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

沙颍河流域汛期（5—9月)不同短历时极端降水精细特征分析

武威 徐丽娜

Analysis of the detailed characteristics of different short-duration extreme precipitation events in the Shaying River basin during rainy season (May-September)

WU Wei，XU Lina

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-164

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

沙颍河流域一次短时极端强降水预报失误剖析

Analysis of forecast error for a short-term extreme precipitation event in the Shaying River Basin

暴雨灾害. 2021, 40(5): 494-504 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.006

Box-Cox正态转换在长江子流域极端降水气候事件判定中的应用

Application of Box-Cox transformation in the determination of extreme precipitation climate events in the Yangtze sub-basins

暴雨灾害. 2022, 41(1): 94-100 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.011

黄河流域夏季6—8月极端强降水的主要环流型

Characteristics of the synoptic conditions of summer extreme heavy precipitation in the Yellow River Basin

暴雨灾害. 2022, 41(5): 536-543 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-028

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

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

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

武威,徐丽娜.2025.沙颍河流域汛期(5—9 月) 不同短历时极端降水精细特征分析[J].暴雨灾害,44(4):443−451. WU Wei, XU Lina. 2025. Analysis of the detailed characteristics of different short-duration extreme precipitation events in the Shaying River basin during rainy season (May-September) [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):443−451 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−164

沙颍河流域汛期(5—9 月)不同短历时极端降水精细特征分析

武威[1, 2], 徐丽娜[1, 3]

(1. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003; 2. 河南省漯河市气象局, 漯河 462300; 3. 河南省平顶山市气象局, 平顶山 467000)

摘　要: 为了加深对沙颍河流域不同短历时极端降水过程的理解和提高极端降水预警能力, 并为短历时极端降水的潜势预报和临近客观预报夯实数据基础。利用 2013—2022 年 5—9 月沙颍河流域 35 个国家气象观测站和 886 个区域气象观测站逐时降水资料, 对 1 h、3 h、6 h 等 3 个短历时极端降水的极值、阈值、降水平均强度及频次等进行详细分析。结果表明: (1) 该流域不同短历时降水极值呈现西部小、北部及东北部和南部大的空间分布特征, 历时越长, 极值局地性越强。(2) 以 99.5% 分位数的降水作为短历时极端降水阈值, 不同历时极端降水阈值空间分布呈现“西低东高”, 历时越长, 该特征越明显。(3) 不同短历时极端降水强度和频次空间分布呈现明显的区域差异, 其中高强度区集中在沙颍河流域北部嵩山与平原过渡带、南部和东北部的平原地区, 高频次区则位于沙颍河流域西部山区, 且随历时增加, 强度与频次的空间分布不均匀性越显著。(4) 月尺度变化上, 短历时极端降水平均强度随历时增加逐渐由 7 月单峰型 (1 h、3 h) 演变为 7 月、9 月双峰型 (6 h); 而频次均为 7 月单峰型。日变化显示, 降水平均强度与频次均呈双峰型, 其中主峰在午后至傍晚, 次峰在凌晨。强度随历时增加主峰时段后延、次峰时段前移, 峰值趋于夜间集中。频次 6 h 峰值阶段与 1 h、3 h 呈反向变化, 历时越短, 日变化越明显, 1 h 最显著。

关键词: ⁺短历时极端降水; 阈值; 精细特征; 双峰型; 沙颍河流域

中图法分类号: P468.0⁺24　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−164

Analysis of the detailed characteristics of different short-duration extreme precipitation events in the Shaying River basin during rainy season (May-September)

WU Wei[1, 2], XU Lina[1, 3]

(1. *CMA/Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support Applied Technique*, *Zhengzhou* 450003; 2. *Luohe Meteorological Burea of Henan Province* , *Luohe* 462300; 3. *Pingdingshan Meteorological Burea of Henan Province*, *Pingdingshan* 467000)

Abstract: In order to enhance the understanding of short-duration extreme precipitation processes and improves early warning capabilities, and establish a critical data foundation for subsequent potential forecasting and objective nowcasting of short-duration extreme precipitation events. Using hourly precipitation data from 35 national meteorological observatory stations and 886 regional meteorological observatory stations in the Shaying River basin from May to September during 2013-2022, a detailed comparison is conducted on the characteristics of extreme precipitation for three short durations (1 h, 3 h and 6 h), including their extremes, thresholds, average precipitation intensities and frequencies. The results are as follows. (1) The spatial distribution of extreme values of short-duration precipitation in the Shaying River basin is characterized by smaller values in the western part and larger values in the northern, northeastern and southern parts. The longer the duration, the stronger the regional distribution of extreme values becomes. (2) Taking the

收稿日期: 2024−08−24; **定稿日期**: 2025−04−28

资助项目: 河南省气象局面上项目 (KM202242); 河南省气象局指令性项目 (KL202409)

第一作者: 武威, 主要从事短期、短临天气预报研究。E-mail: ww-0824@163.com

通信作者: 徐丽娜, 主要从事灾害性天气预报方法与技术研究。E-mail: 309503340@qq.com

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

99.5th percentile of precipitation as the threshold for short-duration extreme precipitation, the spatial distribution of extreme precipitation thresholds for different durations exhibits a pattern of "lower in the west and higher in the east". This characteristic becomes more pronounced as the duration increases. (3) The spatial distributions of short-duration extreme precipitation intensity and frequency exhibit pronounced regional heterogeneity across the basin. High-intensity zones are concentrated in transition areas between Songshan Mountain and the plain area in the northern part of the Shaying River basin, and the plain areas in the southern and northeastern parts of the Shaying River basin, while high-frequency zones dominate the western mountainous areas of the Shaying River basin. Notably, spatial inhomogeneity of both intensity and frequency distributions becomes more pronounced with increasing precipitation duration. (4) On the monthly scale, the average intensity of short-duration extreme precipitation transitions from a monomodal pattern (peaking in July for 1 h and 3 h durations) to a bimodal pattern (dual peaks in July and September for 6 h duration) with increasing duration, while the frequency consistently exhibits a monomodal concentration in July. The diurnal variation shows that both intensity and frequency display bimodal variations, characterized by a primary peak appearing from afternoon to evening and a secondary peak in the early morning. The primary intensity peak shifts later and the secondary peak shifts earlier with prolonged duration, resulting in peak consentration toward nighttime. In contrast, the 6 h precipitation frequency exhibits a reverse pattern in the peak phase compared to shorter durations (1 h, 3 h), with 1 h duration demonstrating more pronounced diurnal variability in frequency.

Key words: short-duration extreme precipitation; threshold value; detailed characteristics; bimodal pattern; Shaying River basin

引　言

随着全球气候变暖，极端降水事件呈频发之势，由于其突发性强、小时雨强大、降水时段集中，造成了严重的经济损失和人员伤亡 (苏爱芳等, 2021)。因此加强极端短时降水的研究，为应对气候变化和提高防灾减灾能力具有重要的理论和应用价值。

通常短历时极端降水涵盖短时极端降水。近年来，关于短时极端降水研究可大致分为三类：一是气候统计类，如时空分布及演变趋势 (牛元甫等, 2025)、概率模型 (牛晨等, 2019)、气候风险区划及重现期 (汪小康等, 2018)。唐永兰等 (2018) 采用百分位法和线性倾向估计分析了湖北省极端降水时空特征；王莉萍等 (2023) 采用耿贝尔—线性矩法建立短时强降水拟合函数，并划分短时强降水等级，为预报预警提供标准规范；黄艳等 (2024)基于高密度地面自动站资料研究了新疆伊犁河谷地区暖季不同历时短时强降水的空间分布特征。二是天气学诊断分析类，如多源高分辨资料的精细观测特征 (贺晓露等, 2023)、多尺度环流异常性及其天气学成因 (孙军等, 2012)、中尺度对流系统及机制机理 (田付友等, 2018)。徐珺等 (2018) 采用多源资料探讨了极端降水的中尺度对流系统触发和组织维持过程；苏爱芳等 (2021) 认为不同阶段极端短时降水对流系统的形态结构和演变特征也明显不同。三是基于数值模式的可预报性研究类，如模式评估 (刘侃等, 2023)、数值模拟试验 (程佳佳等, 2022)、机器学习 (周康辉等, 2021) 等。陈湉茹 (2024) 利用 GRIST 模式对“23.7”华北极端降水不同尺度环流形势的模拟，精准刻画了降水落区和降水演变特征；钟琦等 (2024) 基于多模式降水融合、物理理解和数据特征改进损失函数等方法，探讨了物理结合的机器学习方案对“21·7”河南极端降水精细化预报的订正潜力。

沙颍河流域具有复杂的地形条件和独特的气候背景，该流域各地短历时极端强降水空间分布如何，与之对应的降水强度及频次等有何差异，不同短历时极端强降水又呈现怎样的时间演变，这些问题值得深入研究。目前，针对河南省短历时极端降水的统计基本是围绕 1 h 降水量展开的 (杨军勇和苏爱芳, 2021; 于竹娟等, 2024)，对其他历时的极端降水研究尚未见到。此外，这些研究结论主要根据国家气象观测站 (以下简称国家站) 降水资料分析，相较而言，高密度分布的区域气象观测站 (以下简称区域站) 资料更能够表征降水的精细化时空特征 (武威等, 2024)。基于此，本文利用 2013—2022 年沙颍河流域国家站和区域站 (以下简称全部站) 逐时降水资料，对 1 h、3 h、6 h 等 3 个短历时极端降水精细特征进行统计对比分析，厘清不同短历时极端降水的时空差异，以期为理解不同短历时极端降水内在联系提供新视角，也为指导极端降水预报预警和制定精细的灾害防御提供参考依据。

1 研究区域及资料与方法

1.1 沙颍河流域概况

沙颍河流域 (111.70°—115.63°E、33.07°—34.98°N) 位于河南省中部，地处黄河中下游，包括郑州、开封的尉氏、洛阳的嵩县、平顶山、南阳的方城、许昌、漯河、周口等地，面积达 34 440 m^2，包含 35 个国家站、886 个区域站 (图 1)。流域地势西高东低，西部及西南部为伏牛山区，呈西北—东南走向，海拔 500~1 000 m；西北部为嵩山山区，呈东西走向，海拔 300~800 m；中东部为平原地区，海拔 200 m 以下。

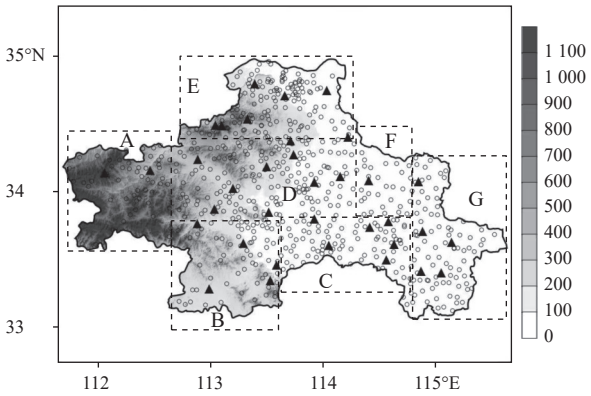


图 1 沙颍河流域国家站 (实心三角形)、区域站 (空心圈) 及其地形高度 (阴影, 单位: m) 分布 (虚框 A—G 分别表示流域不同区域)

Fig. 1 Distribution of national stations (solid triangles), regional stations (hollow circles), and terrain elevation (shaded, unit: m) in the Shaying River basin (Dashed boxes A–G indicate different sub-regions within the basin)

为便于分析和描述沙颍河流域各地不同短历时极端降水的空间特征, 将研究区域 (图 1) 按地域划分为流域西部 (虚框 A)、流域西南部 (虚框 B)、流域南部 (虚框 C)、流域中部 (虚框 D)、流域北部 (虚框 E)、流域东北部 (虚框 F) 和流域东部 (虚框 G) 七部分。

1.2 资料与方法

降水资料为 2013—2022 年 5—9 月沙颍河流域 35 个国家站和 886 个区域站逐小时雨量观测数据, 来源于国家气象信息中心全国综合气象信息共享平台“天擎”, 已经过气候界值、时空一致性等检查, 其中逐 3 h 和 6 h 降水分别通过 3 h 和 6 h 滑动累计计算所得。本文分析中时次均为北京时。

本文研究的极端短历时降水要素包括降水极值、降水阈值、平均降水强度和降水频次。首先, 根据百分位相对阈值法 (武威等, 2024) 确定沙颍河流域不同短历时的极端降水阈值。当站点降水量大于该阈值, 则认为该站出现 1 次短历时极端降水事件; 然后, 将出现事件的站次总数定义为短历时极端降水频次; 最后, 定义所有短历时极端降水的降水量总和与出现频次之比为短历时极端降水平均强度 (杨军勇和苏爱芳, 2021)。

2 不同短历时降水极值空间分布特征

图 2 给出沙颍河流域不同短历时降水极值空间分布。从中可知, 沙颍河流域 1 h 降水极值 (图 2a) 大部集中在 40~80 mm, 流域西部降水极值在 40 mm 以下, 80 mm 以上极值集中在流域北部嵩山东麓的郑州中西部, 最大值出现郑州站, 达 201.9 mm (2021 年 7 月 20 日 16 时), 超过“75·8”过程的小时降水量, 并打破全国国家站历史纪录 (杨浩等, 2022); 70~80 mm 的极值次大区主要位于东部的开封、周口、漯河交界一带, 这与乔春贵等 (2024) 的研究结果一致。3 h 降水极值 (图 2b) 主要集中在 60~120 mm, 大值区位于北部、东北部和南部, 其中 160 mm 以上高值区位于流域北部嵩山东麓的郑州中西部, 最大降水量达 333.2 mm; 随历时增加, 大值区的局地性越明显。6 h 降水极值 (图 2c) 主要集中在 80~200 mm, 其分布特征与 3 h 降水极值分布类似, 极值小值区位于西部, 局部不足 60 mm; 200 mm 以上高值中心仍位于郑州中西部, 最大极值中心达 455.1 mm。综上, 沙颍河流域不同短历时降水极值均呈现出西部小、北部及东北部和南部大, 极值大值区主要分布在流域北部嵩山东侧迎风坡和东北部及南部的平原区, 历时越长, 降水极值的局地性越明显。

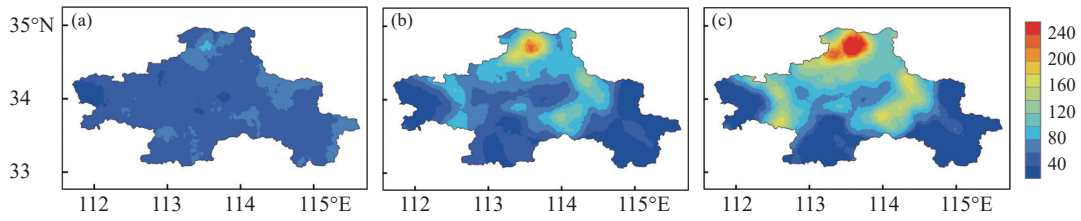


图 2 沙颍河流域 1 h (a)、3 h (b) 和 6 h (c) 降水极值 (单位: mm) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of precipitation extremes value (unit: mm) over (a) 1 h, (b) 3 h and (c) 6 h durations in the Shaying River basin

3 不同阈值短历时极端降水特征

3.1 阈值选取

图 3 为沙颍河流域 95%、98%、99%、99.5% 不同分位数上 1 h 降水阈值和超过相应阈值的 1 h 降水平均强度。从各分位降水数阈值 (图 3a) 可知, 95%、98% 和 99% 分位数上的降水基本在 40 mm 以下, 而 99.5% 分位数小时降水则集中在 34.4~49.1 mm, 有 23% 的站点降水阈值≥50 mm, 中位数为 39.4 mm, 平均数为 41.6 mm, 最接近 40 mm, 符合日常业务预报预警经验指标。此外, 1 h 降水不同阈值以上的平均降水强度统计 (图 3b) 显示, 99.5% 分位数阈值的平均降水强度最小值、最大值和中位数分别为 17.4 mm·h^{-1}、138.7 mm·h^{-1} 和 48.7 mm·h^{-1}。98% 和

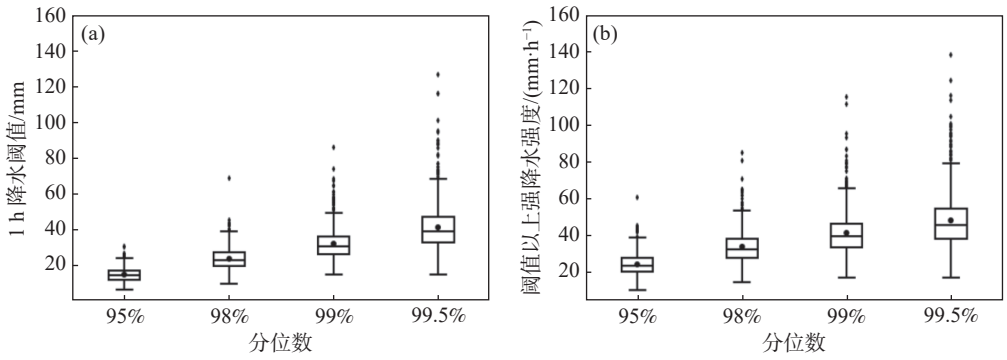


图 3 沙颍河流域所有站点 1 h 降水不同百分位阈值 (a) 和阈值以上强降水强度 (b) 箱线图

Fig. 3 Box and whisker plots of (a) percentile thresholds and (b) intensity of precipitation events exceeding the thresholds for 1-hour precipitation at all stations in the Shaying River basin

99% 分位数阈值的平均降水强度最大值为 85.4 mm·h^{-1} 和 115.9 mm·h^{-1}, 量值较日常经验显著偏小。因此, 采用 99.5% 分位数上的降水量值作为 1 h 极端降水阈值更合理。进一步统计 3 h 和 6 h 降水各分位数上降水阈值及对应阈值以上降水强度发现, 3 h 和 6 h 极端降水阈值也应采用其 99.5% 分位数上的降水值。下文的分析均基于 99.5% 分位数阈值的统计结果。

3.2 极端降水阈值空间分布特征

沙颍河流域不同短历时极端降水 99.5% 分位数阈值 (以下简称降水阈值) 的空间分布如图 4 所示。从中可见, 1 h 极端降水阈值 (图 4a) 表现为流域西部较小, 北部及东北部大, 其中流域西部降水阈值不足 30 mm, 西南部和南部地区阈值超过 45 mm, 北部的郑州和东北部的开封等地阈值达到 60 mm 以上。这与杨军勇和苏爱芳 (2021) 基于国家站资料给出河南沙颍河地区 1 h 极端降水阈值 30~50 mm 的结论基本一致, 但相比而言, 本研究中流域北部和东北部 1 h 降水阈值更大, 这一方面可能与近些年全球气候变暖、雨带北抬及小时雨强增强有关 (杨浩等, 2022); 另一方面, 本研究基于国家站和区域站降水数据统计, 能够更细致刻画短时降水的极端性及其空间分布的局地性, 尤其是对于 60 mm 以上极端降水的描述更加清晰。3 h 和 6 h 极端降水阈值分布显示, 3 h 极端降水阈值 (图 4b) 集中在 60~90 mm, 其中 90 mm 以上的高值区主要分布在北部和东北部, 北部部分地区超过 100 mm; 6 h 极端降水阈值 (图 4c) 集中在 75~120 mm, 北部和东北部地区超过 120 mm 以上, 其中北部嵩山东麓郑州附近高达 150 mm。综上, 沙颍河流域不同短历时极端降水阈值空间分布一致, 基本呈现西低东高的特点, 并随历时增加表现更显著, 也与上述分析降水极值分布对应较好。

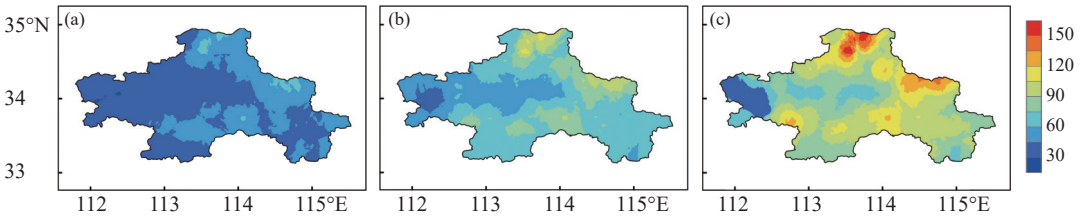


图 4 同图 2, 但为降水 99.5 百分位阈值 (单位: mm) 分布

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the spatial distribution of the 99.5th percentile precipitation threshold (unit: mm)

4 不同短历时极端降水平均强度和频次空间分布特征

4.1 平均强度空间分布

沙颍河流域不同短历时极端降水平均强度的空间分布如图 5 所示。1 h 极端降水平均强度 (图 5a) 表现为中西部小、北部及东北部大的整体分布, 大部分站点 1 h 极端强降水平均强度集中在 40~100 mm·h^{-1}, 流域中西部平均强度不足 40 mm·h^{-1}, 流域南部平均强度达 60~80 mm·h^{-1} 之间, 而平均强度在 80 mm·h^{-1} 以上主要位于流域北部及东北部地区, 其中最大值位于郑州地区 (138.7 mm·h^{-1}), 东北部的开封及南部的漯河附近存在 60 mm·h^{-1} 以上的次大值区。与 1 h 降水平均强度分布类似, 3 h (图 5b) 和 6 h (图 5c) 极端降水平均强度也表现出北部及东北部大、西部偏小的特点, 平均降水强度分别集中于 60~120 mm·(3 h)$^{-1}$ 和 80~160 mm·(6 h)$^{-1}$, 最大值均出现在北部嵩山东麓的郑州。此外, 随着历时增加, 极端降水平均强度空间不均匀性越来越明显, 降水强度大值区局地性表

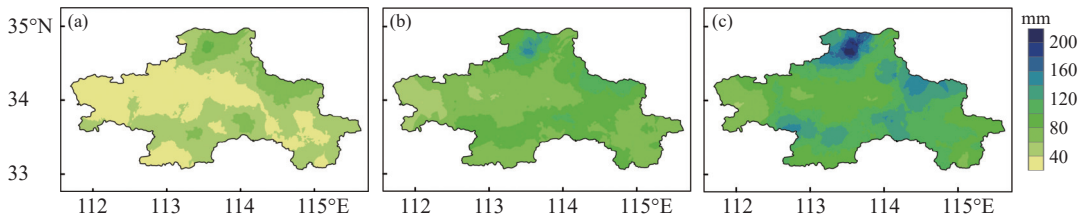


图 5 同图 2, 但为 1 h (a)、3 h (b) 和 6 h (c) 极端降水平均强度分布

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the spatial distribution of the mean intensity of extreme precipitation for (a) hourly, (b) 3 h and (c) 6 h durations

现更为显著。

总体上, 对比不同短历时极端降水平均强度发现, 沙颍河流域西部 3 个短历时极端降水强度较小, 降水强度大值区主要集中在流域 3 个区域, 分别是流域北部的嵩山与平原过渡带、南部和东北部的平原地区。这主要是由于沙颍河流域山区与平原过渡区的地形梯度呈东北—西南向 (图 1), 沙颍河流域暖季近地面盛行偏南气流, 不仅有利于上升气流加强和维持, 还常在山脉东麓造成热力不稳定和水汽辐合, 有利于降水强度增大 (孙继松等, 2014)。此外, 张一平等 (2013) 研究黄淮强降水认为豫中南地区中尺度辐合线或气旋性涡旋是该地区对流强降水发生发展的重要系统; 苏爱芳等 (2021) 分析郑州“7·20”极端暴雨过程发现嵩山地形对冷空气南下路径、辐合线走向有影响, 中尺度锋区对极端强降水起到重要触发作用; 流域南部和东部多为平原区, 受西南涡、台风、江淮或黄淮气旋等影响, 这也属于短历时强降水平均强度的高值区。沙颍河流域西部海拔较高, 阻碍了西南暖湿气流北上 (侯春梅等, 2008), 不利于降水强度进一步增强, 导致平均降水强度低, 且随历时增加这一特征更为明显。

4.2 频次空间分布

从沙颍河流域不同短历时极端降水的频次空间分布 (图 6) 来看, 极端降水频次总体呈现出西高东低的空间分布特征, 与平均降水强度的分布差别较大, 并且随着历时的增加, 极端降水频次明显增多, 西高东低的分布特征更加显著。1 h 极端降水频次 (图 6a) 分布相对均匀, 大多数站点不足 0.4 次·a^{-1}, 0.4 次·a^{-1} 以上的高频区主要分布在流域西部。3 h 极端强降水频次 (图 6b) 较 1 h 明显增多, 大部分站点频次达到 0.2~0.6 次·a^{-1}, 其中高频中心达到 0.6~0.8 次·a^{-1}, 主要集中在流域西部地区, 其次是流域西南部和北部偏西地区。6 h 极端强降水频次 (图 6c) 较 3 h 显著偏多, 中部偏东、东北部和东部大部为 0.4~0.8 次·a^{-1}, 西部大部、西南部和北部偏西等地区超过 0.8 次·a^{-1}, 其中以流域西部最多, 超过 1 次·a^{-1}。

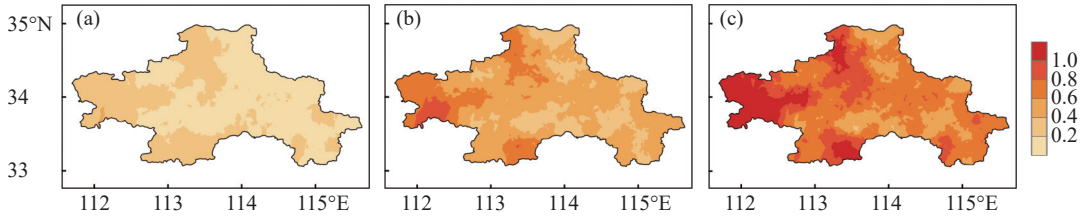


图 6 同图 2, 但为极端降水频次 (单位: 次·a^{-1}) 分布

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for the spatial distribution of extreme precipitation frequency (unit: times·a^{-1})

上述分析可知, 不同短历时极端降水频次空间分布较为相似, 均表现出西高东低的特点, 短历时极端降水多发区主要集中在流域西部, 历时越长, 这一特征越明显。分析其原因在于, 沙颍河流域西部及西南部为伏牛山区, 北部有嵩山, 而中东部为平原, 受独特的地理位置和地形抬升影响, 流域山区极端降水频次更高, 导致流域东西部极端降水频次差异较大。孙继松等 (2014) 指出高海拔地区要求的对流温度较低, 在晴空背景下实际温度有时比低海拔平原地区更高, 因而山区更容易形成热对流; 苏爱芳等 (2013) 指出豫西山区是河南省深厚湿对流的高发区; 王婧羽等 (2019) 发现河南复杂的地形对于短时强降水的增幅作用主要是通过增加降水频次而实现的, 这些研究成果也印证了上述结论。

5 不同短历时极端降水的时间变化分布

5.1 月际变化

图 7 为 2013—2022 年 5—9 月沙颍河流域不同短历时极端降水的平均强度及频次的月际变化。1 h 极端降水平均强度变化呈单峰型分布 (图 7a), 5 月降水强度较小, 6 月迅速增加, 7 月峰值达 51.4 mm·h^{-1}, 之后减少, 这与我国中东部夏季风和主

雨带活动密切相关。3 h 极端降水平均强度单峰结构更明显 (图 7c), 7 月峰值的平均强度达到 81.5 mm·(3 h)$^{-1}$, 明显高于其余各月, 9 月强度略多于 6 月和 8 月。6 h 极端降水平均强度则为双峰结构 (图 7e), 峰值分别在 7 月和 9 月, 降水强度分别为 111.3 mm·(6 h)$^{-1}$ 和 107.8 mm·(6 h)$^{-1}$。

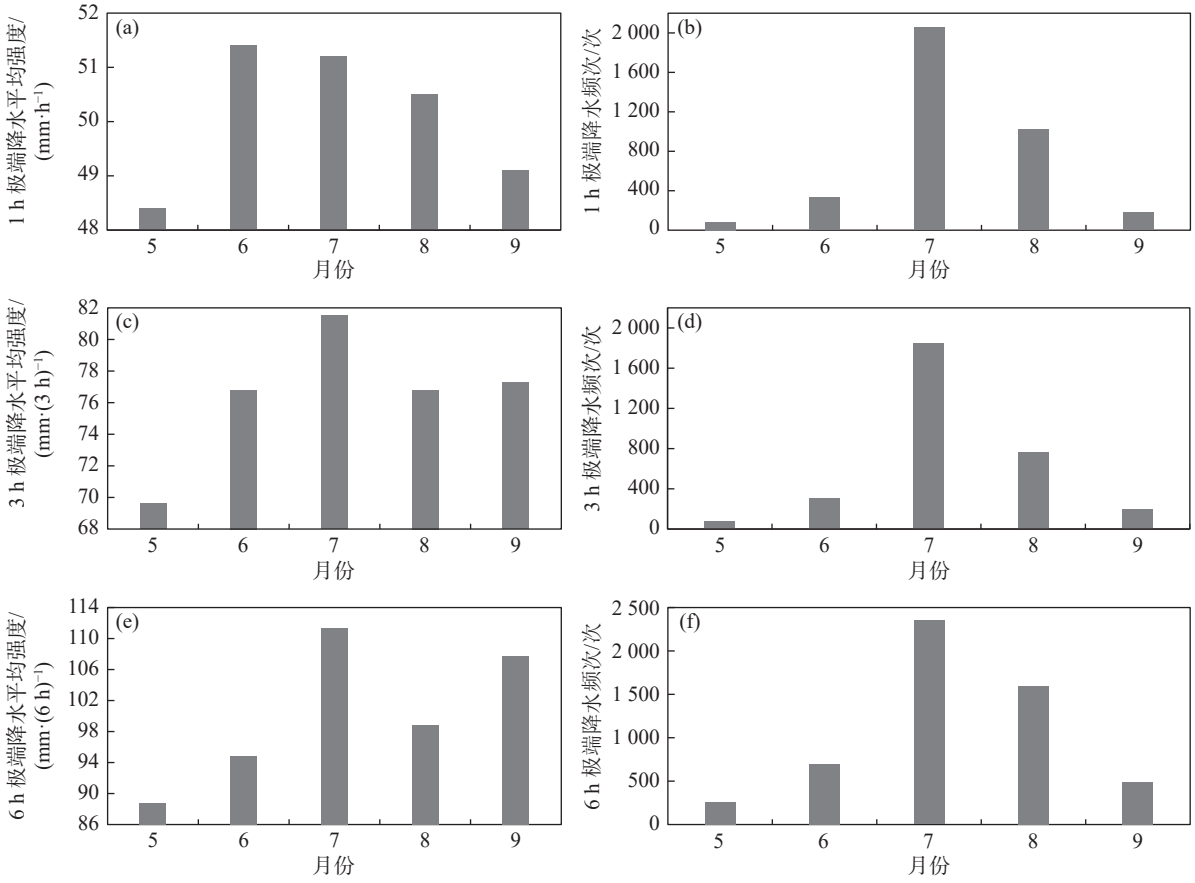


图 7 沙颍河流域 5—9 月 1 h (a、b)、3 h (c、d)、6 h (e、f) 极端降水平均强度 (a, c, e) 和频次 (b、d、f) 逐月变化

Fig. 7 Monthly variations of (a, c, e) mean intensity and (b, d, f) frequency of extreme precipitation for (a, b) 1 h, (c, d) 3 h, and (e, f) 6 h durations in the Shaying River basin from May to September

对比而言, 随历时增加, 7 月和 9 月极端降水平均强度增辐较其余各月更大, 6 月极端降水平均强度增辐最小, 这可能与初夏河南省常常处于冷涡后部西北气流的干环境条件下缺少持续的水汽输送有关 (张一平等, 2013); 盛夏 7—8 月西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 北移至黄淮地区, 不仅水汽输送有利, 而且常有低槽配合, 降水强度大且降水具有一定的持续性, 导致不同短历时极端降水平均强度均达最强; 9 月虽然主雨带逐渐南移, 但当中高纬经向环流增强时, 高空槽引导黄淮气旋东移发展, 有利于秋季长历时的短时强降水出现。

沙颍河流域不同短历时极端降水频次月际变化均为单峰型特征, 峰值出现在 7 月, 8 月次之, 6 月再次, 5 月最少 (图 7)。1 h 极端降水频次 7 月高达 2 053 次, 高于暖季其余月份的频次总和; 其次是 8 月, 达 1 020 次 (图 7b), 这与 7—8 月副高北抬至 25°N 以北, 雨带维持在沙颍河流域附近有关。3 h (图 7d) 和 6 h (图 7f) 极端降水频次的月际变化基本一致, 7 月降水发生频次也远远高于暖季其余各月, 5 月和 9 月频次显著偏低。值得关注的是, 随着历时增加, 短历时极端降水频次增多, 表明即使实况未出现较强的降水强度, 若对流降水具有一定的持续性, 极端强降水发生概率将有所增加。

5.2 日变化

图 8 为 5—9 月沙颍河流域不同短历时极端降水的平均强度及频次的日变化。从中可知, 1 h 极端降水平均强度 (图 8a) 日变化波动在 45~55 mm·h^{-1} 之间, 呈典型的双峰型结构: 主峰位于午后到傍晚 (13—20 时), 最大峰值强度 55 mm·h^{-1}, 出现在午后 16 时; 次峰则出现在凌晨 (02—06 时), 峰值强度 53 mm·h^{-1}。3 h 极端降水平均强度 (图 8c) 日变化也为双峰型波动, 其中下午到傍晚和凌晨存在两个峰值, 午后降水平均强度峰值达 85.1 mm·(3 h)$^{-1}$, 夜间至凌晨峰值为 80 mm·(3 h)$^{-1}$。6 h 极端降水平均强

度 (图 8e) 日变化特征与 1 h 和 3 h 类似, 两个峰值分别在午后到傍晚和凌晨, 波峰强度分别为 115.8 mm·(6 h)$^{-1}$ 和 113.4 mm·(6 h)$^{-1}$。综上, 流域不同短历时极端降水平均强度日变化为典型的双峰波动, 主峰位于下午到傍晚, 次峰出现在凌晨。此外, 随着历时增加, 主峰时段向后推迟, 次峰时段逐渐提前, 两个降水峰值逐渐趋于夜间, 其危害更大, 需防范夜间极端降水带来的不利影响。

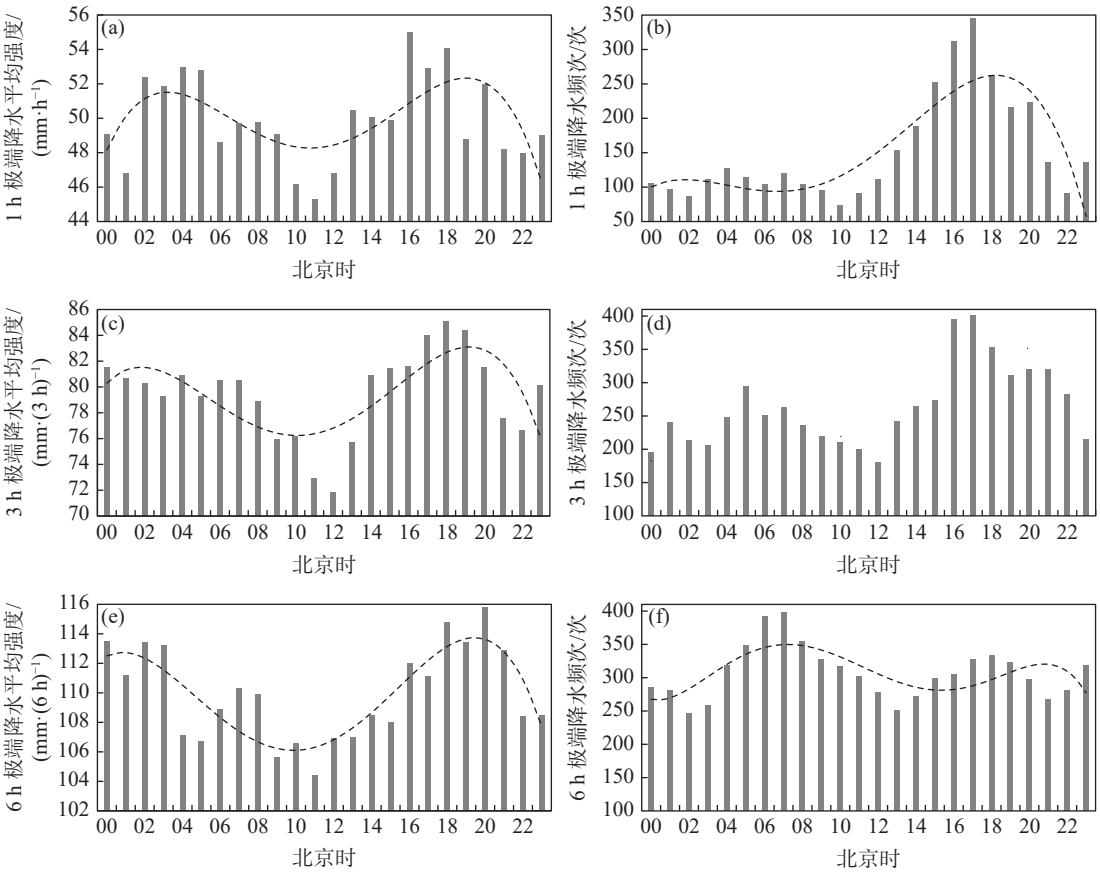


图 8 同图 7, 但为日变化 (虚线表示经过 4 点平滑)

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for diurnal variations (dashed lines denote data smoothed using a 4-point moving average)

频次日变化显示, 1 h 极端降水频次 (图 8b) 主峰出现在午后到傍晚 (15—18 时), 17 时最大峰值高达 345 次, 这与太阳辐射的日变化导致的层结不稳定增强有关 (Dai et al., 1999)。次峰位于凌晨 (02—07 时), 04 时最大峰值达 128 次, 与夜间低空急流发展 (Du and Chen, 2018)、边界层非地转风的惯性振荡 (Zhang et al., 2019) 与夜间云顶辐射冷却 (Yin et al., 2009) 有关。需要注意的是, 主峰峰值与次峰峰值频次相差较大, 日变化特征显著。3 h 极端降水频次 (图 8d) 频次与 1 h 频次特征类似, 主峰位于午后到傍晚 (16—21 时), 最高峰值达到 380 次。次峰位于凌晨到早上 (04—07 时), 但主峰和次峰差距有所减小, 这是因为降水持续性一定程度上抵消了日变化特征。6 h 极端降水频次 (图 8f) 日变化虽然也为双峰分布, 却与 1 h 和 3 h 频次日变化上主次峰阶段截然相反, 主峰集中在凌晨到早上 (04—08 时), 次峰位于午后到傍晚 (16—20 时), 且峰值频次差距更小, 这与降水的持续时间有关。综上, 不同短历时极端强降水频次的日变化均为双峰分布, 其中 1 h 和 3 h 频次主峰集中在午后到傍晚, 次峰出现在凌晨, 6 h 峰值阶段与之相反。此外, 历时越短, 频次日变化特征越明显。

6 结论与讨论

基于 2013—2022 年 5—9 月沙颍河流域 35 个国家站和 886 个区域站降水资料, 详细对比分析了研究区域内不同短历时极端降水精细化时空分布特征, 得到以下主要结论:

(1) 沙颍河流域不同短历时降水极值空间分布呈西部小、北部及东北部和南部大, 极值大值区主要分布在北部嵩山东侧迎风坡、东北部和南部的平原地区, 并具有历时越长, 极值大值局地性越强的特点。不同短历时极端强降水 99.5% 分位数阈值空间分布基本一致, 历时越长, “西低东高”的阈值分布特征越

明显。

(2) 不同短历时极端降水平均强度中西部小、北部和东北部强度大，降水大值区集中在流域北部嵩山与平原过渡带、南部与东北部的平原地区，随历时增加，极端降水空间不均匀性更显著。与降水平均强度分布明显不同，短历时极端降水频次呈“西高东低”分布，其中流域西部山区为高频区，历时越长，该空间分布特征更加凸显。

(3) 月尺度来看，1 h 和 3 h 极端降水平均强度呈单峰分布，7 月达到峰值，而 6 h 极端降水平均强度呈双峰分布，峰值分别出现 7 月和 9 月。随历时增加，7 月和 9 月降水平均强度增辐大，6 月平均强度增辐小。短历时极端降水频次月际变化呈单峰分布且集中在 7 月；历时越长，短历时极端降水频次越多。

(4) 日变化上，不同短历时极端降水平均强度为双峰波动，主峰位于下午到傍晚，次峰出现在凌晨；随历时增加，主峰时段向后推迟，次峰时段逐渐提前，两个峰值逐渐趋于夜间。短历时极端降水频次上，1 h 和 3 h 频次主峰集中在午后到傍晚，次峰出现在凌晨，6 h 峰值阶段与之相反；历时越短，极端降水频次日变化特征越明显，其中 1 h 最为显著，3 h 次之，6 h 最小，这均与降水持续性有关。

本文揭示了沙颍河流域不同地区不同时段极端降水差异，为提高短历时极端降水预警能力提供参考。然而，目前研究未深入分析不同短历时极端降水时空差异的成因；其次，复杂地形造成的不同历时极端降水存在区域性差异也值得进一步探究。此外，本文虽为沙颍河流域短历时极端降水潜势预报和临近客观预报奠定了一定的数据基础，但在后续研究中仍需进一步提炼对短历时极端降水有指示意义的环境参数，结合机器学习模型以及多源新资料，从而实现更为精准的短历时极端降水预报。

参考文献 (References):

陈涤茹,张祎,孙溦,等.2024.应用 GRIST 模式对“23·7”华北极端降水的模拟试验[J].暴雨灾害,43(3):276−287. Chen T R, Zhang Y, Sun W, et al. 2024. Simulation experiment on "23·7" extreme precipitation in North China using the GRIST model [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):276−287 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−263

程佳佳,徐国强.2022.郑州“7·20”极端暴雨过程中水汽和高低空急流作用机制的数值模拟[J].海洋气象学报,42(3):57−68. Cheng J J, Xu G Q. 2022. Numerical simulation analysis on the influence mechanism ofwater vapor and upper-low-level jet during “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Marine Meteorology,42(3):57−68 (in Chinese). doi:10.19513/j.c−nki.issn2096−3599.2022.03.006

贺晓露,郝元甲,祁海霞,等.2023.湖北“8·12”极端降水特征及成因初探[J].暴雨灾害,42(1):13−23. He X L, Hao Y J, Qi H X, et al. 2023. Analysis of characteristics and causes of "8.12" extreme precipitation inHubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,42(1):13−23(in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−109

侯春梅,陈忠民,康雯瑛,等.2008.河南汛期暴雨时空分布特征及成因分析[J].气象与环境科学,31(2):39−42. Hou C M, Chen Z M, Kang W Y, et al. 2008. Distribution and cause analysis of the flood season rainstorm in Henan Province [J]. Meteorological and Environmental Sciences,31(2):39−42(in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2008.02.006

黄艳, 杨莲梅, 唐鹏, 等.2024.新疆伊犁河谷暖季短历时强降水变化特征[J].沙漠与绿洲气象,18(6):32−37. Huang Y, Yang L M, Tang P, et al. 2024. Variation characteristics of flash heavy rain with differentdurations in the warm season of the Yili River Valley in Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(6):32−37 (in Chinese) doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.06.005

刘侃, 陈超辉, 何宏让, 等.2023.基于局地增长模培育法的对流可分辨尺度 WRF 模式对河南“21·7”特大暴雨的预报评估[J].大气科学学报,46(5):725−737. Liu K, Chen C L, He H R, et al. 2023. Assessment of the convection-allowing scale WRF model using LBGM theory: a case study of severe torrential rainin Henan Province, July 2021 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,46(5):725−737 (in Chinese) doi:10.13878/j.cnki.dqkxx−b.20220830001

牛晨,王双银,吴素娟.2019.基于线性矩法的短历时暴雨频率分布研究[J].长江科学院院报,36(8):55−60. Niu C, Wang S Y, Wu S J. 2019. L-moment analysis on frequency distribution of short-duration rainstorm [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 36(8):55−60 (in Chinese). doi:10.11988/ckyyb.20180062

牛元甫,陈昊明,李娟.2025.东北地区暖季小时降水特征分析[J].暴雨灾害,44(1):71−81. Niu Y F, Chen H M, Li J. 2025. Analysis of hourly precipitation characteristics during the warm season in Northeast China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):71−81 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−244

乔春贵,高牧原,梁钰,等.2024.河南省近 30 年分级短时强降水时空分布特征分析[J].气象与环境科学,47(3):72−81. Qiao C G, Gao M Y, Liang Y, et al. 2024. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of classified short-time heavy rainfall in Henan Province in recent 30 years [J]. Meteorological and Environmental Sciences,47(3):72−81(in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2024.03.010

苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等.2021.郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析[J].暴雨灾害,40(5):445−454. Su A F, Lyu X N, Cui L M, et al. 2021. The basic observational analysis of "7.20" extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Torrential Rain and Disasters,40(5):445−454 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.05.001

苏爱芳,孙景兰,谷秀杰,等.2013.河南省对流性暴雨云系特征与概念模型[J].应用气象学报,24(2):219−229. Su A F, Sun J L, Gu X J, et al. 2013. Characteristics and conceptual models of convective rainstorm clouds in Henan Province [J]. Journal of Applied Meteorological Science,24(2):219−229 (in Chinese).

孙军,谌芸,杨舒楠,等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二) 极端性降水成因初探及思考[J].气象,38(10):1267−1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part Ⅱ: preliminary causation analysis and thinking [J]. Meteorological

Monthly,38(10):1267−1277 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.10.013

孙继松. 2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社. Sun J S. 2014. Principles and Technical Methods of Severe Convection Weather Forecasting [M]. Beijing:China Meteorological Press.

唐永兰,于晓晶,徐桂荣,等.2018.近 54a 湖北极端降水的变化特征及其与城市化的关系研究[J].暴雨灾害,37(1):73−82. Tang Y L, Yu X J, Xu G R, et al. 2018. Study on the change characteristics of extremeprecipitation and its relationship with urbanization in Hubei Province in recent 54 years [J]. Torrential Rain and Disasters,37(1):73−82 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.01.010

田付友,郑永光,张小玲,等.2018.2017 年 5 月 5 日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J].气象,44(4):469−484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al. 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017 [J]. Meteorological Monthly,44(4):469−484 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.04.001

王婧羽,李哲,汪小康,等.2019.河南省雨季短时强降水时空分布特征[J].暴雨灾害,38(2):152−160. Wang J Y, Li Z, Wang X K, et al. 2019. Temporal and spatial distribution characteristics of flash heavyrain in Henan during rainy season [J]. Torrential Rain and Disasters,38(2):152−160 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.02.007

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

汪小康,李哲,杨浩,等.2018.河南强降水分布特征及其电网灾害风险区划研究[J].暴雨灾害,37(6):534−542. Wang X K, Li Z, Yang H, et al. 2018. Study on the spatial-temporal characteristics of heavy rainand the disaster risk zoning on Henan Power Grid [J]. Torrential Rain and Disasters,37(6):534−542 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.06.006

武威,段中夏,谢琼娜.2024.基于国家站和区域站的河南暖季极端小时强降水特征对比分析[J].气象与环境学报,40(5):20−29. Wu W, Duan Z X, Xie Q N. 2024. Comparative analysis of extreme hourlyprecipitation characteristics in Henan province based on the observations from national and regionalstations during the warm season [J]. Journal of Meteorology and Environment,40(5):20−29 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2024.05.003

徐珺,毕宝贵,谌芸,等.2018. “5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J].气象学报,76(4):511−524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al. 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Acta Meteorological Sinica,76(4):511−524 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2018.016

杨军勇, 苏爱芳.2021.河南省暖季小时极端降水时空分布特征[J].暴雨灾害,40(2):153−159. Yang J Y, Su A F. 2021. Spatial and temporal distribution characteristics of hourly extreme rainfall inwarm season in Henan [J]. Torrential Rain and Disasters,40(2):153−159 doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.02.006

杨浩,周文,汪小康,等.2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,48(5):571−579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al. 2022. Analysis on extremity and characteristics of the "21·7" severe torrential rain in Henan Province [J]. Meteorological Monthly,48(5):571−579 (in Chinese) doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.111201

于竹娟,罗贵东,夏菲,等.2024.渠江流域短时强降水气候特征分析[J].高原山地气象研究,44(S1):38−44. Yu Z J, Luo G D, Xia F, et al. 2024. Climatic characteristics of short-term heavy rainfall in Qujiang River basin [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(S1):38−44 (in Chinese) doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.Z1.005

张一平,吴蓁,苏爱芳,等.2013.基于流型识别和物理量要素分析河南强对流天气特征[J].高原气象,32(5):1492−1502. Zhang Y P, Wu Z, Su A F, et al. 2013. Analysis on severe convective weather characteristic in Henan based on flow pattern identification and physical elements [J]. Plateau Meteorology,32(5):1492−1502 (in Chinese) doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2012.00139

钟琦,张智察,姚秀萍,等.2024.应用物理结合的人工智能方法提升“21·7”河南极端强降水预报[J].中国科学:地球科学,54(5):1680−1701. Zhong Q, Zhang Z C, Yao X P, et al. 2024. Improved forecasting via physics-guided machine learning as exemplified using “21·7” extreme rainfall event in Henan [J]. Science China Earth Sciences,54(5):1680−1701 (in Chinese). doi:10.1007/s11430−022−1302−1

周康辉,郑永光,韩雷,等.2021.机器学习在强对流监测预报中的应用进展[J].气象,47(3):274−289. Zhou K H, Zheng Y G, Han L, et al. 2021. Advances in application of machine learning to severe convective weather monitoring and forecasting [J]. Meteorological Monthly,47(3):274−289 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.03.002

Dai A, Giorgi F, Trenberth K E. 1999. Observed and model-simulated diurnal cycles of precipitation over the contiguous United States [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,104(D6):6377−6402. doi:10.1029/98JD02720

Du Y, Chen G. 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets oversouthernChina.PartⅠ:Ensemble-basedanalysis[J].MonthlyWeather Review,146(11):3827−3844. doi:10.1175/MWR−D−18−0101.1

Yin S Q, Chen D, Xie Y. 2009. Diurnal variations of precipitation during the warm season over China [J]. International Journal of Climatology,29(8):1154−1170. doi:10.1002/joc.1758

Zhang Y, Xue M, Zhu K, et al. 2019. What is the main cause of diurnal variation and nocturnal peak of summer precipitation in Sichuan Basin, China? The key role of boundary layer low-level jet inertial Oscillations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,124(5):2643−2664. doi:10.1029/2018JD029834

(责任编辑　杨　浩)