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

沁河流域暖季极端小时降水时空特征分析

宋自福 张霞 吕晓娜 司福意 崔文倩 唐影 闫尊

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

SONG Zifu，ZHANG Xia，LYU Xiaona，SI Fuyi，CUI Wenqian，TANG Ying，YAN Zun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-088

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

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

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

近25 a重庆地区小时降水时空分布特征分析

Analysis on the characteristics of temporal and spatial distribution of hourly precipitation in Chongqing during recent 25 years

暴雨灾害. 2020, 39(1): 71-80 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.008

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

近10 a浙江省极端短时强降水时空特征分析

Spatio-temporal characteristics of short-duration extreme rainfall in the recent ten years in Zhejiang Province

暴雨灾害. 2021, 40(6): 599-607 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.004

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

宋自福,张霞,吕晓娜,等.2025.沁河流域暖季极端小时降水时空特征分析[J].暴雨灾害,44(3):352−360. SONG Zifu, ZHANG Xia, LYU Xiaona, et al. 2025. Analysis of temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation during the warm season in the Qinhe River Basin [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):352−360 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−088

沁河流域暖季极端小时降水时空特征分析

宋自福[1, 2, 3], 张霞[1, 4], 吕晓娜[1, 4], 司福意[3], 崔文倩[3], 唐影[5], 闫尊[3]

(1. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003; 2. 河南省焦作市沁河流域气象防灾减灾重点实验室, 焦作 454003; 3. 河南省焦作市气象局, 焦作 454003; 4. 河南省气象台, 郑州 450003; 5. 河南省濮阳市气象局, 濮阳 457000)

摘　要: 基于 2004—2023 年暖季 (5—9 月) 黄河中游沁河流域 10 个国家气象站逐小时降水资料, 分析了该流域复杂地形下极端小时降水的阈值、强度、年均频次及对降水贡献率等要素的时空变化特征, 并和 2018—2023 年 5—9 月该流域 96 个区域气象站降水观测进行比较, 以验证低密度国家气象站极端降水观测的代表性。结果表明: (1) 国家气象站 20 mm·h^{-1} 以上极端小时降水阈值、强度、年均频次及对暖季降水的贡献率均呈现中上游小于下游地区的空间分布, 但降水强度、频次和贡献率的变化趋势并不显著。(2) 国家气象站极端小时降水月变化呈单峰型, 7 月极端小时降水强度最大、频次最高、贡献率最大。频次日变化呈双峰型, 09 时 (北京时, 下同) 和 13 时发生频次最高, 01 时发生频次最低, 白天与夜间降雨强度相差不大。50 mm·h^{-1} 以上的极端小时强降水出现在 6—8 月, 7 月频次最高, 05 时和 07 时出现次数最多。(3) 区域气象站 20 mm·h^{-1} 以上极端小时降水阈值、强度和贡献率的空间分布和日变化与国家气象站一致, 只是 50 mm·h^{-1} 以上的极端小时强降水峰值出现时段有所差异, 因此长时间序列、低空间密度的国家气象站极端降水观测资料具有代表性, 可为沁河流域复杂地形下极端小时降水的预报预警、流域气候分析及气候可行性论证等工作提供参考依据。

关键词: 沁河流域; 极端小时降水; 时空分布特征; 地形

中图法分类号: P426.62^{+}3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−088

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

SONG Zifu[1, 2, 3], ZHANG Xia[1, 4], LYU Xiaona[1, 4], SI Fuyi[3], CUI Wenqian[3], TANG Ying[5], YAN Zun[3]

(1. *CMA·Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Application Technique, Zhengzhou* 450003; 2. *Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation for Qinhe River Basin in Jiaozuo , Henan Province, Jiaozuo* 454003; 3. *Jiaozuo Meteorological Bureau of Henan Province, Jiaozuo* 454003; 4. *Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou* 450003; 5. *Puyang Meteorological Bureau of Henan Province, Puyang* 457000)

Abstract: Based on the hourly precipitation data from 10 national meteorological stations in the Qinhe River Basin in the middle reaches of the Yellow River during the warm season (May-September) from 2004 to 2023, the spatiotemporal variation characteristics in extreme hourly precipitation of thresholds, intensity, annual frequency, and contribution rates to total precipitation under the basin complex terrain during the warm season were analyzed. The spatiotemporal variation characteristics were compared with the results from data analysis utilizing information from 96 regional meteorological stations in the basin from 2018 to 2023 to verify the representativeness of the low-density national meteorological station observations of extreme precipitation.The results are as follows. (1) The spatial distribution characteristics of extreme hourly precipitation exceeding 20 mm·h^{-1} thresholds, intensity, annual average frequency, and contribution to precipitation at national meteorological stations during the warm season, all exhibit a pattern of smaller in the middle and upper reaches than those in the lower reaches. However, the trends of change in precipitation intensity, frequency, and contribution rates are not significant. (2) The monthly variation at national meteorological stations showed an unimodal pattern, with the highest extreme hourly

收稿日期: 2024−05−06; **定稿日期**: 2024−09−22

资助项目: 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2022J019); 河南省科技攻关项目 (252102320004); 河南省气象局复盘总结专项 (KF202549); 中国气象局气象能力提升联合研究专项 (22NLTSY005); 河南省气象局预报员专项 (KY202347) ; 河南省气象局面上项目 (KM202301)

第一作者: 宋自福, 主要从事天气预报方法研究。E-mail: songzf2@126.com

通信作者: 张霞, 主要从事灾害性天气机理及预报技术研究。E-mail: zhxia1970@163.com

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

precipitation intensity, frequency, and contribution rate occurring in July. The diurnal variation distribution presents a bimodal pattern, with the highest frequency occurring at 09:00 BT and 13:00 BT, and the lowest frequency occurring at 01:00 BT. Little difference is found in rainfall intensity between daytime and nighttime. Extreme hourly heavy precipitation exceeding 50 mm·h^{-1} usually occurs between June and August, with the highest frequency of occurrence in July, and the most frequent occurrences at 05:00 BT and 07:00 BT. (3) The spatial distribution and the diurnal variation of extreme hourly precipitation thresholds, intensity, and contribution rates exceeding 20 mm·h^{-1} at regional meteorological stations are consistent with those results derived from national meteorological station data. However, the peak precipitation occurrence times of extreme hourly heavy precipitation above 50 mm·h^{-1} differs slightly. Therefore, the long-term, low-density national meteorological station observations of extreme precipitation are representative, and can provide reliable references for extreme hourly precipitation forecasting and warning, basin climate analysis, climate feasibility studies, and other related work under the Qinhe River Basin complex terrain.

Key words: Qinhe River Basin; extreme hourly precipitation; temporal and spatial characteristics; terrain

引　言

沁河是黄河中游的重要支流之一, 发源于山西省沁源县, 穿太行山流入河南省境内, 在武陟县汇入黄河, 全长 485 km, 流域面积 13 532 km^2。沁河流域中上游地区位于山西境内, 平均海拔高度 942 m, 下游地区位于河南省境内, 平均海拔高度仅 122 m, 上下游落差明显, 因此河道落差大、坡度陡, 致使其雨季洪水生成快、来势猛、预见期短, 历史上曾发生过多次大洪水, 造成严重灾害。例如 2021 年 7 月 11 日沁河流域出现暴雨、大暴雨、局部特大暴雨天气过程, 最大日降雨量达 345.9 mm, 出现在山西阳城蟒河景区, 最大小时降水量达 106 mm·h^{-1}, 出现在山西泽州衙道, 暴雨造成洪水暴发、道路冲毁、通信中断、房屋受损, 导致 10 人死亡, 10 人失联, 直接经济损失超亿元。

短时强降水因其尺度小、突发性强、生命史短、致灾严重等特点, 易引发城市内涝 (曹舒娅等, 2023; 翟丽萍等, 2024) 和山区洪水 (张俊兰等, 2022) 等灾害, 严重威胁人民的生命财产安全。随着高精度时空降水数据集的建立, 小时或更短时间尺度的降水特征研究成果越来越丰富 (Trenberth et al., 2003; 戴泽军等, 2009)。Yu 等 (2007a, 2007b) 利用逐时降水资料分析了我国夏季降水特征, 指出青藏高原及其东部地区在午夜达到降水极值, 长江中游地区的最大降水出现在清晨, 且降水持续性与降水日变化特征之间的关系密切, 长持续性 (>6 h) 降水峰值大多位于夜间和清晨, 而短持续性 (1~3 h) 降水的极大值则多出现在下午或傍晚。李强等 (2017) 利用四川和重庆 123 个气象观测站 1980—2012 年小时降水数据, 分析川渝地区主汛期 5—9 月强降水时空分布特征和持续性特征, 指出不同持续时间小时强降水事件具有双峰型结构, 午后为第一个降水峰值, 20 时 (北京时, 下同) 至次日 07 时对应第二个强降水峰值。杨军勇和苏爱芳 (2021) 对河南省暖季极端小时降水时空分布特征进行统计分析, 指出河南极端小时降水事件 7 月最多, 极端降水频次日变化表现为明显的双峰型, 主峰值出现在傍晚。

城市、山地及平原极端小时降水呈现不同的时空分布特征。孙继松和杨波 (2008)、孔锋等 (2018)、吴梦雯和罗亚丽 (2019) 分析了城市化对极端小时降水的影响, 指出城市热力环流及下垫面的作用有利于 β 中尺度系统维持, 从而更易形成极端降水, 且城市化效应使得极端降水阈值、频次提高。Luo 等 (2016) 利用 1981—2015 年全国小时降水资料分析我国不同地区极端小时降水特点表明, 东部平原地区 (包括四川盆地) 极端小时降水强度明显高于西部山地地区。付超等 (2019) 利用江西省 2010—2016 年 5—9 月 1 597 个气象观测站逐小时降水数据对江西省短时强降水进行统计分析, 指出短时强降水高频区主要分布在山地及河谷附近。张超和贾健 (2019) 根据乌鲁木齐 6 个国家气象站和 31 个区域气象站资料, 分析了不同区域短时强降水特征, 发现短时强降水浅山区多、平原和高山区少。王婧羽等 (2019) 利用高密度地面自动站逐时降水观测资料, 采用绝对阈值法研究了河南省短时强降水 (≥20 mm·h^{-1}) 和极端短时强降水 (≥50 mm·h^{-1}) 变化, 结果也表明河南省复杂的地形对于短时强降水具有显著增幅作用, 且主要是通过增加降水频次而实现。上述研究显示, 不同地区短时强降水特征存在差异, 如降水极值出现时间有所不同, 且受地形、城市化等多种因素影响, 山地及河谷附近往往是短时强降水的高频区, 城市热力环流及下垫面作用利于极端降水的形成, 并提高极端降水阈值和频次。这些研究为深入理解短时强降水特征及其影响因素提供了重要参考。

沁河流域地形复杂, 河道落差大, 坡度陡, 极端降水常常会造成山洪灾害, 关于沁河流域降水特征的研究, 刘强军等 (2021) 利用 10 个国家气象站汛期及分月降水资料研究了沁河流域汛期降水变化的气候特征, 而沁河流域目前缺乏极端降水精细特征研

究。本文基于 2004—2023 年国家气象站和 2018—2023 年区域气象站逐小时降水观测资料，分析和比较了沁河流域暖季 (5—9 月) 极端小时降水的阈值、强度、年均频次及对降水贡献率等要素的时空变化特征，旨在为沁河流域短时强降水预报、流域气候分析及气候可行性论证提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文统计降水时空分布及日变化特征时采用河南省气象局天擎系统的 2004—2023 年 5—9 月沁河流域 10 个国家气象站和 2018—2023 年 5—9 月沁河流域 96 个区域气象站 (图 1) 逐小时降水资料，按北京时整点统计，即每个整点时次测得的降水量为之前 1 h 累积降水量。

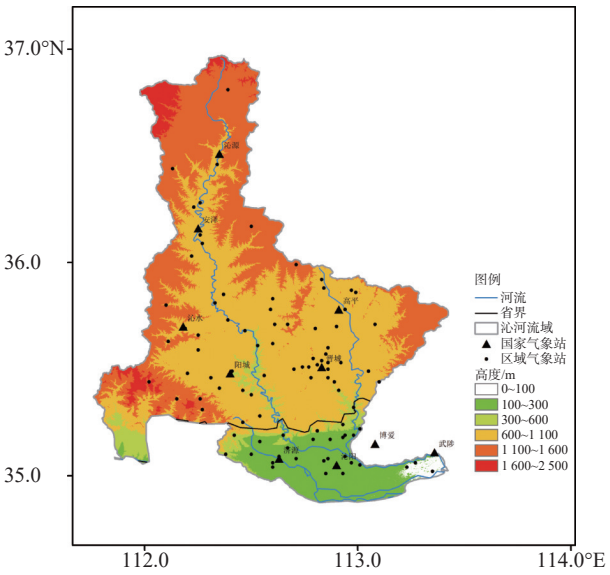


图 1 沁河流域地形高度 (色斑) 及国家气象站、区域气象站分布图 (黑色省界线为中上游与下游分界线)

Fig. 1 Distribution of terrain height (shaded), national and regional meteorological stations in the Qinhe River Basin (The black line is the boundary between the upper and lower reaches)

1.2 研究方法

极端降水阈值研究常用的方法有绝对阈值法和相对阈值法。绝对阈值法选择降水高于某一特定值的方法，俞小鼎 (2013) 用≥20 mm·h^{-1} 降水强度定义小时强降水，用≥50 mm·h^{-1} 定义极端小时强降水。相对阈值法通常有两种计算方法：百分位法和拟合经验曲线函数。Xia 等 (2012) 认为在中国区域利用百分位法选取阈值相对较好。沁河中上游地区处于太行山山区，下游地区逐渐过渡到平原，上下游地区平均海拔相差 800 m 左右，极端降水阈值的选取需要考虑本地的降水特点，采用相对阈值法更能科学反映沁河流域短时强降水的时空分布特征和变化规律。

本文采用百分位法设置极端小时降水阈值，具体做法是：将某一站点大于等于 0.1 mm 的小时降水量按升序排列 X_1, X_2, X_3,⋯, X_n，样本第 i 百分位数 p_i 为阈值 (杨军勇和苏爱芳，2021)。用于分析极端小时降水特征的指标包括：极端小时降水频次、极端小时降水强度和极端小时降水贡献率。极端小时降水频次为某一时段内超过极端小时降水阈值的次数；极端小时降水强度为某一时段内超过降水阈值的降水量之和除以相应的降水频次；极端小时降水贡献率为某一时段内超过降水阈值的降水量之和除以此时段总降水量。

基于国家气象站资料，利用百分位法确定 2004—2023 年暖季沁河流域极端小时降水阈值和占比 (表 1)，沁河流域各站、流域平均和流域第 95 百分位小时降水阈值均低于 10 mm，其中流域第 95 百分位阈值为 5.6 mm，降水量占比为 39.8%，小时降水发生概率和降水量占比高，用该值作为极端小时降水阈值明显偏小。第 99 百分位小时降水各站阈值在 12.6~16.8 mm，流域阈值为 15.8 mm，降水量占比为 24.6%，小时降水发生概率较低、降水量占比较高，根据业务经验，用该值作为极端小时降水阈值略偏小，研究对象不具有极端性。第 99.5 和 99.9 百分位小时流域阈值分别为 20.6 mm 和 36.3 mm，降水量占比分别为 10.8% 和 2.3%，99.5 百分位小时降水发生概率低、降水量占比较高，99.9 百分位小时降水发生概率低和降水量占比低，同时 99.9 百分位小时降水样本各站在 7~8 个，个例少，不利于总结规律，因此排除 99.9 百分位小时降水作为阈值，而 99.5 百分位小时降水样本各站在 32~50 个，小时降水阈值各站为 17.9~23.5 mm，各站平均为 20.6 mm，流域阈值为 20.6 mm，

表 1 2004—2023 年 5—9 月沁河流域国家气象站不同百分位小时降水阈值及占比

Table 1 Thresholds and proportion for different percentiles of hourly precipitation at national meteorogical stations in the Qinhe River Basin from May to September between 2004 and 2023

百分位	站点阈值/mm			流域阈值/mm	降水量占比/%
	最大值	最小值	平均值		
99.9	44.1	26.9	34.5	36.3	3.3
99.5	23.5	17.9	20.6	20.6	10.8
99	16.8	12.6	15.3	15.8	24.6
95	6.2	5.2	5.7	5.6	39.8

注：表中流域阈值为流域所有降水样本所对应的百分位值，降水量占比为流域阈值以上降水量占暖季总降水量的比值

与 Zhang 和 Zhai (2011) 给出的中国中东部极端小时降水标准≥20 mm 较为一致, 因此本文以第 99.5 百分位小时降水为基准, 分析其时空变化规律。

2 极端小时降水时空分布特征

2.1 极端小时降水空间分布特征

从国家气象站资料分析的沁河流域极端小时降水空间分布 (图 2) 可见, 沁河流域中上游除晋城站外各站阈值均小于 20 mm, 下游阈值均大于 20 mm。流域各站平均阈值 20.6 mm, 其中中上游平均阈值为 19.2 mm, 下游平均阈值为 22.6 mm, 极端小时降水阈值呈现中上游小于下游的空间分布特征 (图 2a), 最小为沁水 17.9 mm, 最大为济源 23.5 mm。流域极端小时降水平均强度为 28.6 mm·h^{-1}, 其中中上游平均强度为 28.1 mm·h^{-1}, 下游为 29.4 mm·h^{-1}, 强度呈现中上游小于下游的空间分布特征 (图 2b), 最弱为沁水 25.2 mm·h^{-1}, 最强为济源 32.1 mm·h^{-1}。流域极端小时降水频次分布 (图 2c) 呈现从中上游到下游增大趋势, 流域极端小时降水出现频次平均为 2 次·a^{-1}, 其中中上游平均为 1.8 次·a^{-1}, 下游平均为 2.3 次·a^{-1}, 最小为高平 1.6 次·a^{-1}, 最大为沁阳 2.5 次·a^{-1}。流域极端小时降水对暖季总降水的贡献率平均贡献率为 11.4%, 其中中上游平均为 10.1%, 下游平均为 13.2%, 呈现中上游小于下游的空间分布特征 (图 2d), 最小为沁水 9.1%, 最大为沁阳 14.8%。

为了验证国家气象站极端小时降水数据的代表性, 将其分析的极端小时降水空间变化特征与区域气象站资料分析的进行对比 (图 3), 基于区域气象站资料统计的极端小时降水阈值 (图 3a)、强度 (图 3b) 和贡献率(图 3d) 均呈现自上游至下游递增的空间分布特征, 这与基于长时间序列的国家气象站资料的空间分布特征一致。基于区域气象站统计的极端小时降水阈值和降水强度的平均值分别为 22.8 mm、32.7 mm·h^{-1}, 最大值分别为 33.2 mm、47.2 mm·h^{-1}, 均

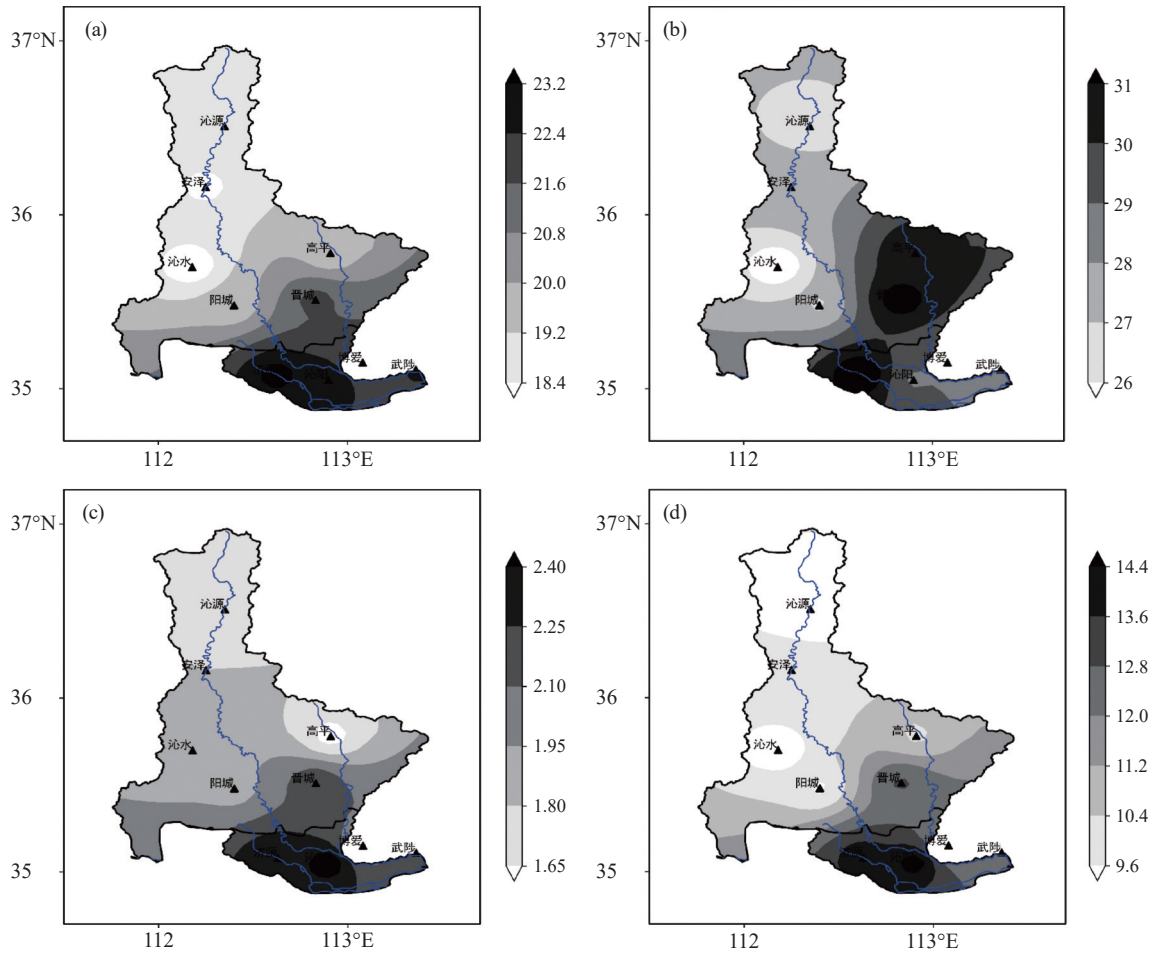


图 2 2004—2023 年 5—9 月沁河流域国家气象站 (三角形) 极端小时降水阈值 (a, 单位: mm)、强度 (b, 单位: mm·h^{-1})、频次 (c, 单位: 次·a^{-1})、贡献率 (d, 单位: %) 空间分布 (蓝线为河流, 下同)

Fig. 2 Spatial distribution of (a) amount (unit: mm), (b) intensity (unit: mm·h^{-1}), (c) frequency (unit: times·a^{-1}), and (d) contribution rate (unit: %) of extreme hourly precipitation at national meteorological stations (triangle) during the warm season in the Qinhe River Basin from May to September between 2004 and 2023 (The blue line is river, the same below)

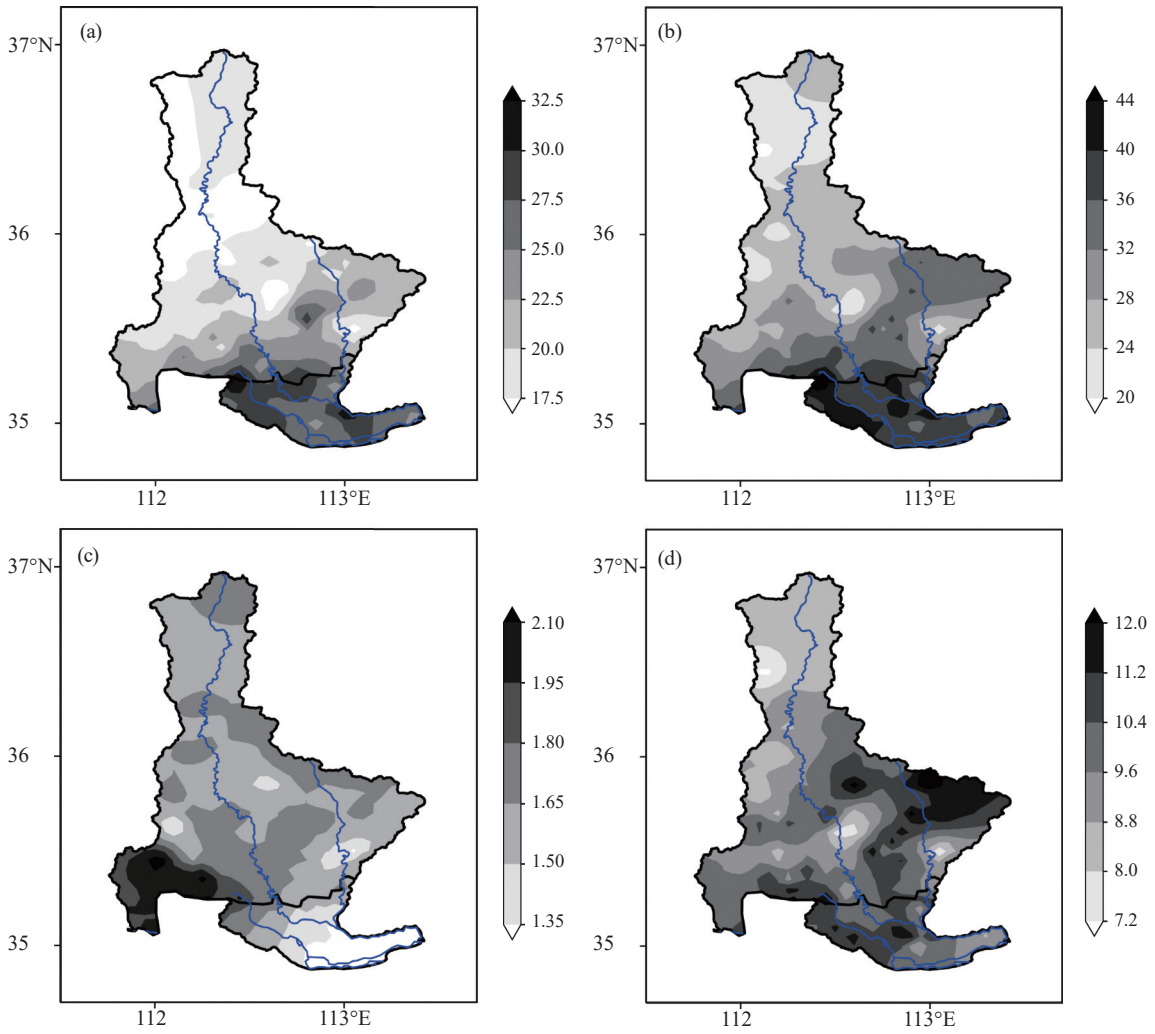


图 3 2018—2023 年 5—9 月沁河流域区域气象站极端小时降水阈值 (a, 单位: mm)、强度 (b, 单位: mm·h^{-1})、频次 (c, 单位: 次·a^{-1})、贡献率 (d, 单位: %) 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of (a) amount (unit: mm), (b) intensity (unit: mm·h^{-1}), (c) frequency (unit: times·a^{-1}), and (d) contribution rate (unit: %) of extreme hourly precipitation at regional meteorological stations during the warm season in the Qinhe River Basin from May to September between 2018 and 2023

大于国家气象站。极端小时降水阈值最小值出现在中上游的高平柳村站 14.9 mm, 最大值出现在下游的沁阳龙涧站 33.2 mm; 极端小时降水强度最小值出现在中上游的沁水郑村 20.1 mm·h^{-1}, 最大值出现在下游的济源郑坪 47.2 mm·h^{-1}; 极端小时降水贡献率最小值 7% 出现在中上游的安泽三交, 最大值 12.4% 出现在下游地区的沁阳北山。与基于国家气象站资料统计的极端小时降水频次空间分布特征不同, 基于区域气象站资料统计的极端小时降水频次 (图 3c) 呈现中上游大于下游的空间分布特征, 极端小时降水频次最大值出现在中上游的沁水下川和阳城西交, 均为 2.2 次·a^{-1}, 最小值出现在下游的沁阳王召和武陟大虹桥, 均为 1.2 次·a^{-1}。这可能与站点分布、区域气象站资料序列短等原因有关。

2.2 极端小时降水时间变化特征

文中 1.3 节分析沁河流域各站极端小时降水阈值为 17.9~23.5 mm·h^{-1}, 流域阈值为 20.6 mm·h^{-1}。不同阈值小时降水具有不同尺度天气系统特征, 根据尺度分析和降水量与垂直速度的关系, ≥10 mm·h^{-1} 的降水一般是由中小尺度天气系统造成的, 而≥50 mm·h^{-1} 的降水主要是由小尺度天气系统导致 (陈炯等, 2013)。为了给出不同强度小时降水的气候分布情况, 本文以≥20 mm·h^{-1} 为极端小时降水阈值和以≥50 mm·h^{-1} 为极端小时强降水阈值, 研究沁河流域极端降水的时间变化情况。

2.2.1 年变化

基于国家气象站资料统计的沁河流域 20 mm 以上极端小时降水样本数为 356 站次, 占 0.1 mm 以上降水总样本 (67 509 站次) 的 5.273%。分析沁河流

域 20 mm·h^{-1} 以上极端小时降水强度、频次、贡献率年变化 (图 4) 可见, 沁河流域极端小时降水年平均强度为 29.2 mm·h^{-1}, 2015 年最弱, 为 24.4 mm·h^{-1}, 2012 年最强, 为 34.1 mm·h^{-1}。极端小时降水年均频次 17.8 站次, 2009 年出现次数最少, 仅 8 站次, 占比为 2.2%, 2021 年出现次数最多, 达 35 站次, 占比为 9.8%。沁河流域极端小时降水对暖季总降水量的贡献率年平均为 10.4%, 2023 年最小, 为 4.9%, 2022 年最大, 为 21.7%。极端小时降水的强度、频次和贡献率的年增长率分别为−0.04 mm·a^{-1}、0.3 站次·a^{-1} 和 0.06%·a^{-1}, 三者均未通过显著性检验, 即三者的变化趋势并不显著。

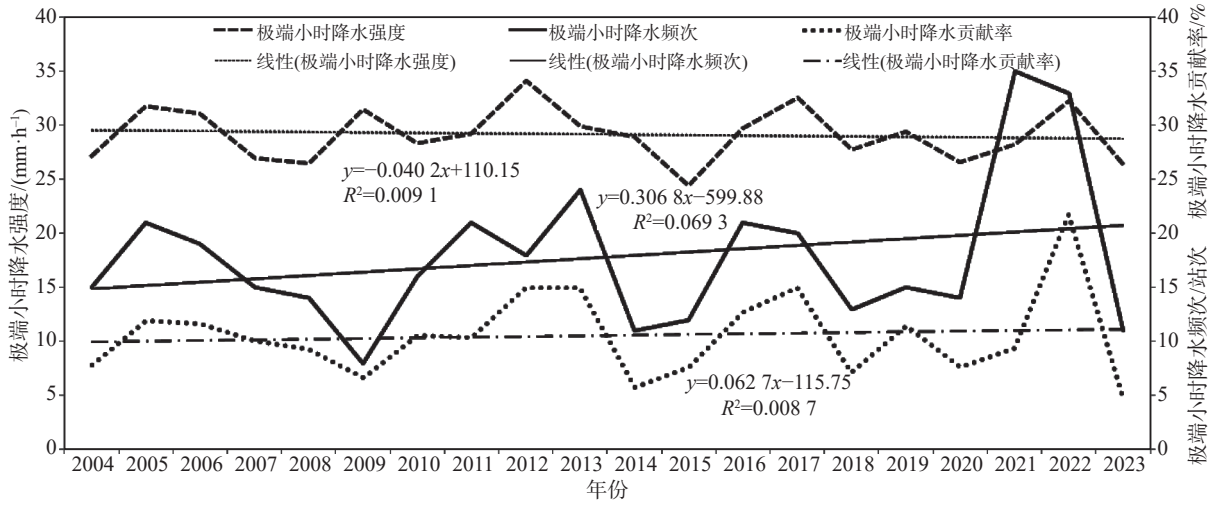


图 4 2004—2023 年 5—9 月沁河流域国家气象站极端小时降水强度、频次、贡献率年变化

Fig. 4 Annual variation of extreme hourly precipitation intensity, frequency and contribution rates at national meteorological stations in the Qinhe River Basin from May to September between 2004 to 2023

近 20 a 沁河流域 50 mm·h^{-1} 以上极端小时强降水 (图略) 总共出现 17 站次, 占 0.1 mm 以上降水总样本的 0.025%, 属于小概率事件, 年均出现 0.85 站次。中上游的晋城出现次数最多, 为 4 次, 下游的沁阳出现最少, 为 1 次。另外 20 a 中仅有 12 a 出现 50 mm·h^{-1} 以上的极端小时强降水。流域极端小时强降水平均强度为 60.2 mm·h^{-1}, 最大小时降水强度武陟 82.9 mm·h^{-1}。

2.2.2 月变化

基于国家气象站资料统计的沁河流域 20 mm·h^{-1} 以上极端小时降水强度、频次、贡献率月变化 (图 5) 显示, 近 20 a 极端小时降水月平均强度为 28.8 mm·h^{-1}, 其中 7 月最强, 为 30 mm·h^{-1}, 8 月次之, 29.4 mm·h^{-1}, 9 月最小, 28.1 mm·h^{-1}。极端小时降水频次具有单峰型的特征, 7 月出现频次最多 (192 站次), 占总次数的 53.9%; 8 月次之 (92 站次), 占总次数的 25.8%; 5 月出现最少 (13 站次), 占总次数的 3.7%。极端小时降水贡献率也具有单峰型的特征, 7 月贡献率最高达 19.1%, 8 月次之为 12.8%, 9 月最低为 2.8%。

沁河流域 50 mm·h^{-1} 以上极端小时强降水 (图略) 仅在 6—8 月出现, 其中 7 月出现次数最多, 达 9 站次, 占比 52.9%, 8 月次之, 为 6 站次, 6 月仅为 2 站次。流域极端小时强降水平均强度 6 月为 62.3 mm·h^{-1}, 7 月为 59.5 mm·h^{-1}, 8 月为 60.6 mm·h^{-1}。

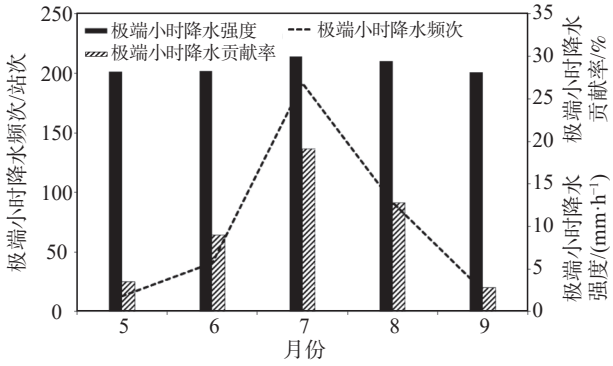


图 5 2004—2023 年 5—9 月沁河流域国家气象站极端小时降水强度、频次、贡献率月变化

Fig. 5 Monthly variation of extreme hourly precipitation intensity, frequency and contribution rate at national meteorological stations in the Qinhe River Basin from May to September between 2004 and 2023

2.2.3 日变化

基于国家气象站资料统计的沁河流域 20 mm·h^{-1} 以上极端小时降水强度、频次日变化 (图 6) 显示, 极端小时降水平均强度为 29.1 mm·h^{-1}, 最大值出现在 05 时, 平均强度为 35.8 mm·h^{-1}, 最小值出现在 02 时, 平均强度为 23.8 mm·h^{-1}。白天 (08—20 时) 降雨平均强度为 28.7 mm·h^{-1}, 夜间 (20—08 时) 降雨平均强度为 29.6 mm·h^{-1}, 白天与夜间降雨强度相差不大。

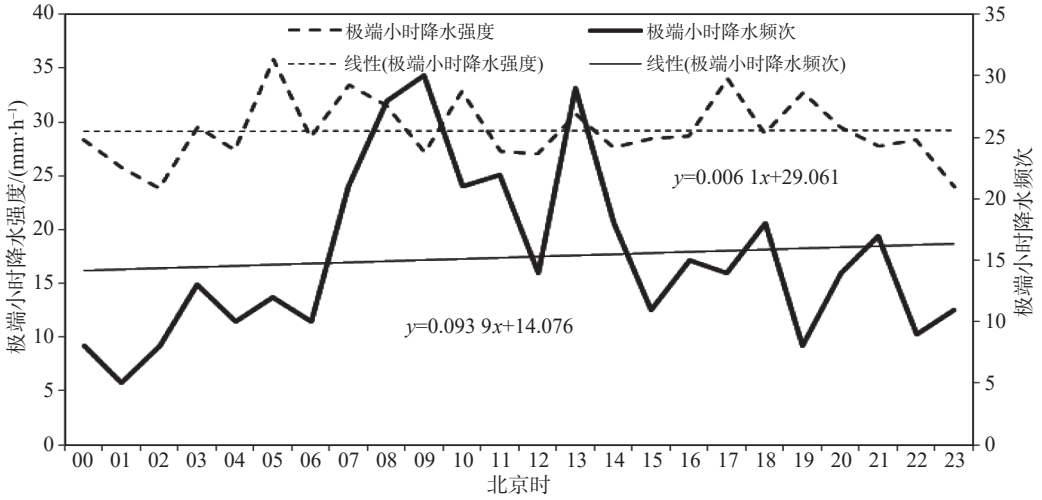


图 6 2004—2023 年 5—9 月沁河流域国家气象站极端小时降水强度、频次日变化

Fig. 6 Diurnal variation of extreme hourly precipitation intensity and frequency at national meteorological stations in the Qinhe River Basin from May to September between 2004 and 2023

极端小时降水频次呈现双峰特征，峰值出现在 09 时和 13 时，出现频率分别为 8.2% 和 7.9%，最小值出现在 01 时，出现频率为 1.4%。

沁河流域 50 mm·h^{-1} 以上极端小时强降水 (图略) 仅在 12 个时次出现，其中 05 时、07 时出现最多，为 3 次，平均强度分别为 60.8 mm·h^{-1}、62.1 mm·h^{-1}，其次 17 时为 2 次，平均强度为 56.7 mm·h^{-1}，最大 82.9 mm·h^{-1}，出现在 13 时。

对比分析基于区域气象站、国家气象站的沁河流域暖季极端小时降水强度和频次的日变化 (图 7)，两者极端小时降水平均强度分别为 30.6 mm·h^{-1} 和 29.1 mm·h^{-1}，差别不大，日变化 00—18 时较为一致，19—23 时差异较大。基于区域气象站、国家气象站的极端小时降水频次日变化趋势呈现一致性特征，峰值均出现在上午的 09—10 时，区域气象站频次为 118 站次 (10 时)，国家气象站为 30 站次 (09 时)。

基于区域气象站资料统计的沁河流域 50 mm·h^{-1} 以上极端小时强降水共出现 75 站次，占 0.1 mm 以上降水总样本 175 049 站次的 0.042%，与基于国家气象站资料分析的 0.025% 接近。仅发生于每年的 6—8 月，其中 7 月出现次数最多，为 45 站次，8 月次之，为 29 站次，6 月仅 1 站次，月变化特征与基于国家气象站资料分析的趋势一致。一天中以 14 时出现最多 (9 站次)，与基于国家气象站的极端小时强降水的峰值时段不一致，一方面可能是由于沁河流域地形复杂，午后容易产生局地强降水，这种对流尺度

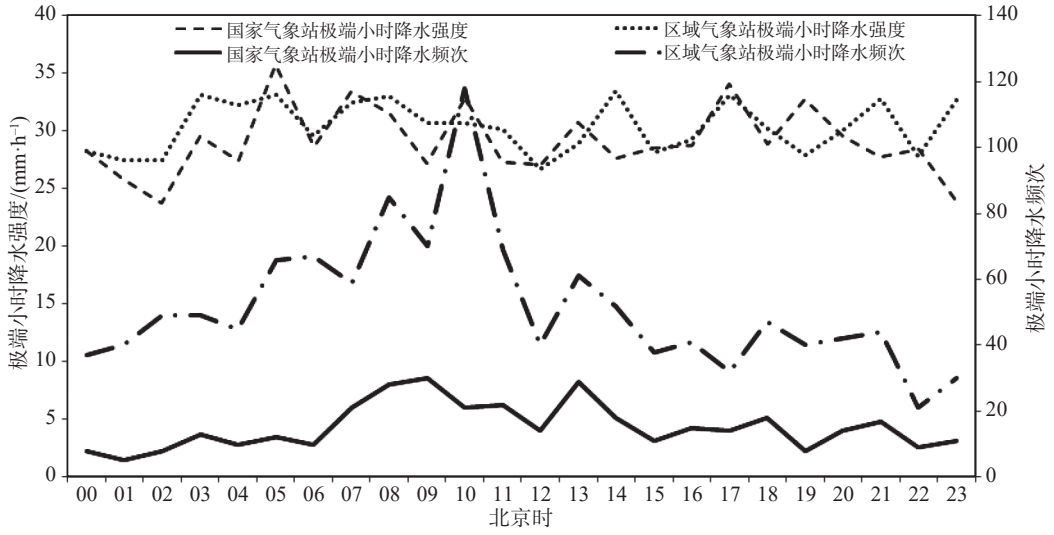


图 7 2004—2023 年 5—9 月沁河流域国家气象站和 2018—2023 年 5—9 月沁河流域区域气象站极端小时降水强度及频次日变化对比

Fig. 7 Comparison of diurnal variations in extreme hourly precipitation intensity and frequency between national meteorological stations (between 2004 and 2023) and regional meteorological stations (between 2018 and 2023) in the Qinhe River Basin from May to September

小, 区域气象站更能监测到局地降水, 另一方面也可能与国家气象站资料统计的极端小时强降水样本少有关。次峰值为 05 时 (8 站次), 与国家气象站峰值时间一致。除峰值外, 日变化特征与基于国家气象站资料分析的趋势基本一致 (图略)。

3 结论与讨论

本文基于 2004—2023 年暖季 (5—9 月) 黄河中游沁河流域 10 个国家气象站逐小时降水观测资料, 分析了极端小时降水的阈值、强度、年均频次及对降水贡献率等要素的时空变化特征, 并和 2018—2023 年 5—9 月该流域 96 个区域气象站极端小时降水要素特征进行比较, 以验证该地区复杂地形下低密度国家气象站极端降水观测的代表性。得到主要结论如下:

(1) 国家气象站极端小时降水阈值、强度、年均频次及对暖季降水的贡献率均呈现中上游小于下游地区的空间分布特征, 极端小时降水的强度、频次和贡献率的年增长率分别为−0.04 mm·a^{-1}、0.3 站次·a^{-1} 和 0.06 %·a^{-1}, 三者的变化趋势并不显著。

(2) 国家气象站极端小时降水的月变化呈单峰型, 7 月极端小时降水频次最高, 占总频次的 53.9%, 贡献率最高, 达 19.1%, 强度也最大。日变化呈双峰型, 09 时、13 时发生频次最高, 01 时发生频次最低, 白天与夜间降雨强度相差不大。而 50 mm·h^{-1} 以上的极端小时强降水出现频次占比仅为 0.025%, 属于小概率事件, 7 月出现最多, 一天中以 05 时和 07 时出现频次高, 降水强度极大值出现在 13 时。

(3) 基于区域气象站和国家气象站统计的极端小时降水阈值、强度、贡献率空间分布均呈现自上游至下游递增的一致性特征, 以及区域气象站统计的极端小时降水阈值、极端小时降水强度的平均值、最大值均大于国家气象站。两种资料统计的极端小时降水月、日变化特征亦较为一致, 特别是 50 mm·h^{-1} 以上的极端小时强降水, 两种资料统计的月变化规律具有高度一致性, 但两者峰值出现时段有差异, 区域气象站资料统计的峰值出现在 14 时, 而国家气象站资料统计的峰值出现在 05 和 07 时。因此, 长时间序列、低空间密度的国家气象站小时极端降水资料具有代表性, 可为沁河流域复杂地形下极端小时降水预报预警、流域气候分析及气候可行性论证等工作提供参考依据。

本文基于两种降水观测资料对沁河流域极端小时降水和极端小时强降水的时空分布特征进行了统计研究, 对比分析不同极端性小时降水的空间变化和日变化特征, 并初步解释了降水峰值时刻差异成因。由于本文统计所用为整点时次降水资料, 可能导致部分连续 1 h 降水量超过指定值被划分到两个时段, 从而没有达到本文所确定的短时强降水阈值标准, 导致本文统计的极端小时降水频率要低于实际发生频率。对于地处平原到太行山过渡地带复杂地形的沁河下游极端小时降水的阈值、强度、频次和贡献率高于中上游地区的可能原因, 初步分析是地形抬升造成的低层辐合加强和垂直速度增大造成的 (周雪松等, 2012), 今后还需要经过数值模拟来验证。另外本文尚未对影响小时降水时空特征的原因进行深入分析, 对造成极端小时降水的天气系统物理机制, 局地下垫面与天气形势对极端小时降水影响, 不同区域、不同性质的极端降水事件, 与大气环流特征、天气系统的结构和作用、陆面温湿条件、地形作用、气候变化等内部变率或外部强迫因素之间的机理等都值得进一步探讨和分析。

参考文献 (References):

曹舒娅,邹兰军,王易,等.2023.苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征[J].暴雨灾害,42(5):532−540. Cao S Y, Zou L J,Wang Y, et al. 2023. Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy rainstorm in southern Jiangsu [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):532−540 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−128

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

戴泽军,宇如聪,陈昊明.2009.湖南夏季降水日变化特征[J].高原气象,28(6):1463−1470. Dai Z J, Yu R C, Chen W M. 2009. Characteristics of summer precipitation diurnal variations in Hunan [J]. Plateau Meteorology,28(6):1463−1470 (in Chinese)

付超,谌芸,朱克云,等.2019. 2010−2016 年江西省暖季短时强降水特征分析[J].气象,45(9):1238−1247. Fu C, Chen Y, Zhu K Y, et al. 2019. Characteristics of flash heavy rain in Jiangxi warm season from 2010 to 2016 [J]. Meteorological Monthly,45(9):1238−1247 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.09.005

孔锋,王一飞,方建,等.2018.中国夏季极端降水空间格局及其对城市化的响应 (1961—2010)[J].长江流域资源与环境,27(5):996−1010. Kong F, Wang Y F, Fang J, et al. 2018. Spatial pattern of summer extreme precipitation and its response to urbanization in China (1961-2010) [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,27(5):996−1010 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyyhj201805007

李强,邓承之,张勇,等.2017. 1980−2012 年 5−9 月川渝盆地小时强降水特征研究[J].气象,43(9):1073−1083. Li Q, Deng C Z, Zhang Y, et al. 2017. Study on spatio temporal distribution characteristics of hourly

heavy rainfall in Sichuan and Chongqing from May to September during 1980-2012 [J]. Meteorological Monthly,43(9):1073−1083 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.09.005

刘强军,牛晨煜,赵珺.2021.黄河中游沁河流域汛期降水特征及突变分析[J].水电能源科学,39(11):19−22. Liu Q J, Niu C Y, Zhao J. 2021. Characteristics and mutation analysis of precipitation in flood season in Flood Season in Oinhe River Basin of Middle Yellow River [J]. Water Resources and Power,39(11):19−22 (in Chinese). doi:10.20040/j.cnki.1000−7709.2021.11.005

孙继松,杨波.2008.地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J].大气科学,32(6):1352−1364. Sun J S, Yang B. 2008. Meso-βscale torrential rain affected by topoqraphy and the urhan circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,32(6):1352−1364 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2008.06.10

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. Tempora and spatial distribution characteristics of ash heavy rain 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

吴梦雯,罗亚丽.2019.中国极端小时降水 2010-2019 年研究进展[J].暴雨灾害,38(5):502−514. Wu M W, Luo Y L. 2019. Extreme hourly precipitation over China: Research progress from 2010 to 2019 [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):502−514 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.013

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 in warm season in Henan [J]. Torrential Rain and Disasters,40(2):153−159 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.02.006

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

张超,贾健.2019.乌鲁木齐市短时强降水分布特征及环境条件分析[J].沙漠与绿洲气象,13(3):41−47. Zhang C, Jia J. 2019. Distribution characteristics and environmental conditions of short-term heavy precipitation in Urumqi [J]. Desert and Oasis Meteorology,13(3):41−47 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2019.03.006

张俊兰,李伟,郑育琳.2022.昆仑山北坡短时强降水天气分型及雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,16(1):1−9. Zhang J L, Li W, Zheng Y L. 2022. Weather Classification and Radar Echo Characteristics of Short-term Heavy Precipitation in the Northern Kunlun Mountains [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(1):1−9 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2022.01.001

翟丽萍,梁依玲,周云霞,等.2024.桂林“5.22”极端强降雨过程的观测分析[J].暴雨灾害,43(3):313−321. Zhai L P, Liang Y L, Zhou Y X, et al. 2024. Observation analysis of "5.22" extreme rainfall event in Guilin [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):313−321 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−141

周雪松,孙兴池,阎丽凤,等.2012. “2007.8.17”山东大暴雨的数值模拟和诊断分析[J].气象,38(8):960−970. Zou X S, Sun X C, Yan L F, et al. 2012. Numerical simulation and analyses on the 17 August 2007 heavy rainstorm in Shandong province [J]. Meteorological Monthly,38(8):960−970 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.08.008

Luo Y L, Wu M G, Ren F M, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. Journal of Climate,29(24):8703−8719. doi:10.1175/JCLI−D−16−0057.1

Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. 2003. The changing character of precipitation [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,84(9):1205−1218. doi:10.1175/BAMS−84−9−1205

Xia J, Du H, Zeng S D, et al. 2012. Temporal and spatial variations and statistical models of extreme runoff in Huaihe River Basin during 1956-2010 [J]. Journal of Geographical Sciences,22(6):1045−1060. doi:10.1007/s11442−012−0982−6

Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al. 2007a. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. Geophysical Research Letters,34(13):L13703. doi:10.1029/2007GL030315

Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007b. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. Geophysical Research Letters,34(1):L01704. doi:10.1029/2006GL028129

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

(责任编辑 张 文)