

纪忠萍,谷德军,高晓容,等,2026.准双周振荡对 2023 年 6 月广东连续暖区暴雨的影响[J].气象,52(5):566-579. Ji Z P, Gu D J, Gao X R, et al, 2026. The influence of quasi-biweekly oscillations on continuous warm-sector rainstorms in Guangdong in June 2023[J]. Meteor Mon, 52(5):566-579(in Chinese).

## 准双周振荡对 2023 年 6 月广东连续暖区暴雨的影响\*

纪忠萍<sup>1</sup> 谷德军<sup>2</sup> 高晓容<sup>3</sup> 徐艳虹<sup>4</sup> 李珊珊<sup>1</sup> 梁巧倩<sup>1</sup> 涂 静<sup>1</sup> 梁伟杰<sup>1</sup>

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

4 广东省气候中心,广州 510640

**提 要:** 采用小波分析、Lanczos 时间滤波器等方法,分析了广东 2023 年前汛期三次连续暴雨过程的低频振荡特征,重点揭示了发生在广东西北部强西南风连续暖区暴雨的平均环流场及其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。结果表明,三次连续暴雨主要存在 7~18 d 的准双周振荡,并处于准 30~60 d 季节内振荡的两次正位相背景中。6 月 22—26 日主要发生于广东西北部的强西南风连续暖区暴雨,中高纬度具有明显的“西阻”与“东阻”,广东西北部处在高原槽底部与西太平洋副热带高压边缘及低层西南季风大风轴的左侧、气旋性环流右侧。强西南风连续暖区暴雨过程从间歇-开始-鼎盛期,中高层的低频信号来自南支波列伊朗高原—青藏高原或以南具有斜压性的低频反气旋与气旋的东传南压,低层的低频信号来自蒙古高原东部低频反气旋与四川盆地—云贵高原以东逐渐加强的低频气旋的东移南压。它们使南亚高压中心逐渐东移,西太平洋副热带高压减弱东退,青藏高原由低频气旋转为反气旋环流控制,华北—华南由低频反气旋转为气旋环流控制。它们可为连续暖区暴雨的中期-延伸期预报提供参考。

**关键词:** 连续暖区暴雨,准双周振荡,环流特征,低频信号

**中图分类号:** P448, P466

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.022801

## The Influence of Quasi-Biweekly Oscillations on Continuous Warm-Sector Rainstorms in Guangdong in June 2023

Ji Zhongping<sup>1</sup> Gu Dejun<sup>2</sup> Gao Xiaorong<sup>3</sup> Xu Yanhong<sup>4</sup> Li Shanshan<sup>1</sup>  
Liang Qiaoqian<sup>1</sup> Tu Jing<sup>1</sup> Liang Weijie<sup>1</sup>

1 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510640

2 Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA/Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Academy of Meteorological Research, Guangzhou 510640

3 Tongzhou Meteorological Office of Beijing, Beijing 101100

4 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510640

**Abstract:** The low-frequency oscillation characteristics of continuous rainstorm processes in Guangdong during the pre-flood season in 2023 are analyzed by means of wavelet analysis and Lanczos temporal filter. The focus of this study is on revealing the mean atmospheric circulation field and its evolution characteristics in different phases of quasi-biweekly oscillations and the source of the low-frequency signals of the

\* 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)、国家自然科学基金项目(42365001)、粤港澳大湾区气象科技协同攻关项目(GHMA2025Y01)和广东省气象局科研项目(GRMC2023M28、GRMC2023M33、GRMC2024Q20)共同资助

2025 年 4 月 26 日收稿; 2026 年 1 月 20 日收修定稿

第一作者:纪忠萍,主要从事中长期天气预报与低频振荡研究. E-mail: jzp897@163.com

通讯作者:谷德军,主要从事季风、海气相互作用、延伸期预报与短期气候预测研究. E-mail: djg@gd121.cn

continuous warm-sector rainstorms with strong southwesterly winds in the northwest of Guangdong Province. The results show that the three continuous rainstorms exhibited a quasi-7–18 d periodic oscillation, located in the positive phase of two quasi-30–60 d intraseasonal oscillations. The continuous warm-sector rainstorms with strong southwesterly winds mainly occurred in the northwest of Guangdong in 22–26 June when there were stable “west blocking” and “east blocking” at the middle and high latitudes. During this period, the northwest of Guangdong was located at the bottom of the plateau trough and the edge of the western Pacific subtropical high at 500 hPa, and at the left side of southwest monsoon axis and the right side of the cyclonic circulations at 850 hPa. During the intermittent-start-peak period of the continuous warm-sector rainstorm processes with strong southwesterly winds, the low-frequency signals in the mid-to-upper levels originated from the southern branch wave train with the eastward propagation and southward extension of baroclinic low-frequency anticyclones and cyclones within or to the south of the Iranian Plateau and Qinghai-Xizang Plateau. The low-frequency signals in the lower levels arose from the eastward movement and southward extension of the eastern Mongolian Plateau low-frequency anticyclone and the progressively intensifying low-frequency cyclone east of the Sichuan Basin and Yunnan-Guizhou Plateau. They induced the center of South Asian high to move eastward gradually and the western Pacific subtropical high to weaken and retreat eastward. At the same time, the Qinghai-Xizang Plateau was controlled by low-frequency cyclonic circulation in intermittent periods and gradually became dominated by the low-frequency anticyclone circulation in the peak period, while North China and South China were controlled first by low-frequency anticyclone circulation in intermittent periods and then gradually by the low-frequency cyclonic circulation in the peak period. These findings could provide some references for medium-to-extended range forecasting of continuous warm-sector rainstorm.

**Key words:** continuous warm-sector rainstorm, quasi-biweekly oscillation, circulation characteristic, low-frequency signal

## 引言

2023年3月22日夜到26日夜,广东省出现了2023年首场大范围强对流和强降水天气,导致26日开汛,较常年偏早16 d。然而,开汛之前的2月中旬至3月中上旬,广东省以晴朗干燥天气为主,连续35 d无有效降水。开汛之后,4–5月广东省降水偏少,6月中下旬出现了两次“龙舟水”连续暴雨过程,尤其是6月22–26日,清远、韶关、江门和阳江等地出现了暴雨到大暴雨局部特大暴雨过程,造成严重的局地性洪涝灾害与经济损失。

季节内低频振荡一般指时间尺度大于7~10 d但小于90 d的准周期变化,它在天气气候的演变中扮演了重要角色,对阶段性、持续性异常/极端事件/高影响事件的发生具有重要作用(丁一汇和梁萍,2010;陈艳等,2021;谭赢等,2022;王熙乔等,2023;陈蔚等,2023),尤其是对暴雨期持续异常环流的形成和维持具有十分重要的作用(周兵和文继芬,

2007;张耀华等,2012;陈彩珠等,2016;臧钰歆等,2024)。数值模式产品是中期-延伸期业务预报的重要支撑之一, Kim et al(2018)研究表明, S2S(subseasonal-to-seasonal)模式对大尺度模态的预报技巧较高,但对灾害性/高影响天气的延伸期预报技巧较低(张可越等,2023)。因此,若能了解连续暴雨过程的低频振荡特征及其发生发展不同阶段的大气环流演变规律,就能结合中期、S2S数值预报产品对其进行预报,有助于做好连续暴雨过程的中期-延伸期预报,有利于防灾减灾。

华南前汛期暴雨可分为两类(黄士松等,1986;何立富等,2016):一类是由冷空气-锋面等西风带低值系统引起,另一类是影响严重但范围较小的暖区暴雨。暖区暴雨由于突发性强、地域性特征显著,是困扰预报业务人员的难点问题,也是近年的热点之一(何立富等,2016;谌芸等,2019;吴乃庚等,2020;付智龙等,2025)。虽然前人对华南汛期降水尤其是持续性强降水或连续暴雨过程与大气低频振荡的关系已开展一些研究(信飞等,2007;纪忠萍等,2010;

谷德军和纪忠萍,2011;章丽娜等,2011;简茂球和张春花,2013;林爱兰等,2016;魏蕾等,2017;孔晓宇等,2017;臧钰歆等,2024;刘遇等,2025),对华南暖区暴雨也开展不少研究(黄士松等,1986;丁治英等,2011;陈翔翔等,2012;何立富等,2016;Miao et al, 2018;覃武等,2020;刘瑞鑫等,2019;2021;叶朗明等,2021;孙璐等,2022;蒲义良等,2023;纪忠萍等,2021;2025;Fu et al,2022;Zhang and Meng,2019;Zhang et al,2022;Zhang et al,2024;覃皓等,2024;韦金逢等,2025),但针对广东连续暖区暴雨来研究其低频振荡特征,揭示暖区暴雨发生发展的环流场演变特征及低频信号来源的工作还相对较少。

广东省 2023 年前汛期从开始到结束,共出现了三次 3 d 以上的连续暴雨过程,分别为 3 月 23—25 日、6 月 14—16 日、6 月 22—26 日。目前业务预报常用的全球数值预报模式 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)细网格( $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ),除对开汛前后的暴雨有较好的中短期预报能力,对其他时段的暴雨过程在中短期预报时效内均存在落区不稳定或漏报的现象。2023 年南海夏季风于 5 月第 3 候爆发,较常年同期(5 月第 4 候)略偏早(支蓉等,2024)。那么,发生在南海夏季风爆发前后的 2023 年广东前汛期三次连续暴雨过程是何种性质的持续强降水? 具有怎样的低频振荡特征及低频信号的来源? 本文首先分析了 2023 年广东前汛期降水,尤其是连续暴雨过程与大气低频振荡的关系,其次对三次连续暴雨过程期间的冷空气活动进行了分析,最后对 6 月 22—26 日发生在广东西北部的强西南风连续暖区暴雨过程的平均环流场及其发生发展的环流演变特征和低频信号的来源进行了分析,以期对连续暖区暴雨的中期-延伸期预报提供参考。

## 1 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 2023 年 3 月 1 日至 6 月 30 日广东省 86 个站地面逐日降水、气压( $p$ )、温度( $T$ )、绝对湿度( $e$ )资料;(2)NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)逐日再分析资料( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ )(Kalnay et al,1996)。

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。

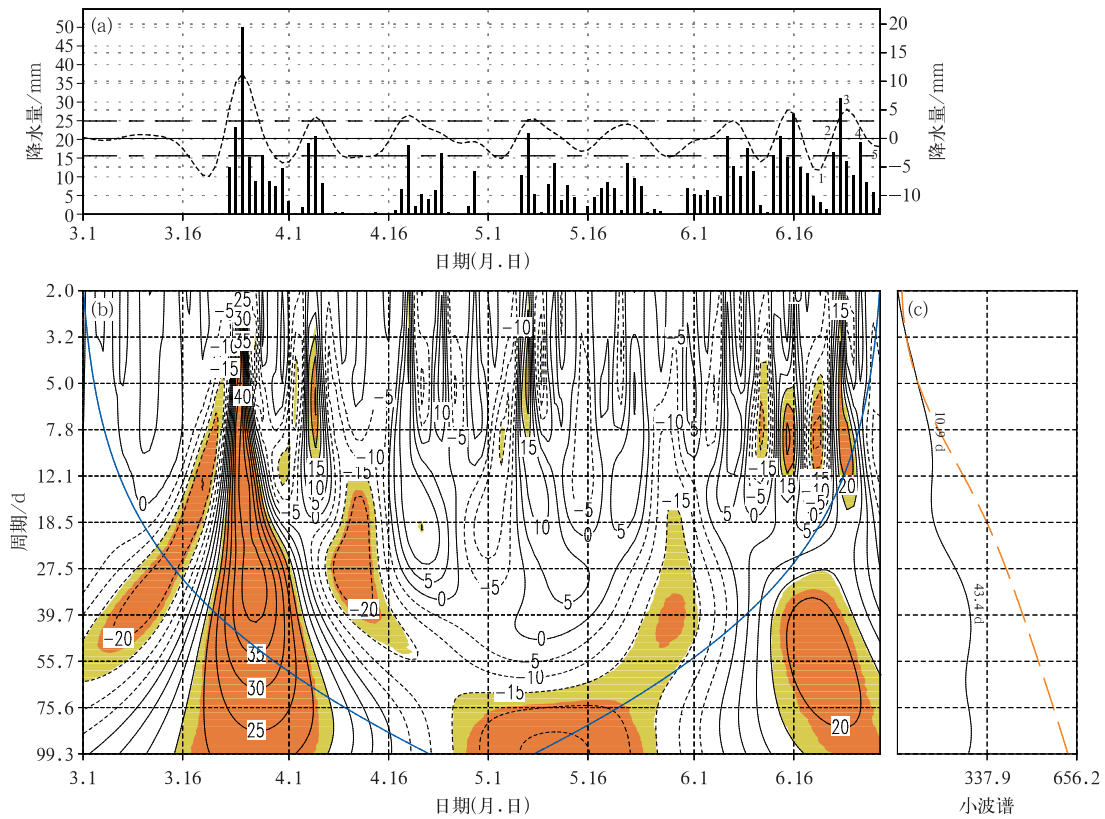
广东省暴雨的定义采用谢炯光等(2006)的定义,即在每日(08 时至第二日 08 时,北京时)的雨量图上,凡广东省内某测站的日降水量达 50 mm 以上,称该站有暴雨;而当某日省内测站有相邻 4 个站暴雨连成片,称该日省内有暴雨。冷空气的活动主要参考广东省气象台关于“冷空气记载的规定”(纪忠萍等,2021),即在毗邻的日期, $p$ 、 $T$ 、 $e$  三要素的 24 h 变化[即  $+\Delta p$ (升压)、 $-\Delta T$ (降温)、 $-\Delta e$ (降湿)]有两项发生且其绝对值  $\geq 0.1$ ,可初步视为有冷空气。另外,结合逐日东亚海平面气压场的变化,检查是否有冷高压南下影响广东,来确定是否有冷空气影响广东(纪忠萍等,2025)。

## 2 广东前汛期降水的时空变化及其低频振荡特征

### 2.1 前汛期降水的逐日变化与低频振荡特征

图 1 给出了 2023 年 3—6 月广东 86 个站平均逐日降水量及其小波系数与小波功率谱。由图 1a 可见,3—6 月广东主要出现了九次明显的降水过程,其中 4 月 4—5 日出现了 2 d 暴雨到大暴雨的降水过程,3 月 23—25 日、6 月 14—16 日和 6 月 22—26 日出现了 3 d 以上的连续暴雨过程,其余几次均为大雨到暴雨或大雨局部暴雨过程。

从小波系数图(图 1b)的底部可见,3—6 月小波系数呈现两对明显的“负-正”相间分布,它们代表 3—6 月降水经历了少雨-多雨的两个阶段性变化。3 月 23—25 日连续暴雨过程主要对应准 10~18 d 的周期振荡,6 月 14—16 日、22—26 日的连续暴雨过程主要对应准 7~10 d 的周期振荡,并且三次暴雨过程都处于准 30~60 d 季节内振荡的两次正位相背景中。三次强降水时段对应的周期均能够通过 0.05 的显著性水平检验。从图 1c 小波功率谱可见,存在准 10.9 d、43.4 d 的峰值,代表广东 3—6 月逐日降水具有显著的准双周振荡以及 30~60 d 的季节内振荡。因此,2023 年广东出现了三次连续暴雨过程,主要存在 7~18 d 的准双周振荡,而 3—6 月降水还存在 30~60 d 的季节内振荡。



注:图 a 中上下两条水平虚线表示 7~20 d 滤波降水的一倍标准差,1~5 分别为 5 个位相;图 b 中黄色和棕色分别表示通过 0.1 和 0.05 显著性水平检验的区域,两侧蓝色的弧线下区域表示边界效应的影响域;图 c 中棕色虚线为 0.1 显著性水平线。显著性水平检验采用了 Monte-Carlo 方法。

图 1 2023 年 3—6 月广东 86 个站(a)平均逐日降水量(左侧纵坐标,柱状)、7~20 d 滤波降水量演变(右侧纵坐标,点虚线),(b,c)平均逐日降水量的(b)墨西哥帽小波变换系数(等值线)和(c)小波全谱(实线)

Fig. 1 (a) The average daily precipitation (left y-axis, bar) and 7–20 d filtered precipitation (right y-axis, dotted-dashed line), (b) Mexican hat wavelet transform coefficient (contour) and (c) global wavelet power spectrum (solid line) for average daily precipitation at 86 stations in Guangdong Province from March to June 2023

### 2.2 连续暴雨过程的空间分布特征

从三次连续暴雨过程累计降水量的空间分布(图 2)可见,3 月 23—25 日连续暴雨过程累计降水量 >100 mm 的区域主要出现在广东北部尤其是西北部市(县),较历年同期偏多 5 成~5.4 倍,局部偏多 6~7 倍(图略);6 月 14—16 日连续暴雨过程累计降水量 >100 mm 的区域主要出现在上川岛—深圳—汕尾—汕头的广东南部及其沿海市(县),较历年同期偏多 4.5 成~3 倍(图略),其中累计降水量最大出现在惠来(248.4 mm),较历年同期偏多 2.9 倍;6 月 22—26 日连续暴雨过程累计降水量 >150 mm 的区域主要出现在以英德—阳山为中心的

广东西北部市(县),较历年同期偏多 7 成~4.7 倍(图略)。

### 2.3 连续暴雨过程与冷空气活动

图 3 给出了 2023 年 3—6 月广州逐日平均气压( $p$ )、温度( $T$ )和绝对湿度( $e$ )的变化。可见,3 月 23—25 日、6 月 14—16 日连续暴雨过程期间,存在较明显的降温、降湿及升压(即 $-\Delta T$ 、 $-\Delta e$ 、 $+\Delta p$ ),即两次连续暴雨期间存在冷空气活动(其中 3 月 24 日为中等冷空气影响,6 月 14 日为弱冷空气影响)。而 6 月 22—26 日连续暴雨过程期间,虽然 6 月 22—23 日存在弱的降温( $-\Delta T$ )、降湿( $-\Delta e$ ),但为降压( $-\Delta p$ )。从逐日东亚海平面气压的变化来看,

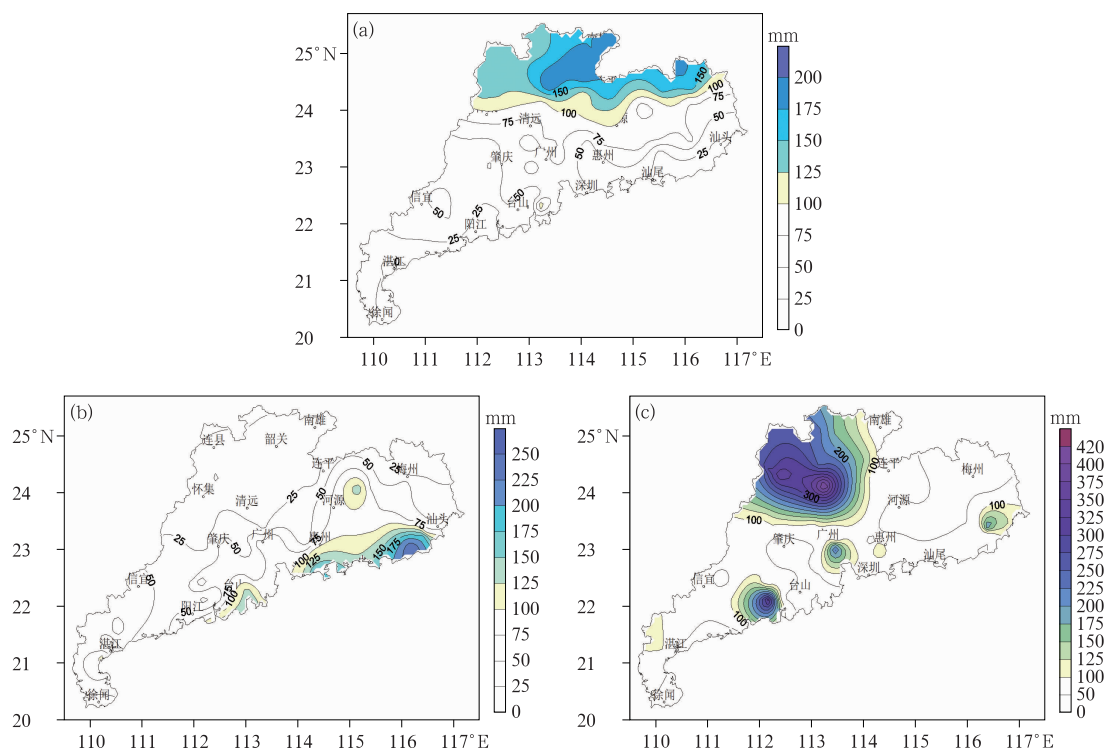


图 2 2023 年(a)3 月 23—25 日,(b)6 月 14—16 日,(c)6 月 22—26 日广东三次连续暴雨过程累计降水量  
Fig. 2 The accumulated precipitation of three continuous rainstorms in Guangdong Province during (a) 23—25 March, (b) 14—16 June and (c) 22—26 June 2023

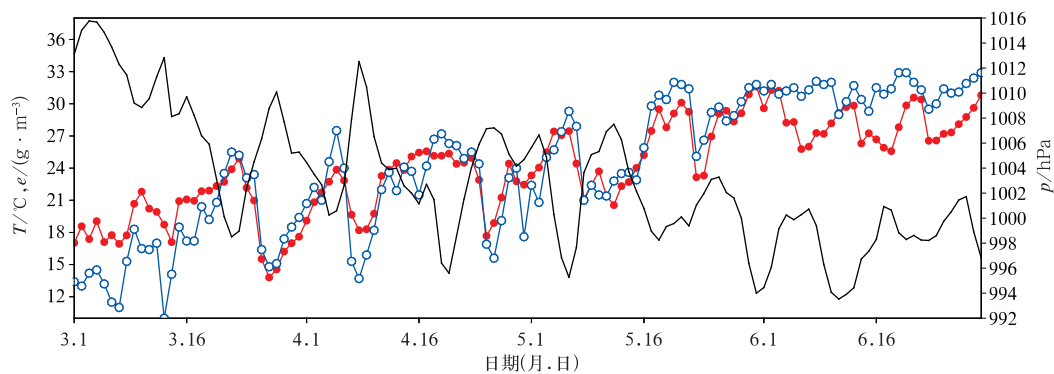


图 3 2023 年 3—6 月广州逐日平均气压(黑线)、温度(红线)、绝对湿度(蓝线)的变化  
Fig. 3 Variations of daily average pressure (black line), temperature (red line), and absolute humidity (blue line) in Guangzhou from March to June 2023

6 月 22—23 日我国北方也无冷空气南下。因此可以认为,6 月 22—26 日为无明显冷空气影响的连续暖区暴雨,其余两次(3 月 23—25 日、6 月 14—16 日)为有明显冷空气影响的连续锋面型暴雨。

### 3 连续暖区暴雨过程的大气平均环流场特征

从上面的分析可见,2023 年前汛期三次连续暴

雨中,只有 6 月 22—26 日为无明显冷空气影响造成的连续暖区暴雨,且持续时间最长,降水总量中心值也较前两次连续暴雨大 1 倍左右(图 2),造成了严重的局地洪涝灾害。因此,为了解这种突发性强、持续时间长、预报难度大、造成严重灾害的连续暖区暴雨的大气环流成因,图 4 给出了 2023 年 6 月 22—26 日连续暖区暴雨过程平均的 500 hPa 高度场、850 hPa 风场、925 hPa 风场叠加 500 hPa 垂直速度场及海平面气压场的分布。

500 hPa 平均高度场上(图 4a),中高纬度欧亚大陆为两脊一槽型,乌拉尔山—巴尔喀什湖—贝加尔湖以西为高空槽控制,欧洲、我国东北—鄂霍次克海为明显的高压脊控制,形成明显的“西阻”与“东阻”。这种中高纬度环流的分布,与刘瑞鑫等(2021)分析得到的“所有类型暖区暴雨发生时对流层中高层的中纬度基本为平直西风气流控制”明显不同。低纬度,高原槽位于贵州—湖南附近,西太平洋副热带高压(以下简称副高)西伸到广东东部沿海—海南岛东部海面,脊线位于  $17^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ ,广东西北部处在高原槽底部及位势高度负距平场与副高边缘的西南气流中,导致出现强降水。这与陈翔翔等(2012)分析得到的“高原槽对暖区暴雨影响明显”一致。850 hPa 与 925 hPa 风场上(图 4b, 4c),  $35^{\circ}\text{N}$  以北的我国中东部—渤海—朝鲜为反气旋环流控制,反气旋底部的偏东风与来自孟加拉湾穿过中南半岛的强西南季风及副高边缘的强西南风在贵州—长江流域形成明显的气旋性环流,广东大部位于该气旋性

环流右侧的强西南风场中,广东西北部位于西南大风轴的左侧气旋性弯曲(图 4b)及垂直运动上升区的大值中心边缘(图 4c)附近,导致连续暴雨过程累计降水量  $>150\text{ mm}$  的区域主要出现在广东西北部市(县)。海平面气压场上,广东西部—广西—北部湾—海南—越南北部为北部湾低压控制,广东东部为副热带高压脊控制,等压线呈南北走向。这种由来自孟加拉湾穿过中南半岛的强西南季风及副高边缘强西南风共同导致的强西南风暖区暴雨的大尺度环流形势与何立富等(2016)总结的强西南风急流型对应“500 hPa 中高纬度地区多为两脊一槽型,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,850 hPa 急流轴在华南沿海地区,地面西南低压槽发展”有明显的不同。因此,由于 500 hPa 中高纬度具有明显的“西阻”与“东阻”,中高纬度的“东阻”与低纬度偏强的副高形成高压坝,使乌拉尔山—巴尔喀什湖—贝加尔湖、青藏高原东南的高空槽移动缓慢,也使广东西北部长时间处在高原槽底部与

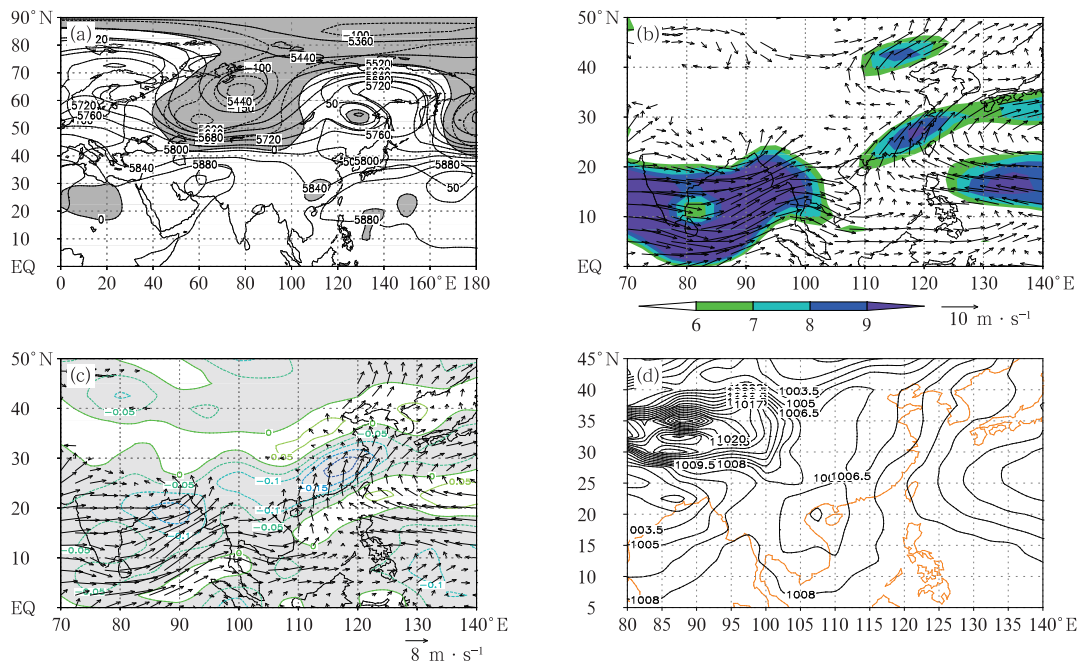


图 4 2023 年 6 月 22—26 日广东连续暖区暴雨过程平均的(a)500 hPa 高度场(实线,单位:gpm)及其距平场(虚线,阴影区为负距平,单位:gpm), (b)850 hPa 风场(箭头)及风速(填色,单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), (c)925 hPa 风场(箭头)、500 hPa 垂直速度(等值线,阴影表示负值,单位:  $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ), (d)海平面气压场(单位:hPa)

Fig. 4 (a) The 500 hPa geopotential height (solid line, unit: gpm) and its anomaly field (dashed line, shaded; negative anomaly, unit: gpm), (b) 850 hPa wind field (vector) and speed (colored, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), (c) 925 hPa wind field (vector) and 500 hPa vertical velocity (contour, shaded; negative value, unit:  $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ), and (d) sea level pressure (unit: hPa) averaged in the continuous warm-sector rainstorms in Guangdong Province during 22–26 June 2023

副高边缘的西南气流中。低层来自渤海出海反气旋底部的偏东风与来自孟加拉湾及副高边缘的强西南季风在贵州—长江流域形成明显的气旋性环流,广东西北部位于西南季风大风轴的左侧、气旋性环流右侧,地面上华南为北部湾低压控制,导致广东西北部发生强西南风连续暖区暴雨。

#### 4 强西南风连续暖区暴雨大气环流场的演变特征

由前人研究可知,强西南季风暖区暴雨一般出现在广东南部沿海地区,尤以珠江三角洲和阳江以东的广东沿海地区降水最大(广东省气象局《广东省天气预报技术手册》编写组,2006)。刘瑞鑫等(2019)的研究也表明,华南暖区暴雨事件内陆地区明显比沿海地区偏少,广东暖区暴雨的落区主要出现在以阳江、恩平、汕尾为中心的南部沿海多雨区,以龙门为中心的粤北山地多雨区。由于6月22—26日强西南风连续暖区暴雨主要出现在以英德—阳山为中心的广东西北部(图2),与前人研究得到的暖区暴雨落区有明显的不同。因此,有必要加强此次过程在低频振荡不同发展阶段大气环流演变规律的研究,探究低频信号的来源,以期更好地利用数值预报大尺度环流形势场的中期-延伸期预报产品,做好连续暖区暴雨的中期与延伸期预报。

为了解6月22—26日连续暖区暴雨发生发展的大尺度原始及其低频环流场演变的差异,首先对2023年3—6月广东86个站平均逐日降水量进行7~20 d的Lanczos滤波(图1a),然后将6月22—26日连续暖区暴雨过程分为5个位相(图1a):位相1、5为波谷,位相3为波峰,位相2与4为转换位相。图5~图8给出了6月22—26日连续暖区暴雨过程1~4位相对应日期的原始与7~20 d滤波的200 hPa、500 hPa风场与高度场、850 hPa风场与散度场及海平面气压场的分布。

##### 4.1 200 hPa 环流场

200 hPa低频风场与高度场(图5a~5d)上,从位相1可以看到,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。中低纬度,从非洲—亚洲中南部也存在相间排列的“气旋-反气旋”低频波列。从位相1到位相3,该两支波列逐渐

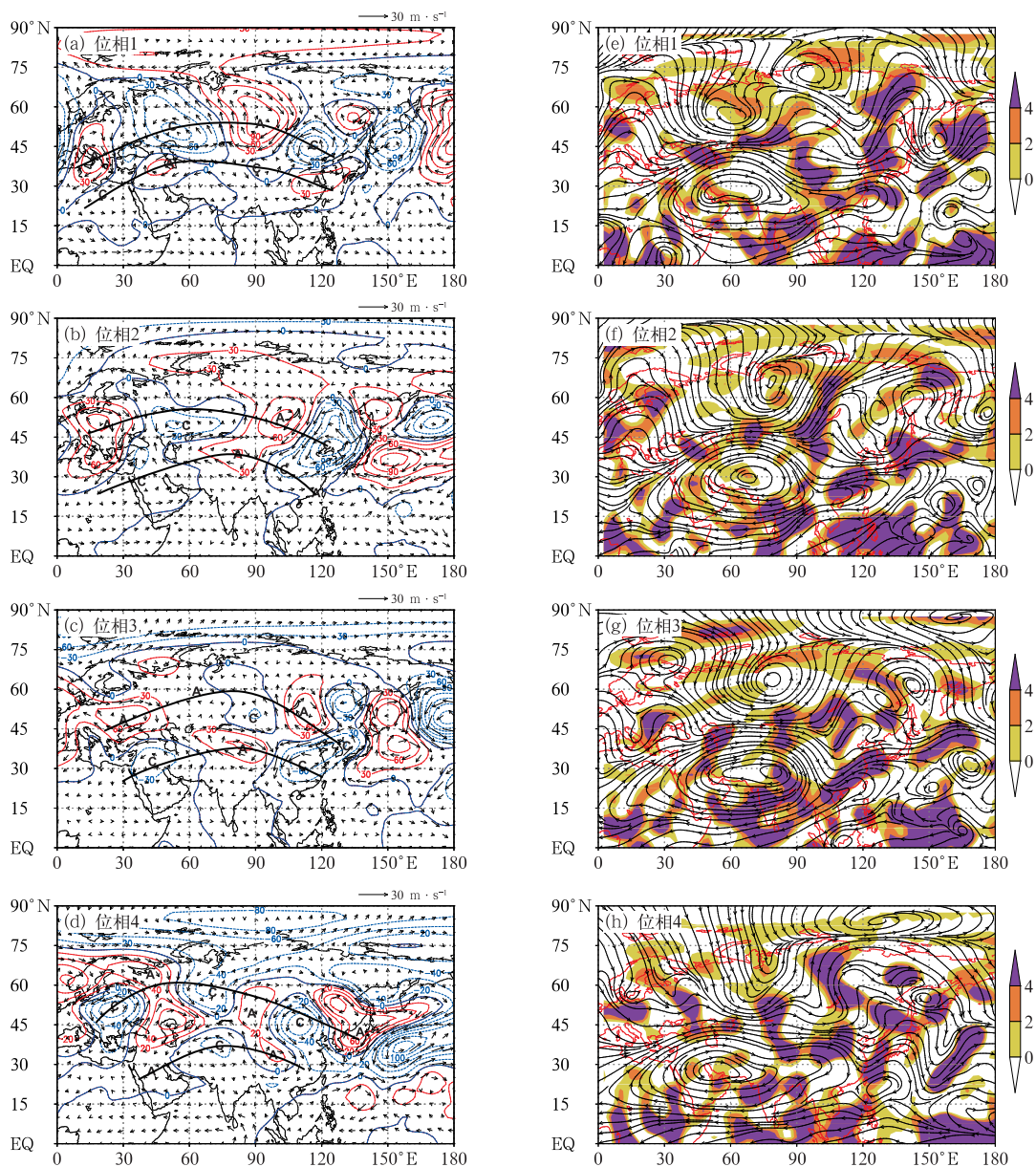
向东向南传播。当中高纬度巴尔喀什湖—贝加尔湖由低频反气旋环流逐渐转为低频气旋环流控制,贝加尔湖东南—内蒙古高原、印度半岛北部—青藏高原由低频气旋环流逐渐转为低频反气旋环流控制,华北—华南由低频反气旋环流逐渐转为从青藏高原逐渐东移南压的低频气旋环流控制,降水从无转为开始并逐渐达到鼎盛期。当华南上空转为逐渐东移南压的青藏高原低频反气旋外围的东北气流控制时,降水减弱。

200 hPa流场与散度场(图5e~5h)上,从位相1~3可以看到,随着从中高纬度到低纬度两支相间排列的“反气旋-气旋”低频波列的向东向南传播,巴尔喀什湖—贝加尔湖由长波脊转为长波槽控制,南亚高压中心由(27.5°N、60°E)逐渐东移到(27.5°N、80°E)附近,华南大部由南亚高压外围的高压脊控制逐渐转为青藏高原附近逐渐加深东移南压的长波槽前的副热带西南风急流出口以南的西南风控制,并与中南半岛上空的东北气流形成喇叭口张开状,使高空辐散由弱转强,降水也由弱逐渐加强并达到最强。位相4,华南转为南亚高压外围高压脊控制,降水减弱。

从上面的分析可见,强西南风暖区暴雨鼎盛期青藏高原为低频反气旋环流控制,华北—华南为低频气旋环流控制。这种暖区暴雨鼎盛期的环流分布,虽然与孔晓宇等(2017)得到的“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;当异常反气旋和气旋分别位于青藏高原和华北上空时,华南降水偏强”相似,但本次强西南风连续暖区暴雨过程,青藏高原的低频反气旋与华北—华南的低频气旋来自中低纬度南支波列的东传,即来自位相1时分别位于里海—伊朗高原的低频反气旋、青藏高原低频气旋的东传,也使南压高压中心逐渐东移,与孔晓宇等(2017)得到“当波列中异常气旋到达华北上空时,使得南亚高压西退”也不同。

##### 4.2 500 hPa 环流场

500 hPa低频高度场与风场(图6a~6d)上,从位相1~3(图6a~6c)可以看到,中高纬度从欧洲西部到东北亚也存在“反气旋-气旋”相间排列的欧亚低频波列的向东向南传播,中低纬度从非洲—亚洲中南部也存在一支“气旋-反气旋”相间排列的南支



注:图 a~d 中“A”和“C”分别代表异常反气旋和异常气旋;黑弧线表示波列。

图 5 2023 年 6 月 22—26 日广东连续暖区暴雨过程位相 1~4 的(a~d)7~20 d 滤波的 200 hPa 低频位势高度场(等值线,单位:gpm)与低频风场(箭头),

及其(e~h)未滤波的 200 hPa 流场(黑线)与散度场(填色,单位: $10^{-6} s^{-1}$ )

Fig. 5 (a~d) The 7~20 d filtered low-frequency geopotential height at 200 hPa (contour, unit: gpm) and low-frequency wind field (vector), and (e~h) their unfiltered streamline (black line) and divergence field (colored, unit:  $10^{-6} s^{-1}$ ) from phases 1 to 4 for continuous warm-sector rainstorms in Guangdong Province during 22~26 June 2023

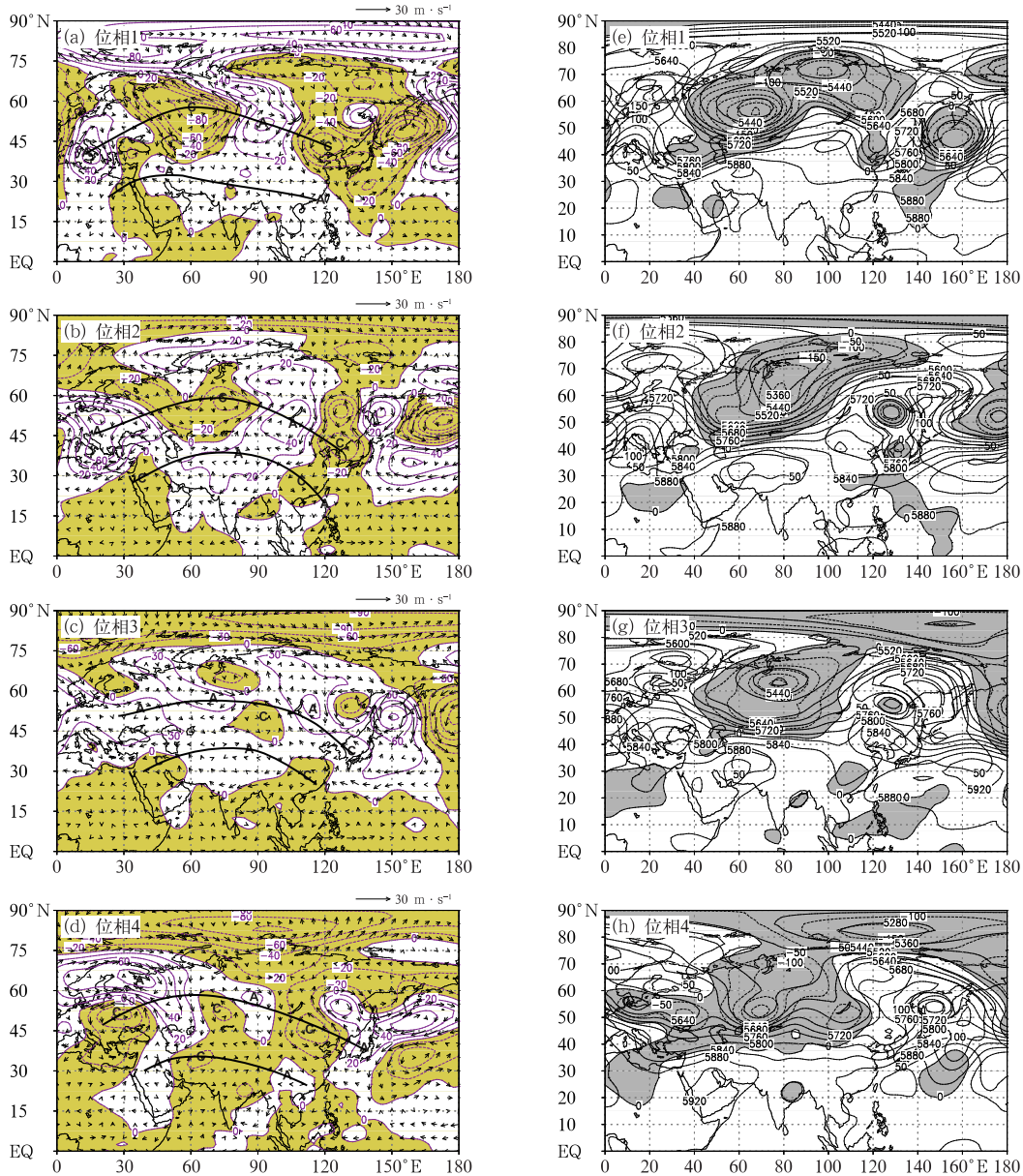
低频波列的向东传播。其中低频反气旋、气旋的中心较 200 hPa 多向东或向南倾斜,具有一定的斜压性。当中高纬度东欧平原—乌拉尔山附近、贝加尔湖东南的东北亚地区由低频气旋转为低频反气旋环流,巴尔喀什湖—贝加尔湖由低频反气旋转为低频

气旋环流,印度半岛北部—青藏高原由低频气旋转为低频反气旋环流,长江流域—华南上空由低频反气旋转为从印度半岛北部—青藏高原西南部逐渐东传的低频气旋环流控制时,降水从间歇—开始—鼎盛。当青藏高原低频反气旋东移南压控制长江流域—华

南大部,降水减弱(图 6d)。

500 hPa 高度场(图 6e~6h)上,从位相 1~3 可以看到,中高纬度,随着欧亚大陆低频波列的东南向传播,巴尔喀什湖—贝加尔湖由高压脊转为高空槽

控制,欧洲、东北亚大部转为明显的高压脊控制,形成明显的“东阻”与“西阻”。中低纬度,随着南支低频频波列的向东传播,青藏高原西南部的高空槽逐渐东移南压到华南西部,副高逐渐减弱东退到珠江口



注:图 a~d 中“A”和“C”分别代表异常反气旋和异常气旋,黑弧线表示波列。

图 6 2023 年 6 月 22—26 日广东连续暖区暴雨过程位相 1~4 的(a~d)7~20 d 滤波的 500 hPa 低频位势高度场(等值线,黄色区代表负值,单位:gpm)与低频风场(箭头),及其(e~h)未滤波的 500 hPa 位势高度场(实线,单位:gpm)与距平场(虚线,阴影区为负距平,单位:gpm)

Fig. 6 (a-d) The 7-20 d filtered low-frequency geopotential height at 500 hPa (contour, yellow shaded; negative value, unit: gpm) and low-frequency wind field (vector), and (e-h) their unfiltered geopotential height (solid line, unit: gpm) and anomaly (dashed line, shaded; negative anomaly, unit: gpm) from phases 1

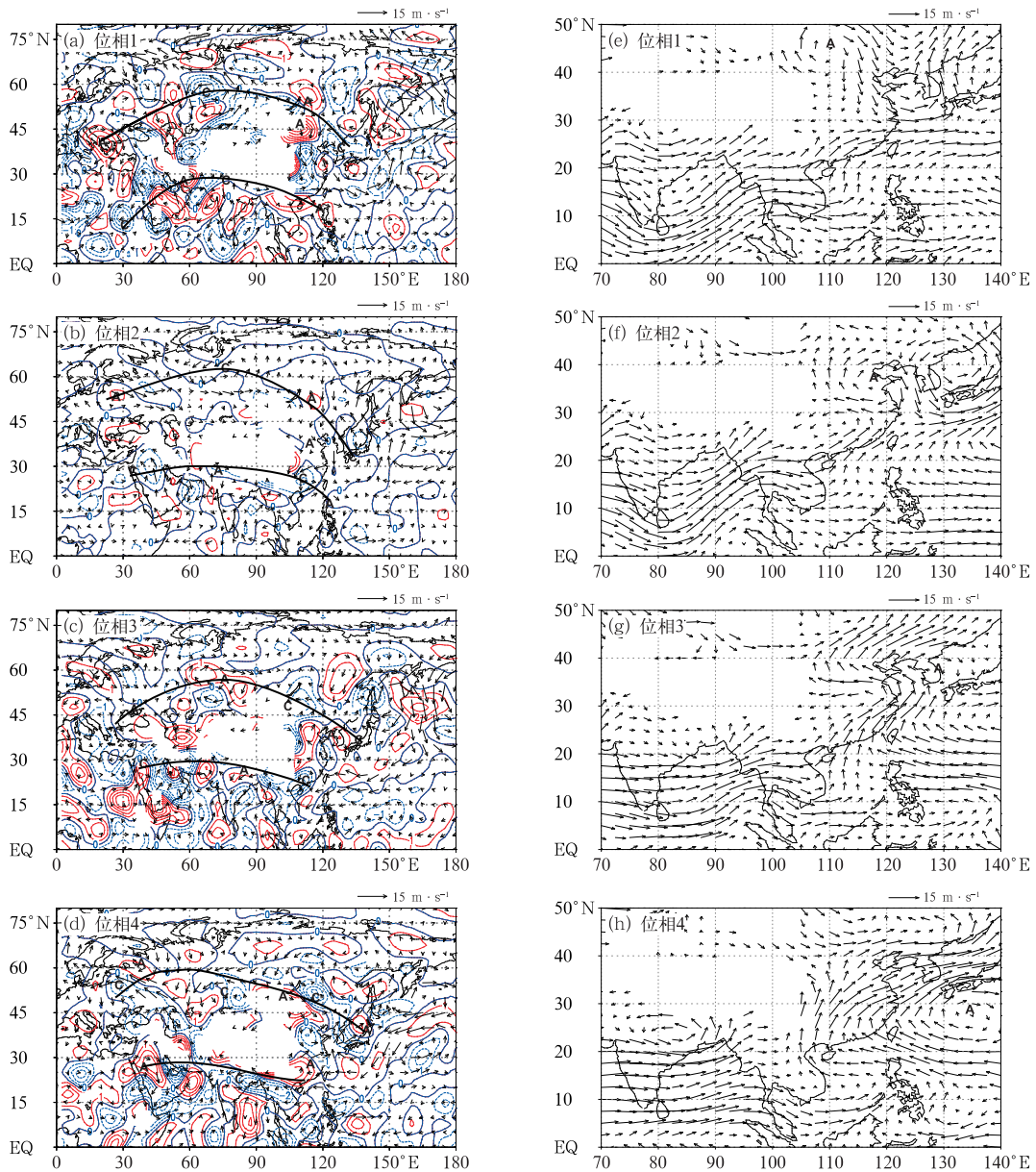
to 4 for continuous warm-sector rainstorms in Guangdong Province during 22-26 June 2023

以东海面,广东由副热带高压脊控制逐渐转为高原槽前与副高边缘的西南气流控制,使广东降水从无开始-鼎盛期。由于中高纬的“东阻”和低纬 120°E 以东的正距平区相叠加,使得低纬维持稳定的东高西低形势,有利于出现连续暴雨过程(谢炯光等, 2006)。广东西北部处在高原槽前与副高边缘转向

的西南气流汇合中,导致西北部出现暖区强降水。

### 4.3 850 hPa 环流场与海平面气压场

850 hPa 低频风场与散度场(图 7a~7d)上,从位相 1~4 可以看到,中高纬度—低纬度仍存在两支具有斜压性低频波列的东南向传播。从位相 1~3,蒙



注:“A”和“C”分别代表异常反气旋和异常气旋,黑弧线表示波列。

图 7 2023 年 6 月 22—26 日广东连续暖区暴雨过程位相 1~4 的(a~d)7~20 d 滤波的 850 hPa 低频风场(箭矢)与散度场(等值线,单位:10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>),及其(e~h)未滤波的 850 hPa 风场(箭矢)

Fig. 7 (a~d) The 7~20 d filtered low-frequency wind field at 850 hPa (vector) and divergence field (contour, unit: 10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>), and (e~h) their unfiltered wind field (vector)

from phases 1 to 4 for continuous warm-sector rainstorms in Guangdong Province during 22—26 June 2023

古高原东部的低频反气旋逐渐东移南压到黄海—朝鲜附近,华南从反气旋环流控制逐渐转为从四川盆地—云贵高原以东逐渐加强的低频气旋环流控制,且广东西北部处于负散度的中心附近(图 7b, 7c),使降水从无转为开始并达到鼎盛期。当低频反气旋逐渐东移控制江南—华南大部时,降水减少。

850 hPa 风场(图 7e~7h)上,从位相 1~3(图 7e~7g)可以看到,来自孟加拉湾穿过中南半岛的西南风与副高边缘西南风逐渐北抬到长江口以北,并与从蒙古高原东部逐渐东移南压到朝鲜—日本附近的反气旋环流西南部的偏东气流在长江中下游—湖南—贵州形成明显的气旋环流,广东西南部—中部—东北部为西南大风轴,虽然广东西北部上空的风速较小,但位于气旋环流右侧的强西南风场风速辐合区,使降水从间歇—开始—鼎盛期。位相 4(图 7h),当副高环流逐渐加强西伸控制广东—长江中上游地区,降水减弱。

海平面气压场上,从位相 1~3 可以看到,广东—长江中下游地区逐渐转为以北部湾为中心向东北伸展的北部湾低压槽控制,降水从间歇—开始—鼎盛期。从位相 4(图 8d)可以看到,广东东部转为弱脊控制,中西部转为均压场控制,降水减弱。

因此,从上面的分析可见,随着中高纬度到低纬

度两支具有斜压性波列的东南向传播,当中高层巴尔喀什湖—贝加尔湖由低频反气旋环流(高压脊)逐渐转低频气旋环流(高空槽)控制,青藏高原逐渐转为伊朗高原附近东传的低频反气旋环流(高压脊)控制,南亚高压中心逐渐东移,副高逐渐减弱东退到珠江口以东海面,长江流域—华南上空逐渐转为青藏高原或以南东传的低频气旋性环流控制时,降水从间歇—开始—鼎盛。低层,蒙古高原东部逐渐东移南压到朝鲜—日本附近的反气旋环流外围的偏东风,与来自孟加拉湾穿过中南半岛到达华南及副高边缘的西南风相聚在长江流域,逐渐形成明显的气旋性环流,广东西北部位于气旋性环流右侧强西南风场中的风速辐合区。地面上,广东—长江中下游地区逐渐转为东北向伸展的北部湾低压槽控制,使暖区暴雨从间歇—开始—鼎盛。

另外还可见,发生在广东西北部的强西南风连续暖区暴雨,对流层中高层的低频信号主要来自南支波列伊朗高原—青藏高原或以南具有斜压性的低频反气旋与气旋的东传南压,它们使南亚高压中心逐渐东移,副高减弱东退。低层的低频信号来自蒙古高原东部低频反气旋与四川盆地—云贵高原以东逐渐加强的低频气旋的东移南压。这与魏蕾等(2017)研究华南夏季持续性强降水期间的低频信号

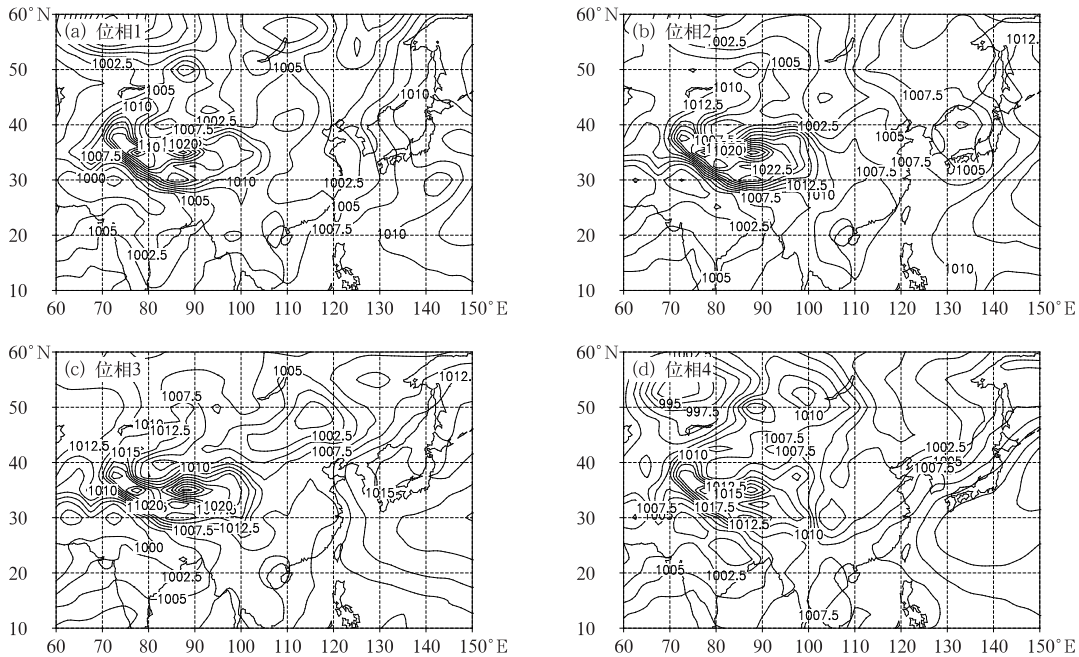


图 8 2023 年 6 月 22—26 日广东连续暖区暴雨过程位相 1~4 的海平面气压场分布(单位:hPa)

Fig. 8 Distribution of sea level pressure (unit: hPa) from phases 1 to 4 for continuous warm-sector rainstorms in Guangdong Province during 22—26 June 2023

“在低层主要来源于中国南海—菲律宾海一带以及热带西太平洋上空低频振荡的西北向传播,副高先西伸扩展后东撤收缩;高层的低频信号来源于低频罗斯贝波列的东南向传播”明显不同。与纪忠萍等(2025)研究广东夏季(强)西南季风型季风槽暴雨的低频信号“不仅来源于从欧洲西部到东北亚具有准正压性低频波列的东南向传播,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”也不同。

## 5 结 论

通过对2023年3—6月广东前汛期降水尤其是连续暴雨的低频振荡特征进行研究,并对开汛以来连续暴雨期间的冷空气活动做了分析,重点揭示了发生在广东西北部强西南风连续暖区暴雨的平均环流场及其低频环流场演变特征与低频信号的来源。得到如下结论:

(1)2023年开汛以来共出现三次连续3 d以上的连续暴雨过程,主要存在7~18 d左右的准双周振荡,并处于准30~60 d季节内振荡的两次正位相背景中。除6月14—16日连续暴雨过程总降水量中心出现在广东南部沿海市(县),其余两次(3月23—25日、6月22—26日)总降水量中心均出现在广东西北部。6月22—26日为无明显冷空气影响造成的暖区暴雨过程,其余两次均有明显冷空气影响。

(2)6月22—26日,由于中高纬度具有明显的“西阻”与“东阻”,低纬度副高西伸到广东南部沿海,使广东西北部处在高原槽底部与副高边缘及低层西南风大风轴的左侧、气旋性环流右侧,导致连续暖区暴雨主要发生在广东西北部。

(3)6月22—26日连续暖区暴雨在中高层的低频信号来自南支波列伊朗高原—青藏高原或以南具有斜压性的低频反气旋与气旋的东传南压,低层的低频信号来自蒙古高原东部低频反气旋与四川盆地—云贵高原以东逐渐加强的低频气旋的东移南压。它们使南亚高压中心逐渐东移,副高减弱东退,青藏高原由低频气旋转为反气旋环流控制,华北—华南由低频反气旋转为气旋环流控制。低层来自蒙古高原东部逐渐东移南压到朝鲜—日本附近的反气旋外围的偏东风,与来自孟加拉湾到达华南的强西南季风及副高边缘的西南风相聚在长江流域,形成

明显的气旋性环流。地面上,广东—长江中下游地区逐渐转为东北向伸展的北部湾低压槽控制,使强西南季风暖区暴雨从间歇-开始-鼎盛期。它们可为强西南季风连续暖区暴雨的中期-延伸期预报提供参考。

## 参考文献

- 陈彩珠,高建芸,黄丽娜,等,2016. 大气低频变化对福建前汛期典型持续性暴雨影响[J]. 应用气象学报,27(1):75-84. Chen C Z, Gao J Y, Huang L N, et al, 2016. Effects of atmospheric low-frequency variation on typical persistent heavy rains during pre-flood season in Fujian[J]. J Appl Meteor Sci, 27(1):75-84 (in Chinese).
- 陈蔚,刘梅,杨华栋,等,2023. 长江中下游典型涝年准双周振荡特征及其影响分析[J]. 气象学报,81(3):393-415. Chen W, Liu M, Yang H D, et al, 2023. Distinction and influences of the quasi-biweekly oscillation among three typical flood years in the lower reaches of the Yangtze River[J]. Acta Meteor Sin, 81(3):393-415 (in Chinese).
- 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 X X, Ding Z Y, Liu C H, 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, 28(5):707-718 (in Chinese).
- 陈艳,张万诚,陶云,等,2021. 低频振荡对2015年春季云南东部降水异常的影响[J]. 气象,47(7):805-816. Chen Y, Zhang W C, Tao Y, et al, 2021. Influence of low-frequency oscillation on abnormal precipitation over eastern Yunnan Province in spring 2015[J]. Meteor Mon, 47(7):805-816 (in Chinese).
- 湛芸,陈涛,汪玲瑶,等,2019. 中国暖区暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害,38(5):483-493. Chen Y, Chen T, Wang L Y, et al, 2019. A review of the warm-sector rainstorms in China[J]. Torr Rain Dis, 38(5):483-493 (in Chinese).
- 丁一汇,梁萍,2010. 基于MJO的延伸预报[J]. 气象,36(7):111-122. Ding Y H, Liang P, 2010. Extended range forecast basing on MJO[J]. Meteor Mon, 36(7):111-122 (in Chinese).
- 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 Z Y, Liu C H, Shen X Y, 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, 27(3):307-316 (in Chinese).
- 付智龙,姜帅,李国平,等,2025. 惠州前汛期暖区暴雨环流分型及其环境参量统计分析[J]. 气象,51(4):473-483. Fu Z L, Jiang S, Li G P, et al, 2025. Statistical analysis on classification of synoptic circulation of warm-sector heavy rainfall and its ambient parameters in Huizhou during the first rainy season[J]. Meteor Mon, 51(4):473-483 (in Chinese).

- 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 D J, Ji Z P, 2011. The strong dragon-boat precipitation of Guangdong in 2008 and quasi-10-day oscillation[J]. J Trop Meteor, 27(1): 11-21(in Chinese).
- 广东省气象局《广东省天气预报技术手册》编写组, 2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社: 125-126. Guangdong Meteorological Bureau "The Weather Forecast Technical Manuals in Guangdong Province" Writing Group, 2006. The Weather Forecast Technical Manuals in Guangdong Province[M]. Beijing: China Meteorological Press: 125-126(in Chinese).
- 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 L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 559-569(in Chinese).
- 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: 55-63. Huang S S, Li Z G, Bao C L, et al, 1986. Torrential Rain in the Subsequent First Rainy Season in South China[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press: 55-63(in Chinese).
- 纪忠萍, 谷德军, 吴乃庚, 等, 2010. 广东省前汛期暴雨与 500 hPa 关键区准双周振荡[J]. 应用气象学报, 21(6): 671-684. Ji Z P, Gu D J, Wu N G, et al, 2010. Variations of torrential rain in first rainy season in Guangdong Province and its relationships with the biweekly oscillation of 500 hPa key region[J]. J Appl Meteor Sci, 21(6): 671-684(in Chinese).
- 纪忠萍, 谷德军, 于玲玲, 等, 2025. 南海季风槽准双周振荡对广东夏季暴雨的影响[J]. 大气科学, 49(3): 727-751. Ji Z P, Gu D J, Yu L L, et al, 2025. Influence of South China Sea monsoon trough quasi-biweekly oscillations on rainstorms in summer in Guangdong Province[J]. Chin J Atmos Sci, 49(3): 727-751(in Chinese).
- 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 Z P, Yuan Y F, Xu Y H, et al, 2021. The relationship between continuous rainstorms and atmospheric intraseasonal oscillation during the first rainy season in Guangdong in 2019[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3): 588-604(in Chinese).
- 简茂球, 张春花, 2013. 准双周振荡对 2010 年 10 月海南持续性暴雨的影响[J]. 热带气象学报, 29(3): 364-373. Jian M Q, Zhang C H, 2013. Impact of quasi-biweekly oscillation on a sustained rainstorm in October 2010 in Hainan[J]. J Trop Meteor, 29(3): 364-373(in Chinese).
- 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 X Y, Mao J Y, Wu G X, 2017. Influence on the South China rainfall anomalies of the atmospheric quasi-biweekly oscillation in mid-high latitude during the summer of 2002[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1204-1220(in Chinese).
- 林爱兰, 纪忠萍, 谷德军, 等, 2016. 大气季节内振荡在华南降水预报中的应用[J]. 热带气象学报, 32(6): 878-889. Lin A L, Ji Z P, Gu D J, et al, 2016. Application of atmospheric intraseasonal oscillation in precipitation forecast over South China[J]. J Trop Meteor, 32(6): 878-889(in Chinese).
- 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 R X, Sun J H, Chen B F, 2019. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China[J]. Chin J Atmos Sci, 43(1): 119-130(in Chinese).
- 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 R X, Sun J H, Fu S M, 2021. Comparison of synoptic circulation characteristics in different types of warm-sector heavy rainfall events over South China[J]. Climatic Environ Res, 26(4): 359-373(in Chinese).
- 刘遇, 吴慧, 蔡亲波, 等, 2025. 热带季节内振荡对海南岛 10 月持续性强降水的影响[J]. 热带气象学报, 41(1): 99-111. Liu Y, Wu H, Cai Q B, et al, 2025. Impact of Madden-Julian oscillation on persistent heavy rainfall over Hainan Island in October[J]. J Trop Meteor, 41(1): 99-111(in Chinese).
- 蒲义良, 卢翔涛, 胡胜, 等, 2023. 华南沿海一次暖区特大暴雨的对流特征和发展机制分析[J]. 气象, 49(2): 201-212. Pu Y L, Lu X S, Hu S, et al, 2023. Convective characteristics and development mechanisms of an extreme warm-sector rainfall in the coastal area of South China[J]. Meteor Mon, 49(2): 201-212(in Chinese).
- 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 H, Qin Y F, Wu Y S, et al, 2024. Study on the mechanism of warm-sector torrential rain in Guangxi under atmospheric rivers background[J]. Plateau Meteor, 43(2): 381-397(in Chinese).
- 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 W, Liu G Z, Lai Z Q, et al, 2020. Study on forecast errors and predictability of a warm-sector rainstorm in South China[J]. Meteor Mon, 46(8): 1039-1052(in Chinese).
- 孙璐, 陈思远, 潘贤, 等, 2022. 华南暖区暴雨预报的模式初始场质量敏感性分析[J]. 气象科学, 42(3): 356-367. Sun L, Chen S Y, Pan X, et al, 2022. Sensitivity analysis of model initial value of a rainstorm in the warm sector of South China[J]. J Meteor Sci, 42(3): 356-367(in Chinese).
- 谭赢, 李丽平, 施春华, 等, 2022. 中国冬季大范围持续性低温事件低频特征及其与大气低频振荡的联系[J]. 高原气象, 41(6): 1410-1424. Tan Y, Li L P, Shi C H, et al, 2022. Low-frequency characteristics of large-scale persistent low temperature events in winter in China and its relation to atmospheric low-frequency oscillation[J]. Plateau Meteor, 41(6): 1410-1424(in Chinese).
- 王熙乔, 李健颖, 李双林, 2023. 北半球夏季 30~60 天季节内振荡年代际变化及其对中国东部降水和气温的影响[J]. 大气科学, 47(6): 1665-1679. Wang X Q, Li J Y, Li S L, 2023. Decadal variation of boreal summer 30-60-day intraseasonal oscillation and its influence on precipitation and temperature over eastern China[J]. Chin J Atmos Sci, 47(6): 1665-1679(in Chinese).
- 韦金逢, 孙璐, 时洋, 等, 2025. 一次华南暖区暴雨的可预报性和预报

- 误差增长特征[J]. 大气科学, 49(5):1369-1386. Wei J F, Sun L, Shi Y, et al, 2025. Predictability and error growth characteristics of a warm-sector heavy rain in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 49(5):1369-1386(in Chinese).
- 魏蕾, 房佳蓓, 杨修群, 2017. 华南夏季 12—30 d 持续性强降雨的低频特征分析[J]. 气象学报, 75(1):80-97. Wei L, Fang J B, Yang X Q, 2017. Low frequency oscillation characteristics of 12—30 d persistent heavy rainfall over South China[J]. Acta Meteor Sin, 75(1):80-97(in Chinese).
- 吴乃庚, 温之平, 邓文剑, 等, 2020. 华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J]. 气象科学, 40(5):605-616. 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]. J Meteor Sci, 40(5):605-616(in Chinese).
- 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 J G, Ji Z P, Gu D J, 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, 17(3):354-362(in Chinese).
- 信飞, 肖子牛, 李泽椿, 2007. 1997 年华南汛期降水异常与大气低频振荡的关系[J]. 气象, 33(12):23-30. Xin F, Xiao Z N, Li Z C, 2007. Relation between flood season precipitation anomalies in South China and East Asian atmospheric low frequency oscillation in 1997[J]. Meteor Mon, 33(12):23-30(in Chinese).
- 叶朗明, 徐碧裕, 刘显通, 等, 2021. 2017 年广东西部一次暖区极端降水过程的维持机制及微物理特征[J]. 气候与环境研究, 26(3):263-274. Ye L M, Xu B Y, Liu X T, et al, 2021. Maintenance mechanism and microphysical characteristics of an extreme intensity precipitation in warm area in western Guangdong in 2017[J]. Climatic Environ Res, 26(3):263-274(in Chinese).
- 臧钰歆, 徐邦琪, 高迎侠, 2024. 10—20 d 和 30—60 d 低频振荡对华南前汛期持续性暴雨的影响差异及机制研究[J]. 气象学报, 82(2):137-154. Zang Y X, Hsu P C, Gao Y X, 2024. The impacts of 10—20 d vs. 30—60 d low-frequency oscillations on South China pre-flood season persistent heavy rainfall: comparison and associated mechanisms[J]. Acta Meteor Sin, 82(2):137-154(in Chinese).
- 张可越, 李娟, 徐邦琪, 等, 2023. 中国南方降水及其极端事件的动力统计相结合延伸期预报[J]. 气象学报, 81(1):79-93. Zhang K Y, Li J, Hsu P C, et al, 2023. The dynamical-statistical extended-range prediction of precipitation and extreme precipitation events over southern China[J]. Acta Meteor Sin, 81(1):79-93(in Chinese).
- 章丽娜, 林鹏飞, 熊喆, 等, 2011. 热带大气季节内振荡对华南前汛期降水的影响[J]. 大气科学, 35(3):560-570. Zhang L N, Lin P F, Xiong Z, et al, 2011. Impact of the Madden-Julian oscillation on pre-flood season precipitation in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 35(3):560-570(in Chinese).
- 张耀华, 周兵, 张耀存, 2012. 2010 年南方持续暴雨期大气环流异常及其低频特征研究[J]. 气象, 38(11):1367-1377. Zhang Y H, Zhou B, Zhang Y C, 2012. Abnormality of general circulation with LFO during the torrential rainstorms over southern China in 2010[J]. Meteor Mon, 38(11):1367-1377(in Chinese).
- 支蓉, 高辉, 孙冷, 2024. 2023 年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象, 50(1):115-125. Zhi R, Gao H, Sun L, 2024. Characteristics and possible causes of climate anomalies over China in summer 2023[J]. Meteor Mon, 50(1):115-125(in Chinese).
- 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 B, Wen J F, 2007. Abnormality of summertime precipitation of eastern China and general circulation with LFO in 1998[J]. J Appl Meteor Sci, 18(2):129-136(in Chinese).
- Duchon C E, 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions[J]. J Appl Meteor Climatol, 18(8):1016-1022.
- 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.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 77(3):437-472.
- Kim H, Vitart F, Waliser D E, 2018. Prediction of the Madden-Julian oscillation: a review[J]. J Climate, 31(23):9425-9443.
- Lau K M, Weng H Y, 1995. Climate signal detection using wavelet transform: how to make a time series sing[J]. Bull Amer Meteor Soc, 76(12):2391-2402.
- 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[J]. J Trop Meteor, 24(4):494-507.
- Torrence C, Compo G P, 1998. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bull Amer Meteor Soc, 79(1):61-78.
- 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]. Atmos Res, 280:106425.
- 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(12):4461-4480.
- Zhang Y X, Meng W G, Huang Y Y, 2024. Influence of cloud microphysical schemes on CMA-GD model prediction of a warm-sector heavy rainfall in South China[J]. Dyn Atmos Oceans, 106:101463.

(本文责编:俞卫平)