

南海季风槽准双周振荡对广东夏季暴雨的影响

纪忠萍¹ 谷德军² 于玲玲¹ 高晓容³ 梁巧倩¹ 梁伟杰¹

1 广东省气象台, 广州 510640

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所/粤港澳大湾区气象研究院, 广州 510640

3 北京市通州区气象局, 北京 101100

摘要 利用 1961~2017 年 NCEP/NCAR 逐日再分析与广东逐日降水等资料, 通过选取没有与锋系联系在一起、由单一南海季风槽影响导致的广东暖区暴雨过程并进行分类, 采用合成分析、小波分析、Lanczos 滤波器等方法, 研究了不同类型季风槽暴雨过程的时空分布特征及其与大气低频振荡的关系, 重点揭示了(强)西南季风型季风槽暴雨过程在准双周振荡不同位相大气环流场的演变特征及低频信号的来源与机制。结果表明:

(1) (强)西南季风型季风槽暴雨过程占总个例的 54.1%, 主要出现在广东沿海与内陆的三大暴雨中心(阳江~阳春~恩平、海丰~陆丰~汕尾、龙门~佛岗), 其余三类季风槽暴雨过程((强)西南季风辐合型、东南季风扰动型、热带气旋远离/消散型)主要出现在广东沿海的两大暴雨中心及珠江口两侧。(2) 季风槽暴雨过程主要存在 5~8 天的准单周振荡、10~24 天的准双周振荡, 少数年份还存在 32~65 天振荡。(3) (强)西南季风型季风槽暴雨从间歇~开始~鼎盛~减弱期, 低频信号不仅来源于从欧洲西部到东北亚具有准正压性、呈相间排列的“反气旋~气旋”的低频波列东南向传播, 还来源于对流层中低层菲律宾东南的热带西太平洋低频气旋西北向传播。它们使南亚高压从孟加拉国向巴基斯坦移动, 西太平洋副高逐渐加强西伸北抬, 巴尔喀什湖~贝加尔湖~我国中东部地区由间歇期的低频反气旋环流或高压脊逐渐转为鼎盛期的低频气旋环流或高空槽控制。(4) 当华南高层由低频反气旋环流东南侧的强东北风逐渐转为华北~江南低频气旋性环流底部的强偏西风与印度半岛~南海西北部低频反气旋外围的西北风控制, 高空辐散逐渐增强并达到最强。中低层由低频反气旋环流或高压脊控制逐渐转受来自南海中北部~孟加拉湾低频反气旋北缘的强西南风控制, 并受东北亚、日本及其以南西太平洋低频反气旋环流的阻挡, 在我国西南~江南~华南上空形成强的低频气旋性环流与正涡度。广东处于来自低纬度季风环流圈与中纬度次级垂直环流圈上升运动的汇合区, 来自对流层中低层偏南风异常与垂直上升运动及绝对涡度逐渐增强并达到最强。地面由弱均压场逐渐转为北部湾向北伸展加强的闭合低压控制, 南海季风槽北抬并增强, 使(强)西南季风型季风槽暴雨从无转为开始并达到鼎盛期。它们可为季风槽暴雨的中期~延伸期预报提供参考。

关键词 季风槽暴雨 准双周振荡 (强)西南季风型 低频信号

文章编号 中图分类号 P456.2, P456.3, P457.6 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2412.22138

收稿日期 2025-1-6; **网络预出版日期**

作者简介 纪忠萍, 女, 1967 年出生, 硕士, 正研级高工, 主要从事中长期天气预报与低频振荡研究。E-mail: jzp897@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 42365001, 广东省自然科学基金 S2013010016751, 广东省气象局科研项目(GRMC2023M33, GRMC2024Q20), 中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题重点项目(23SWQXZ007)

Funded by National Science Foundation of China (Grant 42365001), Natural Science Foundation of Guangdong province (Grant S2013010016751), Scientific Research Project of Guangdong Meteorological Bureau (Grant GRMC2023M33, GRMC2024Q20), Key Project of Open Research Project of China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory (Grant 23SWQXZ007)

Influence of South China Sea Monsoon Trough Quasi-biweekly Oscillation on Rainstorm in summer in Guangdong province

JI Zhongping¹, GU Dejun², YU Lingling¹, GAO Xiaorong³, LIANG Qiaoqian¹, Liang Weijie¹

1 Guangdong Observatory, Guangzhou 510640

2 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology of China Meteorological Administration, GBA Academy of Meteorological Research, Guangzhou 510640

3 Tongzhou Meteorological Bureau of Beijing, Beijing 101100

Abstract Using NCEP/NCAR daily reanalysis dataset and Guangdong daily precipitation from 1961 to 2017, by selecting and classifying the rainstorm processes in the warm sector in Guangdong only caused by South China Sea monsoon trough without the frontal system, the temporal and spatial distribution characteristics of different types of monsoon trough rainstorm processes and their relationship with atmospheric low-frequency oscillations are studied, focusing on revealing atmospheric circulation field evolution characteristics in different phase of quasi-biweekly oscillations and the source and mechanism of low-frequency signals with monsoon trough rainstorm process of the (strong) southwest monsoon type, by the methods of synthetic analysis, wavelet analysis and Lanczos filter. The results indicate that (1)the monsoon trough rainstorm process of the (strong) southwest monsoon type accounted for 54.1% of the total cases, mainly occurring in the three major rainstorm centers (Yangjiang-Yangchun-Enping, Haifeng-Lufeng-shanwei, Longmen-Fogang) along the coast and inland of Guangdong. The other three types of monsoon troughs rainstorm process ((strong) southwest monsoon convergence type, southeast monsoon disturbance type, tropical cyclone away/dissipation type) mainly occurred in the two major rainstorm centers along the coast of Guangdong and on both sides of the Pearl River Estuary. (2)The monsoon trough rainstorm process mainly exhibit quasi weekly (5-8 days) and quasi biweekly (10-24 days) oscillations but less 32-65 days oscillations. (3)During the intermittent-start-peak-weak period of monsoon trough rainstorm process of the (strong) southwest monsoon type, the low-frequency signal not only originates from the southeastward-propagation of the quasi-barotropic low-frequency wave train consisting of a series of anomalous anticyclones and cyclones from Western Europe to Northeast Asia, but also originates from the northwestward propagation of low-frequency cyclones in the tropical western Pacific of southeast Philippines in the middle and lower troposphere. They made the South Asian High move westward from Bangladesh to Pakistan, the western Pacific subtropical high gradually strengthened and extended northwestward, from Balkhash Lake to Baikal lake, central and eastern China is controlled by low frequency anticyclonic circulation or high pressure ridge in intermittent period gradually turning into low frequency cyclonic circulation or upper trough in peak period. (4)In South China, the upper-air divergence gradually increases and reaches the strongest, as the strong northeasterly at the southeast side of the low-frequency anticyclonic circulation gradually changes to the strong westerly from the bottom of low-frequency cyclonic circulation which controls the North China and South of the Yangtze, and the northwesterly from periphery of low-frequency anticyclone which controls the Indian Peninsula-Northwest South China Sea. The middle and lower layers are gradually controlled from the low frequency anticyclone circulation or high pressure ridge to the (strong) southwesterly which comes from the north of the low frequency anticyclone which controls the central and northern South China Sea and the Bay of Bengal, the strong low-frequency cyclonic circulation and positive vorticity are formed over Southwest China, South of the Yangtze and South China, when the strong southwesterly are blocked by the low-frequency anticyclone circulation over Northeast Asia, Japan and the southwestern Pacific. Guangdong is gradually in the confluence area of the ascending motion from the monsoon circulation circle at low latitude and the secondary vertical circulation circle at middle latitude, and the southerly wind anomaly from the middle

and lower troposphere and the ascending motion and the absolute vorticity gradually increase and reach the strongest. The Sea level pressure gradually changed from a weak uniform pressure field to a closed low pressure extending northwards from the Beibu Gulf, the South China Sea monsoon trough lifts northward and strengthens, making the monsoon trough rainstorm process of the (strong) southwest monsoon type from the intermittent to peak period. These are beneficial to medium-extended-range forecast of monsoon trough rainstorm processes.

Keywords Monsoon trough Rainstorm, Quasi-Biweekly Oscillation, (strong) southwest monsoon type, Low frequency signal

1 引言

南海夏季风槽是南海夏季风系统中引起降水的重要系统,具有热带辐合带的鲜明特点(李崇银和潘静,2007)。当南海季风槽伸入华南沿海或陆地,可在华南地区引起持续性暴雨。研究表明,南海季风槽不仅是华南初夏(5~6月)的主要天气系统之一,对5~6月华南强降水有较大的贡献(王荫桐和彭洪,1985),也是华南后汛期(7~9月)除了热带气旋之外的主要降水系统(黄忠等,2005;陈红等,2022)。季风槽暴雨过程引发的气象灾害常给国民经济带来很大损失(黄忠等,2005;杨辉等,2011;纪忠萍等,2014)。但季风槽因气压梯度小,等压线或等高线稀疏,结构特征不典型,降水预报具有显著的不确定性,尤其是暴雨以上的强降水,在温、压、风等要素场上没有明显的前兆信号,是预报难度大、准确率低的一类暴雨(陈见等,2015)。另外,由于在华南季风低槽活跃时期,它的北侧冬季风虽有减弱,但尚未撤退,常携带浅薄冷空气侵入华南沿海,有时还可以到达南海中北部,导致低槽的活动多和锋系联系在一起(占华南5-6月季风槽总数的77%)(王荫桐和彭洪,1985)。而在实际天气预报业务中,没有与锋系联系在一起由单一南海季风槽活动导致的暖区暴雨过程,由于突发性强,造成的局地内涝、山体滑坡与泥石流灾害更加难以防范。因此,加强季风槽暴雨尤其是没有与锋系联系在一起的单一南海季风槽活动导致的暖区暴雨过程发生、发展的季节内变化规律及其低频信号来源的研究,延长预报时效,做好广东省季风槽暴雨过程的中期与延伸期天气预报,对防灾减灾、减少国民经济损失具有重要意义。

南海和西北太平洋上空对流层低层的季风槽是从东南亚吹来的西南季风和从南半球吹来的跨赤道气流与从热带东、中太平洋上空沿西太平洋副热带高压南沿吹来的东风气流相交汇而形成的一个对流层低层气旋性大尺度环流系统(黄荣辉等,2016)。关于西北太平洋季风槽的气候与变化特征(Ueda and Yasunari,1996;wu,2002;黄荣辉等,2016;张翔等,2017)及预测(Li et al.,2017)、与热带气旋活动的关系研究较多(Lander,1996;Briegel and Frank,1997;高建芸等,2008;Molinari and Vollaro,2013;Cao et al.,2014;Zong and Wu,2015a,2015b;黄荣辉等,2016;Guo and Ge,2018;Feng et al.,2020;Li et al.,2022;Huang et al.,2022;Zhang et al.,2023);关于南海季风槽及其与降水或暴雨关系的研究主要集中在气候特征(王荫桐和

彭洪, 1985; 谭锐志和容广坝, 1991; 潘静和李崇银, 2006; 王黎娟等, 2006; 李崇银和潘静, 2007)、短期天气形势(黄忠等, 2005; 卢山等, 2008; 陈见等, 2015; 陈红等, 2022)、中尺度对流系统(蒙伟光等, 2014; 2019)、典型个例的异常特征及低频振荡特征分析(杨辉等, 2011; 纪忠萍等, 2014)。华南暖区暴雨突发性强, 短时雨强大, 易引发洪涝灾害, 但其产生的环境条件复杂和触发机制难以捕捉, 数值模式对其预报能力弱, 给预报带来困难, 经常导致预报失误(Sun et al., 2019; 覃武等, 2020), 因此, 华南暖区暴雨一直是大气科学界的一个研究热点(黄士松等, 1986; 韦统健, 1994; 丁治英等, 2011; 陈翔翔等, 2012; 何立富等, 2016; Miao et al., 2018; Zhang and Meng, 2019; Wu et al., 2020; 刘瑞鑫等, 2019, 2021; 纪忠萍等, 2021; Li and Du, 2021; Fu et al., 2022; Zhang et al., 2022; Ning et al., 2023; 覃皓等, 2024; Zhang et al., 2024)。关于华南夏季持续性强降水期间的低频大气环流型以及低频信号的来源已有研究(林爱兰等, 2015; 魏蕾等, 2017; 李春晖等, 2017; 孔晓宇等, 2017), 但华南夏季(6-8月)持续性强降水具有不同的性质: 虽然5月中旬以后, 受西南季风影响, 强降雨带移至华南沿海, 主要表现为暖区降水(何立富等, 2016), 但6月连续暴雨仍多为冷暖交绥的锋面降水(谷德军和纪忠萍, 2011; 谢炯光等, 2012; 林爱兰等, 2015), 后汛期(7-9月)强降水主要是受台风和热带辐合带等热带天气气候系统的影响(黄忠等, 2007), 因此有必要将华南夏季(6-8月)不同性质的持续性强降水分开研究, 尤其是深入研究没有与锋系联系一起、由单一南海季风槽影响导致的华南暖区暴雨过程, 揭示其季节内振荡特征及其发生、发展的演变规律、低频信号来源, 提高季风槽暴雨的中期与延伸期预报准确率。

本文首先通过排除有热带气旋和冷空气影响后, 对1961-2017年没有与锋系联系一起、由单一南海季风槽影响导致的广东季风槽暖区暴雨过程进行挑选, 并将季风槽暖区暴雨强盛期的环流分为4类进行统计分析; 其次, 研究了季风槽暴雨过程对应的低频振荡特征; 最后, 采用合成分析的方法, 着重研究了预报中易漏报且占总个例的54.1%的强西南季风型季风槽暴雨过程发生、发展的大气环流场及其低频环流场的演变特征及低频信号来源与机制, 并与其他三类季风槽暴雨过程的环流演变特征与机制进行了对比分析, 以提高由单一南海季风槽导致的暖区暴雨过程的中期与延伸期预报准确率。

2 资料与方法

所用资料主要有: (1) 来自广东省气象探测数据中心的1961~2017年广东省86站地面逐日降水、气压(p)、温度(T)、绝对湿度(e)等资料; (2) NCEP/NCAR (National Center

for Atmospheric Research) 逐日再分析资料 ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) (Kalnay et al., 1996); (3) 登陆中国的热带气旋(含热带低压)资料, 这些资料来自: (I) 上海台风研究所编的《西北太平洋台风基本资料集》(1949~1980) (上海台风研究所, 1984), (II) 中国气象局编的《热带气旋年鉴》(1981~2017)。

采用墨西哥帽(Mexican hat)小波变换(Lau and Weng, 1995; Torrence and Compo, 1998)分析时间序列的周期特征, 采用 Lanczos 时间滤波器(Duchon, 1979)进行低频滤波, 采用合成分析的方法分析了季风槽暴雨过程准双周振荡不同位相大气环流场的演变特征与机制, 并采用 t 检验对合成场进行显著性检验(Murakami, 1987)。

广东省暴雨的定义采用谢炯光等(2006)的定义, 即在每日(08 时至第二日 08 时)的雨量图上, 凡广东省内某测站的日雨量达 50 mm 以上者, 称该站有暴雨; 而当某日省内测站有相邻 4 个站暴雨连成片者, 称该日省内有暴雨。季风槽暴雨过程为持续出现 2 天以上由季风槽引起的暴雨过程(具体客观识别过程见下文)。

冷空气活动的判断, 首先参考广东省气象台中期科关于“冷空气记载的规定”(纪忠萍等, 2021), 即在毗邻的日期, p 、 T 、 e 三要素的 24h 变化[即 $+\Delta p$ (升压)、 $-\Delta T$ (降温)、 $-\Delta e$ (降湿)]有两项发生且其绝对值 ≥ 0.1 , 可初步视为有冷空气。其次, 结合逐日东亚海平面气压场的变化, 检查是否有冷高压南压影响广东。由于广州位于广东中部, 资料较完整, 与省内不少地区的相关性甚好, 特别是气温, 与华南地区的相关系数都接近 0.01 的显著性水平(广东省气象局资料室编, 1987)。计算 1961-2017 年逐年 5-9 月广州逐日气压与东半球海平面气压的相关系数, 然后进行多年平均(图略), 可知广州逐日气压与华南海平面气压的相关系数多数在 0.5 以上, 最高达 0.8 以上, 均远超过 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。因此, 通过参考广州单站 p 、 T 、 e 的变化并结合东亚海平面气压场的变化, 来综合判断是否有冷空气影响广东。

3 季风槽暴雨过程的分类与时空分布特征

关于季风槽的定义, 目前国内外学术界还没有统一的标准(Molinari and Vollaro, 2013; 陈见等, 2015; Feng et al., 2020)。一般认为季风槽/ITCZ 在海平面上的表现就是低压槽的存在, 海平面气压的槽线可以表示季风槽(潘静和李崇银, 2006; 王黎娟等, 2006; 杨辉等, 2011)。李崇银和潘静(2007)以夏季(6~8 月)南海区域对流层低层(1000 hPa、850 hPa、700 hPa)平均的相对涡度作为衡量该年南海夏季风槽强、弱的指数。Wu et al. (2012)、Molinari and Vollaro (2013)、Li et al. (2017)、Feng et al. (2020)采用 850 hPa 相对涡度来定义西太平洋季风槽指数。华南地区的预报员通常将如下低层形势称为季风槽

(黄忠等, 2005): 在盛夏季节, 南海北部至华南沿海地区低空经常出现一条西南与东南季风辐合区, 或者由于地面上北部湾附近地区低压槽发展, 强偏南气流登陆华南沿海, 南海季风云团涌到华南上空, 造成强烈降水。

前人关于华南季风槽暴雨过程的确定多采用主观、人工的方法去挑选事件(王荫桐和彭洪, 1985; 黄忠等, 2005; 陈见等, 2015)。已有的研究表明(王荫桐等, 1985), 华南季风槽系统以对流层低层较为明显。谭锐志和容广坝(1991)的研究也表明, 华南季风槽是一类浅薄的天气系统, 其能量主要集中在对流层的中下层(900~600hPa)。陈翔翔等(2012)对华南暖区暴雨的研究也表明, 暴雨辐合中心均在850 hPa以下的低层。黄忠(2005)研究得到季风槽暴雨期间平均海平面气压场的共同特征为: 北部湾有向北或东北方向伸展的低压区, 有时在北部湾或广西境内有闭合的低压中心。黄士松等(1986)关于暖区暴雨的定义, 要求暴雨距离锋区200km以上且处于暖空气一侧的偏南气流中, 不受台风等热带系统控制。因此, 本文确定某次暴雨是否由季风槽引起的客观识别过程如下:

- (1) 根据登陆中国的热带气旋(含热带低压)资料, 剔除有热带气旋在广东登陆及在广东登陆后减弱成低压槽造成的暴雨过程。
- (2) 根据广州单站 p 、 T 、 e 及东亚海平面气压场的变化, 剔除有冷空气影响广东的暴雨过程(具体见上文)。
- (3) 海平面气压图上, 南海中北部-北部湾-江南(10°~27.5°N, 105°~120°E)为低压槽控制。
- (4) 850hPa 风场上, 广东至江南(20°~27.5°N, 110°~120°E)主要为西(偏)南风或偏东风控制。

参考黄忠等(2005)、陈见等(2015)对华南季风槽暴雨的分类, 将上文客观识别的没有与锋系联系一起、由单一南海季风槽活动所引起的广东暖区暴雨过程强盛期对应的环流分为4类(图1)(其中热带气旋远离/消散型, 参考黄忠等(2005), 剔除了热带气旋本身的暴雨, 降水过程时间从热带气旋离广东至少400km以上, 或在广东省外消失以后算起):

I类: (强)西南季风型, 由南海北部(强)西南或偏南气流登陆华南, 在(110°~120°E、20°~25°N) 2/3 以上的网格点为西南风或偏南风, (110°~120°E、27.5°~30°N) 1/2 以上的网格点也为西南风或偏南风, 即在110°E以东、30°N或以南无明显的风向辐合导致的暴雨(图1a)。

II类: (强)西南季风辐合型, 由南海北部(强)西南或偏南气流登陆华南, 在(110°~120°E、20°~25°N) 2/3 以上的网格点为西南风或偏南风, 但在(110°~120°E、27.5°~30°N) 1/2 以上的网格点为偏东风, 即在110°E以东、30°N以南有明显的风向辐合导致的暴雨(图1b)

III类: 东南季风扰动型, 由南海北部西南季风在华南沿海转向为偏东或东南气流(即在(110°~

120 E、22.5°~25°N) 1/2 以上的网格点为东南风或偏东风) 登陆华南上空而产生的暴雨 (图 1c)。

IV类: 热带气旋远离/消散型, 由热带气旋远离广东或在广东省外消散以后遗留的季风槽造成的暴雨 (图 1d)。

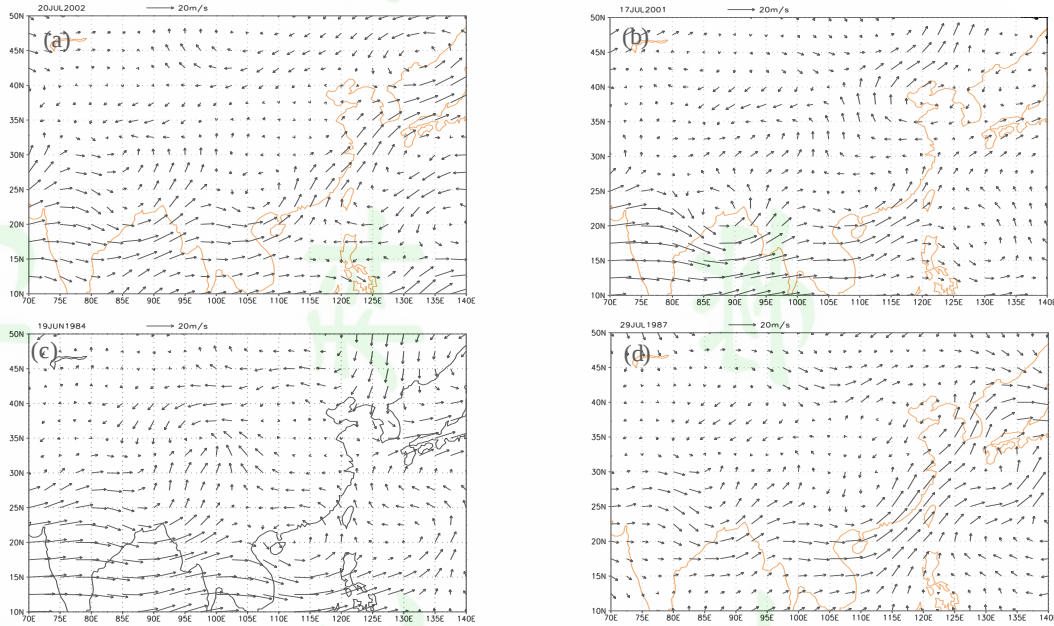


图 1 季风槽暴雨典型个例的 850hPa 风场 (a: (强)西南季风型—I 类;b: (强)西南季风辐合型—II 类;c—东南季风扰动型—III 类;d: 热带气旋远离/消散型—IV 类)。

Fig.1 850hPa wind field of typical cases of monsoon trough rainstorm(a: (strong)southwest monsoon—type I; b: (strong)southwest monsoon convergence—type II; c: southeast monsoon disturbance - type III; d: tropical cyclone away /dissipating - type IV).

表 1 为根据上述季风槽暴雨的分类所确定的 74 次季风槽暴雨过程。表 2 为根据表 1 统计的不同类型季风槽暴雨发生的次数。由表 2 可见, 74 次季风槽暴雨过程中, 最多为(强)西南季风型(I 类,40 次、占 54.1%), 其次为热带气旋远离/消散型(IV 类,14 次, 占 18.9%)、(强)西南季风辐合型(II 类,13 次、占 17.6%), 最少为东南季风扰动型(III 类, 7 次, 占 9.5%)。因此, 由(强)西南季风型导致的暴雨过程最多, 东南季风扰动型产生的季风槽暴雨过程最少。这与陈翔翔等(2012)研究 5~6 月华南暖区暴雨得到的季风爆发后偏南风型最多一致, 与刘瑞鑫等(2019)得到的广东南风型暖区暴雨发生数目最多也一致。另外, 从各类季风槽暴雨的逐月分布可见, (强)西南季风型与(强)西南季风辐合型(I~II 类)出现在 6 月的几率最高, 分别为 $26/40=65\%$, $8/13=61.5\%$, 热带气旋远离/消散型(IV 类)出现在 7~8 月的几率较高 ($10/14=71.4\%$)。因此, (强)西南季风型与(强)西南季风辐合型主要出现在 6 月, 热带气旋远离/消散型主要出现在 7~8 月。

表1 1961~2017年持续2天以上季风槽暴雨过程分类及对应的振荡周期(天)(中间相隔1天算同一次过程)

Table 1 The classification of the rainstorm process caused by monsoon trough that lasts for more than 2 days from 1961 to 2017 and the corresponding oscillation period (days) (1 days apart is the same process)

暴雨个例	类型	周期	暴雨个例	类型	周期	暴雨个例	类型	周期	暴雨个例	类型	周期
1963.7.19-20	IV	10-16	1964.6.11-15	I	6-16	1965.6.14-17	II	12-18.5	1965.6.27-28	I	7.8-8
1966.6.11-14	II	10	1966.6.20-22	I	10-12	1966.7.1-2	I	10-12	1968.6.12-15	I	10-12
1968.6.18-22	II	12-14	1968.7.3-5,8-9	I	5-15	1969.8.10-12	IV	10-12	1970.6.27-28	I	15-18.5
1971.6.5-8	I	10-12	1971.8.11-12	III	5-6	1972.6.4-5	II	6-12	1972.6.14-18	II	13-14
1972.8.11-12,14-15	I	40-65	1973.7.24-25	I	10-24	1975.6.5-6	I	6-7	1975.7.12-14	I	10-15
1975.8.7-8	III	5-7	1977.6.25-26	I	12-16	1978.6.6-7	I	8-10	1979.6.29-30	I	6-12
1981.6.29-30	I	7-18	1982.7.31-8.1	IV	10-12	1982.8.16-18	IV	10-12	1983.6.16-18	I	12-14
1984.6.3-4	I	15-20	1984.6.18-20	III	6-20	1984.8.4-5	III	6-7	1987.7.28-31	IV	12-18.5
1988.7.28-29	II	7-8	1991.6.8-11	III	11-12	1991.7.30-31	I	6.5-7	1992.6.13-15	I	5-8
1993.6.7-11	I	7-8	1993.6.15-17	I	7-13	1994.6.10-12,14-16	IV	8-10,22-30	1994.7.22-27	IV	14-16
1995.6.6-8	II	10	1995.6.14,16-18	I	10-14	1995.8.1-5	IV	10-12	1996.6.21-24	I	24-28
1996.8.15-18	I	9-10	1997.7.2-6	I	12-16	1997.7.17-19	I	8-10	1997.8.7,9,11-12	II	10-13
1998.6.18-19,21-25	I	12-15	1999.6.21,23-24	I	15-16	2001.6.25-27	IV	6-8	2001.7.15,17-18	II	10-12
2002.6.9,11	I	7-10	2002.7.1-2	I	6-8	2002.7.16-20	I	7-10	2002.8.6-10	IV	12-14
2003.6.9-10	II	12-18.5	2005.8.18-20	II	18-28	2007.6.7-9	II	20-23	2007.8.13-15	IV	45-48
2008.6.12-13,15-18	I	12-14	2008.7.6-9	III	7-12	2010.6.8-9	I	6-7	2010.6.14-16	I	7-12
2010.6.24-28	I	12-13	2011.6.28-29	I	7-18	2011.7.15-16	II	16-20	2012.6.21-23	IV	12-15
2013.6.24-25	IV	7-8	2013.7.25-27	I	7-8	2015.7.21,23-24	IV	18-23	2016.6.11-12	I	20-22
2016.8.11-14	III	12-16	2017.7.2-3	I	12-16						

表2 1961~2017年持续2天以上不同类型季风槽暴雨过程的逐月次数

Table 2 Monthly number of rainstorm processes lasting more than 2 days caused by different types of monsoon trough from 1961 to 2017

类型\月	6月	7月	8月	总和
I	26	12	2	40
II	8	3	2	13
III	1	1	5	7
IV	4	5	5	14

为了进一步了解并做好不同类型季风槽暴雨过程的落区预报,图2给出4类季风槽暴雨过程的所有个例平均日降水量的空间分布。可见,(强)西南季风型(I类,图2a)日降水量极大值中心主要分布在粤西云雾山南坡的阳江~阳春~恩平,粤东莲花山南麓的海丰~陆丰~汕尾,粤北以龙门为中心的佛岗~河源一带,它们均是广东三大降水或暴雨中心(广东省气象局资料室编,1987;谢炯光等,2006)。这与刘瑞鑫等(2021)得到的“广东地区的南风型暖区暴雨落区在广东沿海及其中北部地区”一致。(强)西南季风辐合型(II类,图2b)极大值中心主要分布在以粤西的阳江、粤东的海丰为中心的南部沿海一带,东南季风扰动型(III类)极大值中心主要分布在阳春~斗门~珠海~海丰~汕尾~陆丰~汕头地区一带,热带气旋远

离/消散型（IV类）极大值中心主要分布在斗门～珠海～深圳～海丰～汕尾～陆丰一带。这与黄忠等（2005），陈见等（2015）得到的“季风槽暴雨落区以南部为主”一致。因此，季风槽暴雨过程降水的极大值中心主要出现在广东沿海的两大暴雨中心（阳江～阳春～恩平、海丰～陆丰～汕尾）及珠江口两侧，（强）西南季风型还出现在广东的另一个暴雨中心（龙门～佛岗）。

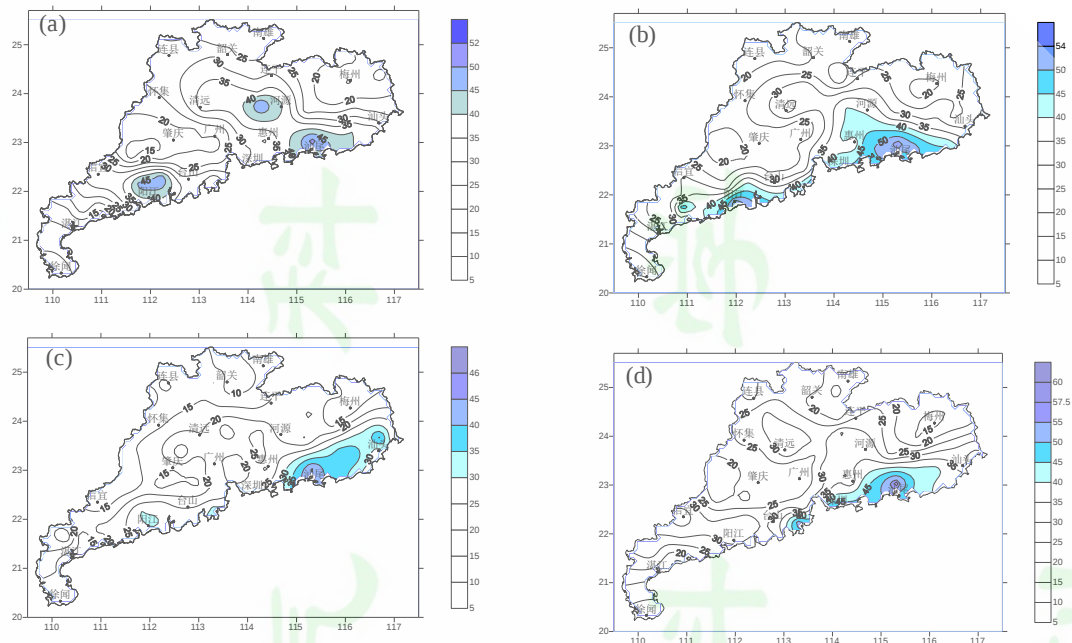


图2 季风槽暴雨典型个例合成平均的日降水量分布(单位: mm) (a: (强)西南季风型—I类;b: (强)西南季风辐合型—II类;c-东南季风扰动型—III类;d:热带气旋远离/消散型—IV类)。

Fig.2 The composite average daily precipitation distribution of typical cases of monsoon trough rainstorm process (unit: mm) (a: (strong) southwest monsoon-type I; b: (strong) southwest monsoon convergence-type II; c: southeast monsoon disturbance - type III; d: tropical cyclone away/dissipation - type IV).

4 季风槽暴雨过程的低频振荡特征

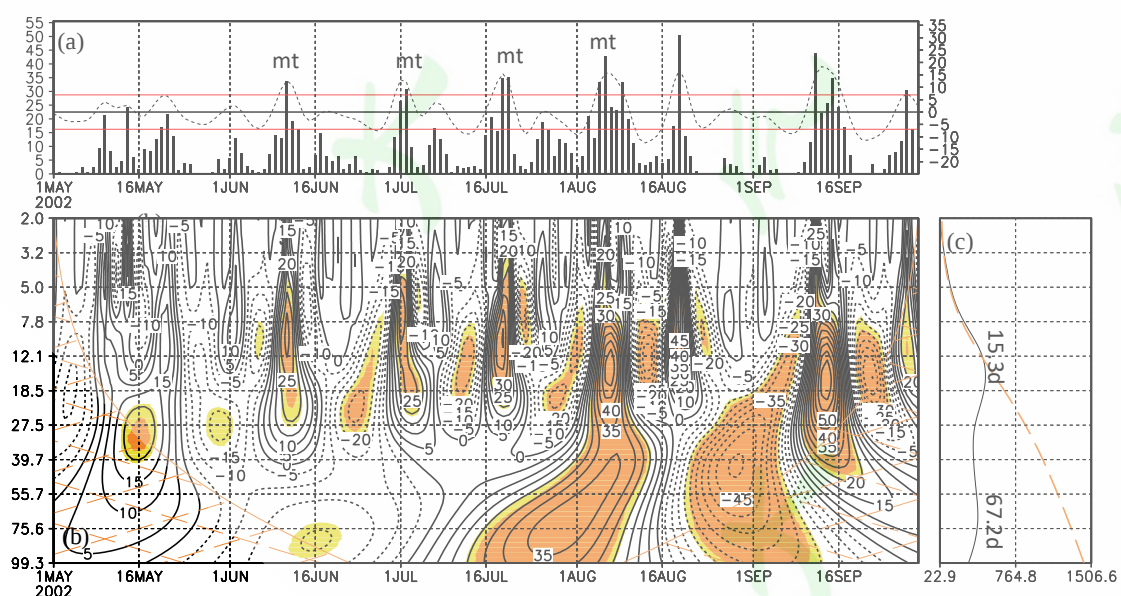
伍红雨等（2011）计算华南区域平均前、后汛期暴雨以上降水量序列与同期降水总量序列的相关系数分别为 0.91 和 0.65，说明华南汛期暴雨以上降水与同期降水总量具有较高的一致变化关系。为了了解历年广东夏季季风槽暴雨过程对应的低频振荡特征，对广东 86 个代表站 1961～2017 年逐年 5～9 月逐日平均雨量进行小波分析。图 3 分别给出了 2002 年、2016 年广东 86 个代表站平均的 5～9 月逐日降水的小波分析。

2002 年 6～8 月出现 4 次季风槽暴雨过程，分别为 6 月 9～11 日、7 月 1～2 日、7 月 16～20 日、8 月 6～10 日(图 3a)，它们与广东 86 站平均逐日降水的峰值时段有较好的对应关系。由于一个正/余弦波的完整周期为在一个周期内完成一次完整的振荡所需要的时间，选取图中每次季风槽暴雨过程及其后少雨期对应的周期，作为季风槽暴雨过程在某个范围内的主导周期。从图 3b 可见，2002 年 5～9 月存在明显的准 8～28 d、准 40～80 d 的周期振荡，4 次季风槽暴雨过程分别与准 7～10d、6～8d、7～10d、12～14d 周期振荡的正位相对应，它们

均对应 5~25d 滤波曲线的峰值附近 (图 3a)。从图 3c 可见, 图中存在 2 个明显的峰值, 分别对应 15.3d、67.2d 周期振荡。因此, 2002 年 5~9 月主要存在 15.3d 的准双周振荡与 67.2 d 的季节内振荡, 季风槽暴雨过程主要对应 6~8 d、7~14 d 的准单周、准双周振荡。

2016 年 6~8 月出现 2 次季风槽暴雨过程, 分别为 6 月 11~12 日、8 月 11~14 日 (图 3d)。从图 3e 可见, 2016 年 5~9 月存在明显的准 7~40 d 左右的季节内振荡, 其中 6 月 11~12 日季风槽暴雨过程与准 20~22d 周期振荡的正位相对应, 8 月 11~14 日季风槽暴雨过程主要与 12~16d 周期振荡的正位相对应。从图 3d 可见, 6 月 11~12 日、8 月 11~14 日的季风槽暴雨过程也对应 5~25d 滤波曲线的峰值附近。从图 3f 可见, 图中存在 2 个明显的峰值, 即 9.4d、28.5d, 它们均可以通过 0.05 的显著性水平检验。因此, 2016 年 5~9 月存在显著的 9.4d、28.5d 的周期振荡, 季风槽暴雨过程主要对应 12~22 d 的准双周振荡。

表 1 给出了 1961~2017 年持续 2 天以上的 74 次季风槽暴雨过程对应的低频特征。可见, 除 2 次暴雨过程 (1972 年 8 月 11~15 日、2007 年 8 月 13~15 日) 分别存在准 40~65 d、45~48 d 的周期振荡, 2 次暴雨过程 (1996 年 6 月 21~24 日、2005 年 8 月 18~20 日) 存在准 24~28 d、18~28 d 的周期振荡, 1994 年 6 月 10~16 日暴雨过程存在准 8~10d、22~30d 周期振荡, 其余 69 次季风槽暴雨过程主要与准 5~8 d、6~20 d、10~24 d 的准单周、准双周振荡相对应 (分别占 $14/74 \approx 18.9\%$, $15/74 \approx 20.3\%$, $40/74 \approx 54.1\%$)。其中 2007 年 8 月 13~15 日季风槽暴雨过程存在准 45~48 d 的季节内振荡与杨辉等 (2011) 分析得到的结果一致。因此, 广东夏季季风槽暴雨过程主要具有 10~24d 的准双周振荡, 其次还具有 5~8 d 的准单周振荡, 少数年份还具有准 32~65 d 的季节内振荡。这与魏蕾等 (2017) 研究得到华南夏季降水具有显著的 12~30 d 低频振荡特征一致。



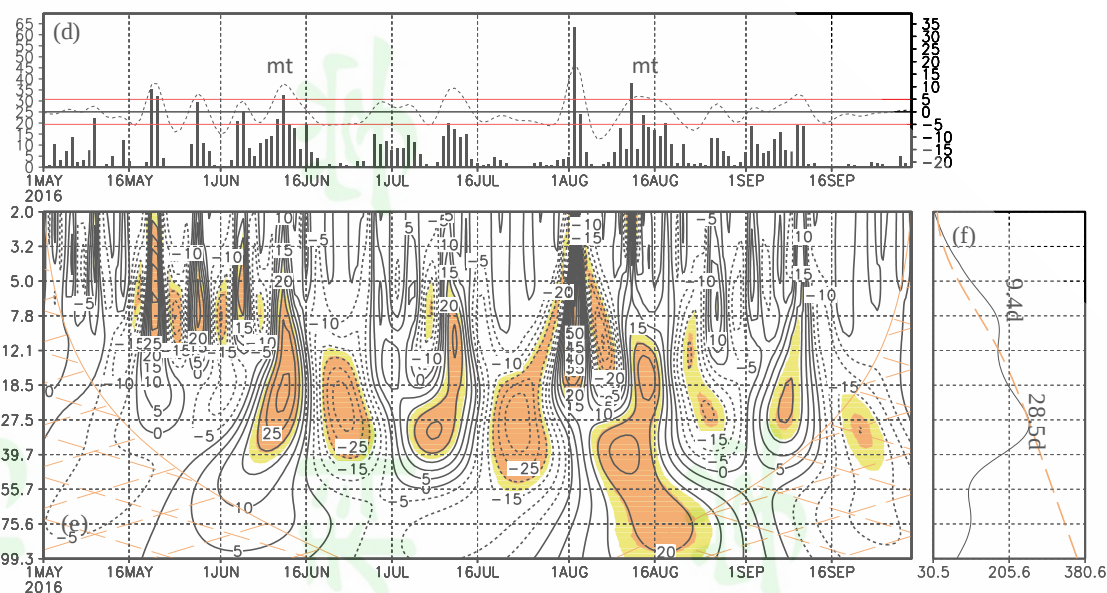


图 3 2002、2016 年 5~9 月广东 86 站 (a)、(d) 平均的逐日降水量 (左侧纵坐标, 柱状, 单位: mm)、5~25 d 滤波降水演变 (右侧纵坐标, 蓝色点虚线, 单位: mm), 平均逐日降水量的 (b)、(e) 墨西哥帽小波变换系数 (实、虚线表示正、负值), (c)、(f) 小波全谱 (实线)。图 1a、图 1d 中上下两条水平实线表示 5~25d 滤波降水的一倍标准差; 图 1b、图 1e 中浅色和深色阴影区表示通过 0.1 和 0.05 显著性水平的区域, 两侧的交叉区域表示边界效应的影响域; 图 1c、图 1f 中虚线为 0.05 显著性水平线。显著性检验采用了 Monte-Carlo 方法。

Fig. 3 (a, d) The daily precipitation (left y-axis, bars, units: mm) and 5–25 d filtered precipitation (right y-axis, blue dashed line, units: mm) averaged at 86 stations in Guangdong Province from May to September 2002 and 2016. (b, e) Mexican hat wavelet transform coefficient solid (dashed) line represent positive (negative) value and (c, f) global wavelet power spectrum (solid line) for daily mean precipitation. In Fig. 3(a, d) the upper and lower horizontal solid line indicate one standard deviation of 5–25 d filtered precipitation. In Fig.3 (b, e) the light (dark) shadings represent the regions with statistical significance at 0.1 (0.05) levels, based on the Monte-Carlo method; the cross-hatched regions at both ends indicate the areas with boundary effects. In Fig.3 (c, f) the dashed line represents statistical significance at the 0.05 level, based on the Monte-Carlo method.

5 (强) 西南季风型季风槽暴雨过程准双周振荡的环流演变

由于在 30°N 以南无明显的风向辐合、占总个例的 54.1% 的 (强) 西南季风型 (图 1a, I 类) 导致的季风槽暴雨过程在预报中较难把握且主要具有 10~24 天的准双周振荡, 而 (强) 西南季风辐合型 (II 类)、东南季风扰动型 (III 类)、热带气旋远离/消散型 (IV 类) 在 30° N 以南的江南~华南或在南海北部~华南具有明显的气旋性环流 (图 1), 在预报中相对容易把握且个例较少。因此, 我们主要对 (强) 西南季风型季风槽暴雨过程在准双周振荡不同位相的原始及其低频大气环流场进行了合成分析, 以了解 (强) 西南季风型季风槽暴雨过程大气环流场的演变特征, 为今后结合中期或次季节-季节 (Sub-seasonal to Seasonal, S2S) 数值预报产品, 做好 (强) 西南季风型季风槽暴雨过程的中期与延伸期预报提供参考。

多数学者通过分析研究对象的主要周期, 并把其作为选取滤波时间尺度的主要依据 (毛江玉和吴国雄, 2005; 陈官军和魏凤英, 2012; 孔晓宇等, 2017)。由前面的分析可知, 广

东夏季季风槽暴雨过程主要具有10~24d的准双周振荡, 其次还具有5~8 d的准单周振荡。因此采用5~25天滤波开展后续工作。

首先对1961~2017年逐年5~9月广东86站平均逐日降水进行5~25天的滤波(图3), 然后分别选取了表1中(强)西南季风型(I类)具有准双周振荡且在逐日降水5~25天滤波曲线中波峰振幅 ≥ 1 倍标准差的26次典型季风槽暴雨过程个例。将每次循环分为5个位相(图4): 位相1、5为波谷, 位相3为波峰, 位相2与4为转换位相。将各类循环过程1~5个位相对应日期的原始与5~25天滤波的200 hPa风场与高度场或散度场、500 hPa风场与高度场、850 hPa风场与涡度场及海平面气压场分别进行合成, 可得到图5~图7。它们反映了(强)西南季风型季风槽暴雨从降水的间歇~开始~旺盛~减弱~结束期的大气环流场演变特征。

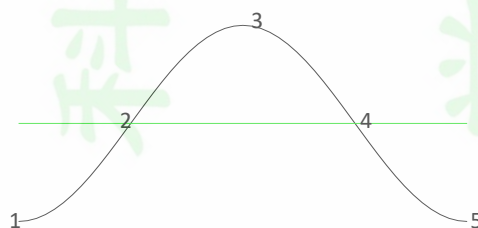


图4 准双周振荡的5个位相。

Fig. 4 Five phases of quasi-weekly oscillation.

5.1 200hPa 环流场

200hPa 低频风场与高度场(图5)上, 位相1, 中高纬度从欧洲西部到东北亚存在相间排列的“反气旋~气旋”低频波列。从位相1到位相3, 该波列从欧亚大陆逐渐向东向南传播, ($45^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{E}$)附近的欧洲东部、($45^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$)附近的东北亚由低频气旋式环流逐渐转为低频反气旋式环流控制, 巴尔喀什湖~贝加尔湖~我国中东部大部分地区由低频反气旋式环流逐渐转为低频气旋式环流控制, 青藏高原附近低频反气旋逐渐减弱南压西退到华南沿海~南海北部~印度, 并在印度北部形成低频反气旋中心。低纬度, 华南高空由青藏高原低频反气旋环流东南部和东海附近的低频气旋环流西南部的强东北风控制, 逐渐转为华北~江南低频气旋式环流底部逐渐增强的强偏西风与印度半岛~孟加拉湾~中南半岛~南海西北部低频反气旋外围强西北风控制, 强偏西风与西北风在广东上空呈喇叭口张开状, 使高空辐散逐渐增强并达到最强(图5g), 降水从无转为开始并逐渐达到鼎盛期。位相4(图5d), 随着中高纬度欧亚波列继续东移南压, 印度半岛北部的低频反气旋环流西北移到伊朗高原附近, 南海中北部海面转为低频气旋式环流控制, 华南沿海高空转为青藏高原东部反气旋式环流东南侧与南海低频气旋式环流外围的弱东北风控制, 降水减少。

200hPa 流场与散度场(图5e~g)上, 从位相1到位相3, 随着中高纬度从欧洲西部到东北亚呈相间排列的“反气旋~气旋”低频波列的东南传播, 乌拉尔山以西的欧洲东部、东北亚由长波槽转为高压脊控制, 东亚沿岸由长波脊逐渐转为长波槽控制且槽底可达江南, 副热

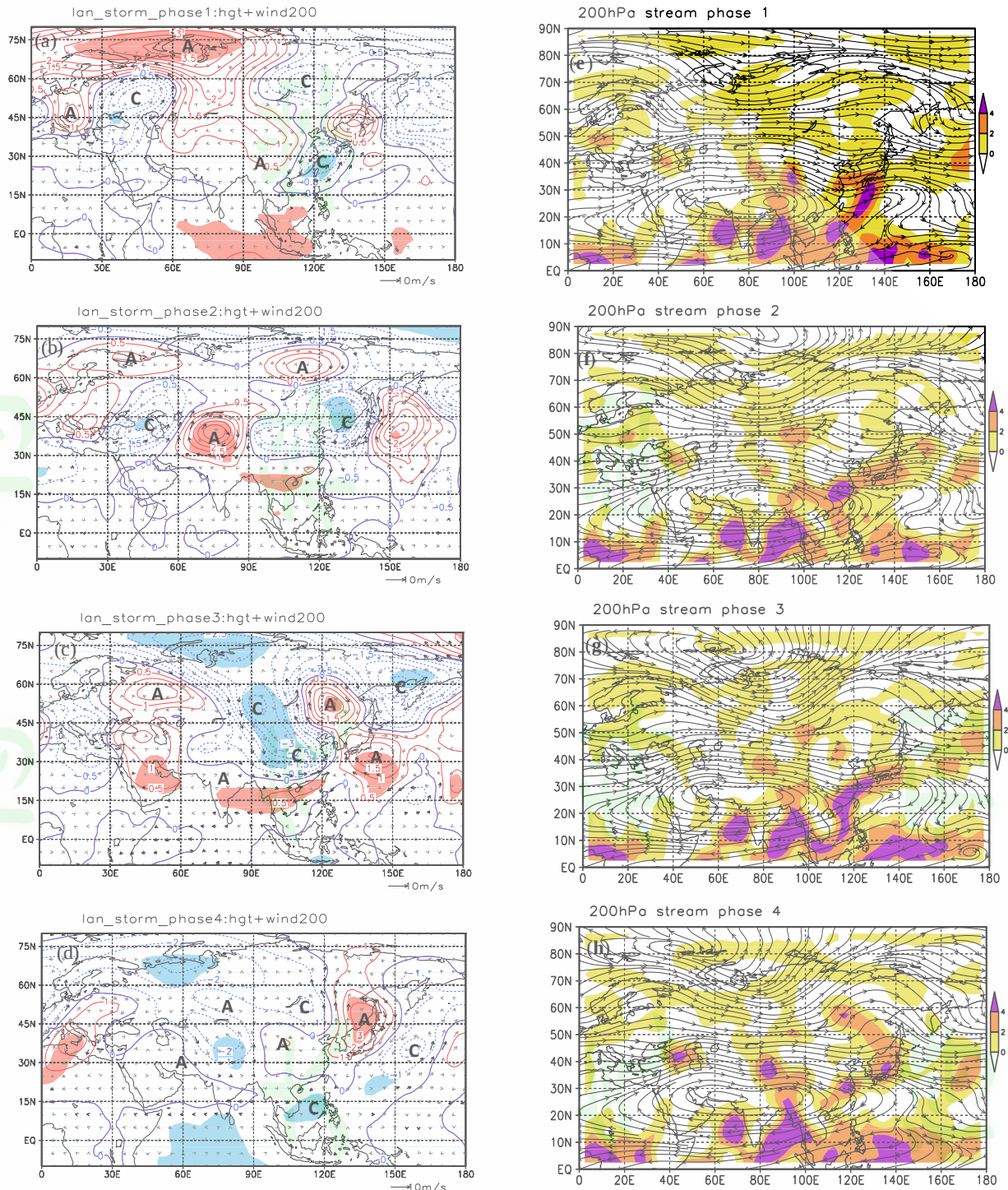


图5 广东夏季(强)西南季风型季风槽暴雨过程5~25天滤波200hPa低频位势高度场(单位: dagpm, 实、虚线分别代表正、负值, 阴影区代表通过0.05显著性水平检验)与低频风场(单位: m/s, 黑色表示达到0.05显著性水平的风场, “A”和“C”分别代表异常反气旋和异常气旋)(a-d)及其未滤波的200hPa流场与散度场(阴影, 单位: 10^{-6}s^{-1})(e-h)位相1~4的合成场分布。

Fig. 5 (a-d) The composite 5–25-day filtered 200-hPa low-frequency geopotential height (unit: dagpm, solid lines indicate positive values, dashed lines indicate negative values, and shadings represent passing 0.05 significance level) and low-frequency wind field (unit: m/s, black arrows represent passing 0.05 significance level, letters A and C represent the anomalous anticyclone and anomalous cyclone, respectively), and its unfiltered 200-hPa wind and divergence field (shading, unit: 10^{-6}s^{-1})(e-h) during a quasi-biweekly oscillation from phases 1 to 4 for monsoon trough rainstorm process caused by (strong) southwest monsoon type in Guangdong in summer.

带西风急流出口由长江口附近逐渐南压到江南～华南，使江南～华南的上空的偏西风-西北风气压梯度逐渐加强且在广东上空呈喇叭口张开状，有利于广东高空的辐散增强（图 5g），并在位相 3 时达到最强，降水也达到鼎盛期。同时，南亚高压逐渐西移，其中心从位相 1 的 (25°N, 92°E) 逐渐西移北上到位相 3 的 (26°N, 70°E) 附近，即南亚高压中心从青藏高原南侧的孟加拉国逐渐西移到青藏高原以西的印度西北部附近。这与已有的实例分析“南亚高压的每一次东西振荡都与西风带的长波调整有关”（朱乾根等，2007）一致，与陈见等（2015）分析得到的季风槽暴雨明显过程对应南亚高压中心从孟加拉湾北部向印度半岛挺进也基本一致。位相 4（图 5h）上，南亚高压中心西北移到巴基斯坦附近，东北亚高压脊加强东移并南扩到朝鲜～日本附近，东亚沿岸的长波槽减弱北收，华南上空转为南亚高压脊东南侧的东北气流控制且辐散减弱，降水减弱。

由上面的分析可见，伴随着中高纬度从欧洲西部到东北亚呈相间排列的“反气旋～气旋”低频波列的东南传播，（强）西南季风型季风槽降水由无转为强盛期，巴尔喀什湖～贝加尔湖～我国东部地区由低频反气旋环流逐渐转为低频气旋环流或高空槽控制，华南北侧为强的低频气旋式环流控制，印度半岛～孟加拉湾～中南半岛～南海西北部为低频反气旋控制，这种环流形式与魏蕾等（2017）研究未区分不同类型的华南夏季 12～30d 持续强降水得到的“华南北侧（22°～45°N，95°～130°E）区域强大的低频气旋式环流和孟加拉湾～中国南海一带的低频反气旋式环流相互配合，使华南高层处于强大的辐散环境中”虽然相似，但季风槽暴雨过程强盛期华南北侧的高层低频气旋环流主要位于巴尔喀什湖～贝加尔湖～我国东部地区（25°～40°N，100°～120°E），存在两个低频气旋中心：巴尔喀什湖～贝加尔湖、华北～江南，它们使南亚高压由孟加拉国向印度西北部挺进。因此，（强）西南季风型季风槽暴雨过程鼎盛期的高层低频环流场不同于未分类的华南夏季持续强降水的高层低频环流场。

5.2 500hPa 环流场

500hPa 低频高度场与风场（图 6a～d）上，从位相 1 到位相 4，中高纬度从欧洲西部到东北亚也存在相间排列的“反气旋～气旋”低频波列的东南向传播，低频反气旋、气旋及位势高度场的正、负值中心分布与 200 hPa 基本一致，具有相当正压结构。低纬度，菲律宾东南的热带西太平洋存在低频气旋的西北向传播。位相 1 时，菲律宾及其以东的热带西太平洋为强大的低频反气旋控制，南海中部经巴士海峡到台湾～东海～日本西南存在低频气旋性环流，华南为低频反气旋式环流控制，降水偏少。从位相 2～位相 3，随着菲律宾东南的热带西太平洋低频气旋式环流生成并逐渐加强西北移，菲律宾及其以东的热带西太平洋转为

明显的低频气旋环流控制,南海中北部海面~孟加拉湾转为从菲律宾及其以东的热带西太平洋逐渐加强西伸北抬的低频反气旋环流控制。华南上空由青藏高原附近低频反气旋环流东南侧与东北亚~华北~长江流域低频气旋式环流西南侧的弱西北~偏北气流与正距平控制(图 6b),逐渐转为热带西太平洋~南海~孟加拉湾的低频反气旋环流北缘的强偏西-西南风控制,并在四川盆地~江南~华南形成强的低频气旋式环流(图 6c),降水达到鼎盛期。另外,从位相 2~位相 3, (25°N, 155°E)附近的热带西太平洋低频反气旋环流中心也西北移到(30°N, 140°E)附近的副热带西太平洋,使东北亚、日本以南的西太平洋均为反气旋式环流控制,形成了明显的高压坝(图 6c),使江南~华南的低频气旋式环流移动缓慢,有利于暴雨的维持。(强)西南季风型季风槽暴雨对应东北亚为低频反气旋性环流,与刘慧斌等(2012)研究东北冷涡指数((40°~50°N、120°~130°E)区域平均 500hPa 位势高度)夏季 10~30 天振荡最高位相时华南降水偏多一致,但季风槽暴雨在中低纬度的环流配置尤其在江南~华南、南海北部~台湾~菲律宾北部及其以东的西太平洋海面分别对应低频气旋、反气旋环流,与其有明显不同。位相 4,随着菲律宾以东的热带西太平洋的低频气旋式环流继续加强西北移,其北侧热带西太平洋~南海北部的低频反气旋环流也进一步北抬,控制广东大部,降水减弱。另外,从位相 2 到位相 4,随着菲律宾东南的西太平洋低频气旋式环流加强西伸北抬到菲律宾以东的热带西太平洋~南海中南部,热带西太平洋的低频反气旋环流也逐渐加强北抬,在位相 4 时与东移南压的东北亚低频反气旋合并加强并有明显的北跳,这与黄荣辉和孙凤英(1994)研究得到的“菲律宾周围对流活动加强后 10 天左右,副热带高压位置北跳”基本一致。

500hPa 原始位势高度场上(图 6e~h),从位相 1~位相 3,中高纬度,欧洲东部~乌拉尔山以西、东北亚由高空槽转为明显的高压脊控制,巴尔喀什湖~贝加尔湖附近由高压脊逐渐转为明显的高空槽控制,华北及其以南的我国东部大部分地区也由高压脊转为明显的高空槽及负距平控制。中低纬度,588dagpm 等高线从 130°E 以东的西太平洋逐渐加强西伸到巴士海峡附近,其南侧 586dagpm 等高线从南海南部~赤道以北的热带西太平洋逐渐北抬,其西北侧的 584 dagpm 等高线从江南逐渐南压到华南北部,我国西南~江南~华南由高压脊逐渐转为明显的高空槽与负距平控制,东北亚~华东沿海~日本南部为高压脊控制,形成明显的高压坝,有利于西南~江南~华南高空槽的维持与缓慢东移。(强)西南季风型季风槽暴雨鼎盛期的大气环流形势,与何立富等(2016)总结的强西南急流型“中高纬度地区多为两脊一槽型,槽区位于贝加尔湖地区。中低纬度华西地区到西南地区有西风槽,南海副高主体偏东,脊线在 16°N 附近”的中高纬度环流较一致,但季风槽强盛期副高位置比其明显

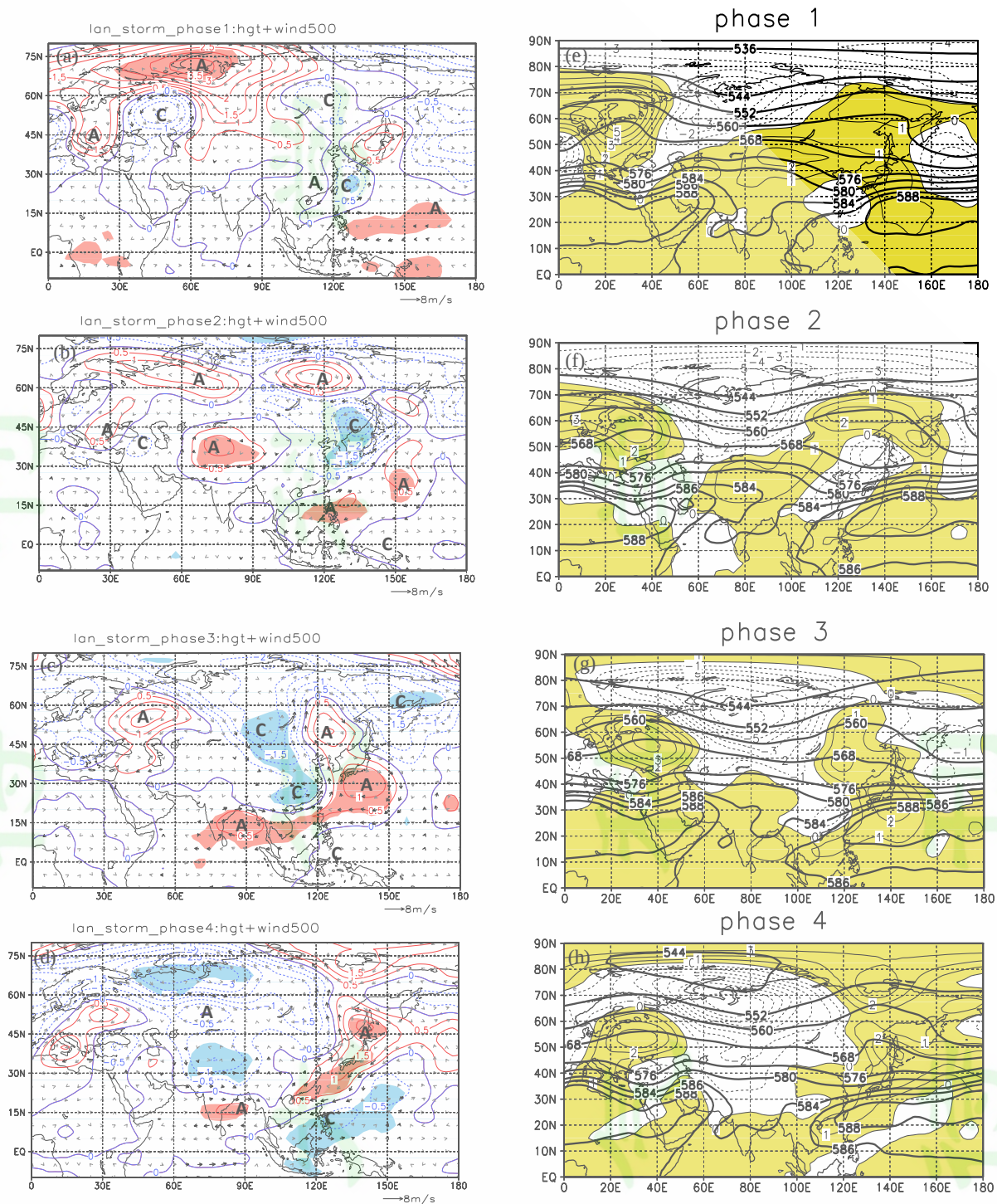


图6 同图5, 但为5-25天滤波的500hPa低频位势高度场(单位: dagpm, 实、虚线分别代表正、负值, 阴影区代表通过0.05显著性水平检验)与低频风场(单位: m/s, 黑色表示达到0.05显著性水平的风场)(a-d)及其未滤波的500hPa位势高度场(黑色粗实线, 单位: dagpm)与距平场(黑色细线, 阴影区为正距平, 单位: dagpm)(e-h)位相1~4的合成场分布。

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for composite 5-25-day filtered 500-hPa low-frequency geopotential height (unit: dagpm, solid lines indicate positive values, dashed lines indicate negative values, and shadings represent passing 0.05 significance level) and low-frequency wind field (unit: m/s, black arrows represent passing 0.05 significance level, Letters A and C represent the anomalous anticyclone and anomalous cyclone, respectively) (a-d), and their unfiltered geopotential height (bold solid lines, units: dagpm) and anomalies (black thin lines, shadings represent positive anomalies, units: dagpm) (e-h) during a quasi-biweekly oscillation from phases 1 to 4.

偏北。与黄忠等（2005）得到的季风槽暴雨期间 500hPa 常见的环流形势“即四川盆地到我国东部沿海有西风槽或低涡活动”一致。他们的研究还指出，高空槽作用使中国西南和华南地区低层高度场降低，使季风槽向北推进。位相 4，副高加强西伸北抬到粤东以东海面，584 dagpm 等高线北抬到长江流域，586 dagpm 等高线北抬控制广东大部，广东上空转为明显的高压脊控制，降水减弱。

因此，随着欧亚大陆具有准正压性、呈相间排列的“反气旋～气旋”低频波列的东南向传播和菲律宾东南的热带西太平洋低频气旋的西北向传播，欧洲东部、东北亚由高空槽转为高压脊控制，西太平洋副高逐渐加强西伸到巴士海峡附近，巴尔喀什湖～贝加尔湖、我国西南～江南～华南由低频反气旋或高压脊控制逐渐转为低频气旋或高空槽控制，并维持西低东高的环流形势，使南海季风槽北上并维持，也使季风槽降水从间歇转为开始并达到旺盛期。当欧亚大陆低频波列继续向东南传播，菲律宾以东的低频气旋式环流继续西北传播并控制南海中南部海面，副高西伸加强北抬，南海北部～广东大部转为低频反气旋外围环流或高压脊控制，降水减弱。

5.3 850hPa 环流场

850hPa 低频风场与涡度场（图 7a～d）上，从位相 1 到位相 4，中高纬度从欧洲西部到东北亚也存在相间排列的“反气旋～气旋”低频波列的东南向传播，低频反气旋、气旋的中心分布与中高层也基本一致，但强度较弱。低纬度，也存在与 500hPa 一致的菲律宾东南的热带西太平洋低频气旋的西北向传播。位相 1，菲律宾以东的热带西太平洋为反气旋式环流控制，南海中部与东北部～巴士海峡～台湾及其东北的热带西太平洋为低频气旋式环流与正涡度控制，华南为低频反气旋式环流与负涡度控制，降水偏少。从位相 2 到位相 3，随着菲律宾东南的赤道以北 135°E 附近西太平洋低频气旋性环流的生成并逐渐加强西北移控制菲律宾以东的西太平洋，菲律宾以东低频反气旋逐渐加强西伸北到南海中北部～孟加拉湾，使位相 1 时位于南海中部～巴士海峡～台湾及其东北的热带西太平洋的低频气旋环流与正涡度即季风槽逐渐加强北抬，华南上空逐渐转受来自西太平洋～南海中北部～孟加拉湾低频反气旋北缘的强低频西南风控制，并受东北亚、日本及其以南西太平洋低频反气旋环流的阻挡在长江流域转向为偏东～东北气流，使华南～江南上空的气旋式环流与正涡度逐渐增强并达到最强，降水开始并逐渐达到鼎盛。位相 4，随着菲律宾以东的西太平洋低频气旋式环流的进一步加强北抬，西太平洋～南海～孟加拉湾的低频反气旋与负涡度也进一步北抬控制广东大部，降水减弱。

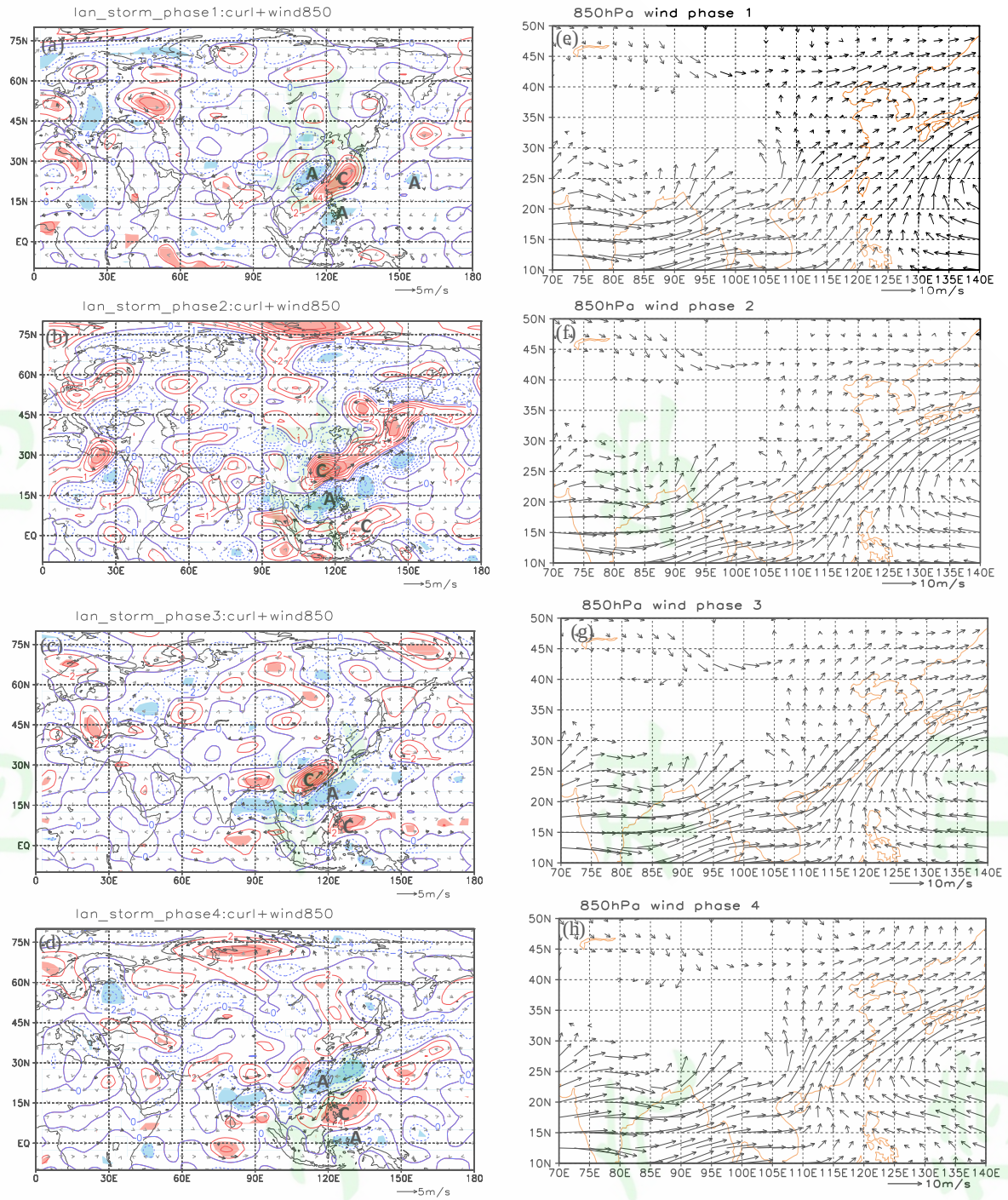


图7 同图5, 但为5~25天滤波的850hPa低频风场(单位: m/s, 黑色表示达到0.05显著性水平的风场, “A”和“C”分别代表异常反气旋和异常气旋)与涡度场(单位: 10^{-6} s^{-1}) (a-d) 及其未滤波的850hPa风场(e-h) (单位: m s^{-1}) 位相1~4的合成场分布。

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for composite 5–25-day filtered 850-hPa low-frequency wind (unit: m/s, black arrows represent passing 0.05 significance level, Letters A and C represent the anomalous anticyclone and anomalous cyclone, respectively) and vorticity field (unit: 10^{-6} s^{-1}) (a-d), and their unfiltered 850-hPa wind field (unit: m s^{-1}) (e-h) during a quasi-biweekly oscillation from phases 1 to 4.

850hPa 风场上（图 7 e~h），从位相 1 到位相 3，菲律宾以东的热带西太平洋反气旋环流逐渐加强西伸到巴士海峡附近，北部湾~南海中北部偏西海面的季风槽也逐渐北抬加强。来自孟加拉湾穿过中南半岛到达华南的西南风逐渐加强并在位相 3 时达到最强，强的西南风在 110°E 以东的华南~江南形成明显的风速辐合与弱的气旋式弯曲，广东处在该气旋式弯曲东南侧的强西南风急流带中，降水由无转为开始并逐渐达到强盛，造成明显的强西南风季风槽暴雨过程。位相 4，随着热带西太平洋反气旋环流继续加强西伸控制广东中东部地区，季风槽降水减弱。

5.4 海平面气压场

低频海平面气压场（图略）上，中高纬度，从位相 1 到位相 4，欧亚大陆正、负距平及其中心的分布与 200hPa、500hPa、850hPa 低频反气旋与气旋中心分布基本一致但强度较弱，具有一定的准正压性。从位相 1 到位相 3，菲律宾以东的热带西太平洋低频正距平逐渐加强西北移到南海中北部海面，北部湾~华南沿海~江南由正距平逐渐转为以北部湾-广西-广东西部为负距平中心的低频场控制。

海平面气压场（图略）上，从位相 1 到位相 3，我国东部~华南大部分地区由弱均压场逐渐转为北部湾向北伸展的闭合低压控制，南海中北部~广西由弱转为强东南~西北气压梯度。这种降水强盛期的海平面气压分布与黄忠等（2005）分析得到季风槽暴雨期的平均海平面气压场在北部湾有向北伸展的低压区一致。位相 4，北部湾附近的低压槽减弱消失，广东大部转为弱的均压场控制，降水减弱。

从上面的分析可见，（强）西南季风型季风槽暴雨从降水间歇~开始~旺盛~减弱期低频信号的来源及大气环流场的演变特征可归纳为：

在（强）西南季风型季风槽暴雨从间歇~开始~鼎盛~减弱期的生命史中，低频信号不仅来源于中高纬度从欧洲西部到东北亚具有准正压性、呈相间排列的低频“反气旋~气旋”波列的东南向传播，还来源于中低层菲律宾以东的热带西太平洋低频气旋的西北向传播，它们使南亚高压从孟加拉国逐渐西北移到巴基斯坦附近，西太平洋副高从 130°E 以东的西太平洋逐渐加强西伸北抬到粤东沿海。中高层巴尔喀什湖~贝加尔湖~我国中东部地区由间歇期的低频反气旋式环流或高压脊逐渐转为鼎盛期的低频气旋式环流或高空槽控制，低层南海中北部低频气旋式环流逐渐加强北抬控制江南~华南。这种中高纬度具有准正压性、呈相间排列的“反气旋~气旋”低频波列的东南向传播与菲律宾以东的热带西太平洋低频气旋的西北向传播及大气环流场的配置，与魏蕾等（2017）得到的“华南夏季 12~30d 持续性强降水，高层的低频信号来源于两支相互交织、共同传播低频罗斯贝波列（波列 1 为从巴伦支海

附近以及俄罗斯中部～亚洲西部～日本海～白令海附近呈东西向低频波列，波列 2 为从巴伦支海～亚洲西部～青藏高原及其北～华南北侧呈西北～东南向低频波列）的东南向传播，低层的低频信号来源于热带西太平洋和中国南海～菲律宾海一带低频振荡的西北向传播，同时伴随着西太平洋副热带高压明显的西伸东退过程”有所不同；与李春晖等（2017）研究华南季风持续性暴雨的前期和同期热带中东太平洋异常海温持续偏暖导致的“高空西风急流位置偏北，激发“-、+、-”的 EAP 遥相关型波列，暴雨发生的关键是 10～20 天季节内振荡导致系统由东南向西北传播”也有所不同。

当华南高层（200hPa）由青藏高原低频反气旋环流东南部和东海附近的低频气旋环流西南部的强东北风控制，逐渐转为巴尔喀什湖～贝加尔湖～华北低频气旋环流底部逐渐增强的强偏西风与印度半岛～孟加拉湾～南海北部低频反气旋外围强西北风控制，强偏西风与强西北风交汇在华南高空，使高空辐散逐渐增强并达到最强。中低层（500hPa～850hPa），华南由高压环流或高压脊控制逐渐转受来自西太平洋～南海中北部～孟加拉湾低频反气旋北缘逐渐增强的低频强西南风控制，并受东北亚、日本及其以南西太平洋低频反气旋环流的阻挡，在西南～江南～华南上空形成强的气旋性环流与正涡度，地面由弱均压场逐渐转为北部湾向北伸展加强的闭合低压控制，季风槽北抬并增强，降水由无转为开始并达到鼎盛期。当高层东亚沿岸长波槽东移减弱，华南转为青藏高原东南低频反气旋外围的弱西北风与南海低频气旋性环流外围弱东北风控制，中低层菲律宾东侧低频气旋性环流继续西北移控制菲律宾以东的西太平洋～南海中南部，副高加强西伸北抬，华南转为高压环流或高压脊控制，地面北部湾低压减弱，降水减少。

另外，在（强）西南季风型季风槽暴雨从降水间歇～开始～强～减弱的整个过程中，南亚高压逐渐西行，副高逐渐加强西伸北抬。强盛期的水汽主要来自菲律宾～南海～孟加拉湾低频反气旋性环流北侧强西南风的输送，与魏蕾等（2017）得到的“华南夏季 12～30d 持续强降水的整个过程中，对应副高先西伸后东撤收缩，水汽主要来自中国南海”有所不同。对比林爱兰等（2015）研究由冷空气和高空槽导致的广东 6 月降水持续异常的环流分布可知，虽然（强）西南季风型季风槽暴雨从高层（200hPa）到低层（850hPa）中高纬度对应的环流异常分布相似，但由于季风槽暴雨强盛期对应应在低纬度菲律宾以东的西太平洋有较强的低频气旋性环流或热带对流存在且位置偏北，使中低层低频反气旋性环流可达孟加拉湾～南海中北部～华南沿海，华南～江南从低层（850hPa）到中层（500hPa）均受此低频反气旋性环流北缘从孟加拉湾穿过中南半岛到达广东的强低频西南风控制，高层（200hPa）广东为强西风与西北风异常之间的气流辐散区域，这与他们得到的“华南在高层 200hPa 处于偏西风和西

南风异常之间的气流辐散区域、中层（500hPa）副高位于南海中部，低层（850hPa）广东为异常的偏北风与偏南风交汇导致的辐合”有明显的不同。因此，华南夏季不同性质的强降水，其伴随的大气环流演变特征及其高低层的环流配置是不同的，有必要细分不同性质的强降水来研究其环流演变特征，对具体的业务预报才有指导意义。

6 准双周振荡波列触发季风槽暴雨的物理过程

上述分析表明，在（强）西南季风型季风槽暴雨从间歇-开始-鼎盛-减弱期的生命史中，低频信号不仅来源于中高纬度从欧洲西部到东北亚具有准正压性、呈相间排列的“反气旋-气旋”低频波列的东南向传播，还来源于中低层菲律宾东南的热带西太平洋低频气旋的西北向传播。为了探究来自不同纬度的准双周振荡波列触发季风槽暴雨的物理过程，图 8 给出（强）西南季风型季风槽暴雨准双周振荡 5~25 d 滤波位相 1~4 的风场、垂直速度、位势高度和涡度沿着 $110^{\circ}\sim 117.5^{\circ}\text{E}$ 经度带平均的纬度-气压合成剖面图。可见，位相 1（图 8a）， $40^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 的我国东部 400hPa 以上的对流层中高层与中低层分别主要为位势高度负、正距平控制，从对流层低层~高层存在弱的下沉运动与偏北风异常。在 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 的长江流域-淮河流域的中低层存在弱的位势高度负异常、弱的上升运动及正涡度异常，对流层中高层为明显的偏北风异常。在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 的华南-长江流域以南的对流层中低层为位势高度正距平与负涡度异常控制，位势高度正距平可达 3dagpm 以上，存在明显的下沉运动。这是由于 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 的我国东部对流层中高层为高空槽后或反气旋性环流前部控制（图 5a, 图 6a），长江流域-淮河流域在中、低层分别东亚大槽底部、气旋性环流控制，华南为低频反气旋环流或副热带高压脊控制所致（图 6a, 图 7a）。另外，在 $0\sim 10^{\circ}\text{N}$ 的赤道-南海南部为位势高度正距平控制，存在弱的偏南风异常与下沉运动，在南海中部 15°N 附近从对流层低层~中高层存在弱的偏南风与偏北风的汇合及弱的上升运动，它们由南海南部为低频反气旋式环流控制、南海中部为低频气旋式环流或季风槽控制所导致（图 6a, 图 7a）。从位相 2~位相 3（图 8b、c）可见，位相 1 时位于 30°N 以北的位势高度负距平逐渐南扩到南海北部-华南沿海并维持，使广东上空从对流层低层到高层均转为位势高度负距平控制。另外，位相 1 时位于 35°N 以北的偏北风异常与下沉运动也逐渐南压到长江流域附近，并与江南附近的上升运动形成弱的次级垂直环流圈。这是由于欧亚大陆低频波列的东南传播，导致巴尔喀什湖~贝加尔湖~我国中东部-华南地区转为低频气旋环流或高空槽控制、东北亚~日本以南的西太平洋为低频反气旋性环流控制（图 5c, 图 6c, 图 7c）所致。另外还可见，低纬度，从位相 1~位相 3，赤道~南海南部的位势高度正距平逐渐北抬到 20°N 附近，南海中部 15°N 附近的上升运动也逐渐加强北抬控制广东大部，南海中南部逐渐转为明显的下沉运动且逐渐北抬到南

海中部 15°N 附近,并在对流层从高层到低层形成了南海中部下沉、广东上升且为强西南风控制的垂直季风环流圈(图 8c)。这是由于菲律宾东南的热带西太平洋低频气旋的西北向传播,导致西太平洋~南海低频反气旋环流即副高逐渐加强西伸北抬(图 6b~c, f~g),南海中部低频气旋性环流即季风槽也北抬,华南上空逐渐转受来自西太平洋~南海中北部~孟加拉湾低频反气旋或副高北缘的强西南风及低频气旋性环流或季风槽控制(图 7b~c, f~g)所致。由于广东处在南、北两个垂直环流圈的上升运动汇合区,且位相 3 时 850~500hPa 偏南风异常与垂直上升运动及绝对涡度均达到最强(图 8c),使季风槽暴雨达到最强。位相 4,南海北部~广东~长江流域均转为位势高度正距平与下沉运动(图 8d),季风槽降水减弱。这是由于菲律宾以东的低频气旋式环流继续西北移动并控制南海中南部海面,副高西伸加强北抬,南海北部~广东~长江流域转为低频反气旋外围环流控制(图 6d~h, 图 7d~h)所致。因此,由于从欧洲西部到东北亚具有准正压性、呈相间排列的“反气旋~气旋”低频波列的东南向传播及中低层菲律宾东南的热带西太平洋低频气旋的西北向传播,使中纬度的位势高度负距平逐渐南传到南海北部,导致广东处于来自低纬度季风环流圈与中纬度次级垂直环流圈上升运动的汇合区,且在位相 3 时对流层中低层偏南风异常与垂直上升运动及绝对涡度均达到最强,使季风槽暖区暴雨开始并逐渐达到最强。

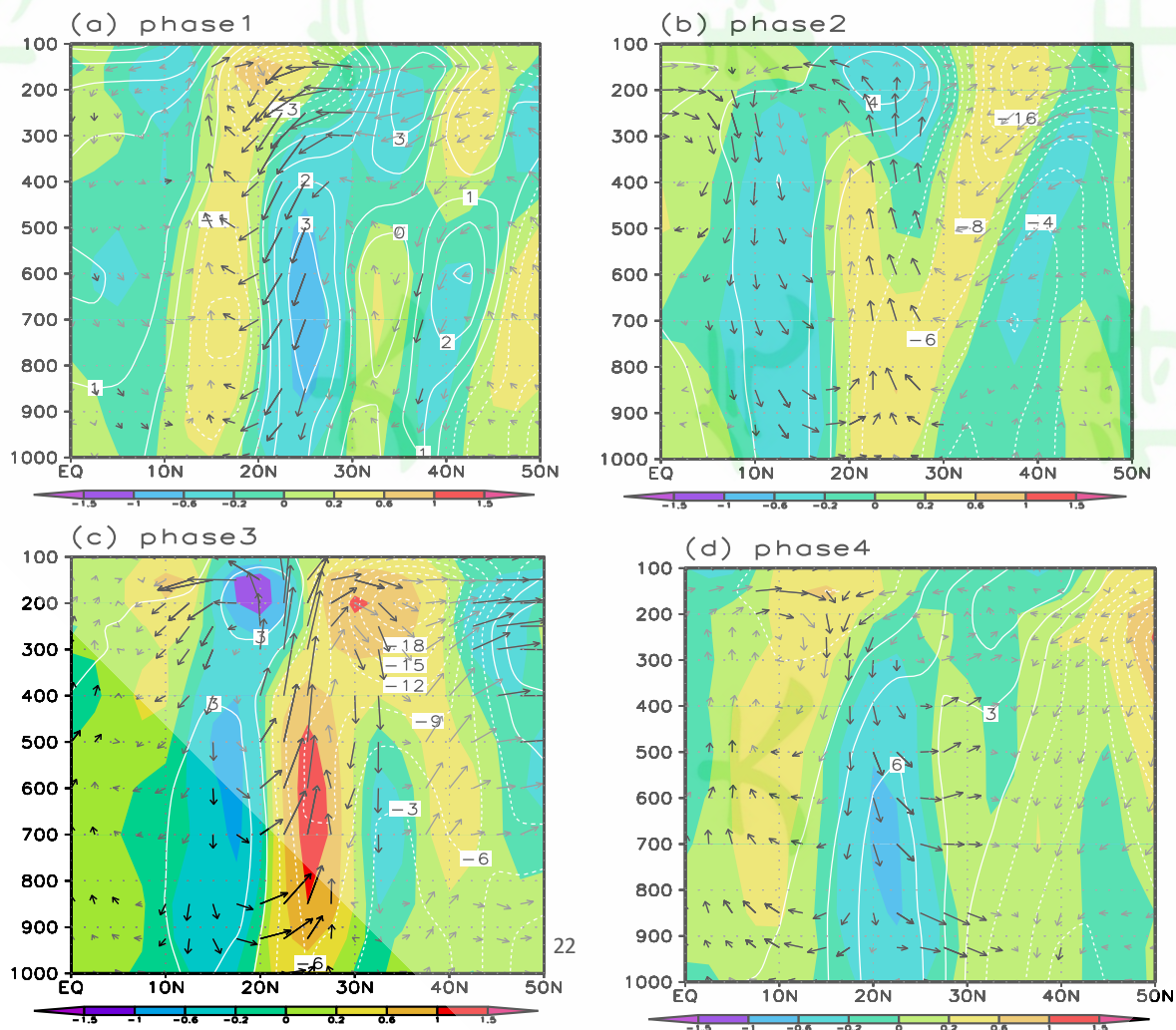


图8 同图5，但为5~25 d 滤波的风场（经向风，单位： ms^{-1} ）和垂直速度（单位： $-10^{-2} \text{Pa s}^{-1}$ ）组成的矢量，黑色箭头表示经向风或垂直速度分量通过信度为95%的显著性检验）、涡度（填色场，单位： 10^{-6}s^{-1} ）和位势高度场（等值线，实（虚）线表示位势高度正（负）异常，单位：gpm，间隔为10 gpm）沿着 $110^{\circ}\sim 117.5^{\circ}\text{E}$ 经度平均的纬度—气压合成剖面。

Fig. 8 Same as Fig. 5, but for composite pressure–latitude cross sections ($110^{\circ}\sim 117.5^{\circ}\text{E}$ mean) of composite 5–25-day filtered wind (vectors composed by meridional wind (unit: ms^{-1}) and vertical velocity (unit: $-10^{-2} \text{Pa s}^{-1}$), black arrows denote that the Anomalous meridional wind or vertical velocity components are statistically significant at the 95% confidence level), vorticity (shaded, unit: 10^{-6}s^{-1}), and geopotential height (contours, the interval is 10 gpm; solid (dashed) contours refer to positive (negative) anomalies) during a quasi-bi weekly oscillation from phases 1 to 4.

另外，我们也分析了 II ~ IV 类季风槽暴雨从间歇~开始~鼎盛~减弱不同位相环流演变及其动力机制。结果表明，除 II 类在低纬度从非洲-孟加拉湾-青藏高原南侧还存在一支自西向东传播的南支波列，不同类型的三类季风槽暴雨在中高纬度均存在欧亚大陆低频波列的东南向传播及低层菲律宾东南的热带西太平洋~南海低频波列的西北向传播。虽然不同类型季风槽在不同位相气旋、反气旋位置有所不同，但在位相 3 即季风槽暴雨鼎盛期在巴尔喀什湖-贝加尔湖以南及华南地区均为低频气旋性环流控制，且在位相 3 时偏南风异常与垂直上升运动及绝对涡度均达到最强，导致季风槽暴雨的发生。由于不同纬度低频波列的传播，使不同类型的暴雨发生前（即位相 1 和位相 2）高空环流特征有所不同，从而使鼎盛期（位相 3）亚洲~南海低频气旋、反气旋及西太平洋副热带高压与 584dagpm 等高线的位置不同（图 6e、g，图 9c、f，图 10c、f，图 11c、f），导致不同类型鼎盛期季风槽暴雨的发生：

I 类，500hPa 位势高度场上（图 6e-g），位相 1-2，随着欧洲西部高压脊的逐渐东移，欧洲东部-乌拉尔山、贝加尔湖以东的高空槽也逐渐东移南压，使巴尔喀什湖-贝加尔湖由高压脊转为弱的高空槽控制，青藏高原及其以西由弱脊转为明显的高压脊控制，我国东部的华北-长江流域、日本由高压脊转为东亚槽控制。低纬度，江南-华南北部也由高压脊转为弱的高空槽控制，副高从 130°E 以东的西太平洋逐渐加强西伸到台湾西南-菲律宾东北部海面。位相 3，巴尔喀什湖~贝加尔湖、四川盆地~江南~华南转为明显的高空槽（低频气旋）控制，我国东北~朝鲜~日本、日本以南的西北太平洋~南海中北部~孟加拉湾东部分别为高压脊（低频反气旋）、加强西伸的副高控制，584dagpm 等高线位于华南北部。

850hPa 风场上（图 7e-g），从位相 1 到位相 3，菲律宾以东的热带西太平洋反气旋环流逐渐加强西伸到巴士海峡附近，北部湾~南海中北部偏西海面的季风槽也逐渐北抬加强。来自孟加拉湾穿过中南半岛到达华南的西南风逐渐加强并在位相 3 时达到最强，强的西南风在 110°E 以东的华南~江南形成明显的风速辐合与弱的气旋式弯曲，广东处在该气旋式弯曲东南侧的强西南风急流带中，降水由无转为开始并逐渐达到强盛，造成明显的强西南风季风槽暴雨过程。

II类, 500hPa 高度场上(图 9a-c), 从位相 1~2, 随着欧洲东部~乌拉尔山及其以东高空槽加深东移南压, 巴尔喀什湖附近由高压脊转为高空槽控制, 巴尔喀什湖-贝加尔湖附近的高压脊减弱南压到蒙古高原及其以南, 贝加尔湖及其以东~我国东部大部分地区由高压脊转为高空槽控制。青藏高原也由高压脊转为高空槽控制。中低纬度, 高原槽江南~华南北部也由高压脊转为东亚深槽的槽底控制, 584dagpm 等高线由长江流域南压到南岭附近, 586dagpm 等高线北缘从华南南压到南海中部。副高主体由 130°E 附近的西太平洋东退到 140°E 附近。位相 3, 里海以东~巴尔喀什湖~贝加尔湖以南转为明显的高空槽(低频气旋)控制、四川盆地~江南~华南也转为东移的高原槽及南压的东亚槽控制, 贝加尔湖、华东~朝鲜~日本转为高压脊(低频反气旋)控制, 副高主体东退到 145°E 以东的西太平洋, 584dagpm 等高线位于华南沿海, 但 586dagpm 等高线南缘北抬东退到南海中部, 使南海中北部~菲律宾北部为副热带高压脊(低频反气旋)控制。

850hPa 风场上(图 9d-f), 从位相 1~2, 长江流域~江南由偏南风转为华北反气旋底部的偏东北~偏东风控制, 并与来自孟加拉湾穿过中南半岛到达华南逐渐加强的西南风, 在广西~贵州~湖南形成明显的气旋性弯曲, 使季风槽从南海中部北抬到华南。位相 3, 长江流域转为华东~朝鲜~日本反气旋环流底部的偏东风控制, 并与来自孟加拉湾穿过中南半岛继续加强北抬控制华南-江南的西南风, 在江南~华南形成明显的气旋性环流, 使季风槽加强并达到最强, 降水达到鼎盛期。

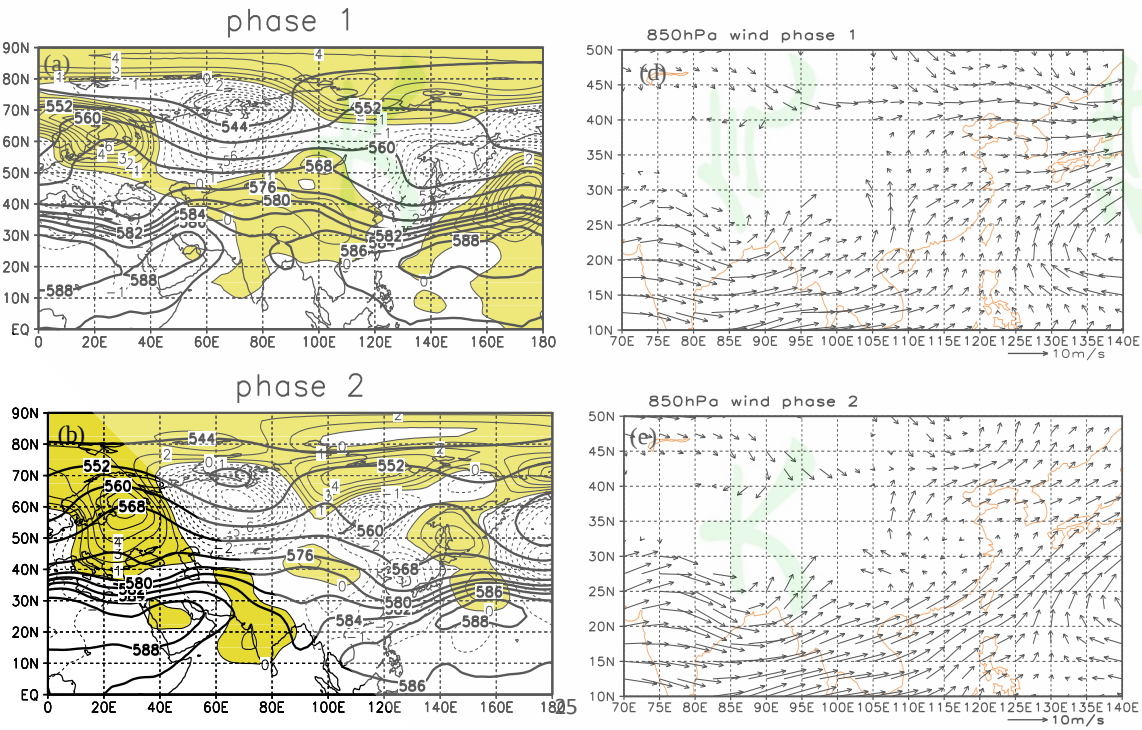
III类, 500hPa 高度场上(图 10a-c), 从位相 1~2, 随着里海西北~乌拉尔山西南、巴尔喀什湖东北的高空槽东移南压, 中西伯利亚高原及其以南的高压脊也东移南压, 里海及其以北转为加深的高空槽及明显的负距平控制, 巴尔喀什湖东南~贝加尔湖~内蒙古高原由高压脊转为高空槽控制, 东北亚由高空槽转为高压脊控制。中低纬度, 584dagpm 等高线从长江流域南压到华南北部, 华南由大陆副高控制转为从青藏高原东部东移南压的高空槽控制。西太平洋副高主体从 160°E 以东的西太平洋加强西伸到 155°E 以东的西太平洋, 586dagpm 等高线也从 150°E 加强西伸北抬到 128°E 附近。位相 3, 里海以北-乌拉尔山东南为明显的高压脊控制, 里海以东~巴尔喀什湖及其以南的青藏高原西部、华北、江南~华南~南海北部均为高空槽(低频气旋)控制, 我国东北~朝鲜~日本~东海~黄海~长江流域中下游为高压脊(低频反气旋)控制, 副高主体位于东海以东的西北太平洋, 584dagpm 等高线位于长江流域以北, 586dagpm 等高线可达华东沿海-菲律宾北部。

850hPa 风场上(图 10d-f), 随着长江流域~东海的气旋性环流与渤海~黄海~日本的反气旋环流的东移南压, 华南由南海~华南的反气旋环流外围的偏南风控制, 转为一致的来

自孟加拉湾穿过中南半岛～南海转向、具有明显风速辐合的西南风控制，降水开始。另外，在粤东～台湾东南～菲律宾东北的热带西太平洋有弱的季风槽生成。位相 3，华南转为来自孟加拉湾穿过中南半岛～南海转向的东南风及加强西伸的副高边缘东南风控制，季风槽加强北抬控制广东，降水达到鼎盛期。

IV类，500hPa 高度场上（图 11a-c），从位相 1～2，中高纬度的环流以纬向环流为主。随着乌拉尔山-巴尔喀什湖的高空槽与贝加尔湖及其以东高压脊的东移南压，巴尔喀什湖南-贝加尔湖西南由高压脊转为高空槽控制，东北平原～日本南部由高空槽转为高压脊控制。中低纬度，西太平洋副热带高压脊（586dagpm 等高线）从 125°E 以东的西太平洋加强西伸到我国东部沿海及南海中南部，使热带气旋登陆华南沿海，并与长江流域以北的高空槽迭加，使 584dagpm 等高线从长江流域南压到华南沿海。位相 3，巴尔喀什湖～贝加尔湖以南、长江流域～华南转为高空槽（低频气旋）控制，我国东北～日本～黄海为高压脊（低频反气旋）控制。副高主体位于 130°E 以东的热带西太平洋，副热带高压脊（586dagpm 等高线）西伸到华南沿海～中南半岛南部，584dagpm 等高线最南可达华南沿海。

850hPa 风场上（图 11d-f），从位相 1～2，来自孟加拉湾穿过中南半岛的西南风加强北抬，江南～华南由反气旋环流转为从华南沿海～南海东北部～台湾东南的热带西太平洋加强北抬的气旋性环流控制。位相 3，来自孟加拉湾穿过中南半岛的西南风继续加强北抬，并在华南～长江流域及其以北形成明显的气旋性弯曲，使季风槽加强并达到最强，广东降水也达到鼎盛期。



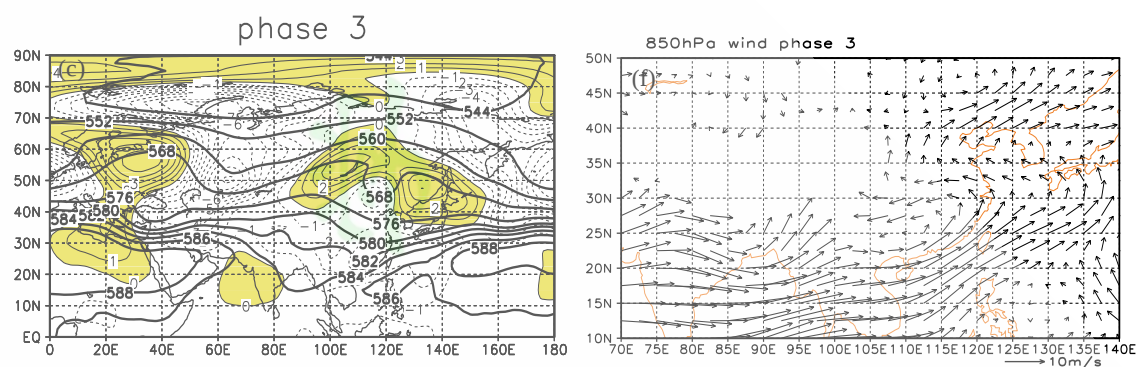


图9 (强)西南季风辐合型(II类)季风槽暴雨过程 500hPa 位势高度场(左,黑色粗实线,单位: dagpm)与距平场(黑色细线,阴影区为正距平,单位: dagpm)及其850hPa 风场(右,单位: m s^{-1})位相1~3的合成场分布。

Fig. 9 The 500-hPa geopotential height (bold solid lines, units: dagpm) and anomalies (black thin lines, shadings represent positive anomalies, units: dagpm)(a-c), and the 850-hPa wind field (unit: m/s)(d-f) during a quasi-biweekly oscillation from phase 1 to 3 for monsoon trough rainstorm process caused by (strong) southwest monsoon convergence (type II).

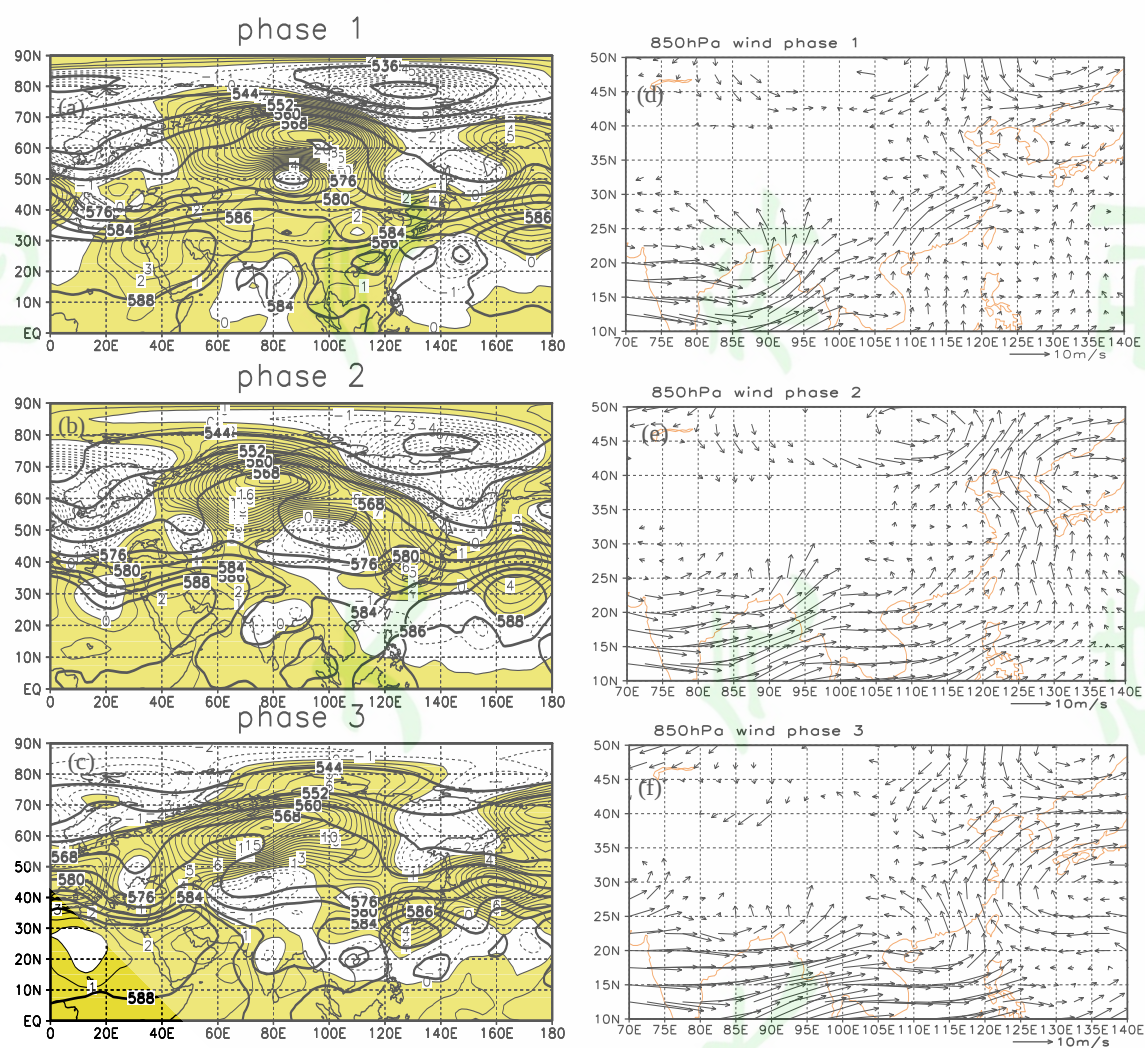


图10 同图9, 但为东南季风扰动型(III类)季风槽暴雨过程。

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for monsoon trough rainstorm process caused by southeast monsoon disturbance (type III).

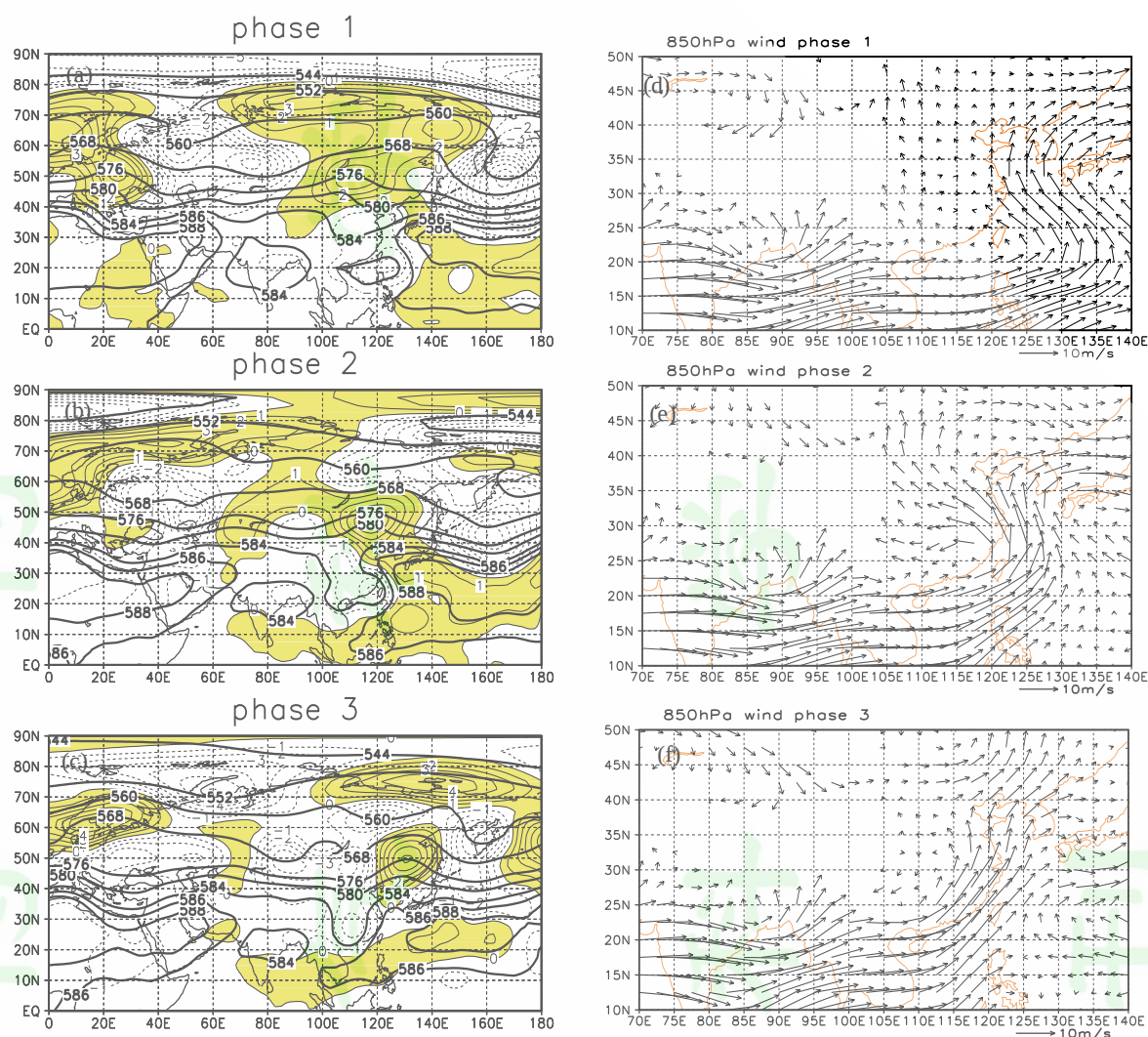


图11, 同图9, 但为热带气旋远离/消散型(IV类)季风槽暴雨过程。

Fig. 11 Same as Fig.9, but for monsoon trough rainstorm process caused by tropical cyclone away/dissipation (type IV).

7、结论

本文利用NCEP/NCAR逐日环流、广东逐日降水、登陆中国的热带气旋等资料, 结合广州逐日气温、气压、绝对湿度等资料及逐日东亚海平面气压场的变化, 排除有冷空气影响后, 确定了1961~2017年没有与锋系联系在一起、由单一南海季风槽影响导致的季风槽暴雨过程并对其进行分类, 分析了不同类型季风槽暴雨的时空分布及其与大气低频振荡的关系, 重点探讨了业务预报中容易漏报的(强)西南风型季风槽暴雨过程不同位相的大气环流演变特征及低频信号的来源与机制, 可得到以下结论:

(1) 将夏季季风槽暴雨过程分为4类:(强)西南季风型、(强)西南季风辐合型、东南季风扰动型、热带气旋远离/消散型, 它们分别占总个例的 54.1%、17.6%、9.5%、18.9%, 暴雨的极大值中心主要出现在广东沿海的两大暴雨中心(阳江~阳春~恩平、海丰~陆丰~汕尾)及珠江口两侧,(强)西南季风型还出现在广东的另一个暴雨中心(龙门~佛岗)。(强)

西南季风型与（强）西南季风辐合型主要出现在 6 月，热带气旋远离/消散型主要出现在 7～8 月。

（2）广东夏季季风槽暴雨过程主要存在 10～24 天的准双周振荡，其次还存在 5～8 天的准单周振荡，少数年份还存在 32～65 天的季节内振荡。

（3）在（强）西南季风型季风槽暴雨从间歇～开始～鼎盛～减弱期的生命史中，低频信号不仅来源于中高纬度从欧洲西部到东北亚具有准正压性、呈相间排列的“反气旋～气旋”低频波列的东南向传播，还来源于中低层菲律宾东南的热带西太平洋低频气旋的西北向传播，它们使南亚高压从孟加拉国逐渐西北移到巴基斯坦附近，西太平洋副高从 130°E 以东的西太平洋逐渐加强西伸北抬到粤东沿海，中高层巴尔喀什湖～贝加尔湖～我国中东部地区由间歇期的低频反气旋式环流或高压脊逐渐转为鼎盛期的低频气旋式环流或高空槽控制，低层南海中北部低频气旋式环流逐渐加强北抬控制江南～华南。

（4）当华南高层由青藏高原低频反气旋式环流东南侧的强东北风逐渐转为华北～江南低频气旋式环流底部逐渐增强的强偏西风与印度半岛～孟加拉湾～南海西北部低频反气旋外围的强西北风控制，强偏西风与强西北风交汇在华南高空，使高空辐散逐渐增强并达到最强。中低层由低频反气旋式环流或高压脊控制逐渐转受来自南海中北部～孟加拉湾低频反气旋北缘的强西南风控制，并受东北亚、日本及其以南西太平洋低频反气旋式环流的阻挡，在我国西南～江南～华南上空形成强的低频气旋式环流与正涡度，地面由弱均压场逐渐转为北部湾向北伸展加强的闭合低压控制，南海季风槽北抬并增强，使（强）西南季风型季风槽暴雨从无转为开始并达到鼎盛期。它们可为（强）西南季风型季风槽暴雨的中期～延伸期预报提供参考。

（5）由于欧亚大陆具有准正压性、呈相间排列的“反气旋～气旋”低频波列的东南向传播及中低层菲律宾东南的热带西太平洋低频波列的西北向传播，使中纬度的位势高度负距平逐渐南传到南海北部，导致广东处于来自低纬度季风环流圈与中纬度次级垂直环流圈上升运动的汇合区，且在暴雨鼎盛期对流层中低层偏南风异常与垂直上升运动及绝对涡度均达到最强，使（强）西南季风型季风槽暖区暴雨开始并逐渐达到最强。

由于不同类型季风槽暴雨的前期环流演变特征不同，使鼎盛期亚洲～南海低频气旋、反气旋及西太平洋副热带高压与 584dagpm 等高线的位置存在差异，导致不同类型鼎盛期季风槽暴雨的发生。

致谢 衷心感谢两位审稿专家给出的宝贵修改意见！

参考文献(References)

- Briegleb L M, Frank W M, 1997. Large-scale influences on tropical cyclogenesis in the western North Pacific[J]. Mon. Wea. Rev., 125, 1397 - 1413.
- Cao X, Li Tim, Peng M, et al. 2014. Effects of monsoon trough intraseasonal oscillation on tropical cyclogenesis over the Western North Pacific[J]. J Atmos. Sci., 71 (9) : 4639-4660.
- 陈红, 郭冬艳, 吴俞, 等. 2022. 两类季风槽特征及海南岛的强降水机制[J]. 热带生物学报, 13(4): 348-357. Chen Hong, Guo Dongyan, Wu Yu, et al. 2022. Analysis of the characteristics of two different types of monsoon trough and mechanisms of heavy rainfall over Hainan Island[J]. J. Trop. Biology (in Chinese), 13(4): 348-357
- 陈官军, 魏凤英, 姚文清, 等. 2017. 基于低频振荡信号的中国南方冬半年持续性低温指数延伸期预报试验[J]. 气象学报, 75(3) : 400-414. Chen Guanjun, Wei Fengying, Yao Wenqing, et al. 2017. Extended range forecast experiments of persistent winter low temperature indexes based on intra-seasonal oscillation over southern China[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(3) : 400-41
- 陈见, 梁维亮, 高安宁, 等. 2015. 华南季风槽暴雨特征分析[J]. 热带气象学报, 31(4): 536-548. Chen Jian, Liang Wei-liang, Gao An-ning, et al. 2015. Analysis on features of monsoon trough rainstorms in South China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 31(4): 536-548.
- 陈翔翔, 丁治英, 刘彩虹, 等. 2012. 2000-2009年5、6月华南暖区暴雨形成系统统计分析[J]. 热带气象学报, 28(5): 707-718. Chen Xiangxiang, Ding Zhiying, Liu Caihong, et al. 2012. Statistic analysis on the formation system of warm-sector heavy rainfall in May and June from 2000-2009 [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 28(5): 707-718.
- 丁治英, 刘彩虹, 沈新勇. 2011. 2005-2008年5、6月华南暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析[J]. 热带气象学报, 27(3): 307-316. Ding Zhiying, Liu Cai hong, Shen Xin yong, 2011. Statistical analysis of the relationship among warm sector heavy rainfall, upper and lower tropospheric jet stream and South Asia High in May and June from 2005 to 2008[J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 27 (3) : 307-316.
- Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions [J]. J Applied Meteorology, 18(8): 1016-1022.
- Feng T, Yang X J, Sun X G, et al. 2020. Reexamination of the climatology and variability of the Northwest Pacific monsoon trough using a daily index[J]. J. Climate, 33: 5919-5938.
- Fu S M, Zhang J P, Luo Y L, et al. 2022. Energy paths that sustain the warm-sector torrential rainfall over South China and their contrasts to the frontal rainfall: A case study[J]. Adv. Atmos. Sci., 39 (9) : 1519-1535.
- 高建芸, 张秀芝, 江志红, 等. 2008. 西北太平洋季风槽异常与热带气旋活动[J]. 海洋学报, 30(3) : 35 -47. Gao Jianyun, Zhang Xiuzhi, Jiang Zhihong, et al. 2008. Anomalous western North Pacific monsoon trough and tropical cyclone activities[J]. Acta Oceanol. Sinica (in Chinese), 30(3) : 35 -47.
- 谷德军, 纪忠萍. 2011. 2008年广东龙舟水与准10天振荡[J]. 热带气象学报, 27(1): 11-21. Gu Dejun, Ji Zhongping. 2011. The strong dragon-boat precipitation of Guangdong in 2008 and quasi-10-day oscillation [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 27(1): 11-21.
- 广东省气象资料室编. 1987. 广东气候[M]. 广州: 广东科技出版社, 102-103, 337-363. Data Office of Guangdong Meteorological Bureau, 1987. Guangdong Climate (in Chinese)[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 102-103, 337-363.
- GUO B Y, GE X Y. 2018. Monsoon trough influences on multiple tropical cyclones events in the western North Pacific[J]. Atmospheric Science Letters, 19(9): e851.
- 何立富, 陈涛, 孔期. 2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 559-569. He Lifu, Chen Tao, Kong Qi. 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 27(5): 559-569.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学, 18(2) : 141-151. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18(2) : 141-151.
- 黄荣辉, 皇甫静亮, 武亮, 等. 2016. 关于西北太平洋季风槽年际和年代际变异及其对热带气旋生成影响和机理的研究[J]. 热带气象学报, 32(6) : 767 -785. Huang Ronghui, HuangFu Jingliang, Wu Ling, et al. 2016. Research on the interannual and interdecadal variabilities of the monsoon trough and their impacts on tropical cyclone genesis over the western north Pacific[J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 32(6) : 767 -785.
- 黄士松, 李真光, 包澄澜, 等. 1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社, 227-228. Huang Shisong, Li Zhenguang, Bao Chenglan, et al. 1986. Torrential rain in the subsequent first rainy season in South China (in Chinese) [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 227-228.
- 黄忠, 张东, 林良勋. 2005. 广东后汛期季风槽暴雨天气形势特征分析[J]. 气象, 31(9): 19-24. Huang Zhong, Zhang Dong, Lin Liangxun. 2005. Synoptic Analysis of heavy rain related to monsoon trough in the latter flood season of Guangdong[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31(9): 19-24.
- Huang Q J, Guo B Y, Ge X Y. 2022. Simulations on multiple tropical cyclones event associated with monsoon trough over the western North Pacific[J]. Meteorological Applications, 29(6): e2104.
- 纪忠萍, 谷德军, 孙广凤, 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.
- 纪忠萍, 源艳芬, 徐艳虹, 等. 2021. 2019年广东前汛期连续暴雨与大气季节内振荡的联系[J]. 大气科学, 45(3): 588-604. Ji Zhongping, Yuan Yanfen, Xu Yanhong, et al. 2021. The Relationship between continuous rainstorms and atmospheric intraseasonal oscillation during the First Rainy Season in Guangdong in 2019 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 588-604.
- 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.
- 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.
- Lander M A, 1996. Specific tropical cyclone track types and unusual tropical cyclone motions associated with a reverse-oriented monsoon trough in the western North Pacific[J]. Wea. Forecasting, 11, 170 - 186.

- Lau K M , Weng H Y. 1995. Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 76(12) : 2391 – 2402
- 李崇银, 潘静. 2007.南海夏季风槽的年际变化和影响研究[J]. 大气科学, 31(6): 1049–1058. Li ChongYin, Pan Jing. 2007. The interannual variation of the South China Sea summer monsoon trough and its impact[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31(6): 1049–1058.
- 李春晖, 吴志伟, 蒙伟光, 等. 2017. 影响华南后汛期季风持续性暴雨和热带气旋持续性暴雨的大尺度环流背景分析[J]. 热带气象学报, 33(1): 11–20. Li Chunhui, Wu Zhiwei, Meng Weiguang, et al. 2017. Compare analysis characteristics of impact of large scale circulation on the persistent heavy rains in post-flood season in south China associated with monsoon and tropical cyclone [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 33(1): 11–20.
- Li C F, Lu R Y, Chen G H, 2017. Promising prediction of the monsoon trough and its implication for tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Environ. Res. Lett.*, 12, 074027
- Li H, Ge X Y, Peng M , et al. 2022. The influences of monsoon trough on the relative motion of binary tropical cyclones[J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 100(5), 729–749.
- Li X Q , Du Y, 2021. Statistical relationships between two types of heavy rainfall and low-level jets in South China[J]. *J. Climate*, 33: 8549–8566.
- 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等. 2015. 广东 6 月持续性暴雨期间的大气环流异常[J]. 气象学报, 87(5): 803–818. Lin Ailan, Gu Dejun, Li Chunhui, et al. 2015. Anomalous atmospheric circulation characteristics of the sustained torrential rainfall over Guangdong in June [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 73(5): 803–818.
- 刘慧斌, 温敏, 何金海, 等. 2012. 东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响[J]. 大气科学, 36 (5): 959–973. Liu Huibin, Wen Min, He Jinhai, et al. 2012. Characteristics of the Northeast cold vortex at intraseasonal timescale and its impact [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36(5): 959–973.
- 刘瑞鑫, 孙建华, 陈鲍发. 2019. 华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J]. 大气科学, 43 (1): 119–130. Liu Ruixin, Sun Jianhua, Chen Baofa. 2019. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 43(1): 119–130.
- 刘瑞鑫, 孙建华, 傅慎明. 2021. 不同类型华南暖区暴雨过程的环流特征[J]. 气候与环境研究, 26(4): 359–373. Liu Ruixin, Sun Jianhua, FU Shenming. 2021. Comparison of synoptic circulation characteristics in different types of warm-sector heavy rainfall events over South China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 26(4): 359–373.
- 卢山, 吴乃庚, 薛登智. 2008. 南海季风槽影响下热带气旋暴雨增幅的研究[J]. 气象, 34 (6) : 53–59. Lu Shan, Wu Naigeng, Xue Dengzhi. 2008. Research on the enhancement of tropical cyclone rainstorm influenced by monsoon trough of South China Sea[J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 34(6) : 53–59.
- 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.
- Miao C S, Yang Y Y, Wang J H, et al. 2018. A comparative study on characteristics and thermo-dynamic development mechanisms of two types of warm-sector heavy rainfall along the South China coast. *Journal of Tropical Meteorology*, 24, 494–507.
- 蒙伟光, 张艳霞, 袁金南, 等. 2014. 华南沿海2011年7月15–18日持续暴雨过程中的季风槽与中尺度对流系统相互作用[J]. 气象学报, 72(3): 508–525. Meng Weiguang, Zhang yanxia, Yuan Jinnan, et al. 2014. Monsoon trough and MCSs interactions during the persistent torrential rainfall event of 15–18 July 2011 along the South China coast[J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 72(3): 508–525.
- 蒙伟光, 张艳霞, 吴亚丽, 等. 2019. 季风槽环境中暴雨中尺度对流系统的分析与数值预报试验[J]. 气象学报, 77 (6) : 980–998. Meng Weiguang, Zhang yanxia, Wu Yali, et al. 2019. Analysis and numerical prediction experiment of rainstorm-producing MCSs in a monsoon trough environment. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 77(6): 980–998.
- Molinari J , Vollaro D, 2013. What percentage of western North Pacific tropical cyclones form within the monsoon trough? [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 499–505.
- Murakami T. 1987. Intraseasonal atmospheric teleconnection patterns during the Northern Hemisphere summer [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (9): 2133–2154.
- Ning Guicai, Luo Ming, Bi Xueyan, et al. 2023. Large-scale moisture transport and local-scale convection patterns associated with warm-sector heavy rainfall over South China[J]. *Atmospheric Research*, 285, 106637.
- 潘静, 李崇银. 2006. 夏季南海季风槽与印度季风槽的气候特征之比较[J]. 大气科学, 30(3) : 377–390. Pan Jing, Li Chong Yi. 2006. Comparison of climate characteristics between two summer monsoon troughs over the South China Sea and India[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30(3) : 377–390.
- 覃武, 刘国忠, 赖珍权, 等. 2020. 华南暖区暴雨预报误差及可预报性探讨[J]. 气象, 46(8): 1039–1052. Qin Wu, Liu Guozhong, Lai Zhenquan et al. 2020. Study on forecast errors and predictability of a warm-sector rainstorm in South China[J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 46(8): 1039–1052.
- 覃皓, 覃月凤, 吴玉霜, 等. 2024. 大气河背景下的广西暖区暴雨机理初探[J]. 高原气象, 43(2) : 381–397. Qin Hao, Qin Yuefeng, Wu Yushuang, et al. 2024. Study on the Mechanism of Warm-Sector Torrential Rain in Guangxi under Atmospheric Rivers Background [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 43(2): 381–397.
- 上海台风研究所, 编. 1984. 西北太平洋台风基本资料集(1949–1980) [M]. 北京: 气象出版社. Shanghai Typhoon Institute. 1984. Collection of basic data of typhoons for Northwest Pacific (1949–1980) (in Chinese) [M]. Beijing: Meteorological Press.
- Sun J H, Zhang Y C, Liu R X, et al. , 2019. A review of research on warm-sector heavy rainfall in China[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 36, 1299 – 1307.
- 谭锐志, 容广坝. 1991. 初夏华南两类季风槽的对比研究——1. 诊断分析[J]. 热带气象学报, 7(2): 49–59. Tan Ruizhi, Rong Guangxin. 1991. A comparative study for two kinds of monsoon trough over Southern China in early summer [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 7(2): 49–59.
- Torrence C , Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (1) : 61 – 78.
- Ueda H, Yasunari T, 1996. Maturing process of the summer monsoon over the western North Pacific: A coupled ocean/ atmosphere system[J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74(4), 493–508.
- 王荫桐, 彭洪. 1985. 初夏季风低槽活动与华南降水[J]. 热带气象, 1(4): 340–349. Wang Yintong, Peng Hong. 1985. The relationship between monsoon trough and precipitation in South China during Early Summer [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 1(4): 340–349.
- 王黎娟, 何金海, 管兆勇. 2006. 东亚副热带夏季风槽的气候特征及其与南海夏季风槽的比较[J]. 气象学报, 64(5): 583–593. Wang Lijuan, He Jinhai, Guan Zhaoyong. 2006. Climatological features of East Asian subtropical summer monsoon trough and its comparison with south China Sea summer monsoon trough [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 64(5): 583–593.

- 魏蕾, 房佳蓓, 杨修群. 2017. 华南夏季12-30 d 持续性强降水的低频特征分析[J]. 气象学报, 75(1):80-97. Wei Lei, Fang Jiabei, Yang Xiuqun. 2017. Low frequency oscillation characteristics of 12-30d persistent heavy rainfall over South China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(1):80-97.
- 韦统健. 1994. 华南前汛期暖区暴雨流场结构特征[J]. 热带气象学报, 10(1): 37-46. Wei Tongjian. 1994. The typical structure of the flow field in warm-sector heavy rain occurring in Southern China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 10(1): 37-46.
- 伍红雨, 杜尧东, 秦鹏. 2011. 华南暴雨的气候特征及变化[J]. 气象, 37(10):1262-1269. Wu Hongyu, Du Raodong, Qin Peng. 2011. Climate Characteristics and variation of Rainstorm in South China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37(10):1262-1269.
- Wu L, Wen Z P, Huang R H, et al. 2012. Possible linkage between the monsoon trough variability and the tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. Mon. Wea. Rev., 140, 140-150.
- Wu N G, Wen Z P, Deng W J, et al. 2020. Advances in warm-sector heavy rainfall during the first rainy season in South China [J]. Meteorol. Sci. Technol. 40, 605-661.
- Wu R G. 2002. Processes for the northeastward advance of the summer monsoon over the western North Pacific [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80(1), 67-83.
- 谢炯光, 纪忠萍, 谷德军, 等. 2006. 广东省前汛期连续暴雨的气候背景及中期环流特征[J]. 应用气象学报, 17(3): 354-362. Xie Jiongguang, Ji Zhongping, Gu Dejun, et al. 2006. The climatic background and medium-range circulation features of continuous torrential rain from April to June in Guangdong [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 17(3): 354-362.
- 谢炯光, 纪忠萍, 谷德军, 等. 2012. 广东省6月长连续暴雨过程的气候特征及成因[J]. 应用气象学报, 23(2): 174-183. Xie Jiongguang, Ji Zhongping, Gu Dejun, et al. 2012. Climate characteristics and cause of long continuous rainstorm process in June of Guangdong province [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 23(2): 174-183.
- 杨辉, 李崇银, 潘静. 2011. 一次引发华南大暴雨的南海季风槽异常特征及其原因分析[J]. 气候与环境研究, 16 (1) : 1-14. Yang Hui, Li Chongyin, Pan Jing. 2011. Cause and anomalous characteristics of the South China Sea monsoon trough producing heavy rainfall in South China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16(1) : 1-14.
- 张翔, 武亮, 皇甫静亮, 等. 2017. 西北太平洋季风槽的季节和年际变化特征及其与热带气旋生成大尺度环境因子的联系 [J]. 气候与环境研究, 22 (4):418-434. Zhang Xiang, Wu Liang, Huangfu Jingliang, et al. 2017. Seasonal and interannual variability of the western North Pacific monsoon trough and its relationship to large-scale environmental factors [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (4): 418-434.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法 (第四版) [M]. 北京: 气象出版社, 491pp. Zhu Qian gen, Lin Jin rui, Shou Shao wen, et al. 2007. Theories and Techniques of Synoptic Meteorology (The fourth edition) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 491pp.
- Zhang Jiuzheng, Zhan Ruifen, Wen Min. 2023. Influence of monsoon trough length on interannual variability of Northwest Pacific multiple tropical cyclone events [J]. Atmospheric Research. Volume 295, 107034. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107034>
- Zhang M R, Meng Z Y. 2019. Warm-sector heavy rainfall in Southern China and its WRF simulation evaluation: a low-level-jet perspective [J]. Mon. Wea. Rev., 147, 4461-4480.
- Zhang L, Ma X Y, Zhu S P, et al. 2022. Analyses and applications of the precursor signals of a kind of warm sector heavy rainfall over the coast of Guangdong, China [J]. Atmospheric Research, 280, 106425.
- Zhang Yanxia, Meng Weiguang, Huang Yanyan. 2024. Influence of cloud microphysical schemes on CMA-GD model prediction of a warm sector heavy rainfall in South China [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 106, 101463.
- Zong H J, Wu L G. 2015a: Re-examination of tropical cyclone formation in monsoon troughs over the western North Pacific [J]. Adv. Atmos. Sci., 32, 924-934.
- Zong H J, Wu L G. 2015b: Synoptic-scale influences on tropical cyclone formation within the western North Pacific monsoon trough [J]. Mon. Wea. Rev., 143, 3421-3433.