暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

广西汛期降水客观分区及其时空特征

韦靖 李华实 毛家 周冬静 唐昌秀 张啸云 陈燕坤 廖胜石

Objective partition of flood season precipitation and its spatio-temporal characteristics in Guangxi

WEI Jing，LI Huashi，MAO Jiashen，ZHOU Dongjing，TANG Changxiu，ZHANG Xiaoyun，CHEN Yankun，LIAO Shengshi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-145

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于聚类分析的浙江省汛期OCF降水预报分区订正试验

Regional correction calibration for OCF precipitation in flood season in Zhejiang Province based on cluster analysis

暴雨灾害. 2023, 42(6): 716-723 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-042

秦岭南北降水小时尺度特征对比分析

Comparative analysis of hourly features of precipitation in the north and south areas of Qinling Mountains

暴雨灾害. 2022, 41(1): 24-32 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.003

广西汛期极端短时强降水特征分析

Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season

暴雨灾害. 2022, 41(3): 308-314 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.007

基于小时降水资料的华西秋雨精细化特征分析

Fine-scale analysis of hourly precipitation of West China autumn precipitation

暴雨灾害. 2024, 43(2): 168-175 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-139

广西前汛期和后汛期地闪特征差异及影响因子分析

Comparative analysis of the cloud to ground lightning activity during pre and post flood season in Guangxi

暴雨灾害. 2022, 41(2): 224-231 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.013

京津冀极端降水时空分布特征及其对城市排水压力的影响

The spatiotemporal distribution characteristics of extreme precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the main flood season and its impact on urban drainage pressure

暴雨灾害. 2025, 44(3): 322-331 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-228

关注微信公众号，获得更多资讯信息

韦靖,李华实,毛家燊,等.2025.广西汛期降水客观分区及其时空特征[J].暴雨灾害,44(5):653−664. WEI Jing, LI Huashi, MAO Jiashen, et al. 2025. Objective partition of flood season precipitation and its spatio-temporal characteristics in Guangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):653−664 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−145

广西汛期降水客观分区及其时空特征

韦靖[1, 2], 李华实[3], 毛家燊[2, 3], 周冬静[3], 唐昌秀[2, 3], 张啸云[4], 陈燕坤[5], 廖胜石[2, 6]

(1. 广西壮族自治区扶绥县气象局, 扶绥 532100; 2. 中国气象局百色岩溶生态气象野外科学试验基地, 南宁 530022; 3. 广西壮族自治区崇左市气象局, 崇左 532200; 4. 广西壮族自治区钦州市气象局, 钦州 535000; 5. 广西壮族自治区凭祥市气象局, 凭祥 532600; 6. 广西壮族自治区气候中心, 南宁 530022)

摘　要: 根据广西 91 个国家气象站 2005—2022 年汛期逐小时降水资料, 采用 *K* 均值聚类分析方法将广西汛期降水分为五个区域, 即Ⅰ区 (桂西北)、Ⅱ区 (桂东北)、Ⅲ区 (桂西南)、Ⅳ区 (桂东南) 和Ⅴ区 (桂南沿海), 并分析各区域前、后汛期降水日变化特征并探讨其环境场差异。结果表明: (1) 全区平均降水量日变化在前、后汛期存在明显差异, 前汛期呈单峰型且以夜间降水为主, 后汛期呈双峰型且白天降水总体较夜间偏多。(2) 汛期降水日变化特征存在地域性差异, 桂西北、桂东北降水量和降水频率在前汛期呈单峰型但后汛期转变为双峰型, 桂西南和桂东南在前、后汛期均呈双峰型, 桂南沿海在前、后汛期均呈单峰型。(3) 随着降水持续时间增加, 降水量累计值呈现先增后减趋势。平均降水量在白天基本以短持续降水过程的贡献为主, 在夜间则以长持续降水过程的贡献为主。(4) 下半夜至凌晨时段强降水归因于较明显的水汽辐合和较强的辐合上升运动, 下午至傍晚时段强降水则主要归因于充沛的水汽条件和较强的热力强迫作用。

关键词: 汛期; 降水日变化; 客观分区; *K* 均值聚类; 时空演变

中图法分类号: P426.6　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−145

Objective partition of flood season precipitation and its spatio-temporal characteristics in Guangxi

WEI Jing[1, 2], LI Huashi[3], MAO Jiashen[2, 3], ZHOU Dongjing[3], TANG Changxiu[2, 3], ZHANG Xiaoyun[4], CHEN Yankun[5], LIAO Shengshi[2, 6]

(1. *Fusui Meteorological Bureau of Guangxi*, *Fusui* 532100; 2. *Baise Field Research Station for Karst Ecological Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Nanning* 530022; 3. *Chongzuo Meteorological Bureau of Guangxi*, *Chongzuo* 532200; 4. *Qinzhou Meteorological Bureau of Guangxi*, *Qinzhou* 535000; 5. *Pingxiang Meteorological Bureau of Guangxi*, *Pingxiang* 532600; 6. *Guangxi Climate Center*, *Nanning* 530022)

Abstract: Based on hourly precipitation data from 91 national stations in Guangxi during the flood season from 2005 to 2022, the precipitation during the flood season in Guangxi was objectively divided into 5 regions by using the *K*-means clustering algorithm, including Region I in the northwest of Guangxi, Region II in the northeast of Guangxi, Region III in the southwest of Guangxi, Region IV in the southeast of Guangxi, and Region V along the coastal areas of southern Guangxi. The diurnal variation characteristics of precipitation during the pre- and post-flood seasons in various regions were analyzed. The results are as follows. (1) There is a significant difference in the daily variation of average precipitation in the entire region between the pre- and post-flood seasons. The pre-flood season shows a unimodal pattern with mainly nighttime precipitation, while the post-flood season shows a bimodal pattern with generally more daytime precipitation than nighttime precipitation. (2) There are regional differences in the diurnal variation characteristics of precipitation in the flood season. The precipitation and frequency in northwest and northeast Guangxi show a unimodal pattern during the pre-flood season, but change to a bimodal pattern during the post-flood season. Southwest and southeast Guangxi show a bimodal pattern during the pre- and post-flood seasons, while the coastal southern Guangxi shows a unimodal pattern during both periods. (3) With increasing

收稿日期: 2024−07−30; **定稿日期**: 2025−02−25

资助项目: 广西自然科学基金项目 (2024GXNSFAA010313); 广西气象科研计划项目 (2024QN30, 2023M29, 2022M03); 崇左市科技计划项目 (20231210)

第一作者: 韦靖, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: 543721343@qq.com

通信作者: 李华实, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: 550753767@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

precipitation duration, the cumulative precipitation first increases and then decreases. The contribution of short-duration precipitation processes is predominant during the day, while long-duration precipitation processes contribute more during the night. (4) The heavy precipitation from late night to early morning is attributed to the obvious water vapor convergence and strong convergent ascending motion, while the heavy precipitation from afternoon to evening is mainly attributed to abundant water vapor conditions and strong thermal forcing.

Key words: flood season; diurnal variation of precipitation; objective partition; K-means clustering; spatiotemporal evolution

引　言

广西位于云贵高原东南边缘，地处华南丘陵西部，南临北部湾海面，地势自西北向东南倾斜，属亚热带季风气候区，是中国降水量最充沛的地区之一。受冬夏季风交替调剂影响，广西干湿季分明，降水主要集中于 4—9 月，前汛期 (4—6 月) 降水主要发生在西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 北侧的西风带中，由冷暖气流交汇引起，以锋面降水为主，同时常常伴随着暖区降水 (李争辉和罗亚丽, 2021)；后汛期 (7—9 月) 多热对流、热带气旋等引起的降水 (Lee et al., 2010)。整体而言，广西汛期降水特征与冷暖空气交绥程度、热带气旋、地形抬升作用、南海夏季风爆发/推进、厄尔尼诺/拉尼娜事件等影响因素密切相关 (董良淼等, 2021; 廖胜石等, 2022)，且由于复杂多变的气候条件和地形地势，导致广西汛期降水地域、日变化差异明显，预报难度大。

降水日变化是大气热力和动力过程共同作用的结果，是表征降水事件的重要特征 (赵玮等, 2022)。对降水日变化特征进行深入研究，不仅有助于理解降水形成机理和区域气候变化机制，而且对于改进数值模式、提高精细化降水预报能力等方面具有重要意义 (Pan and Chen, 2019)。宇如聪等 (2014) 概述中国大陆降水日变化的研究成果并指出，在复杂地形、海陆差异以及大气环流的综合作用下，中国大陆夏季降水日变化区域特征明显，降水日变化存在明显季节差异和季节内演变，在季风活跃期我国中东部降水峰值多出现在清晨或下午且表现出随季风雨带进或退的特征。公颖等 (2017) 指出辽宁省内陆地区基本为午后降水峰值，沿海地区基本为午前降水峰值，内陆平原站点凌晨到午前有次峰现象发生，辽宁降水日变化特征与地理环境关系密切。刘煦等 (2020) 指出山东半岛地区夏半年降水量、降水频率和降水强度的日变化呈双峰型特征，长持续性降水和短持续性降水的日峰值分别出现在清晨和午后。Chen 等 (2009) 指出中国东南部在初夏前，清晨降水控制着大部分地区，进入盛夏 (7—8 月) 后，午后降水愈发强盛并控制了华南大部分地区，而清晨降水范围显著缩减。对于华南沿海地区，早晨的降雨在近海岸和迎风山脉附近比较明显，下午的降雨在陆地上占主导地位，夜间降雨发生在北部内陆地区 (Chen et al., 2018)。珠江三角洲前汛期短时强降水频率由季风爆发前的单峰型 (下午) 转为季风爆发后的双峰型 (早晨与下午)，凌晨–早晨短时强降水频率在季风爆发后较季风爆发前增加显著 (江帆等, 2024)。以上研究揭示了中国不同区域降水日变化特征及机理，丰富和提高了中国天气气候演变规律的科学认识。

目前，已有部分学者针对广西逐小时降水特征开展了一些研究 (廖胜石等, 2022, 2023; 李华实等, 2023)，但针对广西分区域、分时段的降水日变化研究还比较少，且现有研究多建立在主观地理划分区域上或旋转经验正交函数 (REOF) 方法进行分区 (黄永新, 2000; 蒋国兴, 2007)，分区效果具有一定的局限性。*K* 均值聚类算法是一种通过迭代求解相同类型数据的统计分类算法，该算法按照每个观测值距中心值在欧式空间距离最近进行聚类的原则，将 *n* 个观测值划分为 *K* 个聚类 (朱黎明等, 2021; 朱晓彤等, 2024)，因其收敛速度快、聚类效果好，在气候区划、天气环流分型、分类平均等气象领域中被广泛应用 (赵玉春和王叶红, 2020; 张青梅等, 2022; 王莉萍等, 2023)。本文基于小时分辨率降水资料，利用 *K* 均值聚类算法对广西前、后汛期降水进行客观分区，对比分析不同区域的降水日变化特征，探讨其环境场条件差异，以期加深对广西前、后汛期不同区域降水日变化规律及降水环境特征的认识，为本地区域对流尺度数值预报模式发展和精细化分区降水预报提供参考，为合理利用水资源、科学防汛调度和精准趋利避害提供依据。

1　资料和方法

1.1　资料说明

本文使用资料包括：(1) 2005—2022 年 4—9 月广西 91 个国家气象观测站 (简称国家站) 逐小时降水资料，用于分析降水日变化特征，相关数据来自气象大数据云平台“天擎”系统，在使用前先进行数据质量控制，剔除缺测及异常数据。(2) 同时段 NCEP FNL 再分析资料，包含位势高度、水平风、气温、相对湿度、垂直速度和对流有效位能 (CAPE) 等物理量，时

间分辨率为 6 h, 空间分辨率为 1°×1°, 用于分析环境条件对降水日变化的影响。

1.2 统计方法

若某一站点小时降水量≥0.1 mm 则判定该时次有降水发生, 若下一时次没有降水发生, 则判定该站点一次降水过程结束, 一次降水过程从开始至结束的小时数为降水的持续时间。参考彭莉莉等 (2020) 的研究方法, 本文将持续时间小于或等于 6 h 的降水事件定义为短持续降水过程, 持续时间大于 6 h 的降水事件定义为长持续降水过程。

为方便讨论降水的日变化特征, 将一天分为 6 个时段 (罗乃兴等, 2023), 即上半夜 (19—23 时)(北京时, 下同)、下半夜 (23 时—次日 03 时)、凌晨 (03—07 时)、上午 (07—11 时)、下午 (11—15 时) 和傍晚 (15—19 时), 上半夜至凌晨 (上午至傍晚) 统称夜间 (白天)。分析降水的日变化时, 使用的主要指标包括平均降水量 (P)、平均降水频率 (P_F) 和平均降水强度 (P_I), 计算公式如下

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{A}\sum_{k=1}^{T} P_{i,j,k,t}}{N \cdot A \cdot T} \tag{1}$$

$$P_{F(t)} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{A}\sum_{k=1}^{T} F_{i,j,k,t}}{N \cdot A \cdot T} \tag{2}$$

其中 $P_{i,j,k,t} > 0$ 时 $F_{i,j,k,t} = 1$, 否则 $F_{i,j,k,t} = 0$。

$$P_{I(t)} = \frac{P_t}{P_{F(t)}} \tag{3}$$

其中, P_t、$P_{F(t)}$、$P_{I(t)}$ 为一天中第 t (t=1, 2, ⋯, 24) 小时的平均降水量 (单位: mm)、降水频率 (单位: %) 和降水强度 (单位: mm·h^{-1}); i 为所统计区域的排序站点 (相应区域站点总数为 N, 广西全区共计 91 站); j 为年份 (总年份 A=18 a); k 为所统计时段的排序天数 (前汛期总天数 T=91 d, 后汛期总天数 T=92 d; $P_{i,j,k,t}$、$P_{F(i,j,k,t)}$ 分别为第 i 站点、第 j 年、第 k 天、第 t 小时的降水量和降水频率。

1.3 客观分区

鉴于广西前、后汛期受到不同天气系统影响, 参考王国栋等 (2019) 的方法将广西汛期分为前汛期 (4—6 月)、后汛期 (7—9 月) 两个时段进行研究。计算广西各站点 2005—2022 年前、后汛期的小时平均降水量并存储到一个 48 维的数组中, 其中 1—24 维存放前汛期, 25—48 维存放后汛期。对每个站点的降水量数组进行标准化处理后, 利用 K 均值聚类算法进行聚类, 得到同时具有前、后汛期降水日变化特征的不同类。

当进行 K 均值聚类试验时, 聚类数 K 通常取 2~10, 可以通过计算 Davies-Bouldin 指数 (DBI) 评估聚类效果, 其数值越小表示类内距离越小、类间距离越大, 聚类效果越好(肖柳斯等, 2024)。本文通过聚类分析得到如图 1a 的 DBI 指数变化曲线。当 K≤5 时, DBI 指数呈快速下降趋势; 而 K>5 时, DBI 指数曲线趋于平缓。因此, 可将 K=5 作为最佳聚类数, 将广西客观划分为 5 个区域 (图 1b), Ⅰ区主要包括百色、河池两地的桂西北, 该区域地处云贵高原东南麓, 冷空气受高原阻挡影响相对较弱, 另外夏季风也难以深入, 雨季稍迟; Ⅱ区主要包括桂林、柳州、贺州及来宾西部的桂东北, 湘桂走廊横贯在越城岭、海洋山其间, 北来冷空气被阻挡在架桥岭西北侧的永福一带, 与偏南气流对峙形成准静止锋, 形成一个广西暴雨中心, 而东路冷空气常与东南暖湿气流在大瑶山东侧的昭平一带交绥, 形成另一个广西暴雨中心; Ⅲ区主要包括崇左、南宁两地的桂西南, Ⅳ区主要包括梧州、玉林、贵港以及钦州北部的桂东南, 这两个

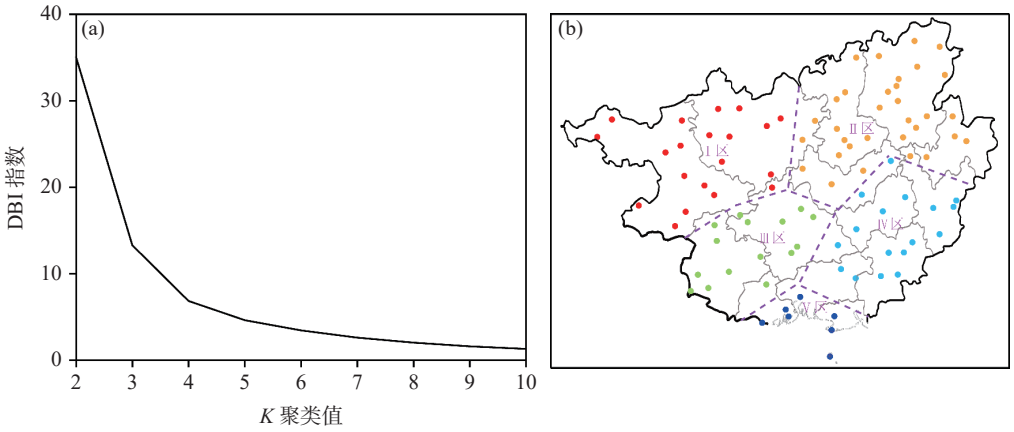


图 1 DBI 指数变化曲线 (a) 和基于 K 均值聚类的客观分区示意图 (b)

Fig. 1 (a) DBI index change curve and (b) objective partitioning diagram based on K-means clustering

区域大致为平原地形；Ⅴ区位于十万大山东南侧的桂南沿海一带，热带系统常常在十万大山迎风面抬升、气流辐合增强，因而成为广西最大暴雨中心以及中国有名的暴雨中心（《广西天气预报技术和方法》编写组，2012）。该降水客观分区与廖胜石等（2023）气象地理分区大体相近，表明聚类分析效果很好，能体现降水日变化在不同区域的不同规律特征，对广西降水气候区域研究有指导性意义。

2 结果与分析

2.1 广西汛期平均降水量日变化特征

图 2 展示了 2005—2022 年历年广西前、后汛期平均降水量的日变化。由图可见，广西前汛期（图 2a）降水量日变化呈单峰特征，峰值主要出现在下半夜至凌晨时段（02—07 时），谷值出现在傍晚至上半夜时段（17—22 时），整体以夜间降水为主。2010 年广西前汛期夜间降水量较常年明显偏多，主要是由于 2010 年 4—5 月中高纬地区冷空气异常活跃且不断南下影响中国大陆（蒋星和李勇，2010），2010 年 6 月低纬度地区多波动东移，冷空气南下与暖湿气流交汇频繁，低空急流存在明显日变化且多次夜间加强明显（孔期，2010），利于降水发生并持续。

后汛期（图 2b）降水量日变化呈双峰特征，峰值较前汛期减小，主峰出现在下午至傍晚时段（13—17 时），次峰在下半夜至凌晨时段（02—07 时），白天降水总体较夜间偏多。2017 年广西后汛期降水量较常年偏多，主要是由于 2017 年 7 月低纬地区副高显著偏强且西南季风水汽输送也偏强，8 月下旬副高偏北，有两个台风西行登陆华南，导致华南地区降水偏多（郑志海和王永光，2018）。

与前汛期相比（图 2c），后汛期降水量在下半夜至上午时段（23 时—次日 10 时）大体呈现减少态势，在下午至傍晚时段（12—19 时）有所增多。其中，2010 年、2022 年夜间降水量减少最为明显，2017 年白天降水量增多明显。

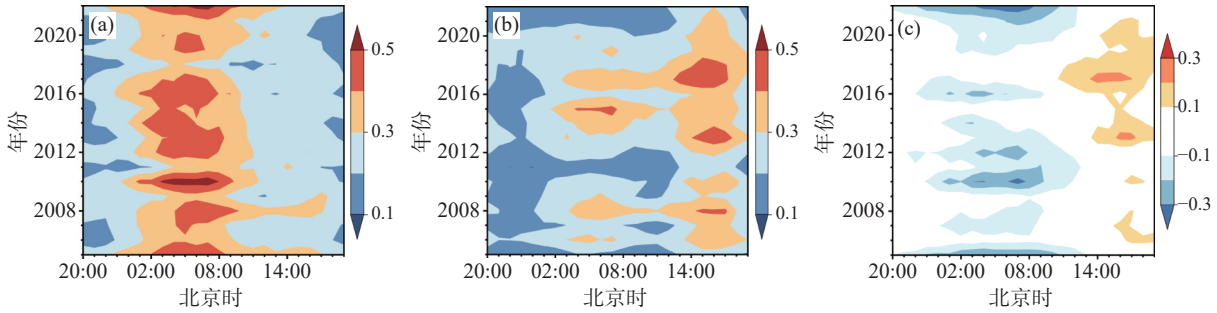


图 2 2005—2022 年广西前汛期 (a)、后汛期 (b) 平均降水量 (单位: mm) 及后汛期与前汛期平均降水量差值 (c, 单位: mm) 的日变化

Fig. 2 Daily variation of average precipitation (unit: mm) during the (a) pre-flood season, (b) post-flood season and (c) the difference between the post-flood season and the pre-flood season in Guangxi Province from 2005-2022

2.2 广西不同区域降水日变化特征

图 3 展示了 2005—2022 年前汛期广西降水客观分区（Ⅰ区桂西北、Ⅱ区桂东北、Ⅲ区桂西南、Ⅳ区桂东南、Ⅴ区桂南沿海）平均降水量、降水频率和降水强度在时间上的演变特征。可以看到，各区域降水量（图 3a）、降水频率（图 3b）日变化曲线具有相似的变化特征，Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅴ区均呈单峰结构，降水量、降水频率峰值出现时间相近，降水量峰值分别在 04 时、07 时和 08 时，仅比降水频率峰值晚 1 h；Ⅲ区、Ⅳ区均呈双峰结构，Ⅲ区降水量峰值分别在 04 时（主峰）、15 时（次峰），振幅偏小，降水频率峰值则分别在 06 时（主峰）、15 时（次峰）；Ⅳ区降水量峰值分别在 08 时（次峰）、15 时（主峰），降水频率峰值则分别在 06 时（次峰）、15 时（主峰）。降水量与降水频率日变化差异主要体现在不同区域的峰值大小方面，降水量峰值以Ⅴ区、Ⅱ区偏高，降水频率峰值则以Ⅱ区、Ⅰ区偏高。Ⅰ区降水量、降水频率日变化形态与Ⅱ区相似，峰值位相差仅 3 h，反映其日变化信号具有自西向东传播的特征（白爱娟等，2011；李德帅，2016；Chen et al., 2018；Bai et al., 2020），这与产生降水对应的对流系统自西向东传播有关，可能由降水沿准静止锋和切变线东传导致（Chen et al., 2017）。各区域降水强度（图 3c）呈多波动特征，Ⅴ区降水强度峰值明显大于其他区域，Ⅰ区、Ⅱ区夜间大于白天，而Ⅲ区、Ⅳ区白天大于夜间；夜间降水强度以Ⅴ区、Ⅰ区、Ⅱ区偏强，而白天降水强度大致以Ⅴ区、Ⅳ区、Ⅲ区偏强。已有研究表明，华南地区夜间降雨通常发生在高原山麓地带（Jiang et al., 2017；Chen et al., 2018, 2020），沿海地区凌晨到上午降雨峰值与夜间低层西南风增强以及陆风与低层季风相互作用的海岸辐合有关（Chen et al., 2016；Jiang et al., 2017；Chen et al., 2020；江帆等，2024），内陆地区的下

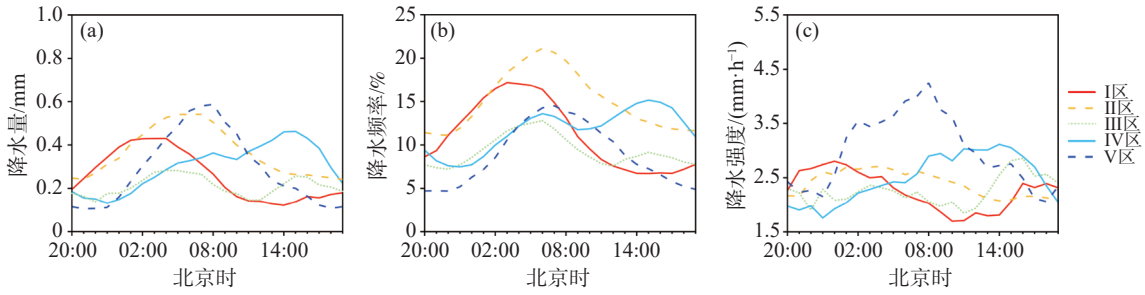


图 3 2005—2022 年前汛期不同区域平均降水量 (a)、降水频率 (b)、降水强度 (c) 日变化

Fig. 3 Daily variation of (a) average precipitation, (b) precipitation frequency, and (c) precipitation intensity in different regions during the pre-flood season from 2005-2022

午降雨峰值则是由太阳加热和地形非均匀性引起的热力不稳定和湿静力能所导致 (Chen et al., 2009; Su et al., 2021; 江帆等, 2024)。

后汛期 (图 4) 各区域平均降水量和降水频率日变化曲线也颇为相似, Ⅰ区—Ⅳ区均呈双峰结构, 两个峰值出现在凌晨时段 (03—07 时)、下午至傍晚时段 (14—17 时); Ⅴ区呈单峰结构, 峰值在 07 时, 明显高于其他区域, 尤其降水量偏高明显 (图 4a、b)。相比前汛期, Ⅰ区、Ⅱ区凌晨时段降水量和降水频率峰值位相的东传特征有所减弱。各区域降水强度 (图 4c) 呈多波动特征, Ⅴ区降水强度峰值明显大于其他区域, Ⅰ区—Ⅳ区降水强度在凌晨时段较为稳定, 下午至傍晚时段 (13—18 时) 增强明显; 夜间降水强度以Ⅴ区偏强, 其余区域相差不大, 而白天降水强度则以Ⅴ区、Ⅳ区、Ⅲ区偏强。

图 5 为各区域 2005—2022 年后汛期平均降水量、降水频率和降水强度与前汛期对应特征量的差值。可见, 从前汛期到后汛期, 平均降水量 (图 5a) 在Ⅰ区、Ⅲ区和Ⅳ区呈现夜间时段减少、白天大部时段增多的趋势, Ⅱ区呈现全天减少且各时次减幅均大于其他区域的趋势, Ⅴ区呈现全天增多且各时次增幅均大于其他区域的趋势。降水频率 (图 5b) 变化趋势与平均降水量相似, 且Ⅳ区呈减少趋势的时段进一步扩展至傍晚。降水强度(图 5c) 在大多数区域的大部时段呈增强趋势, 雨势减弱主要出现在Ⅰ区的上半夜至凌晨时段 (20—04 时)、Ⅱ区的上半夜至上午时段 (20—11 时) 和Ⅳ区的凌晨至上午时段 (05—11 时); Ⅰ区—Ⅳ区在下午至傍晚时段的雨势增强明显, 且Ⅴ区雨势增强幅度明显大于其他区域。

2.3 广西各区域不同持续时间降水日变化

降水持续时间是判断降水稳定性的重要因子, 与降水日变化特征关系密切。由于广西南临北部湾

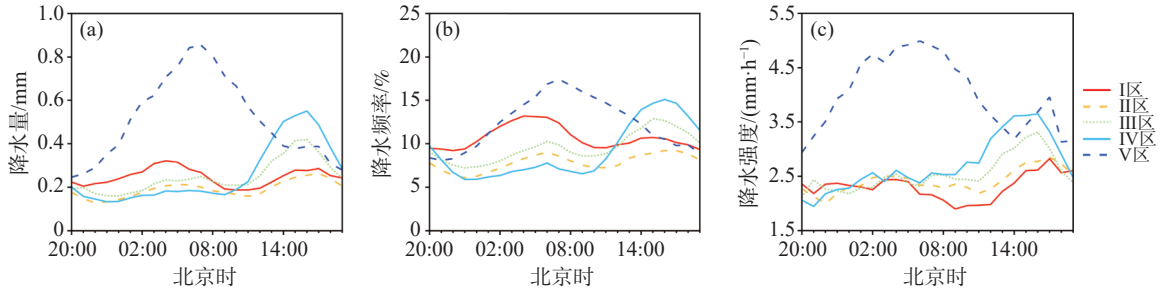


图 4 同图 3, 但为后汛期

Fig. 4 Same as Fig. 3, but during the post-flood season

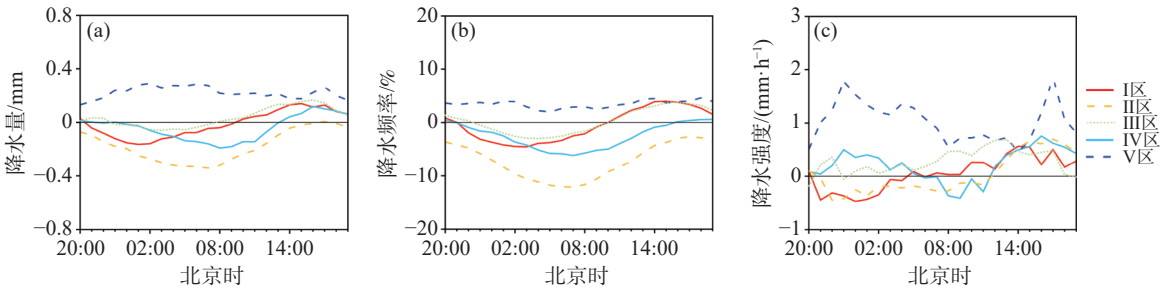


图 5 同图 3, 但为后汛期与前汛期的差值

Fig. 5 Same as Fig. 3, but the difference between the post-flood season and the pre-flood season

海面，面向南海，水汽充沛，极易出现持续性降水。长时间持续的降水容易引发洪涝灾害，是除短时强降水外的另一类易致灾降水事件。

图 6 展示了 2005—2022 年前、后汛期不同区域不同持续时间的降水量日变化情况。在前汛期，夜间以持续时间小于 14 h 的降水事件较为活跃，Ⅰ区 (图 6a)、Ⅱ区 (图 6b) 在上半夜开始活跃，开始时间较早 (李争辉和罗亚丽，2021)，其余区域 (图 6c—e) 则主要在下半夜开始活跃，各区域夜间平均降水量大值区主要在下半夜至凌晨时段；白天以持续时间小于 6 h 的降水事件为主，Ⅰ区在下午开始活跃，其余区域则在上午开始活跃，白天平均降水量大值区在Ⅰ—Ⅳ区主要出现于下午至傍晚时段而在Ⅴ区出现于上午时段。在后汛期，夜间Ⅱ区 (图 6g) 和Ⅳ区 (图 6i) 的降水事件变得不活跃，Ⅰ区 (图 6f) 以小于 10 h、Ⅲ区 (图 6h) 以小于 6 h、Ⅴ区 (图 6j) 以小于 14 h

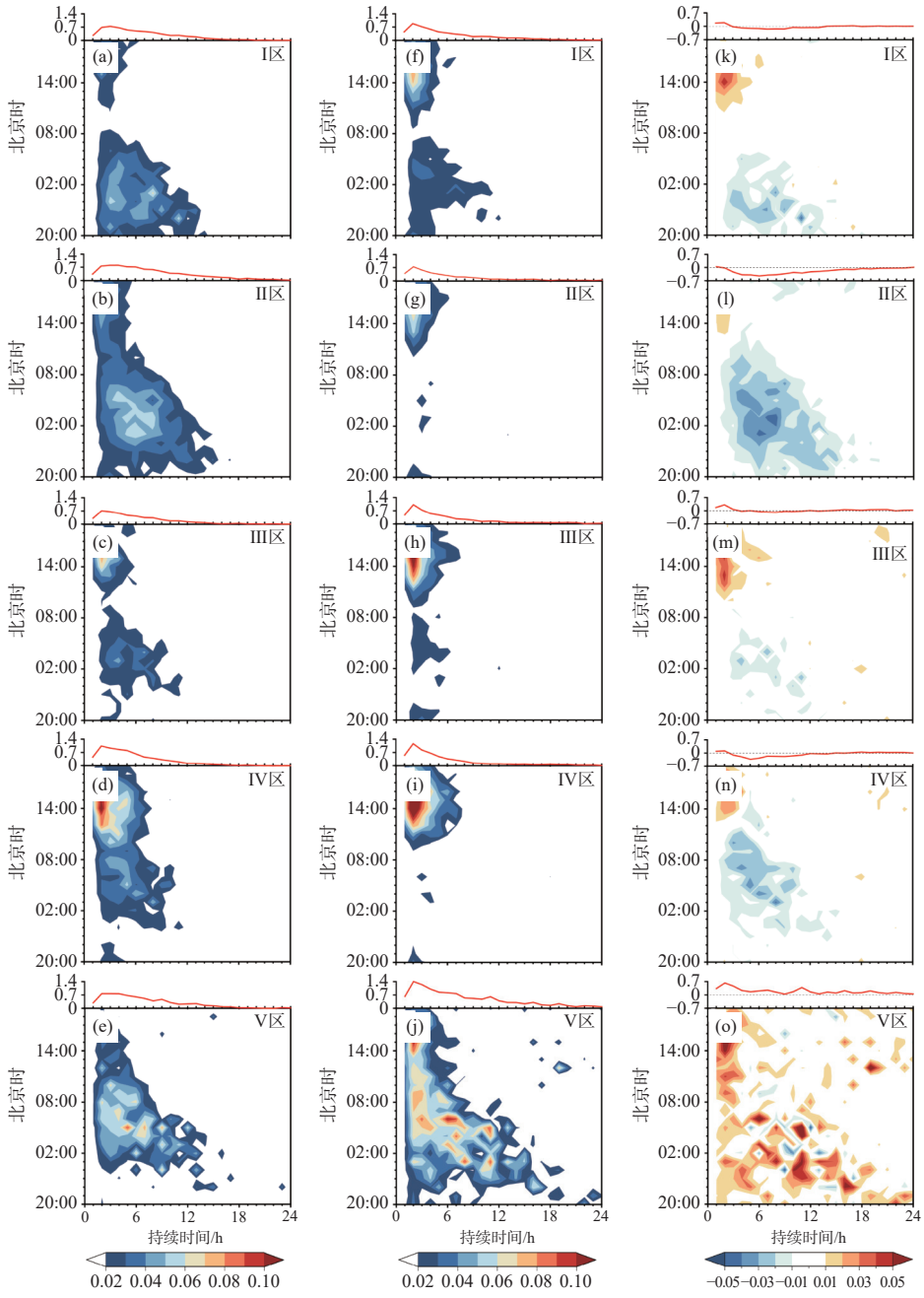


图 6 2005—2022 年前汛期 (a—e)、后汛期 (f—j) 及其后汛期与前汛期的差值 (k—o) 的Ⅰ区 (a、f、k)、Ⅱ区 (b、g、l)、Ⅲ区 (c、h、m)、Ⅳ区 (d、i、n) 和Ⅴ区 (e、j、o) 不同持续时间的平均降水量 (阴影，单位：mm) 以及累计降水量 (红色曲线，单位：mm) 变化

Fig. 6 Variations of average precipitation (shaded, unit: mm) and cumulative precipitation (red line, unit: mm) with different durations of precipitation in (a, f, k) Region Ⅰ, (b, g, l) Region Ⅱ, (c, h, m) Region Ⅲ, (d, i, n) Region Ⅳ and (e, j, o) Region Ⅴ during the (a-e) pre-flood season, (f-j) post-flood season, and (k-o) the difference between the post-flood season and pre-flood season from 2005 to 2022

的持续性降水事件较为活跃; 白天各区域均以持续时间小于 6 h 的降水事件为主, Ⅰ—Ⅳ区平均降水量大值区主要出现于下午至傍晚时段, Ⅴ区有多个大值区且以下午时段最大。前、后汛期Ⅰ—Ⅳ区白天平均降水量大值区均主要出现于下午至傍晚时段; 各区域平均降水量累计值随降水持续时间增加呈现先增后减的趋势, 降水量峰值在前汛期对应于持续时间 3 h (Ⅰ区)、4 h (Ⅱ区)、2 h (Ⅲ区)、2 h (Ⅳ区) 和 3 h (Ⅴ区) 的降水事件, 而后汛期均对应于持续时间 2 h 的降水事件。从前汛期到后汛期, 平均降水量在Ⅴ区 (图 6o) 的不同持续时间均呈增加趋势, 在Ⅰ—Ⅳ区 (图 6k—n) 表现为持续时间 1~2 h 的平均降水量增加 (主要由于下午至傍晚时段该持续时间的降水量增加) 以及持续时间 3~13 h 的平均降水量减少 (主要由于上半夜至上午时段该持续时间的降水量减少明显)。

图 7 为各区域短持续降水过程和长持续降水过程对平均降水量的贡献率及其降水频率的时序图。无论是前汛期 (图 7a—e) 还是后汛期 (图 7f—j) 降水频率, 长持续降水过程发生频率明显低于短

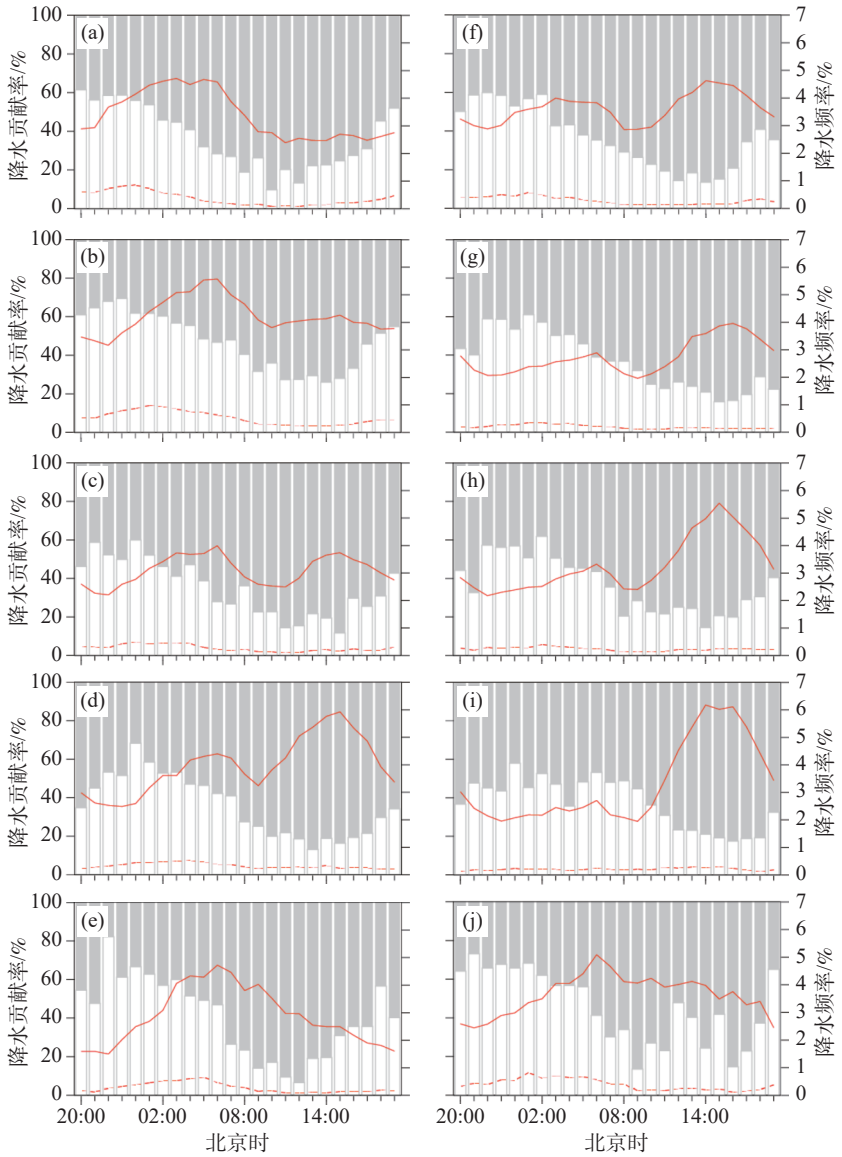


图 7 2005—2022 年前汛期 (a—e) 与后汛期 (f—j) Ⅰ区 (a、f)、Ⅱ区 (b、g)、Ⅲ区 (c、h)、Ⅳ区 (d、i)、Ⅴ区 (e、j) 短持续、长持续降水过程对降水量贡献率 (柱状) 和降水频率 (曲线) 日变化 (其中, 灰色柱状、红色实线为短持续降水, 白色柱状、红色虚线为长持续降水)

Fig. 7 The contribution rate (bar-shaped) and precipitation frequency (curve) vary daily of short-term and long-term precipitation processes in (a, f,) Region Ⅰ, (b, g) Region Ⅱ, (c, h) Region Ⅲ, (d, i) Region Ⅳ and (e, j,) Region Ⅴ during the (a-e) pre-flood seasons and (f-j) post-flood season (the gray column and red solid line represent short-term continuous precipitation,while the whit column andred dashed line represent long-term continuous precipitation) from 2005-2022

持续降水过程；长持续降水的频率峰值除后汛期Ⅳ区 (图 7i) 峰值不明显外，其余主要出现在下半夜至凌晨时段；前汛期在Ⅰ区 (图 7a)、Ⅱ区 (图 7b) 的长持续降水频率高于其余区域，后汛期在Ⅴ区 (图 7j) 的长持续降水频率则明显高于其余区域。短持续降水频率在下半夜至凌晨时段出现峰值，且下午至傍晚时段 (除Ⅴ区外) 出现另一峰值，各区域后汛期在下午至傍晚时段的短持续降水频率明显高于前汛期。在降水贡献率方面，白天平均降水量基本以短持续降水过程贡献为主，夜间大部时段的平均降水量则以长持续降水过程的贡献偏大 (除后汛期Ⅳ区外)，长持续降水过程以较小的降水频率贡献了较大份额的降水量，这与刘煦等 (2020) 的研究结论类似。

3 广西汛期降水日变化差异的天气学成因

前文分析表明，广西汛期降水存在明显的日变化特征，且由于海陆差异、地形、夏季风等多种因素影响，导致降水日变化特征呈现显著的地域性差异。下文将以 02 时、14 时为例，分析 2005—2022 年前、后汛期不同区域的水汽、热力和动力条件差异，探讨环境条件对降水日变化的影响。

3.1 水汽条件

充沛的水汽是降水产生的必要条件 (杨舒楠等，2023)。从大气整层可降水量以及 700 hPa 以下整层水汽通量散度分布图 (图 8) 可见，02 时 (图 8a、c) 整层可降水量较大，前、后汛期分别超过 48 mm 和 55 mm，水汽相当充沛，且除Ⅱ区东北部外均具有较明显的水汽辐合，利于下半夜至凌晨时段降水的发生发展，尤其前汛期Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅴ区和后汛期Ⅴ区 (后汛期Ⅱ区虽存在水汽辐合中心，但东北部水汽辐散区范围偏大)。14 时 (图 8b、d) 整层可降水量较 02 时有所增加，但各区域水汽辐合作用明显减弱，水汽辐合主要集中在前汛期Ⅱ区、Ⅳ区和后汛期Ⅳ区。总体来看，水汽辐合状况与前文不同区域的平均降水量 (图 3、图 4) 关系密切，水汽辐合大值区往往对应着较大的平均降水量。

3.2 热力条件

热力不稳定条件是触发对流抬升的关键因素之一 (史月琴等，2022)，CAPE 是对流降水发展强弱的指标之一，假相当位温则是一个综合大气温度、气压、湿度的热力条件参量，可反映大气中能量的分布

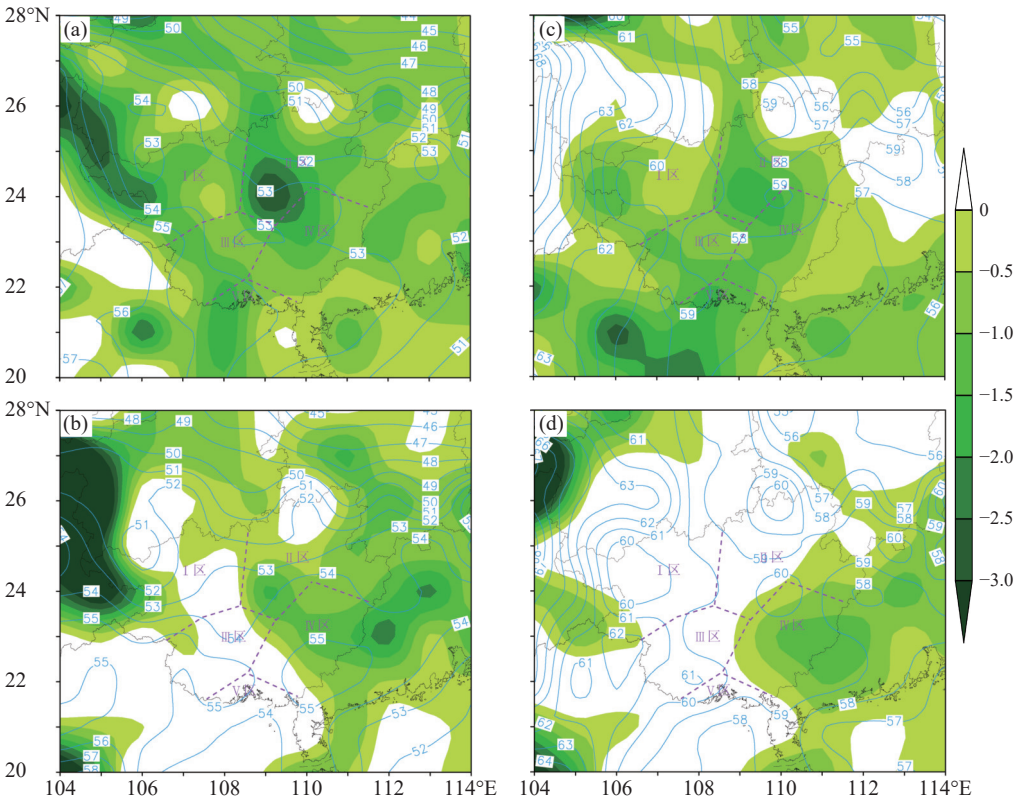


图 8 2005—2022 年广西前汛期 (a、b)、后汛期 (c、d) 02 时 (a、c)、14 时 (b、d) 平均大气整层可降水量 (等值线，单位：mm) 和 700 hPa 以下整层水汽通量散度 (填色，单位：10^{-4} g·cm^{-2}·s^{-1})

Fig. 8 Average precipitable water vapor (contour, unit: mm) and the total water vapor flux divergence below 700 hPa (shaded, unit: 10^{-4} g·cm^{-2}·s^{-1}) at (a, c) 02:00 BT and (b, d) 14:00 BT during the (a, b) pre-flood season and (c, d) post-flood season in Guangxi from 2005-2022

(余洋等, 2024)。CAPE 值和 925 hPa 假相当位温分布图 (图 9) 显示, 02 时 (图 9a、c) CAPE 值普遍较弱, 大于 600 J·kg^{-1} 的区域只出现在Ⅳ区南部和Ⅴ区, 假相当位温在前、后汛期分别介于 336~346 K 和 348~352 K, 后汛期明显偏高, 主要是由于其夏季风水汽较强, 利于不稳定能量累积。14 时 (图 9b、d) 因太阳辐射增强导致陆地表面感热得到增强, 各区域的 CAPE 值增强明显, 假相当位温相应也有所升高, 利于下午至傍晚时段短时强降水的出现 (徐瑗等, 2024)。特别是前汛期Ⅲ区、Ⅳ区以及后汛期Ⅲ区、Ⅳ区、Ⅴ区的 CAPE 值较大且存在假相当位温高能舌, 导致降水强度出现明显峰值, 利于平均降水量增长 (图 3、图 4)。

3.3 动力条件

强降水的形成需要持续的、强的上升运动, 而动力条件是判断对流能否发展和维持的关键因素 (刘嘉劲等, 2023)。从 850 hPa 风场、散度和 700 hPa 垂直速度分布图 (图 10) 可见, 在前汛期 (图 10a、b), 850 hPa 盛行西南风, 利于孟加拉湾和北部湾水汽向广西输送; 02 时 (图 10a) 季风偏强, 在山谷风环流的共同作用下, 高原山麓地带的Ⅰ区和Ⅱ区附近出现较强的水平风辐合, 且 700 hPa 存在明显的垂直上升运动, 故其平均降水量、降水频率和降水强度明显大于平原地带的Ⅲ区、Ⅳ区 (图 3); 14 时 (图 10b) 季风减弱, Ⅰ区、Ⅱ区水平风辐合和垂直上升运动均有所减弱, 特别是Ⅰ区减弱明显, 而Ⅳ区辐合上升运动增强, 故Ⅳ区平均降水量、降水频率和降水强度明显大于其余区域 (图 3)。后汛期 (图 10c、d) 广西一般处在副高南侧边缘或被其控制, 故 850 hPa 盛行东南风, 但风场较前汛期偏弱; 02 时 (图 10c) 水平风辐合大值区 (辐合值超过 0.6×10^{-5} s^{-1})出现在Ⅰ区, 配合较强的垂直上升运动, 使Ⅰ区平均降水量、降水频率大于Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区 (图 4); 14 时 (图 10d) 水平风辐合较弱, 但此时热力条件非常好 (图 9d), 各区域仍维持一定强度的垂直上升运动, 尤其Ⅲ区、Ⅳ区, 使其平均降水量、降水频率和降水强度大于Ⅰ区、Ⅱ区 (图 4)。Ⅴ区在前、后汛期大部时段的降水均比较强 (图 3、4), 但其 850 hPa 水平风辐合和 700 hPa 垂直上升运动并未非常强 (图 10), 主要是因为沿海地区水平风辐合主要发生在大气边界层较低高度 (Chen et al., 2018)。

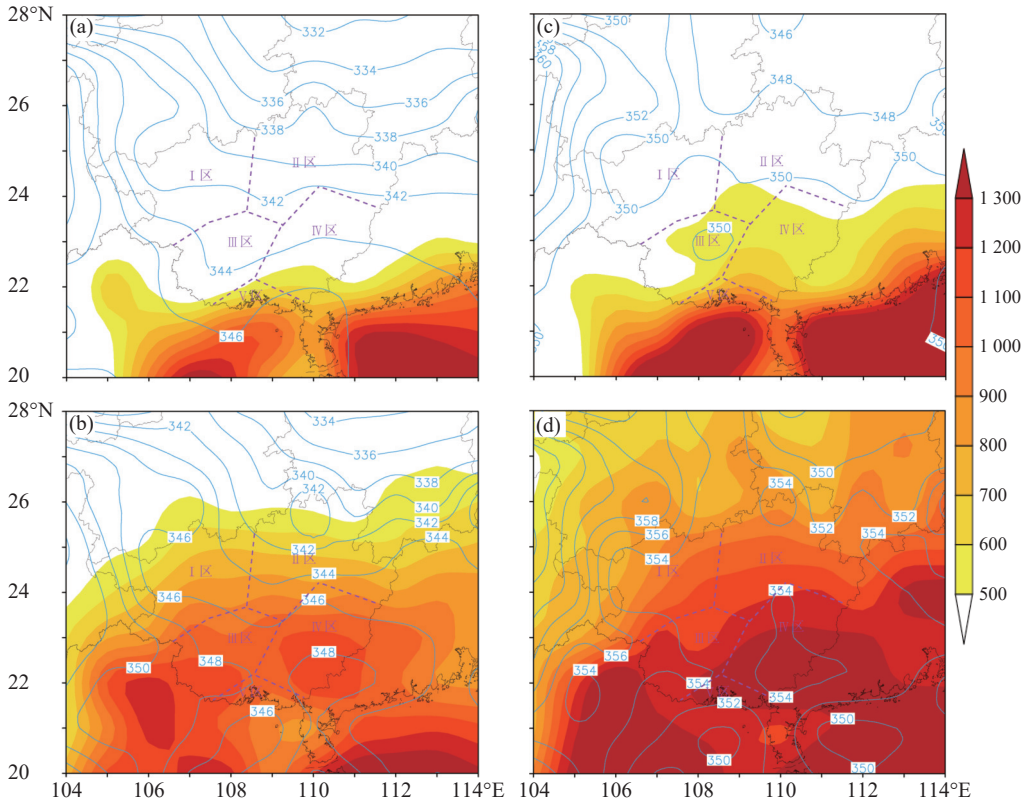


图 9 2005—2022 年前汛期 (a、b)、后汛期 (c、d) 02 时 (a、c)、14 时 (b、d) 平均 CAPE 值 (填色, 单位: J·kg^{-1}) 和 925 hPa 假相当位温 (等值线, 单位: K)

Fig. 9 Average CAPE distribution (shaded, unit: J·kg^{-1}) and pseudo-equivalent potential temperature at 925 hPa (contour, unit: K) at (a, c) 02:00 BT and (b, d) 14:00 BT during the (a, b) pre-flood season and (c, d) post-flood season from 2005-2022

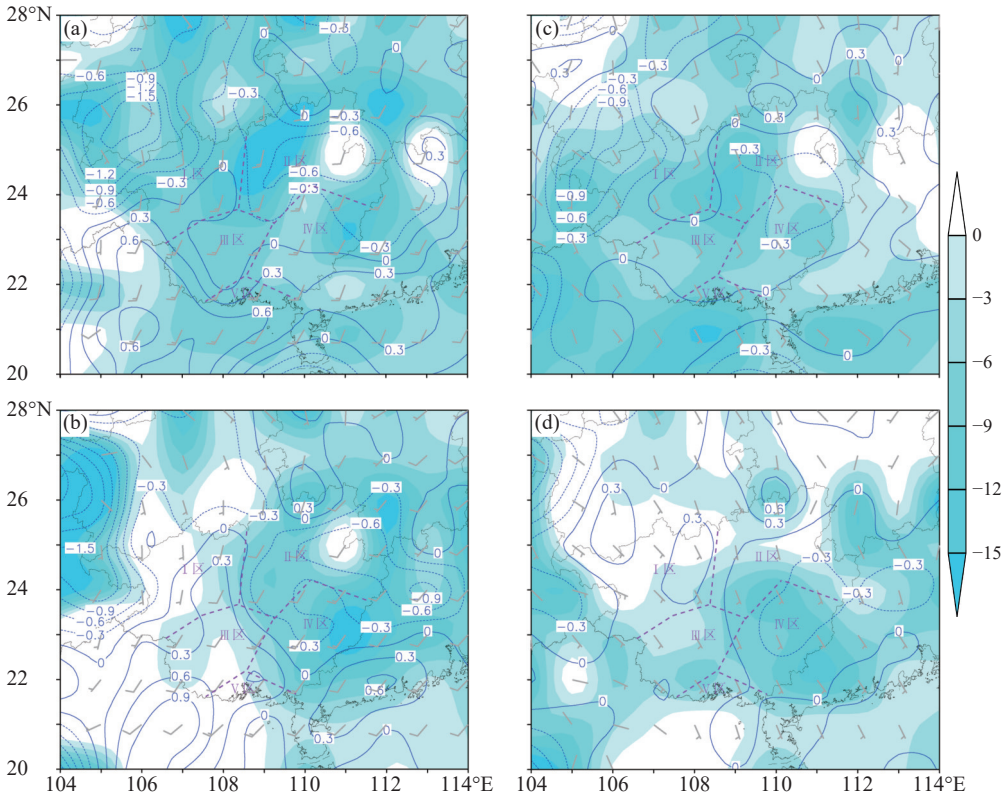


图 10 2005—2022 年前汛期 (a、b)、后汛期 (c、d) 02 时 (a、c)、14 时 (b、d) 850 hPa 风场 (风向杆, 单位: $m\cdot s^{-1}$)、散度 (等值线, 单位: $10^{-5}\ s^{-1}$) 和 700 hPa 垂直速度 (填色, 单位: $10^{-2}\ Pa\cdot s^{-1}$)

Fig. 10 Average wind field (barb, units: $m\cdot s^{-1}$) and divergence (contour, units: $10^{-5}\ s^{-1}$) at 850 hPa, vertical velocity at 700 hPa (shaded, units: $10^{-2}\ Pa\cdot s^{-1}$) at (a, c) 02:00 BT and (b, d) 14:00 BT during the (a, b) pre-flood season and (c, d) post-flood season from 2005-2022

4 结论与讨论

本文利用 2005—2022 年广西汛期 91 个国家站逐小时降水资料, 应用 *K* 均值聚类算法将广西汛期降水客观划分为 5 个区域 (Ⅰ区桂西北、Ⅱ区桂东北、Ⅲ区桂西南、Ⅳ区桂东南、Ⅴ区桂南沿海), 分析揭示广西 5 个区域前、后汛期降水日变化特征, 得出主要结论如下:

(1) 前、后汛期全区平均降水量日变化特征存在明显差异。前汛期呈单峰型, 峰值出现在下半夜至凌晨时段, 以夜间降水为主; 后汛期呈双峰型, 峰值出现在下半夜至凌晨、下午至傍晚时段, 且白天降水总体较夜间偏多。

(2) 前、后汛期降水的日变化特征存在地域性差异。Ⅰ区、Ⅱ区降水量和降水频率在前汛期呈单峰型但后汛期转变为双峰型, Ⅲ区、Ⅳ区在前、后汛期均呈双峰型, Ⅴ区在前、后汛期均呈单峰型。Ⅰ区、Ⅱ区凌晨至上午的峰值存在自西向东传播的特征。降水强度在前汛期夜间以Ⅴ区、Ⅰ区、Ⅱ区偏强, 而白天以Ⅴ区、Ⅳ区、Ⅲ区偏强; 在后汛期夜间以Ⅴ区偏强、其余区域相近, 而白天以Ⅴ区、Ⅳ区、Ⅲ区偏强。

(3) 夜间以持续时间小于 14 h 的降水过程较为活跃, 白天以持续时间小于 6 h 的降水过程为主。随降水持续时间增加, 平均降水量累计值呈现先增后减趋势, 峰值对应持续时间 2~4 h 的降水过程。长持续降水过程发生频率远低于短持续降水过程。平均降水量在白天基本以短持续降水过程贡献为主, 在夜间大多时段则以长持续降水过程的贡献偏大。

(4) 降水日变化与水汽、热力和动力条件密切相关。下半夜至凌晨时段强降水归因于较明显的水汽辐合和较强的辐合上升运动, 下午至傍晚时段强降水则主要归因于充沛的水汽条件和较强的热力强迫作用。

本文利用广西汛期逐小时降水资料, 采用客观分区, 对比分析广西前、后汛期不同区域的降水量、降水频率、降水强度和降水持续时间的日变化特征。所得到的研究结果不仅进一步印证了廖胜石等 (2023) 的研究结论, 还得到一些新的结论: 桂东北、桂西北降水量由前汛期单峰型转变为后汛期双峰型, 但由于后汛期下午至傍晚的峰值较弱, 故整个汛期来看会出现弱峰被平滑而呈单峰型; 桂东南降水量在前、后汛期均呈双峰型, 但凌晨附近的次峰较弱

而下午至傍晚的主峰较强, 故整个汛期来看也呈单峰型; 长、短持续降水过程对平均降水量的贡献在夜间和白天有明显差异等。本文研究结果有助于加深对广西汛期降水日变化特征的认识。然而, 本文尚未从复杂地形下广西各区域降水日变化及演变机理成因进行分析, 相关研究还有待进一步探讨。

参考文献 (References):

白爱娟,刘晓东,刘长海.2011.青藏高原与四川盆地夏季降水日变化的对比分析[J].高原气象,30(4):852−859 Bai A J, Liu X D, Liu C H. 2011. Contrast of diurnal variations of summer precipitation between the Tibetan Plateau and Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology, 30(4):852−859 (in Chinese)

董良淼,翟丽萍,覃月凤,等.2021. 2018 年广西东南部一次暴雨过程分析[J].沙漠与绿洲气象,15(3):46−54. Dong L M, Zhai L P, Qin Y F, et al. 2021. Comprehensive analysis of a heavy rainfall process in the Southeast of Guangxi on 10 May 2018 [J]. Desert and Oasis Meteorology,15(3):46−54 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2021.03.006

公颖,杨阳,周小珊,等.2017.辽宁暴雨的日变化特征及其成因分析[J].暴雨灾害,36(2):125−131. Gong Y, Yang Y, Zhou X S, et al. 2017. Characteristic analysis and mechanism study of the diurnal variation of heavy rain in Liaoning [J]. Torrential Rain and Disasters,36(2):125−131 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.02.004

《广西天气预报技术和方法》编写组.2012.广西天气预报技术和方法[M].北京:气象出版社:12. Writing Group of "Guangxi Weather Forecast Technology and Methods". 2012. Guangxi Weather Forecast Technology and Methods [M]. Beijing:Meteorological Press:12 (in Chinese)

黄永新.2000.广西汛期降水气候特征分析及客观分区[J].广西气象,2000(S1):16−20. Huang Y X. 2000. The climatic characteristics analysis and objective partition of precipitation in flood season in Guangxi [J]. Journal of Guangxi Meteorology,2000(S1):16−20 (in Chinese)

江帆,王东海,曾智琳.2024.近 20 年季风爆发前后珠江三角洲前汛期短时强降水的时空演变特征与成因[J].大气科学,48(2):715−734. Jiang F, Wang D H, Zeng Z L. 2024. Spatiotemporal evolution characteristics and causes of short-duration heavy rainfall in the presummer rainy season over the Pearl River Delta Region before and after the South China Sea summer monsoon onset in the past 20 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(2):715−734 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2208.22102

蒋国兴.2007.广西地形分布与前汛期降水时空变化关系[J].热带地理,27(3):207−212. Jiang G X. 2007. Relations between terrain distribution and spatial-temporal change of early flood season precipitation in Guangxi [J]. Tropical Geography,27(3):207−212 (in Chinese). doi:10.13284/j.cnki.rddl.001010

蒋星,李勇.2010. 2010 年 5 月大气环流和天气分析[J].气象,36(8):111−115. Jiang X, Li Y. 2010. Analysis of the May 2010 atmospheric circulation and weather [J]. Meteorological Monthly,36(8):111−115 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2010.8.016

孔期.2010. 2010 年 6 月大气环流和天气分析[J].气象,36(9):120−125. Kong Q. 2010. Analysis of atmospheric circulation and weather in June 2010 [J]. Meteorological Monthly,36(9):120−125 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2010.9.020

李德帅.2016.基于逐小时资料的华南地区汛期降水时空变化特征及其成因研究[D]. 兰州:兰州大学. Li D S. 2016. Research on the spatiotemporal characteristics of hourly precipitation over South China during the warm season and its possible causes [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese)

李华实,农明哲,马智,等.2023.基于地面高时空分辨率观测资料的广西极端短历时降水特征分析[J]. 气象水文海洋仪器,40(3):59-62. Li H S, Nong M Z, Ma Z, et al. 2023. Analysis of extreme short duration precipitation characteristics in Guangxi based on surface high temporal and spatial resolution observation data [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments,40(3):59-62 (in Chinese). doi:10.19441/j.cnki.issn1006−009x.2023.03.017

李争辉,罗亚丽.2021. 1980—2017 年南海季风爆发前后华南前汛期降水统计特征对比分析[J].暴雨灾害,40(2):101−110. Li Z H, Luo Y L. 2021. Statistical characteristics of pre-summer rainfall over South China before and after South China Sea monsoon onset from1980 to 2017 [J]. Torrential Rain and Disasters,40(2):101−110 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.02.001

廖胜石,卓健,罗建英,等.2022.广西汛期极端短时强降水特征分析[J].暴雨灾害,41(3):308−314. Liao S S, Zhuo J, Luo J Y, et al. 2022. Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):308−314 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.03.007

廖胜石,卓健,陆甲.2023.基于小时数据的广西汛期降水日变化特征[J].气象研究与应用,44(2):27−32. Liao S S, Zhuo J, Lu J. 2023. Analysis of diurnal variation characteristics of precipitation in Guangxi during the flood season based on hourly data [J]. Journal of Meteorological Research and Application,44(2):27−32 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45−1356/P.2023.2.05

刘嘉劲,李泳泽,林佩贤,等.2023. 2020 年深汕区两次特大暴雨过程成因的诊断对比[J].热带气象学报,39(5):711−725. Liu J J, Li Y Z, Lin P X, et al. 2023. Diagnostic analysis of two torrential rainfall events in 2020 in Shenzhen-Shanwei Special Cooperation Zone [J]. Journal of Tropical Meteorology,39(5):711−725 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2023.062

刘煦,凌艺,张凯静.2020.山东半岛地区夏半年降水日变化特征[J].干旱气象,38(2):234−241. Liu X, Ling Y, Zhang K J. 2020. Diurnal variation characteristics of precipitation in summer half year in Shandong Peninsula [J]. Journal of Arid Meteorology,38(2):234−241 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2020)−02−0234

罗乃兴,周林,李杨,等.2023.基于小时降水资料的贵州降水精细特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(4):38−44. Luo N X, Zhou L, Li Y, et al. 2023. Precipitation distribution in Guizhou Province based on hourly rain-gauge data [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):38−44 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.04.006

彭莉莉, 邓剑波, 谢傲.2020.基于梯度观测小时数据的南岳山降水日变化特征[J].暴雨灾害,39(2):201−206. Peng L L, Deng J B, Xie A. 2020. Diurnal variation of precipitation at the southern slope in Nanyue Mountain based on hourly rain dataset from gradient observation [J]. Torrential Rain and Disasters,39(2):201−206 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.02.011

史月琴,高松影,孙晶,等.2022.辽宁一次区域性暴雨的特征条件与成因分析[J].高原气象,41(3):630−645. Shi Y Q, Gao S Y, Sun J, et al. 2022. Analysis of the characteristics and mechanism of a regional heavy rain event in Liaoning Province [J]. Plateau Meteorology,41(3):630−645 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00094

王国栋,金大超,陈君芝,等.2019.两广地区前、后汛期降水异常反位相现象及可能机理[J].大气科学学报,42(6):855−863. Wang G D, Jin D C, Chen J Z, et al. 2019. Anti-phase relationship between first and

second rainy season precipitation anomaly in Guangdong-Guangxi region and its possible mechanism [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,42(6):855−863 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180815003

王莉萍,王韫喆,向欣,等.2023.基于耿贝尔—线性矩和 K-Means 算法的短时强降水等级划分研究[J].地球物理学报,66(8):3171−3184. Wang L P, Wang Y Z, Xiang X, et al. 2023. Research on classification of short-duration heavy rain based on Gumbel—Linear Moment and K-Means algorithm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(8):3171−3184 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2022Q0317

肖柳斯, 张华龙, 吴乃庚, 等.2024.广东省汛期分钟尺度极端降水的时空分布及持续性特征[J].大气科学,48(5):1728−1742. XIAO Liusi, ZHANG Hualong, WU Naigeng, et al. 2024. Spatiotemporal distribution and duration characteristics of minute scale extreme precipitation during flood season in Guangdong Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(5):1728−1742 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2302.22130

徐瑗,喻琴昆,刘成刚,等.2024.川西高原甘孜州汛期短时强降水的时空分布特征[J].高原山地气象研究,44(2):50−57. Xu Y, Yu Q K, Liu C G, et al. 2024. Temporal and spatial distribution characteristics of short-duration heavy rainfall in Ganzi Prefecture [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(2):50−57 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.02.006

杨舒楠,张芳华,胡艺,等.2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J].暴雨灾害,42(5):508−520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics and causes of the "23·7" torrential rainfall event in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):508−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−187

宇如聪,李建,陈昊明,等.2014.中国大陆降水日变化研究进展[J].气象学报,72(5):948−968. Yu R C, Li J, Chen H M, et al. 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica,72(5):948−968 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.047

余洋,万蓉,付志康,等.2024.基于 GNSS 水汽和地面假相当位温观测的短时强降水阈值预报方法研究[J].气象,50(5):603−615. Yu Y, Wan R, Fu Z K, et al. 2024. Development of a threshold prediction model for short-time severe precipitation based on GNSS-Derived PWV and pseudo-equivalent temperature [J]. Meteorological Monthly,50(5):603−615 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.032801

赵玮,郝翠,曹洁,等.2022.近 40 年北京地区夏季降水日变化及不同持续时间降水事件的特征[J].大气科学,46(5):1167−1176. Zhao W, Hao C, Cao J, et al. 2022. Diurnal variation characteristics of summer precipitation and precipitation events with different durations in Beijing in the past 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 46(5):1167−1176 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2204.22028

赵玉春,王叶红.2020.我国东南沿岸及复杂山地后汛期降水日变化的数值研究[J].大气科学,44(2):371−389. Zhao Y C, Wang Y H. 2020. A numerical study of the diurnal variations in second rainy season rainfall in the coastal and mixed topographical regions of Southeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,44(2):371−389 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1906.18264

张青梅,李生辰,苏永玲,等.2022.青海高原短时强降水时空分布及天气学概念模型[J].高原气象,41(2):515−525. Zhang Q M, Li S C, Su Y L, et al. 2022. Temporal-spatial distribution characteristics and synoptic conceptual models of short-time heavy rainfall over the Qinghai Plateau [J]. Plateau Meteorology,41(2):515−525 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00068

郑志海,王永光. 2018. 2017 年夏季北半球大气环流特征及对我国天气气候的影响[J]. 气象,44(1):199-205. Zheng Z H, Wang Y G. 2018. Northern hemisphere atmospheric circulation characteristics in summer 2017 and its impact on weather and climate in China [J]. Meteorological Monthly, 44(1): 199-205 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.01.018

朱黎明,张智欣,魏庆伟.2021.基于 K 均值聚类的中国夏季降水日变化空间分布模式[J].气象科技,49(4):552−560. Zhu L M, Zhang Z X, Wei Q W. 2021. Spatial distribution of diurnal rainfall variation in summer over China using k-means algorithm [J]. Meteorological Science and Technology,49(4):552−560 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20200313

朱晓彤,姚凯,涂钢,等.2024.东北暖季冷涡降水日变化的聚类分析[J].气候与环境研究,29(2):136−144. Zhu X T, Yao K, Tu G, et al. 2024. Clustering analyses of diurnal precipitation variations associated with the northeast cold vortex in warm season [J]. Climatic and Environmental Research,29(2):136−144 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2023.23095

Bai L Q, Chen G X, Huang L. 2020. Convection initiation in monsoon coastal areas (South China) [J]. Geophysical Research Letters, 47(11):e2020GL087035. doi:10.1029/2020GL087035

Chen G X, Sha W M, Iwasaki T. 2009. Diurnal variation of precipitation over southeastern China: Spatial distribution and its seasonality [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,114:D13103. doi:10.1029/2008JD011103

Chen G X, Lan R Y, Zeng W X, et al. 2018. Diurnal variations of rainfall in surface and satellite observations at the monsoon coast (South China) [J]. Journal of Climate,31(5):1703−1724. doi:10.1175/JCLI−D−17−0373.1

Chen G X. 2020. Diurnal cycle of the Asian summer monsoon: Air pump of the second kind. [J] Journal of Climate,33(5):1747-1775. doi:10.1175/JCLI−D−19−0210.1

Chen X C, Zhang F Q, Zhao K. 2016. Diurnal variations of the land-sea breeze and its related precipitation over South China [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,73(12):4793−4815. doi:10.1175/jas−d−16−0106.1

Chen X C, Zhang F Q, Zhao K. 2017. Influence of monsoonal wind speed and moisture content on intensity and diurnal variations of the mei-yu season coastal rainfall over South China [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,74(9):2835−2856. doi:10.1175/JAS−D−17−0081.1

Jiang Z N, Zhang D L, Xia R D. et al. 2017. Diurnal variations of presummer rainfall over southern China [J], Journal of Climate,30(2): 755-773. doi:10.1175/JCLI−D−15−0666.1

Lee M H, Ho C H, Kim J H. 2010. Influence of tropical cyclone landfalls on spatiotemporal variations in typhoon season rainfall over South China [J]. Advances in Atmospheric Sciences,27(2):443−454. doi:10.1007/s00376−009−9106−3

Pan H, Chen G X. 2019. Diurnal variations of precipitation over North China regulated by the mountain-plains solenoid and boundary-layer inertial oscillation [J]. Advances in Atmospheric Sciences,36(8):863−884. doi:10.1007/s00376−019−8238−3

Su L, Fung J C H, Li J L, et al. 2021. Trends in diurnal cycle of summertime rainfall over Coastal South China in the past 135 years: characteristics and possible causes [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,126(8):e2020JD033621. doi:10.1029/2020JD033621

(责任编辑 闵爱荣)