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

1980—2020年4—9月湘赣浙闽地区日极端降水分布特征研究

周芳 王东海 汪如良

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

ZHOU Fang，WANG Donghai，WANG Ruliang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-097

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

汉江流域极端面雨量时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of extreme area rainfall in Hanjiang River basin

暴雨灾害. 2020, 39(5): 516-523 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.010

沁河流域暖季极端小时降水时空特征分析

Analysis of temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation during the warm season in the Qinhe River Basin

暴雨灾害. 2025, 44(3): 352-360 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-088

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

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

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

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

周芳,王东海,汪如良.2025.1980—2020 年 4—9 月湘赣浙闽地区日极端降水分布特征研究[J].暴雨灾害,44(5):676−687. ZHOU Fang, WANG Donghai, WANG Ruliang. 2025. Study on the distribution characteristics of daily extreme precipitation in Hunan, Jiangxi, Zhejiang and Fujian province from April to September 1980-2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):676−687 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−097

1980—2020 年 4—9 月湘赣浙闽地区日极端降水分布特征研究

周芳[1, 2], 王东海[3, 4], 汪如良[1, 2]

(1. 江西省气象台, 南昌 330096; 2. 气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室, 南昌 330046; 3. 中山大学大气科学学院/南方海洋科学与工程广东省实验室 (珠海)/广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室/热带大气海洋系统科学教育部重点实验室, 珠海 519082; 4. 澳门海岸带生态环境国家野外科学观测研究站/澳门环境研究院/澳门科技大学创新工程学院, 澳门 999078)

摘　要: 为揭示湘赣浙闽复杂地形下极端降水分布特征, 提升该区域灾害预警能力, 基于湘赣浙闽地区 1980—2020 年 4—9 月国家气象观测站、2016—2020 年 4—9 月区域气象观测站逐日降水与 ERA5 再分析资料, 采用百分位法确定日极端降水阈值, 并分析了日极端降水的阈值、强度、频次及其对总降水贡献率的时空分布特征, 最后根据已发表成果讨论了日极端降水分布特征和地质、次生灾害分布的关系。结果表明: (1) 湘赣浙闽地区日极端降水的阈值与强度大值区集中于福建东部沿海、鄱阳湖平原及湘西丘陵, 低值区位于湘中盆地与浙闽丘陵北部; 6 月强度达峰值, 4 月最弱。(2) 湘赣浙闽地区日极端降水频次呈东南多、西北少, 山区显著高于平原; 日极端降水对总降水贡献率空间分布福建东北沿海最高 (>35%), 南岭地区最低 (<20%); 月变化显示, 5—6 月湘西丘陵与武夷山区贡献率最高, 超过 40%, 8—9 月贡献率高值区位于浙闽沿海。

关键词: 日极端降水; 时空分布; 地形; 次生灾害; 湘赣浙闽地区

中图法分类号: P426.6　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−097

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

ZHOU Fang[1, 2], WANG Donghai[3, 4], WANG Ruliang[1, 2]

(1. *Jiangxi Meteorological Obsercatory*, *Nanchang* 330096; 2. *Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention of Jiangxi Province*, *Nanchang* 330096; 3. *School of Atmospheric Sciences*, *Sun Yat-Sen University/Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory* (*Zhuhai*)/*Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies/Key Laboratory of Tropical Atmosphere–Ocean System*, *Ministry of Education*, *Zhuhai* 519082; 4. *National Observation and Research Station of Coastal Ecological Environments in Macao/Macao Environmental Research Institute/Facuty of Innovation Engineering*, *Macau University of Science and Technology*, *Macao* 999078)

Abstract: To investigate the distribution characters of the extreme precipitation, enhance regional disaster warning capabilities in Hunan, Jiangxi, Zhejiang, and Fujian provinces of south China with complex terrains, this study identify the daily extreme precipitation thresholds by percentile methods, and analyzed the spatiotemporal variations of the daily extreme precipitation thresholds, intensity, frequency, and the contribution to the total precipitation based on the ERA5 reanalysis and precipitation data from national meteorological stations in

收稿日期: 2024−05−11; **定稿日期**: 2025−04−29

资助项目: 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目 (20223BBG71019); 南昌国家气候观象台专项 (JX2023M13); 中国气象局气象能力提升联合专项 (23NLTSZ004); 江西省地质灾害防治项目 (B360000030004); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2025J027); 佛山市社会领域科技攻关专项项目 (2120001008761); 广东省基础与应用基础研究重大项目 (2020B0301030004); 澳门特别行政区科技发展基金项目资助 (001/2022/NIF); 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室项目 (2020B1212060025、2023B1212060019)

第一作者: 周芳, 主要从事天气预报、灾害天气特征和机理研究。E-mail: 315980443@qq.com

通信作者: 王东海, 主要从事灾害天气机理、中小尺度动力学研究和数值模式开发。E-mail: wangdh7@mail.sysu.edu.cn

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

April to September from 1980 to 2020 and regional meteorological stations in April to September from 2016 to 2020 in the region of Hunan, Jiangxi, Zhejiang, and Fujian provinces. Finally, the relationship between the characteristics of daily extreme precipitation distribution and the distribution of geological and secondary disasters was discussed based on the published results. The results are as follows. (1) The daily extreme precipitation occurs mostly in eastern Fujian coastal areas, Poyang Lake Plain, and western Hunan hills, while light rains occur often in central Hunan Basin and northern Zhejiang-Fujian hills. Intensity peaks occur in June, with April showing the weakest intensity. (2) The daily extreme precipitation occurs more frequently in southeastern regions dominated by mountains than over plains in northwestern areas. The contribution of extreme precipitation to total precipitation show maximum (>35%) in northeastern Fujian coastal areas and minimum (<20%) in Nanling region. In June-July extreme precipitation contributes most to total precipitation in western Hunan hills and Wuyi Mountain Range (over 40%), while in August-September, extreme precipitation dominates along Zhejiang-Fujian coast.

Key words: daily extreme precipitation; spatial and temporal distribution; terrain; secondary disaster; Hunan, Jiangxi, Zhejiang and Fujian regions

引　言

极端降水是指某一区域在统计分布上不经常或者极少发生的强降水, 相应的降水量在某一时间段内显著偏离历史气候平均状态 (高涛和谢立安, 2014)。近年来, 在全球变暖的背景下, 极端降水多发、重发, 引发洪涝灾害、城市内涝、山洪及地质灾害等次生灾害, 对经济、社会、生态环境、生命财产安全等诸多方面造成了巨大的影响 (张峻和张艺玄, 2019; 赵林等, 2025)。

极端降水主要受异常的大气环流、不同类型的天气系统和复杂的下垫面共同影响产生。其中山脉的走向、大型湖泊、地形中尺度环流、海陆风环流等, 对极端降水的影响很大。太行山脉以东的河北中部、北京西部等地, 在低层偏东气流影响下, 常会造成极端降水 (杨晓亮等, 2024; 田付友等, 2021)。天津、山东和广东等地沿海地区, 则受海风锋影响, 常造成暖湿气流的强迫抬升, 从而形成极端降水 (易笑园等, 2024; 刘解明等, 2025)。太湖、洞庭湖、鄱阳湖等大型湖泊附近, 常常在湖陆风环流影响下, 形成极端降水 (胡燕等, 2024; Zou et al, 2020)。以上研究表明复杂地形对极端降水的分布作用显著。

湘赣浙闽地区(湖南、江西、浙江、福建四省)位于中国东部, 长江以南、南岭以北, 地形地貌复杂, 山脉纵横交错, 湖泊河流密布, 水资源丰富、生态良好, 对我国粮食安全、水资源储备、经济发展具有举足轻重的作用, 也是气候系统和生态变化的敏感区 (Chen et al., 2019; 安敏等, 2024)。每年 4—9 月受到热带季风、副热带季风的共同影响, 该区域降水持续时间长、对流性强、短时雨强大, 极端降水频发 (Li and Chen, 2021; Chen et al., 2021; 周芳, 2023), 因此, 开展该地区极端降水的研究有助于提升强降水防灾预警能力。

近年来, 针对中国极端降水时空分布特征的系统性研究主要集中在华东、华南和华北部分地区 (Hong et al., 2022; 丁敏等, 2024; 蒋亚平等, 2025), 湘赣浙闽地区极端降水的研究仍然不足, 主要表现为以下几个方面。一是缺乏整体性研究。湖南、江西、浙江、福建四省地理上相邻, 极端降水具有多发性和同时性 (胡思, 2020; 郭丽芳等, 2025), 但实际研究中常常被分到长江中下游、华南、华东等不同的区域中 (黄丹丹等, 2024), 且浙江、福建未见全省极端降水空间分布特征的研究。二是缺乏统一的降水阈值标准和时间范围的研究。如黄丹丹等 (2024) 采用第 95 百分位作为日极端降水阈值, 分析了浙江沿海地区 1971—2020 年日极端降水的空间分布特征。而陈红专 (2021)、蔡义勇等 (2019) 则采用第 99 百分位作为日极端降水阈值, 分别分析了 1981—2018 年湖南省、1979—2018 年福建省台风造成的日极端降水的空间分布特征。因此亟需开展统一标准、统一时空范围的研究。三是尚未见到该区域极端降水的分布与地形关系的研究。湘赣浙闽地区位于中国东部, 从大地形的角度, 是海洋和中国西部高原地形的过渡地带, 从小地形角度, 四省的地质状况复杂, 山脉众多, 加上两湖地区, 地形对降水分布影响较大。南北向山脉分别有雪峰山、罗霄山、武夷山, 东西向山脉分别有武陵山、幕阜山、九岭山、怀玉山等 (图 1b), 不同走向的山脉地形对暖湿气流的强迫抬升、地形辐合作用不同 (付超等, 2021)。而两湖地区中尺度地形、湖陆风环流以及湖陆温度差异能够对天气尺度和中尺度系统产生直接影响, 从而影响降水的分布 (Zou et al., 2020)。但目前的研究多是一个省份或者小范围区域地形的相关研究, 缺乏将湘赣浙闽地区复杂地形作为一个整体而开展的极端降水分布特征的研究。四是缺乏极端降水和地形对次生灾害的影响分析。湘赣浙闽地区地形复杂, 有多处地质脆弱区, 也是山洪、地质灾害等次生灾害的高发区 (涂勇

等, 2020)。极端降水是导致次生灾害发生的主要原因之一, 目前也缺少极端降水与次生灾害的分布特征的研究。

基于上述不足, 本文利用湘赣浙闽地区 1980—2020 年 4—9 月国家地面气象观测站 (以下简称国家站)、2016—2020 年 4—9 月区域地面气象观测站 (以下简称区域站) 日降水观测及 ERA5 再分析资料, 采用百分位法结合业务标准确定日极端降水阈值, 分析复杂地形下日极端降水量、降水频次、降水强度、日极端降水对总降水贡献率的时空分布特征, 并依据已发表研究成果讨论了日极端降水分布特征和不同类型地质、次生灾害分布的对应关系。研究可为提高湘赣浙闽地区复杂地形的极端降水预报水平、应对地区极端降水灾害提供重要参考, 也有利于改进暴雨洪涝风险评估模型, 制定差异化的防灾减灾策略。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文所采用的日降水观测资料来源于国家气象信息中心提供的国家级地面气象观测站基本气象要素日值数据集 (V3.0), 用于分析极端降水与地形的空间分布关系。该套数据集经过数字化资源整合与核查、质量控制等过程形成。本文所使用的数据都是标识为数据正确的 08 时 (北京时, 下同) 到次日 08 时日降水资料。鉴于各地面气象站建站时间不一致, 为了保证历史观测资料的长度相同, 且尽可能充分, 本文最终选取湘赣浙闽地区 1980—2020 年 4—9 月缺测率低于 1% 的站点数据, 总共 314 个站点的逐日降水数据作为日降水观测资料 (图 1a)。另外, 由于国家站站点稀疏, 难以捕捉复杂下垫面的极端降水情况, 为了验证国家站数据的空间分布特征、反映极端降水与复杂地形的关系, 又选取了国家气象信息中心提供的 2016—2020 年 4—9 月湘赣浙闽地区缺测率低于 1% 的 8 544 个区域站降水数据, 计算总体的极端降水阈值、强度和频次分布特征, 其站点分布见图 1a。图 1b 展示湘赣浙闽地区的复杂地形分布。

另外, 本文使用欧洲中期天气预报中心提供的 1980—2020 年 4—9 月第五代再分析资料 (ERA5) 月平均资料, 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 物理量为位势高度, 气压层数据选取 500 hPa, 用于计算副热带高压 (以下简称副高) 的相关参数, 分析副高位置与极端降水分布的关系。

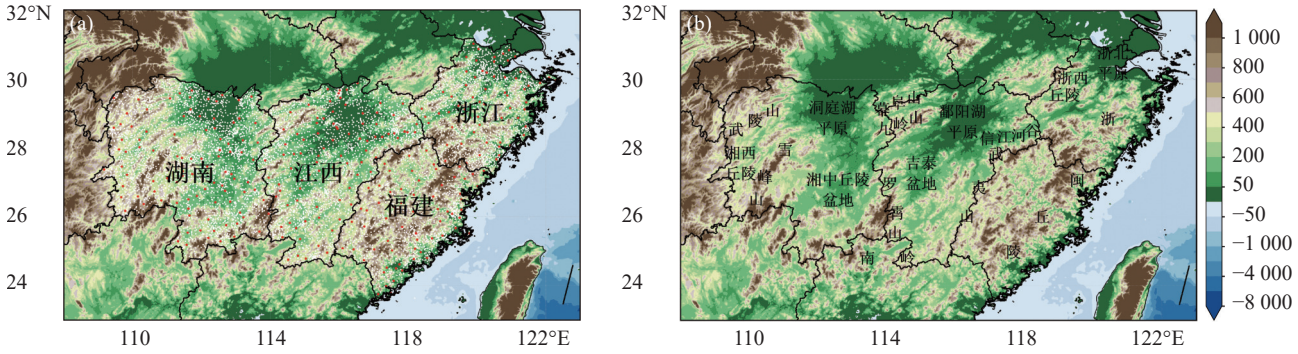


图 1 湘赣浙闽地区国家站 (红色圆点) 和区域站 (白色圆点) (a) 与地形 (b) 的海拔高度 (填色, 单位: m) 分布图

Fig. 1 Altitude (filled color, unit: m) distribution of (a) national stations (red dots), regional stations (white dots) and (b) terrain in the Hunan, Jiangxi, Zhejiang, and Fujian regions

1.2 日极端降水阈值及相关定义

本文参考周芳 (2023) 的百分位法确定单站日极端降水的阈值, 具体方法是: 利用湘赣浙闽地区 1980—2020 年 4—9 月 314 个国家站逐日降水观测资料, 计算每个站点有效降水量 (日降水量≥0.1 mm) 的累积分布函数, 某一百分位所对应的数值即为该站点该百分位对应的极端降水量的阈值。通过各百分位所对应的极端降水阈值、极端降水频次、极端降水强度和极端降水贡献率, 综合参考《降水量等级》业务规定, 最终选出日极端降水的阈值, 该方法可以有效避免人为选取的阈值过大或过小的问题。

单站日极端降水的相关定义如下: 极端降水量是指超过极端降水阈值的日降水量; 极端降水频次为某站统计时段内日降水量超过日极端降水阈值的日数; 极端降水强度为某站统计时段内极端降水量与极端降水频次的比值; 极端降水贡献率为某站统计时段内极端降水总量与总降水量的比值。

依照上述方法, 分析湘赣浙闽地区不同百分位对应不同强度的日降水特征, 并据此选取日极端降水所对应的百分位阈值。前人研究多采用 99.9、99、95 和 90 百分位数作为极端降水阈值, 也有采用 97 百分位数的, 为考察各个阈值的合理性, 分别计算 90~99.9 之间多个百分位所对应的极端降水量、强度、频次和贡献率, 结果见表 1。

表 1 1980—2020 年 4—9 月湘赣浙闽地区国家站不同百分位日极端降水阈值及特征

Table 1 1The threshold value and feature of extreme precipitation in different percentiles in Hunan, Jiangxi, Zhejiang and Fujian in April to September from 1980 to 2020

百分位	日极端降水阈值/mm			出现频次占总频次百分比/%	降水量占总降水量百分比/%
	最大值	最小值	平均值		
99.9	298.2	104.1	158.6	0.11	1.74
99.5	202.9	76.4	110.6	0.52	5.88
99	132.5	66.3	90.3	1.02	9.87
98	96.5	52.6	71.5	2.02	16.30
97	85.9	46.5	61.0	6.01	21.61
96	74.3	41.1	54.1	4.02	26.25
95	66.4	37.3	48.9	5.03	30.40
90	44.7	26.3	33.8	10.04	46.68

由表 1 可见, 湘赣浙闽国家站相同百分位的日极端降水阈值的最大值和最小值差异较大。当取 99.9 百分位作为阈值时, 最大值为 298.2 mm·d^{-1}, 最小值为 104.1 mm·d^{-1}, 日极端降水的出现频次为 0.11%, 平均值为 158.6 mm·d^{-1}, 极端降水量占比仅为 1.74%, 因此 99.9 百分位的日极端降水阈值过高。第 90 和 95 百分位日极端降水的平均阈值均不足 50 mm·d^{-1}, 出现频次分别为 10% 和 5%, 但其极端降水量占比分别为 46.7% 和 30.4%, “极端”的特点不突出。第 96、97、98 百分位极端降水阈值平均为 50 mm·d^{-1} 以上, 出现频次比分别为 4%、3% 和 2%, 也满足“极端”的特点, 极端降水量百分比第 96 和第 97 百分位均超过了 20%, 同样, “极端”的特点不突出。第 99 百分位日极端降水出现频次为 1%, 极端降水量占比 9.87%, 满足“极端”的特点, 其阈值最大值为 132.5 mm·h^{-1}, 最小值为 66.3 mm·h^{-1}, 平均值为 90.3 mm·h^{-1}。按照国家标准《降水量等级》(中国国家质量监督检验检疫总局, 2012), 第 99 百分位更为接近大暴雨的标准 (100.0 mm·d^{-1}), 因此选定第 99 百分位日降水量为湘赣浙闽地区日极端降水的阈值标准, 下文的分析均基于该百分位阈值进行。

2 结果与分析

2.1 日极端降水阈值的时空分布特征

从湘赣浙闽地区 1980—2020 年国家站 4—9 月的第 99 百分位日极端降水阈值 (以下简称日极端降水阈值) 空间分布 (图 2a) 可见, 日极端降水阈值的大值区有三个, 分别位于福建东部沿海地区 (Ⅰ区)、鄱阳湖平原到信江河谷 (Ⅱ区)、湘西丘陵北部 (Ⅲ区), 其中福建东部沿海的柘荣站 (①站, 海拔 685.1 m) 的阈值最大, 为 132.5 mm·d^{-1}; 江西省北部庐山站 (②站, 海拔 1 165.4 m) 次之, 为 132.2 mm·d^{-1}; 再次是福建省东南部沿海的平潭站 (③站, 海拔 33.4 m) 和云霄站 (④站, 海拔 23.8 m), 阈值分别为 128.4 mm·d^{-1} 和 126.9 mm·d^{-1}。阈值的小值区也有三个, 分别位于湘中丘陵盆地 (Ⅳ区)、罗霄山脉与南岭交界地区 (Ⅴ区)、浙闽丘陵北部 (Ⅵ区), 其中湖南西南部的新宁站 (⑤站) 阈值最低, 为 66.3 mm·d^{-1}, 其次为浙闽丘陵的缙云站 (⑥站), 为 67.0 mm·d^{-1}。其他地区阈值普遍在 77~100 mm·d^{-1} 之间。

从地形上来看, 孤立高山站比周边平原站的阈值大, 如湖南衡山、江西庐山、福建九仙山等; 大型湖泊东部比西部阈值大, 如洞庭湖和鄱阳湖东部的阈值普遍大于西部, 且鄱阳湖平原的平均阈值远大于洞庭湖平原。

从 2016—2020 年 4—9 月区域站日极端降水阈值空间分布图 (图 2b) 可以验证上述结论, 并呈现出

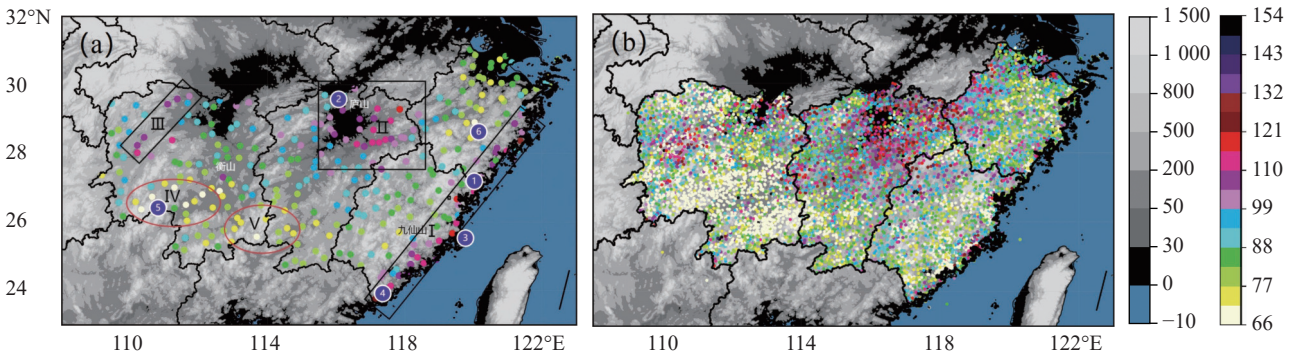


图 2 湘赣浙闽地区 1980—2020 年国家站 (a) 和 2016—2020 年区域站 (b) 4—9 月日极端降水阈值 (彩色圆点, 单位: mm) 及地形 (阴影, 单位: m) 分布 (图 2a 中黑色矩形框为大值区, 红色椭圆形框为小值区, 紫色数字圈为代表性站点, 下同)

Fig. 2 Extreme daily precipitation thresholds (colored dots, units: mm) and topographic distribution (shadows, units: m) for April to September in (a) 1980-2020 at national stations and (b) 2016-2020 at regional stations in the Hunan, Jiangxi, Zhejiang, and Fujian regions. The black rectangular boxes indicate high-value areas, red oval boxes represent low-value areas, and purple digital circles denote representative stations in Fig. 2a (same below).

更加精细的空间分布特征。日极端降水阈值的大值区仍然有三个，但位于福建东部沿海地区的大值区变得不那么连续，位于鄱阳湖平原到信江河谷的大值区向东北扩展到了浙江西北部丘陵，并向东扩展到了武夷山区，而位于湘西丘陵北部的大值区，分布在雪峰山的附近。东西向山脉的南侧（如九岭山脉、幕阜山脉），极端降水的阈值要小于山上和山北侧，这可能是由于西南气流多在此处被强烈抬升所导致。此外，多个河谷地区的极端降水阈值大于周边站点。

综上可知，湘赣浙闽地区日极端降水阈值的空间分布与地形密切相关，总体上山脉迎风坡、平原河谷地区和沿海地区阈值大，山脉背风坡、丘陵山区的阈值小。

日极端降水是发生在一定天气气候背景下的，副高的位置和南北摆动影响日极端降水量空间分布和月际变化。从湘赣浙闽地区 1980—2020 年 4—9 月国家站逐月日极端降水量阈值的空间分布和副高北界平均位置（副高北部 588 dagpm 等值线，下同）叠加图中（图 3）可见，4—9 月日极端降水量的阈值先增加后减小，且每月又有不同的分布特征。4 月（图 3a）副高脊线位于 12°N，副高北界位于雷州半岛到南海北部，湘赣浙闽地区的日极端降水阈值分布较为均匀，值为 60~70 mm·d^{-1}；5 月（图 3b）副高有所北抬，脊线位于 15°N，北界位于华南沿海，日极端降水阈值增大，最大的区域位于福建省和江西省南部，值为 80~85 mm·d^{-1}，湘西丘陵区阈值为 80~85 mm·d^{-1}，其他地区为 75~80 mm·d^{-1}；6 月（图 3c）副高进一步北上，脊线位于 20°N 附近，副高北界略向北抬了一点，位于湘赣浙闽地区南界处，该区域全部站点日极端降水阈值达到最大，普遍为 110~115 mm·d^{-1}；7 月（图 3d）副高脊线位于 25°N，除了湘西以外，湘赣浙闽地区均处于副高控制下，115°E 以东的区域阈值减小（90~95 mm·d^{-1}），115°E 以西的区域阈值仍较大，且自北向南递减，最大中心位于湖南北部，为 110~115 mm·d^{-1}；8 月（图 3e）副高脊线抬至最北，位于 29°N 附近，但副高北界仍位于 30°N 附近，南界（副高南部

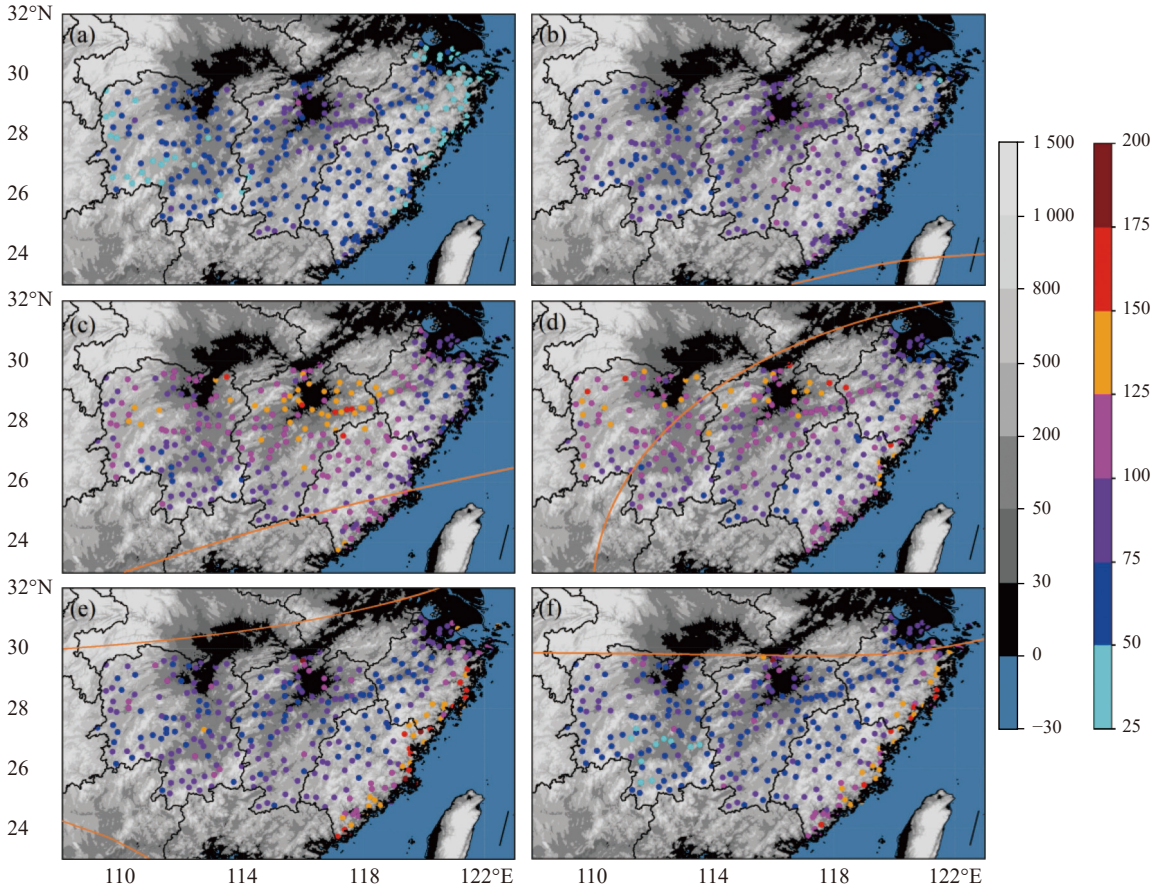


图 3 湘赣浙闽地区国家站 1980—2020 年 4—9 月 (a—f) 逐月日极端降水阈值（彩色圆点，单位：mm）及地形（阴影，单位：m）分布（橙色实线为当月 588 dagpm 平均位置，下同）

Fig. 3 Distribution of extreme precipitation thresholds (colored dots, unit: mm) and topographic (shadow, unit: m) of national stations in Hunan, Jiangxi, Zhejiang and Fujian from April to September (a-f) in 1980-2020 (orange solid line is the average location of the 588 dagpm in the same month, the same below)

588 dagpm 线, 下同) 则位于广西中部一点, 日极端降水阈值除了洞庭湖平原北部和福建沿海地区阈值仍较大外 (90~100 mm·d^{-1}), 其他地区减少至 80~90 mm·d^{-1}; 9 月 (图 3f) 副高北界仍位于 30°N 附近, 但脊线南落回到 23°N, 湘赣浙闽地区阈值全面减小且空间分布不均匀, 大值区位于福建省和江西省东南部, 阈值为 80~85 mm·d^{-1}, 次大值位于鄱阳湖平原-信江河谷和湘西丘陵, 为 70~80 mm·d^{-1}。

综上所述, 随着副高的南北移动, 湘赣浙闽地区 4—9 月日极端降水阈值平均月变化特征为先由东南向西北增大, 再由西北向东南减小, 且福建省和江西东南部地区是日极端降水阈值最先增大和最后减小的区域。同时, 在不同的地形地貌影响下, 又有极端降水阈值空间分布的细微特征, 如鄱阳湖平原—信江河谷地区降水阈值是最后增大和最先减小的。

2.2 日极端降水频次的时空分布特征

从湘赣浙闽地区国家站 1980—2020 年 4—9 月平均日极端降水频次的空间分布 (图 4a) 来看, 湘赣浙闽地区的日极端降水次数分布空间分布不均, 整体南多北少, 山区丘陵多而平原河谷少, 浙江沿海多而福建沿海少。极端降水频次分布与极端降水阈值分布有一定的对应关系, 即频次高的地区阈值小, 频次低的地方阈值高。湘赣浙闽地区日极端降水出现最多的区域位于浙闽丘陵 (Ⅶ区) 及罗霄山附近地区 (Ⅷ区), 为 1.14~1.17 次·a^{-1}, 以罗霄山脉井冈山站 (①站, 海拔为 848.4 m) 和浙闽丘陵中部的泰顺站 (②站) 1.17 次·a^{-1} 为最高。极端降水出现最少的地区为鄱阳湖入长江口的彭泽 (③站) 和鄱阳湖西侧的南昌站 (④站), 仅为 0.56 次·a^{-1}。

从区域站的日极端降水年频次空间分布 (图 4b) 可以验证上述结论, 并能看到更精细的空间分布特征, 主要差异体现在福建省的丘陵地带, 降水频次空间分布更为复杂, 跟这一带的丘陵地带多地形起伏的地貌特征密切相关。

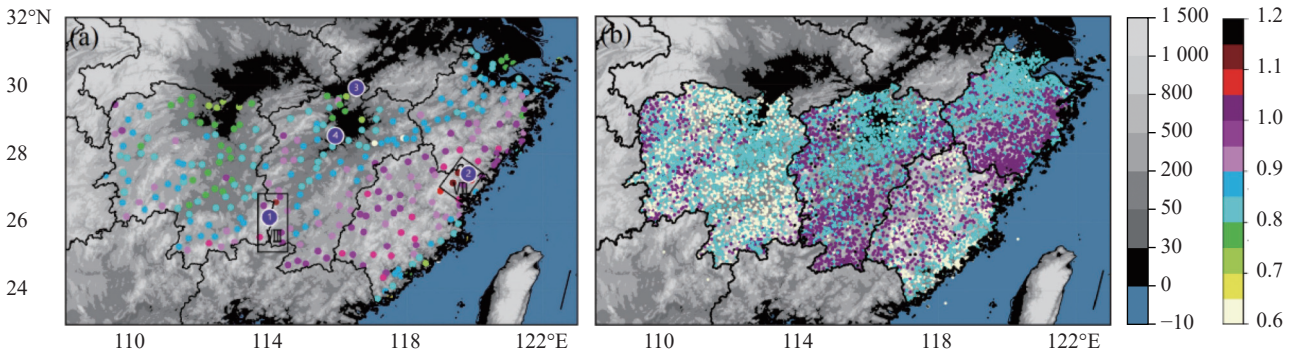


图 4 同图 2, 但为日极端降水年频次 (单位: 次·a^{-1}) 及地形 (阴影, 单位: m) 分布

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the distribution of the frequency of daily extreme precipitation annual average number of times (unit: times·a^{-1}) and topographic (shadow, unit: m)

从湘赣浙闽地区国家站 1980—2020 年 4—9 月逐月日极端降水频次的空间分布图 (图 5) 可见, 41 a 中湘赣浙闽地区多数站点每月日极端降水的总频次为 4~8 次, 空间分布均匀, 自南向北先增加, 再自北向南减少, 总体上湘西丘陵、浙闽丘陵和南岭山区为高频中心, 浙北平原、洞庭湖平原是低频区。4 月 (图 5a) 两湖平原北部和浙北平原、浙闽丘陵北部、福建东南部极端降水频次较低, 为 4~6 次, 其他地区 7~8 次; 5 月 (图 5b) 日极端降水向南岭山区和浙闽丘陵集中, 可达 7 次, 低频区位于浙北平原, 仅为 5 次; 6 月 (图 5c) 洞庭湖平原、南岭西部的日极端降开始减少, 浙北平原日极端降水增加, 其他地区与 5 月相当。7 月 (图 5d) 湘赣浙闽地区的日极端降水频次大幅减少, 其中洞庭湖平原、鄱阳湖平原和福建东南部沿海地区减少最多, 这可能与副高逐渐控制湘赣浙闽地区有关。8 月 (图 5e) 浙闽丘陵、南岭山区和浙闽沿海地区的日极端降水频次再次增加。9 月 (图 5f) 日极端降水频次减少, 高频区进一步东移至浙闽丘陵地带到浙江东部沿海地区低频区位于福建沿海地区。

综上, 日极端降水在 5 月发生频次最高, 9 月最低。4—6 月, 日极端降水频次自南向北增加, 主要 28.3°N 以南的丘陵地区, 7 月日极端降水频次迅速减少, 洞庭湖平原和鄱阳湖平原减少最明显; 8—9 月日极端降水频次表现为东南多西北少, 最多位于浙闽两省交界处。

2.3 日极端降水强度的时空分布特征

从湘赣浙闽地区国家站 4—9 月平均日极端降水强度的空间分布图 (图 6a) 可以看出, 总体上, 日极端降水强度与日极端降水阈值的空间分布一致, 有三个大值中心和三个小值中心, 差别只在数值大小上, 同一站点的极端降水强度大于极端降水阈值, 其中鄱阳湖平原和福建沿海部分地区的极端降水强度超

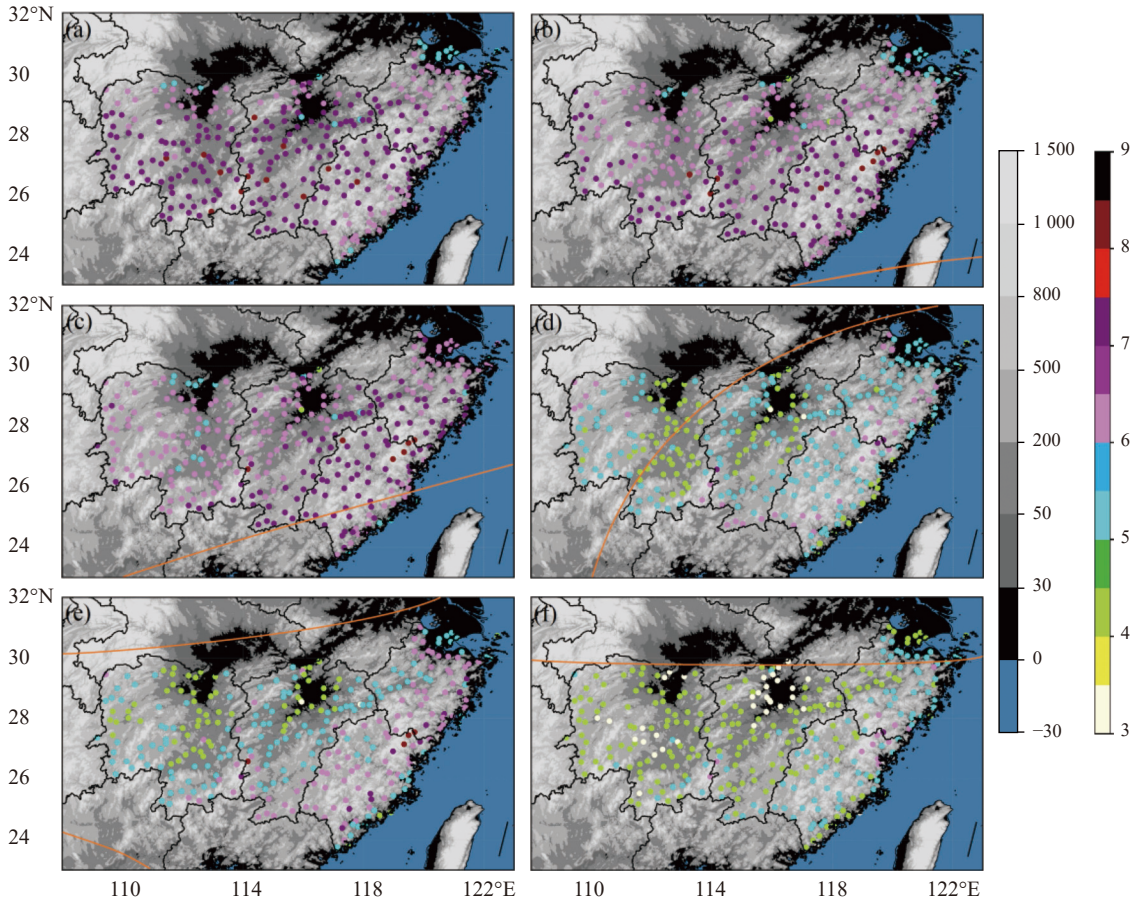


图 5 同图 3, 但为日极端降水月频次 (单位: 次) 及地形 (阴影, 单位: m) 分布

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the distribution of the frequency of daily extreme precipitation (unit: times) and topographic (shadow, unit: m)

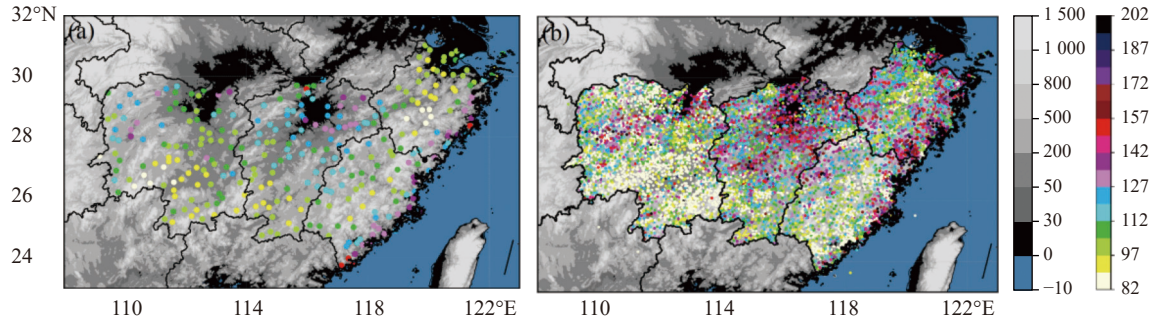


图 6 同图 2, 但为日极端降水强度 (单位: $mm·d^{-1}$) 及地形 (阴影, 单位: m) 分布

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for the distritution of the intensity of daily extreme precipitation (unit: $mm·d^{-1}$) and topographic (shadow, unit: m)

过 170 $mm·d^{-1}$。区域站的极端降水强度分布与国家站类似 (图 6b), 可见到更精细的空间分布特征, 由此可见, 湘赣浙闽地区的极端降水强度的空间分布与地形地貌有密切的关系。

从逐月湘赣浙闽地区国家站日极端降水强度的空间分布图 (图 7) 可见, 湘赣浙闽地区的日极端降水强度总体上 6 月最强、4 月最弱, 且每月的空间分布不同。4 月 (图 7a) 日极端降水强度空间分布总体呈现南北强、中间弱的特征, 在洞庭湖平原和鄱阳湖平原 (以下简称两湖平原, Ⅰ区) 以及南岭 (Ⅱ区) 分别有两条强降水带, 强度普遍达到 80~100 $mm·d^{-1}$, 鄱阳湖平原和洞庭湖东北部局部超过 130 $mm·d^{-1}$, 以幕阜山西北侧湖南临湘站 138.0 $mm·d^{-1}$ (①站) 为最大。5 月 (图 7b) 大部分地区日极端降水强度增强, 其中湘西丘陵 (Ⅰ区)、武夷山区 (Ⅱ区) 和福建东南部沿海地区 (Ⅲ区) 增加显著, 部分地区 120~150 $mm·d^{-1}$, 单站以福建武夷山脉东部的清流站 (①站) 最大, 为 187.4 $mm·d^{-1}$; 浙北平原和浙闽丘陵北部 (Ⅳ区) 强度最弱, 极端降水强度小于 70 $mm·d^{-1}$, 不到慈利极端降水强度的一半。6 月 (图 7c) 日极端降水强度全面加强, 降水强度高值区位于大型湖泊附近和丘陵地带, 如鄱阳湖平原至武夷山两侧 (Ⅰ区)、湘西丘陵

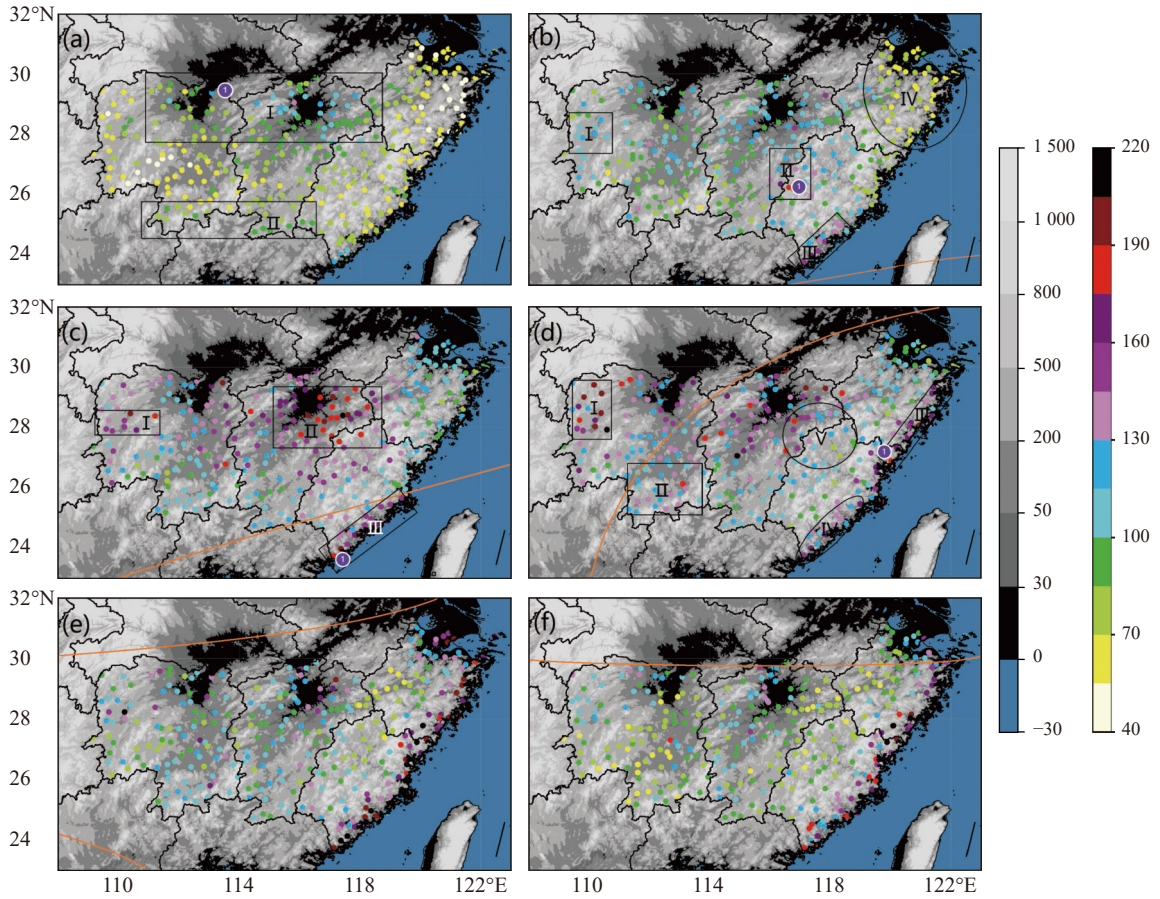


图 7 同图 3, 但为日极端降水强度 (单位: mm·d^{-1}) 及地形 (阴影, 单位: m) 分布

Fig. 7 Same as Fig. 2, but for the distribution of the intensity of daily extreme precipitation (unit: mm·d^{-1}) and topographic (shadow, unit: m)

(Ⅲ区)、福建东南部沿海 (Ⅳ区) 的部分站点达到 160~190 mm·d^{-1}、局部超过 200 mm·d^{-1}, 以福建龙山 (①站) 246.6 mm·d^{-1} 为最大。7 月 (图 7d)强降水区西扩、北抬, 湘西丘陵 (Ⅰ区)、湘中丘陵盆地 (Ⅱ区)、浙江东部沿海地区 (Ⅲ区) 日极端降水强度增强, 以福建柘荣 242.8 mm·d^{-1} 为最大; 鄱阳湖平原 (Ⅳ区)、福建东南部沿海地区 (Ⅴ区) 日极端降水强度减弱。8 到 9 月 (图 7e、f) 日极端降水强度全面减弱, 强度大值区东移至浙闽沿海地区。综上, 湘赣浙闽地区日极端降水强度 4—6 月持续增强, 7 月略有减弱, 8—9 月显著减弱。4 月日极端降水在鄱阳湖平原较强, 5 月极端降水浙闽丘陵和湘西丘陵最强, 6 月鄱阳湖平原、湘西丘陵和福建东南部沿海地区迅速加强, 且强度最强, 7 月湘西丘陵和湘中丘陵盆地开始加强, 8—9 月沿海地区降水最强。在极端降水量和降水频次的共同影响下, 极端降水强度呈现了不同的空间分布特征, 反映了在复杂地形影响下, 湘赣浙闽地区极端降水的复杂性。

2.4 日极端降水贡献率的时空分布特征

从湘赣浙闽地区国家站 4—9 月极端降水贡献率空间分布图 (图 8a) 可见, 极端降水贡献率呈现出显著的地区差异。极端降水贡献率最高的区域位于福

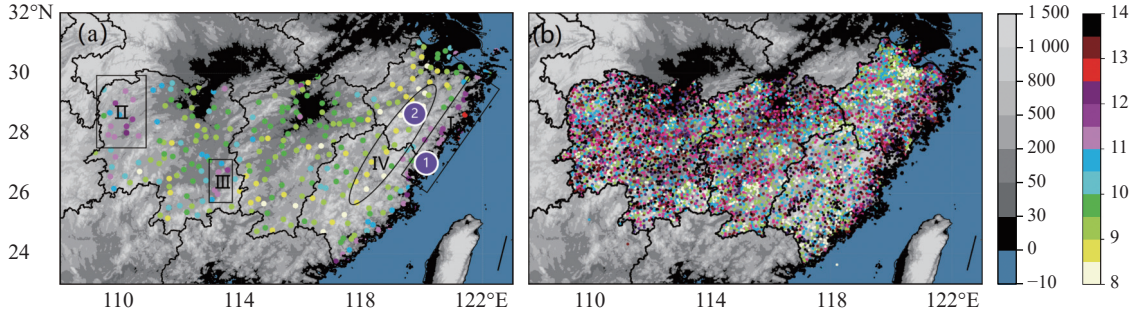


图 8 同图 2, 但为日极端降水贡献率 (单位: %) 及地形 (阴影, 单位: m) 分布

Fig. 8 Same as Fig. 2, but for the distritution of the contribution rate of daily extreme precipitation (unit: %) and topographic (shadow, unit: m)

建东北部、浙江东南部沿海地区（Ⅰ区，12.1%~15.3%），其次是湘西丘陵地区（Ⅱ区，11.1%~12.0%），以福建柘荣站 15.3% 为最大，罗霄山脉西侧（Ⅲ区）极端降水贡献率也超过 11%；贡献率最小的区域集中位于浙闽丘陵（Ⅳ区）、罗霄山脉东侧（Ⅴ区）和湘中丘陵盆地（Ⅵ区），其贡献率不足 9%，以浙江永康站 7.8% 为最小；其他区域贡献率普遍为 9%~11.0%。高山站极端降水贡献率不尽相同，其中庐山站（海拔 1 165.4 m）作为一个孤立高山站，其极端降水贡献率较多地高于周边平原站，达到了 11.5%，南岳站（海拔 1 265.1 m）极端降水率则与周边平原站相近，为 10.7%。

从湘赣浙闽地区区域站 4—9 月极端降水贡献率空间分布图（图 8b）可见，上述结论仍然成立，但洞庭湖平原、鄱阳湖平原等地，极端降水对总降水量的贡献率增大了 1%~3%，这可能与国家站统计的是 1980—2020 年的数据，而区域站统计的是 2016—2020 年的数据有关。

从湘赣浙闽地区国家站逐月极端降水贡献率（当月极端降水总量除以当月降水总量）来看，每月的极端降水率空间分布都不同。4 月（图 9a）平均贡献率 8.0%，平原地区贡献率高，丘陵地区贡献率低；空间分布为北多南少，极端降水贡献率最大区位于洞庭湖平原和九岭-幕阜山脉处（Ⅰ区）和湘西丘陵（Ⅱ区），大部分贡献率为 8.0%~10.0%，局部地区超过 10%，最大为湖南临湘站（11.9%）；浙闽丘陵（Ⅲ区）极端降水贡献率小，为 6.0%~8.0%，个别站点低于 6%。5 月（图 9b）平均贡献率 8.7%，湘西丘陵（Ⅰ区）、洞庭湖平原（Ⅱ区）、武夷山区（Ⅲ区）和福建浙江沿海地区（Ⅳ区）极端降水贡献率增加，普遍达到 8.0%~12.0%，局部地区超过 14.0%（①站，福建诏安，14.6%）；鄱阳湖平原-信江河谷、浙闽平原极端降水贡献率变化不大。6 月（图 9c）极端降水平均贡献率 9.3%，其中湘西丘陵（Ⅰ区）、洞庭湖平原（Ⅱ区）、福建东南部沿海（Ⅲ区）等地区的贡献率增加最为明显，贡献率普遍达 10.0%~14.0%，以福建柘荣站 17.1% 为最大（位置见图 7d）。7 月（图 9d）大部分地区极端降水贡献率增加，平均贡献率为 10.8%，湘西丘陵（Ⅰ区）、南岭山区（Ⅱ区）、吉泰盆地（Ⅲ区）极端降水贡献率最大，达 12.0%~16.0%。8—9 月（图 9e、f）平均极端降水贡献率仍为 10.8%，极端降水贡献率的空间分布不均匀，在沿海地区的贡献率相对更大，且贡献率随月份增大而增加，这可能与热带气旋等热带系统影响

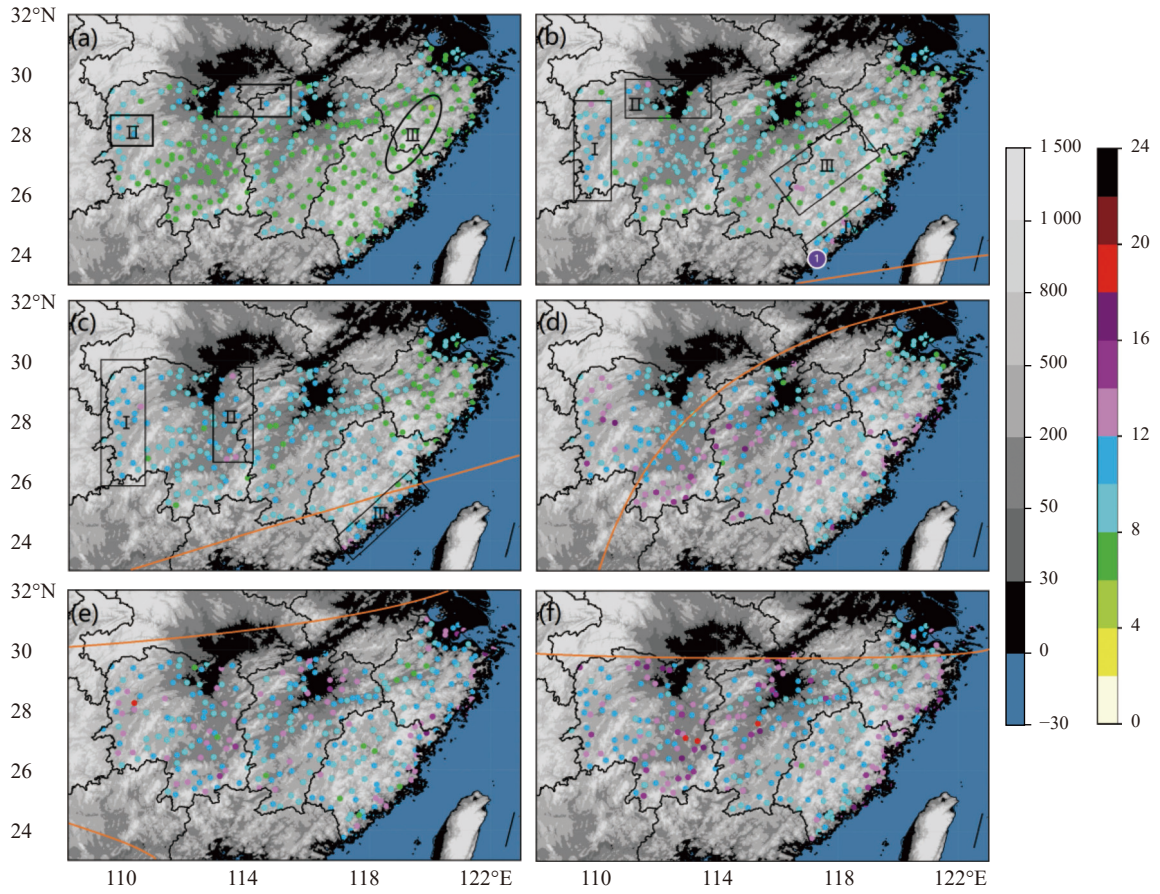


图 9 同图 3，但为日极端降水贡献率（单位：%）及地形（阴影，单位：m）分布

Fig. 9 Same as Fig. 3, but for the distribution of the contribution rate of daily extreme precipitation (unit: %) and topographic (shadow, unit: m)

较多有关。

综上所述, 4 月极端降水对月降水的贡献率还较小, 5—6 月受季风影响, 极端降水贡献率迅速增加, 且大值区集中在湘西丘陵、洞庭湖平原、武夷山区和福建东南沿海地区, 7 月南岭地区和东部沿海地区的贡献率增加, 8—9 月极端降水贡献率分布不均, 大值区主要集中分布在浙江福建东部沿海地区。

3 结　论

本文基于 1980—2020 年 4—9 月国家级气象观测站、2016—2020 年 4—9 月区域气象观测站日降水及ERA5再分析资料, 利用百分位法分析了湘赣浙闽地区复杂地形下极端降水的时空分布特征, 结合次生灾害相关研究成果, 讨论了日极端降水特征与次生灾害的关系。得到如下结论:

(1) 湘赣浙闽地区日极端降水阈值的空间分布与地形密切相关。大值区有三个, 分别位于福建东部沿海地区、鄱阳湖平原到信江河谷、湘西丘陵北部。小值区也有三个, 分别位于湘中丘陵盆地、罗霄山脉与南岭交界地区、浙闽丘陵北部。总体可见, 日极端降水阈值在山脉迎风坡、平原河谷地区和沿海地区大, 在山脉背风坡、丘陵山区小, 最大的地区是鄱阳湖平原-信江河谷地区。平均月变化特征为先由东南向西北增大, 再由东南向西北减小。

(2) 湘赣浙闽地区日极端降水频次东南多西北少, 山区丘陵多而平原河谷少, 浙江沿海多而福建沿海少, 极端降水频次最高的区域是浙闽丘陵地区。平均月变化特征为, 4—6 月频次自南向北增加, 7 月迅速减少, 洞庭湖平原和鄱阳湖平原减少最明显; 8—9 月东南多西北少, 最多位于浙闽两省交界处。

(3) 湘赣浙闽地区日极端降水强度的空间分布与极端降水阈值一致, 也有三个相同的大值中心和小值中心。平均月变化 6 月最强、4 月最弱, 其中鄱阳湖平原、湘西丘陵、浙闽丘陵和福建东南部沿海地区强度最强, 而浙北平原最弱。

(4) 湘赣浙闽地区日极端降水对 4—9 月总降水量的贡献率地区差异显著: 最高区域位于福建东北部沿海, 其次是湘西丘陵地区; 最小的区域集中位于浙西丘陵、浙闽丘陵中部和南岭地区。地形对极端降水的贡献率影响较大, 内陆孤立高山站、鄱阳湖平原-信江河谷以及沿海山地地形对极端降水贡献率更大。平均月变化特征为, 5—6 月湘西丘陵、洞庭湖平原、武夷山区和福建东南部沿海地区最大, 7 月南岭地区和东部沿海地区的贡献率增加, 8—9 月浙江福建东部沿海地区贡献率最大。

4 讨　论

结合相关文献 (杨迁等, 2020; 涂勇等, 2020) 及前述分析, 可初步得到不同日极端降水频次、强度和不同类型灾害的对应关系。浙西丘陵、浙闽丘陵日极端降水频次高、强度较大, 山洪和崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害均多发, 尤其是在闽中一带 (熊俊楠等, 2019); 湘西北、湘鄂赣三省交界处日极端降水频次低、强度大, 容易形成局地的山洪和崩塌 (张喆, 2022), 也曾造成严重的致死性地质灾害 (冷从德等, 2023); 湖南南部南岭地区日极端降水频次高、强度小, 偶发山洪 (庄加佳, 2013); 福建东南部沿海地区极端降水频次较高、强度大, 也容易形成山洪和泥石流等严重的次生灾害 (熊俊楠等, 2019); 而鄱阳湖平原日极端降水强度大但频次低, 加之地形平坦, 基本不会出现地质灾害, 但长时间集中的极端降水更容易造成区域性的洪涝灾害; 浙北平原一带降水强度小、频次最低, 未查到地质灾害记录。

逐月来看, 湘赣浙闽地区的次生灾害主要与极端降水频次有较好对应关系。其中湖南省地质灾害高发期为 5—7 月, 山洪灾害集中在 5 月下旬—6 月上旬以及 7 月下旬; 江西省地质灾害高发期为 5—7 月, 约站全年的 90.7%, 其中 5 月和 6 月分别占全年的 31.5% 和 41.5% (刘云和康卉君, 2020), 山洪灾害主要出现在 5 月下旬到 6 月中旬。浙江省地质灾害多发于 6—8 月, 山洪灾害集中出现在 6 月中旬至 7 月上旬。福建省地质灾害多发于 5—8 月, 主要是受梅雨锋暴雨和台风暴雨, 山洪灾害的高峰期则位于 5 月下旬到 6 月上旬和 7 月下旬。

本文分析了湘赣浙闽地区日极端降水阈值、强度、频次、贡献率的时空分布特征, 并通过文献调研, 讨论了日极端降水特征的频次和强度与地质灾害和次生灾害的空间分布的定性关系, 揭示了极端降水"高频次-高强度"耦合区与地质灾害、次生灾害高发区的空间高度吻合, 表明极端降水相关参数可作为地质和次生灾害风险预警的关键指标。研究成果对优化东南丘陵区山洪地质灾害监测网络布局、改进暴雨洪涝风险评估模型、制定差异化的防灾减灾策略具有重要应用价值, 同时为全球气候变化背景下极端降水事件的区域响应研究提供了典型样区参考。但是极端降水频次与不同类型的地质和次生灾害之间存在怎样的定量关系; 极端降水出现在哪些主导环流型和天气背景下; 全球变暖背景下, 其变化趋势怎样, 这些问题本文并未涉及, 有待于未来展开专题进行研究。

参考文献 (References):

安敏,韦雅倩,何伟军,等.2024.气候变化和人类活动对长江经济带生态敏感性的影响分析[J].环境科学,45(10):5833−5843. An M, Wei Y Q, He W J, et al. 2024. Impact of climate change and human activities on the ecological sensitivity of the Yangtze River Economic Belt [J]. Environmental Science,45(10):5833−5843 (in Chinese). doi:10.13227/j.hjkx.202311071

蔡义勇,党皓飞,林青,等.2019.福建台风极端强降水的时空分布及环流特征[J].海峡科学,(10):14−21+33. Cai Y Y, Dang H F, Lin Q, et al. 2019. Spatio-temporal distribution and circulation characteristics of typhoon extreme heavy precipitation in Fujian [J]. Straits Science, (10):14−21+33 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−8683.2019.10.003

陈红专.2021.湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究[J].气象,47(10):1219−1232. Chen H Z. 2021. Climatic characteristics and weather system classification of extreme precipitation in Hunan Province [J]. Meteorology Monthly,47(10):1219−1232 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.10.005

丁敏,李妍,孟洁,等.2024.1980—2020 年山西省极端降水特征[J].沙漠与绿洲气象,18(3):69−77. Ding M, Li Y, Meng J, et al. 2024. Analysis of extreme precipitation charateristics in Shanxi province during 1980-2020 [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(3):69−77 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.03.011

付超,谌芸,尹丝雨,等.2021.鄱阳湖对降水强度减弱的物理过程的数值模拟研究[J].气象,47(1):24−35. Fu C, Chen Y, Yin S Y, et al. 2021. Numerical simulation of physical prcess of precipitation intensity weakening in Poyang Lake [J]. Meteorology Monthly,47(1):24−35 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.01.003

中国国家质量监督检验检疫总局.2012.GB/T 28592—2012 降水量等级 [S] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2012. GB/T 28592—2012 Grade of Precipitation [S]

高涛,谢立安.2014.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J].地球科学进展,29(5):577−589. Gao T, Xie L A. 2014. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years [J]. Advances in Earth Science,29(5):577−589 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001−8166.2014.05.0577

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

胡思.2020.长江流域极端降水的时空特征及其区域频率分析[D]. 长沙:湖南师范大学, Hu S. 2020. Spatio-temporal characteristics of extreme precipitation in the Yangtze river basin and its regional frequency analysis [D]. Changsha:Hunan normal university (in Chinese)

胡燕,陈鹤,刘红武,等.2024.湖南雨季小时极端降水的特征及其对暴雨贡献分析[J]. 大气科学学报,47(6): 892-903. Hu Y, Chen H, Liu H W, 2024. Characteristics of hourly extreme precipitation and its contribution to rainstorms during the rainy season in Hunan Province, China [J]. Transactions of Atmosphere Science,47(6):892-903 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230824001

黄丹丹,王天阳,李凤全,等.2024.近 50 年浙江沿海地区降水变化特征分析[J].浙江师范大学学报 (自然科学版),47(1):82−89. Huang D D, Wang T Y, Li F Q, et al. 2024. Characteristic analysis of precipitation changes in the coastal areas of Zhejiang Province over the past 50 years [J]. Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences),47(1):82−89 (in Chinese). doi:10.16218/j.issn.1001−5051.2024.06

蒋亚平,覃皓,黄妮,等.2025.广西西南部一次极端暴雨过程成因分析[J].高原山地气象研究,45(1):113−121. Jiang Y P, Qin H, Huang N, et al. 2025. Cause analysis of an extreme rainstorm in southwest Guangxi [J]. Plateau and mountain meteorology research,45(1):113−121 (in Chinese). doi:10.3969\j.issn.1674−2184.2025.01.013

冷从德,吴雨夫,肖文俊,等.2023. 2013—2022 年江西致死性地质灾害特征[J].地质灾害与环境保护,34(4):78−84. Leng C D, Wu Y F, Xiao W J, et al. 2023. Charateristics of fatal geological disasters in Jiangxi Province from 2013 to 2022 [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,34(4):78−84 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−4362.2023.04.012

刘解明,张勇,房云龙,等.2025.山东半岛"平行"双支海风锋的中尺度特征分析及对流触发机制初探[J].暴雨灾害,44(1):9−18. Liu X M, Zhang Y, Fang Y L, et al. 2025. Mesoscale characteristics analysis of "parallel" dual sea breeze fronts and associated convection initiation mechanism in the Shandong Peninsula [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):9−18 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−137

刘云,康卉君.2020.江西崩塌滑坡泥石流灾害空间时间分布特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,31(4):107-112. Liu Y, Kang H J. 2020. Spatial-temporal distribution of landslide, rockfall and debris flow hazards in Jiangxi province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 31(4): 107-112 (in Chinese). doi:10.16031/j.cnki.issn.1003−8035.2020.04.14

田付友,杨舒楠,郑永光,等.2021.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[J].暴雨灾害,40(1):27−36. Tian F Y, Yang S L, Zheng Y G, et al. 2021. Comparison of short-duration heavy rainfall environmental conditions during two extreme torrential rainfall events over Beijing area [J]. Torrential Rain and Disasters, 40(1):27−36 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.01.004

涂勇,吴泽斌,何秉顺.2020.2011—2019 年全国山洪灾害事件特征分析[J].中国防汛抗旱,30(9/10):22−25. Tu Y, Wu Z B, He B S. 2020. Analysis on the characteristics of flash flood disasters in China from 2011 to 2019 [J]. China Flood and Drought Management,30(9/10):22−25 (in Chinese). doi:10.16867/j.issn.1673−9264.2020239

熊俊楠,曹依帆,程维明,等.2019.福建省山洪灾害危险性评价[J]. 山地学报,37(4):538-550. Xiong J N, Cao Y F, Cheng W M, et al. 2019. Risk assessment of mountain torrent disasters in Fujian Province, China [J]. 2019. Mountain Research,37(4):538-550 (in Chinese). doi:10.16089/j.cnki.1008−2786.000446

杨迁,王雁林,马园园,等.2020. 2001—2009 年中国地质灾害分布规律及引发因素分析[J].地质灾害与环境保护,31(4):43−48. Yang Q,

Wang Y L, Ma Y Y. 2020. Distribution rule and influencing factors of geological disasters from 2001 to 2019 in China [J]. Journal of geological hazards and environment preservation,31(4):43−48 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−4362.2020.04.008

杨晓亮,杨敏,金晓青,等.2024. “23.7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,43(1):1−12. Yang X L, Yang M, Jin X Q, et al. 2024. Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):1−12. doi:10.12406/byzh.2023−191

易笑园,陈宏,张庆,等.2024.渤海湾西岸一次局地极端短时强降水事件的成因分析[J].海洋气象学报,44(3):1−13. Yi X Y, Chen H, Zhang Q, et al. 2024. Causes of an extreme local short-time heavy precipitation event along the west coast of Bohai Bay [J]. Journal of marine meteorology,44(3):1−13 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240529001

张峻,张艺玄.2019.长江中下游地区近 60 a 降水变化规律研究[J].暴雨灾害,38(3):259−266. Zhang J, Zhang Y X. 2019. Study on the variation of precipitation in the middle-lower reaches of the Yangtze River in recent 60 years [J]. Torrential Rain and Disasters,38(3):259−266 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.03.008

张喆.2022.江西省山洪灾害时空分布规律和风险评价研究[D]. 南昌: 南昌大学. Zhang Z. 2022. Study on temporal and spatial distribution law and risk assessment of mountain torrents in Jiangxi Province [D]. Nanchang: Nanchang University (in Chinese). doi:10.16031/j.cnki.issn.1003−8035.2013.04.023

赵林,陈滢,刘邱源,等.2025.基于文献计量的中国区域极端降水研究现状分析[J]. 暴雨灾害,44(4): 431-442. Zhao L,Chen Y, Liu Q Y, et al. 2025. Analysis of current research status on extreme precipitation in China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4): 413-442 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−178

周芳.2023.湘赣浙闽地区汛期降水特征及极端性研究[D]. 珠海: 中山大学. Zhou F. 2023. Characteristics and extremes of precipitation over the south of the Yangtze river [D]. Zhuhai:Sun Yat-sen university (in Chinese)

庄加佳.2013.湖南省崩滑流的空间分布研究[D]. 北京:中国地质大学. Zhuang J J. 2013. The spatial distribution analysis of landslide in Hunan province [D]. Beijing:China University of Geosciences (in Chinese)

Chen S, Liu B, Tan X, et al. 2019. Characteristics and circulation background of extreme precipitation over East China [J]. Natural Hazards, 99:537–552. doi:10.1007/s11069−019−03758−2

Chen Y, Liao Z, Shi Y, et al. 2021. Detectable increases in sequential flood–heatwave events across china during 1961–2018 [J]. Geophysics Reseach Letters,48:e2021GL092549. doi:10.1029/2021GL092549

Hong H X, Sun J Q, Wang H J. 2022. Interannual variations in summer extreme precipitation frequency over northern Asia and related atmospheric circulation patterns [J]. Journal of Hydrometeorology, 23(5):619−636. doi:10.1175/JHM−D−21−0177.1

Li W, Chen Y. 2021. Detectability of the trend in precipitation characteristics over China from 1961 to 2017 [J]. International Journal of Climatology,41:E1980−E1991. doi:10.1002/joc.6826

Zou H B, Zhang S W, Liu Y, et al. 2020. Analysis of a convective storm crossing Poyang Lake in China [J]. Journal Meteorological Research, 34(3):529−545. doi:10.1007/s13351−020−9143−5

(责任编辑　张　文)