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

中国南方极端降水的不同变化特征分析

郭丽芳 巩远发 孙昕

Analysis of different characteristics of extreme precipitation in Southern China

GUO Lifang，GONG Yuanfa，SUN Xin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-204

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

近54 a湖北极端降水的变化特征及其与城市化的关系研究

Study on the change characteristics of extreme precipitation and its relationship with urbanization in Hubei Province in recent 54 years

暴雨灾害. 2018, 37(1): 73-82 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2018.01.010

1981-2016年京津冀地区极端降水特征研究

Characteristics of extreme precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1981 to 2016

暴雨灾害. 2018, 37(5): 428-434 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2018.05.005

中国极端小时降水2010—2019年研究进展

Extreme hourly precipitation over China: Research progress from 2010 to 2019

暴雨灾害. 2019, 38(5): 502-514 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.012

赣江流域近50 a来极端降水时空变化特征

Spatial and temporal characteristics of extreme precipitation in Ganjiang River Basin in the past 50 years

暴雨灾害. 2020, 39(1): 102-108 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.012

1982—2016年云南省不同强度降水气候态及其变化

Climatology and changes of hourly precipitation with various intensities in Yunnan Province from 1982 to 2016

暴雨灾害. 2020, 39(4): 363-371 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.006

ECMWF降水极端天气指数在浙江的应用评估

Application assessment of precipitation extreme forecast index (EFI) from ECMWF in Zhejiang Province

暴雨灾害. 2021, 40(1): 69-77 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.009

关注微信公众号，获得更多资讯信息

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 Lifang, GONG Yuanfa, SUN Xin. 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

中国南方极端降水的不同变化特征分析

郭丽芳[1, 2], 巩远发[1], 孙昕[1]

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225;
2. 山西省大气探测技术保障中心, 太原 030000)

摘　要: 利用国家气象科学数据中心的中国南方七省 (区) (以下简称中国南方) 1961—2020 年 206 个气象观测站点的逐日降水资料, 采用百分位法提取 20 时—08 时 (北京时, 下同; 夜间)、08 时—20 时 (白昼)、20 时—20 时 (全天) 三个时段的 95% 分位极端降水, 分析了 60 a 中国南方极端降水量及其频次、极端降水最早开始时间、最晚结束时间的时空变化特征。结果表明: (1) 夜间、白昼及全天极端降水阈值的空间分布特征比较相似, 夜间极端降水量大于白昼。(2) 中国南方极端降水量及其发生频次整体的长期变化均呈显著增加趋势。夜间、白昼极端降水量及其频次呈增加趋势的站点均超过 70%; 全天的极端降水量及其频次也有近 80% 的站点呈增加趋势。(3) 中国南方极端降水的空间分布不均匀, 并有昼夜差异。年平均极端降水量高值区在两广的偏南地区, 夜间年平均极端降水量大于白昼年平均极端降水量; 年平均极端降水频次大值区分布与极端降水量明显不同, 全天和白昼极端降水频次高值区大多位于中国南方的中部和东部, 夜间极端降水频次高值区多位于南方的西北部。(4) 中国南方一年中极端降水从开始到结束的发生时间段有不断延长的趋势。夜间、白昼极端降水开始时间提前趋势和结束时间延后趋势的站点均超过 60%; 全天极端降水开始时间提前趋势和结束时间延后趋势的站点均超过 67%, 总体是开始时间平均每 10 a 提前 2 d、结束时间平均每 10 a 延后近 2 d。南方中部地区极端降水开始时间最早, 广东西南部、广西和贵州西部开始时间最晚; 极端降水结束时间江西北部最早, 浙江东部最晚。

关键词: 极端降水; 极端降水阈值; 降水频次; 变化趋势
中图法分类号: P467　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−204

Analysis of different characteristics of extreme precipitation in Southern China

GUO Lifang[1, 2], GONG Yuanfa[1], SUN Xin[1]

(1. *Chengdu University of Information Technology College of Atmospheric Science*, *Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province*, *Chengdu* 610225; 2. *Shanxi Provincial Atmospheric Sounding Technology Safeguard Center*, *Taiyuan* 030000)

Abstract: Based on the daily precipitation data from 206 meteorological observation stations in seven provinces of Southern China between 1961 and 2020 provided by the National Meteorological Science Data Center, the 95th percentile extreme precipitation for three periods, 20:00 BT-08:00 BT (nighttime), 08:00 BT-20:00 BT (daytime), and 20:00 BT- 20:00 BT (all-day) was extracted by percentile method. The temporal and spatial characteristics of extreme precipitation, frequency, the earliest start time, and the latest end time over 60 years were analyzed. The results are as follows. (1) The spatial distribution characteristics for nighttime, daytime, and all-day extreme precipitation thresholds are similar, but the extreme precipitation at nighttime is larger than that at daytime. (2) For the long-term change, both the extreme precipitation and frequency in Southern China are increasing significantly. More than 70% of the stations show increases in nighttime and daytime extreme precipitation and frequency, and nearly 80% of the stations show increases in all-day extreme precipitation and frequency. (3) The spatial distribution of extreme precipitation in Southern China exhibits nonuniform patterns and varies between day and night. The high-value areas of the annual mean extreme precipitation amount are located in the southern parts of Guangdong and Guangxi, with the annual average extreme precipitation at night being larger than that at daytime. The spatial distribution of the annual average extreme precipitation frequency is obviously different from that of extreme precipitation amount. The high-frequency areas of extreme precipitation for daytime and all-day periods are located in the central and eastern parts of Southern China,

收稿日期: 2023−09−26; **定稿日期**: 2024−01−30
资助项目: 国家自然科学基金项目 (U20A2097)
第一作者: 郭丽芳, 主要从事短期气候变化诊断研究。E-mail: 1352612468@qq.com
通信作者: 巩远发, 主要从事短期气候变化诊断和模拟研究。E-mail: gyfa@cuit.edu.cn
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

while night extreme precipitation at night is mainly concentrated in the northwest of Southern China. (4) The period of extreme precipitation from beginning to end in Southern China is lengthening. More than 60% of the stations show an earlier start and later end time trend for both nighttime and daytime extreme precipitation, and more than 67% of stations exhibit a similar trend for all-day extreme precipitation. Overall and on average, the start time advances by 2 days per 10 years, and the end time delays by 2 days in 10 years. The earliest onset time of extreme precipitation appears in the central part of South China, and the latest onset time occurs in the southwestern part of Guangdong and the western part of Guangxi and Guizhou. The earliest end time of extreme precipitation appears in north Jiangxi with the latest end time in east Zhejiang.

Key words: extreme precipitation; extreme precipitation threshold; precipitation frequency; trend

引　言

IPCC 发布的《2021 年气候变化: 自然科学基础》指出 (IPCC, 2021), 2011—2020 年全球平均温度比 1850—1900 年提高了 1.09 ℃, 气候变化对自然环境及人类生产生活产生了重要影响 (Zhao et al., 2023)。全球气候变暖不仅会导致冰川退缩、海平面升高、冻土融化等灾害 (丁一汇, 2003; Wu et al., 2020; 蔡芗宁等, 2024; 李勇等, 2024), 也会导致大范围内极端强降水发生频率增加 (李晓惠等, 2024)、区域强降水事件更趋频繁 (翟盘茂和刘静, 2012)。城市化使得许多城市区域极端降水增加、地表径流加强, 沿海城市受到不断加剧的、与海平面上升相关的复合型洪水的影响 (袁宇锋和翟盘茂, 2022)。极端降水的发生对人民生命安全、社会经济发展以及生态环境等方面造成了巨大影响 (Groisman et al., 2005; Alexander et al., 2006), 是全球变化研究的一项重要课题。

对中国南方极端降水的变化研究已有众多成果。中国南方极端降水的长期变化趋势为增加 (陈海山等, 2009), 就不同省份的极端降水而言, 贵州极端降水呈西高东低的特征 (甘文强等, 2018); 江西极端降水呈从南到北递增的特征 (马锋敏等, 2013); 湖南、广东极端降水有较大的空间差异, 且呈明显增强的趋势, 大尺度环流变化是湖南极端降水异常的主要因子 (周莉等, 2018); 福建、浙江的极端降水量、频次、强度均呈现出增加趋势, 福建极端降水与西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 强度、北半球极涡强度和南海副高强度之间有显著的相关性 (曾颖婷等, 2023); 广西极端降水变化与厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 存在潜在联系, 不同极端指标在 37 a 的傅里叶谱周期内均呈现显著的周期性变率 (梁驹等, 2017)。

就昼夜降水变化特征而言, 我国不同地区有不同的特征。王胜等 (2011) 发现淮河流域昼夜降水呈北少南多分布, 且夜雨量和夜雨日略多于白昼。曾波等 (2018) 研究表明四川地区白昼和夜间降水频次均呈减少趋势, 且夜间降水的年代际变化相对于白天更为明显。邓海军等 (2020) 研究表明湿润区流域的年均昼夜暴雨雨量对总降水量的贡献率大于昼夜大雨对总降水量的贡献率, 而干旱区-半干旱区流域则相反。刘义花等 (2020) 研究表明青海高原昼夜雨量空间分布基本一致, 均呈东南向西北减少, 且昼雨日少于夜雨日, 昼夜雨量总体均呈增多趋势。中国南方有关极端降水变化特征的研究主要着眼于全天, 鲜有分为昼夜两个时段进行研究的。昼夜极端降水的变化特征本质上存在很大差异, 夜间发生的极端降水更易造成暴雨洪涝、山体滑坡, 并使得防灾的难度成倍增加。因此, 基于国家气象科学数据中心提供的中国南方七省 (自治区) 60 a 气象观测站点的逐日降水资料, 利用百分位法等方法对 20 时 (北京时, 下同)—08 时 (夜间)、08 时—20 时 (白昼)、20 时—20 时 (全天) 的极端降水量及其频次、一年中极端降水开始 (结束) 时间的变化特征进行深入细致的分析, 探寻昼夜极端降水的不同变化特征, 以期进一步了解全球气候变化背景下区域极端降水的变化趋势及其影响, 为防灾减灾提供更加深入的科学基础和依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的资料为国家气象科学数据中心提供的 1961—2020 年湖南、江西、浙江、贵州、广西、广东、福建中国南方七省 (区) (以下简称中国南方) 206 个气象观测站点逐日降水资料, 该资料经过国家气象信息中心的质量控制, 研究区域的站点见图 1。

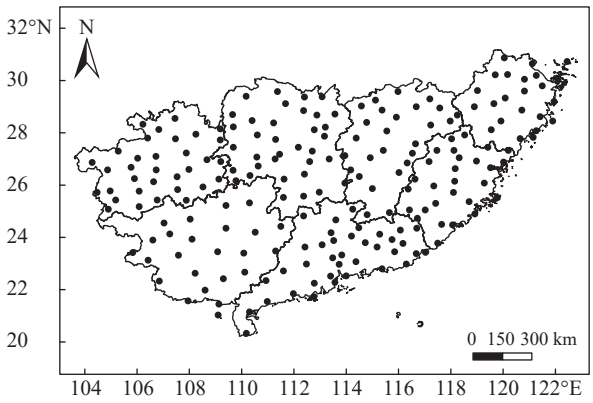


图 1 中国南方 206 个气象观测站点 (黑色圆点) 的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of 206 meteorological stations (black dots) in Southern China

1.2 定义与方法

极端降水采用百分位法定义 (郑祚芳等, 2013), 即将某站点 60 a 内夜间、白昼、全天三个时段降水按升序排列, 达到 95% 分位数的降水量称该站点夜间、白昼、全天极端降水阈值。计算方法如下:

首先, 在某站点的 60 a 日降水序列中, 取出所有湿日 (即夜、昼 12 h 降水量≥0.5 mm、全天 24 h 降水量≥1.0 mm) 构成新的降水量子序列。将新的子序列按升序排序, 得到升序序列 X。

其次, 利用 Hyndman 和 Fan (1996) 推荐的百分位数计算模型求出 X 的 95% 分位数作为该站点的极端降水阈值。序列 X 的第 q 百分位降水量阈值 X_q 为

$$X_q = X_i + r(X_{i+1} - X_i) \tag{1}$$

其中

$$i = \mathrm{int}\left(q \times \left[n + \frac{1}{3}\right] + \frac{1}{3}\right) \tag{2}$$

$$r = q \times (n+1) - \mathrm{int}(q \times (n+1)) \tag{3}$$

式中, n 为序列 X 长度, 即每个站点夜间、白昼、全天降水的天数 (湿日数); i 为确定分位数所在的位置; r 为插值系数, 即 q 分位数在第 i 和第 $i+1$ 位置之间的比例。

极端降水量和极端降水频次: 将某测站的全天 (夜间、白昼) 降水量达到或超过其全天 (夜间、白昼) 极端降水阈值, 记为一次极端降水, 达到或超过极端阈值的降水量称为极端降水量, 年值则为其年内各次极端降水量总和, 频次同理。年平均极端降水量和频次: 某站 60 a 出现的极端降水总量除以 60 为该站的年平均极端降水量, 频次同理。极端降水起止时间: 取某站某年首次出现极端降水的日期为极端降水开始时间, 取最后一次出现极端降水的日期为极端降水结束时间 (卢珊等, 2020)。

另外, 采用线性倾向分析方法 (魏凤英, 2007) 分析区域平均极端降水量、降水频次、极端降水开始时间、结束时间的变化趋势。采用反距离权重插值法方法根据已知点位降水数据推算出周边其他位置的降水数据, 将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面, 从而得出空间分布特征 (栗泽苑等, 2021)。

2 南方极端降水的时空变化

2.1 极端降水量阈值的空间分布

图 2 为 1961—2020 年 60 a 中国南方夜间、白昼以及全天 95% 分位日极端降水阈值的空间分布。从图 2a 可见, 南方夜间极端降水阈值分布最小值位于

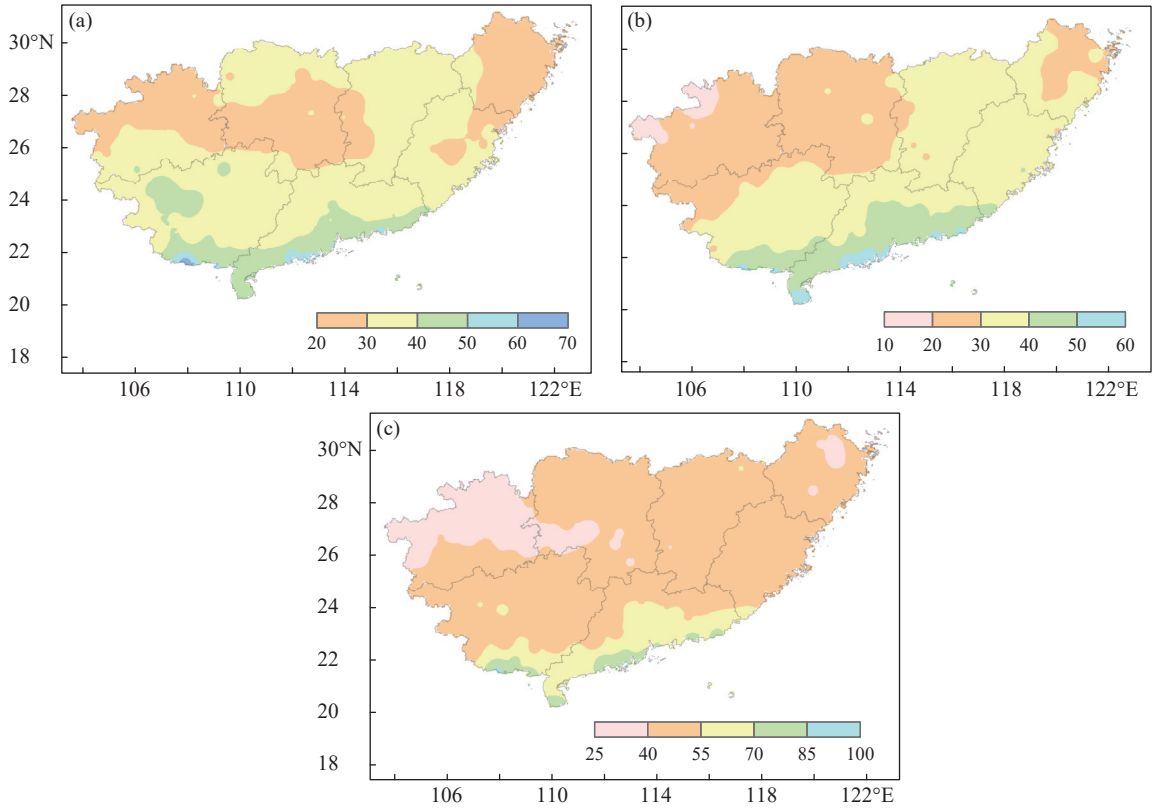


图 2 1961—2020 年中国南方夜间 (a)、白昼 (b) 和全天 (c) 极端降水阈值 (单位: mm·d^{-1}) 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of (a) nighttime, (b) daytime, and (a) all-day extreme precipitation thresholds (unit: mm·d^{-1}) over Southern China from 1961 to 2020

贵州北部、湖南南部、江西西部、浙江大部分地区及福建北部地区, 平均极端降水阈值为 33 mm·d^{-1}, 最小阈值为 21 mm·d^{-1}, 阈值分布最大位于广西、广东沿岸, 最大阈值为 63 mm·d^{-1}。从图 2b 可见, 白昼极端降水的阈值分布整体类似夜间极端降水阈值分布, 平均极端降水阈值为 32 mm·d^{-1}, 阈值分布最大位于贵州西北部地区, 最小阈值为 17 mm·d^{-1}, 最大阈值位于两广沿海地区, 高达 57 mm·d^{-1}。从图 2c 可见, 全天极端降水阈值分布整体呈从北向南递增趋势, 南北差异很大, 全天平均极端降水阈值为 48 mm·d^{-1}, 阈值分布最小位于贵州北部、湖南西部及浙江省北部地区, 最小阈值为 29 mm·d^{-1}, 最大阈值位于两广南部沿海, 高达 91 mm·d^{-1}。从上述中国南方昼夜 60 a 极端降水阈值空间分布可知, 夜间极端降水阈值要大于白昼的阈值, 表明夜间极端降水多于白昼。

2.2 极端降水量及其频次的时空变化特征

2.2.1 极端降水量和频次变化趋势的空间分布

图 3 为 1961—2020 年中国南方夜间、白昼及全天极端降水量、频次的 60 a 平均值和变化趋势的空间分布。从图 3a 可见, 就夜间年平均极端降水量而言, 高值区位于广西南部, 年平均极端降水量可达 488 mm 以上, 最大值位于广西东兴 (554 mm); 低值区位于贵州北部、湖南东部、江西南部、福建南部、浙江北部、广西东部及广东北部地区, 最小值是广东罗定 (155 mm)。中国南方夜间年极端降水量呈增加趋势的站点达 72% (149 个), 其中通过信度为 0.1 的

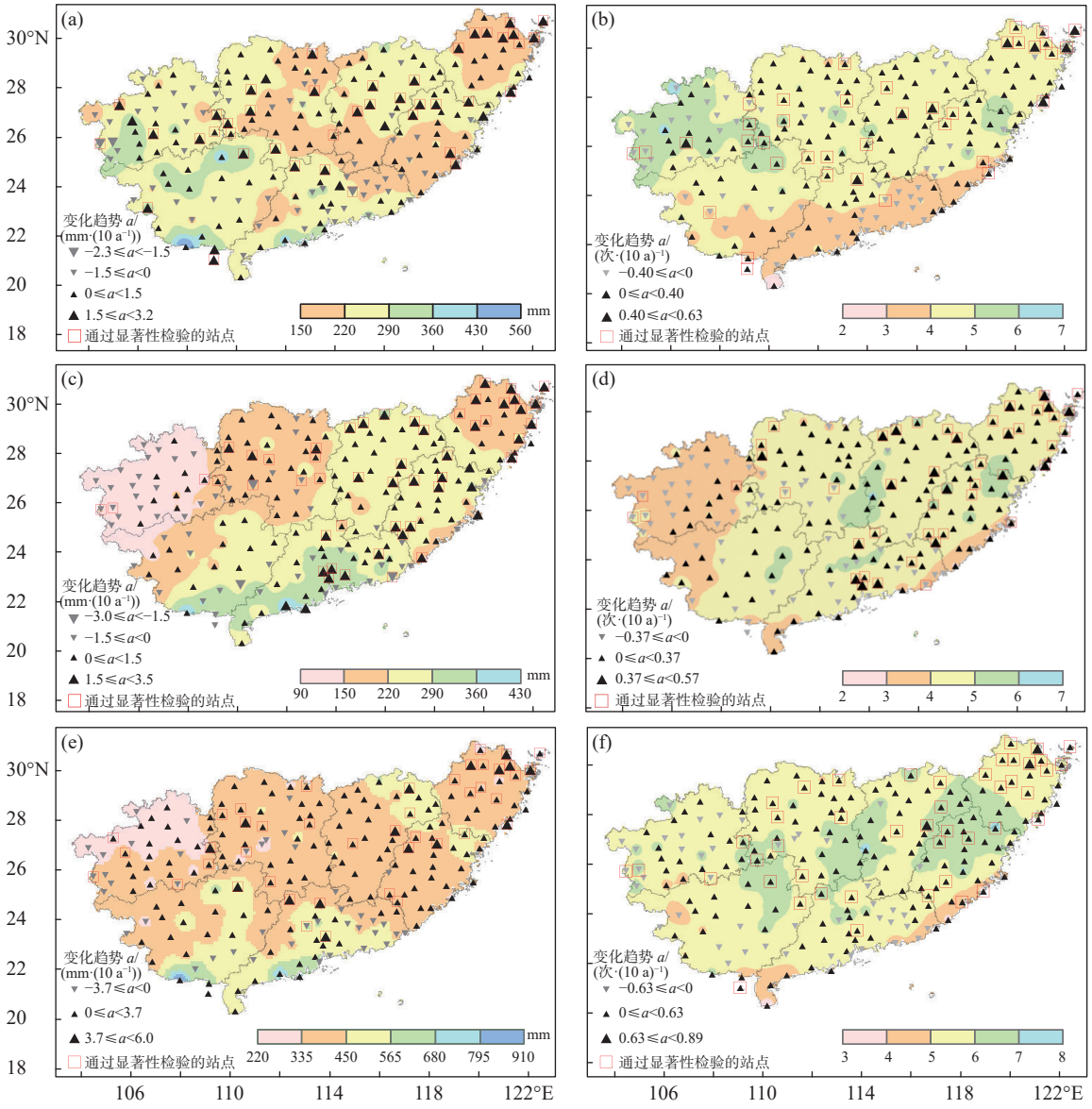


图 3 1961—2020 年中国南方夜间 (a, b)、白昼 (c, d)、全天 (e, f) 极端降水量 (a, c, e) 和频次 (b, d ,f) 的 60 a 平均值 (填色) 和变化趋势 *a*

Fig. 3 The 60-year average mean (shaded) and the trend *a* of (a, b) nighttime, (c, d) daytime, (e, f) all-day extreme (a, c, e) precipitation and (b, d ,f) frequency in Southern China during 1961-2020

显著性检验的站点有 19% (39 个), 最大增加趋势位于江西南城 (3.21 mm·a^{-1})。从图 3b 可见, 南方夜间年平均极端降水频次均大于 2 次, 其中贵州西部地区极端降水频次最多, 最大值是贵州织金 (年平均 7 次)。中国南方夜间年极端降水频次呈增加趋势的站点也达 73% (151 个), 其中通过信度为 0.1 的显著性检验的站点有 16% (33 个), 最大增加趋势位于江西南城 (0.63 次·(10 a^{-1}))。

从图 3c 可见, 南方白昼年平均极端降水量高值区位于两广南部, 年平均极端降水量超过 369 mm, 最大值位于广东阳江 (424 mm); 低值区位于贵州大部分及广西西北部地区, 最小值位于贵州威宁 (94 mm)。白昼的年极端降水量呈增加趋势的站点有 73% (151 个), 其中通过信度为 0.1 的显著性检验的站点有 22% (46 个), 主要位于湖南、江西、浙江、福建北部以及广东省南部地区。从图 3d 可见, 白昼年平均极端降水频次在所有站点均大于 2 次, 其中白昼年平均极端降水频次最多位于江西西部地区, 井冈山 (年平均 7 次) 发生极端降水频次最多。白昼年极端降水频次整体呈增加趋势的站点也超过 70% (147 个), 其中通过信度为 0.1 的显著性检验的站点有 20% (41 个), 最大趋势位于浙江杭州的临安 (0.57 次·(10 a^{-1}))。

从图 3e 可见, 南方全天年极端降水量高值区位于广西南部及广东西南部地区, 多数站点的年平均降水量超过 680 mm, 最大值位于广西东兴 (907 mm); 低值区位于贵州北部、湖南西南部及广西西部地区, 最小值位于贵州威宁 (222 mm)。从中国南方全天的 60 a 极端降水量变化趋势看, 呈增加趋势的站点有 80% (164 个), 其中通过信度为 0.1 的显著性检验的站点有 19% (39 个), 主要位于贵州南部、湖南西部、江西东北部、两广北部、福建北部以及浙江北部。从图 3f 可见, 就全天的年平均极端降水频次而言, 所有站点 60 a 平均频次均大于 3 次, 其中江西西部及福建北部极端降水频次最多, 江西井冈山 (年平均 8 次) 发生极端降水频次最多。全天年极端降水频次也有近 80% (164 个) 站点是增加趋势, 其中通过信度为 0.1 的显著性检验的站点有 20% (41 个), 最大增加趋势位于江西南城 (0.89 次·(10 a^{-1}))。

结合表 1 分析可知, 中国南方年平均极端降水量高值区在其偏南的两广地区, 夜间年平均极端降水量大于白昼平均极端降水量; 年平均极端降水频次高值区分布与极端降水量明显不同, 夜间极端降水频次高值区多位于南方的西北部, 全天极端降水频次及白昼极端降水频次高值区大多位于中国南方的中部和东部。对极端降水量和降水频次的变化趋势而言, 呈增加趋势的站点数均超过 70%, 昼夜呈增加趋势的站点数量相当, 但增加趋势的绝对值白昼明显大于夜间, 全天的极端降水量和频次均有近 80% 的站点呈增加趋势。可见在整个中国南方极端降水量和发生频次均有所增加, 表明中国南方的极端降水正趋于更加极端化。

表 1 中国南方 206 个站点夜间、白昼及全天极端降水量、频次增加和显著增加的站点占比

Table 1 Proportion of 206 stations with increasing nighttime, daytime, and all-day extreme precipitation and precipitation frequency in Southern China

时段	极端降水量		极端降水频次	
	P_1/%	P_2/%	F_1/%	F_2/%
夜间	72	19	73	16
白昼	73	22	71	20
全天	80	19	80	20

注: P_1、P_2分别表示极端降水量增加、显著增加的站点占比; F_1、F_2分别表示极端降水频次增加、显著增加的站点占比。显著增加表示通过信度为0.1的显著性检验。

2.2.2 极端降水量和频次的时间变化

图 4 为 1961—2020 中国南方 206 个站点平均的夜间、白昼及全天极端降水量和发生频次的年际变化。从图可见, 南方极端降水的年降水量和频次均呈增加趋势, 且降水量的增加趋势要比降水频次更明显, 均通过了信度为 0.05 的显著性检验。从图 4a 分析可知, 夜间极端降水频次增加的倾向率为 0.10 次·(10 a^{-1}), 2016 年极端降水频次最大, 可达 6.1 次, 夜间平均降水量增加倾向率为 6.2 mm·(10 a^{-1}), 2016 年最大, 可达 323 mm。从图 4b 分析可知, 白昼极端降水频次增加倾向率为 0.11 次·(10 a^{-1}), 2016 年极端降水频次最大, 为 5.9 次, 白昼降水量增加的倾向率为 6.9 mm·(10 a^{-1}), 也是 2016 年最大, 达 296 mm。从图 4c 分析可知, 全天极端降水频次增加倾向率为 0.16 次·(10 a^{-1}), 2015 年极端降水频次最大, 可达 7.5 次, 降水量增加率为 13.4 mm·(10 a^{-1}), 2016 年极端降水量最大, 为 543 mm 。结合表 2 分析可知, 中国南方全天及昼夜的极端降水量和发生频次均是显著增加趋势, 白昼的极端降水量和频次增加趋势略高于夜间, 但夜间的平均极端降水量比白昼多, 表明中国南方的极端降水正在趋于更加极端化。

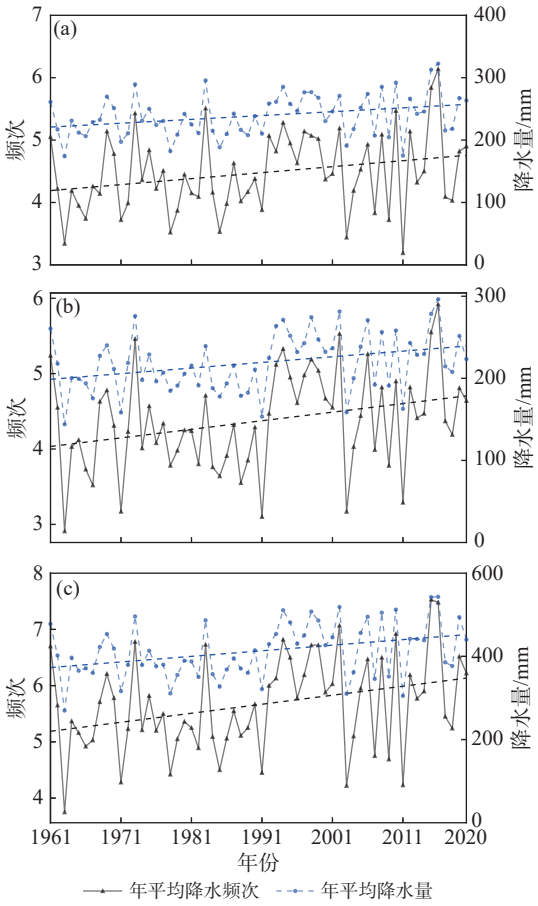


图 4 1961—2020 年中国南方 206 个站点平均的夜间 (a)、白昼 (b)、全天 (c) 极端降水量和频次的年际变化 (蓝色和黑色虚直线分别为降水量, 频次线性趋势)

Fig. 4 Interannual changes of (a) nighttime, (b) daytime, and (c) all-day precipitation and frequency of mean extreme precipitation for 206 stations in Southern China during 1961-2020 (The blue and black dashed lines represent the linear trends of precipitation and frequency, respectively)

表 2 中国南方夜间、白昼、全天极端降水量 (*P*) 和频次 (*F*) 的变化趋势

Table 2 Trends of nighttime, daytime, and all-day extreme precipitation (*P*) and frequency (*F*) in Southern China

时段	*P*/[mm·(10 a^{-1})]	*F*/[次·(10 a)$^{-1}$]
夜间	6.2*	0.10*
白昼	6.9*	0.11*
全天	13.4*	0.16*

注: *表示通过信度为0.05的显著性检验。

2.3 极端降水开始、结束时间的时空变化

2.3.1 极端降水开始、结束时间的空间分布

图 5 为极端降水夜间、白昼及全天的平均最早开始、最晚结束时间及其变化趋势空间分布。从图 5a 可见, 夜间极端降水开始最早出现于贵州东南部、湖南、江西南部、福建广东北部及广西东北部地区, 江西龙南最早, 在其年日序的第 87 d (3 月 28 日) 开始; 夜间极端降水开始最晚出现于广东西南部地区, 广东徐闻最晚, 在其年日序的第 200 d (7 月 19 日) 开始; 南方夜间极端降水开始时间呈提前趋势的站点为 67% (137 个), 通过信度为 0.1 的显著性检验的站点 21 个, 位于贵州东部、湖南南部、江西北部和南部、浙江南部及两广北部地区。从图 5b 可见, 夜间极端降水结束最早时间出现于江西北部地区, 江西玉山最早, 在其年日序的第 209 d (7 月 28 日) 结束; 夜间极端降水结束最晚出现于浙江东北部, 大陈岛最晚, 在其年日序的第 278 d (10 月 5 日) 结束; 夜间极端降水结束时间呈延后趋势的站点为 60% (123 个), 通过信度为 0.1 的显著性检验的站点 16 个, 延后趋势的区域位于贵州、湖南南部及江西、福建北部地区。

从图 5c 可见, 白昼极端降水开始最早时间出现于湖南、江西、广西东北部、广东北部、浙江西南部及福建西部地区, 福建泰宁最早, 其年日序的第 101 d (4 月 21 日) 开始; 白昼极端降水开始最晚时间位于贵州西部、浙江东北部、广东西南部及广西西北部和南部地区, 贵州威宁最晚, 其年日序的第 174 d (6 月 23 日) 开始; 南方白昼极端降水开始时间呈提前趋势的站点有 66% (135 个), 通过信度为 0.1 的显著性检验的站点 25 个, 主要在贵州东部、湖南、两广、浙江北部及江西、福建西部地区。从图 5d 可见, 白昼极端降水结束最早出现于贵州西部和北部、广西东部、广东中部及湖南、江西、福建北部地区, 广西梧州最早, 在其年日序的第 218 d (8 月 6 日) 结束; 白昼极端降水结束最晚出现于浙江东北部, 大陈岛最晚, 在其年日序的第 272 d (9 月 29 日) 结束; 白昼极端降水结束时间呈延后趋势的站点有 63% (129 个), 通过信度为 0.1 的显著性检验的站点 30 个, 延后趋势的区域位于湖南北部、江西东北部、福建北部及两广西部地区。

从图 5e 可见, 全天极端降水开始最早时间出现于广西东北部、广东北部、福建西部及湖南、江西南部地区, 广东南雄最早, 为年日序的第 85 d (3 月 26 日) 开始; 贵州西部、广东西南部地区的开始时间最晚, 广东徐闻最晚, 在其年日序的第 178 d (6 月 27 日)。南方极端降水开始时间呈提前趋势的站点有 68% (140 个), 其中通过信度为 0.1 的显著性检验的站点有 35 个; 主要在贵州东部、湖南北部、江西东部和南部、浙江北部和南部、福建西部及两广北部地区。从图 5f 可见, 全天极端降水结束最早时间出现于贵州南部、浙江西部、及湖南、江西、福建北部地区, 江西景德镇最早, 其年日序的第 225 d (8 月 13 日) 结束; 全天极端降水结束最晚时间出现于浙江东部, 浙江东部沿海石浦最晚, 其年日序的第 284 d (10 月 11 日) 结束。全天极端降水结束时间呈延后

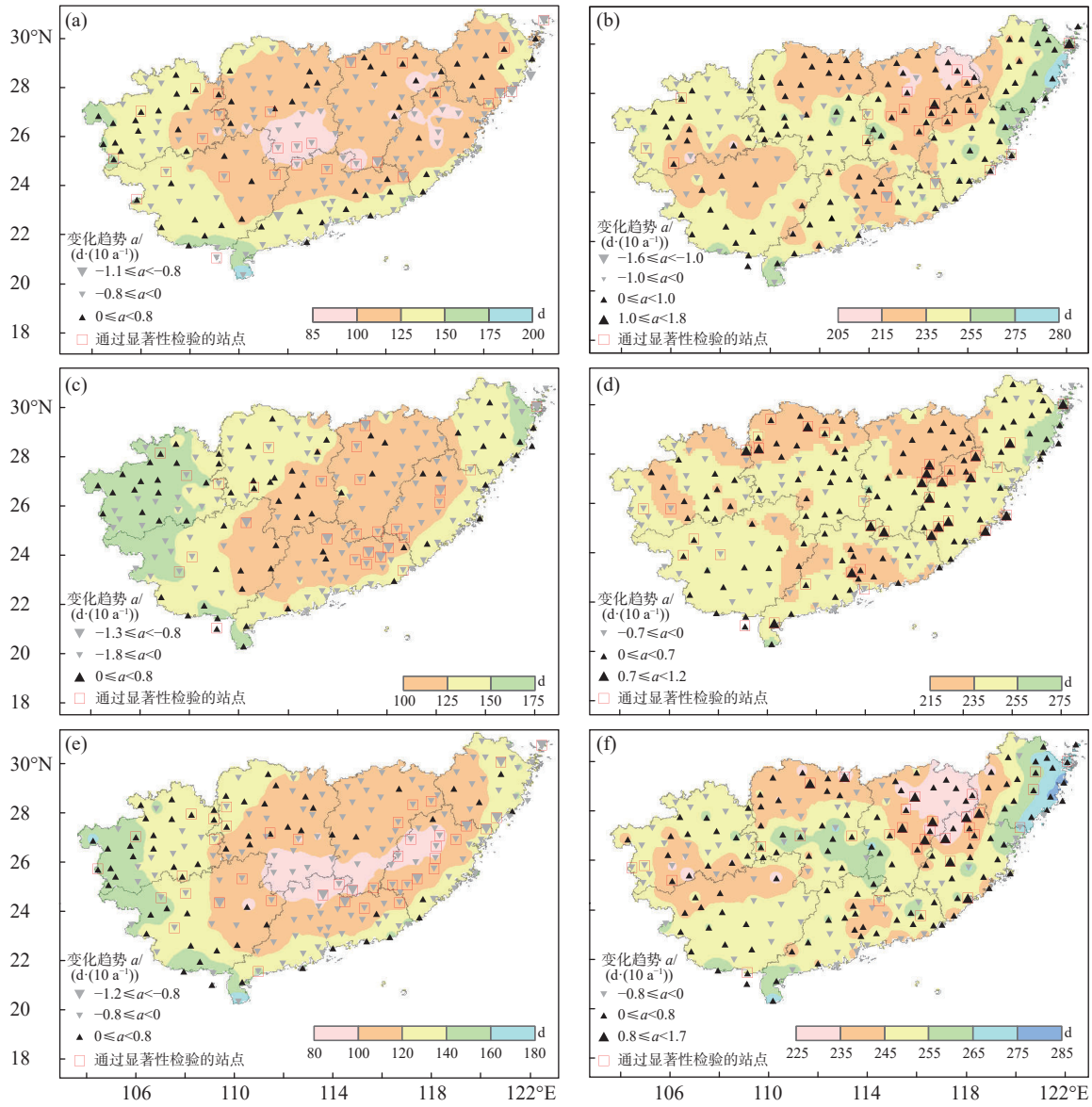


图 5 1961—2020 年中国南方夜间 (a, b)、白昼 (c, d)、全天 (e, f) 极端降水开始 (a, c, e) 和结束时间 (b, d ,f) 的 60 a 平均年日序 (填色, 将降水日期转为年日序数, 以 1 月 1 日为第 1 d, 1 月 2 日为第 2 d, 依此类推, 12 月 31 日为第 365 d, 依据实际观测数据得到各站点降水资料日序数的时间序列) 和变化趋势 *a*

Fig. 5 The 60-year average annual order (Shaded, the precipitation date is converted into a chronological order. January 1st is the first day, January 2nd isthe second day, and so on. December 31st is the 365th day. Based on actual observation data, the time series of the chronological order of precipitation data at each station are obtained) and the trend *a* of (a, c, e) onset and (b, d ,f) end of (a, b) nighttime, (c, d) daytime, (e, f) all-day extreme in Southern China during 1961-2020

趋势的站点有 67% (137 个), 通过信度为 0.1 的显著性检验的站点有 27 个, 结束时间延后的区域主要位于湖南、福建、浙江北部及江西中部地区。

分析表 3 可知中国南方白昼、夜间及全天极端降水最早开始时间有超过 67% 的站点呈提前趋势, 昼夜及全天极端降水最晚结束时间有超过 60% 的站点呈延后趋势, 表明极端降水发生的时间段在不断的延长。中国南方中部地区开始时间最早, 广东西南部、广西贵州西部开始时间最晚。江西北部结束最早, 浙江东部结束最晚。

2.3.2 极端降水开始、结束时间的时间变化

图 6 为 1961—2020 中国南方平均的夜间、白昼和全天极端降水开始时间、结束时间的年际变化曲线。可见夜间和白昼极端降水平均开始时间也均呈提前趋势, 提前的倾向率分别为 −1.4 d·(10 a)$^{-1}$ 和 −1.6 d·(10 a)$^{-1}$, 均是平均每 10 a 提前了 1.5 d 左右, 白天通过了信度为 0.1 的显著性检验 (图 6a、c)。夜间和白天极端降水平均结束时间均是延后趋势, 延后的倾向率分别为 0.7 d·(10 a)$^{-1}$ 和 1.4 d·(10 a)$^{-1}$, 均未通过信度为 0.1 的显著性检验 (图 6b、d)。全天极端

表 3 中国南方极端降水夜间、白昼、全天开始时间提前和显著提前、结束时间延后和显著延后的站点占比

Table 3 Proportion of stations in Southern China where the onset time of nighttime, daytime and all-day extreme precipitation advances, the end time delays

时段	开始时间		结束时间	
	E_1/%	E_2/%	L_1/%	L_2/%
夜间	67	10	60	8
白昼	66	12	63	15
全天	68	17	67	13

注: E_1、E_2 分别表示极端降水开始时间提前、显著提前的站点占比; L_1、L_2 分别表示极端降水结束时间延后、显著延后的站点占比。

降水的平均开始时间在 60 a 来呈提前趋势, 其提前倾向率为−2.0 d·(10 a)$^{-1}$, 即平均每 10 a 提前 2 d, 并通过信度为 0.1 的显著性检验 (图 6e); 全天极端降水结束时间为延后趋势, 倾向率为 1.8 d·(10 a)$^{-1}$, 平均每 10 a 延后 2 d, 但未通过信度为 0.1 的显著性检验 (图 6f)。

分析 (表 4) 可知, 中国南方全天极端降水开始时间提前和结束时间延后的变化趋势均非常明显, 夜间和白昼的极端降水开始时间提前的趋势相当, 结束时间延后的趋势则是白昼比夜间更明显; 总体上, 无论是夜间和白昼的极端降水, 还是全天的极端降水, 其从开始到结束的持续时间均有延长的趋势。

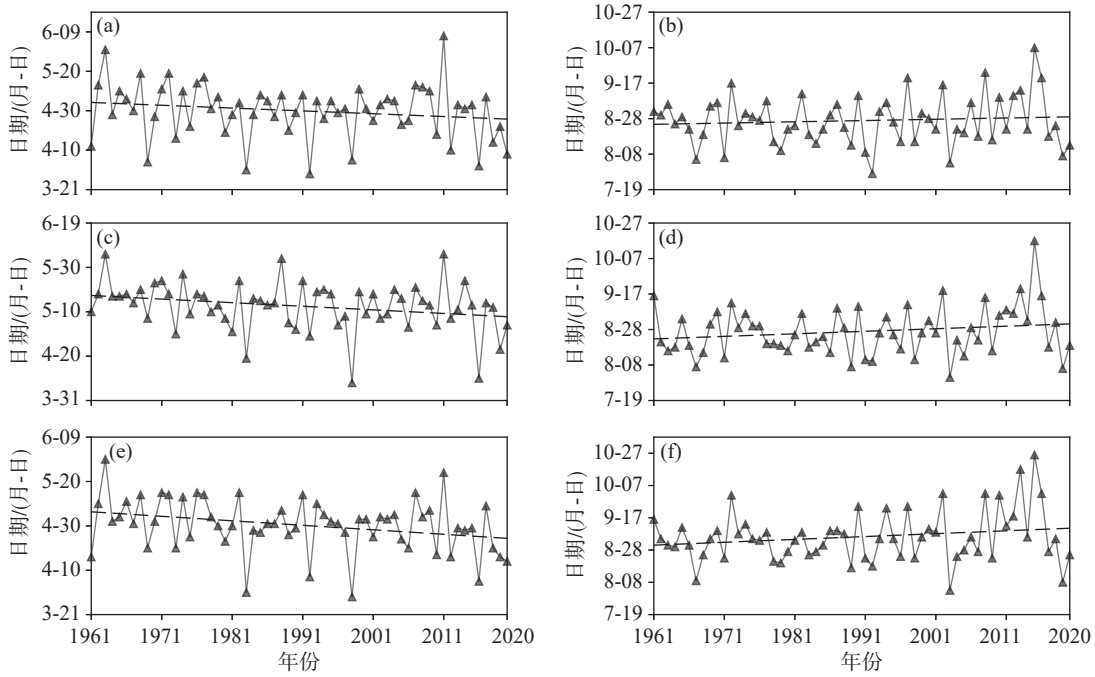


图 6 1961—2020 年中国南方 206 个站点平均的夜间 (a, b)、白昼 (c, d)、全天 (e, f) 极端降水开始 (a, c, e) 和结束时间 (b, d ,f) 的年际变化 (黑色虚直线为开始时间、结束时间线性趋势)

Fig. 6 Interannual changes of (a, c, e) onset and (b, d ,f) end of (a, b) nighttime, (c, d) daytime, (e, f) all-day extreme precipitation of 206 stations in Southern China during 1961-2020 (The black dashed line is the linear trend of onset time, end time)

表 4 中国南方极端降水夜间、白昼及全天开始时间、结束时间的年变化趋势 (单位: d·(10 a)$^{-1}$)

Table 4 Annual trend of onset and end time of nighttime, daytime, and all-day extreme precipitation in Southern China (unit: d·(10 a)$^{-1}$)

时段	开始时间趋势	结束时间趋势
夜间	−1.4	0.7
白昼	−1.6*	1.4
全天	−2.0*	1.8

注: *表示通过信度为0.05的显著性检验。

3 结论和讨论

本文使用国家气象科学数据中心提供的 1961—2020 年湖南、江西、浙江、贵州、广西、广东、福建中国南方七省 (区) 206 个气象观测站点逐日降水资料, 分析了南方夜间、白昼及全天极端降水量、极端降水频次、极端降水开始和结束时间的时空变化特征。得出以下主要结论:

(1) 中国南方极端降水夜间、白昼、全天阈值整体呈从北向南递增趋势, 南北差异很大; 贵州北部、湖南南部, 江西西部和浙江东北部最小, 华南沿海地区最大; 夜间极端降水阈值要大于白昼的阈值, 表明夜间极端降水量大于白天。

(2) 中国南方极端降水量及其发生频次整体的长期变化均呈显著增加趋势, 通过信度为 0.1 的显著性检验的站点占比约为 20%。其中昼、夜极端降水量和频次整体的长期变化增加趋势的站点基本相当,

均超过 70%, 通过信度为 0.1 的显著性检验的站点占比为 19%, 但白昼的平均极端降水量比夜间多, 表明白昼的极端降水强度比夜间更强。而全天的极端降水量和频次整体的长期变化增加趋势的站点占比则高达 80%, 通过信度为 0.1 的显著性检验的站点占比为 20%。

(3) 中国南方极端降水的空间分布不均匀, 并且有昼夜差异, 表现为年平均极端降水量高值区在两广的偏南地区, 夜间年平均极端降水量大于白昼年平均极端降水量; 年平均极端降水频次大值区分布与极端降水量明显不同, 夜间极端降水频次高值区多位于南方的西北部, 全天和白昼极端降水频次大值区大多位于中国南方的中部和东部。

(4) 中国南方极端降水开始时间提前和结束时间延后的变化趋势均非常明显, 极端降水发生的时间段在不断的延长。其中昼、夜极端降水开始时间提前趋势的站点均达 67%, 其中通过显著性检验的站点占比为 11%, 结束时间延后趋势的站点稍少, 但均超过 60%, 其中通过显著性检验的站点占比为 12%; 全天极端降水开始时间提前和结束时间延后趋势的站点也均超过 67%, 其中通过显著性检验的站点占比为 15%, 总体是开始时间平均每 10 a 提前 2 d、结束时间平均每 10 a 延后近 2 d。南方中部地区极端降水开始时间最早, 广东西南部、广西贵州西部开始时间最晚; 江西北部极端降水结束时间最早, 浙江东部最晚。

本文分析的中国南方区域主要是针对我国东部偏南的华南和江南两个雨带的区域, 其雨季非常长, 极端降水的成因和机制也非常复杂, Tao 和 Chen (1987) 研究表明西太平洋副高、南亚高压、欧亚中高纬阻塞和切断、东亚副热带西风急流等均是影响中国南方降水的环流系统, 这两个区域的降水也受南海季风和东亚副热带季风系统的共同影响。但本文仅对这两个区域 60 a 极端降水量、极端降水频次和极端降水开始、结束时间等变化特征进行了分析和阐述。文中结论表明两个区域极端降水量增加, 总体开始时间平均每 10 a 提前 2 d、结束时间平均每 10 a 延后近 2 d。就极端降水发生时间而言, 60 a 来延长了近一个月 (约 24 d), 这是气候变暖的结果, 或是环流异常变化的结果, 值得进一步关注和研究。

参考文献 (References):

蔡芗宁,马杰,刘晓波,等.2024.气候变化对延伸期预报的影响[J].沙漠与绿洲气象,18(1):12−19. Cai X N, Ma J, Liu X B, et al. 2024. Impact of climate change on extended range forecast [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):12−19 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.002

陈海山,范苏丹,张新华.2009.中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异[J].大气科学学报,32(6):744−751. Chen H S, Fan S D, Zhang X H. 2009. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 years [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,32(6):744−751 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2009.06.005

邓海军,郭斌,曹永强,等.2020. 1961—2016 年中国昼夜降水变化的时空格局[J].地理研究,39(10):2415−2426. Deng H J, Guo B, Cao Y Q, et al. 2020. Spatial and temporal patterns of daytime and night time precipitation in China during 1961-2016 [J]. Geographical Research, 39(10):2415−2426 (in Chinese). doi:10.11821/dlyj020200100

丁一汇.2003.气候变暖: 我们面临的灾害和问题[J].中国减灾,2003(2):20−26. Ding Y H. 2003. The disasters and problems we face with climate warming [J]. Disaster Reduction in China,2003(2):20−26 (in Chinese).

甘文强, 李刚, 万雪丽.2018.近 57 a 5—9 月贵州极端强降水变化特征[J].干旱气象,36(4):617−623. Gan W Q, Li G, Wan X L. 2018. Variation characteristics of extreme precipitation during May-September in Cuizhou Province in recent 57 years [J]. Journal of Arid Meteorology,36(4):617−623 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2018) −04 −0617

李晓惠,冯璐,叶朗明,等.2024.华南前汛期强降水过程雨滴谱特征研究[J].暴雨灾害,43(6):637−647. Li X H, Feng L, Ye L M, et al. 2024. Research on raindrop size distributions of strong precipitation events during the South China pre-flood season [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):637−647 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−075

李勇,梅双丽,周宁芳.2024. 1961—2020 年西北地区夏季降水趋势变化特征[J].沙漠与绿洲气象,18(1):74−80. Li Y, Mei S L, Zhou N F. 2024. Variation characteristics of summer precipitation in northwest China from 1961 to 2020 [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):74−80 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.009

栗泽苑,杨雷峰,华道柱,等.2021. 2013—2018 年中国近地面臭氧浓度空间分布特征及其与气象因子的关系[J].环境科学研究,34(9):2094−2104. Li Z Y, Yang X F, Hua D Z, et al. 2021. Spatial pattern of surface ozone variables in China during 2013-2018 and its relationship with meteorological [J]. Research of Environmental Sciences, 34(9):2094−2104 (in Chinese). doi:10.13198/j.issn.1001−6929.2021.06.16

梁驹,梁骏,雍阳阳.2017.广西极端降水事件气候态及其对 ENSO 的潜在响应[J].气候变化研究进展,13(2):117−127. Liang J, Liang J, Yong Y Y. 2017. Climatology of the extreme precipitation events over Guangxi Province and its potential responses to ENSO [J]. Climate Change Research,13(2):117−127 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673−1719.2016.109

刘义花,马元仓,杨延华,等.2020. 1961—2018 年青海高原昼夜雨量时空变化特征分析[J].冰川冻土,42(3):996−1006. Liu Y H, Ma Y C, Yang Y H, et al. 2020. Research of the spatio-temporal variation characteristics of daytime and nighttime precipitation the Qinghai Plateau from 1961 to 2018 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,42(3):996−1006 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0240.2020.0072

卢珊,胡泽勇,王百朋,等.2020.近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局[J].高原气象,39(4):683−693. Lu S, Hu Z Y, Wang B P, et al.

2020. Spatio-temporal patterns of extreme precipitation events over China in recent 56 Years [J]. Plateau Meteorology,39(4):683−693 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00058

马锋敏,章毅之,唐传师,等.2013.近 52 年江西省汛期极端降水事件的时空变化[J].长江流域资源与环境,22(10):1348−1355. Ma F M, Zhang Y Z, Tang C S, et al. 2013. Temporal and spatial variations of extreme precipitation events in flood season of Jiangxi in recent 52 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,22(10): 1348−1355 (in Chinese)

王胜,谢五三,唐为安,等.2011. 1961—2009 年淮河流域昼夜降水变化特征[J].生态学杂志,30(12):2881−2887. Wang S, Xie W S, Tang W A, et al. 2011. Change characteristics of day and night precipitation in Huaihe River Basin in 1961-2009 [J]. Chinese Journal of Ecology, 30(12):2881−2887 (in Chinese). doi:10.13292/j.1000−4890.2011.0440

魏凤英.2007.现代气候统计诊断与预测技术 (第二版) [M]. 北京:气象出版社. Wei F Y. 2007. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology (2nd ed.) [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

袁宇锋,翟盘茂.2022.全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知[J].大气科学学报,45(2):161−166. Yuan Y F, Zhai P M. 2022. Latest understanding of extreme weather and climate events under global warming and urbanization influences [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,45(2):161−166 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211011001

曾波,王钦,伍清.2018.近 56 年四川地区不同季节昼夜降水特征分析[J]. 高原山地气象研究,38(3):7−16. Zeng B, Wang Q, Wu Q. 2018. Analysis of precipitation characteristics in different seasons in the nighttime and daytime in Sichuan in the past 56 years [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,38(3):7−16 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2018.03.002

曾颖婷,李成,黄新洲,等.2023.近 60 年福建省极端降水的时空变化特征[J]. 水土保持研究,30(3):203−210. Zeng Y T, Li C, Huang X Z, et al. 2023. Spatial and temporal characteristics of extreme precipitation in Fujian Province in the last 60 years [J]. Research of Soil and Water Conservation,30(3):203−210 (in Chinese). doi:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.034

翟盘茂,刘静.2012.气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学,14(9):55−63,84. Zhai P M, Liu J. 2012. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background [J]. Strategic Strategic Study of CAE, 14(9):55−63,84 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009−1742.2012.09.009

郑祚芳,王在文,高华.2013.北京地区夏季极端降水变化特征及城市化的影响[J].气象,39(12):1635−1641. Zheng Z F, Wang Z W, Gao H. 2013. Characteristics of extreme precipitation events in summer and its effect on urbanization in Beijing area [J]. Meteorological Monthly, 39(12):1635−1641 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.12.012

周莉,胡瑞卿,李伟等.2018.湖南省夏季极端降水异常时空特征及其成因分析[J].气象科学,38(6):838−848. Zhou L, Hu R Q, Li W, et al. 2018. Characteristics of summer extreme precipitation anomaly and the cause of concurrent anomaly pattern in Hunan Province [J]. Journal of the Meteorological Sciences,38(6):838−848 (in Chinese). doi:10.3969/2018jms.0062

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research,111:D05109. doi:10.1029/2005JD006290

Groisman P Y, Knight R W, Easterling D R, et al. 2005. Trends in intense precipitation in the climate record [J]. Journal of Climate,18(9): 1326−1350. doi:10.1175/JCLI3339.1

Hyndman R J, Fan Y N. 1996. Sample quantiles in statistical packages [J]. American Statistician,50(4):361−365. doi:10.1080/00031305.1996104735 66

IPCC. 2021. Climate change 2021: The physical science basis [R]. [2021-08-06]. https://www.ipcc. ch/report/ar6/wgl/#FullReport

Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [J]. Monsoon Meterology,1987:60−92

Wu L, Hu F, Xie L. 2020. Characteristics of extreme precipitation in South China during April–July for early rice season [J]. Journal of Earth System Science,129(1):1−10. doi:10.1007/s12040−019−1281−8

Zhao L L, Li L S, Li Y B, et al. 2023. Global extreme precipitation characteristics: the perspective of climate and large river basins [J]. Climate Dynamics,62(2):1013−1030. doi:10.1007/s00382−023−06961

(责任编辑　唐永兰)