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

南岭地区汛期短时强降水的时空变化特征分析

宋楠 吴珍珍 张春燕 叶成志 曾智琳 向钢 王佩

Analysis of spatiotemporal characteristics of the short-duration heavy rainfall during the flood season in Nanling Mountain

SONG Nan，WU Zhenzhen，ZHANG Chunyan，YE Chengzhi，ZENG Zhilin，XIANG Gang，WANG Pei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-014

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

基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究

Investigating the characteristics of short-duration heavy rainfall during flood season in Zhejiang Province using the minute rain gauge data

暴雨灾害. 2025, 44(1): 60-70 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-062

北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析

Comparison of short-duration heavy rainfall environmental conditions during two extreme torrential rainfall events over Beijing area

暴雨灾害. 2021, 40(1): 27-36 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.004

贵州省短时强降水时空分布特征分析

Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall in Guizhou Province

暴雨灾害. 2021, 40(4): 383-392 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.006

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

副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析

Analysis of water vapor during short-time heavy rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning Province

暴雨灾害. 2024, 43(5): 532-541 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-116

基于地面分钟雨量数据的湖北省短时强降水时空分布特征分析

Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Hubei Province based on minute rain gauge data

暴雨灾害. 2021, 40(1): 61-68 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.008

关注微信公众号，获得更多资讯信息

宋楠,吴珍珍,张春燕,等.2025.南岭地区汛期短时强降水的时空变化特征分析[J].暴雨灾害,44(6):780−791. SONG Nan, WU Zhenzhen, ZHANG Chunyan, et al. 2025. Analysis of spatiotemporal characteristics of the short-duration heavy rainfall during the flood season in Nanling Mountain [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):780−791 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−014

南岭地区汛期短时强降水的时空变化特征分析

宋楠[1, 2, 3, 4], 吴珍珍[1, 2, 3], 张春燕[5], 叶成志[1, 2, 3], 曾智琳[6], 向钢[7], 王佩[4]

(1. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118; 2. 洞庭湖国家气候观象台, 长沙 410118; 3. 湖南省气象科学研究所, 长沙 410118; 4. 湖南省郴州市气象局, 郴州 423000; 5. 广东省气象数据中心, 广州 510640; 6. 广东省气象台, 广州 510000; 7. 湖南省株洲市气象局, 株洲 412000)

摘　要: 南岭地区地形复杂, 下垫面非均匀性显著, 其特殊的地理位置加剧了强降水的局地性和突发性, 汛期 (4—9 月) 短时强降水往往给当地国民经济和人民的生命财产造成重大损失。利用 2013—2022 年 1 683 个气象观测站逐时降水数据和 ERA5 再分析数据, 将汛期分成晚春 (4 月)、初夏 (5—6 月)、盛夏 (7—8 月)、早秋 (9 月) 4 个次季节, 统计分析南岭地区汛期短时强降水时空变化特征, 并探讨地形对降水的影响。结果表明: (1) 短时强降水频次呈现南侧多北侧少、东西两侧多中部少的特征, 主要集中于越城岭南侧、都庞岭南侧、骑田岭西南侧和万洋山东侧及南侧, 平均频次分别为 89.1、64.7、49、52 次·(站·10 a)$^{-1}$。短时强降水的平均降水强度空间差异较小, 降水量与降水频次的空间分布一致。(2) 短时强降水季节变化显著, 从晚春到初夏全研究区月平均降水频次由 5.3 次·(站·10 a)$^{-1}$ 增加到 12.6 次·(站·10 a)$^{-1}$, 越城岭南侧增加尤其突出, 由 11.1 次·(站·10 a)$^{-1}$ 增加到 23 次·(站·10 a)$^{-1}$。盛夏和早秋逐渐减少到 8.6 和 3.7 次·(站·10 a)$^{-1}$。(3) 南岭短时强降水主要存在清晨 (03—06 时) 和午后 (15—19 时) 两个日变化峰值, 晚春以午夜至清晨为主, 初夏越城岭南侧和都庞岭南侧维持清晨峰值, 骑田岭西南侧和万洋山东侧及南侧降水峰值开始向午后到傍晚转变, 盛夏除了越城岭南侧, 南岭大部以午后短时强降水为主, 早秋各区域短时强降水减少, 午后峰值仍存在于骑田岭西南侧和万洋山东侧及南侧。(4) 随着季节从春向夏秋转换, 清晨短时强降水减少、范围缩小, 午后短时强降水增多、范围由东向西扩, 这与环流系统季节性北移、东西太阳辐射差异等因素有关。(5) 南岭西段多发生清晨短时强降水, 是由增强的西南气流和山脉迎风坡的抬升作用主导; 而南岭东段多发生午后短时强降水, 则源于太阳辐射加热作用形成的强热力不稳定。

关键词: 南岭地区; 短时强降水; 时空特征; 地形作用

中图法分类号: P466　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−014

Analysis of spatiotemporal characteristics of the short-duration heavy rainfall during the flood season in Nanling Mountain

SONG Nan[1, 2, 3, 4], WU Zhenzhen[1, 2, 3], ZHANG Chunyan[5], YE Chengzhi[1, 2, 3], ZENG Zhilin[6], XIANG Gang[7], WANG Pei[4]

(1. *Key laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hunan Province*, *Changsha* 410118; 2. *Dongting Lake National Climatological Observatory*, *Changsha* 410118; 3. *Hunan Meteorological Research Institute*, *Changsha* 410118; 4. *Chenzhou Meteorological Bureau*, *Chenzhou* 423000; 5. *Guangdong Meteorological Data Center*, *Guangdong Meteorological Administration*, *Guangzhou* 510640; 6. *Guangdong Meteorological Observatory*, *Guangzhou* 510640; 7. *Zhuzhou Meteorological Bureau*, *Zhuzhou* 412000)

Abstract: The complex terrain and heterogeneous underlying surface of the Nanling region, combined with its unique geographical location, contribute to the highly localized and sudden nature of heavy precipitation events. The short-duration heavy rainfall from April to September (the flood season) poses significant threats to local socio-economic activities and public safety. Hourly precipitation data from automatic meteorological stations and ERA5 reanalysis data from 2013 to 2022 were analyzed to divide the flood season into four sub-

收稿日期: 2025−01−24; **定稿日期**: 2025−10−28

资助项目: 湖南省自然科学基金青年基金项目 (2023JJ40369); 中国气象局高影响天气 (专项) 重点开放实验室项目 (2024-G-10); 湖南省自然科学基金重大专项 (2021JC0009); 湖南省气象局重点课题 (XQKJ22A003)

第一作者: 宋楠, 主要从事天气预报技术、气象防灾减灾研究。E-mail: 651573038@qq.com

通信作者: 吴珍珍, 主要从事中小尺度天气动力学、气象防灾减灾研究。E-mail: 75502361@qq.com

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

seasons, including late spring (April), early summer (May to June), midsummer (July to August), and early autumn (September). Then, the spatiotemporal characteristics of short-duration heavy precipitation during the flood season in the Nanling area and the effects of topography were investigated. The results are as follows. (1) Short-duration heavy rainfall exhibits a distinct spatial pattern in the Nanling region, showing more frequent occurrence on the southern slopes than the northern slopes, and more frequent on the eastern and western sides than the central part. It is mainly concentrated on four regions, the southern slopes of Yuechengling, Dupangling, the southwestern of Qitianling, and eastern and southern Wanyangshan, with average precipitation frequencies of 89.1, 64.7, 49, and 52 times (station·10a)$^{-1}$, respectively. The average precipitation intensity of short-duration heavy rainfall shows minimal spatial variation, and precipitation amount is consistent with that of precipitation frequency patterns. (2) Seasonal variability is pronounced for short-duration heavy rainfall, increasing from late spring (5.3 times (station·10 a)$^{-1}$) to early summer (12.6 times (station·10 a)$^{-1}$). A particular increase is found on the southern sides of Yuechengling, from 11.1 to 23 times (station·10 a)$^{-1}$. In midsummer and early autumn, the frequency decreases to 8.6 and 3.7 times (station·10 a)$^{-1}$, respectively. (3) Diurnal peaks occur in the early morning (03:00—06:00) and afternoon (15:00—19:00) in the Nanling Mountains, while the peak mainly occurs from midnight to early morning in late spring. In early summer, early-morning peaks are found on the southern Yuechengling and Dupangling, while peak shifts to afternoon and evening on the southern Qitianling and eastern and southern sides of Wanyangshan. In midsummer, short-duration heavy rainfall mainly occurs in the afternoon except for the southern side of Yuechengling. In early autumn, short-duration heavy rainfall decreases in all regions, while the afternoon peak remains on the southern Qitianling and the eastern and southern sides of Wanyangshan. (4) Seasonal transition from spring to summer and autumn correlates with decreasing amount and coverage of short-duration heavy rainfall in the morning, but increasing afternoon events with the expansion from east to west. This is linked to the seasonal northward shift of circulation and east-west solar radiation gradients. (5) Morning short-duration heavy rainfall frequently appears in the western Nanling, which is possibly driven by enhanced southwesterly flows and orographic lifting. But afternoon short-duration heavy rainfall is more common in the eastern Nanling, possibly resulting from solar heating-induced thermal instability.

Key words: the Nanling Mountains; short-duration heavy rainfall; spatiotemporal characteristics; topographic effect

引　言

南岭地区地形复杂, 是我国南方最重要的山脉, 贯穿我国南部桂、湘、粤、赣四省, 对岭南岭北的气候起到了隔离作用 (周凌云, 2006)。一方面, 南岭山脉迫使冷空气停滞堆积, 与西南暖湿气流交汇形成静止锋引发持续性强降水, 或山脉复杂地形对冷空气产生分流与抬升作用, 促使冷空气小股入侵进而触发对流造成局地强降水 (何立富, 2006; 李博等, 2013); 另一方面, 尽管南岭山脉整体呈东西走向, 但山脉并不连续, 山脉走向不一致, 山势比较散乱、破碎 (刘厚培和朱景郊, 1992), 因而形成许多喇叭口、迎风坡地形, 也使得该区域局地短时强降水频发 (夏茹娣等, 2006; 付炜等, 2018, 2020)。总的来说, 南岭破碎的地形和强烈的山体起伏影响流场结构, 造成强盛的水汽辐合和强的动力抬升条件, 对强对流触发有显著作用 (陈芳丽等, 2022; 付炜等, 2022)。南岭地区强降水极易引发洪涝和山体滑坡、泥石流等地质灾害, 造成重大人员伤亡和财产损失, 如 2021 年 6 月 1 日湖南省郴州市桂东县强降水引发严重群发性山洪地质灾害导致 4 人死亡、2 人受伤; 2024 年 7 月“格美”台风极端强降水导致湖南省郴州市资兴市 50 人遇难、15 人失踪。

降水除了与复杂地形密切相关外, 还存在显著的区域差异以及季节与日变化特征。Yu 等 (2007) 指出夏季 (6—8 月) 长江中游以南降水峰值出现在清晨, 华南降水峰值出现在傍晚。Chen 等 (2018) 进一步指出, 华南北部多夜间降水, 沿海和迎风坡多早晨降水, 华南其他地区以午后降水为主。Fu 等 (2023) 根据峰值出现时间将华南降水分为午后、傍晚、清晨 3 类降水模式。其中, 夜间至清晨的降水一般集中在珠江三角洲东北部和沿海地区, 午后降水主要出现在内陆。降水峰值时间随季节变化而改变, 11—3 月中国南方降水峰值出现在清晨, 5—9 月西南地区有清晨和午后双峰值, 东南地区为午后峰值 (Li et al, 2008; 李国平, 2025)。我国东南部春季 (3—4 月) 降水多发生在午夜到清晨, 初夏 (5—6 月) 降水显著增多且开始出现午后峰值, 盛夏 (7—8 月) 以午后峰值为主 (Chen et al., 2009a)。在梅雨前, 青藏高原以东至中国中东部地区呈现出一带状夜雨特征, 而进入梅雨期直至盛夏, 带状夜雨减弱消失转为午后降水 (Xu and Zipse, 2011; 范江琳等, 2019; 李永军和卢萍, 2024)。此外, 众多学者研究表明, 短时强降水高发区多出现在山脉南侧喇叭口地形处, 且存在显著的夜间发展特征 (Zhang and Zhai, 2011; 周芳驰等, 2023; 郭丽芳等, 2025)。以华南北部的南岭山脉为例, 梁钟清等 (2023) 指出, 南岭山脉的存在使得山区和平原温差加大, 夜晚沿山坡下滑的山风与北上的西南气流相遇, 形成中尺度地面辐合线, 易促发对流。

上述对中国南方的降水特征的研究大多聚焦于长江中下游一带或华南地区，南岭作为南方的关键地形阻隔带，针对南岭地区降水变化特征尤其是强降水变化特征鲜有研究。在南岭复杂地形背景下，汛期短时强降水局地性、突发性强、危害重，易引发山洪、滑坡、泥石流等次生灾害，而目前对南岭复杂地形下的局地性、突发性短时强降水时间和落区预报远不能满足精细化服务需求。因此，本文利用 2013—2022 年 4—9 月逐时气象观测站降水数据，探讨南岭地区汛期(4—9 月) 短时强降水的时空变化特征，以期进一步充实对南岭地区强降水特征的认识，为后续开展相关科学研究和提高强降水预报准确率提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的研究资料包括：(1) 中国气象局国家气象信息中心提供的 2013—2022 年 4—9 月气象观测站 (含国家站和区域站) 逐小时降水观测资料，用于分析南岭地区短时强降水特征。由于南岭地区的许多区域气象站设立时间为 2013 年以后，且部分区域站存在数据缺测或数据错误等问题，为确保研究结果的准确性，对研究区域 (109.5°—114.8°E, 24.4°—27°N) 内所有区域站降水数据进行界值、时间、空间等一致性检查，经过处理和剔除，最终保留 1 683 个站；(2) 欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 提供的 ERA5 (ECMWF Reanalysis 5th Generation) 再分析资料，该资料时间间隔为 1 h，空间分辨率为 0.25° × 0.25°，物理要素包括水平风、垂直速度和地面接收的太阳净辐射等，用于分析南岭短时强降水的环流特征和太阳辐射的差异；(3) 地理空间数据云提供的美国航空航天局 SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission) 高分辨率地形高程数据，数据版本为 V4.1，分辨率精度为 90 m。

1.2 短时强降水定义

短时强降水作为一种对流性天气，其引发的暴洪和地质灾害往往造成的重大的人员伤亡和财产损失 (樊李苗和俞小鼎, 2013)。小时降水量≥20 mm 是被广泛采用的短时强降水标准 (Zhang and Zhai, 2011; 陈炯等, 2013; 俞小鼎等, 2013)，本文将站点的小时降水量达到 20 mm 时，记为一站次的短时强降水，未特殊说明外，文中统计的降水均为短时强降水。某站的短时强降水频次为此站 2013—2022 年累计短时强降水次数，短时强降水平均强度为站点短时强降水的降水量与历时之比。

1.3 次季节划分

将研究区所有站点在一天中各时次的短时强降水频次，按月分别进行站点平均，得到从南岭地区 4—9 月逐月短时强降水频次日变化曲线 (图 1)。汛期不同月份的短时强降水频次具有不同的日变化特征，4 月和 9 月日变化曲线较为平缓，但 4 月短时强降水主要发生在清晨，而 9 月峰值在午后，5 月和 6 月短时强降水显著增多，主峰值在清晨，次峰值在午后，7 月和 8 月短时强降水转移到午后为主。综上所述并参考 Chen 等 (2009a) 和 Yuan 等 (2010) 对季节的划分和提法，将汛期分成晚春 (4 月)、初夏 (5—6 月)、盛夏 (7—8 月)、早秋 (9 月) 四个次季节。

1.4 研究区域划分

南岭山脉主要由“五岭”(越城岭、都庞岭、萌渚岭、骑田岭、大庾岭) 及附近山地构成 (周凌云，

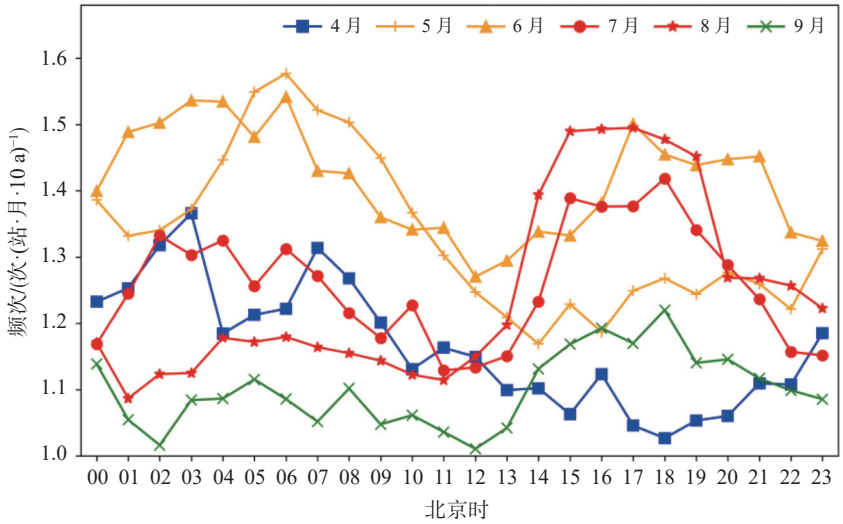


图 1 南岭地区 2013—2022 年 4—9 月短时强降水频次日变化

Fig. 1 Diurnal variation of short-duration heavy rainfall frequency over the Nanling region during April to September from 2013 to 2022

2006)。本文将南岭山脉及罗霄山脉中南段的万洋山脉称为南岭地区 (109.5°—114.8°E, 24.4°—27°N), 并根据地形和短时强降水频次分布特点划分出 A、B、C 和 D 共 4 个关键研究区域, 如图 2 所示。

2 短时强降水时空变化特征

2.1 空间分布特征

图 2 为 2013—2022 年南岭地区汛期 (4—9 月) 短时强降水的累计降水频次和平均降水强度的空间分布。从图 2a 可见, 短时强降水频次大值区与南岭地形密切相关, 整体而言, 南岭南部多北部少、东西两侧多中部少, 主要集中在越城岭南部及西部、都庞岭南部、东部和西部、骑田岭西南部、万洋山南部及东部, 短时强降水频次低值区主要分布在南岭北部的越城岭与万洋山之间的大片海拔较低处。A、B、C 和 D 区域的月平均降水频次分别为 89.1 次·(站·10 a)$^{-1}$、64.7 次·(站·10 a)$^{-1}$、49 次·(站·10 a)$^{-1}$ 和 52 次·(站·10 a)$^{-1}$。短时强降水的降水强度集中在 25~35 mm·h^{-1} 之间 (图 2b), 强度分布差异较小。

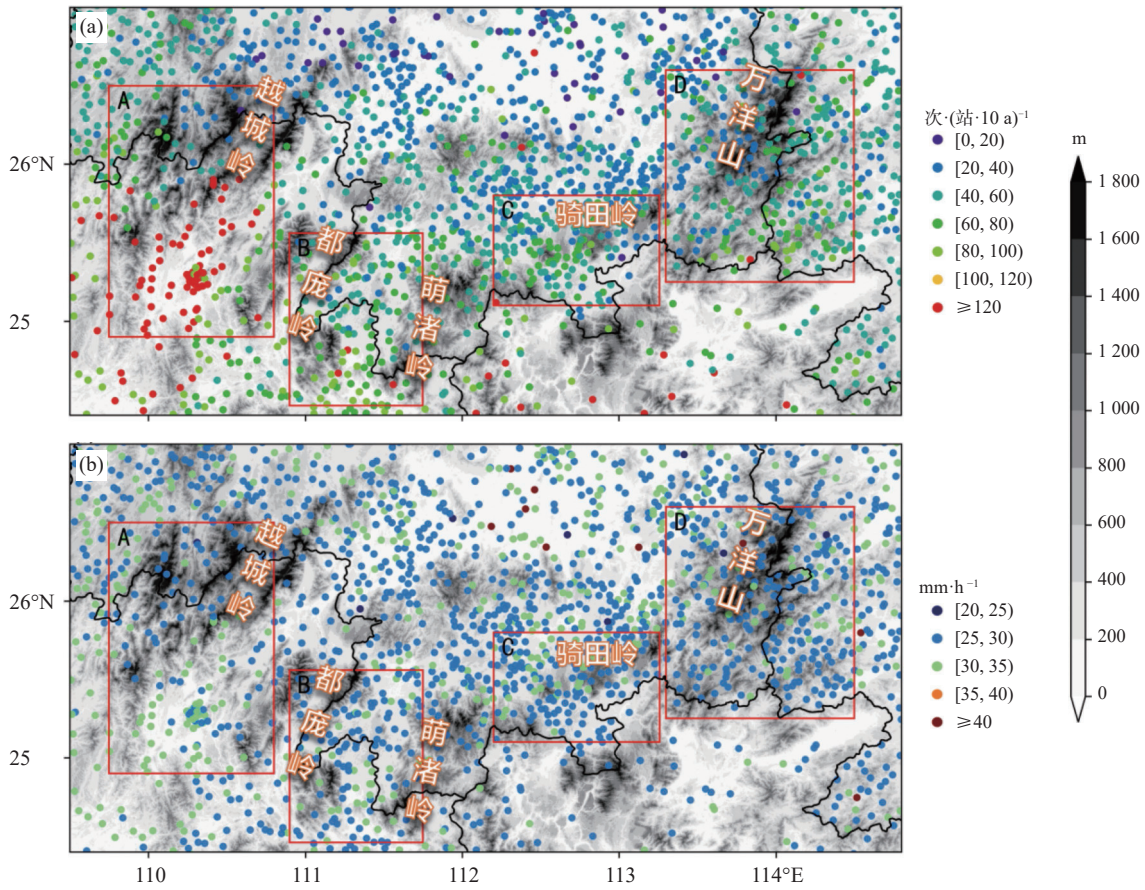


图 2 南岭地区 2013—2022 年汛期短时强降水的累计降水频次 (a) 和降水强度 (b) 的空间分布 (其中 A、B、C、D 红色矩形为关键研究区域, 下同, 阴影为地形高度)

Fig. 2 Spatial distributions of (a) short-duration heavy rainfall frequency and (b) intensity over the Nanling region during the rainy season of 2013—2022 (where red boxes labeled A, B, C, D represent key study areas, the same hereinafter, and shading denotes topographic elevation)

2.2 时间变化特征

根据次季节划分, 统计各次季节站点的短时强降水频次, 由于各次季节所含月份数量不一, 对各次季节内站点均进行月平均处理。图 3a、c、e、g 给出了南岭各次季节短时强降水的空间分布, 可见各季节短时强降水分布非常不均匀。晚春短时强降水主要发生在南岭地区西段 112°E 以西 (图 3a), 初夏整个南岭范围短时强降水明显增多, 月平均降水频次由 5.3 次·(站·10 a)$^{-1}$ 增加到 12.6 次·(站·10 a)$^{-1}$。特别是 A 区的越城岭南侧 (110°—111°E) 和 D 区的万洋山南侧 (114 °E 附近) 增加显著 (图 3c), 其中 A 区月平均降水频次由晚春的 11.1 次·(站·10 a)$^{-1}$ 增加到初夏的 23 次·(站·10 a)$^{-1}$。盛夏短时强降水减少, 尤其是 A 和 B 区, A 区由 23 次·(站·10 a)$^{-1}$ 减少到 13 次·(站·10 a)$^{-1}$, B 区由 16.7 次·(站·10 a) 减少到 7.9 次·(站·10 a)$^{-1}$, 短时强降水主要分布在越城岭南侧、都庞岭南侧、骑田岭西南侧和万洋山东侧 (图 3e)。早秋短时强降水进一步减少, 月平均降水频次由盛

夏的 8.6 次·(站·10 a)$^{-1}$ 减少到 3.7 次·(站·10 a)$^{-1}$, 主要发生在万洋山东侧 (图 3g)。

为了反映南岭地区强降水的次季节特征和日变化特征, 各时次沿经向对纬度进行平均, 图 3b、d、f、h 给出了短时强降水的降水量和频次的时间-经度图。可见, 南岭地区短时强降水的降水量和降水频次呈现相似的变化特征。晚春南岭地区西段短时强降水主要发生在 00—08 时 (北京时, 下同), 自南岭西段向东移动 (图 3b), 112°E 以东移动特征减弱, 南岭东段短时强降水出现在 06 时和 15 时前后。初夏短时强降水明显增多, 西段 (112°以西) 短时强降水发生在 00—12 时, 与晚春类似。这可能是由于夏季风开始活跃, 低空西南气流在 02—08 时增强, 增强了山前风速辐合和水汽、热量输送, 气层不稳定性和上升运动增强, 促进夜间迎风面降雨, 使南岭地区后半夜至清晨降雨量显著增多 (Chen et al., 2014; Bai et al., 2020; Wang et al., 2021)。东段 (112°以东)15—20 时短时强降水增多, 在清晨和下午出现双峰并存的特征, 峰值时间分别在 06 时和 18 时左右 (图 3d)。盛夏 110 °E 附近为清晨和下午双峰特征, 其他区域短时强降水转为午后, 且南岭东段明显增多 (图 3f)。由于季节变化, 西风带系统北抬、西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 西伸北抬, 季风向北输送, 清晨雨带也随之北移 (Yuan et al., 2010; Bao et al., 2011), 因此盛夏清晨降水明显减弱。而午后受太阳辐射加热作用, 容易形成较强的热力不稳定 (孙继松和陶祖钰, 2012)。早秋短时强降水显著减少 (图 3h), D 区还维持午后降水峰值。已有研究表明, 行星锋区、副高、夏季风等均存在季节演变和进退, 使低层气流呈现明显的昼夜变化 (Chen et al., 2009b; Yuan et al., 2010; Du and Chen, 2019)。可见, 不同季节太阳辐射和环流系统的变化及环流日变化可能是导致南岭地区强降水的日变化存在明显的季节差异的原因。

综上, 南岭西段短时强降水的峰值时间以清晨为主, 南岭东段以午后为主, 因此以中午 12 时为间隔, 将一天中 24 小时划分为 00—12 时和 12—24 时两个时段, 统计 4 个重点研究区域在这两个时段的短时强降水频次和占比, 如图 4 所示。为了便于比较, 图中采用的是各区域内站点的平均降水频次。从晚春到初夏, 季节性短时强降水显著增加, 而后到

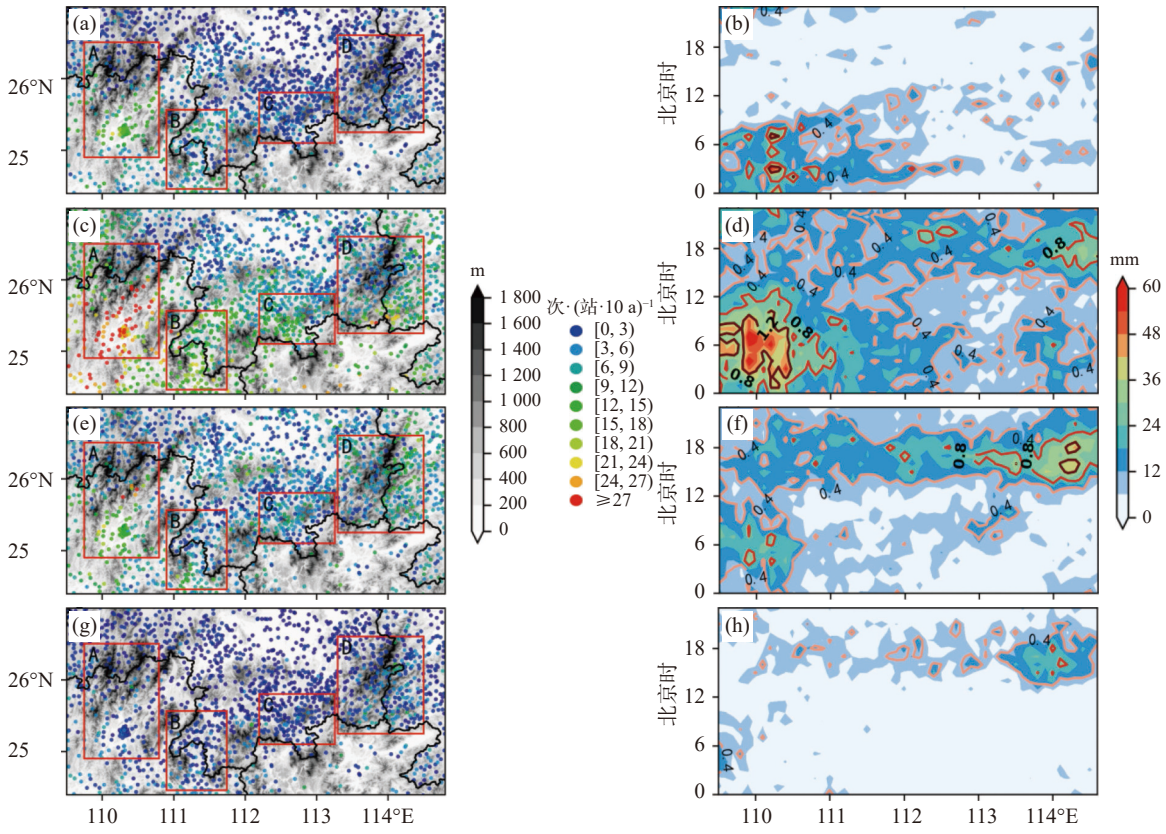


图 3 南岭地区 2013—2022 年晚春 (a、b)、初夏 (c、d)、盛夏 (e、f) 和早秋 (g、h) 的短时强降水累计频次 (圆点颜色) 的空间分布 (a、c、e、g) 以及短时强降水的季节平均降水量 (填色) 和频次 (等值线, 单位: 次) 的经度-时间剖面图 (b、d、f、h)

Fig. 3 Spatial distributions of (a, c, e, g) short-duration heavy rainfall frequency and (b, d, f, h) time–longitude Hovmöller diagrams of seasonal mean precipitation amount (shaded) and frequency (contours, unit: times) of short-duration heavy rainfall for (a, b) late spring, (c, d) early summer, (e, f) midsummer and (g, h) early autumn over Nanling region form 2013 to 2022

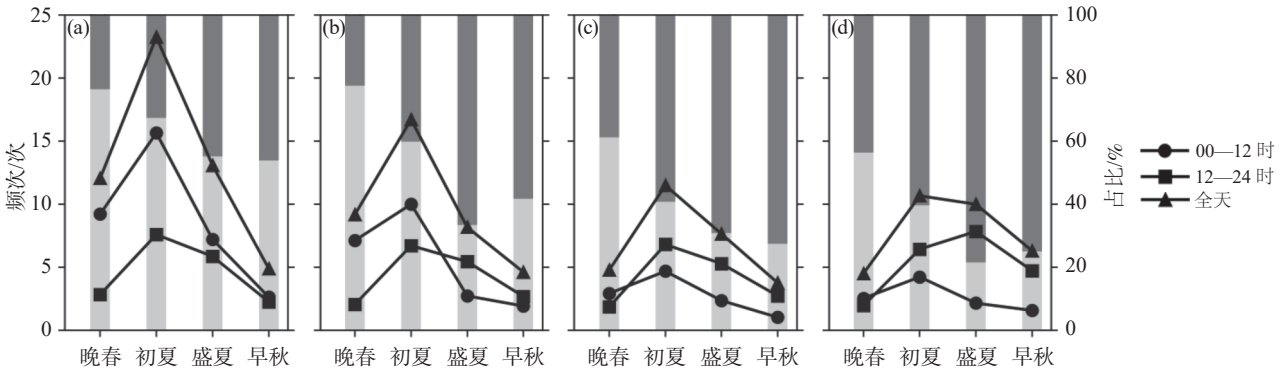


图 4 南岭地区 A (a)、B (b)、C (c) 和 D (d) 四个区域不同次季节短时强降水频次 (折线) 和占比 (柱状, 浅灰色表示 00—12 时, 深灰色表示 12—24 时)

Fig. 4 Frequency of short-duration heavy rainfall (lines) and time period percentage (bar, with light gray representing 00—12 local time and dark gray representing 12—24 local time) across different sub-seasons in four regions (a) A, (b) B, (c) C, and (d) D

盛夏和早秋, 短时强降水逐渐减少。另一个明显特征是随着季节变化, 短时强降水发生在 00—12 时的占比逐渐减少, 12—24 时的占比逐渐增多, 但各个区域之间有显著不同。A 区 00—12 时的强降水始终比 12—24 时更多, B 区在晚春和初夏表现为 00—12 时多而盛夏和早秋强降水发生时间迅速向 12—24 时转变; C、D 区除了晚春 00—12 时略多, 其他季节 12—24 时占比更多, 尤其是 D 区的盛夏和早秋, 12—24 时的占比接近 80%。

为了进一步分析短时强降水日变化的空间差异性, 图 5 给出了 00—12 时和 12—24 时的降水频次之差, 正值表示 00—12 时段的降水频次大于 12—24 时段, 负值则相反, 因此正值越大表示强降水频次发生在 00—12 时段越多, 负值越小则表示强降水主要发生在 12—24 时。晚春强正值区域出现在 A、B 区及其南侧, C、D 区短时强降水较少因此表现出较小的正值, 初夏 A 区正值明显加大, 这是由短时强降水增多导致的, C、D 区开始出现负值, 说明 12—24 时短时降水开始增多。值得注意的是, D 区表现出南北两侧不同的正负值中心, 这可能与 D 区的地形分布有关。盛夏南岭西段 00—12 时短时强降水明显减少, 因此其数值减小, D 区的负值中心明显加强, 且负值区域向西延伸至 A 区的南侧, 南岭地区大部转为 12—24 时短时强降水占主导。早秋仍然是负值为主, 强度明显降低, 较大负值中心仅出现 D 区及附近。单从空间分布来看, 112 °E 以西地区短时强降水主要发生在 00—12 时, 112 °E 以东地区短时强降水主要发生在 12—24 时。而随着季节向盛夏转变, 发生在 12—24 时的短时强降水有明显增强和自东向西扩大的趋势。这可能是盛夏我国西南和东南部云量存在显著的区域性差异, 导致太阳辐射加热自东向西减弱, 东部气温高, 稳定性弱, 午后对流活动频繁, 而西部地表气温较低, 大气层较稳定, 相对不利于午后对流的发生 (Li et al., 2008; Chen et al., 2012);

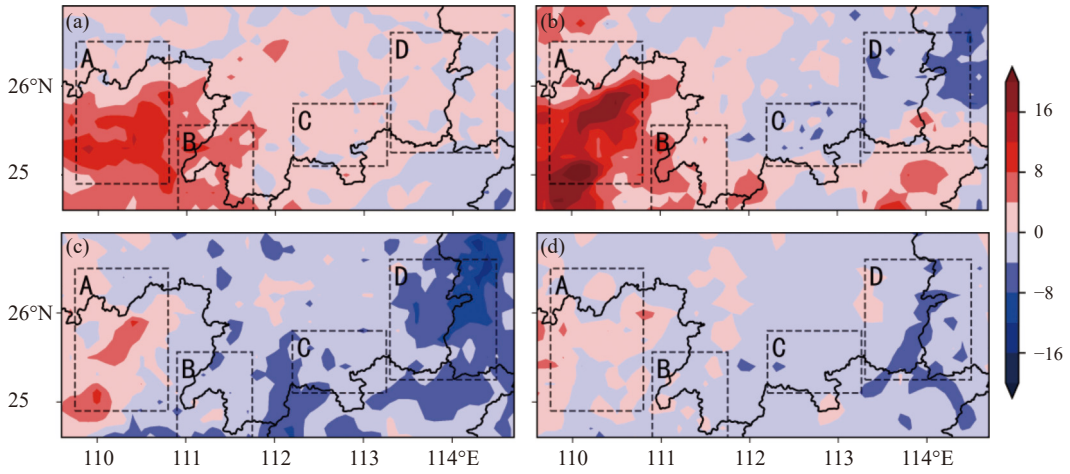


图 5 南岭地区晚春 (a)、初夏 (b)、盛夏 (c) 和早秋 (d) 的 00—12 时和 12—24 时强降水频次之差

Fig. 5 Difference in frequency of short-duration heavy rainfall between 00—12 local time and 12—24 local time during (a) late spring, (b) early summer, (c) midsummer and (d) early autumn over the Nanling region

另一方面，青藏高原下游地区中低层暖平流的作用，也抑制了西部午后对流的发展 (Chen et al., 2010)。

为了探究地面接收太阳短波辐射对南岭不同区域强降水的影响，对各区域地面接收的太阳净辐射计算区域平均和日平均，图 6 为各区域平均的地面太阳净辐射的变化。C、D 区盛夏太阳净辐射大，且明显大于 A、B 区，太阳辐射加热作用使得大气热力不稳定显著增加，有利于盛夏 C、D 区午后对流的形成和发展。与盛夏相比，初夏热力不稳定条件相对较弱，太阳辐射加热作用效果较差，这可能与降水系统的空间大小和持续时间有关 (Luo et al., 2013)，盛夏对流尺度较小、持续时间较短，而初夏雨带或云团的水平范围更大，雨水蒸发冷却近地面空气，云的阻挡减弱太阳辐射的加热效果，从而减弱热力不稳定性，并且降水系统的持续时间长，进一步降低了低层气温。这也说明盛夏强降水相比初夏可能较少受大尺度天气系统的控制，而更多地受太阳辐射加热导致的局部不稳定性影响。

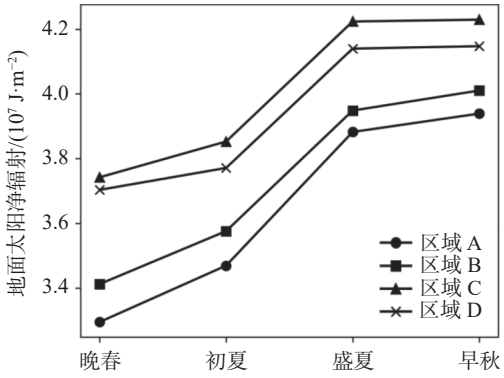


图 6 各区域平均的地面太阳净辐射的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of the spatially averaged surface net solar radiation over the key study regions

图 7 显示不同季节短时强降水频次的峰值时间，若峰值同时出现在 2 个或以上的时间，则取先出现的时间。表 1 对各站点的峰值时间进行统计，表中给出了不同峰值时间的站点数量占比。晚春短时强降水频次峰值多出现在 00—06 时 (图 7a)，其中 A、B、C 区站点峰值出现在 00—03 时的最多，D 区出现在 03—06 时最多 (表 1 用加粗字体显示)。初夏 A、B 区仍然维持清晨降水峰值，C、D 区中部分站点短时强降水峰值时间开始向午后到傍晚转变 (图 7b)，峰值时间出现在 18—21 时的站点最多，其次是 15—18 时，统计峰值时间出现在 15—21 时的的站点在本区域的占比分别为 60 % 和 44 %。盛夏午后峰值进一步西扩 (图 7c)，除了 A 区，其他区域短时强降水频次峰值基本转变为午后到傍晚为主，并且 C、D 区 15—21 时的占比增加到 70 % 和 67 %。相比初夏的 18—21 时最多，C、D 区大部分站点峰值时间提早到了 15—18 时。B 区峰值时间从初夏的 03—06 时转到盛夏的 18—21 时。初夏 C、D 区和盛夏 B 区短时强降水多出现在傍晚，盛夏 C、D 区又略有提前，可能是由于太阳辐射强度存在季节变化，使得 C、D 区初夏的强对流相比盛夏需要更多的时间来积累不稳定能量，同时太阳辐射强度还存在空间差异性，因此盛夏 B 区强降水峰值时间相比 C 和 D 区滞后 1~3 h。早秋发生短时强降水的站点有所减少 (图 7d)，C 和 D 区与盛夏类似，短时强降水多发生在午后，A、B 区部分转为后半夜到清晨。

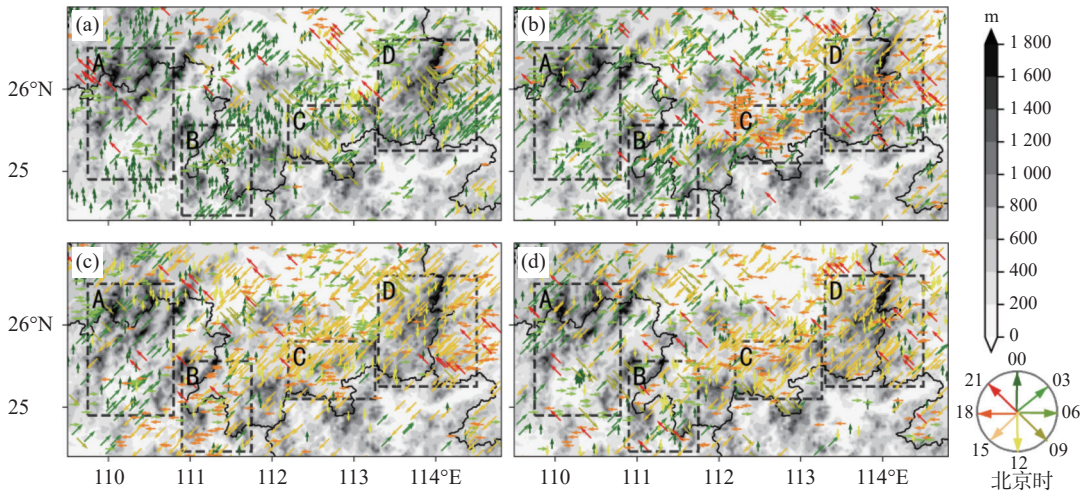


图 7 南岭地区晚春 (a)、初夏 (b)、盛夏 (c) 和早秋 (d) 短时强降水频次峰值出现时间 (阴影为地形高度，不同颜色的箭头表示降水峰值出现的不同时间，北京时)

Fig. 7 Spatial distributions of the occurrence time peaks of short-duration heavy rainfall frequency during (a) late spring, (b) early summer, (c) midsummer, and (d) early autumn over the Nanling region (The shading represents the topographic height, unit: m. Arrows of different colors indicate different occurrence time peaks)

表 1 南岭地区不同季节、不同区域、不同时段短时强降水出现峰值的站点占比 (单位:%)

Table 1 Percentage of stations with peak occurrence of short-duration heavy rainfall in different seasons, regions, and time periods (unit: %)

次季节	区域	00—03时	03—06时	06—09时	09—12时	12—15时	15—18时	18—21时	21—00时
晚春	A	36	28	24	4	0	0	0	7
	B	47	30	9	12	2	0	0	0
	C	58	16	6	11	8	0	1	0
	D	19	31	14	15	12	6	1	2
初夏	A	20	29	36	8	4	1	1	1
	B	27	38	8	10	3	4	5	5
	C	12	12	4	1	6	14	45	6
	D	12	10	11	4	9	20	24	10
盛夏	A	12	38	17	8	11	5	4	4
	B	9	9	12	1	4	22	36	7
	C	4	6	6	2	11	45	25	1
	D	4	0	4	5	14	47	20	6
早秋	A	29	16	19	12	6	11	3	5
	B	17	10	25	9	14	13	9	4
	C	2	1	5	7	12	44	25	3
	D	11	5	2	5	17	38	17	4

3 地形对短时强降水的影响作用

南岭短时强降水的分布特征不仅受天气条件影响, 还与复杂地形密切相关。本文统计了南岭各区域强降水频次的分布情况, 图 8 给出了四个区域强降水频次在纬向上的平均, 图中灰色虚线选取了短时强降水多发区域附近的地形。由图可知, 尽管南岭地形较为破碎, 但仍可见短时强降水主要分布在地形南侧。A 和 D 区中受高大地形作用, 降水频次折线可以看出迎风坡强降水明显偏多 (图 8b、h), 夜间到清晨增强的西南气流遇到高大地形而形成阻塞, 气流辐合产生上升运动, 因此在其迎风面更容易产生强降水。B 区有两处峰值, 分别位于都庞岭两段山地南侧 (图 8c、d), C 区强降水位于骑田岭西南侧的香花岭周边 (图 8e、f)。

图 9 显示了分别在 A、B、C 和 D 区沿 110.25 °E、111.25 °E、112.5 °E 和 113.75 °E 的垂直剖面。夜间到清晨增强的西南气流遇到 A 区越城岭高大地形而

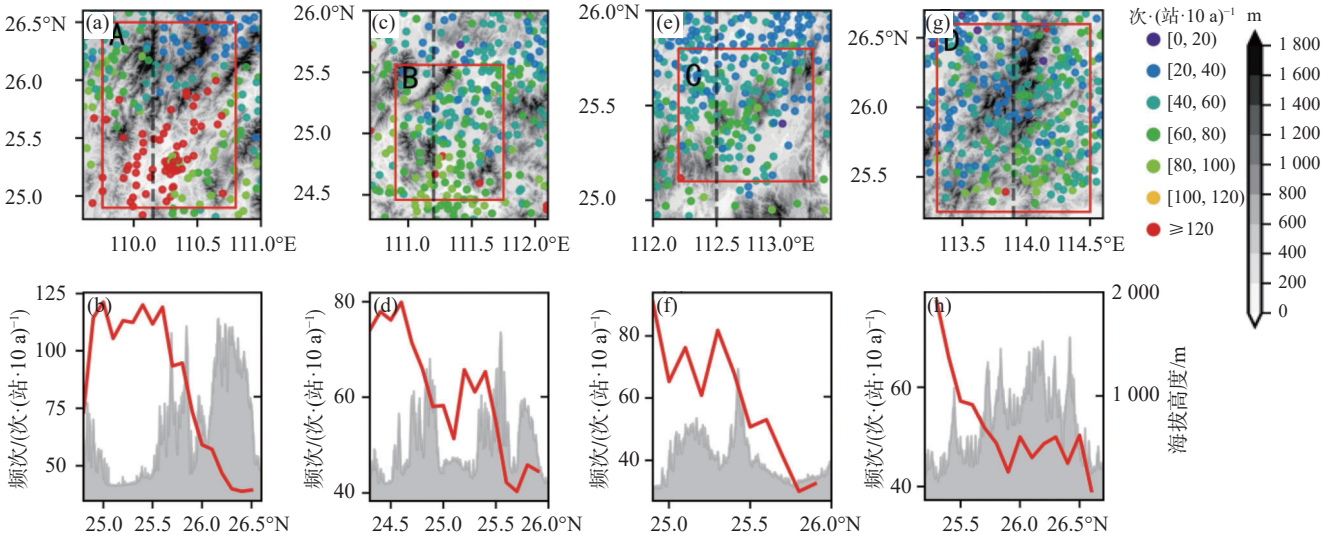


图 8 南岭地区 A (a、b)、B (c、d)、C (e、f) 和 D (g、h) 四个区域短时强降水频次 (彩色圆点) 与海拔高度 (填色) (a、c、e、g) 以及对应图中黑色虚线所代表位置的频次的纬向平均 (红色折线) 与海拔高度 (灰色填色) 剖面 (b、d、f、h)

Fig. 8 Distributions of (a, c, e, g) short-duration heavy rainfall frequency (colored dots, unit: times) and elevation (shaded, unit: m), and (b, d, f, h) the zonal average of frequency (red lines, unit: times) and elevation profile (gray shaded, unit: m) along the locations marked by the black dashed lines for the four regions (a, b) A, (c, d) B, (e, f) C, and (g, h) D of Nanling

阻塞，气流辐合产生上升运动，因此在其迎风面更容易产生强降水（图 9a_1—d_1）。辐合上升的强度与西南气流的强度密切相关，盛夏和早秋西南气流减弱，气流垂直速度也减弱。B 区在都庞岭南北两段的山前产生迎风坡降水，图 9e_1、f_1 中在 02 时 24.5°N 和 25.25°N 附近有明显上升运动，B 区的上升运动比 A 区弱，即 A 区越城岭地形的抬升作用更显著，说明较高大的地形更有利于强降水的发生。D 区地形高大但其清晨迎风面气流上升也不如 A 区（图 9m_1），可能原因一方面是 A 区越城岭的陡峭地形更有利于垂直运动的发展，另一方面 D 区地形走向与西南气流交角较小，产生的迎风面作用较弱。C 区的地形影响不同，强降水与气流辐合上升的位置位于骑田岭西南侧的香花岭山顶附近，与图 2 中 C 区短时强降水多发区域一致，辐合上升强度也较弱（图 9j_1—l_1），可能是由于小尺度地形对气流的抬升作用较弱（Smith and Barstad, 2004）。

为了进一步探究西南气流对短时强降水发生的重要作用，本文对四个关键区域短时强降水发生时 850 hPa 及以下的低层风速和风向进行了统计。由 1 000—850 hPa 垂直高度上的风速最大值对应的风向（图 10a—d）可见，晚春和初夏的短时强降水发生时低层为西南风的占比达到 50 % 以上，盛夏和晚秋–西南风占比逐渐减少。此外，影响南岭短时强降水的西南风风速强度表明（图 10e—h），整体而言，A 和 B 区的西南风速较其它区域大，这也与 A 和 B 区短时强降水频次大于其它区域对应。随着季节的转换，盛夏和早秋南岭地区地面接收太阳短波辐射显

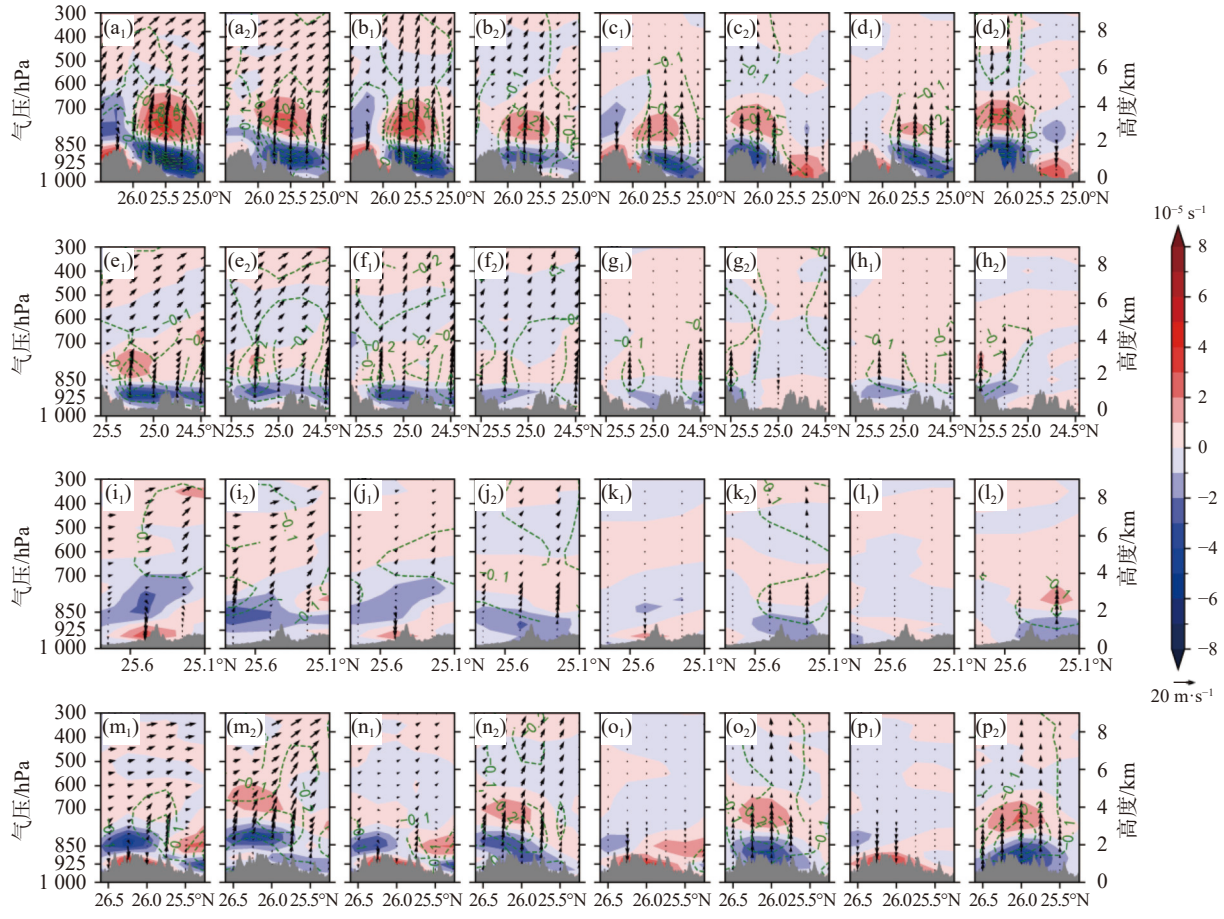


图 9 南岭地区 A (a—d)、B (e—h)、C (i—l) 和 D (m—p) 四个区域风（矢量箭头，为 v 与 $\omega\times10^2$ 的合成，单位：m·s^{-1}）、垂直速度（绿色虚线，单位：Pa·s^{-1}）和水平散度（填色，单位：10^{-5} s^{-1}）在晚春（a、e、i、m）、初夏（b、f、j、n）、盛夏（c、g、k、o）和早秋（d、h、l、p）四个次季节内 02 时（a_1—p_1）和 14 时（a_2—p_2）的垂直经向剖面图（A、B、C 和 D 区的剖面位置分别为 110.25°E、111.25°E、112.5°E 和 113.75°E，灰色填色为地形）

Fig. 9 Vertical-meridional sections of wind (arrows, the composite of meridional wind and vertical velocity multiplied by 10^2, unit: m·s^{-1}), vertical velocity (green dashed lines, unit: Pa·s^{-1}), and horizontal divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) for regions (a—d) A, (e—h) B, (i—l) C, and (m—p) D along the meridional direction over the Nanling region. Region A is located at 110.25°E, region B is at 111.25°E, region C is at 112.5°E, and region D is at 113.75°E. These sections are depicted for (a_1-p_1) 02:00 BT and (a_2-p_2) 14:00 BT local time during short-duration heavy rainfall events during (a, e, i, m) late spring, (b, f, j, n) early summer, (c, g, k, o) midsummer, and (d, h, l, p) early autumn (Gray shading represents terrain topography)

著增强 (图 6), 会导致局部热力不稳定, 在此背景下, 即使西南风动力强迫作用相对减弱, 与局地增强的热力抬升的共同作用仍可触发短时强降水。

此外, 地形的另一个可能影响是局地热力作用 (赵玉春和王叶红, 2020)。夏季午后 14 时太阳辐射加热使得山顶升温明显, 气流在山顶汇聚, 产生辐合并伴随强烈的垂直上升运动 (图 9c_2、d_2、n_2、o_2、p_2), 从而激发对流。夜间山顶 02 时冷却转为下沉的辐散气流 (图 9c_1、d_1、n_1、o_1、p_1), 抑制对流发展, 如此形成环流日变化, 导致降水日变化。

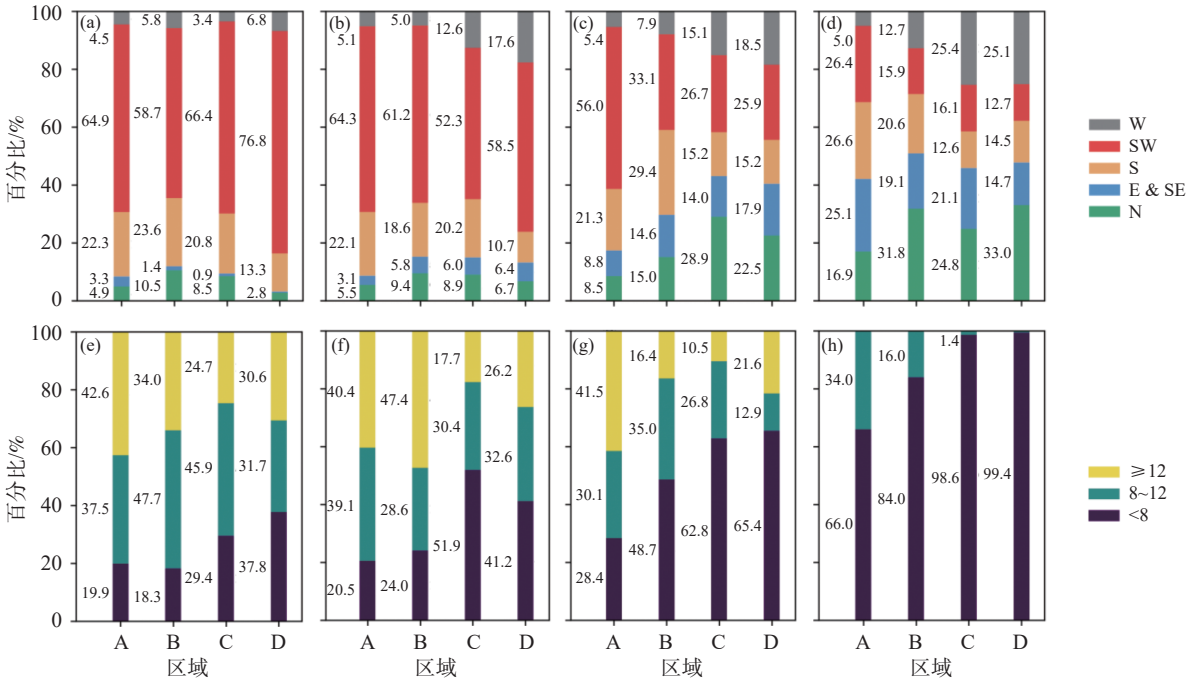


图 10 南岭地区不同区域晚春 (a、e)、初夏 (b、f)、盛夏 (c、g) 和早秋 (d、h) 短时强降水发生时次低层 (1 000—850 hPa) 风向 (a—d) 和西南风风速 (e—h, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 占比统计 (其中, N 表示 0°—67.5°和 292.5°—360°的偏北风; E & SE 表示 67.5°—157.5°的东风和东南风; S、SW 和 W 分别表示 157.5—202.5°的南风、202.5°—247.5°西南风和 247.5°—292.5°的西风)

Fig. 10 Distribution percentage of (a-d) low-level wind direction and (e-h) the occurrence percentages of southwesterly wind speed (unit: $m \cdot s^{-1}$) during short-duration heavy rainfall events for (a, e) late spring, (b, f) early summer, (c, g) midsummer, and (d, h) early autumn over the Nanling region (Especially, N represents northerly winds within the ranges of 0°—67.5° and 292.5°—360°, E & SE denote easterly and southeasterly winds within 67.5°—157.5°, S, SW, and W represent southerly winds within 157.5°—202.5°, southwesterly winds within 202.5°—247.5°, and westerly winds within 247.5°—292.5°)

4 结论与讨论

本文利用 2013—2022 年气象观测站逐时降水数据和 ERA5 再分析数据, 将汛期分成晚春 (4 月)、初夏 (5—6 月)、盛夏 (7—8 月)、早秋 (9 月)4 个次季节, 研究南岭地区汛期 (4—9 月) 短时强降水时空变化特征, 并探讨地形对降水的影响, 得到以下主要结论:

(1) 南岭短时强降水高频区沿南岭地形分布, 南岭南部多北部少、东西两侧多中部少, 主要分布在越城岭南部、都庞岭南部、骑田岭西南部和万洋山东部及南部。将高频区分为 A、B、C 和 D 四个研究区域, 各区域月平均降水频次分别为 89.1、64.7、49 和 52 次·(站·10 a)$^{-1}$。短时强降水的平均降水强度的空间分布差异较小, 降水量的分布依赖于降水频次的分布。各季节短时强降水呈现显著的时空变化特征, 晚春短时强降水主要发生在南岭地区西段 112 °E 以西, 到初夏强降水显著增加, 月平均降水频次由 5.3 次·(站·10 a)$^{-1}$ 增加到 12.6 次·(站·10 a)$^{-1}$, 盛夏和早秋减少到 8.6 次·(站·10 a)$^{-1}$ 和 3.7 次·(站·10 a)$^{-1}$。

(2) 南岭强降水主要存在清晨 (03—06 时) 和午后 (15—19 时) 两个日变化峰值, 晚春和初夏以清晨降水占主导, 且多发生在南岭西段, 可能是由增强的西南气流和山脉迎风坡的抬升作用而产生; 盛夏和早秋以午后降水占主导, 多发生在南岭东段, 可能是午后太阳辐射加热作用形成的热力不稳定导致。随季节变化西风带系统北抬、副高西伸北抬、季风向北输送, 清晨强降水频次减少、范围缩小, 而太阳辐射增强, 午后短时强降水增多、范围由东向西扩。

(3) 短时强降水多出现在山脉南侧, 南岭地形的作用一方面体现在迎风坡的动力抬升, 在较好的迎风坡面, 较强的暖湿气流和较高的陡峭山体更有利

于动力抬升；另一方面体现在午后的局地热力作用，受太阳辐射加热影响，山上易产生强的局地热力不稳定，进而促发强对流。

本文研究了南岭地区短时强降水分布特征，指出了夜间增强的西南气流以及午后太阳辐射加热作用等对南岭不同关键区域强降水日变化的重要影响。由于南岭地区短时强降水的机理复杂，需要考虑多种物理因素的综合影响，例如大气中水汽含量、水汽输送、凝结效率与持续时间、云团的组织结构、水汽的垂直分布、地形的形态和尺度大小、气流的强度和方向等，还有待后续利用数值模拟等方式进行深入探讨。文中对短时强降水特征进行研究，实际上强降水的发展演变过程较为复杂，不同环境条件下可能存在不同的降水模式和控制机制，天气尺度系统如中纬度锋面、热带气旋等对短时强降水日变化的影响仍需进一步研究，并将强降水变化规律用于业务客观模式误差订正，以提高强降水预报准确率，提升气象防灾减灾能力。

参考文献 (References):

陈芳丽,刘显通,曾丹丹,等.2022.珠三角北部一次暖区强降水过程中的地形作用[J].热带气象学报,38(3):377−386. Chen F L, Liu X T, Zeng D D, et al. 2022. Effect of topography on a warm-sector heavy rainfall event in the northern pearl river delta [J]. Journal of Tropical Meteorology,38(3):377−386 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2022.034

陈炯,郑永光,张小玲,等.2013.中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J].气象学报,71(3):367−382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al. 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season [J]. Acta Meteorologica Sinica, 71(3):367−382 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.035

范江琳,曹萍萍,冯良敏,等.2019. 1961—2018 年四川盆地夜雨特征分析[J].高原山地气象研究,39(4):24−30. Fan J L, Cao P P, Feng L M, et al. 2019. Analysis of night precipitation characteristics in Sichuan Basin in recent 58 years [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 39(4):24−30. doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2019.04.004

樊李苗, 俞小鼎.2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156−165 Fan L M, Yu X D. 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China [J]. Plateau Meteorology,32(1):156−165 doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2012.00016

付炜,叶成志,王东海,等.2018.一次南岭山脉前汛期强对流天气过程诊断分析[J].暴雨灾害,37(6):511−521. Fu W, Ye C Z, Wang D H, et al. 2018. Diagnostic analysis of a severe convective weather event in the Nanling Mountains during the pre-rainy season [J]. Torrential Rain and Disaster,37(6):511−521 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.06.003

付炜,唐明晖,叶成志.2020.强西南急流背景下湘桂边界两次预报失败的暖区暴雨个例分析[J].气象,46(8):1001−1014. Fu W, Tang M H, Ye C Z. 2020. Analysis of two forecast failure cases of warm-sector rainstorms on Hunan-Guangxi border area in severe southwest jet [J]. Meteorological Monthly,46(8):1001−1014 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.08.001

付炜,唐明晖,叶成志,等.2022.强西南急流背景下南岭山脉一次暖区大暴雨数值模拟分析[J].热带气象学报,38(2):203−215. Fu W, Tang M H, Ye C Y. 2022. Numerical simulation of warm-sector heavy rainfall process over Nanling Mountains under strong low-level southwest jet [J]. Journal of Tropical Meteorology,38(2):203−215 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2022.019

郭丽芳,巩远发,孙昕.2025.中国南方极端降水的不同变化特征分析[J].暴雨灾害,44(3):390−399. Guo L F, Gong Y F, Sun X. 2025. Analysis of different characteristics of extreme precipitation in Southern China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):390−399. (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−204

何立富.2006. “05·6”华南暴雨形成机理与中尺度对流系统研究[D].南京:南京信息工程大学. He L F. 2006. Study on the physical mechanisms and MCSs of the sustained heavy rainfall event in South China in June 2005 [D].Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese). doi:10.7666/d.y868491

李博,刘黎平,赵思雄,等.2013.局地低矮地形对华南暴雨影响的数值试验[J].高原气象,32(6):1638−1650. LI B, Liu L P, Zhao S X, et al. 2013. Numerical experiment of the effect of local low terrain on heavy rainstorm of South China [J]. Plateau Meteorology,32(6):1638−1650 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2012.00156

李国平.2025.四川盆地周边山地夜间暴雨的特征与机理研究新进展[J].沙漠与绿洲气象,19(3):1−9. LI G P. 2025. Recent advances in understanding the mechanisms and features of night rainstorms in the mountainous regions of the Sichuan Basin [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(3):1−9 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2409.23002

李永军,卢萍.2024.青藏高原东南缘攀枝花市降水特征及其成因初探[J].暴雨灾害,43(1):101−109. Li Y J, Lu P. 2024. Characteristics and genesis of precipitation in Panzhihua on the southeast margin of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters, 43(1):101−109 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−246

梁钟清, 张艳霞, 钟水新, 等.2023.地形对一次粤北暖区暴雨的影响研究[J].热带气象学报,39(4):536−550 Liang Z Q, Zhang Y X, Zhong S X, et al. 2023. Influence of topography on warm-sector heavy rainfall in northern Guangdong [J]. Journal of Tropical Meteorology,39(4):536−550 doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2023.048

刘厚培,朱景郊.1992.南岭山区自然资源开发利用 [M]. 北京:科学出版社,8-10. Liu H P, Zhu J J. 1992. Development and Utilization of Natural Resources in the Nanling Mountains [M]. Beijing:Science Press: 8–10 (in Chinese)

孙继松,陶祖钰.2012.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].气象,38(2):164−173. Sun J S, Tao Z Y. 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast [J]. Meteorological Monthly,38(2):164−173 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.02.004

夏茹娣,赵思雄,孙建华.2006.一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究[J].大气科学,30(5):988−1008. Xia R D, Zhao S X, Sun J H. 2006. A study of circumstances of meso-β-scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in south China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,30(5):988−1008 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2006.05.26

俞小鼎.2013.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,32(3):202−209 Yu X D. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters,32(3):202−209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.03.002

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

周芳弛, 李国平, 黄楚惠.2023.四川山地暖季夜间暴雨的空间分布以及对海拔高度的依赖性[J].沙漠与绿洲气象,17(4):78−86 Zhou F C, Li G P, Huang C H. 2023. Spatial distribution of nighttime rainstorms in warm season in Sichuan mountains and the dependence on altitude [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):78−86. doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.04.011

周凌云.2006.南岭山区气候屏障作用的初步分析[D]. 广州:华南师范大学. Zhou L Y. 2006. Analysis of the role of climate barriers in the Nanling Mountains [D].Guangzhou:South China Normal University (in Chinese)

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

Bao X H, Zhang F Q, Sun J H. 2011. Diurnal variations of warm-season precipitation east of the Tibetan Plateau over China [J]. Monthly Weather Review,139(9):2790−2810. doi:10.1175/MWR−D−11−00006.1

Chen G X, Sha W M, Iwasaki T. 2009a. Diurnal variation of precipitation over southeastern China: Spatial distribution and its seasonality [J]. Journal of Geophysical Research,114(D13). doi:10.1029/2008JD011103

Chen G X, Sha W M, Iwasaki T. 2009b. Diurnal variation of precipitation over southeastern China: 2. Impact of the diurnal monsoon variability [J]. Journal of Geophysical Research,114(D21). doi:10.1029/2009JD012181

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 H M, Yu R C, Li J, et al. 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River valley [J]. Journal of Climate,23(4):905−917. doi:10.1175/2009JCLI3187.1

Chen H M, Yu R C, Wu B Y. 2012. FY-2C-derived diurnal features of clouds in the southern contiguous China [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,117(D18). doi:10.1029/2012JD018125

Chen X C, Zhao K, Xue M. 2014. Spatial and temporal characteristics of warm season convection over Pearl River Delta region, China, based on 3 years of operational radar data [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,119(22):12447−12465. doi:10.1002/2014JD021965

Du Y, Chen G X. 2019. Climatology of low-level jets and their impact on rainfall over southern China during the early-summer rainy season [J]. Journal of Climate,32(24):8813−8833. doi:10.1175/JCLI−D−19−0306.1

Fu D, Zhi X F, Zhu S P, et al. 2023. Principal modes of diurnal cycle of rainfall over South China during the presummer rainy season [J]. Journal of Climate,36(8):2457−2470. doi:10.1175/JCLI−D−22−0284.1

Li J, Yu R C, Zhou T J. 2008. Seasonal variation of the diurnal cycle of rainfall in southern contiguous China [J]. Journal of Climate, 21(22):6036−6043. doi:10.1175/2008JCLI2188.1

Luo Y L, Wang H, Zhang R H, et al. 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over South China and the Yangtze and Huai River basin [J]. Journal of Climate,26(1):110−132. doi:10.1175/JCLI−D−12−00100.1

Smith R B, Barstad I. 2004. A linear theory of orographic precipitation [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,61(12):1377−1391. doi:10.1175/1520−0469(2004)061<1377:ALTOOP>2.0.CO;2

Wang C L, Zhao K, Huang A N, et al. 2021. The crucial role of synoptic pattern in determining the spatial distribution and diurnal cycle of heavy rainfall over the South China coast [J]. Journal of Climate, 34(7):2441−2458. doi:10.1175/JCLI−D−20−0274.1

Xu W X, Zipser. 2011. Diurnal variations of precipitation, deep convection, and lightning over and east of the eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Climate,24(2):448−465. doi:10.1175/2010JCLI3719.1

Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. Geophysical Research Letters,34(1):223−234. doi:10.1029/2006GL028129

Yuan W H, Yu R C, Chen H M, et al. 2010. Subseasonal characteristics of diurnal variation in summer monsoon rainfall over central eastern China [J]. Journal of Climate,23(24):6684−6695. doi:10.1175/2010JCLI3805.1

Zhang H, Zhai P. 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season [J]. Advances in Atmospheric Sciences,28(5):1177−1183. doi:10.1007/s00376−011−0020−0

(责任编辑　闵爱荣)