

# 2019年广东前汛期连续暴雨与大气季节内振荡的联系<sup>1</sup>

纪忠萍<sup>1</sup> 源艳芬<sup>2</sup> 徐艳虹<sup>3</sup> 韩浦城<sup>1</sup> 方一川<sup>1</sup> 谢炯光<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 广东省气象台, 广州 510640

<sup>2</sup> 广东省气象探测数据中心, 广州 510080

<sup>3</sup> 广东省气候中心, 广州 510640

**摘要** 为了做好连续回流暴雨的中期与延伸期预报, 采用小波分析、Lanczos时间滤波器等方法研究了2019年广东前汛期降水与大气季节内振荡的关系, 分析了4-5月发生在西南部的两次连续回流暴雨的平均环流场及其低频传播特征的差异, 并与6月广东北部锋面型连续暴雨进行对比分析。结果表明, 4~5月两次以阳江为中心的西南部连续暴雨及前汛期降水均具有准23天振荡, 它们分别为有、无明显冷空气影响的连续回流暴雨且对应的大气环流场及低频传播特征具有明显的不同: 4月12~14日连续回流暴雨期间, 500hPa中高纬度具有稳定的“西阻”和“东阻”, 使冷空气不断地从东海入海高压的南部东移南下, 925hPa形成以阳江为中心相对干冷的强东南风与来自南海中南部从中南半岛转向的暖湿偏南风的辐合渐近线; 而5月23~26日连续回流暴雨期间, 500hPa华东~东海~黄海为稳定高压坝, 广东长时间处于高原槽前西南气流中, 地面上处于东海出海变性高压脊西南部及北部湾~西南低槽前, 925hPa形成以阳江为中心来自孟加拉湾的强偏南风与珠江口以东东南风的辐合渐近线。来自我国中部(东海以东)低频反气旋南侧(西南侧)逐渐加强南传的低频东北风(东南风)与从140°E附近的西太平洋西传(孟加拉湾东传)到广东并加强的低频北风(南风)汇合在广东西南部, 并有(无)与从南海中北部北传的低频气旋北侧低频东风相遇, 导致4月12~14日(5月23~26日)有(无)明显冷空气影响的连续回流暴雨发生。而6月广东北部为东亚深槽引导的冷空气与来自孟加强盛西南风交汇所产生的锋面型连续暴雨, 来自我国中部、孟加拉湾分别逐渐加强向南、向东传播到达广东的低频西南风, 与来自中纬度低频反气旋外围的干冷东北风交汇在江南或南海北部, 导致广东北部6月9~13日连续暴雨的发生。

**关键词** 连续回流暴雨 环流特征 传播特征 季节内振荡

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20136

## The Relation between Atmospheric intraseasonal Oscillation and the Continual Backflow Rainstorms in Guangdong during the First Rainy Season in 2019

Ji Zhongping<sup>1</sup>, YUAN Yanfen<sup>2</sup>, XU Yanhong<sup>3</sup>, Han Pucheng<sup>1</sup>, Fang Yichuan<sup>1</sup>, XIE Jiongguang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Guangdong Observatory, Guangzhou 510640

<sup>2</sup> Guangdong meteorological Observation and data Centre, Guangzhou 510080

<sup>3</sup> Guangdong Climate Center, Guangzhou 510640

**Abstract** In order to make better medium-term and extended-range forecast of continuous backflow rainstorms, wavelet analysis and Lanczos time filter were used to analyze the relation between daily precipitation and atmospheric intraseasonal oscillation during the first rainy season of Guangdong in 2019. The mean circulation of two backflow continuous rainstorms over southwest of Guangdong during April and May and its low-frequency

收稿日期 2020-03-20; 网络预出版日期

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

基金项目 国家重点研发计划(2018YFC1505806)、国家自然科学基金(41675096)、气象预报业务关键技术发展专项子项目YBGJXM(2020)4A-05)共同资助

Funded by National Key R&D Program of China (2018YFC1505806), National Natural Science Foundation of China (Grant 41675096), Meteorological Forecasting Operation Key Technology Development Program (Grant YBGJXM(2020)4A-05)

propagation characteristics were analyzed and compared with the frontal type continuous rainstorms over north of Guangdong during June. The results show that the two continuous backflow rainstorms near Yangjiang from April to May and the precipitation during the first rainy season exhibit quasi-23-day periodic oscillation. They are continuous backflow rainstorms with or without the influence of cold air, and their corresponding atmospheric circulation fields and low-frequency propagation are significantly different. During the continuous backflow rainstorms on April 12-14, there were stable "west blocking" and "east blocking" at middle and high latitudes at 500hPa, which made cold air continuously move southeast from the south of high pressure transformed over the East China Sea, and the convergence asymptote of relatively dry and cold strong southeast wind, and the warm humid southerly wind from the mid-southern South China Sea by Indochina Peninsula was formed near Yangjiang at 925hPa; During the continuous rainstorms on May 23-26, there was a stable high-pressure ridge over Eastern China~East China Sea~Yellow Sea at 500hPa, which kept Guangdong in the southwestern airflow came from the plateau trough for a long time, and Guangdong was in the southwestern of degenerative high pressure ridge from the East China Sea and in front of trough from Beibu Bay to southwest of China on the ground, and the convergence asymptote of strong southerly winds which came from Bay of Bengal centered in Yangjiang and southeast winds which came from east of the Pearl River Estuary, was formed at 925hPa. The low-frequency northeast wind (Southeast wind) from the south(southwest) of low frequency anticyclone in Central China(east of the East China Sea) was gradually strengthened southward, merged the enhanced low-frequency northerly (southerly) winds which came westward from western Pacific near 140 E (eastward from Bay of Bengal) in the southwest of Guangdong. And they encountered with (without) low-frequency eastern wind from the north of low frequency cyclone propagating northward from the mid-northern South China Sea, and finally resulted in the continuous backflow rainstorms with (without) obvious influence of cold air. But the frontal type continuous rainstorm during June was affected by convergence between cold air induced by deep East Asian trough and southwesterly from Bengal Bay. The enhanced low-frequency southwesterly propagated southwards and eastwards to Guangdong from mid China and Bengal Bay, and low-frequency cold dry northeasterly winds from the periphery of the mid-latitude anticyclone, converged at the south of Yangtze River or the north of South China Sea and led to the happening of the continuous rainstorm during June 9-13.

**Keywords** Continuous backflow rainstorm, Circulation characteristics, Propagation characteristics, Intraseasonal oscillation

## 1 引言

2019 年广东前汛期发生了多次强降水过程, 导致省内多地出现山洪、严重内涝与人员伤亡。如, 5 月 23-26 日广东西南部发生了连续暴雨, 阳江市江城区、阳东区、阳西县局部出现了特大暴雨, 发生较为严重的洪涝灾害, 低洼地区农田、村庄、道路受浸严重, 部分交通中断, 江城区、市区低洼地带水浸严重, 阳西县织篢河发生 10 年一遇洪水, 给人民生命财产造成严重损害。因此, 加强暴雨尤其连续暴雨过程的中期与延伸期预报, 提高预报时效, 为政府部门提供决策参考尤为重要。

由于华南前汛期暴雨可分为两类(华南前汛期暴雨编写组, 1986; 何立富等, 2016): 一类由冷空气~锋面等西风带低值系统引起, 另一类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。目前我国预报业务中使用的全球数值预报模式对暖区暴雨的预报能力十分有限, 高分辨率中尺度数值模式的预报效果也不尽人意(何立富等, 2016), 因此华南暖区暴雨研究也是近年的热点之一。回流暴雨被普遍认为是华南暖区暴雨的一种(广东省气象局《广东省天气预报技术手册》编写组, 2006; 叶朗明和苗峻峰, 2014; 何立富等, 2016; 刘瑞鑫等, 2019; 张亚妮等, 2019), 它一般出现在4月初~5月中旬, 主要为回流的东风与西南风的辐合所触发的中尺度暴雨。一般情况下, 出现回流暴雨是在前一股冷空气完全变性减弱, 变性脊东移出海, 而后一股冷空气

尚在长江流域或江南地区之时。但也有回流暴雨是由于冷空气东移入海后,华南西部处于入海高压后部,经南海回流的东南气流相对于孟加拉湾西南气流和越赤道气流是干冷的,不同性质气流汇合形成锋面、辐合线,造成仍属锋面降水性质的回流暴雨(林确略等,2015)。因此,有必要研究回流暴雨期间的冷空气活动及其对应的环流场特征,弄清回流暴雨的性质,减少漏报率,从而提高回流暴雨的预报准确率。

关于回流暴雨发生时的大气环流场与中尺度特征已有较多的研究,对回流暴雨期间的冷空气活动除在华北回流暴雨的研究中较常见外,在华南回流暴雨的研究中较少见。如,张迎新和张守保(2006)对华北回流暴雨的研究表明,来自东北平原的低层冷空气虽然经渤海侵入华北平原,但仍然保持干冷气团的特性,在降水中起“冷垫”作用。张守保等(2009)发现回流冷空气与西南暖湿气流相遇产生的辐合带中存在中尺度低压和切变,使华北出现回流强降水过程。马鸿青等(2010)对河北一次春季回流暴雨过程的分析表明,暴雨发生在地面冷锋后部,由近地面层超低空东北风急流与其上层偏南急流相遇形成的回流所致。张晓美等(2009)、叶朗明和苗峻峰(2014)对华南回流暴雨的研究表明,回流暴雨多发生在变性冷高压脊后部,连续生消的中 $\beta$ 尺度对流系统活动造成回流暴雨过程的发生,它们在地面倒槽的辐合气流或较强的超低空东南急流遇到喇叭口地形形成的地面辐合线中发展起来。张亚妮等(2019)研究了在低层浅薄偏东风与西南风气流汇合为暖区暴雨提供有利的低层辐合条件下,高层动力强迫对回流型华南暖区暴雨的影响。因此,有必要加强冷空气活动在华南回流暴雨中作用的研究。另外,关于华南强降水过程或连续暴雨已有较多的研究,主要从气候特征及其成因(谢炯光等,2012;陈思等,2017)、环流形势(谢炯光等,2006;林爱兰等,2013;徐明等,2016)、低频振荡特征(温之平等,2007;谷德军和纪忠萍,2011;曹鑫等,2012;高建芸等,2013;简茂球和张春花,2013)开展了一些研究,但关于连续回流暴雨的低频及其传播特征的研究仍较少。

2019年4~6月广东各月均出现了3天以上的连续暴雨过程,且4~5月两次连续暴雨主要出现在西南部,6月主要出现在广东北部,这与前汛期气候平均场上广东雨带自北向南逐渐南移有明显不同,目前业务预报常用的全球数值预报模式(ECMWF细网格( $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ )、NCEP\_GFS( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ))在中短期预报时效内对这两场出现在西南部的连续暴雨均漏报。初步分析表明,4~5月的连续暴雨均与冷高压入海引起的回流有关,6月连续暴雨为锋面型暴雨。那么,4~5月的连续回流暴雨为何种性质?2019年广东前汛期降水尤其是连续回流暴雨与大气季节内振荡的关系如何?2019年南海季风于5月5日爆发,那么发生在季风爆发前后的广东西南部两场连续回流暴雨对应的平均环流场及其低频传播特征有何不同?它们与6月广东北部锋面型连续暴雨有何不同?因此,本文首先分析了2019年广东前汛期降水尤其是连续回流暴雨与大气季节内振荡的关系,并对4~5月两场连续回流暴雨及6月连续暴雨期间的冷空气活动、平均环流场及其低频传播与低层低频风场演变特征进行了对比分析,以期为今后广东前汛期连续回流暴雨的中期与延伸期预报提供参考。

## 2 资料与方法

所用资料主要有:(1)2019年4月1日—6月30日广东省86站地面逐日降水、气压( $P$ )、温度( $T$ )、绝对湿度( $e$ )资料,它们来自广东省气象探测数据中心;(2)NCEP/NCAR逐日再分析资料( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ );(3)美国NOAA地球系统研究实验室提供的OLR资料([ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/uninterpolr/\[2020-02-05\]](ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/uninterpolr/[2020-02-05]))。

采用墨西哥帽(Mexican hat)小波变换(纪忠萍等,1999;谷德军等,2009)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。

连续暴雨过程的定义采用谢炯光等(2006)的定义,即“在每日的雨量图上(08:00—08:00),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。凡广东省暴雨日持续3 d以上者,称为一次连续暴雨过程。”

冷空气的活动参考广东省气象台中期科关于“冷空气记载的规定”,即在毗邻的日期, $P$ 、 $T$ 、 $e$ 三要素的24小时变化(即 $+\Delta P$ (升压)、 $-\Delta T$ (降温)、 $-\Delta e$ (降湿))有两项起反映,可视为有冷空气。用 $P$ 、 $T$ 、 $e$ 任一要素项来反映某次冷空气的强度等级(表1)。

表 1 冷空气强度级别的确定

| Table 1 Definition of cold air intensity levels |            |             |             |
|-------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|
| 冷空气级别                                           | 24 小时变量之下界 | 48 小时变量之下界  | 72 小时变量之下界  |
| 特强                                              | $\geq 8.0$ | $\geq 10.0$ | $\geq 12.0$ |
| 强                                               | $\geq 6.0$ | $\geq 8.0$  | $\geq 10.0$ |
| 中等                                              | $\geq 4.0$ | $\geq 6.0$  | $\geq 8.0$  |
| 弱                                               | $\geq 2.0$ | $\geq 4.0$  | $\geq 6.0$  |
| 微弱                                              | $< 2.0$    | $< 4.0$     | $< 6.0$     |

注：变量代表气压（单位：hPa）、温度(单位：℃)、绝对湿度(单位：g/kg)中的任一要素。

### 3 2019年广东前汛期降水的变化与低频特征

#### 3.1 前汛期降水的时间分布与低频特征

图 1 给出了 2019 年 4~6 月广东 86 站平均逐日降水量及其小波系数与小波功率谱分析。由图 1a 可见，2019 年广东前汛期主要出现了 6 次强降水时段且与 7~30 天滤波的峰值时段一致：4 月 11~22 日、4 月 26~27 日、5 月 4~8 日、5 月 23~29 日、6 月 9~13 日和 6 月 24~25 日，其中 4 月 18~19 日、5 月 28~29 日出现了持续 2 天暴雨，4 月 12~15 日、5 月 23~26 日、6 月 9~13 日出现了 3 天以上的连续暴雨过程。由图 1b 可见，4~6 月小波系数呈现 6 对明显的“负”、“正”相间分布，它们代表前汛期降水经历了少雨~多雨的 6 个阶段性变化；6 次强降水时段分别对应准 23 天、5~8 天、8~10 天、23~25 天、9~12 天、7~12 天左右的准周期振荡。其中前 2 次连续暴雨过程(4 月 12~15 日、5 月 23~26 日)均与准 23 天周期振荡对应、而 6 月 9~13 日连续暴雨与准 9~12 天周期振荡相对应，且强降水时段对应的周期均能够通过 0.05 显著性水平检验。从图 1c 小波功率谱分析可见，存在一个准 23 天的峰值，代表整个前汛期的主要周期为准 23 天。因此，4~5 月两次连续暴雨均与准 23 天周期振荡对应,它们与前汛期降水的主要周期振荡一致。

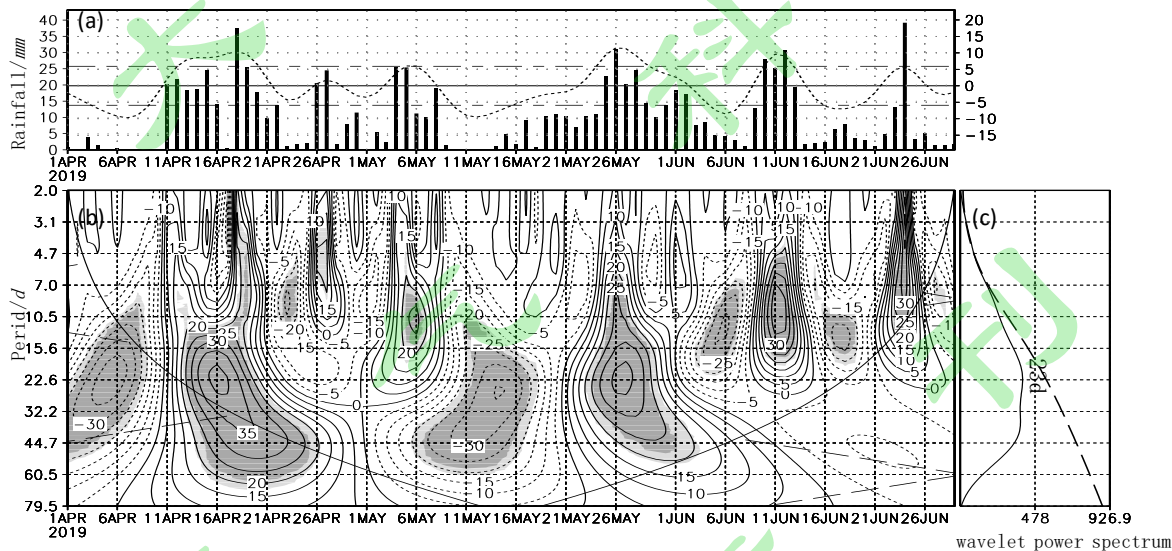


图 1 2019 年 4~6 月广东 86 站平均逐日降水量(a,单位:mm)及其小波分析(b)与小波功率谱(c)。图 1a 中直方图表示逐日降水量,细虚线为 7~30 天滤波降水演变;图 1b 中浅色和深色阴影区表示超过 0.10 和 0.05 显著性水平的区域,两边的交叉区域表示边界效应的影响域;图 1c 中虚线为 0.10 显著性水平值,显著性检验采用了 Monte-Carlo 方法

Fig.1 (a)The daily precipitation averaged at 86 stations in Guangdong from April to June 2019 (unit: mm), (b) its wavelet transform coefficient, based on the Mexican hat wavelet, and (c) its mean global wavelet power spectrum. The bar and thin dashed line in (a) is daily precipitation and filtered precipitation between 7 and 30 days, respectively; The light and dark shaded areas in (b) represent the regions with statistical significance at 0.10 and 0.05 levels, respectively. The cross-hatched regions at both ends indicate the areas with boundary effects. The dashed line in (c) represents statistical significance at the 0.10 level, based on the Monte-Carlo method).

### 3.2 连续暴雨过程的空间分布特征

为了了解连续暴雨的空间分布特征,图2给出了2019年4月12~15日、5月23~26日、6月9~13日广东连续暴雨过程累计雨量(mm)分布。可见,4月12~15日总降水量在100 mm以上的区域主要分布在以阳江为中心的西南部及佛岗到河源一带(图2a),它们均是广东三大暴雨中心之一,其中以阳江为中心的西南部降水最大,遂溪~吴川~电白~阳江~上川岛较历年同期偏多6.4~8.8倍(图略);5月23~26日总降水量在100 mm以上的区域主要分布在以阳江为中心的西南部一带(图2b),斗门~台山~恩平~上川岛~阳江较历年同期偏多2.5~9倍左右(图略)。6月9~13日总降水量在200mm以上的区域主要分布在以连县~乐昌为中心的西北部偏北及以龙门~连平~和平~兴宁为中心的东北部偏东(图2c),它们较历年同期偏多2.5~4.5倍左右(图略)。因此,2019年4~5月的两次连续暴雨中心均在以阳江为中心的西南部,而6月的连续暴雨主要出现在西北部偏北~东北部偏东一带。

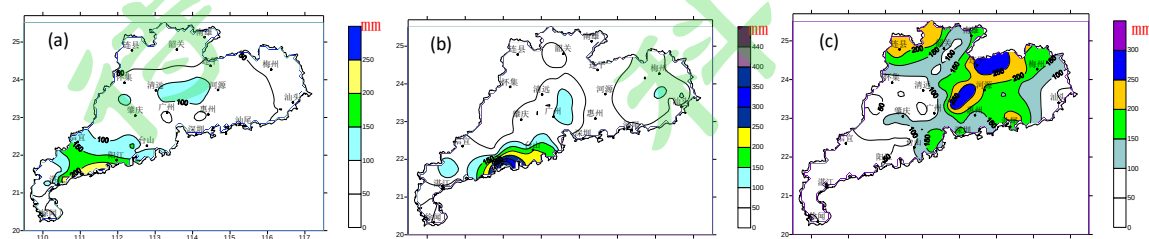


图2 2019年4~6月广东3次连续暴雨过程累计雨量(mm)((a)4月12~15日、(b)5月23~26日、(c)6月9~13日)

Fig.2 The cumulative rainfall of three continuous heavy rains in Guangdong in April-June 2019 (mm) ((a) April 12-15, (b) May 23-26, and (c) June 9-13).

### 3.3 连续暴雨过程与冷空气活动

为了弄清连续暴雨的性质,需要了解连续暴雨期间是否有冷空气活动。图3给出了2019年4~6月阳江逐日平均气压( $P$ )、温度( $T$ )和绝对湿度( $e$ )的变化。可见,4月12~15日、6月9~13日连续暴雨期间,4月12日、14~15日与6月11日,阳江单站 $P$ 、 $T$ 、 $e$ 三要素的24小时变化存在明显或弱的上升、下降、下降(即 $+\Delta P$ 、 $-\Delta T$ 、 $-\Delta e$ )。对照表1,可知4月12日、14~15日、6月11日阳江分别受中等偏强、微弱、弱冷空气影响;而5月23~26日连续暴雨期间,阳江单站 $P$ 、 $T$ 、 $e$ 三要素的24小时变化只有在5月24日(25日)存在微弱的上升(下降)、下降(下降)、下降(下降),说明连续暴雨期间不存在明显的升压、降温、降湿,即无明显冷空气影响。因此可以认为,5月23~26日为无明显冷空气影响的连续暖区暴雨,其余2次(4月12~15日、6月9~13日)为有明显冷空气影响的连续暴雨。

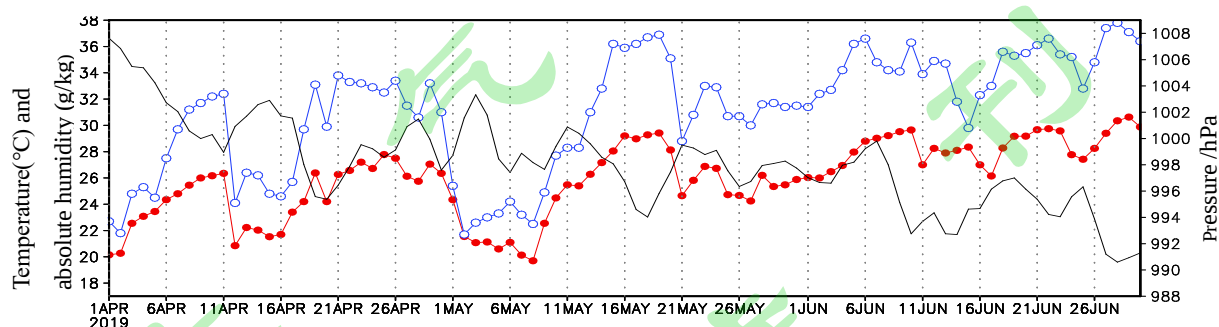


图3 2019年4~6月阳江逐日平均气压(实线,单位:hPa)、温度(●,单位:℃)、绝对湿度(○,单位:g/kg)的变化。

Fig.3 Daily pressure (solid line, unit: hPa), temperature (●, unit: °C) and absolute humidity (○, unit: g/kg) evolution of Yangjiang from April to June 2019.

## 4 连续暴雨过程的大气环流场特征

谢炯光等(2006)的研究表明,一次连续暴雨过程只出现在一个区的可能性非常小,多数情况是几个区分别出现。从连续暴雨期间逐日暴雨的落区分布(图略)可知,2019年4月12~15日、5月23~26日的连续暴雨除4月15日主要出现在西北部和中部外,其余时间均主要出现在以阳江为中心的西南部。由于这两次连续暴雨对应的强降水过程均具有准23天左右的周期振荡,且ECMWF细网格( $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ )、NCEP\_GFS( $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ )全球数值预报模式在中短期预报时效内对发生在西南部的这两次连续暴雨过程均存在明显的漏报现象。那么,这两场落区均在以阳江为中心的西南部连续暴雨对应的平均环流场有何特征?它们与6月主要出现在北部的连续暴雨有何不同?

图4给出了2019年4~5月两次发生在以阳江为中心的西南部连续暴雨过程平均的500hPa高度场、850hPa风场、925hPa风场叠加500hPa垂直运动 $\omega$ 场及海平面气压场的分布。可见,4月12~14日连续暴雨期间,500hPa高度场上(图4a),中高纬度呈二脊一槽型,欧洲与鄂霍次克海附近为高压脊及明显的正距平控制,乌拉尔山以东~贝加尔湖以北~东北亚~日本海~东海为极涡与南压的东亚大槽及明显的负距平控制;中低纬度亚洲~东亚沿海为一脊一槽型,巴尔喀什湖~亚洲大陆为西北~东南走向的高压脊及明显的正距平控制,东亚大槽位于日本及以南,槽底可达 $25^{\circ}\text{N}$ 附近。低纬度,西太平洋副高北缘稳定在南海北部~中南半岛及其以西,584dagpm线位于华南北部~台湾中部一带。这种连续暴雨的大尺度环流形势与鲍名(2007)总结的华南型暴雨所需的冷空气多来自于西高东低环流型的东亚深槽、西太平洋副高稳定维持是一致的。与谢炯光等(2006)总结的广东连续暴雨对应的中高纬度具有十分稳定的“西阻”和“东阻”也是一致的。850hPa风场上(图4b), $30\sim 35^{\circ}\text{N}$ 附近的华中~华东为高压环流控制,云南~贵州~广西为气旋性环流控制,广东~江南为西太平洋副高边缘的偏南风控制,偏南风的大风轴位于广东~广西交界处;925hPa风场和500hPa垂直运动 $\omega$ 场上(图4c),华东~江南为入海高压环流控制,江南~华南为一致的从入海高压南部回流的干冷偏东~东南风控制,中南半岛为从南海中南部转向的偏南风控制。从入海高压南部回流的相对干冷的偏东~东南气流与暖湿的偏南气流在广东西南部上空汇合,由于东南风的大风轴中心在阳江,形成了以阳江为东南风大风轴的辐合渐近线,并在广东上空形成以西南部为中心的垂直运动上升区,造成以阳江为中心的连续暴雨的发生。地面上(图4d),冷高压中心在东海附近,广东为入海高压底部的高压脊控制,等压线呈西北~东南走向。林确略等(2015)也揭示了类似的回流暴雨环流形势。他们还发现,当前汛期边界层为东南风时,就会形成随高度由东南风顺转为西南风的垂直结构,有利于对流有组织地发展(俞小鼎等,2006)。特别是当边界层东南风加大时,高低层的垂直风切变增强,水平螺旋度也增加,从而使暴雨增强。因此,由于中高纬度具有稳定的“西阻”和“东阻”,使巴尔喀什湖~亚洲大陆的冷空气源源不断地从东海入海高压的南部东移南下,造成低层以阳江为中心相对干冷的强东南风长时间维持,并与来自南海中南部从中南半岛转向的暖湿偏南风汇合,形成以阳江为东南风大风轴中心的辐合渐近线,造成以阳江为中心有明显冷空气影响的连续回流暴雨的发生。

5月23~26日连续暴雨期间,500hPa高度场上(图4e), $60^{\circ}\text{N}$ 以北的高纬主要为极涡及其东扩的环流控制,中纬度的环流相对平直,东亚大槽位于日本海及日本东南部,华西~华南地区为阶梯槽控制,云贵高原附近为明显的高原槽及明显的负距平控制,华东~东海~黄海为高压脊及明显的正距平控制并形成高压坝,对高原槽的移动起到了阻挡作用,使其移动缓慢,并使广东长时间处于高原槽前强盛的西南气流控制;副高较弱,位于南海南部。这与陈翔翔等(2012)分析影响暖区暴雨的高空槽以高原槽为主一致。850hPa风场上(图4f),东海~日本及其以南为出海变性冷高压环流控制,华南~江南~华东为一致的来自孟加拉湾穿过中南半岛的强盛西南风控制,且西南风的大风轴中心也位于在广东西部,广东西南部处于云南~贵州~广西~北部湾气旋性弯曲东侧的西南风大风轴右侧。925hPa风场和500hPa垂直运动 $\omega$ 场上(图4g),东海~日本及其以南仍为出海变性的冷高压环流控制,珠江口以西为来自孟加拉湾穿过中南半岛的一致强盛偏南风控制、且偏南风的大风轴中心位于以阳江为中

心的西南部,珠江口以东为出海变性冷高压环流西南部的东南风控制,它们在珠江口附近形成辐合渐近线,并在广东西部~湖南~江西形成垂直运动的强烈上升区,造成以广东西南部为中心连续暴雨的发生。地面上(图4h),冷高压中心在东海~日本南部并经福建沿海伸向广东东部,使广东中东部为出海的变性高压脊控制,北部湾~西南地区为低压槽控制。这种连续暴雨的中低层天气系统配置与《广东省天气预报技术手册》编写组(2006)总结的暖区回流暴雨对应的大气环流场基本一致,与何立富等(2016)总结的边界层辐合线型暖区暴雨也基本一致。因此,由于华西区为阶梯槽控制,云贵高原附近为明显的高原槽控制,华东~东海~黄海高压坝的稳定维持,使广东长时间处于高原槽前西南气流中,地面上处于东海出海高压脊西南部及北部湾~西南低槽前,在925hPa形成以阳江为中心来自孟加拉湾的强偏南风与珠江口以东来自东海出海变性高压脊西南侧东南风的辐合渐近线,导致以阳江为中心的西南部无明显冷空气影响的连续回流暴雨发生。

6月9~13日连续暴雨期间,500hPa高度场上(图5a),中高纬度呈稳定的二脊二槽型,欧洲~乌拉尔山与30°N以北的我国大部分地区~贝加尔湖~东北亚均为稳定的高压脊及正距平控制,巴尔喀什湖以北为极涡与南压的高空槽及负距平控制,黄海~东海~日本以东洋面为槽底可达台湾及其以东洋面的东亚大槽控制,即东亚大陆及其沿海维持稳定的西高东低环流型,有利于冷空气沿着华东~东海南下;低纬度,西太平洋副高西脊点可达中南半岛,华南沿海为副高边缘的偏西气流控制。850hPa风场(图5b)与925hPa风场和500hPa垂直运动 $\omega$ 场上(图5c),华北~华中~黄海~长江流域~江南为冷高压环流控制,华南为一致的来自孟加拉湾穿过中南半岛的强盛西南风控制,它们与冷高压环流底部的干冷偏东气流相遇在广东北部~江南,具有明显的辐合上升运动(图5c),利于形成锋前西南风急流暴雨或者冷锋暴雨(华南前汛期编写组,1986),造成以广东北部为主的连续暴雨发生。地面上(图5d),冷高压位于东海~黄海~日本以北,北部湾~华南~江南大部分地区为低压槽控制,使冷空气沿着华东~东海南下,与低压槽前暖湿气流在江南~广东北部相遇,形成锋前西南风急流暴雨或者冷锋暴雨。因此,由于东亚大陆及其沿海维持稳定的西高东低环流型,东亚大槽槽底可达台湾及其以东洋面,使冷空气沿着华东~东海南下,它们与来自孟加拉湾穿过中南半岛的强盛西南风在江南~广东北部形成明显的冷暖对峙,形成锋前西南风急流暴雨或者冷锋暴雨,造成以广东北部为主的锋面型连续暴雨发生。

为了解连续暴雨过程的水汽输送情况,图6给出了2019年4~6月广东三次连续暴雨的925hPa水汽通量矢量与散度。可见,4月12~14日连续暴雨过程(图6a),水汽主要来源于台湾~菲律宾东面的热带西太平洋及热带西太平洋穿过菲律宾南部到达南海中北部转向的水汽输送,并在江南~广东形成以广东西部为中心的明显水汽通量辐合;5月23~26日连续暴雨过程(图6b),水汽除了来源于台湾~菲律宾东面的热带西太平洋,还有来自105°E附近在中南半岛南部转向经南海中北部到达及来自孟加拉湾经中南半岛转向北上的两条水汽输送通道,它们在长江口~广东西部形成明显的水汽通量辐合;而6月9~13日的连续暴雨过程(图6c),水汽主要来源于孟加拉湾穿过中南半岛到达广东的强西南风水汽输送通道,它们与来自东海的弱东风在江南~华南北部形成明显的水汽通量辐合,且辐合中心在25°N附近的华南北部。因此,上述2019年4~6月三次连续暴雨的水汽分别来源于台湾~菲律宾东面的热带西太平洋和南海中北部,台湾~菲律宾东面的热带西太平洋、南海中北部和孟加拉湾,以及孟加拉湾。这与林爱兰等(2013)研究广东前汛期持续性暴雨过程的主要水汽来源随月份发生变化一致。

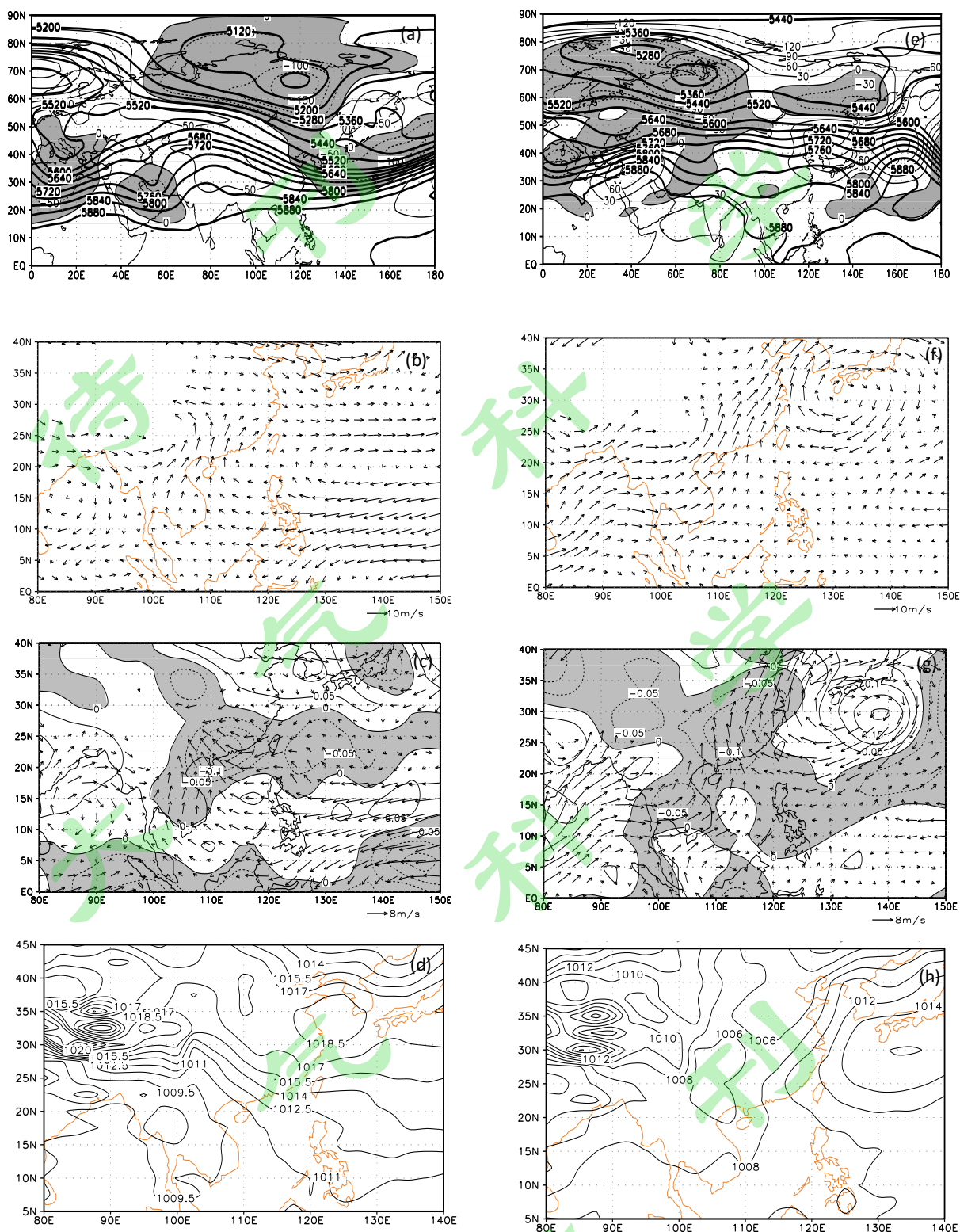


图4 2019年广东西南部两次连续回流暴雨过程(4月12~14日(a~d)、5月23~26日(e~h))平均的:(a)、(e)500hPa高度场及其距平场(单位: dagpm,阴影区为负距平), (b)、(f)850hPa 风场(m/s), (c)、(g)925hPa 风场(m/s)和500hPa垂直速度(hPa/s)、(d)、(h)海平面气压场(hPa)。

Fig.4(a)、(e) The averaged 500hPa height and its anomalies(unit: dagpm, shadowed area is negative anomaly), (b)、(f)850hPa wind (unit:m/s), (c)、(g)925hPa wind (unit:m/s) and 500hPa vertical velocity (unit: hPa/s), (d)、(h) sea level pressure (unit: hPa) for the two continuous backflow rainstorm in southwestern Guangdong on 12-14 April 2019 (a-d) and 23-26 May 2019(e-f).

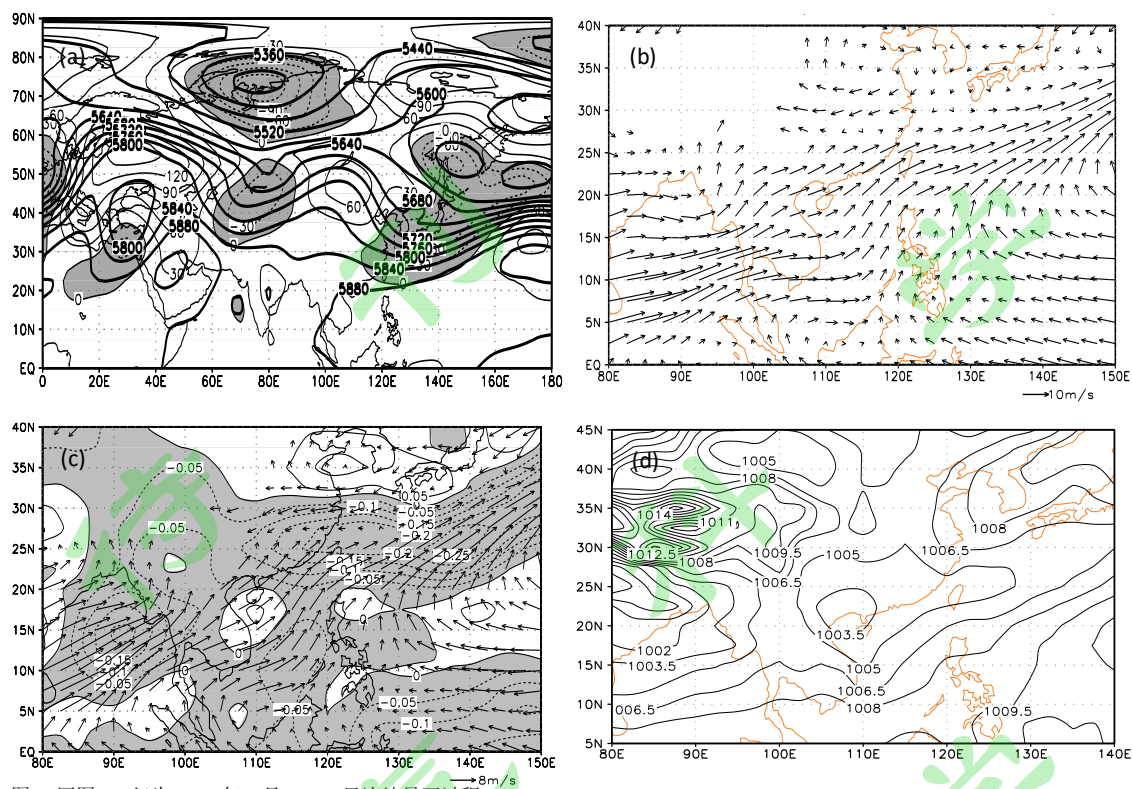


图5 同图4，但为2019年6月9~13日连续暴雨过程  
Fig.5 Same as fig.4, but for continuous rainstorm on 9-13 June 2019.

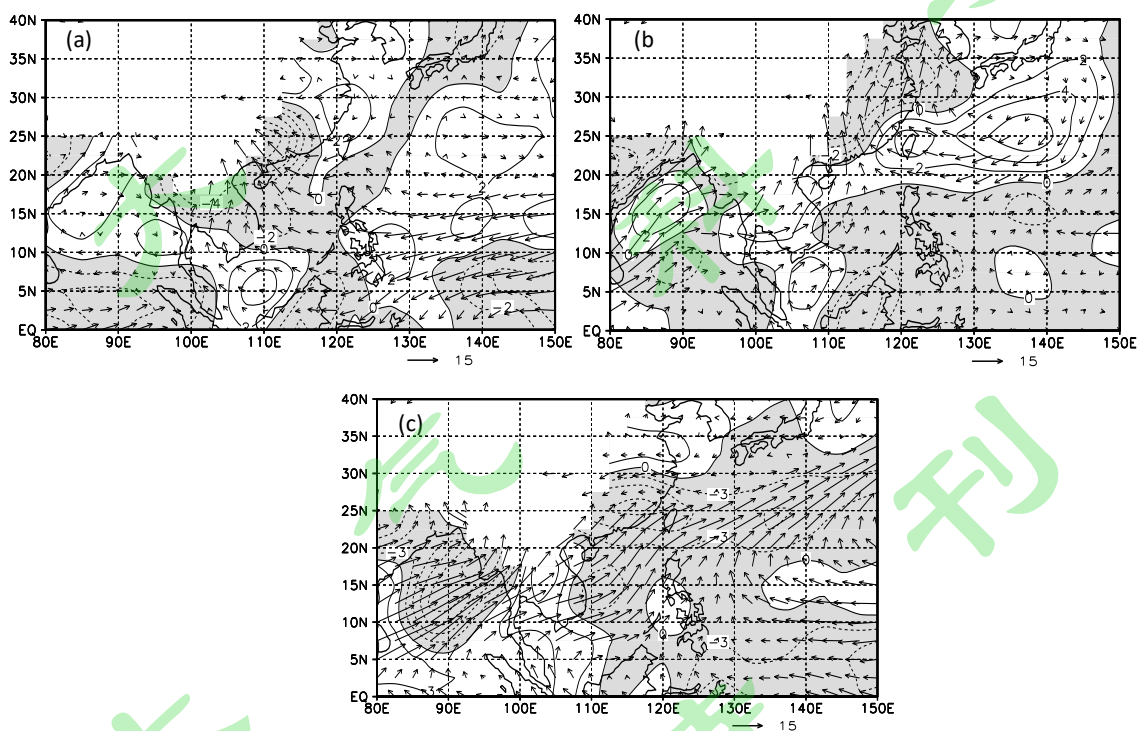


图6 2019年4~6月广东3次连续暴雨过程的925hPa水汽通量( $\text{g}/(\text{s hPa cm})$ )和水汽通量散度( $10^{-6}\text{g}/(\text{s hPa cm}^2)$ )  
(a) 4月12~14日; (b) 5月23~26日; (c) 6月9~13日)

Fig.6 925hPa water vapor flux(unit:  $\text{g}/(\text{s hPa cm})$ ) and water vapor flux divergence(unit:  $10^{-6}\text{g}/(\text{s hPa cm}^2)$ ) in the three continuous heavy rainstorm in Guangdong in April-June 2019. ((a)April 12-14; (b)May 23-26; and (c)June 9-13)

## 5 大气季节内振荡对连续暴雨的影响

### 5.1 大气季节内振荡的经向与纬向传播对连续暴雨的影响

据建华等（2007；2008）的研究表明，夏季东亚季风区大气季节内振荡(ISO)的传播分为经向传播和纬向传播，其中经向传播主要表现为在 $30^{\circ}\text{N}$ 以南地区从赤道向北传播和 $30^{\circ}\text{N}$ 以北地区向南传播的特征，纬向传播则是分别起源于印度季风区的ISO东传和起源于西太平洋海域的ISO西传。那么，大气季节内振荡的经向和纬向传播对2019年4~5月连续回流暴雨的影响如何？它们与2019年6月广东北部锋面型连续暴雨的低频传播特征有何不同？

对2019年4~6月925hPa纬向风、经向风及OLR分别进行7~30天的Lanczos滤波，并作它们沿 $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 平均的纬度-时间剖面图（图7）与 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 平均的经度-时间剖面图（图8）。

从图7可见，4月12~14日连续回流暴雨期间，对应中心值为负值的7~30天低频纬向风、经向风、OLR从 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 附近的我国中部逐渐向南传播到广东并加强的过程，当该中心向南加强传播到广东，并与从南海中北部向北传的低频纬向风、OLR负值相遇，加强为强负值中心即强的低频东北风并伴有对流发展时，正好对应该次有冷空气影响的连续回流暴雨过程。

5月23~26日连续回流暴雨期间，对应5月中旬后期低频纬向风的负值中心从 $35^{\circ}\text{N}$ 附近的我国中部逐渐向南传播到广东并加强的过程，但低频经向风、OLR则分别主要对应其正值、负值于5月下旬初从 $35^{\circ}\text{N}$ 附近逐渐向南并在江南加强传播到广东的过程，当它们向南传播到广东并伴有对流发展时，正好对应该次无明显冷空气影响的连续回流暴雨过程。另外，5月下旬初，伴随低频经向风的向南传播，低频纬向风的正值中心也向南传播到 $26^{\circ}\text{N}$ 附近的江南，广东对应其底部负值的南传，说明连续回流暴雨期间主要对应低频东南风从江南逐渐南传到广东的过程。

6月9~13日连续暴雨期间，主要对应6月上旬初低频纬向风、经向风的正值中心及OLR的负值从 $35^{\circ}\text{N}$ 附近的我国中部逐渐向南传播到广东并加强的过程。这与以往的研究（据建华等，2007，2008；谷德军和纪忠萍，2011）得到的“强降水过程多与纬向风的正值中心相对应、而降水过程的间歇期多与纬向风的负值中心相对应”一致，但与4~5月两次连续回流暴雨与纬向风的负值中心即强东风距平对应应有明显的不同。从上面的分析可知，导致这种相反变化的原因与这两次连续暴雨由强东风回流所造成有关。

从图8可见，4月12~14日连续回流暴雨期间，在 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 的低频纬向风、经向风、OLR均存在一个明显的负值中心，低频经向风于4月上旬末从 $140^{\circ}\text{E}$ 附近的西太平洋负值中心逐渐西传到广东并加强，并与本地加强的低频纬向风、OLR的负值中心相遇，形成强的低频东北风距平，导致该次连续暴雨过程。而在5月23~26日连续暴雨期间，在 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 的低频纬向风、经向风、OLR分别存在一个明显的负、正、负值区，对应5月中旬末低频纬向风、经向风从 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 的印度季风槽区经青藏高原南侧逐渐向东传到广东且经向风的正值存在明显加强的过程，并与5月下旬初从 $105^{\circ}\text{E}$ 附近加强东传的OLR负值相遇，导致该次连续暴雨过程。造成这两次连续暴雨经向传播不同的原因，可能与它们分别发生在南海季风爆发（5月5日）前、后有关。从图4中的850hPa风（图4b、4f）、925hPa风场（图4c、4g）可见，4月12~14日连续暴雨期间，孟加拉湾中北部为反气旋环流控制， $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 的青藏高原南部为弱的西南风~西北风且只能传播到 $102.5^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$ 的云南附近，未能传播到广东；而5月23~26日连续暴雨期间，孟加拉湾中北部为一致的强盛西南季风控制， $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 的青藏高原南部为西南~偏西风控制，来自孟加拉湾的强盛西南季风穿过中南半岛并在北部湾~广东西南部转向为偏南风，它们对应经向风即偏南风的加强东传。

另外，6月9~13日连续暴雨期间，在 $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 的低频纬向风与经向风、OLR分别存在明显的正值区、负值区，低频纬向风与经向风主要从 $105^{\circ}\text{E}$ 附近的中南半岛北部东传到广东，而OLR则无明显的传播特征。

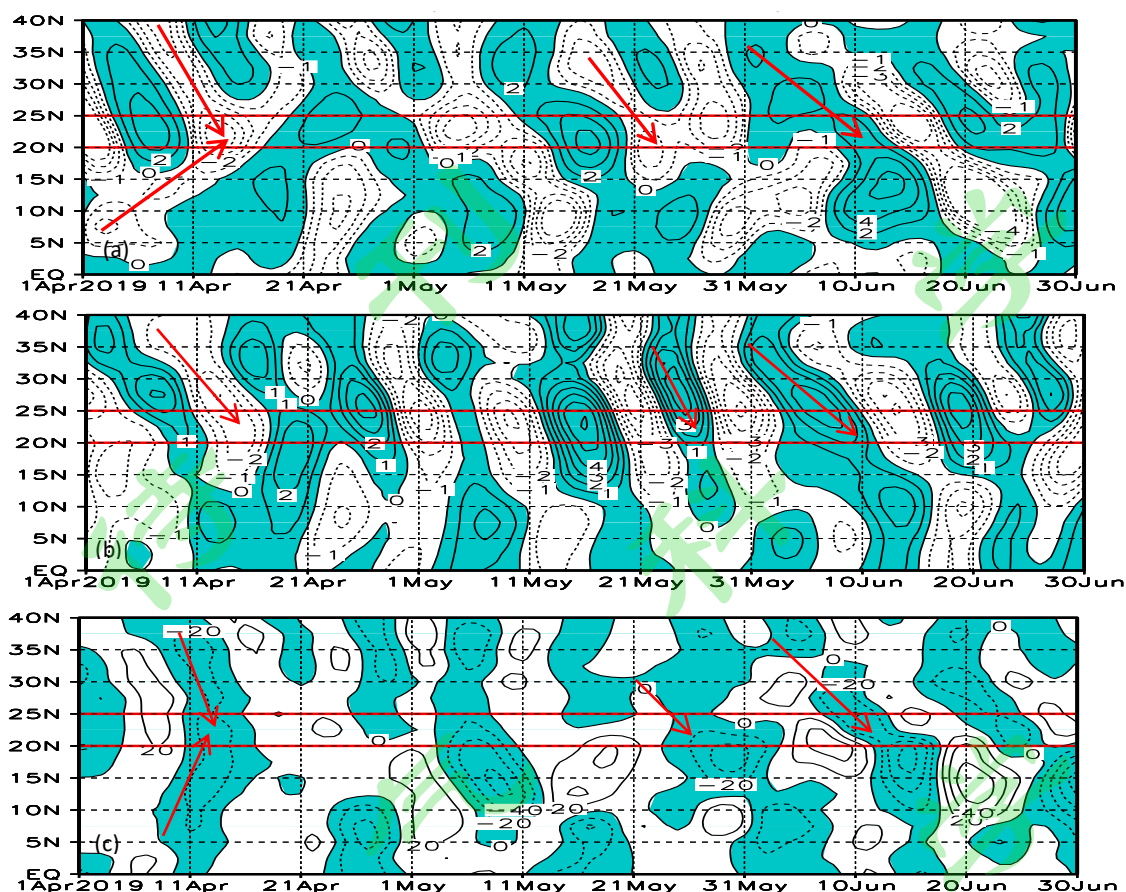


图7 2019年4—6月925 hPa 110~115°E 平均的低频(7~30天)纬向风 (a)、经向风 (b) (单位: m/s)、OLR (c,单位:  $W/m^2$ ) 的纬度-时间剖面图。

Fig.7 The low frequency (7-30 days) latitude-time profile averaged over 110-115°E from April to June 2019, 925 hPa zonal wind (a, unit: m/s), meridional wind (b, unit: m/s) and OLR (c, unit:  $W/m^2$ ).

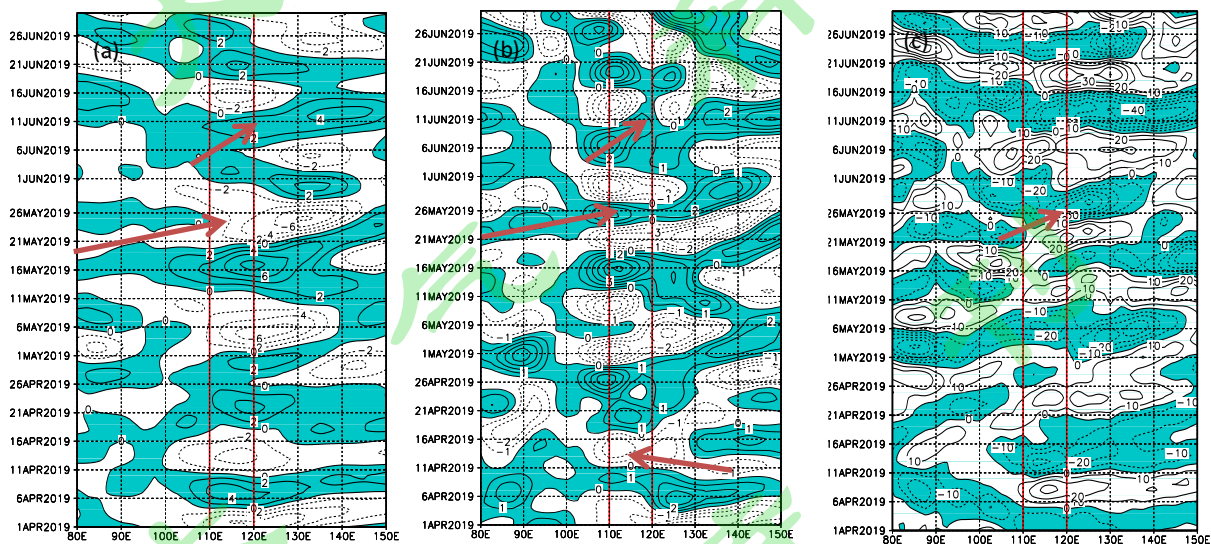


图8 2019年4~6月925 hPa 20~25°N 平均的低频(7~30天)纬向风 (a)、经向风 (b) (单位: m/s)、OLR (c,单位:  $W/m^2$ ) 的经度-时间剖面图。

Fig.8 The low frequency (7-30 days) longitude-time profile averaged over 20-25°N from April to June 2019, 925 hPa zonal wind (a, unit: m/s), meridional wind (b, unit: m/s) and OLR (c, unit:  $W/m^2$ ).

## 5.2 连续暴雨过程低层低频风场的演变特征

为了更清楚地了解季节内振荡的经向与纬向传播对广东 4~5 月连续回流暴雨过程及 6 月连续暴雨的影响, 图 9~11 分别给出了 2019 年 4 月 7~14 日、5 月 21~26 日、6 月 1~13 日的 925hPa 低频水平风场的演变。

从图 9 可见, 4 月 7 日到 10 日(图 9a、图 9b), 位于 35~40°N 附近我国华北~华中的低频东北风逐渐东移南压到长江流域, (20~25°N、140°E) 附近及其以东的西太平洋由西南风转为西北风控制; 低纬度, 位于南海西北部海面的反气旋式环流中心逐渐东北移到台湾东南部海面, 使华南由反气旋北侧的偏西风转为反气旋西北边缘的弱西南风控制, 降水偏少。另外, 在赤道以北、135°E 以东的热带西太平洋、菲律宾南部及其以东的热带西太平洋存在低频反气旋、气旋波列逐渐西北移, 使南海中南部逐渐转为气旋性环流控制, 气旋性环流北侧的偏东风也逐渐北抬到南海中部; 4 月 12 日到 14 日(图 9c、图 9d), 随着华北低频反气旋的东移南压, 低频反气旋南侧的东北风也从江淮流域逐渐加强东移南压到华南及其沿海, (20~25°N、140°E) 附近的西太平洋转为东北风控制且逐渐加强西传, 并在南海北部转为偏东~东北风, 到达珠江口及其以西沿海, 同时低纬度热带西太平洋的低频反气旋继续西北移, 南海中部的低频气旋则向北~东北移, 使南海中部低频气旋环流北侧的偏东气流继续北抬到达南海北部。因此, 来自我国中部低频反气旋南侧的低频干冷东北风逐渐加强南传, 与来自 140°E 附近的西太平洋西传并加强到达广东西南部的低频偏东~东北风相遇, 并与南海中北部逐渐北抬的低频气旋北侧暖湿的偏东风汇合, 导致 4 月 12~14 日以阳江为中心的广东西南部有明显冷空气影响的连续回流暴雨发生。

从图 10 可见, 5 月 21 日到 23 日(图 10a、图 10b), 随着中纬度的低频反气旋中心逐渐东移到东海, 江南逐渐转为低频东南风控制, 广东由强东北风转为来自东海低频反气旋西南侧的东北~东风回流控制, 连续回流暴雨开始。另外, 80~90°E 的孟加拉湾中北部也由偏东风转为西南风。5 月 25~26 日(图 10c、图 10d), 随着东海低频反气旋继续东移到日本以南海域, 来自东海低频反气旋西南侧的东南风从江南逐渐加强南压到广东, 使广东东部与珠江口以西转为东南风控制, 同时来自孟加拉湾中北部的西南风也不断东传并在中南半岛中北部转向为偏南风到达广西~广东西南部, 并在北部湾~广东西部~广西~贵州形成明显的气旋性环流, 使以阳江为中心的广东西南部处于气旋性环流东南侧的偏南风与从东海出海反气旋西南侧回流东南风的交汇处, 导致以阳江为中心的西南部连续回流暴雨的维持。因此, 来自我国中部从东海东移出海的低频反气旋西南侧的东南风, 从江南逐渐加强南压控制广东东部与珠江口以西, 与来自孟加拉湾中北部不断东传转向到达阳江的偏南风相遇, 导致 5 月 23~26 日以广东阳江为中心的西南部无明显冷空气影响的连续回流暴雨发生。

从图 11 可见, 6 月 1 日到 7 日(图 11a~图 11c), 随着黄海~日本的低频反气旋逐渐东移, 江淮低频气旋发展并逐渐东移出海, 江南~华南逐渐转为加强西伸并南压的西太平洋低频反气旋外围的西南风控制, 低频西南风也从 35~40°N 的我国华北~华中逐渐加强南压到江南~华南, 降水逐渐减少。低纬度, 南海南部的低频气旋(图 11a)逐渐西北移控制中南半岛南部(图 11c), 130~140°E 附近的赤道以北出现低频反气旋(图 11c); 6 月 9 日(图 11d), 低频反气旋控制我国华北~华中~江南, 来自西太平洋低频反气旋外围逐渐南压的西南风, 与来自南海南部加强西伸的低频反气旋西缘经孟加拉湾~中南半岛~南海北部北传转向的西南风汇合, 并与来自中纬度低频反气旋的干冷东北风交汇在江南, 使广东北部开始出现暴雨。6 月 11 日到 13 日(图 11e~图 11f), 我国华北~华中的低频反气旋逐渐东移到渤海, 低频反气旋西南部的干冷东北风逐渐南压到南海北部, 它们与来自南海南部低频反气旋西缘经孟加拉湾转向到达南海的西南风相遇在南海北部, 并在江南~广东~南海北部~台湾以东的西太平洋形成明显的低频气旋性环流, 导致连续暴雨的持续。

因此, 从上面的分析可见, 来自华中(东海东移出海)低频反气旋南侧(西南侧)逐渐加强南传的低频东北风(东南风)与从 140°E 附近的西太平洋西传(从 80~90°E 的孟加拉湾东传)到广东并加强的低频北风(南风)汇合在广东西南部, 并有(无)与从南海中北部北传的低频气旋北侧暖湿的低频东风相遇, 导致 4 月 12~14 日(5 月 23~26 日)有(无)明显冷空气影响的连续回流暴雨发生。而来自我国中部、孟加拉湾分别逐渐加强向南、向东传播到达广东的低频西南风, 与来自中纬度低频反气旋外围的干冷东北风交汇在江南或南海北部, 导致广东北部 6 月 9~13 日锋面型连续暴雨的发生。

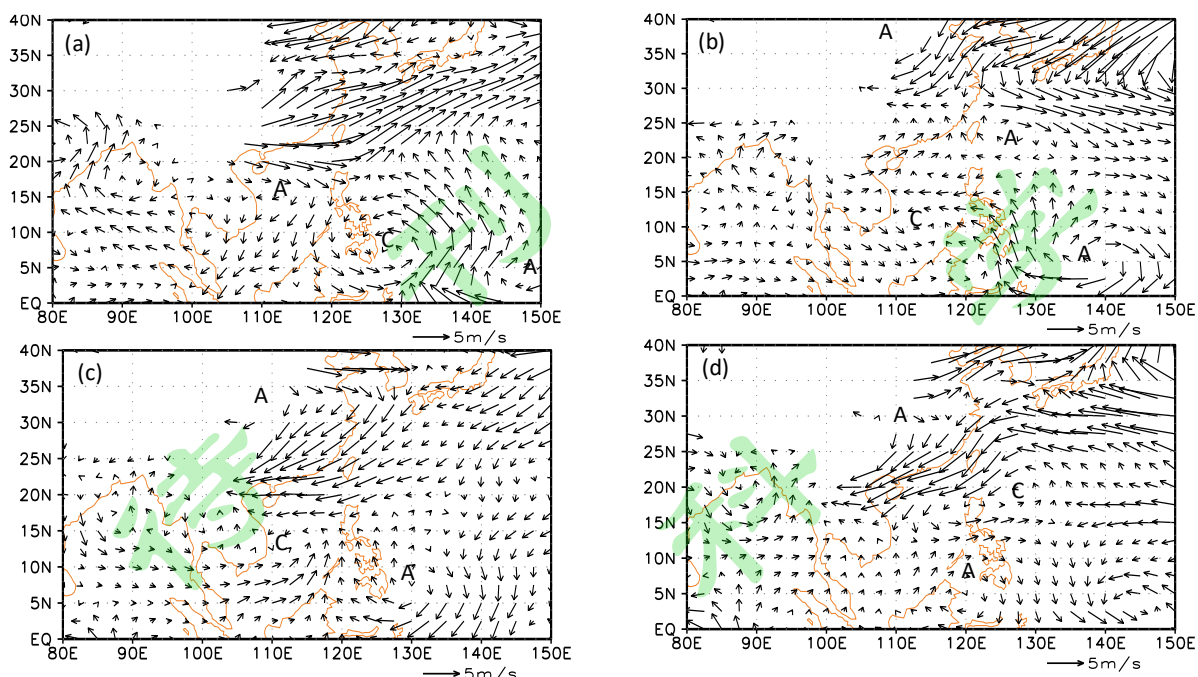


图9 2019年4月7~14日的925hPa低频水平风场(m/s). (a)4月7日; (b)4月10日; (c)4月12日; (d)4月14日.  
Fig.9 Evolution of low frequency horizontal wind (m/s) at 925hPa during 7-14 April 2019. (a)April 7; (b) April 10; (c)April 12 and (d)April 14.

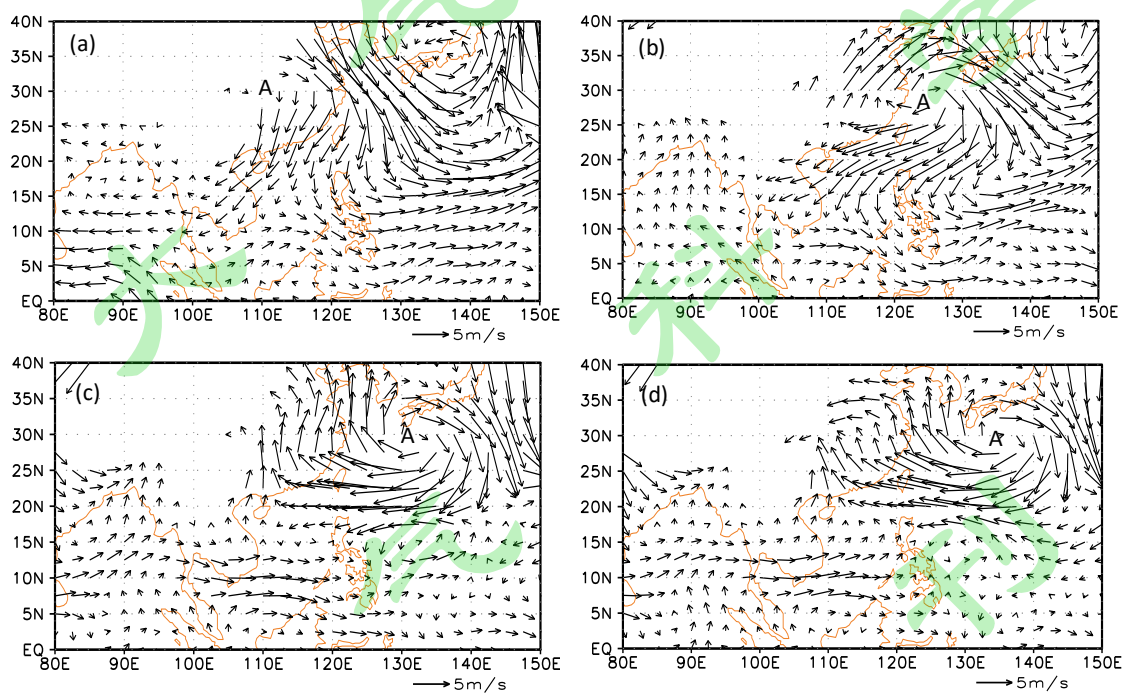


图10 同图9, 但为2019年5月21~26日. (a)5月21日; (b)5月23日; (c)5月25日; (d)5月26日.  
Fig.10 Same as fig.9, but for 21-26 May 2019. (a)May 21; (b)May 23; (c)May 25 (d) May 26.

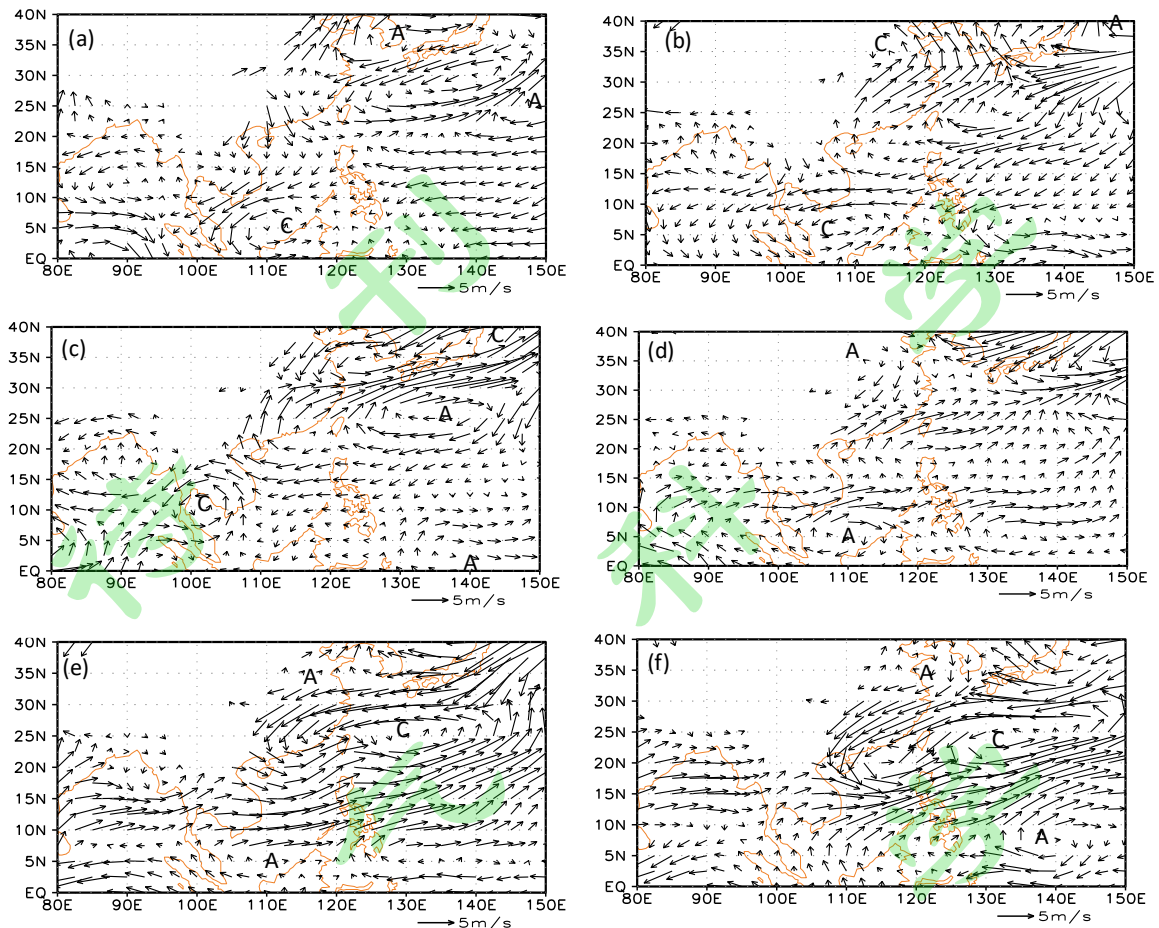


图 11 同图 9，但为 2019 年 6 月 1~13 日。(a) 6 月 1 日；(b) 6 月 4 日；(c) 6 月 7 日；(d) 6 月 9 日；(e) 6 月 11 日；(f) 6 月 13 日。

Fig.11 Same as fig.9, but for 1-13 June 2019. (a) June 1; (b) June 4; (c) June 7; (d) June 9; (e) June 11; and (f) June 13.

## 6 结论

通过对 2019 年 4~6 月广东前汛期降水及其季节内振荡特征进行分析，并对季风爆发前后 4~5 月两次连续回流暴雨及 6 月锋面型连续暴雨期间的冷空气活动、平均环流场、低频传播与低层低频风场演变特征进行了对比分析，可得到如下结论：

(1) 2019 年 4 月 12~15 日、5 月 23~26 日、6 月 9~13 日出现了连续 3 天以上的连续暴雨，其中 4~5 月两次连续暴雨的中心均在以阳江为中心的广东西南部，而 6 月的连续暴雨主要出现在广东西北部偏北~东北部偏东一带。除 5 月 23~26 日为无明显冷空气影响造成的暖区连续暴雨，其余 2 次（4 月 12~15 日、6 月 9~13 日）连续暴雨均为有明显冷空气影响所造成。4~5 月两次连续暴雨均与准 23 天周期振荡对应，它们与前汛期的主要周期振荡一致。

(2) 4~5 月发生在南海季风爆发前后、以阳江为中心的西南部两次连续暴雨分别为有、无明显冷空气影响所造成的回流暴雨，它们对应的大气环流场具有明显的不同，与 6 月主要出现在北部的锋面型连续暴雨也有明显的不同：4 月 12~14 日连续回流暴雨期间，由于 500hPa 中高纬度具有稳定的“西阻”和“东阻”，使巴尔喀什湖~亚洲大陆的冷空气源源不断地从东海入海高压的南部东移南下，造成 925hPa 以阳江为中心相对干冷的强东南风长时间维持，并与来自南海中南部从中南半岛转向的暖湿偏南风汇合，形成以阳江为东南风大风轴中心的辐合渐近线，造成以阳江为中心有明显冷空气影响的连续回流暴雨的发生。而 5 月 23~26 日连续回流暴雨期间，由于 500hPa 华西地区为阶梯槽控制，云贵高原附近为明显的高原槽控制，华东~东海~黄海高压坝的稳定维持，使广东长时间处于高原槽前西南气流中。地面上处于东海出海高压脊西南部及北部湾~西南低槽前，925hPa 形成以阳江为中心来自孟加拉湾的强偏南风与珠江口以东来自东海出海变性高压脊西南侧东南风的辐合渐近线，导致以阳江为中心的西南部无明显冷空气影响的连续回流暴雨发生。6 月 9~13 日，

由于东亚大陆及其沿海维持稳定的西高东低环流型, 东亚大槽槽底可达台湾及其以东洋面, 使冷空气沿着华东~东海南下, 它们与来自孟加拉湾穿过中南半岛的强盛西南风相遇在江南~广东北部, 造成以广东北部为主的锋面型连续暴雨发生。

(3) 4-5 月以阳江为中心的广东西南部两次连续回流暴雨与 6 月主要出现在广东北部的锋面型连续暴雨的低频传播特征也有明显的不同: 来自我国中部(东海东移出海)低频反气旋南侧(西南侧)逐渐加强南传的低频东北风(东南风)与从  $140^{\circ}\text{E}$  附近的西太平洋西传(从  $80^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$  的孟加拉湾东传)到广东并加强的低频北风(南风)汇合在广东西南部, 并有(无)与从南海中北部北传的低频气旋北侧的低频东风相遇, 导致 4 月 12~14 日(5 月 23~26 日)有(无)明显冷空气影响的连续回流暴雨发生。而来自我国中部、孟加拉湾分别逐渐加强向南、向东传播到达广东的低频西南风, 与来自中纬度低频反气旋外围的干冷东北风交汇在江南或南海北部, 导致广东北部 6 月 9~13 日锋面型连续暴雨的发生。

致谢: 衷心感谢三位审稿专家给出的宝贵修改意见!

#### 参考文献(References)

- 鲍名. 2007. 近50年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景 [J]. 大气科学, 31(5):779-792. Bao Ming. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(5):779-792.
- 曹鑫, 任雪娟, 杨修群, 等. 2012. 中国东南部5-8月持续性强降水和环流异常的准双周振荡 [J]. 气象学报, 70(4):766-778. Cao Xin, Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, et al. 2012. The quasi-biweekly oscillation characteristics of persistent severe rain and its general circulation anomaly over Southeast China from May to August [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70(4):766-778.
- 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]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28(5):707-718.
- 陈思, 高建芸, 黄丽娜, 等. 2017. 华南前汛期持续性暴雨年代际变化特征及成因 [J]. 应用气象学报, 28(1):86-97. Chen Si, Gao Jianyun, Huang Lina, et al. 2017. Decadal variation characteristics of South China pre-flood season persistent rainstorm and its mechanism [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 28(1):86-97.
- Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions [J]. J. Appl. Meteor., 18(8): 1016-1022.
- 高建芸, 陈彩珠, 周信禹, 等. 2013. 2010年福建前汛期典型持续性暴雨过程的低频特征分析 [J]. 气象科技进展, 3(1):39-45. Gao Jianyun, Chen Caizhu, Zhou Xinyu, et al. 2013. Analysis of low-frequency features on typical persistent heavy rainfall during pre-flood season in Fujian Province in 2010 [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 3(1):39-45.
- 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]. Journal of tropical meteorology (in Chinese), 27(1):11-21.
- 谷德军, 王东晓, 纪忠萍, 等. 2009. 墨西哥帽小波变换的影响域和计算方案新探讨 [J]. 应用气象学报, 20(1):62-69. Gu Dejun, Wang Dongxiao, Ji Zhongping. 2009. New research on cone of influence and computing scheme of Mexican hat wavelet transform [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 20(1): 62-69.
- 广东省气象台《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, 119-126. Guangdong Meteorological Bureau "The technical guidance on weather forecasting in Guangdong province" writing group. 2006. Technical guidance on weather forecasting in Guangdong province [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 119-126.
- 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]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 27(5): 559-569.
- 华南前汛期暴雨编写组. 1986. 华南前汛期暴雨 [M]. 广州:广东科技出版社, 55-63. "Heavy rainfall during pre-rainy season in south China" Writing Group. 1986. Rainstorms of the first rainy season in South China [M] (in Chinese). Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 55-63.
- 纪忠萍, 谷德军, 谢炯光. 1999. 广州近百年气候变化的多时间尺度分析 [J]. 热带气象学报, 15(1):48-55. Ji Zhongping, Gu Dejun, Xie Jiongguang. 1999. Multiple time scales of climate variation in Guangdong during the last 100 years [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 15(1): 48-55.
- 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 Maoqiu, Zhang Chunhua. 2013. Impact of quasi-biweekly oscillation on a sustained rainstorm in October 2010 in Hainan [J]. Journal of tropical meteorology (in Chinese), 29(3): 364-373.
- 琚建华, 孙丹, 吕俊梅. 2007. 东亚季风涌对我国东部大尺度降水过程的影响分析 [J]. 大气科学, 31(6): 1129-1139. Ju Jianhua, Sun Dan, Lu Junmei. 2007. The Influence of the East Asian monsoon stream on the large-scale precipitation course in Eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6): 1129-1139.
- 琚建华, 孙丹, 吕俊梅. 2008. 东亚季风区大气季节内振荡经向与纬向传播特征分析 [J]. 大气科学, 32(3): 523-529. Ju Jianhua, Sun Dan, Lu Junmei. 2008. The relay character analysis of the zonal and longitudinal propagations of the atmospheric intraseasonal oscillation in the East Asian monsoon region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(3): 523-529.
- 林爱兰, 李春晖, 郑彬, 等. 2013. 广东前汛期持续性暴雨的变化特征及其环流形势 [J]. 气象学报, 71(4):628-642. Lin Ailan, Li Chunhui, Zheng Bin, et al. 2013. Variation characteristics of sustained torrential rain during the pre-flooding season in Guangdong and the associated circulation pattern [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 71(4):628-642.
- 林确略, 寿绍文, 杨华. 2015. 基于数值模拟对一次广西前汛期回流暴雨形成机制的分析 [J]. 气象, 41(7):852-862. Lin Quelue, Shou Shaowen, Yang Hua. 2015. Analysis on formation mechanism of the backflow rainstorm occurring in first rainy season of

- Guangxi based on numerical simulation [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 41 (7):852-862.
- 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.
- 马鸿青, 丁治英, 赵振杰, 等. 2010. 河北一次春季回流暴雨过程及其热力结构分析 [J]. 暴雨灾害, 29(3):224-230. Ma Hongqing, Ding Zhiying, Zhao Zhenjie, et al. 2010. Thermodynamic structure of a returning flow heavy rain in Spring over Hebei Province [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 29(3):224-230.
- 温之平, 董灵英, 吴丽姬, 等. 2007. 大气30-60d振荡特征及其与广东持续性强降水的联系 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 46(5):98-103. Wen Zhiping, Dong Linying, Wu Liji, et al. 2007. The characteristics of 30-60 day oscillation and its relation to the durative rainstorm in Guangdong [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 46(5):98-103.
- 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.
- 徐明, 赵玉春, 王晓芳, 等. 2016. 华南前汛期持续性暴雨统计特征及环流分型研究 [J]. 暴雨灾害, 35(2):109-118. Xu Ming, Zhao Yuchun, Wang Xiaofang, et al. 2016. The study of statistical characteristics of South China pre-flood season persistent rainstorm and its circulation pattern [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 35(2):109-118.
- 叶朗明, 苗峻峰. 2014. 华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析 [J]. 暴雨灾害, 33(4):342-350. Ye Langming, Miao Junfeng. 2014. Mesoscale analysis of a typical heavy rain event caused by returning flow in the warm sector in Southern China [J]. Torrential Rain and Disasters, 33(4): 342-350.
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京:气象出版社, 118-122. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Yannan, et al. 2006. Principles and operational application of doppler weather radar [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 118-122.
- 张守保, 张迎新, 郭品文. 2009. 华北回流强降水天气过程的中尺度分析 [J]. 高原气象, 28(5):1067-1074. Zhang Shoubao, Zhang Yingxin, Guo Pinwen. 2009. Mesoscale analysis of a return-flow event with rainstorm occurred over North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28(5):1067-1074.
- 张晓美, 蒙伟光, 张艳霞, 等. 2009. 华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析 [J]. 热带气象学报, 25(5):551-560. Zhang Xiaomei, Meng Weiguang, Zhang Yanxia, et al. 2009. Analysis of mesoscale convective systems associated with a warm sector heavy rainfall event over South China [J]. Journal of tropical meteorology (in Chinese), 25(5):551-560.
- 张亚妮, 姚秀萍, 于超. 2019. 高层动力强迫对回流型华南暖区暴雨影响的个例研究 [J]. 热带气象学报, 35(2):166-176. Zhang Yanni, Yao Xiuping, Yu Cao. 2019. A case study on the effect of upper dynamics forcing on warm sector rainstorm over the south of China [J]. Journal of tropical meteorology (in Chinese), 35(2):166-176.
- 张迎新, 张守保. 2006. 华北平原回流天气的结构特征 [J]. 南京气象学院学报, 29(1):107-113. Zhang Yingxin, Zhang Shoubao. 2006. Structural feature of the backflow precipitation over North China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29(1):107-113.