



湘中地区夏季极端小时降水和极端降水事件的时空分布及其环流特征

蔡海朝 蔡瑾婕 刘红武 屈右铭 唐云 蔡杏芳

Spatial and temporal distribution and circulation characteristics of extreme hourly precipitation and precipitation events in central Hunan during summer

CAI Haichao, CAI Jinjie, LIU Hongwu, QU Youming, TANG Yun, CAI Xingfang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-220>

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

1980—2020年4—9月湘赣浙闽地区日极端降水分布特征研究

Study on the distribution characteristics of daily extreme precipitation in Hunan, Jiangxi, Zhejiang and Fujian province from April to September 1980-2020

暴雨灾害. 2025, 44(5): 676–687 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-097>

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>

河南省暖季小时极端降水时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of hourly extreme rainfall in warm season in Henan

暴雨灾害. 2021, 40(2): 153–159 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.006>

2010—2020年全国冰雹灾害事件时空分布特征

Temporal and spatial distribution characteristics of hail disaster events in China from 2010 to 2020

暴雨灾害. 2023, 42(2): 223–231 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-089>

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>

湖北省夏季引发极端降水的MCS统计特征分析

Statistical characteristics of extreme precipitation induced by MCS in Hubei Province

暴雨灾害. 2021, 40(2): 147–152 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

蔡海朝,蔡瑾婕,刘红武,等.2026.湘中地区夏季极端小时降水和极端降水事件的时空分布及其环流特征[J].暴雨灾害,45(4):523–532. CAI Haichao, CAI Jinjie, LIU Hongwu, et al. 2026. Spatial and temporal distribution and circulation characteristics of extreme hourly precipitation and precipitation events in central Hunan during summer [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(4):523–532 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–220

湘中地区夏季极端小时降水和极端降水事件的时空分布及其环流特征

蔡海朝^{1,2}, 蔡瑾婕^{2,3}, 刘红武^{2,3}, 屈右铭⁴, 唐云⁵, 蔡杏芳¹

(1. 湖南省娄底市气象局, 娄底 417000; 2. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118;

3. 湖南省气象台, 长沙 410118; 4. 湖南省气象局, 长沙 410118; 5. 湖南省益阳市气象局, 益阳 413000)

摘要: 为揭示湘中地区夏季极端降水事件的时空变化与形成原因, 提升区域极端暴雨灾害防御能力, 利用 2016—2025 年夏季湘中地区 830 个气象观测台站逐小时降水资料及 ERA5 再分析资料, 分析了该地区夏季极端小时降水和不同历时极端降水事件的时空分布特征, 并比较了不同历时极端降水事件的异常环流特征。结果表明: (1) 湘中地区夏季极端小时降水的阈值、平均降水量和强度呈现“北高南低”的空间分布, 阈值和强度高值中心集中在辰溪、麻阳和溆浦一带, 平均降水量和平均频次大值区主要分布于雪峰山主体中段及其南麓地区; 极端小时降水旬尺度高频区呈阶段性“自南向北”演变特征。(2) 极端降水事件频次自西向东呈“少-多-少”分布, 平均降水量则表现为“北多南少”格局, 平均强度存在多个局地高值中心, 安化、溆浦和长沙县的极端降水事件降水贡献率相对更高。(3) 短历时极端降水事件频次峰值时段在 8 月上中旬, 中历时事件主峰在 6 月上旬、次峰在 6 月下旬, 长历时事件高峰时段在 6 月下旬至 7 月上旬; 短、长历时事件日变化表现为单峰型, 峰值分别出现在 16 时和 08 时 (北京时, 下同), 中历时事件呈双峰型, 主峰在 16 时、次峰为 07 时。(4) 短历时极端降水事件发生在西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 偏东、偏弱背景下, 湘中至我国东南沿海为异常气旋性环流控制; 中、长历时事件副高偏西、偏强, 我国南海至华南地区为异常反气旋性环流, 有利于孟加拉湾与南海的水汽输送至湘中地区。研究结果可为极端降水监测预警和灾害风险防范提供参考。

关键词: 极端降水事件; 时空分布; 异常环流; 湘中地区

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–220

Spatial and temporal distribution and circulation characteristics of extreme hourly precipitation and precipitation events in central Hunan during summer

CAI Haichao^{1,2}, CAI Jinjie^{2,3}, LIU Hongwu^{2,3}, QU Youming⁴, TANG Yun⁵, CAI Xingfang¹

(1. Loudi Meteorological Bureau of Hunan Province, Loudi 417000; 2. Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha 410118; 3. Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118; 4. Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410118; 5. Yiyang Meteorological Bureau of Hunan Province, Yiyang 413000)

Abstract: Based on hourly precipitation observations from the National Meteorological Information Center of the China Meteorological Administration and ERA5 hourly $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ reanalysis data during summer from 2016 to 2025, this study investigates the spatiotemporal evolution patterns and underlying mechanisms of extreme precipitation events in central Hunan region, in order to enhance the regional rainstorm disaster prevention ability. We analyze the spatiotemporal distribution of extreme hourly precipitation and extreme precipitation events in central Hunan, and compare the associated abnormal circulation characteristics for events of different durations. The results are as follows. (1) The threshold, mean precipitation, and intensity of extreme hourly precipitation in central Hunan during summer exhibits a “north–south contrast” with higher values in the north and lower values in the south. High-value centers for threshold and intensity are

收稿日期: 2025–10–21; 定稿日期: 2026–02–26

资助项目: 湖南省联合基金重点项目 (2026JJ30038); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2026J014); 湖南省气象局创新发展专项 (CXFZ2024-FZZX16, CXFZ2025-MSXM07)

第一作者: 蔡海朝, 主要从事灾害性天气预报技术研究。E-mail: tfm007@163.com

通信作者: 刘红武, 主要从事灾害性天气机理及预报预警技术研究。E-mail: 45877780@qq.com

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

located in the Chenxi-Mayang-Xupu area, while the high-value areas of mean precipitation and mean frequency are along the central Xuefeng Mountain range and its southern foothills. The ten-day periods with high-frequency of extreme hourly precipitation exhibit a phased "south-to-north" progression. (2) The frequency of extreme precipitation events shows a "low-high-low" pattern from west to east, while the mean precipitation amount exhibits a "more in the north, less in the south" distribution, The mean intensity presents multiple localized maxima. and the contribution rates of extreme precipitation events to total precipitation are particularly prominent in Anhua, Xupu, and Changsha County. (3) The short-duration extreme precipitation events peak in early to mid-August; medium-duration events peak in early June followed by late June; long-duration events peak from late June to early July. The diurnal variation of short- and long-duration events shows a unimodal pattern, peaking at 16:00 and 08:00 (Beijing time) respectively, while medium-duration events exhibit a bimodal pattern, with peaks at 16:00 and 07:00. (4) Short-duration events occur under the background of a weaker and eastward-displaced Western Pacific Subtropical High (WPSH), with an abnormal cyclonic circulation extending from central Hunan to the southeastern coast of China. In contrast, medium-duration and long-duration events occur under a westward-extended and stronger WPSH, accompanied by an anomalous anticyclone over the South China Sea to South China, which enhances moisture transport from the Bay of Bengal and the South China Sea to central Hunan, These findings provide scientific references for monitoring, early warning, and disaster risk mitigation of extreme precipitation events in central Hunan.

Key words: extreme precipitation events; spatial and temporal distribution; anomalous circulation; central Hunan

引 言

全球气候变暖背景下,极端天气气候事件表现出日益显著的持续性、群发性与复合性特征,而极端降水事件作为典型的极端天气气候事件,对人民生命财产安全和社会经济发展构成重大威胁(李明刚等, 2012),已成为全球气候变化研究中备受关注的核心议题。研究表明,全球范围极端降水事件普遍增多,且表现出明显的区域性差异(Tank and Können, 2003; Goswami et al., 2006; Ren et al., 2012)。我国极端降水事件频次总体呈上升态势,极端降水量与年总降水量之间存在明显的正相关关系,其中夏季极端降水事件对年总降水量的贡献尤为突出(王志福和钱永甫, 2009)。在空间分布上,我国夏季极端降水事件呈现出“南增北减”的总体格局:长江中下游、华南及西北地区极端降水事件趋于增多,而华北、东北及西南部分地区则呈减少趋势(龙妍妍等, 2016)。此外,我国夏季极端降水事件还具有明显的年际与年代际变率,并于 20 世纪 90 年代发生由减少转为增多的气候突变(陈金明等, 2016)。在全球持续增暖背景下,预计未来几十年长江中下游地区夏季极端降水事件将进一步增多,至 21 世纪中后期,在温室气体高排放情景下极端降水频次可能继续上升(陈红, 2017; Yang et al., 2022)。因此,深入研究不同区域极端降水事件的时空分布、演变规律及其物理机制,不仅是应对气候变化的迫切需求,也能为区域水资源管理、灾害风险防控与应对策略制定提供重要科学依据。

我国极端降水事件的成因普遍被认为是多尺度

天气系统共同作用的结果(蔡悦幸等, 2018; 夏阳等, 2023)。西北太平洋副热带高压(以下简称副高)的位置和强度异常,直接影响来自孟加拉湾与南海暖湿气流的输送路径与强度(陶诗言和卫捷, 2006)。同时,南亚高压的异常变化作为长江中下游地区极端降水的关键环流因子,其位置与强度的季节内调整会直接影响该区域的动力条件与水汽输送(吴志伟等, 2006)。东亚夏季风与印度西南季风的协同作用,进一步增强了水汽向我国西南地区的输送效率,当低层出现异常气旋性环流或强劲的低空急流时,水汽在降水区强烈辐合(沈晓琳等, 2019)。亚洲中高纬度地区“+—”距平波列或阻塞型环流形势与我国夏季梅雨期异常的降水关系密切(张庆云和陶诗言, 1998)。此外,源自中高纬的 Rossby 波能量向下游传播,常为长江中下游和江淮地区的极端降水事件发生提供必要的能量来源(李明刚等, 2016)。

湘中地区位于长江中游南岸,地处云贵高原向江南丘陵的过渡地带,境内丘陵与山地交错分布(潘志祥等, 2015),夏季受东亚季风、南亚高压与副高等高低空环流系统的共同影响,极端降水事件频发。目前国内极端降水事件的研究已取得丰硕成果(韩洁等, 2012; 张灵等, 2022; 唐红玉等, 2025),但针对湘中地区极端小时降水和极端降水事件的专项研究仍较为匮乏。因此,本文利用逐小时降水观测资料及 ERA5 再分析资料分析该区域极端小时降水和不同历时极端降水事件的时空分布特征,重点揭示不同历时极端降水事件的异常环流及水汽输送等关键因子的影响机制,以期对湘中地区夏季极端降水事件的形成机制、精细化预报预警及灾害风险防范提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

文中所用资料主要包括:(1)国家气象信息中心提供的2016—2025年湘中地区国家气象站和区域气象站逐小时降水观测数据。针对各站点资料进行严格的质量控制筛选流程,主要包括极值检验、时间一致性检验、内部一致性检验及空间一致性检验(冉津江等,2023),最终筛选出830个有效站点,包含43个国家气象站和787个区域气象站,所有站点有效观测时次均高于95%。所有站点覆盖湘中地区不同海拔高度与多样化地貌(图1),具有良好的空间代表性。(2)欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的2016—2025年6—8月ERA5逐小时再分析资料,时间分辨率1 h,水平分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,包括500 hPa和200 hPa位势高度、总降水量、整层水汽通量东西分量和南北分量以及整层水汽通量散度,用于不同历时极端降水事件的异常环流和水汽输送的合成分析。

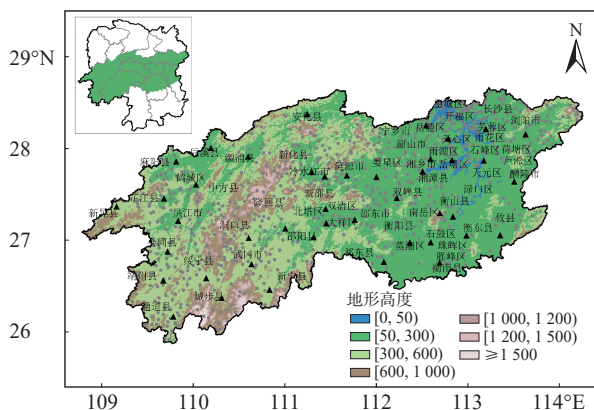


图1 湘中地区气象站点与地形高度(阴影,单位:m)空间分布(▲为国家气象站,•为区域气象站)

Fig. 1 Meteorological stations and topography over central Hunan (shaded, unit:m) (▲ denotes national meteorological stations, • denotes regional meteorological stations)

1.2 研究方法

1.2.1 极端小时降水定义

本文采用李建等(2013)提出的百分位法计算极端小时降水阈值。选取2016—2025年夏季湘中地区各站点的小时降水量数据,筛选出 ≥ 0.1 mm的有效降水数据,并按数值升序排列(杨梦兮等,2025),分别计算第90.0、95.0、98.0、98.5及99.0百分位对应的数值,作为不同强度的极端小时降水阈值(见表1)。分析表明,第90.0百分位阈值虽出现频率较高(10.14%),但平均值低于 $10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,而 $\geq 10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水通常由中小尺度系统引发(陈炯等,2013),因此该阈值不具备典型强降水特征;第99.0百分位阈值出现

表1 2016—2025年夏季湘中地区不同百分位极端小时降水阈值统计结果

Table 1 Statistical results of extreme hourly precipitation thresholds at different percentiles in central Hunan during summer from 2016 to 2025

百分位	极端小时降水阈值/mm			出现频率/%	降水量百分比/%
	最小值	最大值	平均值		
99.0	15.0	34.3	24.4	1.04	15.6
98.5	13.0	28.8	20.6	1.54	20.5
98.0	11.8	24.9	17.9	2.04	24.7
95.0	6.9	15.1	10.4	5.07	42.5
90.0	3.8	9.2	5.9	10.14	59.6

频率仅1.04%(平均 $24.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),过于严格。按照中央气象台标准,将1 h雨量 ≥ 20 mm定义为短时强降水(邓彪等,2022;王中等,2025),该阈值出现频率为1.62%,降水量占比21.4%,与第98.5百分位对应指标1.54%和20.5%极为接近,因此,本文选定第98.5百分位作为湘中地区极端小时降水的阈值。

1.2.2 极端降水事件与历时分类定义

本文对极端降水事件的定义如下:降水从起始至终止的全过程中,允许存在最多连续1 h的无降水间隔,满足该条件的完整降水过程被定义为一次降水事件(唐永兰等,2023);若该降水事件中至少有1 h的降水量超过站点98.5百分位降水阈值,则判定为一次极端降水事件,其起止时间段即为极端降水事件历时,基于极端降水事件历时的差异,将其划分为短历时(1~6 h)、中历时(7~12 h)与长历时(>12 h)三类。为研究分析湘中地区站点极端降水特征,定义10个主要特征量,具体见表2。

1.2.3 合成分析

针对2016—2025年夏季湘中地区发生的不同历时极端降水事件持续时段内最大小时降水量对应的降水分布、500 hPa和200 hPa位势高度场以及整层水汽通量及其散度场进行合成分析,利用 t 检验,评估该合成标准化距平场的统计显著性,以揭示与极端降水事件相联系的大尺度环流特征。

2 结果分析

2.1 极端小时降水分布特征

2.1.1 极端小时降水空间分布

图2为2016—2025年夏季湘中地区极端小时降水的阈值、平均降水量、年均频次及强度的空间分布,由图可知,湘中地区夏季极端小时降水的阈值、平均降水量和强度均呈现“北高南低”的特征。如图2a所示,湘中地区夏季极端小时降水阈值为13.0~

表 2 研究站点极端降水主要特征量及其定义

Table 2 Key characteristic variables of extreme precipitation at the study stations and their definitions

特征量名称	定义描述	单位
极端小时降水平均降水量	所有超过 98.5 百分位降水阈值的小时降水量总和与统计年数的比值	$\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$
极端小时降水平均频次	所有超过 98.5 百分位降水阈值的小时降水频次总和与统计年数的比值	$\text{time}\cdot\text{a}^{-1}$
极端小时降水强度	所有超过 98.5 百分位降水阈值的小时降水量总和与对应极端小时降水频次的比值	$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$
极端小时降水高频旬	夏季各旬中极端小时降水在统计时段内累计发生频次最高的旬	旬
极端小时降水高频旬频次贡献率	极端小时降水高频旬的发生频次占夏季总频次的百分比	%
极端降水事件总历时	所有极端降水事件的持续时间之和	h
极端降水事件频次	发生极端降水事件的总次数	次
极端降水事件平均降水量	极端降水事件的总降水量与事件总频次的比值	$\text{mm}\cdot\text{time}^{-1}$
极端降水事件平均强度	极端降水事件的总降水量与事件总历时的比值	$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$
极端降水事件降水量贡献率	极端降水事件总降水量占夏季总降水量的百分比	%

28.8 mm, 其中 79.8% 的站点集中在 18~24 mm, 高值 (≥ 24 mm) 站点占比 7.3%, 低值 (<18 mm) 站点占比 12.9%。平均降水量 (图 2b) 主要集中在 90~130 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 占比 72.7%, 130 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上占比仅 9.8%。89.0% 的站点年均频次集中在 2.8~4.4 $\text{time}\cdot\text{a}^{-1}$ (图 2c), 而 4.4 $\text{time}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上的高频站点占比 7.6%, 主要分布于雪峰山主体中段及南麓一带, 与 130 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上降水量高值区位置基本吻合。极端小时降水强

度空间分布 (图 2d) 与阈值分布高度一致, 高值中心位于辰溪、溆浦和麻阳一带, 最大强度为 42.8 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 89.2% 的站点集中在 26~38 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 其中高值 (>34 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) 站点占比 12.4%, 低值 (<22 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) 站点占比 1.3%, 最低值为 20.1 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2.1.2 极端小时降水频次旬空间分布

湘中地区夏季极端小时降水的高频旬呈带状空间分布 (图 3a), 主要时段集中在 6 月下旬至 7 月上

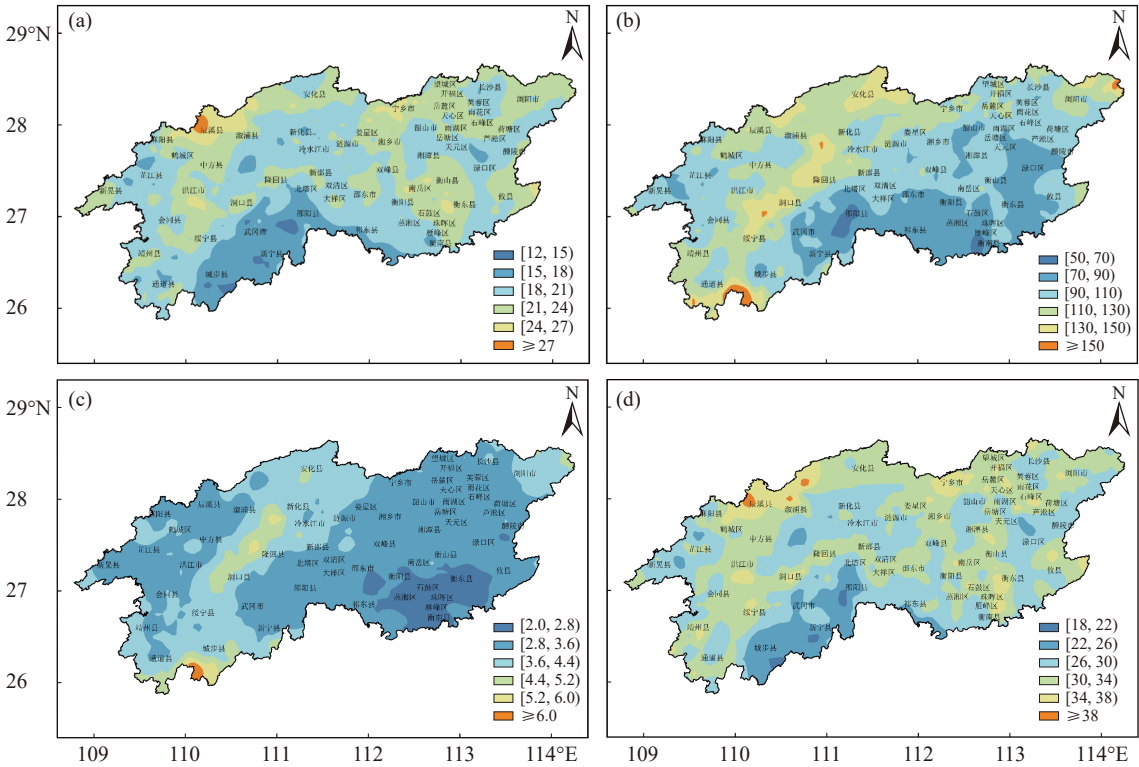


图 2 2016—2025 年夏季湘中地区极端小时降水阈值 (a, 单位: mm)、平均降水量 (b, 单位: $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)、年均频次 (c, 单位: 次) 和强度 (d, 单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of (a) extreme hourly precipitation threshold (unit: mm), (b) mean precipitation (unit: $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$), (c) mean frequency (unit: times· a^{-1}), and (d) mean intensity (unit: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) in central Hunan during summer from 2016 to 2025

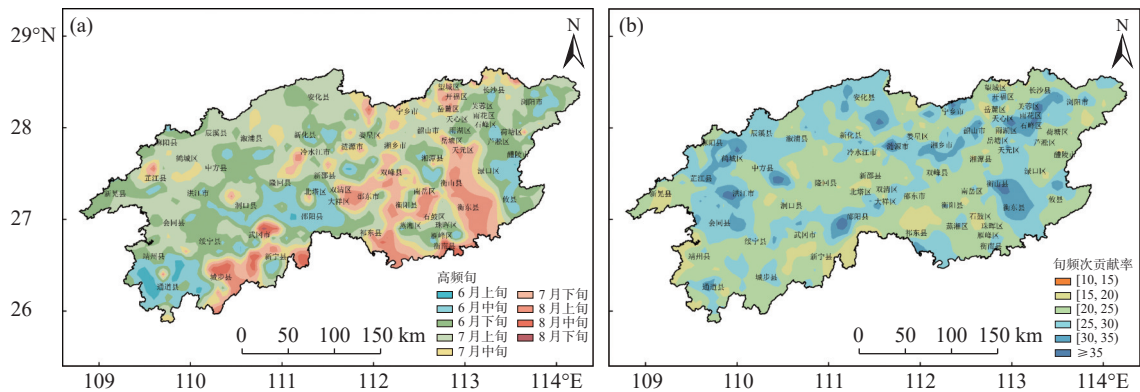


图3 2016—2025年夏季湘中地区极端小时降水高频旬(a)及其频次贡献率(b,单位:%)空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of (a) the ten-day period with the highest frequency of extreme hourly precipitation and (b) its frequency contribution rate (unit: %) in central Hunan during summer from 2016 to 2025

旬,该时段内极端小时降水频次占整个夏季的57%,与湘中地区常年雨季的集中时段高度吻合。从地域分布来看,6月上旬至7月上旬,极端小时降水旬尺度高频区呈现“自南向北”演变特征。6月上旬高频区最早出现在通道与靖州,6月中旬移至洞口、隆回及醴陵等地,6月下旬进入高发阶段,高频区主要分布在新晃、辰溪和浏阳等地,7月上旬进一步北推至溆浦、安化和长沙县等地,7月中旬以后呈“东多西少”空间分布,8月高频区范围显著缩小,仅占总体的5.1%,零散分布于城步、双峰、衡东及湘潭县等地,反映出盛夏后期极端小时降水发生频次的整体衰减特征。

进一步分析图3b表明,湘中地区夏季极端小时降水高频旬的频次贡献率整体呈“北高南低、东高西低”的分布特征,北部和东部的降水集中性更突出。麻阳、鹤城区等地的旬频次贡献率高于30.0%,高值区合计占研究区域15.3%,极端小时降水高度集中于某一时段;新晃、新宁等地低于20.0%,仅0.5%的站点低于15.0%,且分布较分散;此外,频次贡献率为20.0%~25.0%站点分布最广,占比高达41.3%。

2.2 极端降水事件时空分布特征

2.2.1 极端降水事件空间分布特征

由湘中地区夏季极端降水事件频次的空间分布(图4a)可见,自西向东呈“少-多-少”的带状分布,82.7%观测站点集中在21~33次。低频区(<21次)约占总站点数的4%,主要分布于辰溪、邵东及南岳区等地;高频区(≥ 39 次)占比3.9%,主要分布在通道、新化及浏阳东部等地。平均降水量表现出与频次不同的“北多南少”分布特征(图4b),77.8%的站点集中在46~78 mm·time⁻¹,低值区(<46 mm·time⁻¹)主要位于城步、新宁和祁东等地,占总站点数4.6%;高值区(≥ 94 mm·time⁻¹)占比2.7%,集中在辰溪、溆浦和安化一带。平均强度空间分布(图4c)呈现出更为复杂

的特征,86.3%的站点集中在5~8 mm·h⁻¹。低强度区(<5 mm·h⁻¹)占比5.2%,主要散布于城步、韶山及长沙县等地;高强度区(≥ 8 mm·h⁻¹)占比8.6%,在空间上形成了多个高值中心,主要分布在靖州、双峰及衡山县等地。降水量贡献率空间分布(图4d)与平均降水量的分布特征较为相似,呈现出“北高南低”的分布特征,其中,安化、溆浦和长沙县一带的降水量贡献率显著偏高,超过40%,表明这些区域夏季降水更多依赖于极端降水事件;而城步、武冈及邵阳等地的极端降水量贡献率相对较低,普遍在30%以下。

2.2.2 不同历时极端降水事件时间变化特征

图5为湘中地区夏季不同历时极端降水事件中最大小时降水量发生频次的旬-日变化特征。从旬尺度变化来看,短历时事件的频次分布表现出向盛夏集中的趋势,峰值时段出现在8月上中旬(图5a);中历时事件的频次峰值则较早出现,主峰为6月上旬,次峰为6月下旬(图5b);长历时事件的频次高峰时段集中于6月下旬至7月上旬(图5c)。从日变化特征来看,短历时事件呈现单峰型分布,峰值出现在16时,这主要受太阳辐射日变化影响,午后至傍晚近地层大气不稳定能量与层结不稳定度达峰值,利于触发对流活动,导致极端降水事件频发(Li and Zhou, 2008);中历时事件则呈双峰型分布,主峰为07时,次峰为16时,反映出其可能受到不同天气系统与触发机制的共同影响;长历时事件为单峰型分布,峰值出现在08时,中、长历时事件在清晨至上午时段的峰值,可能与边界层过程及低空急流的日变化有关(Xue et al., 2018; 谢傲等, 2026)。

2.3 大尺度环流异常特征

2.3.1 大尺度降水异常特征

基于图5的极端降水事件旬变化分析结果,分别选取短历时(8月上中旬)、中历时(6月上旬与下旬)以及长历时(6月下旬至7月上旬)的典型高发时

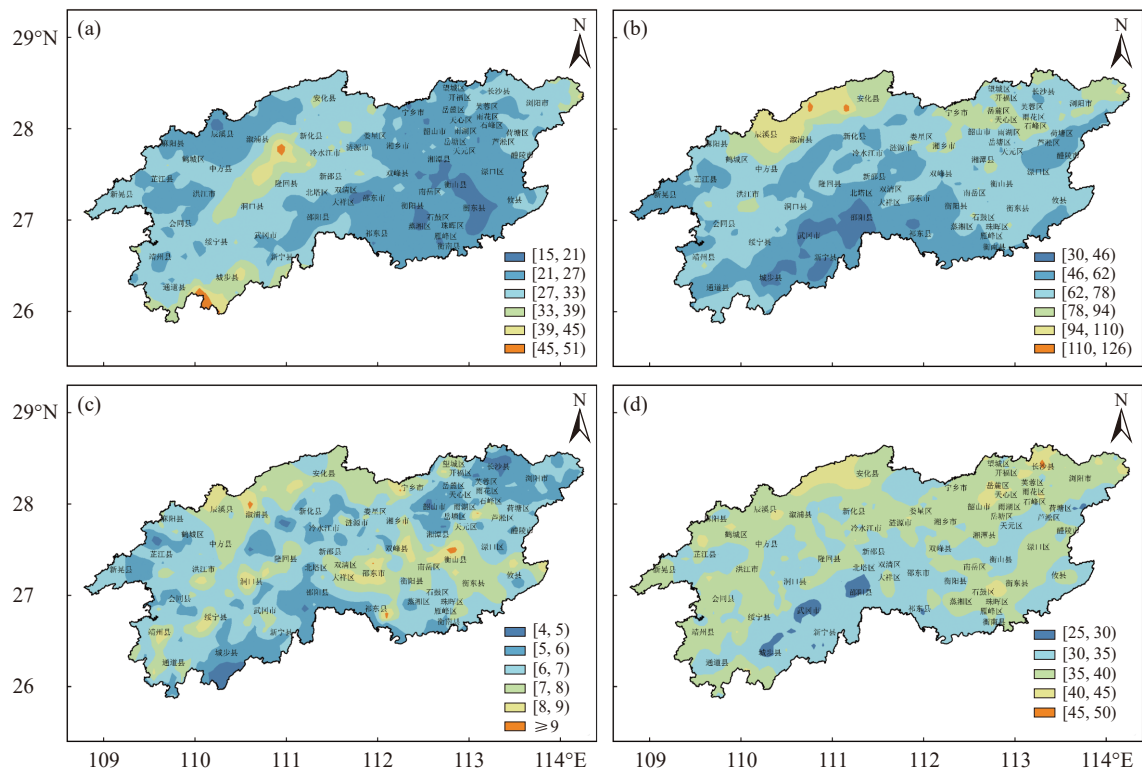


图 4 2016—2025 年夏季湘中地区极端降水事件频次 (a, 单位: 次)、平均降水量 (b, 单位: mm)、平均强度 (c, 单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、降水量贡献率 (d, 单位: %) 空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of (a) frequency (unit: times), (b) mean precipitation amount (unit: mm), (c) mean intensity (unit: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), and (d) contribution rate to total precipitation (unit: %) of extreme precipitation events in central Hunan during summer from 2016 to 2025

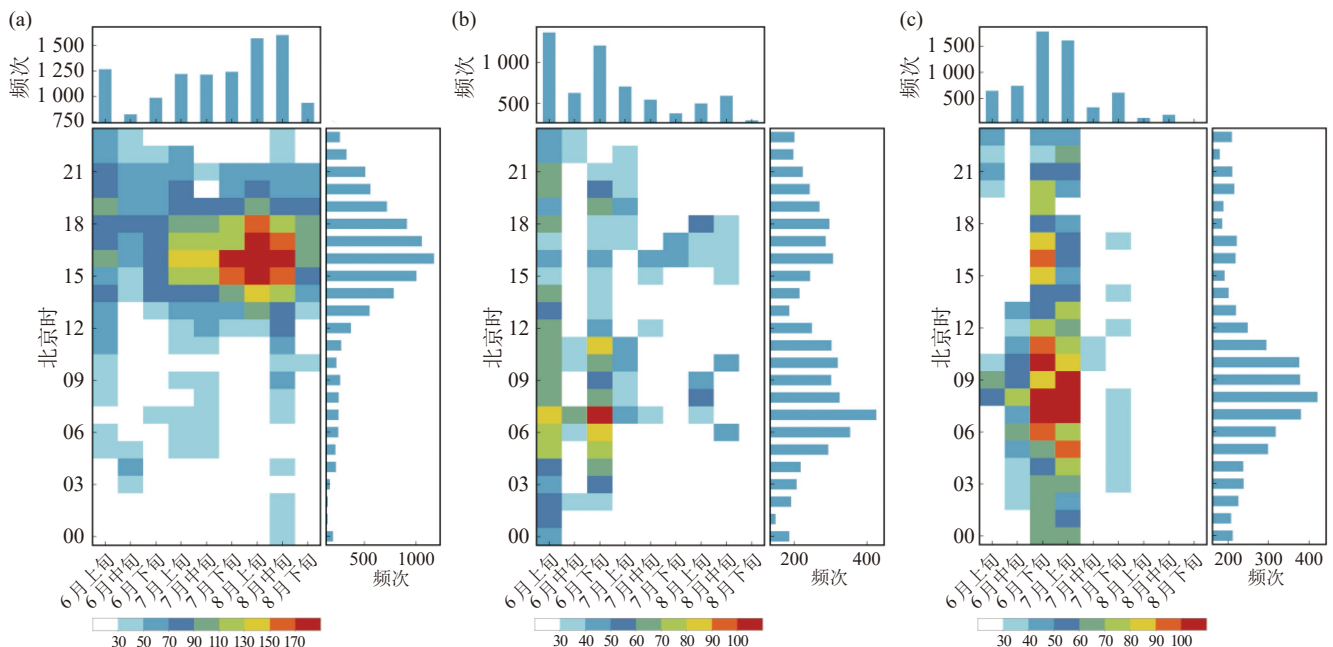


图 5 2016—2025 年夏季湘中地区短历时 (a)、中历时 (b) 和长历时 (c) 极端降水事件最大小时降水量发生频次 (填色, 单位: 次) 旬-日变化分布图

Fig. 5 Spatial distribution of ten-day and diurnal variations in the frequency of maximum hourly precipitation (shaded, unit: times) for (a) short-duration, (b) medium-duration, and (c) long-duration extreme precipitation events in central Hunan during summer from 2016 to 2025

段, 计算得出湘中地区夏季不同历时极端降水事件对应的大尺度降水异常场空间分布 (图 6), 由图可见, 不同历时极端降水事件在湘中地区均表现为降

水正异常区, 其强度随历时的增加而增强, 南北两侧的负异常区也表现出增强的趋势, 进而使得正、负异常区之间的强度差异更为显著。

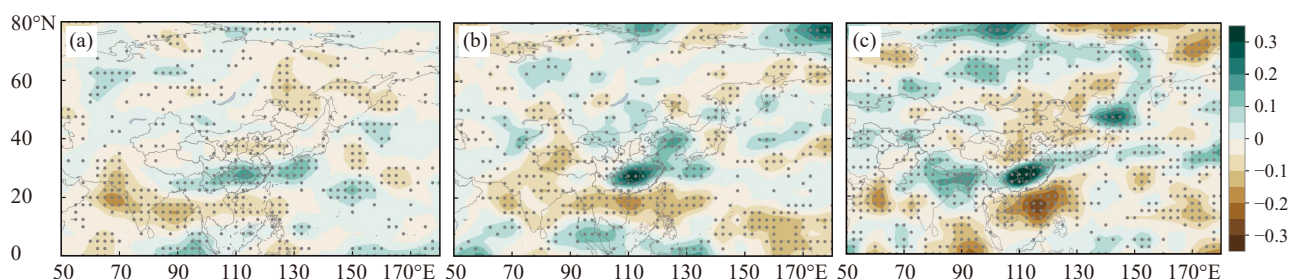


图6 2016—2025年夏季湘中地区短历时(a)、中历时(b)和长历时(c)极端降水事件对应的大尺度降水量标准化距平场(填色,圆点表示通过置信度为95%的显著性检验,下同)

Fig. 6 Standardized anomaly fields of large-scale precipitation corresponding to (a) short-duration, (b) medium-duration, and (c) long-duration extreme precipitation events in central Hunan during summer from 2016 to 2025(shaded, dotted areas statistical significance at the 95% confidence level based on the t-test, the same below)

2.3.2 位势高度场异常特征

图7为不同历时极端降水事件的500 hPa与200 hPa位势高度合成及其标准化距平的空间分布场。分析可知,500 hPa中高纬度地区为“两槽一脊”型,构成了“—+—”的波列结构。不同历时极端降水事件的副高异常响应特征具有一定差异,短历时事件中副高表现为偏东、偏弱态势(图7a),该配置为登陆我国东南沿海的台风活动提供了更有利的环流背景;而中、长历时事件则表现出副高偏西、偏强的特征(图7b、c),其外围环流延伸覆盖湖南南部地区,有利于引导孟加拉湾与南海的水汽向湘中地区输送,为极端降水事件的发生提供有利的水汽条件。

在200 hPa高度场上,中、长历时事件的位势高度距平分布形态相似(图7e、f),均在青藏高原及中

高纬度地区上空存在大范围的正异常区,而短历时事件则表现为负异常控制上述区域(图7d)。对上述区域的高低空环流配置综合对比发现,中、长历时事件在中高层均表现为较强的位势高度正异常,受南亚高压和副高的协同作用更为显著;短历时事件中这两个系统强度均相对偏弱,这种系统强度的配置差异,与南亚高压和副高相向移动的耦合模态密切相关(雷显辉等,2022),是导致不同历时极端降水事件在强度与空间分布上呈现显著差异的重要原因。

2.3.3 水汽输送异常特征

图8a—c展示了不同历时极端降水事件的整层水汽通量及散度分布特征,整体来看,从低纬热带洋面至30°N均存在显著的西南—东北向的水汽输送带,其中青藏高原南部及其以南区域为水汽通量高

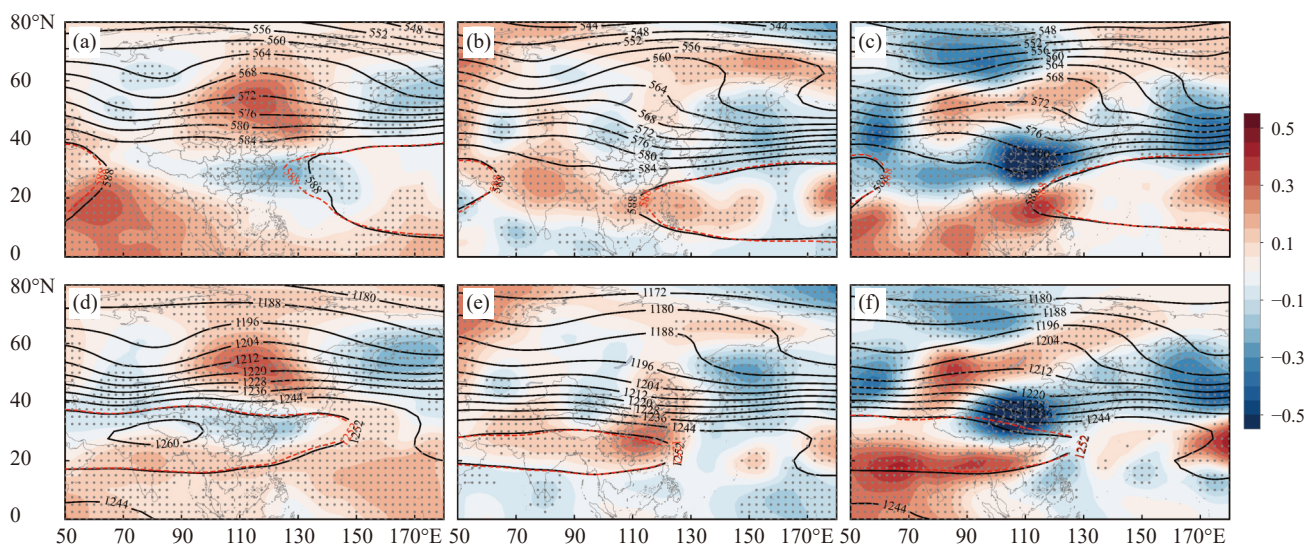


图7 2016—2025年夏季湘中地区短历时(a、d)、中历时(b、e)和长历时(c、f)极端降水事件的500 hPa(a—c)和200 hPa(d—f)位势高度(等值线,单位: dagpm)合成场及其标准化距平场(填色)(图a—c红色虚线为常年同期588 dagpm,图d—f红色虚线为常年同期1252 dagpm)

Fig. 7 Composite fields of (a-c) 500 hPa and (d-f) 200 hPa geopotential height (contours, unit: dagpm) and their standardized anomalies (shading) for (a, d) short-duration, (b, e) medium-duration, and (c, f) long-duration extreme precipitation events in central Hunan during summer from 2016 to 2025 (red dashed lines in figure a-c and figure d-f indicate the climatological 588 dagpm and 1252 dagpm isolines, respectively)

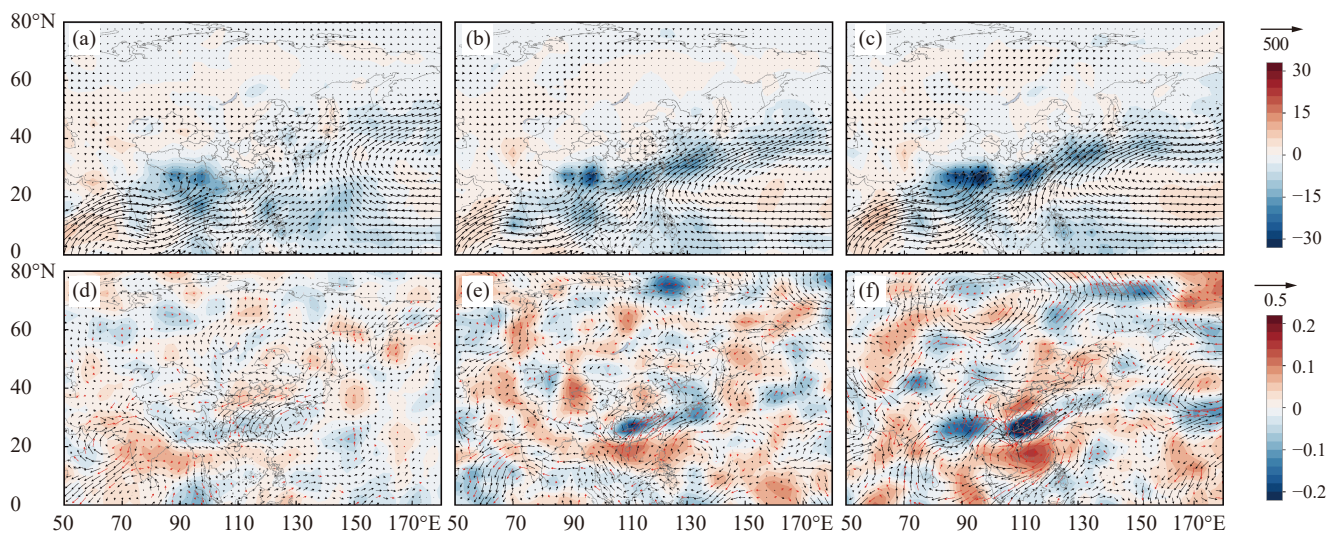


图 8 2016—2025 年夏季湘中地区短历时 (a、d)、中历时 (b、e) 和长历时 (c、f) 极端降水事件的整层水汽通量 (箭头, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 及其散度 (填色, 单位: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 合成场 (a—c) 和标准化距平场 (d—f, 红色箭头表示通过置信度为 95% 的显著性检验)

Fig. 8 The (a-c) composite fields of vertically integrated water vapor flux (arrows, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergence (shaded, unit: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), and (d-f) their standardized anomaly fields for (a, d) short-duration, (b, e) medium-duration, and (c, f) long-duration extreme precipitation events in central Hunan during summer from 2016 to 2025 (red arrows in (d-f) indicate anomalies statistically significant at the 95% confidence level based on the t-test)

值区, 孟加拉湾至南海的水汽在华南地区辐合。不同历时极端降水事件的水汽来源存在明显差异: 短历时事件的整层水汽通量高值区位置偏南, 湘中地区整层水汽通量偏弱 (图 8a), 中历时事件受孟加拉湾与南海共同影响 (图 8b), 长历时事件则以孟加拉湾为主要水汽来源 (图 8c)。

进一步分析整层水汽通量及其散度异常场 (图 8d—f) 发现, 不同历时极端降水事件在水汽输送路径配置上存在显著差异。短历时事件表现为湘中地区至我国东南沿海受异常气旋性环流系统控制 (图 8d), 且整层水汽通量散度为负异常区, 表明此类情形下台风活动频次高于常年, 水汽辐合显著, 与前文所述的副高偏东、偏弱背景下台风活动频繁的结论一致。而中、长历时事件的水汽来源于孟加拉湾与南海的协同输送, 在副高偏西、偏强的背景下, 我国南海至华南地区出现异常反气旋性环流 (图 8e, f), 该环流配置为源自孟加拉湾与南海的暖湿水汽向湘中地区输送提供持续、稳定的动力条件。

3 结论与讨论

本文利用逐小时降水观测资料及 ERA5 再分析资料, 分析了 2016—2025 年夏季湘中地区极端小时降水和极端降水事件的时空分布特征, 并比较了不同历时极端降水事件的异常环流特征。得到以下主要结论:

(1) 湘中地区夏季极端小时降水的阈值、平均降

水量和强度呈现“北高南低”的空间分布, 阈值和强度高值中心集中于辰溪、麻阳和溆浦一带, 平均降水量和平均频次大值区主要分布在雪峰山主体中段及其南麓地区; 极端小时降水高频时段主要集中在 6 月下旬至 7 月上旬, 高频区呈现阶段性“自南向北”演变特征, 7 月中旬后转为“东多西少”空间分布, 8 月份发生频次显著降低。

(2) 湘中地区夏季极端降水事件发生频次表现为自西向东“少-多-少”、平均降水量呈现“北多南少”、平均强度则形成多个局地性高强度中心的分布特征。安化、溆浦和长沙县一带地区极端降水事件对夏季总降水量的贡献率尤为突出。

(3) 湘中地区夏季不同历时极端降水事件具有明显的旬际变化和日变化差异。在旬际时间尺度上, 短历时事件 8 月上中旬为峰值时段; 中历时事件主峰为 6 月上旬, 次峰为 6 月下旬; 长历时事件高峰时段为 6 月下旬至 7 月上旬。在日变化尺度上, 短、长历时事件呈现单峰型, 日峰值分别出现在 16 时和 08 时; 而中历时事件表现为双峰型分布, 主峰出现在 16 时, 次峰为 07 时。

(4) 湘中地区夏季极端降水事件在 500 hPa 中高纬表现为“两槽一脊”型, 短历时事件在副高偏东、偏弱的背景下, 湘中地区至我国东南沿海受异常气旋性环流系统控制, 整层水汽通量散度为负异常区; 中、长历时事件表现为副高偏西、偏强, 我国南海至华南地区为异常反气旋性环流, 有利于孟加拉湾与

南海的水汽输送至湘中地区。

本文系统分析了湘中地区夏季极端小时降水和极端降水事件的时空分布特征及其与大尺度环流系统的关联机制,为极端降水的成因机理研究、监测预警和灾害风险防范提供科学参考。湘中地区地处长江中游南岸,境内雪峰山、南岳等山脉与丘陵交错分布,其复杂地形引发的动力抬升、局地辐合线触发及山谷风环流等过程,如何与大尺度环流系统形成跨尺度协同作用,目前仍缺乏深入认识。今后需结合多源观测资料与高分辨率数值模拟,深入揭示多尺度系统相互作用的动力、热力机制,提升对复杂地形条件下区域极端降水发生、发展及演变规律的科学认知,从而完善并丰富区域极端降水成因的理论体系。

参考文献 (References):

- 蔡悦幸,陆希,杨崧.2018.华南地区前后汛期极端降水事件对比分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*,57(1):83–92. Cai Y X, Lu X, Yang S. 2018. Comparative of extreme precipitation events in early and latter rainy seasons over South China [J]. *Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition)*,57(1):83–92 (in Chinese). doi:10.13471/j.cnki.acta.snus.2018.01.012
- 陈红.2017.长江中下游夏季极端降水事件频次的统计降尺度模拟与预估[J]. *长江流域资源与环境*,26(5):771–777. Chen H. 2017. Simulation and estimation of extreme precipitation event frequency in the middle-lower reaches of Yangtze River using statistical downscaling method [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,26(5):771–777 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyhj201705015
- 陈金明,陆桂华,吴志勇,等.2016.1960—2009年中国夏季极端降水事件与气温的变化及其环流特征[J]. *高原气象*,35(3):675–684. Chen J M, Lu G H, Wu Z Y, et al. 2016. Change properties of summer extreme precipitation events and temperature and associated large-scale circulation in China during 1960–2009 [J]. *Plateau Meteorology*,35(3):675–684 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2015.00072
- 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小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
- 邓彪,王春学,孙蕊,等.2022.四川省近10年极端小时降水时空分布特征[J]. *高原山地气象研究*,42(4):115–120. Deng B, Wang C X, Sun R, et al. 2022. Temporal and spatial distribution characteristics of extreme hourly precipitation in Sichuan Province in recent 10 years [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,42(4):115–120 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2022.04.016
- 韩洁,管兆勇,李明刚.2012.夏季长江中下游流域性极端日降水事件的环流异常特征及其与非极端事件的比较[J]. *热带气象学报*,28(3):367–378. Han J, Guan Z Y, Li M G. 2012. Comparisons of circulation anomalies between the daily precipitation extreme and non-extreme events in the middle and lower reaches of Yangtze River in boreal summer [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,28(3):367–378 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–4965.2012.03.009
- 雷显辉,宋敏红,张少波.2022.夏季南亚高压和西太副高活动特征指数与中国东部降水分布的联系[J]. *高原气象*,41(2):489–501. Lei X H, Song M H, Zhang S B. 2022. Association between summer activity characteristic indices of the South Asia high and the West Pacific subtropical high and precipitation distribution in Eastern China [J]. *Plateau Meteorology*,41(2):489–501 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2021.00099
- 李建,宇如聪,孙微.2013.中国大陆地区小时极端降水阈值的计算与分析[J]. *暴雨灾害*,32(1):11–16. Li J, Yu R C, Sun W. 2013. Calculation and analysis of the thresholds of hourly extreme precipitation in mainland China [J]. *Torrential Rain and Disasters*,32(1):11–16 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2013.01.002
- 李明刚,管兆勇,韩洁,等.2012.近50 a 华东地区夏季极端降水事件的年代际变化[J]. *大气科学学报*,35(5):591–602. Li M G, Guan Z Y, Han J, et al. 2012. Interdecadal changes of summertime precipitation extremes in East China in recent five decades [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,35(5):591–602 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2012.05.011
- 李明刚,管兆勇,梅士龙.2016.夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异及其与环流和 Rossby 波活动的联系[J]. *大气科学*,40(6):1199–1214. Li M G, Guan Z Y, Mei S L. 2016. Interannual and Interdecadal variations of summer rainfall duration over the middle and lower reaches of the Yangtze River in association with anomalous circulation and Rossby wave activities [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,40(6):1199–1214 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1511.15257
- 龙妍妍,范广洲,段炼,等.2016.中国近54年来夏季极端降水事件特征研究[J]. *气候与环境研究*,21(4):429–438. Long Y Y, Fan G Z, Duan L, et al. 2016. A study on the characteristics of summertime extreme precipitation events over China in recent 54 years [J]. *Climatic and Environmental Research*,21(4):429–438 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9585.2016.15130
- 潘志祥,黎祖贤,叶成志,等.2015.湖南省天气预报手册[M].北京:气象出版社. Pan Z X, Li Z X, Ye C Z, et al. 2015. Hunan Provincial Weather Forecast Handbook [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)
- 冉津江,齐玉磊,龙治平,等.2023.基于高密度站点的四川盆地短时强降水特征分析[J]. *高原气象*,42(4):949–961. Ran J J, Qi Y L, Long Z P, et al. 2023. Characteristics of short-time heavy rainfall in the Sichuan basin based on high-density station observations [J]. *Plateau Meteorology*,42(4):949–961 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2022.00044
- 沈晓琳,周宁芳,杨舒楠,等.2019.2015年冬季云南两次极端降水事件及环流异常特征分析[J]. *暴雨灾害*,38(4):380–385. Shen X L, Zhou N F, Yang S N, et al. 2019. Analysis of two extreme precipitation events and circulation anomalies in Yunnan Province in winter of 2015 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,38(4):380–385 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.04.011
- 唐红玉,吴遥,董新宁,等.2025.华西秋雨期极端降水事件及其环流特征[J]. *气象*,51(6):711–723. Tang H Y, Wu Y, Dong X N, et al. 2025. Extreme precipitation events and their circulation characteristics during

- the autumn rain period in West China [J]. *Meteorological Monthly*, 51(6):711–723 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2025.032001
- 唐永兰,徐桂荣,王晓芳,等.2023.1992—2021 年三峡库区夏季小时强降雨时空分布特征[J].*干旱气象*,41(4):589–598. Tang Y L, Xu G R, Wang X F, et al. 2023. Spatio-temporal distribution characteristics of summer hourly heavy rainfall in the Three Gorges Reservoir area from 1992 to 2021 [J]. *Journal of Arid Meteorology*,41(4):589–598 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-04-0589
- 陶诗言,卫捷.2006.再论西太平洋副热带高压的西伸北跳[J].*应用气象学报*,17(5):513–525. Tao, S Y, Wei J. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,17(5):513–525 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001
- 王志福,钱永甫.2009.中国极端降水事件的频数和强度特征[J].*水科学进展*,20(1):1–9. Wang Z F, Qian Y F. 2009. Frequency and intensity of extreme precipitation events in China [J]. *Advances in Water Science*,20(1):1–9 (in Chinese). doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2009.01.005
- 王中,李东川,王嘉佩.2025.2016—2022 年四川盆地东部极端降水特征[J].*沙漠与绿洲气象*,19(3):88–95. Wang Z, Li D C, Wang J P. 2025. Characteristics of extreme precipitation in eastern Sichuan Basin during 2016–2022 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,19(3):88–95 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2310.17001
- 吴志伟,李建平,何金海,等.2006.大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转[J].*科学通报*,51(14):1717–1724. Wu Z W, Li J P, He J H, et al. 2006. Large-scale atmospheric circulation anomalies and long-cycle drought-flood abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer [J]. *Chinese Science Bulletin*,51(14):1717–1724 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2006.14.016
- 夏阳,陈金梅,李明刚,等.2023.1979—2019 年云贵高原夏季区域性极端日降水事件的异常环流特征[J].*热带气象学报*,39(4):603–613. Xia Y, Chen J M, Li M G, et al. 2023. Circulation anomalies of regional daily precipitation extremes over Yunnan-Guizhou Plateau during boreal summers of 1979–2019 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 39(4):603–613 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2023.052
- 谢傲,李易芝,罗伯良,等.2026.湖南省夏季降水的日变化特征及形成原因分析[J].*暴雨灾害*,45(1):130–141. Xie A, Li Y Z, Luo B L, et al. 2026. Analysis of diurnal variation characteristics and formation causes of summer precipitation in Hunan Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(1):130–141 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025-012
- 杨梦兮,胡瑞金,刘梅,等.2025.江苏梅雨期极端小时降水时空变化特征[J].*暴雨灾害*,44(4):473–482. Yang M X, Hu R J, Liu M, et al. 2025. The spatiotemporal variation characteristics of extreme hourly precipitation during the Meiyu period in Jiangsu Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,44(4):473–482 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-033
- 张灵,熊开国,周悦.2022.湖北夏季日极端降水事件的气候特征及环流分型[J].*长江流域资源与环境*,31(6):1393–1401. Zhang L, Xiong K G, Zhou Y. 2022. Characteristics and circulation classification of extreme daily precipitation events in Hubei Province during summer [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,31(6):1393–1401 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyyhj202206019
- 张庆云,陶诗言.1998.亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响[J].*气象学报*,56(2):199–211. Zhang Q Y, Tao S Y. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,56(2):199–211 (in Chinese)
- Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment [J]. *Science*,314(5804):1442–1445. doi:10.1126/science.1132027
- Li J, Yu R, Zhou T. 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
- Ren F M, Cui D L, Gong Z Q, et al. 2012. An objective identification technique for regional extreme events [J]. *Journal of Climate*,25(20):7015–7027. doi:10.1175/jcli-d-11-00489.1
- Tank A M G K, Können G P. 2003. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99 [J]. *Journal of Climate*,16(22):3665–3680. doi:10.1175/1520-0442(2003)0162.0.CO;2
- Xue M, Luo X, Zhu K, et al. 2018. The controlling role of boundary layer inertial oscillations in Meiyu frontal precipitation and its diurnal cycles over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(10):5090–5115. doi:10.1029/2018JD028368
- Yang H, Liu M, Wang M, et al. 2022. Projections of extreme precipitation in the middle and upper Yangtze River at 1.5°C and 2°C warming thresholds based on bias correction [J]. *Theoretical and Applied Climatology*,147(10):1589–1600. doi:10.1007/s00704-021-03899-0

(责任编辑 杨 浩)