

覃卫坚,何莉阳,蔡悦幸,等. 近 30 年华南地区“龙舟水”暴雨研究进展[J]. 气象研究与应用,2023,44(1):01-06.

Qin Weijian, He Liyang, Cai Yuexing, et al. Research progress of dragon-boat precipitation in South China in the past 30 years[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(1): 01-06.

# 近 30 年华南地区“龙舟水”暴雨研究进展

覃卫坚<sup>1</sup>, 何莉阳<sup>1</sup>, 蔡悦幸<sup>1</sup>, 廖雪萍<sup>2</sup>

(1.广西壮族自治区气候中心, 南宁 530022; 2.广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022)

**摘要:** 主要综述和回顾近 30a 来国内外关于华南“龙舟水”暴雨的天气气候研究进展, 包括高空槽、切变线、低涡、急流、副热带高压等天气系统的影响, 低频振荡、季风等大尺度环流背景, 及其对高原积雪、海温等外强迫信号的响应。总结了“龙舟水”暴雨精细化预报中主要存在的问题, 对提高“龙舟水”暴雨预报预测能力提出了展望。

**关键词:** “龙舟水”; 暴雨; 前汛期; 华南

**中图分类号:** P45

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.01

## 引言

华南地区位于中国南部, 南面濒临南海, 汛期降水量大, 常出现暴雨洪涝灾害。“龙舟水”指端午节前后(5月21日—6月20日)华南地区出现的持续性大范围强降水, 处于华南前汛期的后半段, 正值春夏季之交, 热带暖湿气流势力加强, 与冷空气在华南上空持续交汇, 易发生比较集中、强度较强、连续的降水过程, 强降水引发暴雨洪涝常造成严重经济损失及人员伤亡。在全球气候变暖背景下, 气候系统不稳定性加剧, 极端天气气候事件频发强发, 如 2022 年华南地区出现了新中国成立以来最强的“龙舟水”, 根据自治区应急管理厅灾情统计, 仅广西造成直接经济损失达 114.5 亿元。为了提高“龙舟水”暴雨预报预测能力, 本文从天气学、气候学角度回顾前人近 30a 来关于“龙舟水”期间暴雨研究, 为预报员提供参考, 提出下一步“龙舟水”暴雨的研究思路。

## 1 天气形势分析

影响华南地区“龙舟水”暴雨过程的天气系统为高空槽、切变线、低涡、急流、副热带高压等。

### 1.1 高空槽

高空槽对气流起到重要的引导作用, 槽前存在

正涡度平流, 同时形成高空辐散上升运动, 槽后有负涡度平流, 为辐合下沉运动, 高空槽是影响华南地区“龙舟水”暴雨过程的重要系统<sup>[1-2]</sup>。高安宁等<sup>[3]</sup>研究指出, 在弱环境风场背景下高原槽东移引发了西南低涡, 为华南暴雨过程提供动力条件, 在槽区气旋性大的区域正涡度较大, 为大范围暴雨的主要落区。张端禹等<sup>[4]</sup>把华南前汛期持续暴雨过程环流可分为东亚槽底型、南方低槽型、孟加拉湾槽前型、西风波动型、热带风暴型。李箐等<sup>[5-7]</sup>研究建立了华南西部大范围锋面暴雨天气概念模型: 湘黔桂低涡型、深槽型、波动型、东北(华北)+南支槽型, 其中深槽型暴雨过程高空欧亚为两槽一脊、贝加尔湖附近为长波脊区、中国西南地区为低槽, 波动型锋面暴雨中高纬度槽脊平直、青藏高原南支槽频繁东移、副高加强西伸、华南位于副高边沿, 华北槽+南支槽锋面暴雨过程高空为一槽一脊型、南支槽位于青藏高原南部并移出、副高稳定位于南海, 南支槽+高后型通常出现低空急流、副高加强西伸、高原地区多小槽东移。钱维宏等<sup>[8]</sup>、Qian 等<sup>[9]</sup>分析了“龙舟水”暴雨过程的湿涡度扰动, 降水雨带与湿涡度扰动有直接关系, 与暴雨关联的扰动风、扰动温度、扰动湿度大值区一般位于 925hPa 层附近。高空槽对气流起到重要的引导作用, 根据槽脊变化“龙舟水”暴雨过程可分为多种天气环流型。

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 广西科技计划项目(桂科 AB21075005)、广西气象科技研究计划项目(桂气科 2023Z05)

作者简介: 覃卫坚(1971—), 男, 正研级高级工程师, 博士, 主要从事气候变化与预测研究。E-mail: qinweijian2008@126.com

## 1.2 切变线

华南地区 5—6 月暴雨过程通常有切变线和锋面活动,切变线是影响“龙舟水”暴雨过程的主要天气系统,表现为冷暖气团的交汇,形成低层辐合、高层辐散的强对流系统<sup>[10-11]</sup>。张东等<sup>[12]</sup>、熊文兵等<sup>[13]</sup>研究发现暴雨过程雨带一般对应着切变线,冷暖气流在切变线的南侧、低空急流左侧交汇,产生强烈的上升气流运动,引发强降水。刘国忠等<sup>[14]</sup>、梁毅进等<sup>[15]</sup>研究指出在华南“龙舟水”暴雨过程中低层低涡切变线和地面静止锋向南移动,切变线上不断有低涡生成和消亡,低层低涡切变线长期滞留是“龙舟水”持续性暴雨发生的主要原因。Chen 等<sup>[16]</sup>研究指出西南季风和冷空气在华南沿海一带形成季风切变线,西南季风增强导致切变线加强、不稳定性增加。以上可见,切变线是华南“龙舟水”暴雨过程最常见的天气系统,暴雨落区通常位于切变线的南侧,西南季风增强、切变线长期滞留是持续性暴雨发生的主要原因。

## 1.3 低涡

西南低涡主要产生于四川和重庆,经贵州、湖南等地进入华南地区,西南低涡多发年份华南地区“龙舟水”期间易出现大范围暴雨洪涝灾害,西南低涡致洪暴雨过程往往需要静止锋、急流、副热带高压等天气系统相互配合<sup>[17-21]</sup>。陈翔翔等<sup>[22]</sup>研究发现低涡型暖区暴雨过程多发生在夏季风爆发之后,一般出现在低涡中心的东北—西南方向。李菁等<sup>[7]</sup>提出湘黔桂低涡是在湘黔桂地区生成和发展的低压涡旋,在冷锋、静止锋、冷空气配合下也会造成华南持续暴雨发生。何编等<sup>[23]</sup>在研究低涡发展过程中,指出低空急流通过改变大气斜压性使低涡向下游发展,低空急流是驱动低涡强度增强和移动的重要系统。总之,低涡与静止锋、急流等天气系统配合下,导致“龙舟水”暴雨过程的发生,急流是驱动低涡发展增强的重要系统。

## 1.4 急流

急流是一股强而窄的气流带,高空急流的风速水平和垂直切变量大,对称不稳定使上升运动加强;低空急流给暴雨过程输送丰富的水汽,建立低空不稳定层结,触发不稳定能量的释放,急流在“龙舟水”暴雨过程中起到重要作用<sup>[13,24-26]</sup>。周文志等<sup>[27]</sup>把广西大范围低空急流暴雨过程天气形势分为三种:低涡急流型、深槽切变急流型和副高急流型。典型的暖区暴雨过程往往发生在地面低压倒槽、西南低空急流左侧、高空急流右侧,高空急流稳定维持、低空急流持续加强是暖区暴雨过程的动力机制<sup>[28-33]</sup>。伍

红雨等<sup>[34]</sup>指出“龙舟水”异常偏多年份对流层高层副热带西风急流强度偏强,中层极涡明显偏强,低层华南地区偏南气流偏强。张端禹等<sup>[35]</sup>研究发现持续性暴雨与华南东部边界层西南风急流活跃有关,使低层水汽辐合上升,强对流得以维持。以上可见,高空急流使对流不稳定能量增加、低空急流提供丰富的水汽,对暴雨过程起到重要作用。

## 1.5 副热带高压

副热带高压是副热带地区暖性高压系统,是影响华南地区“龙舟水”主要的大型天气系统,当深槽(强脊)靠近它时东退(西伸),上升气流往往出现在副热带高压的南、北侧或西侧边沿,副热带高压中心附近为下沉气流,副热带高压的位置变化直接影响暴雨雨带的分布。华南持续性大范围暴雨过程发生的年份西太平洋副热带高压强度偏强、位置偏西<sup>[36]</sup>,暴雨过程发生前均存在副热带高压西伸过程,东退时为暴雨过程的间歇期<sup>[37-38]</sup>。王黎娟等<sup>[39]</sup>研究发现华南地区位于副热带高压西北侧存在异常强烈的视热源和视水汽汇;鄂霍次克海附近高压脊活跃,有利于冷空气南下,西太平洋副热带高压明显偏强、位置偏西,有利于南海及西太平洋水汽向华南输送<sup>[40-43]</sup>。Sun 等<sup>[44]</sup>研究指出澳大利亚高压偏强,增强了澳大利亚北部越赤道气流,激活了海洋性大陆的对流,加大了东亚局部经向环流,增强西太平洋副热带高压,中高纬度地区存在波列从北大西洋向东亚地区传播,蒙古—贝加尔湖出现异常反气旋,利于华南暴雨发生和维持。以上可见,副热带高压对暴雨雨带分布起到重要作用,“龙舟水”暴雨过程往往与副高偏强、偏西有关。

## 2 低频振荡、夏季风等大尺度环流背景

### 2.1 低频振荡

热带地区存在 30~60d 大气低频振荡现象(简称 MJO),是高频天气变化的气候背景,又是月季尺度气候主要信号,是引起中期天气以及月尺度天气过程主要因子之一。李文铠等<sup>[45]</sup>利用合成方法研究 MJO 对华南前汛期降水的影响,当 MJO 对流中心位于赤道印度洋附近时,非绝热加热作用通过罗斯贝波到达华南地区,水汽输送增强,降水增多。陶诗言等<sup>[46]</sup>研究指出 MJO 活跃于南海地区造成西风加强,触发中国南部出现季风涌,造成珠江流域暴雨过程发生。鲍名<sup>[47]</sup>通过分析两次华南“龙舟水”暴雨过程,发现持续性暴雨过程与副热带高压西伸加强、引导

热带西太平洋对流 10~25d 低频振荡向华南移动有关。覃卫坚等<sup>[48-51]</sup>研究指出广西及其以南低纬度地区 OLR 30~60d 周期振荡有明显 (相对不明显或不连续) 的向东传播, MJO 处于印度洋中东部, 副热带高压西伸到南海区域, 广西暴雨异常偏多(少)。很多研究表明“龙舟水”期间降水存在准双周振荡<sup>[52-57]</sup>。洪伟等<sup>[58]</sup>研究发现持续性强降水期间存在 10~30d 的非绝热加热低频振荡特征。Zheng 和 Huang<sup>[59]</sup>研究指出持续暴雨过程存在 5~20d 振荡向北传播, 跟垂直风切变效应和涡度平流有关。张玉洁等<sup>[60]</sup>将南方地区 10d 以上低频尺度降水划分为 5 个异常雨型, 其中华南低频雨型为: 华南上空对应着显著的高度场负距平, 东亚西风急流中心位置偏东偏南, 气流在高空辐散、低层水汽输送及其辐合上升更加强烈。热带低频振荡为暴雨过程提供丰富的水汽, 触发形成季风涌, 是持续性暴雨过程维持和发展的重要影响因子, 是延伸期暴雨过程可预报性的主要来源之一。

## 2.2 夏季风

陶诗言等<sup>[61]</sup>研究指出夏季风的前缘是冷暖空气交汇的地区, 对应着多雨带, 如 5—6 月华南前汛期暴雨。一般 5 月中下旬南海夏季风爆发后两周内季风气流把丰沛的西南暖湿水汽从热带印度洋和南海输送到东亚大陆, 使南方强降水增多, “龙舟水”与东亚热带季风关系密切, 南海夏季风爆发偏早、暴雨偏多<sup>[62-66]</sup>, 越赤道气流异常强盛决定东亚热带季风的强弱<sup>[66-67]</sup>。汪永铭<sup>[68]</sup>、张端禹等<sup>[69]</sup>、吴丽姬等<sup>[70]</sup>研究夏季风爆发对持续性暴雨的影响, 指出夏季风爆发后切变线型暖区暴雨以暖式切变为主, 夏季风降水增多, 华南地区暴雨呈东西反位相分布特征。Chen 等<sup>[71]</sup>、Lu 等<sup>[72]</sup>、Peng 等<sup>[73]</sup>指出“龙舟水”暴雨过程水汽来源受夏季风爆发的影响显著, 来自南海和西太平洋水汽贡献在夏季风爆发前后有显著的减少, 孟加拉湾和印度洋的贡献在爆发前后有显著的增大。林爱兰等<sup>[74]</sup>研究指出通常暴雨过程水汽 5 月主要来自孟加拉湾、西太平洋和南海, 6 月索马里越赤道气流加强, 横穿印度洋到孟加拉湾形成强的水汽输送带, 水汽主要来自孟加拉湾。以上可见, 南海夏季风爆发打通了来自孟加拉和印度洋的水汽通道, 为“龙舟水”暴雨过程提供了有利水汽条件, 南海夏季风爆发偏早、“龙舟水”暴雨偏多。

## 3 积雪、海温等外强迫因子的影响

青藏高原积雪反映了热源的变化, 青藏高原热

力作用对大气环流, 尤其东亚大气环流和中国天气气候有着重要影响。蔡学湛<sup>[75]</sup>、王红军和潘维玉<sup>[76]</sup>、覃卫坚和李栋梁<sup>[77]</sup>研究指出前冬今春青藏高原积雪面积偏大(小), 有利于华南前汛期暴雨偏多(少)。Gu 等<sup>[78]</sup>研究揭示了华南前汛期降水变化特征与热带太平洋海表温度偶极子分布有关。王婷等<sup>[79]</sup>研究指出前期拉尼娜事件是 2008 年广东“史上最强龙舟水”的主要气候背景, 西太平洋暖池一带热带对流活跃, 南海夏季风爆发偏早, 南极冰面积增大使下垫面温度发生变化、绕极低压带增强, 大气经向环流加强, 有利冷空气向北爆发, 索马里和西澳大利亚赤道气流明显增强。Chu 等<sup>[80]</sup>、Fan 等<sup>[81]</sup>研究发现冬春季厄尔尼诺事件对华南前汛期降水有重要影响, 有利于菲律宾反气旋维持、西太平洋副热带高压加强并西伸, 来自太平洋水汽增强, 使暴雨发生。覃卫坚等<sup>[82]</sup>、王彦明等<sup>[83]</sup>研究了太平洋年代际涛动(PDO) 对华南暴雨的影响, 当 PDO 处于冷(暖)位相时, 贝加尔湖阻塞高压强度显著性偏强(弱), 使中高纬度地区经向环流增强(减弱), 索马里越赤道气流显著性增强(减弱), 在南海和菲律宾及以东洋面上空(不)容易形成季风槽, 华南暴雨日数偏多(少)。伍红雨等<sup>[84]</sup>研究了不同强度厄尔尼诺对华南前汛期降水的影响, 指出强度在中等及以上的厄尔尼诺事件次年, 菲律宾以东洋面海温激发异常反气旋环流和南风异常, 孟加拉湾—中南半岛—华南偏西气流以及南海到华南偏南气流增强, 导致华南前汛期开汛偏早、降水偏多、强度偏强。李海燕等<sup>[85]</sup>研究了中部型和东部型厄尔尼诺事件的影响, 东部型厄尔尼诺事件有利于副热带高压偏强, 前汛期降水偏多, 中部型厄尔尼诺事件不利水汽向华南输送、降水偏少。以上可见, 青藏高原积雪与“龙舟水”关系存在正相关, PDO 指数与“龙舟水”暴雨为反相关, 中等强度以上或东部型厄尔尼诺次年有利“龙舟水”偏多。

## 4 结论和讨论

在全球气候变暖背景下, 气候系统不稳定性加剧, 极端天气气候事件频发强发, 了解“龙舟水”暴雨的天气气候成因具有重要的意义。本文主要综述和回顾近 30a 来国内外关于华南“龙舟水”暴雨的天气形势分析、大尺度环流背景、外强迫因子的研究进展, 为“龙舟水”暴雨的天气预报、气候预测提供科学依据, 为防灾减灾工作提供参考。

多年以来“龙舟水”暴雨研究人们更重视天气形



势分析研究,对暴雨过程环流形势进行分型,并建立了天气概念模型,分析了暴雨雨量、落区与急流等天气系统的关系,取得了很多成果,但在天气系统精细化特征、地形的影响、观测大数据的运用等方面还有待进一步加强研究,以提高天气预报的精细化水平。近年来随着延伸期(10~30d)降水过程预报的业务化,迫切需提高10d以上暴雨过程预报能力,热带季节内振荡是延伸期降水过程可预报性的主要来源之一,热带季节内振荡与其他系统形成多尺度信号的协同作用对“龙舟水”暴雨的影响还有待去探索和揭示。高原积雪、海温等外强迫因子对暴雨气候异常的影响机理值得进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 李勇,覃武,钟利华.广西2012年前汛期3次暴雨过程环流和中尺度特征[J].气象研究与应用,2013,34(2):31-35.
- [2] 梁俊聪,陈见,陈思毅,等.2012年“6·4”广西沿海季风槽暴雨分析[J].气象研究与应用,2013,34(1):24-28.
- [3] 高安宁,李生艳,陈见,等.弱环境风场条件下华南西部大范围暴雨特征分析[J].热带气象学报,2009,25(增刊1):9-17.
- [4] 张端禹,徐明,汪小康,等.华南前汛期持续暴雨环流特征分析[J].暴雨灾害,2012,31(3):264-271.
- [5] 李菁.广西大范围锋面暴雨过程的特征分析[J].气象研究与应用,2008,29(增刊2):1-4.
- [6] 李菁,祁丽燕,黄治逢.广西大范围锋面暴雨概念模型[J].气象研究与应用,2010,31(4):8-11.
- [7] 李菁,祁丽燕,黄治逢.华南西部重大锋面暴雨天气过程研究[J].热带气象学报,2009,25(增刊1):48-57.
- [8] 钱维宏,艾阳,陈绿文,等.一次广东典型龙舟水暴雨过程的扰动形势分析[J].热带气象学报,2020,36(4):433-443.
- [9] Qian W H, Ai Y, Leung J C, et al. Anomaly-Based Synoptic Analysis and Model Product Application for 2020 Summer Southern China Rainfall Events[J]. Atmospheric Research, 2021, 258(4):1-14.
- [10] 汪永铭,苏百兴,常越.1998年试验期间华南暴雨的系统配置和环流特点[J].热带气象学报,2000,16(2):123-130.
- [11] 孙建华,赵思雄.华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I.引发暴雨的 $\beta$ 中尺度对流系统的数值模拟研究[J].大气科学,2002,26(4):541-557.
- [12] 张东,林钢,叶萌,等.华南连续性特大致洪暴雨两个例分析[J].气象科技,2007,35(1):82-87.
- [13] 熊文兵,李江南,姚才,等.“05·6”华南持续性暴雨成因分析[J].热带气象学报,2007,23(1):90-97.
- [14] 刘国忠,丁治英,卢小丹,等.“05·6”华南致洪暴雨过程中各尺度天气系统的作用[J].云南地理环境研究,2007,19(12):11-16.
- [15] 梁毅进,苏贵睦,陆洪波,等.2010年广西“6·1”特大暴雨过程分析[J].气象研究与应用,2011,32(增刊2):102-105.
- [16] Chen T C, Huang W R. Interannual Variation of the Late Spring - Early Summer Monsoon Rainfall in the Northern Part of the South China Sea[J]. Journal of Climate, 2011, 24(8):4295-4313.
- [17] 刘国忠,丁治英,贾显锋.影响华南地区西南低涡以及致洪低涡活动的统计研究[J].气象研究与应用,2007,28(增刊1):53-59.
- [18] 黄东林,周伟灿,薛荣康.西南低涡东移对华南暴雨增强的动力机制分析[J].广西气象,2006,27(4):30-33.
- [19] 何编,孙照渤.“0806”华南持续性暴雨诊断分析与数值模拟[J].气象科技,2010,30(2):164-171.
- [20] 饶晓琴.华南持续暴雨洪涝灾害严重华北阵雨频繁雨量多气温高[J].气象,2008,34(9):117-123.
- [21] 黄治逢.“94·6”广西大范围大暴雨过程分析[J].广西气象,1994,15(3):180-183.
- [22] 陈翔翔,丁治英,刘彩虹,等.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,2012,28(5):707-718.
- [23] 何编,孙照渤,李忠贤.一次华南持续性暴雨的动力诊断分析与数值模拟[J].大气科学学报,2012,35(4):466-476.
- [24] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,2000.
- [25] 赵玉春,王叶红.近30年华南前汛期暴雨研究概述[J].暴雨灾害,2009,28(3):193-202.
- [26] Zhang M R, Meng Z Y. Warm-Sector Heavy Rainfall in Southern China and Its WRF Simulation Evaluation: A Low-Level-Jet Perspective[J]. Monthly Weather Review, 2019, 147(12):4461-4479.
- [27] 周文志,唐熠,王艳兰,等.广西大范围低空急流暴雨的分型及雷达回波特征分析[J].自然灾害学报,2011,20(4):159-164.
- [28] 覃艳秋,刘蕾.华南锋前暖区暴雨研究概述[J].气象研究与应用,2017,38(1):26-29.
- [29] 丁治英,刘彩虹,沈新勇.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,2011,27(3):307-316.
- [30] 罗建英,廖胜石,黄归兰,等.广西前汛期锋前暖区暴雨过程的模拟与分析[J].气象,2009,35(10):50-57.
- [31] 张晓美,蒙伟光,张艳霞,等.华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析[J].热带气象学报,2009,25(5):551-560.

- [32] 王黎娟, 管兆勇, 何金海. 2005 年 6 月华南致洪暴雨的大尺度环流特征及成因探讨[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(2): 145–152.
- [33] 熊文兵, 沈桐立, 钟利华. 2005 年 6 月华南持续性暴雨爆发和维持机制分析[J]. 广西气象, 2006, 27(4): 11–15.
- [34] 伍红雨, 李春梅, 王迪龙. 近 55 年广东“龙舟水”异常特征及成因分析[J]. 热带气象学报, 2017, 33(5): 608–616.
- [35] 张端禹, 崔春光, 赵玉春. 2010 年前汛期末华南西部和东部暴雨对比分析[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(6): 8–15.
- [36] 许晓林, 徐海明, 司东. 华南 6 月持续性致洪暴雨与孟加拉湾对流异常活跃的关系[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(4): 463–471.
- [37] 司东, 温敏, 徐海明, 等. 2005 年 6 月华南暴雨期间西太平洋副高西伸过程分析[J]. 热带气象学报, 2008, 24(2): 169–175.
- [38] 李向红. 华南大范围暴雨副热带高压的演变特征及可能机制[J]. 广西气象, 2001, 22(3): 13–17.
- [39] 王黎娟, 陈璇, 管兆勇, 等. 我国南方洪涝暴雨期西太平洋副高短期位置变异的特点及成因[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 1047–1057.
- [40] 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等. 广东 6 月持续性暴雨期间的大气环流异常[J]. 气象学报, 2015, 73(5): 803–818.
- [41] 刘蕾, 孙颖, 张蓬勃. 大尺度环流的年代际变化对华南持续性暴雨的影响[J]. 气象学报, 2014, 72(4): 690–702.
- [42] 于波, 林永辉, 陈菊英, 等. 华南地区 5 月降水的水汽特征分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(4): 507–514.
- [43] 胡娅敏, 杜尧东, 罗晓玲. 近 49 年华南“龙舟水”的降水分型[J]. 气象, 2013, 39(8): 1031–1041.
- [44] Sun J Q, Ming J, Zhang M Q, et al. Circulation Features Associated with the Record-Breaking Rainfall over South China in June 2017 [J]. Journal of Climate, 2018, 31(9): 7209–7224.
- [45] 李文铠, 何金海, 祁莉, 等. MJO 对华南前汛期降水的影响及其可能机制[J]. 热带气象学报, 2014, 30(5): 983–989.
- [46] 陶诗言, 卫捷. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系[J]. 气象, 2007, 33(3): 10–18.
- [47] 鲍名. 两次华南持续性暴雨过程中热带西太平洋对流异常作用的比较[J]. 热带气象学报, 2008, 24(1): 27–36.
- [48] 覃卫坚, 何莉阳, 蔡悦幸. 广西持续性区域暴雨对热带低频振荡的响应特征[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(4): 32–37.
- [49] 覃卫坚, 李耀先, 陈思蓉. 同期 MJO 对广西汛期强降水过程的影响[J]. 气象研究与应用, 2017, 38(4): 18–21.
- [50] 覃卫坚, 李耀先, 廖雪萍, 等. 大气低频振荡对广西持续性区域性暴雨的可能影响[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(3): 1–7.
- [51] 覃卫坚, 李耀先, 廖雪萍. MJO 活动对广西 6 月阶段性降水的影响研究[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(1): 25–30.
- [52] 李丽平, 杨春艳, 孔德璇. 华南前汛期典型涝年低频降水特征及其与低频水汽输送的关系[J]. 热带气象学报, 2017, 33(3): 299–312.
- [53] 徐明, 赵玉春, 王晓芳, 等. 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, 2016, 35(2): 109–118.
- [54] 胡娅敏, 翟盘茂, 罗晓玲, 等. 2013 年华南前汛期持续性强降水的大尺度环流与低频信号特征[J]. 气象学报, 2014, 72(3): 465–477.
- [55] 梁巧倩, 蔡洁云, 纪忠萍, 等. 2006 年广东汛期大气环流场的低频特征[J]. 热带气象学报, 2011, 27(2): 219–229.
- [56] 罗秋红, 纪忠萍, 吴乃庚, 等. 近 40 年西江流域前汛期致洪暴雨期间降水的低频振荡特征分析[J]. 热带气象学报, 2010, 26(2): 201–210.
- [57] 纪忠萍, 方一川, 梁健, 等. “05·6”广东致洪暴雨过程的 500hPa 环流场及低频特征[J]. 广东气象, 2006, 28(2): 15–18.
- [58] 洪伟, 任雪娟, 杨修群. 华南持续性强降水期间低频非绝热加热对低频环流的影响[J]. 气象学报, 2015, 73(2): 276–290.
- [59] Zheng B, Huang Y Y. Mechanisms of Meridional-Propagating High-Frequency Intraseasonal Oscillation Associated with a Persistent Rainfall over South China [J]. Monthly Weather Review, 2018, 146(5): 1475–1494.
- [60] 张玉洁, 刘寿东, 任宏利, 等. 中国南方夏季低频雨型特征及其年代际变化研究[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1205–1217.
- [61] 陶诗言, 李吉顺, 王昂生. 东亚季风与我国洪涝灾害[J]. 中国减灾, 1997, 7(4): 17–20.
- [62] 谷德军, 纪忠萍. 2008 年广东强龙舟水与准 10 天振荡[J]. 热带气象学报, 2011, 27(1): 11–21.
- [63] 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等. 南海夏季风爆发与华南前汛期锋面降水异常变化的联系[J]. 中山大学学报, 2010, 49(5): 127–133.
- [64] 史学丽, 丁一汇. 1994 年中国华南大范围暴雨过程的形成与夏季风活动的研究[J]. 气象学报, 2000, 55(6): 666–678.
- [65] 郑彬, 梁建茵, 林爱兰, 等. 华南前汛期的锋面降水和夏季风降水 I. 划分日期的确定[J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1207–1216.
- [66] 覃卫坚, 蔡悦幸, 罗小莉. 南海夏季风爆发对广西 6 月暴雨的影响[J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 132–138.
- [67] 吕梅, 成新喜, 陈中一, 等. 1994 年华南暴雨期间夏季风的特征及其对水汽的输送[J]. 热带气象学报, 1998, 14

- (2):135–141.
- [68] 汪永铭.东亚夏季风与 1994 年华南连续大暴雨[J].暴雨灾害,1997,16(10):115–123.
- [69] 张端禹,郑彬,汪小康,等.华南前汛期持续暴雨环流分型初步研究[J].大气科学学报,2015,38(3):310–320.
- [70] 吴丽姬,温之平,贺海晏,等.华南前汛期区域持续性暴雨的分布特征及分型[J].中山大学学报,2007,46(6):108–113.
- [71] Chen Y R X, Luo Y L. Analysis of Paths and Sources of Moisture for the South China Rainfall During the Presummer Rainy Season of 1979–2014 [J]. Journal of Meteorological Research, 2018, 32(5): 744–757.
- [72] Lu X L, Li Q L, Zhao W, et al. Spatiotemporal Characteristics of Rainfall in South China from 1967 to 2018 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2021, 60(9): 1333–1345.
- [73] Peng D D, Zhou T J, Sun Y, et al. Interannual Variation in Moisture Sources for the First Rainy Season in South China Estimated by the FLEXPART Model[J]. Journal of Climate, 2022, 35(1): 746–761.
- [74] 林爱兰,李春晖,郑彬,等.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,2013,71(4):628–642.
- [75] 蔡学湛.青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响[J].应用气象学报,2001,12(3):358–367.
- [76] 王红军,潘维玉.2008 年华南前汛期异常降水的大尺度环流特征及成因分析[J].热带地理,2009,29(3):219–224.
- [77] 覃卫坚,李栋梁.广西暴雨气候特征及其异常成因[M].北京:气象出版社,2017,1–252.
- [78] Gu W, Wang L, Hu Z Z, et al. Interannual Variations of the First Rainy Season Precipitation over South China [J]. Journal of Climate, 2018, 31(1): 623–640.
- [79] 王婷,胡娅敏,潘蔚娟.2008 年广东“史上最强龙舟水”气候成因[J].广东气象,2008,30(4):5–7.
- [80] Chu Q C, Wang Q G, Qiao S B, et al. Feature Analysis and Primary Causes of Pre-flood Season Cumulative Effect of Torrential Rain over South China [J]. Theory of Application Climatology, 2016, 32(12): 1–10.
- [81] Fan L L, Xu J J, Li J J. Differences in Pre-Flood Season Rainfall in South China between Spring and Summer El Nino Events [J]. Atmosphere–Ocean, 2020, 58(2): 144–156.
- [82] 覃卫坚,李栋梁,蔡悦幸.广西大范围暴雨气候异常对太平洋年代际涛动的响应[J].热带气象学报,2022,38(2):161–170.
- [83] 王彦明,高建芸,池艳珍,等.太平洋海温场不同时间尺度背景下华南前汛期持续性暴雨的统计特征[J].大气科学学报,2015,38(1):126–131.
- [84] 伍红雨,吴遥.不同类型和强度的厄尔尼诺事件对次年华南前汛期降水的可能影响[J].大气科学,2018, 42(5): 1081–1095.
- [85] 李海燕,孙家仁,谌志刚,等.两类 El Nino 事件对华南前汛期降水异常的影响[J].热带气象学报,2019,35(4): 491–503.

## Research progress of dragon–boat precipitation in South China in the past 30 years

Qin Weijian<sup>1</sup>, He Liyang<sup>1</sup>, Cai Yuexing<sup>1</sup>, Liao Xueping<sup>2</sup>

(1. Guangxi Climate Center, Nanning 530022, China;

2. Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China)

**Abstract:** The progress of weather and climate research on the dragon–boat precipitation in South China in the past 30 years is summarized and reviewed in this paper, including the influence of weather systems such as high–level trough, shear line, low vortex, jet stream, subtropical high and so on, as well as the large–scale circulation features like low–frequency oscillations and monsoons, and their response to the external forcing signals such as the plateau snow cover, sea surface temperature, and so on. The main problems in the refinement of the dragon–boat precipitation forecast are also summarized, and a prospect for improving the prediction ability of dragon–boat precipitation is proposed.

**Key words:** dragon–boat precipitation; rainstorm; pre–flood season; South China