guoxiong. 2017. Influence on the South China rainfall anomalies of the atmospheric quasi-biweekly oscillation in mid-high latitude during the summer of 2002 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (6): 1204–1220, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16277.

2002 年夏季中高纬大气准双周振荡对华南降水的影响

孔晓宇^{1,2} 毛江玉^{2,3} 吴国雄^{2,3}

¹ 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

² 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 利用 JRA55 大气再分析资料和 TRMM 卫星降水资料, 分析了 2002 年夏季 (5~8 月) 华南地区降水的低频振荡特征, 重点揭示了对影响显著的中高纬大气季节内振荡的环流结构及演变。小波和功率谱分析表明, 2002 年夏季华南降水表现为主周期为 10~30 d 的准双周低频振荡。典型低频降水事件及合成分析指出, 准双周降水的强 (弱) 变化除了受低空西北太平洋副热带高压西伸进入 (东移退出) 南海的影响以外, 还显著地依赖于中高纬地区高空大气环流的季节内振荡。在对流层高层, 中高纬度地区存在一支自大西洋经欧亚大陆的气旋—反气旋相间排列的低频波列。该波列在欧亚大陆地区向东南传播, 当异常反气旋和气旋分别位于青藏高原和华北上空时, 这种偶极型环流之间的高空辐散场有利于华南地区上升运动的发展, 因而华南降水偏强; 反之, 华南降水偏弱。研究还表明, 低频波列南移造成了对流层异常温度平流和副热带高层异常绝对涡度的变化, 使得华南地区上升与下沉运动交替出现以及相应的经向环流圈反转, 从而导致华南准双周振荡干湿位相的转换。局地异常感热加热对干湿位相转换也起一定作用。时滞相关分析发现, 当青藏高原地区 500 hPa 位势高度异常超前于华南异常降水 4 d (即位相差为 1/4 周期) 时, 二者出现显著正相关, 表明青藏高原地区 500 hPa 位势高度异常对预测华南地区季节内降水变化有潜在的应用价值。

关键词 华南降水异常 准双周振荡 中高纬大气环流

文章编号 1006-9895(2017)06-1204-17

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16277

Influence on the South China Rainfall Anomalies of the Atmospheric Quasi-Biweekly Oscillation in Mid-High Latitude during the Summer of 2002

KONG Xiaoyu^{1,2}, MAO Jiangyu^{2,3}, and WU Guoxiong^{2,3}

¹ College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期 2016-12-02; **网络预出版日期** 2017-04-06

作者简介 孔晓宇, 女, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气低频振荡研究。E-mail: kongxiaoyu@lasg.iap.ac.cn

通讯作者 吴国雄, E-mail: gxwu@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91537103、41375087, 全球变化与海气相互作用专项 GASI-IPOVAI-03, 中国科学院前沿科学重点研究项目 QYZDY-SSW-DQC018

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91537103, 41375087), National Program on Global Change and Air–Sea Interaction (Grant GASI-IPOVAI-03), Frontier Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant QYZDY-SSW-DQC018)

Abstract The satellite-based TRMM rainfall and the JRA55 atmospheric reanalysis datasets are used to investigate the structure and evolution of extratropical atmospheric intraseasonal oscillation and its impact on anomalous rainfall over South China (SC) in the summer (May to August) of 2002. Wavelet and power spectra analyses demonstrate that the intraseasonal variability of the SC rainfall during the summer of 2002 was characterized by a significant quasi-biweekly oscillation (QBWO) with a period of 10–30 days. Composite analyses show that such a QBWO of the SC rainfall was not only related to alternate occurrences of the anticyclone and cyclone anomalies in the lower troposphere over the coastal region of SC that modulate the western North Pacific subtropical high entering or leaving the South China Sea, but also largely dependent on the extratropical atmospheric oscillation in the middle and upper troposphere. The QBWO in the upper troposphere was characterized by a southeastward-propagating wave train consisting of a series of anomalous cyclones and anticyclones, which were aligned in a northwest-southeast direction over Eurasian continent. When the anomalous anticyclone and cyclone were respectively located over the Tibetan Plateau and northern China as the wave train moved, the upper tropospheric divergence between this dipole in anomalies was favorable for the development of ascending motions over SC, leading to above-normal rainfall; in the opposite situation, below-normal rainfall occurred over SC. For the transition between dry and wet episodes of the QBWO, anomalous tropospheric horizontal temperature advection and absolute vorticity anomalies in the upper troposphere above the subtropics caused by the southward migration of the wave train are two dominant factors leading to the alternation between ascending and descending motions over SC as well as the reversal of the corresponding meridional circulations. Local sensible heating anomalies also make certain contributions to the above process. Significantly positive correlations were found when the 500-hPa geopotential height anomalies over the Tibetan Plateau led the SC rainfall anomalies by 4 days (that is, a phase lag of 1/4 period of the QBWO), which implies that the 500-hPa geopotential height anomalies around the Tibetan Plateau may be a potential predictor for the forecast of the intraseasonal variation of rainfall over SC.

Keywords South China rainfall anomalies, Quasi-biweekly oscillation, Extratropical atmospheric circulation

1 引言

自从 Madden and Julian (1971, 1972) 发现热带大气存在向东传播的 30~60 d 低频振荡以来, 各国气象学者开展了大量的相关研究 (Krishnamurti and Bhalme, 1976; 李崇银, 1993; 祝从文等, 2004; 据建华等, 2005)。随后的研究表明热带外大气活动也有季节内振荡现象 (Ghil and Mo, 1991; 李崇银, 1993; 温之平等, 2006), 并且其环流结构及传播特征与热带地区具有一定差异。由于大气环流系统的持续异常是造成持续性强降水或阶段性干旱的直接原因, 而大气低频振荡又决定着持续性环流异常的形成和演变 (张庆云和陶诗言, 2003; 周兵和文继芬, 2007; Fujinami and Yasunari, 2009; Yang et al., 2010), 所以研究大气低频振荡的演变规律及其影响对提高月、季时间尺度延伸期预报和短期气候预测水平具有重要的现实意义。

我国地处东亚季风区, 季风活动异常引起的旱涝灾害频繁发生, 给国民经济造成巨大的损失。例如, 1991 年夏季江淮流域和 1998 年夏季长江流域持续性暴雨引发了全流域洪涝灾害; 2002 年夏季出现了南方多雨北方少雨的气候格局, 南方大部地区降水偏多, 华南地区发生了多起暴雨事件。在这种

区域降水总量偏多的夏季, 降水率的强弱变化通常取决于某种主导频率的大气季节内振荡 (毛江玉和吴国雄, 2005; Ren et al., 2013; Li et al., 2015)。实际上, 东亚夏季风的活动主要存在准双周 (或 10~20 d) 和 30~60 d 两种频率的低频振荡 (Lau et al., 1988; Li et al., 2015)。西北太平洋副热带高压 (以下简称副高) 作为东亚夏季风系统的重要成员, 其位置和持续时间影响着我国东部地区降水的落区与强度 (Tao and Chen, 1987; 姚秀萍等, 2005)。毛江玉和吴国雄 (2005) 发现, 1991 年江淮流域异常洪涝与对流层中层 (500 hPa) 北太平洋副热带高压 15~35 d 低频变化及其传播有关; 多年降水资料的集合小波谱分析则表明江淮流域夏季降水季节内振荡的特征周期是 20~50 d (Mao et al., 2010)。这种 20~50 d 降水低频振荡是对西太平洋副高季节内变化的响应, 而副高的季节内振荡又受到一种起源于赤道西太平洋而向西北传播的准 Rossby 波性质的对流—环流耦合波列的调制。这表明来自热带的低频扰动对我国东部降水季节内变率有重要的影响。

在对流层高层, 南亚高压也是东亚夏季风的重要环流系统。它的位置及持续性的变化除了受到青藏高原上空非绝热加热的强迫作用以外, 还很大程

度地受到中高纬环流系统（特别是西风急流）的影响（Tao and Chen, 1987；况雪源和张耀存, 2006；Liu et al., 2007）。早在 1964 年，陶诗言和朱福康（1964）就注意到 100 hPa 南亚高压在其平均位置来回振动，形成“东部型”和“西部型”两种流型的反气旋；两种流型的交替与中层 500 hPa 西太平洋副高的进退相联系，影响江淮梅雨的起讫。Liu et al. (2007) 随后揭示出南亚高压“东部型”与“西部型”之间的转换是一种准双周振荡，而且这种准双周振荡与中高纬高位涡系统的向南侵入有关。在考察江淮流域夏季降水季节内变化的成因时，Fujinami and Yasunari (2009) 基于 1979~2004 年的观测和 NCEP-NCAR 再分析资料发现江淮流域降水的 7~25 d 低频振荡与不同类型的中纬度地区 200 hPa 流函数异常的低频波列显著相关，导致两种波列差异的主要因素是中纬度西风急流的结构。第一种波列沿着青藏高原的北部和东部边缘传播，急流向北凸起，而第二种自西向东穿越青藏高原，急流呈纬向型。可见，来自上游和高纬度到达青藏高原附近的高层低频波列对我国东部地区降水季节内变化的影响是非常重要的。既然影响江淮流域降水季节内变化的中高纬大气低频振荡的环流结构存在显著年际变化，那么中高纬大气低频振荡对江淮以外地区（如华南）降水异常影响的相对重要性可能也存在年际差异，该问题需要深入探究。

Li and Mao (2016) 根据 1981~2007 年我国东部夏季降水低频振荡的空间分布的统计分析发现：除了江淮流域，长江以南的华南内陆地区和东南沿海地区是另外两个典型的降水低频振荡大值中心区。这意味着大气季节内振荡活动状况对华南地区阶段性旱涝形成以及夏季总降水量的多寡至关重要。谷德军等 (2013) 和林爱兰等 (2013) 注意到华南局地降水的准双周振荡现象，纪忠萍等 (2014) 也考察了准双周振荡对 2011 年夏季广东季风槽暴雨形成的影响。Li and Mao (2016) 以 2002 年华南分布型为例，利用与 10~20 d 和 30~60 d 两种频率有关的亚洲季风区热带大气低频振荡的关键预报因子开展了时效为 15 d 的延伸期预报试验，但没有涉及中高纬大气低频波列的影响因子。前文指出，2002 年夏季华南地区总雨量偏多，期间发生了多起持续性暴雨事件。Wang and Duan (2015) 还发现，2002 年夏季青藏高原上空大气 10~20 d 周期

的低频振荡非常显著，其方差贡献超过了 50%。因此本文选择 2002 年作为个例，来研究华南地区降水的低频振荡特征及成因，着重考察中高纬大气环流的季节内振荡的演变及对华南降水异常的影响。

第 2 节介绍本文所用的资料及方法；第 3 节揭示 2002 年夏季 5~8 月华南地区降水的准双周振荡特征；第 4 节考察中高纬大气准双周振荡的环流结构和演变；第 5 节从动力学角度探究准双周振荡的垂直结构及形成机理；第 6 节给出结论与讨论。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所用资料包括：(1) TRMM 卫星观测的逐日降水资料 (Simpson et al., 1996)，水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经、纬度网格，主要用于揭示 2002 年夏季 (5~8 月) 华南及附近洋面地区降水的分布情况。(2) 逐日大气环流要素场包括风场、位势高度场、气温场和感热加热等，取自 JRA55 再分析资料 (Ebita et al., 2011)，水平分辨率为 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ 经、纬度网格。

2.2 方法

小波分析是检测时间序列中时—频变化的常用方法。本文使用 6 阶导数的高斯函数作为小波母函数，从而有效地识别序列演变的极值 (Torrence and Compo, 1998)。使用 Lanczos 带通滤波器 (Duchon, 1979) 提取气象要素序列的季节内振荡分量；对于时滞相关系数的统计显著性检验，采用 Wilks (1995) 方法重新估算了低频时间序列的有效自由度。利用位相合成分析揭示大气低频振荡的环流结构，合成要素场的统计显著性采用 Murakami (1987) 文中的 t 检验。通过计算对流层高层的波活动通量 (Takaya and Nakamura, 2001)，揭示中高纬大气低频扰动的水平传播特征。

3 2002 年夏季华南地区降水低频振荡

图 1 给出 2002 年夏季 (5~8 月) 中国东部地区降水总量距平百分率和 10~90 d 滤波的季节内变率标准差的分布。2002 年夏季总雨量异常超过 30% 的区域大多集中在 30°N 以南的华南地区，并伴有较大的季节内变率（其标准差大部分地区达到 7 mm d^{-1} 以上）。这表明 2002 年夏季华南降水受较强的季节内振荡所调控。为了清楚地显示华南地区降水季节内振荡的时间演变规律，选取降水总量距

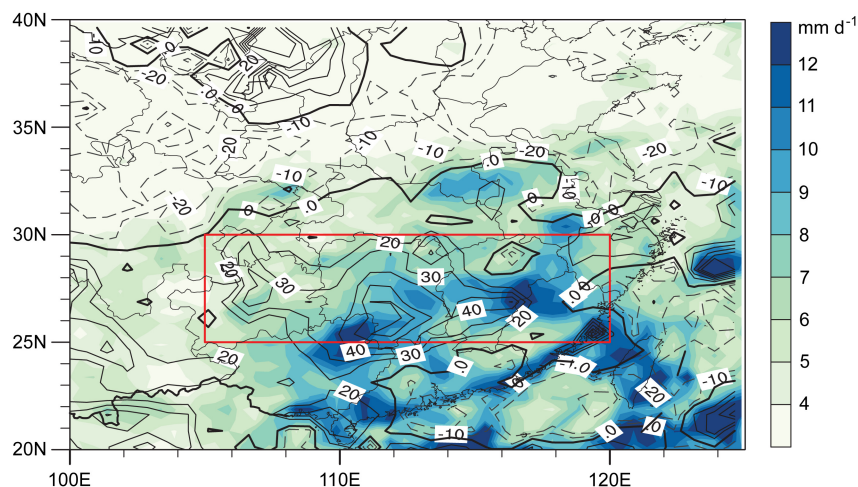


图1 2002 年夏季(5~8 月)降水总量距平百分率(等值线, %)和 10~90 d 滤波的季节内降水标准差(阴影, mm d^{-1})。气候态为 1998~2010 年夏季降水的多年平均值。等值线间隔为 10%, 实(虚)线表示距平百分率正(负)值区。红色方框表示华南关键区($25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)

Fig. 1 Distribution of percentage of rainfall departure (contours, %) from climatological precipitation and the intraseasonal standard deviation (shading, mm d^{-1}) of the 10–90-day filtered daily rainfall in the summer of 2002. Climatological precipitation is the multi-year summer precipitation averaged over the period of 1998–2010. The contour interval is 10%, with solid (dashed) countours denoting positive (negative) rainfall anomalies. Red rectangle denotes the key area in South China ($25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)

平百分率最大的区域($25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)为关键区, 以这个区域平均的日降水量作为降水指数, 图 2 给出降水指数的时间演变。在 2002 年 5 月的上半月, 逐日降水量基本较同期气候态降水量显著偏多(降水异常为正距平); 但随后约一个月的时段(即 5 月中旬至 6 月上旬), 日降水量大多较同期气候值偏少, 表现为长时段的降水负距平。6 月中旬、6 月第 6 候及 7 月中下旬又出现显著正距平, 期间的 6 月第 5 候、7 月第 2 至 3 候为显著负距平时段。这种阶段性的降水正异常和负异常的交替出现清晰地反映了 2002 年夏季华南地区降水强度的季节内振荡特征。

为了进一步证实华南降水低频振荡的主导周期, 将 2002 年夏季降水指数序列先进行五天滑动平均滤掉天气尺度扰动后, 再进行小波分析和功率谱分析, 由图 1b 可见, 通过信度检验的显著谱系数主要集中在 10~30 d 和 30~60 d 两个频带内, 而降水异常序列的功率谱分析表明最大功率谱出现在 25 天附近(图略)。表明 10~30 d 周期较 30~60 d 周期更显著。经计算, 10~30 d 降水变率的解释方差(26.42%)大于 30~60 d 降水变率的解释方差(8.45%)。说明在 2002 年夏季, 华南降水 10~30 d (简称准双周)低频振荡占主导地位, 也意味着准双周振荡对 2002 年夏季华南地区阶段性洪涝

以及总雨量偏多的形成起着重要作用。所以, 本文主要分析准双周振荡的成因。

10~30 d 滤波的低频降水时间序列如图 2a 所示, 以振幅大于一个标准差为阈值, 则异常降水时间序列存在 4 个较为明显的准双周循环, 分别为 5 月 5~24 日、6 月 10~24 日、6 月 25 日到 7 月 15 日以及 7 月 16 日到 8 月 2 日。每个循环的波峰和波谷分别对应极端多雨和少雨时段。按着毛江玉和吴国雄(2005)的做法, 将每个循环再分为 8 个位相: 位相 1 (位相 5) 表示准双周振荡由中断期(活跃期)向活跃期(中断期)的过渡。位相 3 为活跃期的波峰, 位相 7 表示中断期的波谷。位相 2 和 4 (6 和 8) 表示低频振荡的振幅值接近该循环的峰值(谷值)一半的时间(图 2)。下文通过对上述 4 个循环的位相进行合成分析以揭示不同低频位相不同层次的环流结构及其演变。

由降水异常的合成图(图 3)可见, 弱的降水正异常自第 1 位相(图 3a)出现 30°N 附近, 而此时华南中部为弱的负异常; 随后, 降水正异常在华南北部加强, 负异常在华南消失(图 3b); 到了第 3 位相(图 3c), 华南降水正异常达到极大值, 范围也最大。随着强度的减弱, 华南东北部的正异常在第 4 位相(图 3d)变弱最明显。第 5 位相(图 3e)时, 弱的降水正距平仅存在于广西东部和广东

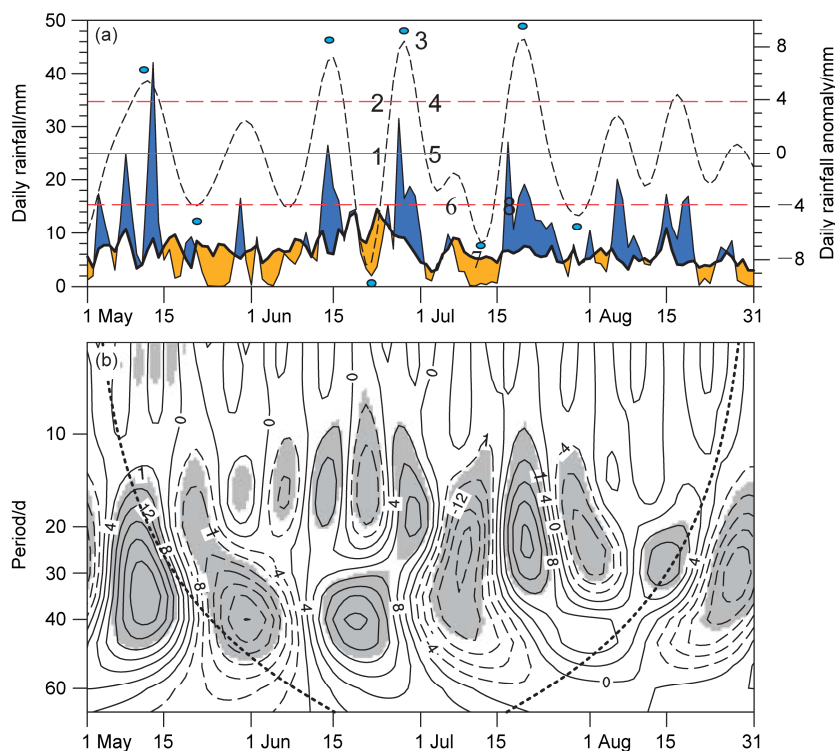


图 2 (a) 华南关键区 ($25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 区域平均的夏季 (5~8 月) 逐日降水量和降水量异常。黑色细实线代表 2002 年, 黑色粗实线为气候态, 蓝色 (黄色) 阴影部分表示 2002 年降水量相对于气候态为正 (负) 距平的时段。黑色虚线表示 2002 年 10~30 d 滤波的低频降水序列, 红色实线表示低频降水序列的零线, 红色虚线表示低频降水序列正、负异常为 1 个标准差的等值线。浅蓝色圆点标识出振幅大于 1 个标准差的显著准双周循环, 数字 1~8 代表准双周振荡的典型不同位相。(b) 华南关键区区域平均的降水序列小波谱。实 (虚) 线表示正 (负) 值, 阴影区表示谱系数通过红噪声检验而置信度超过 95% 的显著频谱区, 粗点线以外的区域受边缘效应的影响

Fig. 2 (a) Time series of area-averaged daily rainfall (left y axis) and daily rainfall anomaly (right y axis) over the key area ($25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) in South China during the summer from 1 May to 31 August of 2002 (black thin curve) and for climatology (black thick curve). Positive (negative) rainfall anomalies with respect to climatology are shaded in blue (yellow) colors. The black dashed curve is the time series of the 10–30-day filtered area-averaged daily rainfall anomaly, the parallel red dashed lines indicate the positive and negative rainfall anomalies equal to one standard deviation, red solid line represents the mean value). Light blue dots show the selected significant cycles of the quasi-biweekly oscillation with amplitude greater than one standard deviation. Numbers 1 to 8 represent the phases of the quasi-biweekly oscillation. (b) Wavelet spectra of daily rainfall time series averaged over the key area using the sixth-order derivative of a Gaussian as wavelet basis function. Shadings indicate the spectral coefficients statistically significant at the 95% confidence level for a red-noise process. Thick dashed line indicates the cone of influence. The edge effects become important outside the cone

西部的局部地区, 降水负异常开始在 30°N 附近地区出现。此后, 降水负异常在位相 6 (图 3f) 在华南北部加强, 在位相 7 (图 3g) 向南扩展达到极小值、负距平强度减弱, 在位相 8 (图 3h) 范围进一步缩小。值得注意的是, 在华南降水的活跃期 (位相 2~4) 和中断期 (位相 6~8), 菲律宾以西的南海北部出现与华南符号相反的降水异常, 这意味着二者低频降水存在反相关关系。

4 准双周振荡的水平环流结构及演变

4.1 对流层低层环流

水汽辐合是降水的必要条件, 而且水汽主要集

中于对流层低层。图 4 给出 10~30 d 滤波的 850 hPa 低频流场和水汽通量散度场合演变。由位相 1 (图 4a) 可见, 一个西南—东北向倾斜的异常反气旋位于南海至西北太平洋, 其南侧是异常气旋, 二者之间是显著的异常东北气流。长江以北地区受中纬度另一个异常气旋西南侧的西北风的影响, 华南地区水汽通量是辐散的。随着赤道地区异常气旋向西北移动, 南海的异常反气旋变得狭窄, 且其北侧的西南风显著性增强, 水汽通量在华南地区辐合 (图 4b~d), 因而华南降水偏多。在此期间南海北部是水汽通量辐散的区域, 特别是在极端位相 3 (图 4c)。所以, 华南与南海北部相反的水汽通量散度正是导

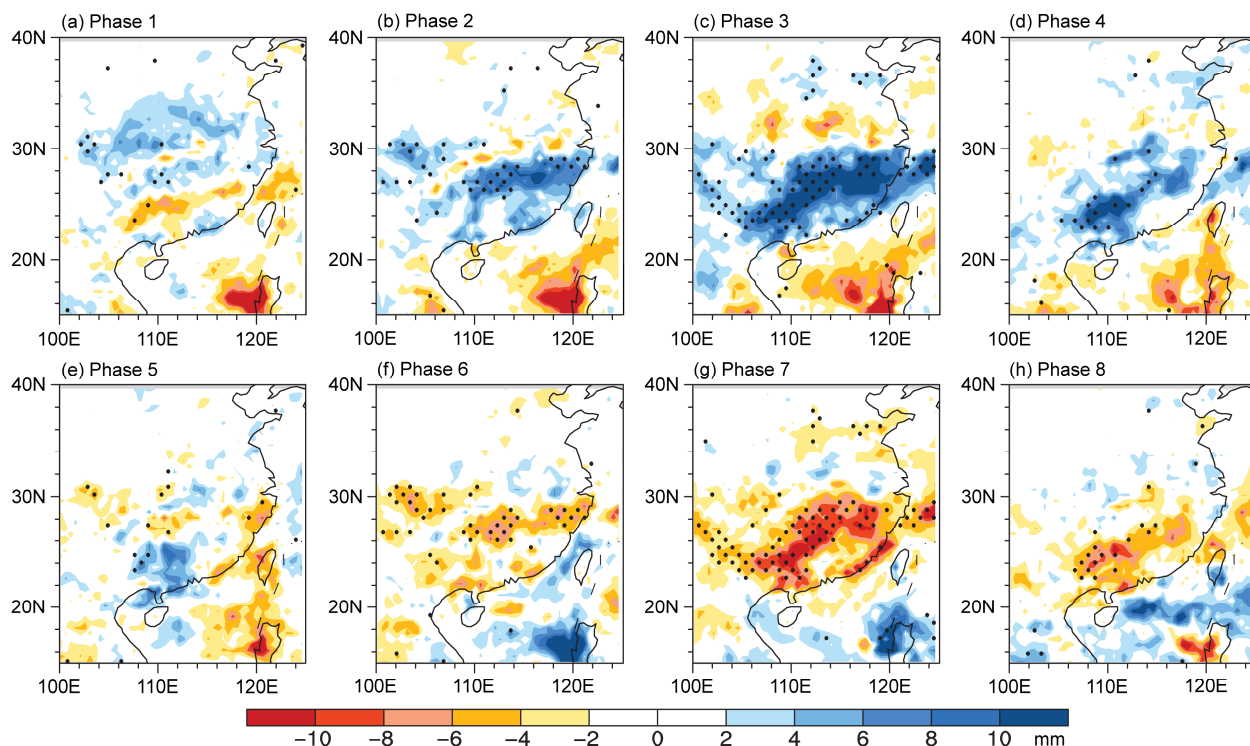


图3 10~30 d 滤波的降水异常(填色)合成。打点区代表降水异常通过信度为 90% 的显著性检验的区域

Fig. 3 Evolution of composite 10–30-day filtered rainfall anomalies (shading) during a quasi-biweekly oscillation from phases 1 to 8. Stippling denotes the regions where the rainfall anomalies are statistically significant at the 90% confidence level

致两地降水异常反相关(图 3)的原因。此后异常气旋环流继续向西北移动,在位相 7 时成为控制南海至西北太平洋高纬地区的主导系统(图 4g)。所以,自位相 6 至位相 8,华南地区处于水汽通量辐散的环境(图 4f–h),因而降水呈现为负异常。在华南降水自湿位相向干位相的转换过程中(图 4c–g),尽管低层的异常气旋主要起源于赤道地区,但其在向西北传播期间还同时受到中纬度扰动的影响而结构发生形变,使得该异常气旋的西南端进入南海,引起南海局地降水偏多而其北侧的华南降水偏少。反之,变形的异常反气旋深入南海上空,造成华南降水偏多。本质上,这种结构形变的异常气旋(反气旋)的直接作用是导致西北太平洋副高实体进入(退出)南海上空的東西向振荡。

4.2 对流层中层环流

以往研究(陶诗言和朱福康, 1964; Tao and Chen, 1987; 吴国雄等, 2002; 张庆云等, 2003)指出,我国东部地区夏季暴雨的发生与青藏高原的热力强迫有关、雨带的建立对 500 hPa 西太副高的位置比较敏感。据此计算了华南低频降水时间序列与 500 hPa 位势高度异常场的时滞相关(图 5)。首先,

从同时相关场(图 5h)可以看出,显著正相关区仅局限于青藏高原北部,且范围较小。但是,自-4 d(图 5d)起(即青藏高原地区位势高度异常超前于华南降水异常 4 d),显著正相关几乎覆盖了整个青藏高原上空,特别是在-3 d 至-2 d(图 5e–f)。值得注意的是,这种 3~4 d 的滞差恰好对应于准双周振荡的 1/4 周期,表明华南准双周降水的极端多雨(少雨)落后于青藏高原地区 500 hPa 位势高度异常极大(小)值约 1/4 周期。可见,青藏高原地区 500 hPa 位势高度异常对华南低频降水预报有一定的指示意义。

从相关区的传播看,青藏高原区的显著正相关可以追溯到-7 d(图 5a)的我国东部长江下游地区和青藏高原上游的巴尔喀什湖地区。这两个地区分别存在一个小范围的正相关区,同时在二者之间的贝加尔湖西南部还存在一个显著负相关区。这种正负相间的相关区分布实际反映了 500 hPa 低频波列异常反气旋、气旋和反气旋环流中心所处的地理位置(图 6g)。自-6 d 至-2 d(图 5b–f)位于巴尔喀什湖地区的正相关区不断向青藏高原扩展和东移,而且相关系数的统计显著性增强。另一方面,

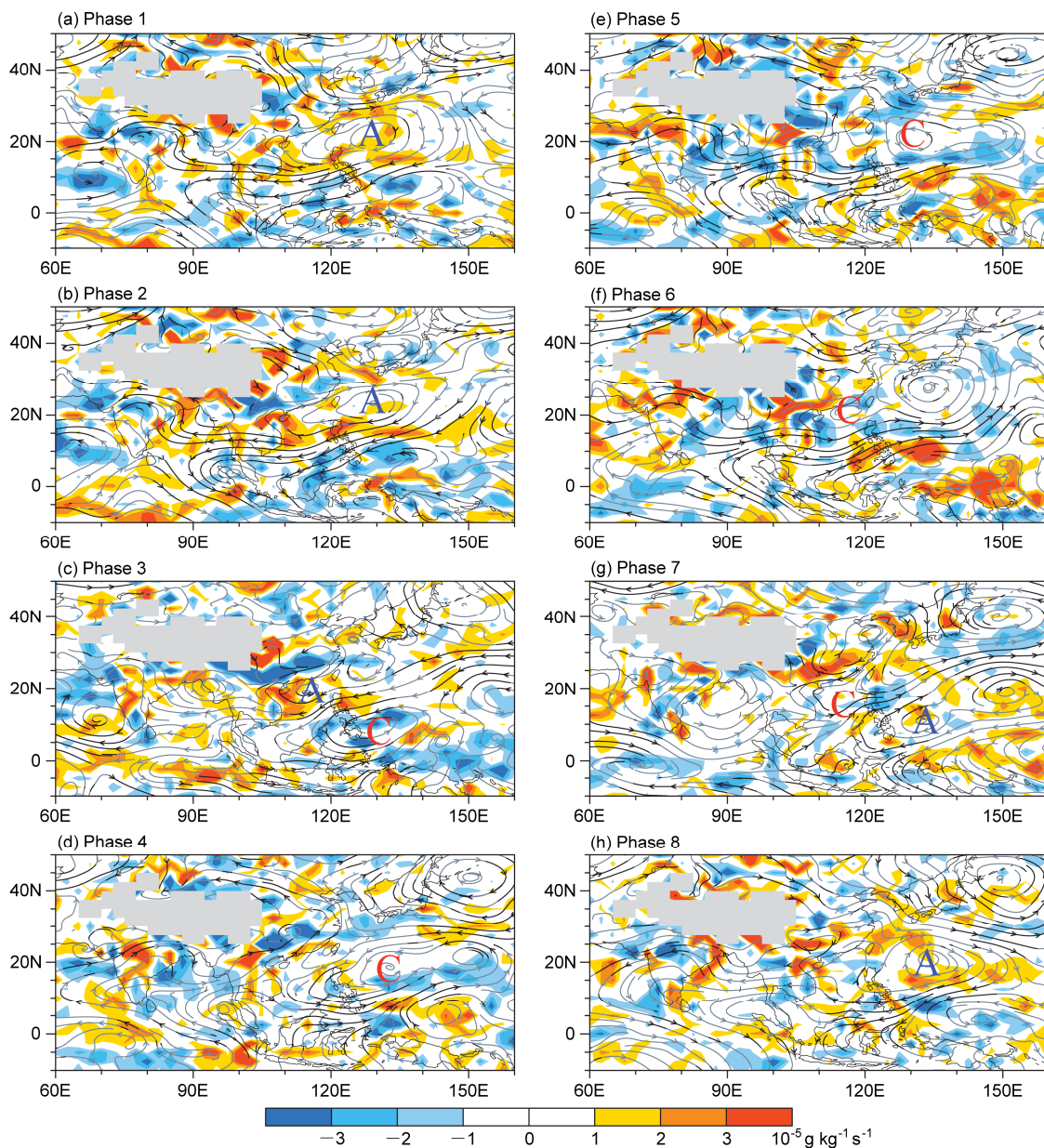


图4 合成的10~30 d滤波的850 hPa风场(流线,黑色线段表示纬向风或经向风分量通过信度为90%的显著性检验的流线,“A”和“C”分别代表异常反气旋和异常气旋)和水汽通量散度场(填色,单位: $10^{-5} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)。灰色阴影区表示地形

Fig. 4 Evolution of composite 10–30-day filtered 850-hPa winds (streamlines, with black segments denoting anomalous zonal or meridional wind components statistically significant at the 90% confidence level) and 850-hPa moisture flux divergence (shading, $10^{-5} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) during a quasi-biweekly oscillation from phases 1 to 8. Letters A and C represent the anomalous anticyclone and anomalous cyclone, respectively. Gray shaded areas represent topography

位于我国东部的正相关区反而连续向西收缩、向青藏高原移动,但这种相关区的西移本质上是由500 hPa低频波列向东南传播过程中巴尔喀什湖地区的异常反气旋使得青藏高原地区位势高度升高而贝加尔湖南部的异常气旋使得我国东部地区位势高度降低造成的(图6)。另一个负相关区在中纬度大西洋,表示大西洋地区位势高度异常与华南降水存在遥相关。

图6给出合成的500 hPa低频流场和温度场。在位相1(图6a),我国东南部受到一个中心位于台湾的异常反气旋控制,青藏高原西部亦存在一个反气旋。而在中高纬地区有一支自乌拉尔山以西经西西伯利亚至贝加尔湖南部的异常气旋—反气旋—气旋交替的低频波列。随着低频波列向东南传播,位于西北太平洋的异常反气旋向西南延伸进入南海,同时青藏高原地区的反气旋增强且向西收缩

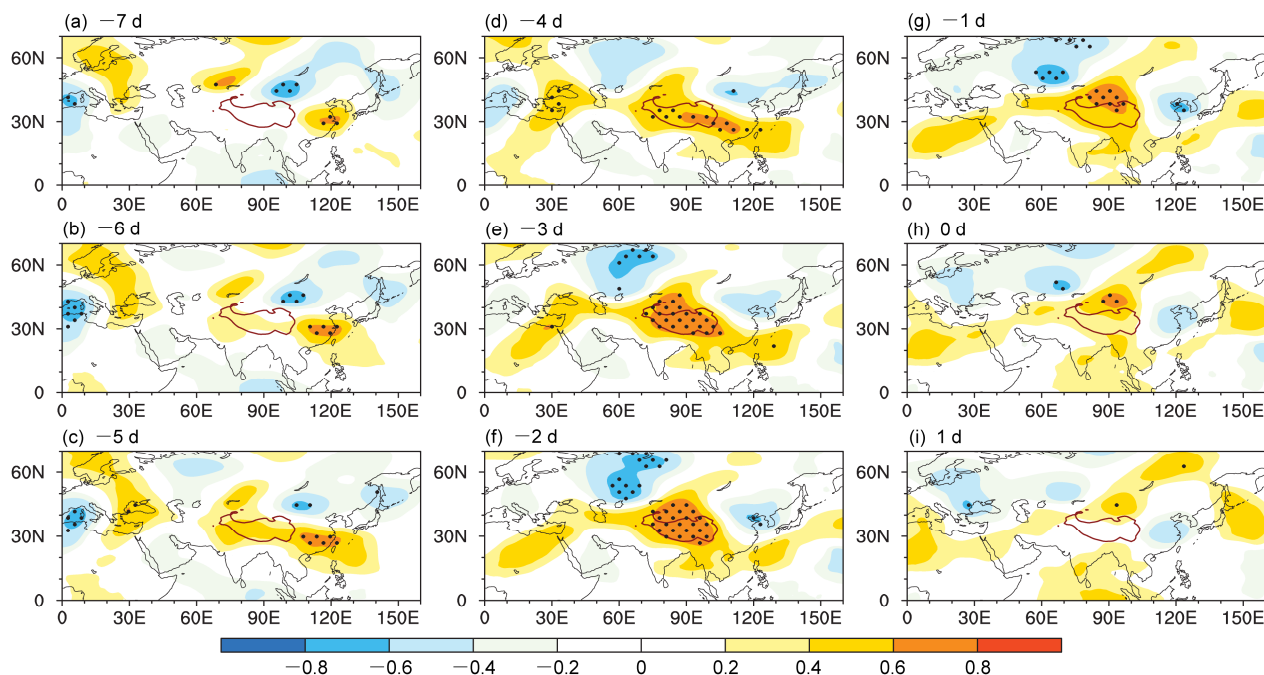


图 5 2002 年夏季(5~8 月)10~30 d 滤波的华南低频降水时间序列与 10~30 d 滤波的 500 hPa 位势高度场的时滞相关。打点区为显著性检验超过 90% 信度水平的区域, 负时滞天数表示位势高度异常超前于降水异常, 正时滞天数表示位势高度异常落后于降水异常, 棕色粗实线包围的区域指地形高度大于 3000 m 的青藏高原, 下同

Fig. 5 Evolution of lead-lag correlations (shading) of the 10–30-day filtered 500-hPa geopotential height anomalies with the time series of 10–30-day filtered area-averaged daily rainfall anomaly over the key area (25°–30°N, 105°–120°E) in South China for the summer of 2002 (1 May to 31 August). Stippling denotes the regions where the correlation coefficients are statistically significant at the 90% confidence level. Negative number such as –7 on the top left corner of each panel indicates that the geopotential height anomaly leads rainfall anomaly, and the opposite is true for positive number. The Tibetan Plateau with topography height above 3000 m is outlined by the brown solid curve, the same below

(图 6b, 位相 2)。发展到极端位相 3 时(图 6c), 青藏高原地区的反气旋和其东侧的以华北为中心的气旋之间的偏北风变得异常显著, 它与南海反气旋北侧的异常西南风恰好在华南辐合, 导致华南降水偏多。特别注意的是, 在这支轴向呈东北—西南方向倾斜的异常气旋(反气旋)低频波列自位相 1 到位相 3 的传播过程中, 气温冷(暖)异常中心始终处于槽(脊)轴的西北侧, 体现出中高纬地区典型的大气斜压结构。从青藏高原至西北太平洋上空的带状异常反气旋流线的形状和未滤波的 500 hPa 特征等高线 5840 gpm 和 5880 gpm 不难看出, 在位相 1(图 6a)时, 青藏高原及其东部的内陆地区位势高度是正距平, 对应图 5 中–4 d 的显著正相关区。位相 2(图 6b)时的乌拉尔山地区的异常气旋(青藏高原的异常反气旋)分别对应图 5 中–2 d 的显著负(正)相关区。在位相 3(图 6c)之后, 中高纬低频波列继续东移, 强度变弱(图 6d, 位相 4), 但在乌拉尔山以西地区出现新的暖性异常反气旋。

随后自位相 5 至 8 的演变(图 6e–h)与位相 1 至 4 形成相反的环境结构。

4.3 对流层高层环流

图 7 是 10~30 d 滤波的 200 hPa 流场合成演变图, 同时叠加相应的散度场和波活动通量。在位相 1(图 7a), 最显著的系统是贝加尔湖与青藏高原北缘之间的异常气旋, 在其东南部是弱的异常反气旋控制青藏高原以东的我国东部地区。在异常气旋上游是一支非常清楚的起源于大西洋经过地中海到青藏高原西部的低频波列。由于波活动通量反映低频波列的能量传播方向, 所以总体上向东的波活动通量表示下游扰动将会因能量频散而发展。对于阿拉伯半岛北部的显著异常气旋, 既有来自大西洋的能量, 也有来自热带的能量, 而该气旋的能量又紧接着向东偏北方向频散而传播到贝加尔湖南侧的异常气旋环流, 使得这个异常气旋随低频波列向南移动的过程中振幅显著增大, 中心位于华北地区(图 7b, 位相 2)。同时, 来自高纬度乌拉尔山地

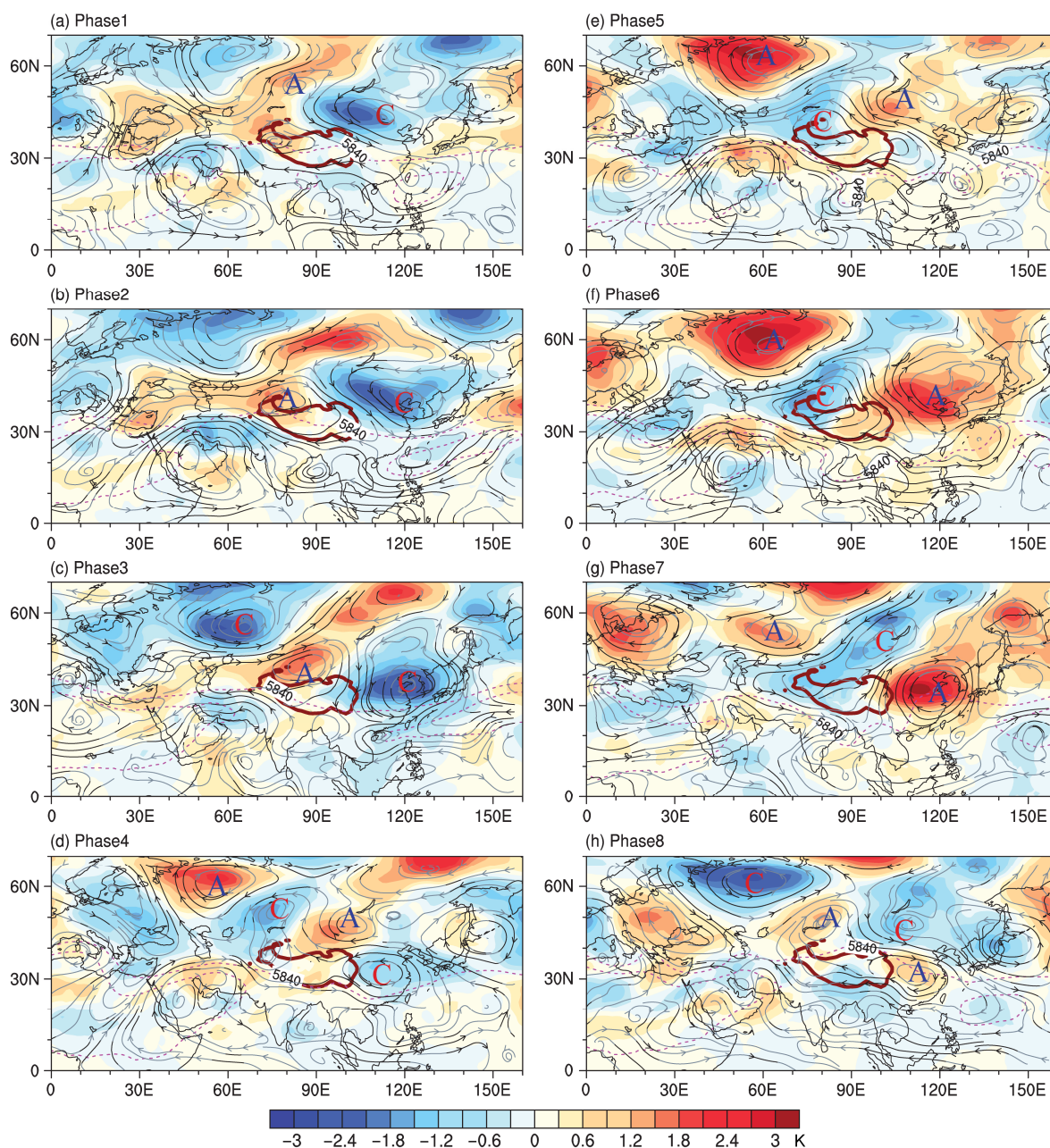


图6 合成的10~30 d滤波的500 hPa 流场(黑色线段表示纬向风或经向风分量通过信度为90%的显著性检验的流线,“A”和“C”分别代表异常反气旋和异常气旋)与温度场(填色,单位:K)以及未滤波的500 hPa 位势高度场(紫色虚线,为清晰仅显示5840 gpm和5880 gpm两条特征等高线)
Fig. 6 Evolution of composite 10–30-day filtered 500-hPa winds (streamlines, with black segments denoting the anomalous zonal or meridional wind components statistically significant at the 90% confidence level) and 500-hPa air temperature (shading, K) superimposed on the unfiltered 500-hPa geopotential height field (purple dashed curves, only the two characteristic contours of 5840 and 5880 gpm are shown) during a quasi-biweekly oscillation from phases 1 to 8. Letters A and C represent the anomalous anticyclone and anomalous cyclone, respectively

区向东南频散的能量导致青藏高原西部反气旋及华北异常气旋的加强。在位相3(图7c),华北区的异常气旋性环流达到最强状态,其显著的异常偏北气流沿着青藏高原东侧到达华南地区后而转向为东北风,使得华南高空成为显著的辐散区,并与

低空850 hPa的辐合区(图4c)相耦合,非常有利于上升运动的发展,华南降水正异常(图3c)。

在位相3时,青藏高原东侧和南侧的显著流线分布呈现出从孟加拉湾北部经华北到日本以东的反气旋—气旋—反气旋交替的波列结构的相关区

分布,其中以华北为中心的大面积正相关区甚至延伸到江淮地区。此时青藏高原周围的环流结构与 Fujinami and Yasunari (2009) 指出的 NET 型相关波列非常相似。自位相 3 以后,华北异常气旋减弱,

并向南移动(图 7d, 位相 4),而其下游的反气旋得到增强,上游出现与位相 3 符号相反的环流结构。从位相 5 至 8(图 7e-h),低频波列中自贝加尔湖附近发展而向华北传播的异常反气旋成为控制华

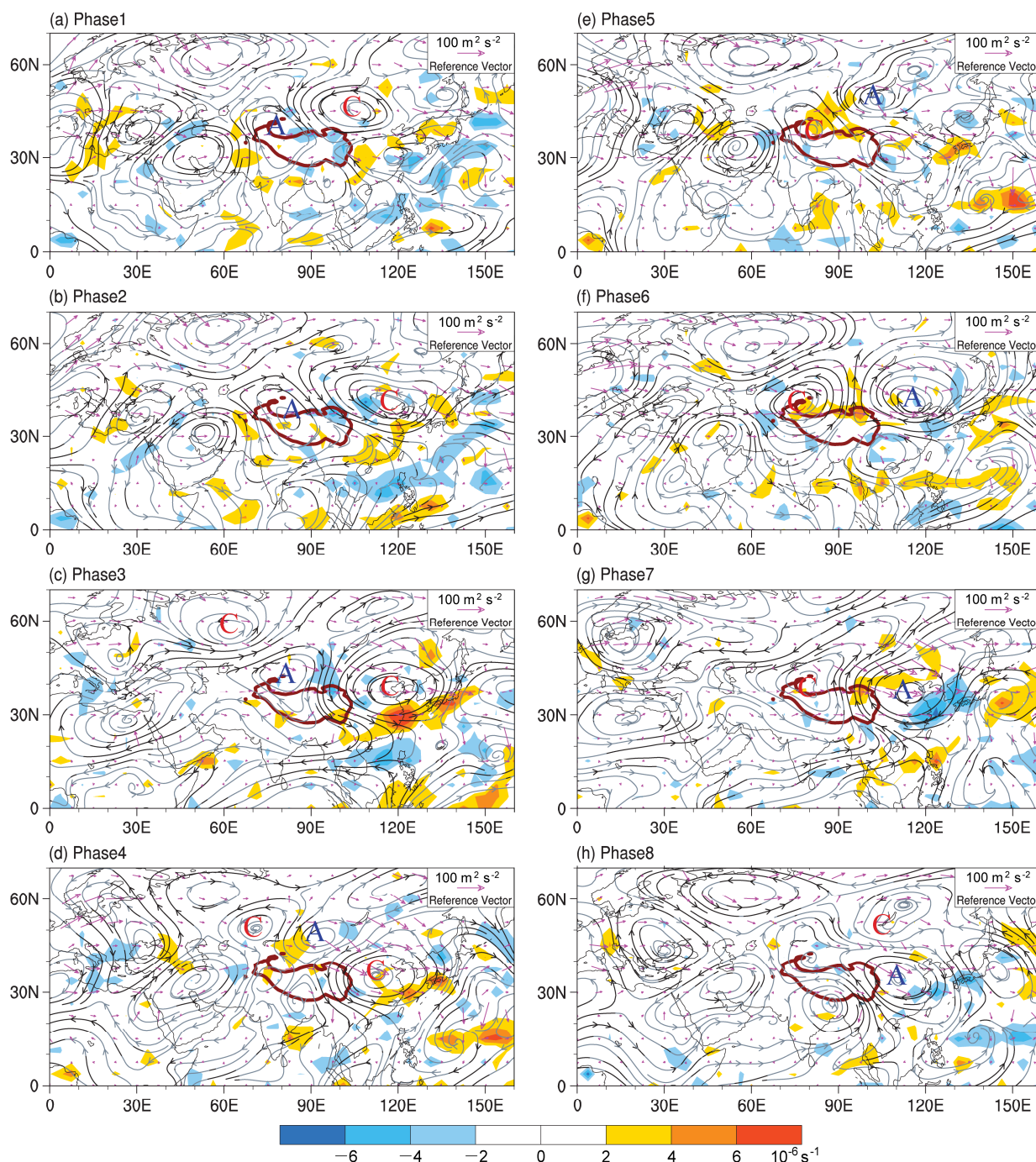


图 7 合成的 10~30 d 滤波的 200 hPa 风场(流线,黑色线段表示纬向风或经向风分量通过信度为 90%的显著性检验的流线,“A”和“C”分别代表异常反气旋和异常气旋)、散度场(填色,单位: 10^{-6} s^{-1})和波活动通量(粉色箭头,单位: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$)

Fig. 7 Evolution of composite 10–30-day filtered 200-hPa winds (streamlines, with black segments denoting anomalous zonal or meridional wind components statistically significant at the 90% confidence level), divergence at 200 hPa (shading, units: 10^{-6} s^{-1}) and wave-activity fluxes (pink vectors, units: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$) during a quasi-biweekly oscillation from phases 1 to 8. Letters A and C represent the anomalous anticyclone and anomalous cyclone, respectively

南地区干位相的主导系统。

为了证实中高纬低频波列的传播对南亚高压的调制作用,图8给出了图2所示的振幅最大的第2个循环(6月10~24日)的200 hPa低频环流场,

并叠加了未滤波的位势高度场(以12480~12560 gpm的特征等高线为代表)。在6月12~17日的湿位相阶段,与低频波列有关的且以华北为中心的异常气旋环流导致南亚高压偏西、偏南,造成华南高

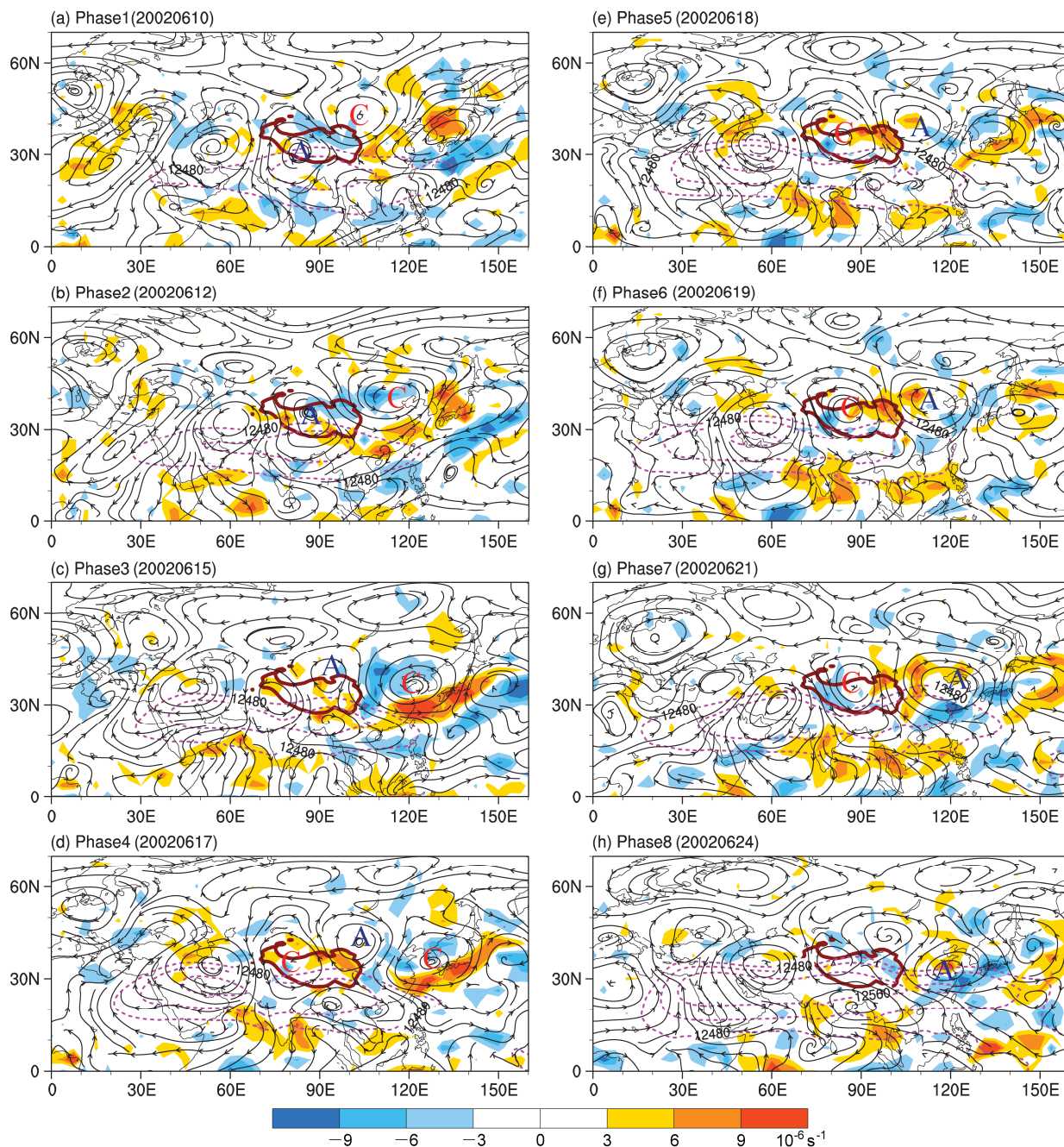


图8 2002年6月10~24日10~30 d滤波的200 hPa风场(流线,“A”和“C”分别代表异常反气旋和异常气旋)和散度场(填色,单位: 10^{-6} s^{-1})以及未滤波的200 hPa位势高度场(紫色虚线,为清晰仅显示12480 gpm至12560 gpm之间的特征等高线,间隔为40 gpm)。棕色粗实线包围的区域指地形高度大于3000 m的青藏高原

Fig. 8 Evolution of the 10–30-day filtered 200-hPa winds (streamlines) and 200-hPa divergence (shading, 10^{-6} s^{-1}) superimposed on the unfiltered 200-hPa geopotential height field (purple dashed curves, only several characteristic contours from 12480 to 12560 gpm are shown for clarity, the interval is 40 gpm) during a quasi-biweekly oscillation from 10 to 24 June 2002. Letters A and C represent the anomalous anticyclone and anomalous cyclone, respectively. The Tibetan Plateau with topography height above 3000 m is outlined by the brown solid curve

空的气流辐散环境。反之, 在 6 月 19~24 日的干位相阶段, 异常反气旋环流导致南亚高压偏东、偏北, 华南上空是气流辐合的环境。

5 准双周振荡的垂直环流演变及动力学机理

上述分析表明, 华南地区夏季降水准双周振荡的演变, 表现为中高纬度地区对流层中、高层的低频波列向东南方向传播, 而在低层来自热带地区的低频气旋(反气旋)沿着西北方向朝南海北部移动。为了探究准双周振荡的垂直环流结构和干湿位相转换动力学机制, 图 9 给出 10~30 d 滤波的风场、位势高度和温度场沿着 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 经度带平均的纬度—气压合成剖面图。由图 9 可见, 位相 1 时(图 9a), 在华南北部, 对流层低层的气温正异常表明暖空气的存在, 其上空对流层的位势高度正异常为 10 gpm; 但是, 在 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 中纬地区 250 hPa 附近, 位势高度负异常最小值可达 50 gpm。实际上, 负异常的极小值连线对应着各层等压面的低压槽。显著的气温负异常位于低压槽的下方, 特别是在近地面层, 这种冷槽结构反映了中纬度大气的斜压性。由于低频波列南移, 低压槽后部的冷空气下沉而槽前华南地区低层暖空气抬升, 在 150 hPa 以下的对流层中出现一致的上升运动(图 9b, 位相 2)。注意到上升气流在高空辐散, 到达南海中部而下沉, 形成了季风型环流圈。下面的分析(图 10)将证明, 这种季风型经圈环流是纬向对称大气对于副热带外部强迫的角动量守恒型热力响应(Plumb and Hou, 1992; 吴国雄等, 2016)。此季风环流圈与赤道上升而南海中部下沉的 Hadley 型环流圈相耦合。随着对流层中层更冷气团的南移, 华南地区上升运动到达极大值(图 9c, 位相 3), 但此时, 对流层高层出现显著冷异常, 且伴随着异常偏北风, 这种高层的温度冷平流效应将抑制随后上升运动的发展(图 9d, 位相 4)。随后在华南地区位势高度出现负异常, 在 40°N 以北存在异常暖脊, 与暖脊相伴的对流层中上层(200~500 hPa)暖平流有利于其南侧上升运动的发展, 作为补偿环流也加强了低压槽区南部(即华南地区)的下沉运动(图 9e, 位相 5), 由此形成了与位相 1(图 9a)反向的垂直环流。

随着暖脊的南移(图 9f, 位相 6), 华南下沉而华北上升的经向环流圈在位相 7(图 9g,) 到达极

值。此后中纬度冷槽南移, 该经圈环流减弱(图 9h, 位相 8), 华南逐渐向湿位相转化。需要指出, 从位相 5 至位相 7(图 9e~g), 南海北部上升而赤道下沉的热带季风型环流圈比较显著, 特别是南海北部的上升运动。因为该经圈环流与北侧的反向垂直环流相耦合, 所以华南地区的下沉运动必然随之变化, 这反映了热带大气热力、动力异常在准双周振荡干湿位相转换中的作用。

为揭示华南地区局地上升或下沉运动发生和转换的动力学机理, 图 10 给出 10~30 d 滤波的绝对涡度和经圈环流的纬度—气压合成剖面图。图中在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 南海区域的对流层下层, 从位相 1 到位相 3 有负绝对涡度增强并稳定北移, 伴有下沉运动加强(图 10a~c)。这是由中低对流层西太副高在此阶段加强西伸、进入南海所致(图 4a~c 和图 6a~c)。此后随着西太平洋副高东移离开南海和冷空气侵入, 该区域的负涡度减弱并逐渐被正涡度代替(图 10d~h)。在此期间, 高纬度 40°N 以北有另一个负涡度中心发展南移, 在位相 7 时(图 10g)已经移到 40°N 附近, 位于对流层顶 200 hPa 的中心强度接近 $-3\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 。当这个负绝对涡度异常中心继续南移经过副热带进入华南时(图 10a~c), 使得华南高空形成了绝对涡度的极小值区(由图 10c 可见, 位相 3 时, 未滤波的绝对涡度在 150 hPa 附近可小于 $2\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$)。于是, 华南地区上升运动强烈发展, 与西伸进入南海的西太平洋副高低空的下沉气流配合, 共同在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 区域形成显著的经圈环流, 成为华南夏季降水低频振荡湿位相的一个显著特征。这是一个季风型的经圈环流, 其上部水平支的北风和下部水平支的南风使绝对涡度平流随高度增加, 促使上升运动发展, 对应着华南多雨期。注意到图 10a~c 高层该负涡度中心的北面伴有一个南移发展的正涡度中心。从图 7a~c 可以看出, 对流层上层该正/负涡度中心的发展与发生在高空的华北气旋环流以及华南至南海北部的反气旋环流的南移加强相互对应。理论研究指出, 纬向对称大气对于外部强迫的响应分为热力平衡(TE)型和角动量守恒(AMC)型(Schneider and Lindzen, 1977; Schneider, 1977, 1987; Held and Hou, 1980)。高纬度地区 Rossby 变形半径小, 大气响应一般为 TE 型; 热带副热带地区 Rossby 变形半径大, 大气响应一般为 AMC 型。根据 Plumb and Hou (1992) 从基本方程出发证得的 AMC 和 TE 型转换的判据, 在热

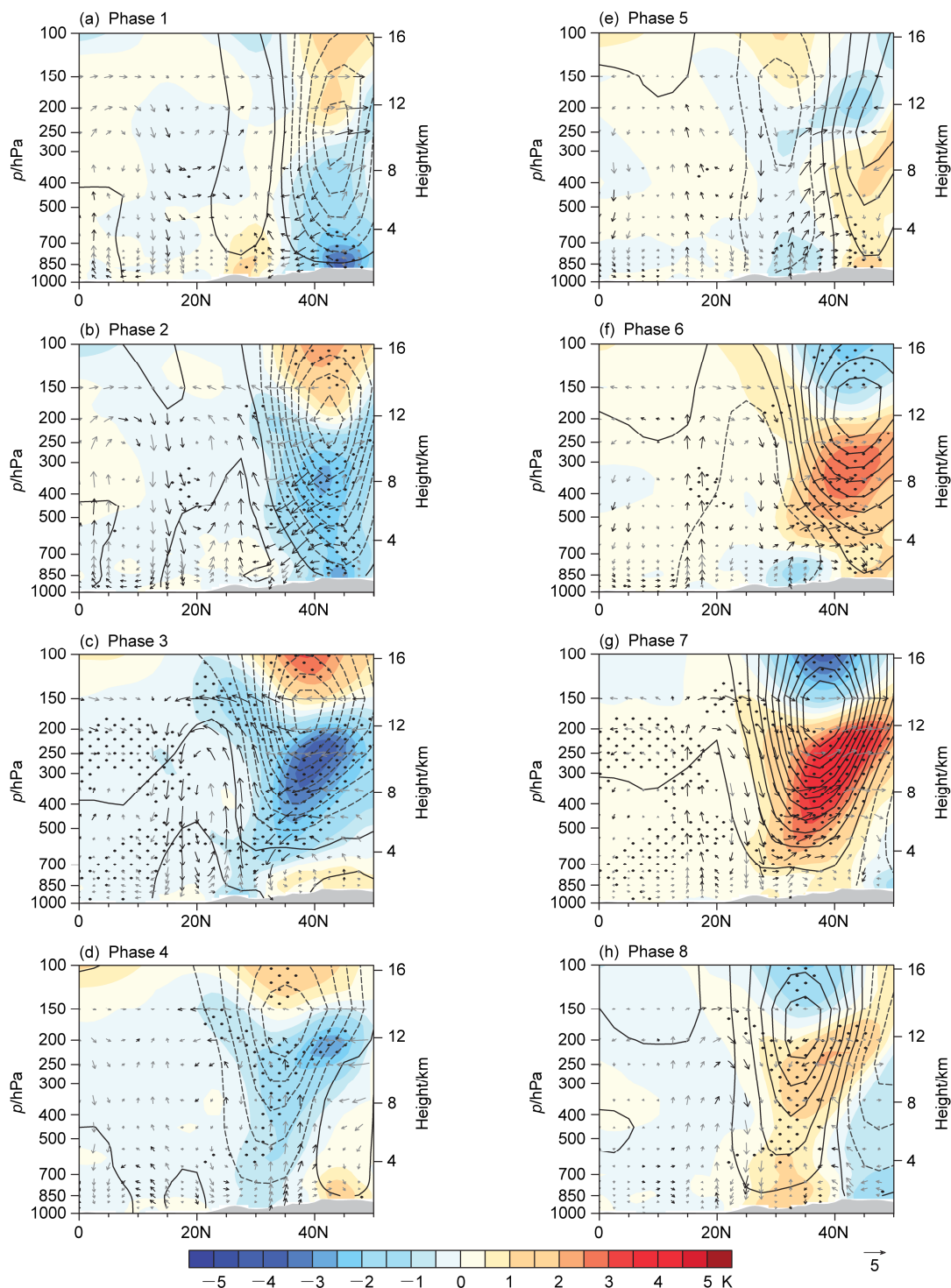


图9 10~30 d 滤波的风场(矢量, 经向风单位为 m s^{-1} , 垂直速度 ω 单位为 $-10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$, 黑色箭头表示经向风或垂直速度分量通过信度为 90% 的显著性检验的矢量)、温度场(填色, 单位: K, 打点区代表温度异常通过信度为 90% 的显著性检验的区域)和位势高度场(等值线, 实线表示位势高度正异常, 虚线表示位势高度负异常, 单位: gpm, 间隔为 10 gpm)沿着 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 经度带平均的纬度—气压合成剖面。灰色阴影表示地形, 下同

Fig. 9 Pressure–latitude cross sections ($105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ mean) of composite 10–30-day filtered wind (vectors, meridional wind in m s^{-1} , vertical velocity ω in $-10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$, black arrows denote that the anomalous meridional or vertical wind components are statistically significant at the 90% confidence level), air temperature (shading, units: K, and geopotential height (contours, the contour interval is 10 gpm; solid (dashed) contours refer to positive (negative) anomalies) during a quasi-biweekly oscillation from phases 1 to 8. The gray shaded areas represent topography, the same below

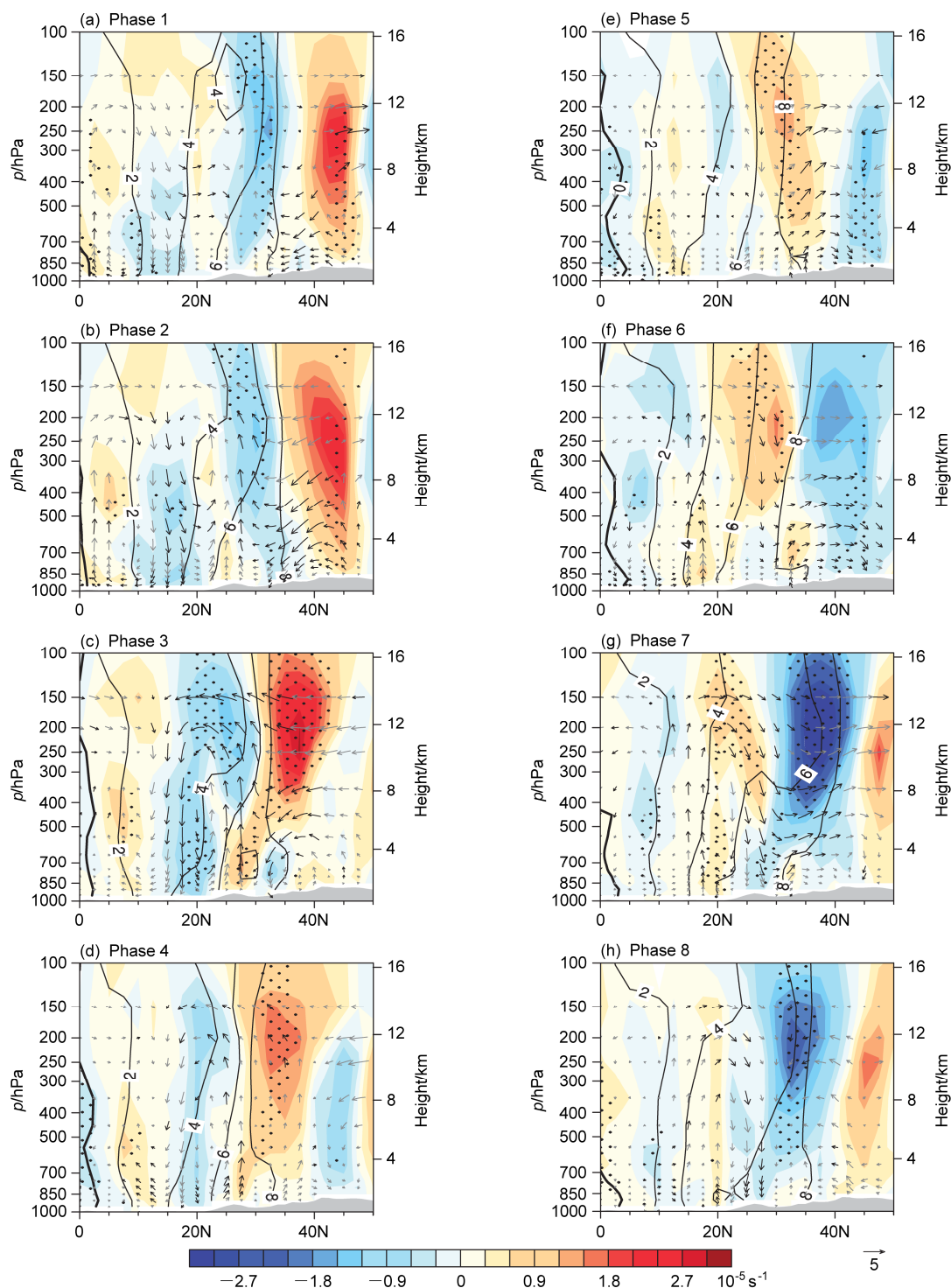


图 10 10~30 d 滤波的风场 (矢量, 经向风单位为 m s^{-1} , 垂直速度 ω 单位为 $-10^{-2} \text{Pa s}^{-1}$, 黑色箭头表示经向风或垂直速度分量通过信度为 90% 的显著性检验的矢量)、10~30 d 绝对涡度场 (填色, 单位: 10^{-5}s^{-1} , 打点区代表涡度异常通过信度为 90% 的显著性检验的区域) 和未滤波的绝对涡度场 (等值线, 间隔为 $2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, 粗实线为绝对涡度零线) 沿着 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 经度带平均的纬度—气压合成剖面

Fig. 10 Pressure-latitude cross sections ($105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ mean) of composite 10–30-day filtered wind (vectors, meridional wind in m s^{-1} , vertical velocity ω in $-10^{-2} \text{Pa s}^{-1}$, with black arrows denoting anomalous meridional or vertical wind components statistically significant at the 90% confidence level), 10–30-day filtered absolute vorticity (shading, units: 10^{-5}s^{-1} , the stippling represents the absolute vorticity anomalies statistically significant at the 90% confidence level), and unfiltered absolute vorticity (contours, with an interval of $2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) during a quasi-biweekly oscillation from phases 1 to 8

带、副热带地区, 当对流层高层绝对涡度较小时, AMC 型经圈环流将被激发。由于 Plumb and Hou (1992) 的模型是一个弱非线性模型, 所以图 10a-c 中位于华南对流层上层的低频振荡的负涡度异常区与绝对涡度的小值区有很好的对应关系。因此可以推断, 湿位相期间 (图 10a-c) 在华南发展起来的显著经圈环流与副热带对流层高层的负绝对涡度异常的发展密切相关。在湿位相向干位相转换过程中, 高空的绝对涡度负异常向南移动至南海北部 (图 10e), 有利于随后激发出局地上升运动 (图 10f), 与此同时, 在长江以南区域 ($17.5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$), 对流层高层有南风发展, 导致该处绝对涡度平流随高度减少, 使得下沉运动在华南地区发展 (图 10e-g)。

另一方面, 在干湿位相转换期间, 耦合的经向环流圈方向的反转还与华南局地的感热异常直接相关。干位相时, 华南地区降水少, 地表向上的感热加热偏强 (图略), 这有利于局地低层大气在随后出现上升运动, 为向湿位相转化创造条件。进入湿位相时, 华南降水增加, 导致地表感热加热偏弱 (图略), 有利于下沉运动发展, 从而为向干位相转化创造条件。图 11 给出华南关键区的降水异常

序列与感热异常区 ($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 区域平均的时间序列的时滞相关。当感热异常超前降水异常 7 天时, 二者的正相关系数最大; 而当感热异常滞后降水异常 2 天时, 二者的负相关系数最大, 并且最大正相关系数和最大负相关系数均通过了置信度为 90% 的统计显著性检验。这说明与局地降水异常有关的感热加热异常也有助于准双周振荡干、湿位相的转换。

6 结论和讨论

长江以南的广大华南地区是夏季严重旱涝频发的地区之一、也是降水季节内变率较大的中心之一, 本文以 2002 年为例, 研究华南地区降水低频振荡特征及成因, 重点考察了中高纬大气季节内振荡的环流演变及影响, 得到以下主要结论:

(1) 2002 年夏季华南地区降水具有显著的准双周振荡特征, 主导周期为 10~30 d。降水异常首先在 30°N 附近出现, 随后向南扩展加强。华南地区这种低频降水与南海北部低频降水呈反相关关系。

(2) 华南降水准双周振荡的环流结构在对流层低层表现为来自赤道地区的异常反气旋 (气旋) 向西北传播至南海北部, 导致西北太平洋副高进入 (退出) 南海, 使得水汽在华南地区辐合 (辐散)。在高层, 环流结构则呈现为中高纬地区一支自乌拉尔山以西经西西伯利亚至贝加尔湖南部向东南传播的异常气旋与反气旋交替配置的低频波列。当波列中异常气旋 (反气旋) 到达华北上空时, 使得南亚高压西退 (东伸), 华南高空成为显著的辐散 (辐合) 区, 并与低空 850 hPa 的辐合 (辐散) 区相耦合, 有利于上升 (下沉) 运动的发展, 造成华南降水正 (负) 异常。在对流层中层, 中高纬地区的低频波列是典型的冷槽与暖脊相间排列的结构。

(3) 随着中、高层低频波列向东南移动, 低压槽后部的冷空气下沉, 从而强迫华南地区低层暖空气抬升, 华南降水异常进入湿位相, 地表向上的感热加热随之减弱。华南地区的上升运动在高空向南辐散, 在南海北部下沉, 形成经向耦合的垂直环流圈。当华南异常降水达到最强后, 对流层高层的温度冷平流效应反而抑制随后上升运动的发展, 从而向干位相转化。这种转化还伴随着中纬度异常暖脊的南移而实现。华南局地感热加热负异常将使得随后近地层出现下沉运动, 也有助于向干位相的转化。

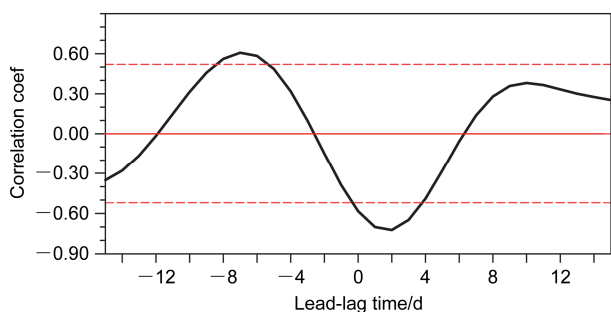


图 11 2002 年夏季 (5~8 月) 10~30 d 滤波的华南关键区低频降水时间序列与 10~30 d 滤波的区域 ($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 平均感热异常序列的时滞相关系数。在横坐标中, 负时滞天数表示感热异常超前于降水异常, 正时滞天数表示感热异常落后于降水异常, 红色实线是相关系数的零线, 红色虚线代表相关系数显著性检验通过 90% 信度的临界值

Fig. 11 Lead-lag correlation coefficients of the time series of 10-30-day filtered area-averaged daily rainfall anomaly over the key area ($25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) with the time series of 10-30-day filtered daily sensible heating flux anomaly averaged over the area ($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) in South China for the summer (1 May to 31 August) of 2002. Negative days in abscissa indicate that the anomalous sensible heating leads anomalous rainfall, the opposite is true for positive number. Red solid line is the zero line of the correlation coefficients, red dashed lines represent the critical values of the correlation coefficients statistically significant at the 90% confidence level

(4) 中高纬低频波列南移导致的副热带高层绝对涡度异常是准双周振荡垂直环流转变的重要动力学因素。在干位相向湿位相转换期间, 位于华北异常气旋南部的高压脊在华南上空产生绝对涡度负异常和辐散抽吸, 热带和副热带大气对这种涡度异常的响应是激发角动量守恒型经圈环流。伴随中低层副热带高压脊伸入南海所产生的近地层下沉运动, 两者的共同作用是激发出一个在华南上升而在南海北部下沉的经向环流圈。反之, 在湿位相向干位相转换过程中, 华南地区下沉运动的发展一方面取决于华南北部负的绝对涡度平流垂直梯度, 另一方面由南海北部高空绝对涡度负异常激发出的热力强迫经圈环流所致。

(5) 华南低频降水与 500 hPa 位势高度异常场的滞相关分析表明, 当青藏高原地区位势高度异常超前于华南异常降水 4 d (即超前 1/4 周期) 时, 二者出现显著正相关, 这种 1/4 周期的位相差意味着青藏高原地区 500 hPa 位势高度异常可能是华南地区季节内降水变化潜在的预报因子。

应当指出, 本文只是个例研究, 所得结果具有一定局限性。如华南降水准双周振荡干湿位相转换期间有关与低频波列活动相联系的中纬度冷 (暖) 平流与热带扰动系统的相对重要性问题, 还需要考察更多同类个例并通过多年资料的统计分析加以证实。

参考文献 (References)

- Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18 (8): 1016–1022, doi:10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2.
- Ebita A, Kobayashi S, Ota Y, et al. 2011. The Japanese 55-year reanalysis “JRA-55”: An interim report [J]. *Scientific Online Letters on the Atmosphere Sola*, 7: 149–152, doi:10.2151/sola.2011-038.
- Fujinami H, Yasunari T. 2009. The effects of midlatitude waves over and around the Tibetan Plateau on submonthly variability of the East Asian summer monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (7): 2286–2304, doi:10.1175/2009MWR2826.1.
- Ghil M, Mo K. 1991. Intraseasonal oscillations in the global atmosphere. Part I: Northern Hemisphere and tropics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 48 (5): 752–779, doi:10.1175/1520-0469(1991)048<0752:IOITGA>2.0.CO;2.
- 谷德军, 纪忠萍, 高晓容, 等. 2013. 广东前汛期降水与南海北部风场准双周振荡的关系 [J]. *热带气象学报*, 29 (2): 189–197. Gu Dejun, Ji Zhongping, Gao Xiaorong, et al. 2013. The relationship between the rainfall during the annually first rainy season in Guangdong and the quasi-biweekly oscillation of wind field in the north of South China Sea [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 29 (2): 189–197, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.02.002.
- Held I M, Hou A Y. 1980. Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 37 (3): 515–533, doi:10.1175/1520-0469(1980)037<0515:NASCIA>2.0.CO;2.
- 纪忠萍, 谷德军, 孙广风, 等. 2014. 2011 年夏季广东季风槽暴雨与准双周振荡 [J]. *热带气象学报*, 30 (3): 432–442. Ji Zhongping, Gu Dejun, Sun Guangfeng, et al. 2014. Torrential rains caused by monsoon trough in Guangdong and its quasi-biweekly oscillation during the summer of 2011 [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 30 (3): 432–442, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.03.04.
- 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.
- Krishnamurti T N, Bhalme H N. 1976. Oscillations of a monsoon system. Part I. Observational aspects [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33 (10): 1937–1954, doi:10.1175/1520-0469(1976)033<1937:OOAMSP>2.0.CO;2.
- 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响 [J]. *高原气象*, 25 (3): 382–389. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle-lower reaches of Yangtze River [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (3): 382–389, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.004.
- 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.
- 李崇银. 1993. 大气低频振荡 [M]. 北京: 气象出版社, 310pp. Li Chongyin. 1993. *Low Frequency Oscillation in the Atmosphere (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 310pp.
- Li J Y, Mao J Y. 2016. Experimental 15-day-lead statistical forecast of intraseasonal summer monsoon rainfall over eastern China [J]. *Atmos. Ocean Sci. Lett.*, 9 (1): 66–73, doi:10.1080/16742834.2015.1126152.
- Li J Y, Mao J Y, Wu G X. 2015. A case study of the impact of boreal summer intraseasonal oscillations on Yangtze rainfall [J]. *Climate Dyn.*, 44 (9–10): 2683–2702, doi:10.1007/s00382-014-2425-9.
- 林爱兰, 李春晖, 谷德军, 等. 2013. 热带季节内振荡对广东 6 月降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 29 (3): 353–363. Lin Ailan, Li Chunhui, Gu Dejun, et al. 2013. Impact of tropical intraseasonal oscillations on the precipitation of Guangdong in June [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 29 (3): 353–363, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.03.001.
- Liu Y M, Hoskins B J, Blackburn M. 2007. Impact of Tibetan orography and heating on the summer flow over Asia [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B: 1–19, doi:10.2151/jmsj.85B.1.
- 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 Meteor. 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. 1987. Intraseasonal atmospheric teleconnection patterns during the Northern Hemisphere summer [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (9): 2133–2154, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<2133:IATPDT>2.0.CO;2.
- Plumb R A, Hou A Y. 1992. The response of a zonally symmetric atmosphere to subtropical thermal forcing: Threshold behavior [J]. *J. Atmos. Sci.*, 49 (19): 1790–1799, doi:10.1175/1520-0469(1992)049<1790:TROAZS>2.0.CO;2.
- Ren X J, Yang X Q, Sun X G. 2013. Zonal oscillation of western Pacific subtropical high and subseasonal SST variations during Yangtze persistent heavy rainfall events [J]. *J. Climate*, 26 (22): 8929–8946, doi:10.1175/JCLI-D-12-00861.1.
- Schneider E K. 1977. Axially symmetric steady-state models of the basic state for instability and climate studies. Part II. Nonlinear calculations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34 (2): 280–296, doi:10.1175/1520-0469(1977)034<0280:ASSSMO>2.0.CO;2.
- Schneider E K. 1987. A simplified model of the modified Hadley circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44 (22): 3311–3328, doi:10.1175/1520-0469(1987)044<3311:ASMOTM>2.0.CO;2.
- Schneider E K, Lindzen R S. 1977. Axially symmetric steady-state models of the basic state for instability and climate studies. Part I. Linearized calculations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34 (2): 263–279, doi:10.1175/1520-0469(1977)034<0263:ASSSMO>2.0.CO;2.
- Simpson J, Kummerow C, Tao W K, et al. 1996. On the tropical rainfall measuring mission (TRMM) [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 60 (1): 19–36, doi:10.1007/BF01029783.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6): 608–627, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2.
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系 [J]. *气象学报*, 34 (4): 385–396. Tao Shiyan, Zhu Fukang. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West-Pacific subtropical anticyclone over the Far East [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 34 (4): 385–396, doi:10.11676/qxxb1964.039.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. Oxford, UK: Oxford University Press, 60–92.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (1): 61–78, doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.
- Wang M R, Duan A M. 2015. Quasi-biweekly oscillation over the Tibetan Plateau and its link with the Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 28 (12): 4921–4940, doi:10.1175/JCLI-D-14-00658.1.
- 温之平, 黄荣辉, 贺海晏, 等. 2006. 中高纬大气环流异常和低纬 30~60 天低频对流活动对南海夏季风爆发的影响 [J]. *大气科学*, 30 (5): 952–964. Wen Zhiping, Huang Ronghui, He Haiyan, et al. 2006. The influences of anomalous atmospheric circulation over mid-high latitudes and the activities of 30–60 d low frequency convection over low latitudes on the onset of the South China Sea summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (5): 952–964, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.23.
- Wilks D S. 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* [M]. New York, NY, USA: Academic Press, 464pp.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京: 科学出版社, 314pp. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. *Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclones* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 314pp.
- 吴国雄, 何编, 刘屹岷, 等. 2016. 青藏高原和亚洲夏季风动力学研究的新进展 [J]. *大气科学*, 40 (1): 22–32. Wu Guoxiong, He Bian, Liu Yimin, et al. 2016. Recent progresses on dynamics of the Tibetan Plateau and Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 40 (1): 22–32, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15129.
- 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.
- 姚秀萍, 于玉斌, 刘还珠. 2005. 2003 年淮河流域异常降水期间副热带高压的特征 [J]. *热带气象学报*, 21 (4): 393–401. Yao Xiuping, Yu Yubin, Liu Huanzhu. 2005. Characteristics of the subtropical anticyclone during the abnormal rainfall period over the Huaihe River region 2003 [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 21 (4): 393–401, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.04.007.
- 张庆云, 陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. *大气科学*, 27 (3): 369–380. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, 2003. The anomalous subtropical anticyclone in western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (3): 369–380.
- 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 [J]. *大气科学*, 27 (6): 1018–1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asia during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (6): 1018–1030, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.06.06.
- 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 [J]. *应用气象学报*, 18 (2): 129–136. Zhou Bing, Wen Jifen. 2007. Abnormality of summertime precipitation of eastern China and general circulation with LFO in 1998 [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 18 (2): 129–136, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.02.001.
- 祝从文, Nakazawa T, 李建平. 2004. 大气季节内振荡对印度洋—西太平洋地区热带低压/气旋生成的影响 [J]. *气象学报*, 62 (1): 42–50. Zhu Congwen, Nakazawa T, Li Jianping. 2004. Modulation of tropical depression/cyclone over the Indian–western Pacific oceans by Madden-Julian oscillation [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (1): 42–50, doi:10.11676/qxxb2004.005.