

1954—2022 年武汉短历时强降水 时空变化特征*

姜琪¹ 秦鹏程² 刘火胜³ 史瑞琴²

1 武汉市黄陂区气象局, 武汉 430300

2 武汉区域气候中心, 武汉 430074

3 武汉市公共气象服务中心, 武汉 430048

摘要: 短历时强降水是影响城市安全运行的重要不稳定因素。利用武汉市国家气象站 20 世纪 50 年代以来逐分钟降水观测资料, 采用滑动累计法识别短历时强降水事件, 通过模糊识别法确定单次降雨过程雨型, 从发生频率、强度和雨型等方面系统分析武汉地区短历时强降水时空特征, 并初步探究城市化对短历时强降水的影响。结果表明: 1954—2022 年武汉短历时强降水事件年均发生频次、强降水量、最大单次强降水量和最大 60 min 强降水量分别为 6.9 次、289.9 mm、282.2 mm 和 98.0 mm, 总体呈微弱增加趋势, 增速分别为 $0.3 \text{ 次} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 、 $16.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $0.9 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $1.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。其中, 年强降水频次和年强降水量存在年代际特征, 近似呈现“减-增-减-增”的“W”型。强降水持续时间以 60—120 min 的发生率和贡献率均最大, 分别为 41.6% 和 32.2%。年内强降水最强时间出现在 6 月下旬至 7 月中旬, 占全年的 33.6%; 日内强降水频次近似呈单峰型, 峰值出现在 05:11—05:40 (北京时, 下同), 波谷出现在 15:58—16:47; 平均分钟雨强呈多峰分布, 主峰出现在 16:04—17:34, 波谷出现在 07:53—08:27, 白天平均大于夜间, 尤其是 14—20 时雨强较大, 春季平均分钟频次波峰和波谷较年平均有所提前。武汉强降水雨型以单峰前置 (I 型) 和均匀型 (IV 型) 为主, 其中 0—60 min 强降水以 I 型和单峰居中 (III 型) 为主, 大于 180 min 强降水则以 IV 型为主。武汉地区短时强降水空间差异较小, 城区强降水频次、持续时间和强降水量略高于郊区。

关键词: 强降水, 时空特征, 雨型, 城市化

中图分类号: P426 DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.022402

*湖北省自然科学基金(2023AFD098)、全国暴雨研究开放基金 (BYKJ2024Q01) 和海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室开放基金 (武汉大学) “武汉市强降水多时空特征及风险识别研究” (2022-04) 共同资助

2024-07-13 收稿 2025-02-24 收修订稿

第一作者, 姜琪, 主要从事气候变化和城市气象研究. Email: 1185832639@qq.com

通讯作者, 刘火胜, 主要从事天气预报和城市气象研究. Email: iu376752469@163.com

The spatio-temporal variation characteristics of short-term heavy rainfall in Wuhan from 1954 to 2022

JIANG Qi¹ QING Pengcheng² LIU Huosheng^{3*} SHI Ruiqin²

¹ Huangpi Meteorological Bureau of Wuhan, Wuhan 432200

² Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074;

³ Wuhan Public Meteorological Service Center, Wuhan 430048

Abstract: Short-duration heavy rainfall is an important unstable factor affecting the safe operation of the city. Based on the minute by minute precipitation observation data from Wuhan National meteorological station since 1950s, the sliding accumulation method was used to identify short-duration heavy rainfall events, and the fuzzy identification method is used to determine the rain pattern of every single rainfall event. In addition, the temporal and spatial characteristics of short-duration heavy rainfall in Wuhan were systematically analyzed from the aspects of occurrence frequency, intensity and rain type, and preliminarily explore the influence of urbanization on short-duration heavy rainfall. The results show that: From 1954 to 2022, the short-duration heavy rainfall events in Wuhan showed a small increasing trend, which suggests that the annual frequency of heavy rainfall, annual heavy rainfall, annual maximum 60-minute heavy rainfall and annual maximum single heavy rainfall were respectively 6.9 times, 289.9 mm, 98.0 mm and 282.2 mm, while the increasing rates were 0.3 times /10a, 16.7 mm/10a, 1.4mm/10a and 0.9 mm/10a, respectively. Among them, the frequency and amount of annual heavy precipitation exhibit interdecadal characteristics, approximately presenting a "W" shape of "decrease-increase-decrease-increase". The incidence and contribution of heavy rainfall lasting 60—120 minutes were the largest, 41.6% and 32.2%, respectively. Heavy rainfall in Wuhan mainly occurs from late June to mid-July, accounting for 33.6% of the whole year. The frequency of daily heavy precipitation is approximately unimodal, while the peak occurred at 05:11-05:40, and the trough occurred at 15:58-16:47. The average minute rainfall intensity is distributed in multi-peaks, the main peak appeared in 16:04-17:34, and the trough could be found in 07:53-08:27. The average rain intensity during the day was greater than that at night, especially during 14-20. The average frequency of peaks and valleys per minute in spring is earlier than the annual average. In terms of individual rain patterns, the heavy rainfall at each station in Wuhan was dominated by the type I and type IV rain patterns, while the heavy rainfall in 0-60 minutes was dominated by the type I and type III rain, and the heavy rainfall in more than 180 minutes was mainly type IV. The spatial variability of short-term heavy precipitation in Wuhan area is relatively small, and the frequency, duration and precipitation of heavy precipitation in urban area are slightly higher than those in suburban area.

Key words: Heavy rainfall, Spatio-temporal characteristics, Rainfall pattern, Urbanization

引言

过去几十年,在全球气候变化和快速城市化的双重影响下,全球大部地区强降水事件的发生频次和强度均呈显著上升趋势,大城市受其影响尤为显著(Zhu et al, 2019; Gu et al, 2022;

1 Chang et al, 2023), 年总降水量、暴雨频次、强度和持续时间均发生显著改变 (Donat et al,
2 2016; 孔锋和薛澜, 2019; Deng et al, 2022; Zhu et al, 2019; 苏锦兰等, 2021; 周晓敏等, 2023;
3 唐永兰等, 2024), 未来强降水极端性可能持续增强 (Hu et al, 2021), 将进一步加剧强降
4 水的灾害风险。

5 近年来,有关全球气候变化影响下强降水的变化特征,已成为国内外学术界关注的热点。
6 Donat et al (2016) 指出在过去 60 年中全球干旱地区和湿润地区强降水总量变化趋势不明
7 显,但极端日降水量都显著增加,且预计未来继续增加。孔锋和薛澜 (2019) 采用 1961—
8 2017 年中国 545 个气象站日降水数据,研究发现暴雨量和雨日在东南地区呈增加趋势,西
9 北地区变化趋势不明显。朱秀迪等 (2018) 利用北京市 20 个国家气象站 2011—2015 年小时
10 降水数据,研究了北京市短历时强降水特征,表明强降水存在明显区域差异,城市化在一定
11 程度上增加了降水强度。商守卫等 (2023) 基于成都市及周边 21 个国家气象观测站 1969—
12 2019 年日降水数据,研究指出成都地区极端降水呈下降趋势,且城镇化进程对成都地区极
13 端降水具有一定的增雨效应。上述研究的时间尺度以日或小时尺度为主,侧重于从宏观揭示
14 强降水的时空分布特征,但受观测数据限制,使用日或者小时降水量数据分析时,可能将多
15 个短历时强降水事件判识为一个强降水事件或遗漏掉跨整点的短历时强降水事件,因而对短
16 历时强降水的刻画存在一定不足 (艾婉秀等, 2024; 付超等, 2019; 郝翠等, 2023; 方德贤
17 等, 2020; 郑淋淋等, 2023)。

18 战云健等 (2021) 利用中国夏季 1965—2004 年自记纸以及 2005—2019 年的自动站分钟
19 降水数据,发现 1965—2019 年中国平均夏季降水量增加主要时是由于分钟降水频率增加,
20 分钟降水强度则没有明显趋势性变化;而连续 15~45 min 的最大降水量增加最为明显。陈
21 梅等 (2016) 利用 1974—2013 年广州市分钟降水资料,分析不同短历时 (5、10、20、30、
22 60、90 和 120 min) 年最大降雨量,得出广州市年最大 5 min 和 10 min 降雨序列在 1987 年
23 发生突变,广州市降雨愈来愈趋于集中,短历时降雨强度显著增加。冷亮等 (2021) 基于湖
24 北省地面加密自动站 2010—2015 年的分钟雨量数据,统计分析滑动累计小时雨量大于等于
25 20 mm 的事件,发现短时强降水的频次分布具有明显的月变化和日变化特征,武汉地区强
26 降水年内分布的主峰在 7 月,日内分布呈多峰分布 (07—14 时)。此外,雨型可以描述降
27 雨强度随着时间尺度的分配过程,间接反映强降水致洪或造成城市内涝积水的峰值出现时
28 间,也是短历时强降水特征研究的重要内容。曹经福等 (2021) 利用天津市 1961—2018 年
29 分钟级降水数据对暴雨过程进行分类研究,指出近 58 a 天津地区短时暴雨雨型以单峰型 (I
30 型、II型和III型) 为主,并存在明显的时空分异。成丹等 (2020) 利用 1980—2018 年武汉
31 国家基本气象观测站逐分钟降雨数据,基于同频率分析法和 Huff 雨型分析法确定了武汉主
32 城区历时 1440 min 设计暴雨雨型均为单峰型。何永晴等 (2019) 利用西宁市 1954—2017 年
33 降水分钟数据建立暴雨统计样本,发现西宁市短历时暴雨雨型单峰特征比较明显,单峰峰值
34 出现在前 1/3。上述研究基于分钟降水观测资料,揭示了短历时强降水的一些新特征,然而,

1 多数研究采用的资料序列长度有限，对短历时强降水长期演变特征的认识尚不清晰，同时，
2 对短历时强降水过程的定义标准及雨型的判识研究尚不深入。

3 本文拟利用武汉市 1950 年代以来长时间序列分钟降水资料，系统分析武汉地区短历时
4 强降水频率、强度和雨型在气候变化和城市化背景下的趋势变化及其区域差异，以期为本
5 地区极端降水气候事件研究和城市管理提供科学依据。

6 1 资料及方法

7 1.1 区域概况和资料说明

8 武汉地处江汉平原东部，大别山南坡，长江及其最大支流汉江横贯市境中央，河湖密布。
9 总体地势北高南低，地貌表现为中部为低平的长江中游平原，局部有残丘耸立，北部为低山
10 林立的低山丘陵区，南部丘陵、垄岗环抱（图 1）。21 世纪以来，武汉城市化进程迅速推进，
11 城市规模不断扩大，已成为特大城市，但同时武汉地区暴雨事件增多（张怀谷等，2023），
12 城市内涝频发，造成了巨大的社会经济损失（陈昆仑等，2020）。

13 表 1 武汉地区 5 个国家气象观测站分钟降水数据年限及观测方式

14 Table 1 Minute Precipitation data periods and observation methods of five national surface meteorological
15 observation stations in Wuhan

站名（站号）	数据年限	人工观测	自动观测
武汉（57494）	1954—2022	1954—2003	2004—2022
江夏（57493）	1967—2022	1967—2006	2007—2022
黄陂（57491）	1980—2022	1980—2006	2007—2022
新洲（57492）	1980—2022	1980—2006	2007—2022
蔡甸（57489）	1974—2022	1974—2006	2007—2022

16 本文使用资料为武汉市 5 个国家气象观测站逐分钟降水观测资料，其空间分布如图 1
17 所示，观测时间和方式见表 1。2004 年以前国家气象站降水量的观测方式为人工观测（如虹
18 吸式雨量计、翻斗式雨量计等观测方式，以雨量自记纸的形式记录），2004 年以后逐步改
19 为自动观测（如双阀容栅式雨量传感器、称重式雨量传感器等观测方式，以数值的形式记录）
20 （方怡等，2021）。资料来源于湖北省气象信息与技术保障中心，经质量控制检查，并剔除
21 数据连续缺失 1 小时以上的时段。

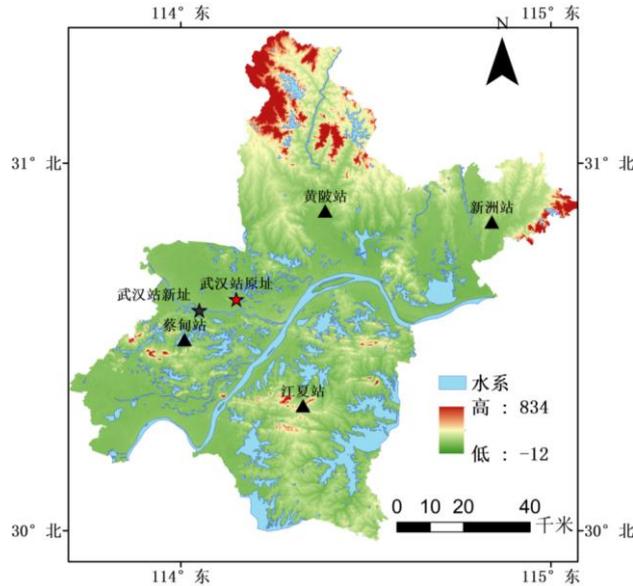


图 1 武汉市地形和国家气象站分布

Fig.1 Distribution of terrain height and stations in WuHan

由于五个气象站观测数据起止时间不同（表 1），根据研究目标，在年代际变化趋势分析中选用武汉站 1954—2022 年资料为代表，在各区域空间差异特征分析时，选用 5 个气象站 1980—2022 年相同时段的资料。此外，2009 年后武汉站迁至慈惠农场，为郊区农田下垫面，选取相同时间段进行对比分析，即 1997—2009 年武汉站在吴家山城区，为城市下垫面。黄陂站下垫面一直为农田，因此选其为郊区参照站点。通过比较 1997—2009 年和 2010—2022 年武汉站和黄陂站探究城镇化对强降水的影响。

1.2 数据处理及研究方法

1.2.1 强降水标准和过程识别

短时强降水是指 1 h 雨量在 20 mm 或 3 h 雨量在 50 mm 以上的降水事件(俞小鼎, 2013)。根据前人(曹经福等, 2021; 严正宵等, 2020)对强降水过程的定义, 结合武汉地区气候特点, 本文短历时强降水过程的识别基于逐分钟降水量进行滑动累计统计, 将满足以下两个条件的降水事件确定为一次强降水过程: (1) 60 min 滑动累计降水量大于等于 20 mm; (2) 60 min 内降水量小于 5 mm 即为强降水过程终止。

1.2.2 强降水特征统计指标

从强降水频率、强度、持续时间、累计降水量和雨型等方面, 选取以下指标: ①强降水量: 统计时段内的强降水累计量; ②强降水频次: 统计时段内的强降水发生次数; ③强降水贡献率: 不同历时或雨型强降水量占总降水量的百分比。④强降水发生率: 不同历时或雨型强降水频次占总频次的百分比。⑤不同历时最大强降水量: 单次强降水过程中滑动 30 min、

1 60 min 和 180 min 最大累计降水量。⑥不同阈值累计强降水量最短时间：单次强降水过程中
 2 滑动累计降水量达 5 mm、10 mm、20 mm、30 mm 和 50 mm 阈值所需最短时间。⑦平均分
 3 钟强降水频次：统计时段内平均每年该分钟强降水发生次数，计算如（1）式。⑧平均分钟
 4 雨强：统计时段内平均每年该分钟强降水量，计算如（2）式。⑨雨型：采用 7 种典型雨型
 5 （图 2）模型，其中 I、II、III 型均为单峰型，IV 型为均匀型，V、VI、VII 型均为双峰型（曹
 6 经福等，2021），将历次降雨过程等分为 6 个时段，通过模糊识别法确定单次降雨过程所属
 7 雨型。

$$f_i = M_i / N \quad (1)$$

$$p_i = \sum_{j=1}^{M_i} p_{ij} / M_i \quad (2)$$

10 式中， M_i 为第 i 分钟共出现强降水事件次数， N 为参加统计数据年数，本文为 69 a； p_{ij} 为第
 11 i 分钟发生的第 j 次强降水量。

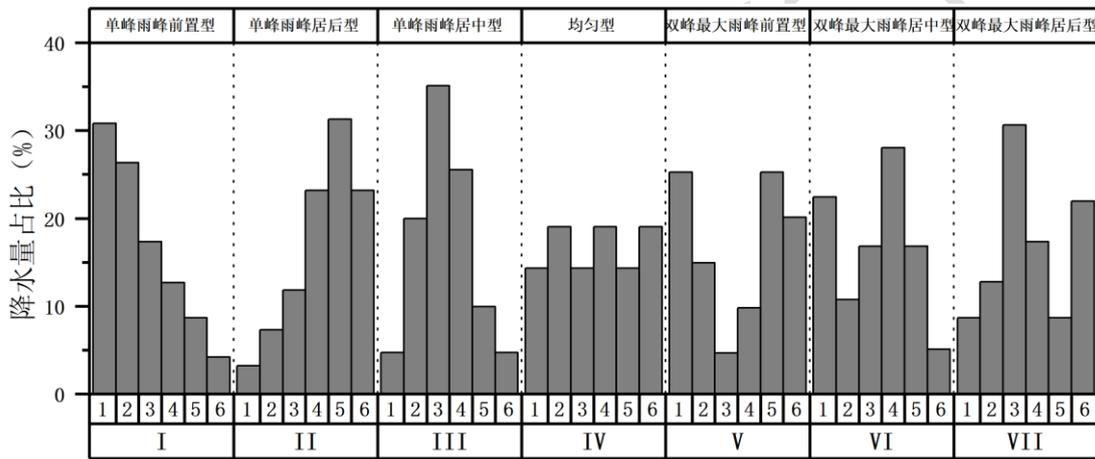


图 2 7 种典型雨型示意图

Figure 2 seven kinds of typical rain type diagram

1.2.3 雨型模糊识别法

16 雨型模糊识别法是指将每次强降雨过程等分为 n 个时段,计算每段时间内降水量 p_i 占总
 17 降水量 p_z 的比例 x_i , 建立该场降雨过程的模式矩阵 X 。计算式为:

$$x_i = p_i / p_z \quad (3)$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4)$$

20 7 种暴雨雨型(图 2), 其中 I、II、III 型均为单峰型, IV 型为均匀型, V、VI、VI 型均为
 21 双峰型, 各雨型模糊矩阵 V_k 表示为:

$$V_k = (V_{k1}, V_{k2}, \dots, V_{kn}) \quad (5)$$

23 计算每次强降水过程指标与 7 种雨型模式矩阵的贴近度, 以贴近度值最大为原则确定该
 24 场降雨过程所属雨型。其中贴近度 σ^k 的公式如下:

1

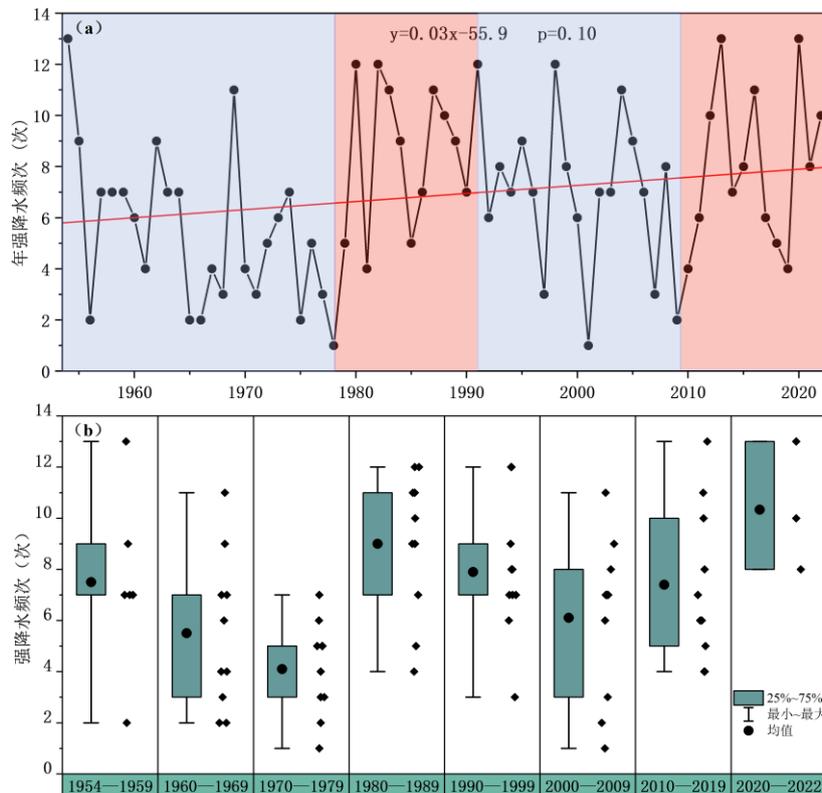
$$\sigma_k = 1 - \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (v_{ki} - x_i)^2} \quad (6)$$

2 结果与分析

3 2.1 强降水频次特征

4 以武汉站（图 3a）为代表，1954—2022 年共识别出 476 次短历时强降水事件，年平均
 5 为 6.9 次，最多年可达 13 次（1954 年、2013 年和 2020 年），最少年仅 1 次（1978 年和 2001
 6 年）；总体近似呈现“W”型，即 1954—1977 年迅速下降，1978—1990 年又显著增加，1991
 7 —2009 年转为减少趋势，2010—2022 年呈增加的趋势（图 3a）；整体为增加趋势（0.3 次·(10
 8 a)⁻¹），通过 90%置信度检验。

9 在年代际尺度上（图 3b），武汉站强降水频次在 1960—1969 年、1970—1979 年和 2000
 10 —2009 年偏少，其中 1970—1979 年偏少超过一倍标准差，仅为 4.1 次·a⁻¹；在 1980—1989
 11 年、1990—1999 和 2020—2022 年偏多，其中 1980—1989 年和 2020—2022 年偏多超过一倍
 12 标准差，分别为 9.0 次·a⁻¹ 和 10.3 次·a⁻¹。此外，从 2000—2009 年、2010—2019 年和 2020
 13 —2022 年三个时间段来看，强降水事件有增加的趋势。



14

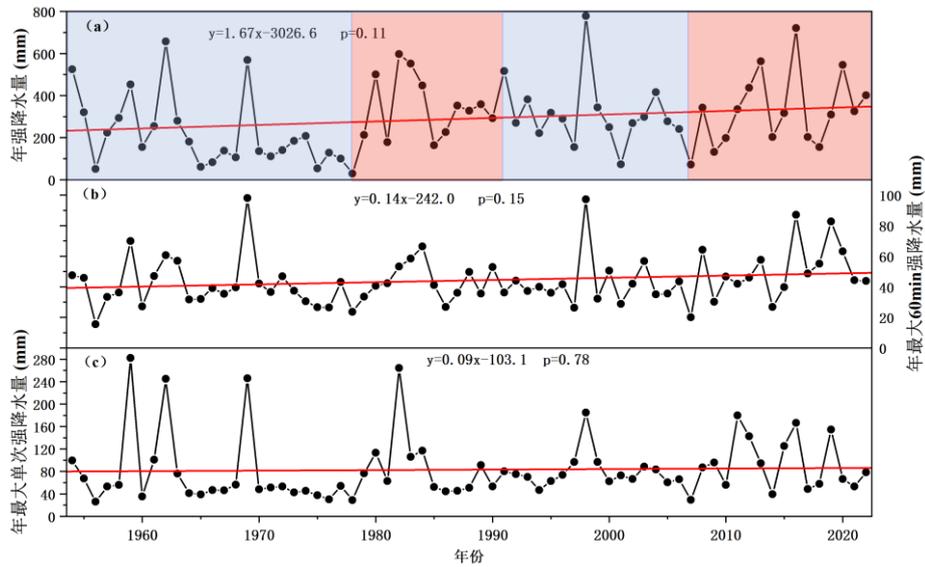
15 图 3 武汉站 1954—2022 年年强降水频次（单位：次）（a）年变化点线图和（b）年际变化箱线图

16 Figure 3 Annual variation point plot(a) and interannual variation box (b) plot of the annual intense precipitation

17 frequency (unit: times) in Wuhan Station from 1954 to 2022

1 **2.2 降水强度特征**

2 分析年强降水量、年最大 60 min 强降水量、年最大单次强降水量和年最短 20 mm 强降
 3 水量时间进以表征降水强度（图 4）。1954—2022 年武汉站年强降水量平均为 289.9 mm，
 4 整体呈增加趋势（ $16.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ， $p=0.11$ ），未通过 95%置信度检验，波动近似为“W”
 5 型，但极值出现时间不同，极大值出现在 1998 年（778.4 mm），极小值出现在 1978 年（28.8
 6 mm）。年强降水量和年强降水频次峰值出现时间并不完全重合，可见年强降水量并不只依
 7 赖于年强降水频次。1954—2022 年武汉站年最大 60 min 强降水量和年最大单次强降水量平
 8 均分别为 44.2 mm 和 83.3 mm，最大值分别为 98.0 mm 和 282.2 mm，整体均无明显周期，
 9 表现为在波动中缓慢增加的趋势，增加速率分别为 $1.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ （ $p=0.15$ ）和 $0.9 \text{ mm} \cdot (10$
 10 $\text{a})^{-1}$ （ $p=0.78$ ），但均未通过 95%置信度检验。此外，对于更短时间尺度而言，如 30 min 强
 11 降水量，增加趋势更为显著。



12
 13 图 4 武汉站 1954—2022 年 (a) 年强降水量、(b) 年最大 60 min 强降水量和 (c) 年最大单次强降水量变
 14 化 (单位: mm)

15 Figure 4 Changes of annual intense precipitation (a), annual maximum 60-minute intense precipitation (b) and
 16 annual maximum single-time intense precipitation (c) in Wuhan Station from 1954 to 2022 (unit: mm)

17
 18 表 2 武汉站 5 mm、10 mm、20 mm、30 mm 和 50 mm 累计强降水量最短时间年代际统计 (单位: min)
 19 Table2 Wuhan Station 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, and 50 mm Cumulative intensive precipitation for the
 20 shortest time period Era Statistics (unit: minute)

	5 mm 累计强降 水量最短时间		10 mm 累计强降 水量最短时间		20 mm 累计强降 水量最短时间		30 mm 累计强降 水量最短时间		50 mm 累计强降 水量最短时间	
	最小	平均	最小	平均	最小	平均	最小	平均	最小	平均
1954—1959	2	8.9	4	24.0	9	61.5	19	73.2	36	155.0
1960—1969	2	7.3	4	18.5	8	48.9	12	56.0	29	103.4
1970—1979	2	7.0	5	18.0	12	52.0	32	70.3	67	133.8
1980—1989	2	8.1	4	20.3	7	53.0	12	69.1	30	89.9
1990—1999	2	8.3	4	19.8	8	49.7	14	70.9	23	105.7

2000—2009	1	6.6	2	17.2	6	51.3	16	63.4	41	125.9
2010—2019	2	6.6	4	16.6	8	47.0	14	61.3	32	106.1
2020—2022	2	5.1	4	12.4	9	42.0	15	67.1	35	124.7

1 注：加粗表示同列最小值

2

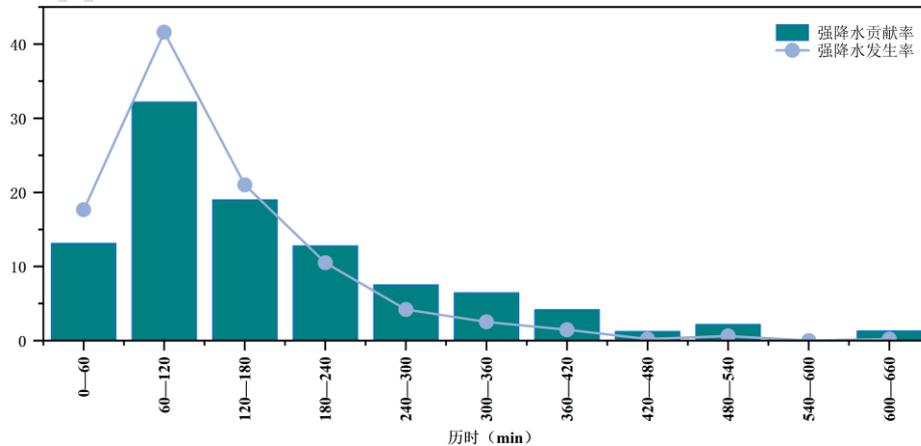
3 按年代统计不同阈值累计强降水量最短时间最小值和平均值，进一步分析短历时强降水
4 过程分钟雨强特征（表 2）。武汉站 1954—2022 年年平均 5 mm、10 mm、20 mm、30 mm
5 和 50 mm 累计强降水量最短时间分别为 7.4 min、18.7 min、50.8 min、66.5 min 和 111.5 min。
6 在年代际尺度上，5 mm、10 mm 和 20 mm 累计强降水量最短时间最小值均出现在 2000—2009
7 年，分别为 1 min、2 min 和 6 min，平均时间最小值出现在 2020—2022，分别为 5.1 min、
8 12.4 min 和 42.0 min。5 mm 和 10 mm 和 20 mm 累计强降水量最短时间和平均时间均在 2000
9 年后较小，此外，年际趋势上均表现为减少，尤其是 5 mm 和 10 mm 通过 95% 置信度检验。
10 可见武汉雷暴强度越来越大，尤其是 2000 年后，且强降水过程中极端分钟降水量在增加（张
11 恒进和郑永光，2022）。30 mm 累计强降水量最短时间最小值为 12 min（1960—1969 年和
12 1980—1989 年），平均时间最小值为 56.0 min（1960—1969 年）；50 mm 累计强降水量最
13 短时间最小值为 23 min（1990—1999 年），平均时间最小值为 89.9 min（1980—1989 年）。

14

15 2.3 强降水历时特征

16 不同历时强降水发生率和强降水贡献率如图 5 所示。强降水历时为 60—120 min 的发生
17 率和贡献率均最大，分别为 41.6% 和 32.2%，在 0—60 min、120—180 min 和 180—240 min
18 强降水发生率和贡献率也均较大，分别为 17.6%、21.0%、10.5% 和 13.1%、19.0%、12.8%，
19 其他历时均小于 10%，此外，0—30 min 强降水事件发生率仅为 0.8%。60—120 min 之后随
20 着历时增加发生率和贡献率均呈指数形式递减，说明历时越长强降水贡献率和发生率均迅速
21 减小。在强降水事件历时小于 180 min 时，各历时强降水发生率均小于强降水贡献率，而在
22 大于 180 min 时表现相反。

23



24

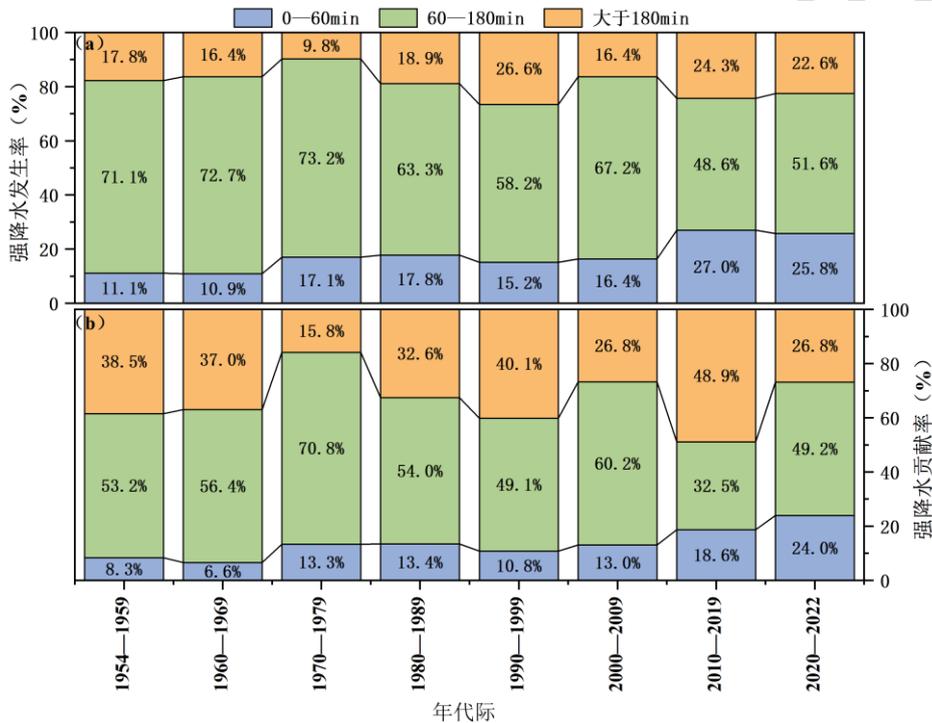
图 5 武汉站 1954—2022 年不同历时强降水发生率和强降水贡献率 (%)

25

Figure 5 Occurrence rate and contribution rate (%) of heavy rainfall in different periods of Wuhan Station from

1

2 将各历时合并为 0—60 min、60—180 min 和大于 180 min 分析不同历时强降水发生率和
 3 贡献率的年代际变化如图 6 所示。其中，60—180 min 强降水平均发生率最大，为 62.6%；0
 4 —60 min 强降水平均发生率最小，仅为 17.6%；大于 180 min 强降水平均发生率为 19.7%。
 5 但在不同年代际有所不同，60—180 min 强降水发生率仅在 2010—2019 年低于一半，为
 6 48.6%，1970—1979 年最大（73.2%）；不同年代际 0—60 min 强降水平均发生率为
 7 11.1%~27.0%，且呈增加趋势，即 0—60 min 历时强降水事件发生概率越来越大；大于 180 min
 8 强降水平均发生率为 9.8%~26.6%。就强降水贡献率而言，0—60 min 和 60—180 min 占比较
 9 发生率有一定减小，分别 13.1%和 51.2%；而大于 180 min 占比增加到 35.7%，尤其是 2010
 10 —2019 年最大，且大于 60—180 min 强降水贡献率，达 48.9%。



11

12 图 6 武汉站 1954—2022 年 0—60 min、60—180 min 和大于 180 min 历时年强降水发生率 (a) 和贡献率 (b)
 13 年代际变化 (单位: %)

14

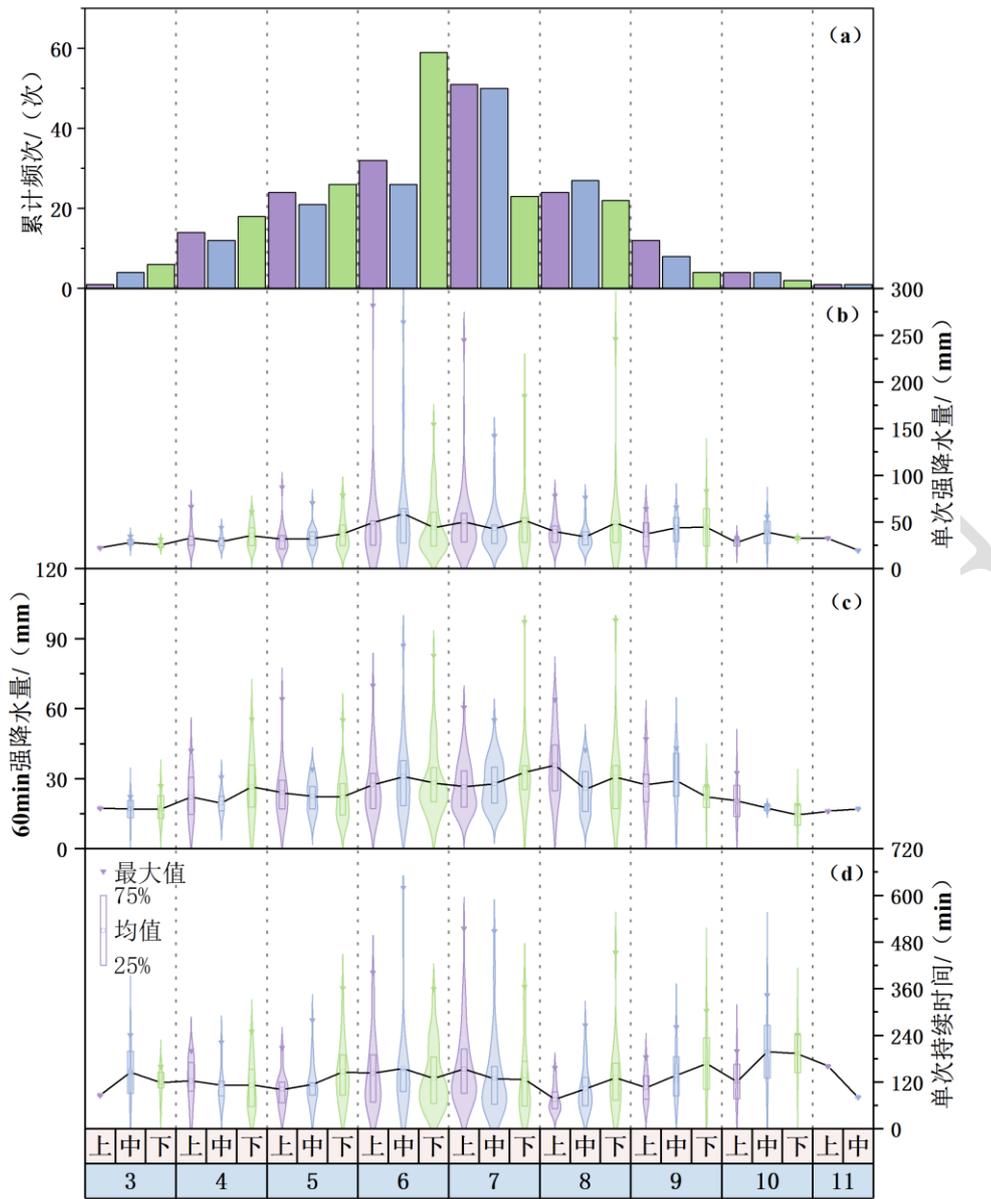
15 Figure 6 Interdecadal changes of annual heavy rainfall incidence (a) and contribution rate (b) (unit: %) during 0—
 16 60 minutes, 60—180 minutes and more than 180 minutes at Wuhan Station during 1954—2022

17 **2.4 强降水季节和日内特征**

18 武汉站 1954—2022 年强降水过程年内不同时段发生频次显示 (图 7a)，强降水发生频
 19 次呈单峰型，峰值出现在 6 月下旬，占比 12.4%。武汉站强降水出现在 3 月上旬至 11 月中
 20 旬，其中 5—8 月占全年强降水事件的 80.9%，尤其是 6 月下旬到 7 月中旬，占全年 33.6%。
 21 这是因为 4 月上旬开始常常有冷暖空气在长江中下游交汇，产生降水，有时遇上西南涡东移
 22 降水过程多，持续时间长，强降水总量大；8 月出梅进入盛夏，武汉地区被副高控制，高温

1 高湿易产生局地雷雨天气，降水强度大、持续时间短（江洁等，2022；汪小康等，2024）。

2 武汉站平均单次强降水量（图 7b）和平均 60 min 最大强降水量（图 7c）旬变化与平均
3 强降水量类似，均近似呈单峰分布，峰值分别也出现在 6 月中旬（59.0 mm）和 8 月上旬（35.7
4 mm）。可见 8 月上旬多发生短时强降水，单次降水量不大，但雨强较大。平均单次持续时
5 间（图 7d）旬变化则呈多峰分布，最大峰值出现在 10 月中旬（198.0 min），另外两个峰值
6 分布出现在 6 月中旬（155.0 min）和 9 月下旬（167.5 min）。从最大值来看，最大单次强
7 降水量、60 min 最大强降水量和最长单次持续时间旬变化特征与平均值有所不同，没有明
8 显峰型特征。最大单次强降水量出现在 6 月上旬（282.2 mm），6 月中旬、7 月上旬和 8 月
9 下旬最大单次强降水量也均超过 200 mm，分别为 264.3 mm、244.8 mm 和 246.0 mm；60 min
10 最大强降水量出现在 8 月下旬（98.0 mm），7 月下旬也超过 90 mm，为 97.2 mm；最长单
11 次持续时间出现在 6 月中旬（620 min），此外 7 月中旬和下旬也较大（515 min 和 508 min）。
12 可见 6 月上旬至 7 月中旬强降水事件往往持续时间长，累计降水量大，而 7 月下旬到 8 月下
13 旬强降水 60 min 雨强大。



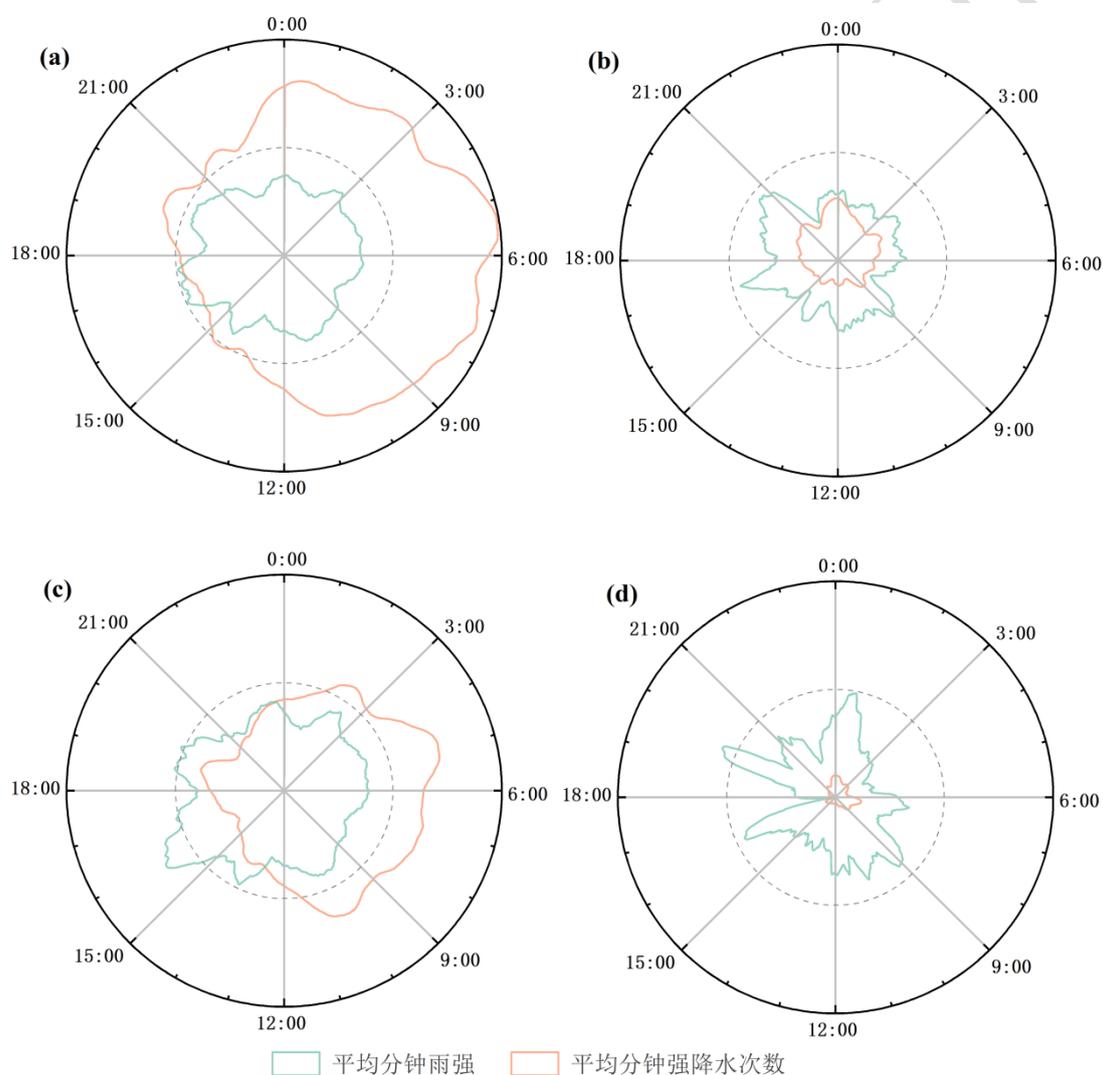
1
2 图7 武汉站强降水累计频次 (a, 单位: 次)、单次强降水量、60 min 最大强降水量 (b、c, 单位: mm)
3 和单次持续时间 (d, 单位: min) 旬变化

4 Figure 7 Changes of cumulative frequency of heavy rainfall (a, unit: times), single heavy rainfall , 60-minute
5 maximum heavy rainfall (b, c, unit: mm) and single durations (d, unit: minute) at Wuhan Station

6 从日变化上看 (图 8a), 武汉站短历时强降水过程年平均分钟频次近似呈单峰型, 峰
7 值出现 05:11—05:40, 为 $0.89 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$, 谷值出现在 15:58—16:47, 为 $0.38 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$, 且夜间
8 (20—08 时) 占全日 56.3%, 大于白天 (08—20 时)。这是因为低空急流往往夜间增强,
9 后半夜达最强, 此外地面气压在 05 时附近较低, 促使辐合增强, 有利于系统性强降水发生
10 发展, 但此类降水往往持续时间较长, 即强降水频次较多, 但平均分钟雨强较小。武汉站平
11 均分钟雨强整体呈显著的多峰型特征, 主峰出现在 16:04—17:34, 最大分钟雨强为 0.43 mm,
12 次峰为 19:13—20:05 (0.41 mm), 波谷出现在 07:53—08:27, 最小分钟雨强为 0.25 mm, 白

1 天平均分钟雨强大于夜间。此外，30 min 短历时强降水事件也大都发生在 14—21 时。武汉
 2 地区午后太阳辐射强，地面蒸发强，经过几个小时的水汽积累，对流单体不断发展，降水强
 3 度逐渐增大，发展为短时强降水，这类降水往往持续时间短而雨强大，因此 14—20 时，武
 4 汉平均分钟雨强较大，而平均分钟强降水次数较少。

5 不同季节武汉站短历时强降水过程平均分钟频次和平均分钟雨强特征也存在差异（图
 6 8b、图 8c 和图 8d）。春季平均分钟频次波峰和波谷较年平均有所提前，峰值出现 0 时附近，
 7 为 $0.26 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ，谷值出现在 13 时前后，仅为 $0.08 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ；最大平均分钟雨强为 0.42 mm ，
 8 出现在 16:30 附近。夏季平均分钟频次和平均分钟雨强特征与年平均相近，但午后 16:30 前
 9 后平均分钟雨强更大 (0.95 mm)。秋季强降水过程平均分钟频次较小，峰值仅为 $0.11 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ，
 10 但平均分钟雨强峰值较大 (0.54 mm)，出现在 19:30 前后。

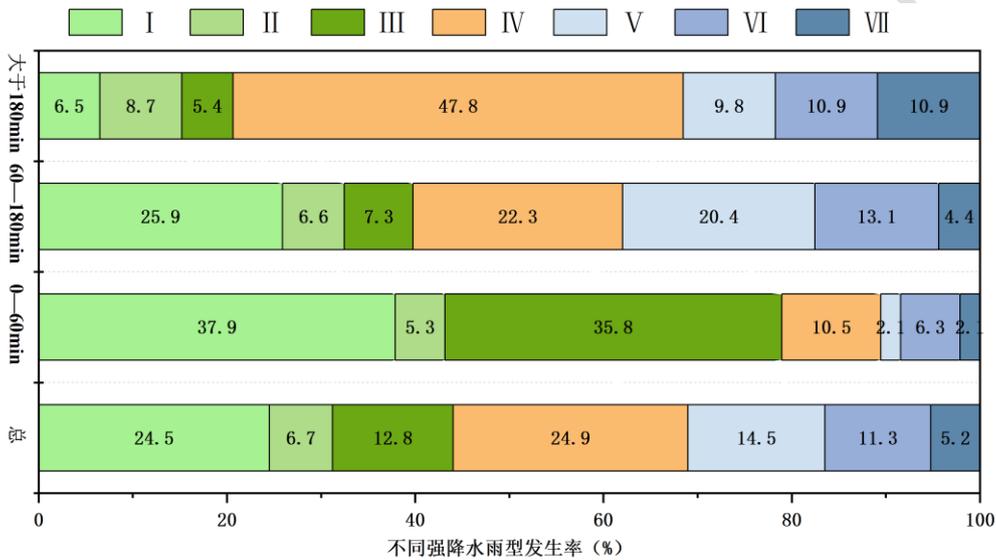


11
 12 图 8 武汉站 1954—2022 年 (a) 年、(b) 春季、(c) 夏季和 (d) 秋季短历时强降水过程平均分钟频次 (单
 13 位: 次数) 和平均分钟雨强 (单位: mm/min) 日内变化

14 Fig.8 Intraday variation of average minute frequency (unit: times) and average minute rain intensity (unit:
 15 mm/min) of the short duration heavy precipitation in Wuhan Station

1 **2.5 强降水雨型特征**

2 武汉站 7 种雨型占比如图 9，总体上单峰型（第 I 型、第 II 型和第 III 型）占 44.0%，其中
 3 主要是第 I 型单峰型，为 24.5%；双峰型（第 V 型、第 VI 型和 VII 型）占 31.0%，均匀型占比
 4 为 24.9%；其中，而第 II 型和第 VII 型雨型出现概率较小，这可能是由于第 II 型和第 VII 型雨型
 5 在降水较大时突然结束，即降水云系较小，移动到其他区域，可见武汉大多数强降水发生在
 6 系统性降水背景下。不同历时强降水雨型有较大差异，0—60 min 强降水站均以单峰型为主，
 7 出现概率高达 78.9%，其中第 I 型和第 III 型雨型贡献大，这与曹经福等（2021）对天津短时
 8 暴雨雨型分析结论基本一致。60—180 min 强降水均匀型和双峰型均较 0—60 min 有所增加，
 9 整体表现为第 I 型、第 IV 型、第 V 型和第 VI 型出现概率均较大。



10
 11 图 9 武汉站不同强降水雨型发生率 (a: 所有历时、b: 0—60 min、c: 60—180 min 和 d: 大于 180 min 历
 12 时，单位：%)

13 Figure 9 Incidence of different heavy rainfall types in Wuhan Station (a: all durations, b: 0-60 minutes, c: 60-180
 14 minutes, d: durations greater than 180 minutes, unit: %)

15

16 **2.6 城郊强降水特征差异**

17 表 3 1980—2022 年武汉各站点强降水统计

18 Table 3 Statistics of Heavy Rainfall at Various Stations in Wuhan from 1980 to 2022

	武汉站	江夏站	黄陂站	新洲站	蔡甸站
平均年强降水频次 (次)	7.8	7.4	7.2	7.6	7.3
平均年强降水量 (mm)	333.7	306.5	304.8	319.6	327.1
平均年最大 60 min 强降水量 (mm)	46.1	42.2	47.1	44.0	47.2
平均年最大单次强降水量 (mm)	87.5	76.5	90.8	82.0	87.9
平均单次强降水持续时间 (min)	132.2	132.2	126.3	126.0	129.2

19 注：加粗表示每行最大值和最小值

20 为探究武汉强降水趋势变化特征空间差异，统一使用 1980—2022 年对武汉各站点统计
 21 分析（表 3）。武汉各站 1980—2022 年平均年强降水频次、平均年强降水量和平均单次强

1 降水持续时间分别为 7.2~7.8 次、304.8~333.7 mm 和 126.0~132.2 mm，最大值均出现在武汉
 2 站，最小值出现站点不尽相同，依次为黄陂站、黄陂站和新洲站。可见武汉地区短时强降水
 3 的空间差异性较小。平均年最大 60 min 强降水量和平均年最大单次强降水量，最小均为江
 4 夏站（42.2 mm 和 76.5 mm），最大分别为蔡甸站（47.2 mm）和黄陂站（90.8 mm）。对比
 5 江夏站和黄陂站来看，两站的平均年强降水量相近，但黄陂站平均年最大 60 min 强降水量
 6 和平均年最大单次强降水量均大于江夏站。可见黄陂站强降水事件的雨强和单次过程总量上
 7 极端性更强。

8 1997—2009 年城区站(武汉站)强降水频次和强降水量大多数年份大于郊区站(黄陂站)，
 9 2010—2022 年则城区站小于郊区站年份更多，可见武汉站迁至郊区后，强降水频次和强降
 10 水量较郊区站差异明显减小（表 4）。此外，1997—2009 年武汉站强降水频次、强降水量和
 11 强降水持续时间分别为 6.5 次、280.6 毫米和 830.9 min，黄陂站分别为 5.6 次、223.9 毫米和
 12 646.6 min，城区站强降水指标均高于郊区站，为其 1.2~1.3 倍（表 3），2010—2022 年城区
 13 站和郊区站强降水频次、强降水量和强降水持续时间相差无几。

14 进一步分析城郊不同历时强降水差异，0—60 min 年强降水频次在 1997—2009 年城区
 15 站（1.1 次）小于郊区站（1.5 次），2010—2022 年均增加，且城区站增加幅度更大，城区
 16 站（2.2 次）反超郊区站（1.7）。60—180 min 年强降水频次在 1997—2009 年城区站（4.2
 17 次）大于郊区站（3.3 次），2010—2022 年城区站减少至 4.0 次，而郊区站增加至 4.8 次。
 18 大于 180 min 强降水较为极端，2010 年后武汉地区极端强降水频发。城区站和郊区站强降
 19 水大于 180 min 频次较 1997—2009 年增加 0.7 次和 0.8 次，从而导致二者比值减小。

20
 21 表 4 武汉站和黄陂站 1997—2009 年和 2010—2022 年统计

22 Table 4 Statistics of Wuhan Station and Huangpi Station from 1997 to 2009 and 2010 to 2022

	武汉	黄陂	武汉/黄陂	
1997—2009 年	强降水频次（次）	6.5	5.6	1.2
	强降水总量（mm）	280.6	223.9	1.3
	强降水持续时间（min）	830.9	646.6	1.3
	0—60 min 强降水频次（次）	1.1	1.5	0.7
	60—180 min 强降水频次（次）	4.2	3.3	1.3
	大于 180 min 强降水频次（次）	1.2	0.8	1.6
2010—2022 年	强降水频次（次）	8.1	8.2	1.0
	强降水总量（mm）	362.4	362.8	1.0
	强降水持续时间（min）	1042.2	1040.5	1.0
	0—60 min 强降水频次（次）	2.2	1.7	1.3
	60—180 min 强降水频次（次）	4.0	4.8	0.8
	大于 180 min 强降水频次（次）	1.9	1.6	1.2

23

24 **3 结论与讨论**

1 3.1 结论

2 本文利用武汉市长时间序列分钟降水资料，从强降水频率、强度、持续时间和雨型等方面系统分析武汉地区强降水特征，并初步探究城市化对强降水的影响。主要结论如下：

3 (1) 1954—2022 年武汉站共出现 476 次短历时强降水事件，年均 6.9 次，最多年达 13
4 次，年强降水量平均为 289.9 mm，最大单次过程强降水量为 282.2 mm，最大 60 min 强降水
5 量为 98.0 mm。1954 年以来短历时强降水过程频次、年均强降水量、年最大单次强降水量
6 和最大 60 min 强降水量总体呈微弱增加趋势，增速分别为 $0.3 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $16.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、
7 $0.9 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $1.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。其中，年强降水频次和年强降水量存在年代际特征，
8 近似呈“W”型，2000 年以来强降水频次增加明显。2000 年后，武汉雷暴强度越来越大，5 mm
9 和 10 mm 和 20 mm 累计强降水量最短时间和平均时间均较小。

10 (2) 武汉地区从 3 月上旬至 11 月中旬，均可能出现短历时强降水，其中 5—8 月强降
11 水事件占全年的 80.9%，尤其是 6 月下旬至 7 月中旬，占全年的 33.6%。6 月上旬至 7 月中
12 旬强降水事件持续时间长、累计降水量大，7 月下旬至 8 月下旬强降水以 60 min 雨强最大。

13 (3) 武汉地区短历时强降水频次日变化近似呈单峰型，峰值出现凌晨 05:11—05:40，
14 谷值出现在下午 15:58—16:47，夜间（20—08 时）占全日的 56.3%，大于白天（08—20 时）。
15 平均分钟雨强呈多峰型特征，主峰出现在 16:04—17:34，次峰出现在 19:13—20:05，波谷出
16 现在 07:53—08:27，白天平均分钟雨强大于夜间，尤其是 14—20 时雨强较大。春季平均分
17 钟频次波峰和波谷较年平均有所提前，夏季平均分钟频次和平均分钟雨强特征与年平均相
18 近，秋季强降水过程平均分钟频次较小。

19 (4) 武汉地区短历时强降水以 60—120 min 历时的发生率和贡献率最大，分别占 41.6%
20 和 32.2%，随着历时增长发生率和贡献率均呈指数形式递减。1954 年以来，0—60 min 强降
21 水发生率有明显增加趋势。

22 (5) 武汉地区短历时强降水总体以单峰前置型（I型，24.5%）和均匀型（IV型，24.9%）
23 雨型为主。不同历时强降水雨型存在一定差异，0—60 min 强降水以单峰型（78.9%）为主，
24 其中单峰前置型（I型）占 37.9%，单峰后置型（III型）占 35.8%；大于 180 min 强降水以均
25 匀型（IV型）和双峰型为主，其中均匀型占 47.8%。

26 (6) 武汉地区短时强降水的空间差异性较小。城郊各站 1980—2022 年平均年强降水频
27 次、平均年强降水量和平均单次强降水持续时间范围分别为 7.2~7.8 次、304.8~333.7 mm 和
28 126.0~132.2 mm，城区强降水频次、持续时间和强降水量略高于郊区。

29 3.2 讨论

30 本文基于分钟降水数据系统揭示了武汉地区短历时强降水的发生频次、强度及其年、季
31 和日内分布特征，与冷亮等（2021）和谌伟等（2022）基于地面分钟和小时雨量数据对湖北
32 省短时强降水的分析结论总体一致，其中本文对武汉地区降水频次和强度的日内分布特征及
33 雨型的刻画更具体，这对于城市强降水灾害风险管理和应急预案的制订具有重要的指导意
34

1 义。武汉地区短历史强降水雨型统计结果表明, 主导雨型以单峰前置 (I 型) 和均匀型 (IV
2 型) 为主, 这与天津等北方城市雨型以I型为主有所不同 (曹经福等, 2021), 此外, 不同
3 历时主导雨型存在明显差异, 可见针对性开展短历时强降水的精细分型十分必要。

4 本文基于武汉站迁站前后及其与黄陂站强降水特征的比较, 初步揭示了城市化对强降水
5 发生频次、强度和历时存在一定影响, 其影响机理和程度尚需进一步结合数值模式和其他资
6 料深入分析。同时, 本文利用武汉市内 5 个国家气象站长序列观测资料分析不同地区短历时
7 强降水特征未发现显著差异, 下一步可结合高密度区域站观测资料, 更细致探究武汉地区短
8 时强降水的空间差异。

9 10 11 12 参考文献(References):

- 13 艾婉秀, 赵珊珊, 陈鲜艳, 等, 2024. 1961~2020 年三峡库区极端降水的变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 33(3): 625-633. Ai
14 W X, Zhao S S, Chen X Y, et al, 2024. Characteristics of extreme precipitation in the Three Gorges Reservoir Region during 1961~
15 2020[J]. Res Environ Yangtze Basin, 33(3): 625-633 (in Chinese).
- 16 曹经福, 杨艳娟, 郭军, 等, 2021. 天津市短时暴雨雨型时空分异及其对城市内涝的影响[J]. 气象与环境学报, 37(4): 114-121. Cao
17 J F, Yang Y J, Guo J, et al, 2021. Spatiotemporal differentiation of short-duration rainstorm pattern and its influence on urban
18 waterlogging in Tianjin[J]. J Meteor Environ, 37(4): 114-121 (in Chinese).
- 19 陈昆仑, 许红梅, 李志刚, 等, 2020. 快速城市化下的武汉城市暴雨渍水空间特征及发生机制[J]. 经济地理, 40(5): 129-135, 219.
20 Chen K L, Xu H M, Li Z G, et al, 2020. The spatial characteristics and formation mechanism of urban rainstorm waterlogging under
21 the influence of human activities in Wuhan[J]. Econ Geogr, 40(5): 129-135, 219 (in Chinese).
- 22 陈梅, 陈斯达, 刘曾美, 等, 2016. 广州市中心城区短历时暴雨变异特性研究[J]. 人民长江, 47(12): 1-5, 22. Chen M, Chen S D, Liu
23 Z M, et al, 2016. Study on variation characteristics of short-duration rainstorm in central urban area of Guangzhou[J]. Yangtze River,
24 47(12): 1-5, 22 (in Chinese).
- 25 谌伟, 刘佩廷, 徐枝芳, 等, 2022. 湖北强降水频次时空特征及基于 GWR 模型的地形关系分析[J]. 热带气象学报, 38(2): 216-226.
26 Chen W, Liu P T, Xu Z F, et al, 2022. Spatio-temporal characteristics of frequency of heavy rainfall events in Hubei province and
27 analysis of topographic relationship based on GWR[J]. J Trop Meteor, 38(2): 216-226 (in Chinese).
- 28 成丹, 陈翠珍, 陈正洪, 等, 2020. 武汉市暴雨的雨峰和历时及其排水防涝的分析[J]. 暴雨灾害, 39(5): 532-538. Cheng D, Chen C Z,
29 Chen Z H, et al, 2020. Analysis of rainfall peak and duration of rainstorm for drainage and waterlogging prevention in Wuhan[J].
30 Torr Rain Dis, 39(5): 532-538 (in Chinese).
- 31 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等, 2020. 2008~2016 年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学, 44(2): 327-340. Fang D X, Dong X N,
32 Deng C Z, et al, 2020. Temporal and spatial distribution of precipitation in Chongqing during 2008-2016[J]. Chin J Atmos Sci, 44(2):
33 327-340 (in Chinese).
- 34 方怡, 陈城, 胡昌琼, 等, 2021. 自动观测与人工观测的短历时雨量差异分析[J]. 暴雨灾害, 40(1): 94-100. Fang Y, Chen C, Hu C Q,
35 et al, 2021. The difference between short-duration rainfall by automatic recording and manual observation[J]. Torr Rain Dis, 40(1):
36 94-100 (in Chinese).
- 37 付超, 谌芸, 朱克云, 等, 2019. 2010—2016 年江西省暖季短历时强降水特征分析[J]. 气象, 45(9): 1238-1247. Fu C, Chen Y, Zhu K Y,
38 et al, 2019. Characteristics of flash heavy rain in Jiangxi warm season from 2010 to 2016[J]. Meteor Mon, 45(9): 1238-1247 (in
39 Chinese).
- 40 郝翠, 于波, 戴翼, 等, 2023. 北京地区汛期降水时空分布的统计降尺度研究[J]. 气象, 49(7): 843-854. Hao C, Yu B, Dai Y, et al,
41 2023. Statistical downscaling research on spatio-temporal distributions of summer precipitation across the Beijing region[J]. Meteor
42 Mon, 49(7): 843-854 (in Chinese).

- 1 何永晴, 尹继鑫, 沈洁, 等, 2019. 西宁市短历时暴雨雨型及适用性分析[J]. 冰川冻土, 41(4): 900-906. He Y Q, Yin J X, Shen J, et al,
2 2019. Analysis of short duration rainstorm type and its applicability in Xining City[J]. J Glaciol Geocryol, 41(4): 900-906 (in
3 Chinese).
- 4 江洁, 周天军, 张文霞, 2022. 近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. 大气科学, 46(3): 707-724. Jiang J, Zhou T J, Zhang W
5 X, 2022. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years[J]. Chin J
6 Atmos Sci, 46(3): 707-724 (in Chinese).
- 7 孔锋, 薛澜, 2019. 1961~2017 年中国不同长历时暴雨与总降雨事件的空间分异特征对比研究[J]. 长江流域资源与环境, 28(9):
8 2262-2277. Kong F, Xue L, 2019. Comparative study on spatial differentiation characteristics of different long duration heavy
9 rainfall and total rainfall events in China from 1961 to 2017[J]. Res Environ Yangtze Basin, 28(9): 2262-2277 (in Chinese).
- 10 冷亮, 周伶俐, 肖艳姣, 等, 2021. 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[J]. 暴雨灾害, 40(1): 61-68.
11 Leng L, Zhou L L, Xiao Y J, et al, 2021. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Hubei
12 Province based on minute rain gauge data[J]. Torr Rain Dis, 40(1): 61-68 (in Chinese).
- 13 商守卫, 王磊之, 王银堂, 等, 2023. 1960-2019 年成都地区极端降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 39(3): 195-204. Shang S W,
14 Wang L Z, Wang Y T, et al, 2023. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area
15 from 1960 to 2019[J]. Water Resour Protect, 39(3): 195-204 (in Chinese).
- 16 苏锦兰, 张万诚, 宋金梅, 等, 2021. 云南小时降水的时空分布变化研究[J]. 气象, 47(2): 133-142. Su J L, Zhang W C, Song J M, et
17 al, 2021. Study on spatio-temporal distribution of hourly precipitation in Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 47(2): 133-142 (in
18 Chinese).
- 19 唐永兰, 徐桂荣, 祁海霞, 2024. 三峡库区蓄水前后夏季小时降水变化特征[J]. 气象, 50(9): 1081-1092. Tang Y L, Xu G R, Qi H X,
20 2024. Variation characteristics of summer hourly precipitation before and after impoundment in the Three Gorges Reservoir Area[J].
21 Meteor Mon, 50(9): 1081-1092 (in Chinese).
- 22 汪小康, 崔春光, 刘柯, 等, 2024. 中国主雨季极端小时降水时空分布和日变化特征[J]. 气象, 50(4): 393-406. Wang X K, Cui C G,
23 Liu K, et al, 2024. Spatio-temporal distribution and diurnal variation of extreme hourly precipitation in China during the main rainy
24 season[J]. Meteor Mon, 50(4): 393-406 (in Chinese).
- 25 严正宵, 夏军, 宋进喜, 等, 2020. 中小流域设计暴雨雨型研究进展[J]. 地理科学进展, 39(7): 1224-1235. Yan Z X, Xia J, Song J X,
26 et al, 2020. Research progress on design hyetographs in small and medium-scale basins[J]. Prog Geogr, 39(7): 1224-1235 (in
27 Chinese).
- 28 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
29 flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3): 202-209 (in Chinese).
- 30 战云健, 鞠晓慧, 范邵华, 等, 2021. 1965—2019 年中国夏季分钟降水空间分布与长期趋势分析[J]. 气象学报, 79(4): 598-611. Zhan
31 Y J, Ju X H, Fan S H, et al, 2021. An analysis of minute summer precipitation in China during 1965—2019[J]. Acta Meteor Sin,
32 79(4): 598-611 (in Chinese).
- 33 张怀谷, 程磊, 刘攀, 等, 2023. 城镇化对武汉市极端降水过程的影响研究——以“7.23”暴雨为例[J]. 武汉大学学报(工学版), 56(6):
34 669-678. Zhang H G, Cheng L, Liu P, et al, 2023. The impact of the urbanization on extreme precipitation process in Wuhan City: a
35 case study of the “7.23” rainstorm[J]. Eng J Wuhan Univ, 56(6): 669-678 (in Chinese).
- 36 张恒进, 郑永光, 2022. 基于逐时观测的 1971—2010 年中国大陆雷暴气候特征[J]. 气象学报, 80(1): 54-66. Zhang H J, Zheng Y G,
37 2022. Thunderstorm climatology over mainland China based on hourly observations during 1971—2010[J]. Acta Meteor Sin, 80(1):
38 54-66 (in Chinese).
- 39 郑淋淋, 张申葵, 邱学兴, 等, 2023. 大别山对一次冷涡对流的作用分析[J]. 大气科学, 47(6): 2001-2019. Zheng L L, Zhang S Y, Qiu
40 X X, et al, 2023. Impacts of the Dabie Mountains on a mesoscale convective system that occurred in the background of the northeast
41 cold vortex[J]. Chin J Atmos Sci, 47(6): 2001-2019 (in Chinese).
- 42 周晓敏, 田付友, 郑永光, 等, 2023. 中国短时强降雨对暴雨的贡献特征[J]. 气象, 49(3): 267-278. Zhou X M, Tian F Y, Zheng Y G,
43 et al, 2023. Contribution of short-duration heavy rainfall to rainstorm in China[J]. Meteor Mon, 49(3): 267-278 (in Chinese).
- 44 朱秀迪, 张强, 孙鹏, 2018. 北京市快速城市化对短时间尺度降水时空特征影响及成因[J]. 地理学报, 73(11): 2086-2104. Zhu X D,

- 1 Zhang Q, Sun P, 2018. Effects of urbanization on spatio-temporal distribution of precipitations in Beijing and its related causes[J].
2 Acta Geogr Sin, 73(11): 2086-2104 (in Chinese).
- 3 Chang C C, Chen Y H, Huang J J, 2023. A comparison study on the role of urbanization in altering the short-duration and long-duration
4 intense rainfall[J]. Sci Total Environ, 857: 159290.
- 5 Deng P X, Zhang M Y, Hu Q F, et al, 2022. Pattern of spatio-temporal variability of extreme precipitation and flood-waterlogging process
6 in Hanjiang River basin[J]. Atmos Res, 276: 106258.
- 7 Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al, 2016. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions[J]. Nature Clim
8 Change, 6(5): 508-513.
- 9 Gu X Z, Ye L, Xin Q, et al, 2022. Extreme precipitation in China: a review on statistical methods and applications[J]. Adv Water Res, 163:
10 104144.
- 11 Hu M L, Dong M Y, Tian X Y, et al, 2021. Trends in different grades of precipitation over the Yangtze River Basin from 1960 to 2017[J].
12 Atmosphere, 12(3): 413.
- 13 Zhu X D, Zhang Q, Sun P, et al, 2019. Impact of urbanization on hourly precipitation in Beijing, China: spatiotemporal patterns and
14 causes[J]. Global Planet Change, 172: 307-324.
- 15