

杜萌萌,魏俊涛,张楠,等. 西安不同历时降雨极值特征与重现期分析[J]. 陕西气象,2026(2):45-52.

文章编号:1006-4354(2026)02-0045-08

# 西安不同历时降雨极值特征与重现期分析

杜萌萌<sup>1,2</sup>,魏俊涛<sup>1</sup>,张楠<sup>3</sup>,黄蕾<sup>1,2</sup>

(1. 西安市气象台,西安 710016;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 西安市公共气象服务中心,西安 710016)

**摘要:**基于1955—2024年西安市不同历时长最大降水量序列,结合强降水频率、概率分布特征等,对各历时长最大降水量变化特征进行统计分析。利用广义极值分布(generalized extreme value distribution, GEV)拟合典型代表时段年最大降雨极值的概率分布,并计算各历时不同重现期下的降雨极值。结果表明:(1)不同历时长最大降水量序列之间普遍存在强相关性,且历时越近相关性越强,特别是45 min历时与其他历时均表现出极强相关性。(2)从总体趋势看,随着降雨历时的延长,各典型代表时段年最大降水量的标准差呈现增大趋势,同时各历时长最大降水量的年际变化显著,且均呈现增强趋势,其中60 min历时的增强趋势尤为突出,增速为1.6 mm/10 a。(3)西安典型代表时段的降水极值数据总体上符合GEV分布特征,估算不同重现期的降雨极值,与实测资料对比发现,各典型代表时段的最大降水量均超过50 a一遇水平,个别历时长极端降水量超过100 a一遇水平。

**关键词:**西安;年最大降水量;不同历时;重现期;广义极值分布(GEV)

**中图分类号:**P463.3

**文献标识码:**A

近年来,极端气候事件频发,已成为全球气候变化研究的热点。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,自20世纪中叶以来,全球变暖显著加剧,极端降水事件频率和强度在多个区域呈上升趋势,亚洲季风区表现尤为突出。中国作为全球气候变化敏感区之一,频繁遭遇由极端降水引发的洪涝灾害,严重威胁人民生命财产安全和城市基础设施运行。传统极端降水研究多集中于日尺度或年尺度最大降水量的变化趋势分析<sup>[1-3]</sup>,但在实际防洪工程设计与城市雨水管理中,更关注的是分钟至小时级别的短时强降水事件。例如,2021年郑州“7·20”暴雨事件中,1 h降水量达201.9 mm,打破中国大陆小时降水极值,造成重大人员伤亡和财产损失<sup>[4]</sup>,该

事件凸显了以短时极端降水为代表的小概率事件对城市基础设施与安全运行的不利影响。目前,已有研究基于多历时极端降水数据开展相关性分析。段修荣等<sup>[5]</sup>对四川自贡市不同历时长最大降水量的变化进行研究,揭示了年最大降水量随降水历时的变化规律,并指出短历时降水的极值变化对城市内涝等灾害具有重要影响。针对郑州市“7·20”暴雨事件的研究表明,短历时强降水呈现明显的年代际波动特征和周期性变化规律,广义极值分布(generalized extreme value distribution, GEV)模拟结果与历史实测高值高度吻合,多个时段的年最大降水量超过50 a一遇,部分历时甚至超过100 a一遇水平<sup>[6]</sup>。孙娟等<sup>[7]</sup>通过对昆明地区不同历时降水极值的研究,揭示了昆明

**收稿日期:**2025-09-09

**作者简介:**杜萌萌(1986—),女,汉族,河南孟津人,硕士,高工,主要从事天气机理与预报技术方法研究工作。

**通信作者:**黄蕾(1991—),女,汉族,甘肃天水人,硕士,高工,主要从事大气环境及数值模拟研究工作。

**基金项目:**秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021Y-7);陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-QN-0364);陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(青年)(2024JC-YBQN-0346)

降水的年际变化及其极值重现期的特征,为类似地区的降水极值推算提供了参考。

西安地处关中盆地,夏季频繁发生强降水事件,导致城市内涝、山洪地质等次生灾害,给城市基础设施、交通运输以及居民生活带来严重影响。随着城市化进程的加快,西安周边强降水事件呈现出频发且强度逐渐增加的趋势<sup>[8-9]</sup>。系统分析西安地区极端降水时空分布特征,准确模拟其变化规律,对科学制定城市防洪减灾策略和适应气候变化具有重要意义。张高健等<sup>[10]</sup>通过对西安市汛期降水的精细化分析,探讨了短时强降水时空变化特征,发现降水频次和强度在不同区域存在明显差异。蔡新玲等<sup>[11]</sup>研究发现陕西省暖季短历时强降水增加趋势显著,空间变化表现为非均一性,历时越短,强降水呈增多趋势的范围越大。高宇星等<sup>[12]</sup>研究发现西安地区暴雨日数在不同年份间变化较大,且主要出现在7—8月,受地形影响,暴雨极值的大值区主要集中在周至、长安、蓝田和临潼。

上述研究为理解西安地区降水变化规律提供了有益借鉴。然而,多历时年最大降水量的系统性分析较为欠缺。本文以西安站近70 a分钟级降水观测资料为基础,构建典型历时的年最大降水量序列,系统分析其分布特征与变化趋势。此外,基于历史序列构建GEV模型计算不同重现期的降雨极值。本研究系统分析西安地区分钟级历时降水的变化规律,以期提升大城市气象服务、改善防灾减灾措施以及优化基础设施规划,进而有效应对未来极端气候事件挑战提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

所用数据为1955—2024年西安站(站号:57036,2014年站号改为V8870)的逐分钟降水数据,其中1955—2003年的数据采用降水自记纸数字化处理系统,通过计算机扫描、图像处理和数据处理,将自记纸图像转化为逐分钟降水量;2004—2024年的数据则采用气象站自动站记录的数据,在数据处理过程中,经过严格的质量检查和一致性分析,最终确定逐分钟降水量的完整资料序列。采用逐分钟滑动统计逐年各历时降水量,根据《室

外排水设计标准》(GB 50014—2021)的规定,利用年最大值法在每年各历时降水量中选取一个最大降水量值,形成5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180 min共11个不同历时历年最大降水量数据集。

### 1.2 方法

1.2.1 短历时暴雨标准 对于短历时的暴雨标准,采用G·Wussow<sup>[13]</sup>提出的各历时暴雨临界值 $r(t)$ 来定义,公式如下。

$$r(t) = \begin{cases} \sqrt{5t}, & t < 120 \text{ min} \\ \sqrt{5t - (t/24)^2}, & t \geq 120 \text{ min} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $t(\text{min})$ 为降水历时;当 $t$ 内的降水量 $R > r(t)$ 时称为暴雨;若 $R > 1.5r(t)$ 时为大暴雨;若 $R > 2r(t)$ 时为特大暴雨。不同历时不同暴雨等级标准值见表1。

表1 不同历时不同暴雨等级标准值

历时/min	暴雨/mm	大暴雨/mm	特大暴雨/mm
5	5.0	7.5	10.0
10	7.1	10.7	14.2
15	8.7	13.1	17.4
20	10.0	15.0	20.0
30	12.2	18.3	24.4
45	15.0	22.5	30.0
60	17.3	26.0	34.6
90	21.2	31.8	42.4
120	24.0	36.0	48.0
150	26.7	40.1	53.4
180	29.0	43.5	58.0

1.2.2 频率分析 强降水频率分析基于年最大降水序列进行,采用降水指标变量 $R_m$ 及降水频率 $P_{Rm}$ 。降水指标变量 $R_m$ 表示年最大降水量序列的中值。首先将年最大降水量序列从小到大排序,序列有 $n$ 个数,若 $n$ 为奇数则选择第 $(n+1)/2$ 个数为中值,若 $n$ 为偶数则中值是第 $n/2$ 和第 $n/2+1$ 个数的平均值,该指标不受降水序列中出现的异常偏大或偏小降水量的影响,因此具有较好的稳定性。降水频率 $P_{Rm}$ 为单位时间内达到的雨量值,表示为 $R_m/t$ <sup>[14]</sup>。

1.2.3 概率分布特征参数 对数据分布形态进行量化表征:通过变异系数( $C_v$ )衡量数据离散程度,偏度系数(Skewness)评估分布对称性,峰度系数(Kurtosis)刻画分布峰态特征<sup>[15]</sup>。

1.2.4 极值分布模型选取 GEV 是用于描述极端事件的一类重要概率分布,近年来被广泛应用于极端气候事件的建模与情景预测,其参数结构能够同时涵盖不同尾部特征,有利于对极端事件的科学估计<sup>[16-17]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 相关性

根据相关系数的强弱划分标准,当相关系数介于 0.80~1.00 之间时,定义为极强相关;介于 0.61~0.79 之间时为强相关;而相关系数 $\leq 0.60$ 时,则表明变量间呈中等程度或弱相关。通过对各历时年最大降水量之间的相关系数进行计算(图 1),结果表明,年最大降水量之间的相关性随历时间隔的变化呈现明显的变化特征,即历时间隔越近,年最大降水量之间的相关性越强;反之,历时间隔越远,年最大降水量之间的相关性则逐渐减弱。例如,各历时年最大降水量之间的相关系数均 $\geq 0.66$ ,为强正相关,并通过 0.01 的显著性检验。不同历时年最大降水量与 5 个相邻的降水量之间存在极强相关;其中,45 min 与各历时年最大降水量之间均存在极强相关,从极值序列的统计属性来看,对于更短历时,其最大值多包含

于 45 min 峰值时段内,对于更长历时,45 min 峰值是构成其总量的最主要贡献部分。

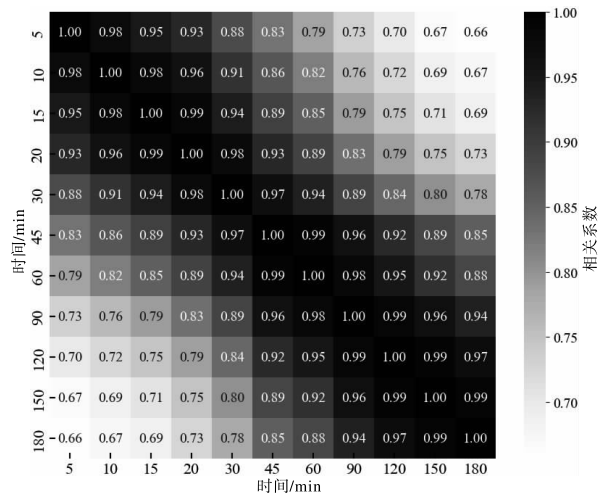


图 1 西安站各历时年最大降水量序列之间的相关系数

### 2.2 频率特征

西安地区的不同历时强降水统计结果显示(表 2),在 30~60 min 有可能会发生高达 20.0 mm 左右的降水量,120~180 min 有可能会发生高达 30.0 mm 左右的降水量;降水频率在 60 min 以内是显著的,即强度最大的降水集中在较短的时间内,从降水频率变化来看,10 min 以内降水频率下降幅度较大,为 0.20 mm/min,此后降幅逐渐缓和,下降幅度为 0.05~0.15 mm/min,120 min 以后降幅小于 0.05 mm/min,说明降水趋于稳定。综合考虑,以下分析选取 5 min、10 min、30 min、45 min、60 min 和 120 min 作为典型代表时段。

表 2 西安站不同历时强降水的统计特征

历时/min	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
$R_m$ /mm	5.7	9.4	12.7	15.3	19.2	22.2	23.8	25.0	27.0	27.8	29.5
$P_{Rm}$ /(mm/min)	1.14	0.94	0.85	0.77	0.64	0.49	0.40	0.28	0.23	0.19	0.16

### 2.3 统计特征

各典型代表时段年最大降水量统计特征值(表 3)和频数直方图(图 2)表明,不同历时的年最大降水量具有显著的年际差异。历时 5 min 年最大降水量的最小值为 1.4 mm,最大值 17.2 mm,标准差 3.1 mm;历时 120 min 的历年最大降水量的最小值仅为 12.8 mm,最大值 92.4 mm,标准

差 14.9 mm。5 min、10 min 的标准差分别为 3.1 mm、5.4 mm,表明历年最大降水量分布较为集中,波动性较小。随着历时时间的延长,30 min 至 60 min 的历年最大降水量的标准差逐渐增大至 14.6 mm,表明离散程度显著增加,波动性增大。60 min 至 120 min 的历年最大降水量的标准差趋于稳定,波动性达到相对平衡的状态。总体

来看,随着历时时间的延长,历年最大降水量的标准差呈增大趋势。典型代表时段年最大降水量的变异系数为 0.5~0.6,表明年最大降水量与均值的离散程度基本一致,离散程度较高。典型代表时段年最大降水量的偏度系数为 1.0~1.8,属正

偏度,这主要因各历时年最大降水量中存在一些极端的大值,但大值出现的频率较低而造成。从峰度系数来看,45 min 和 60 min 的历时年最大降水量偏度系数分别为 4.3 和 5.0,在直方图中“峰”的坡度相对陡峭。

表 3 西安市各典型代表时段年最大降水量统计特征

历时 /min	降水量最小 值/mm	降水量最大 值/mm	标准差 /mm	变异系数	偏度系数	峰度系数	最大值 出现日期
5	1.4	17.2	3.1	0.5	1.3	2.1	1989-07-18
10	2.1	29.2	5.4	0.5	1.0	1.2	1989-07-18
30	4.0	55.6	11.1	0.5	1.1	1.3	2020-07-10
45	5.8	83.2	13.6	0.6	1.7	4.3	1989-07-18
60	7.1	91.6	14.6	0.6	1.8	5.0	1989-07-18
120	12.8	92.4	14.9	0.5	1.5	3.1	1989-07-18

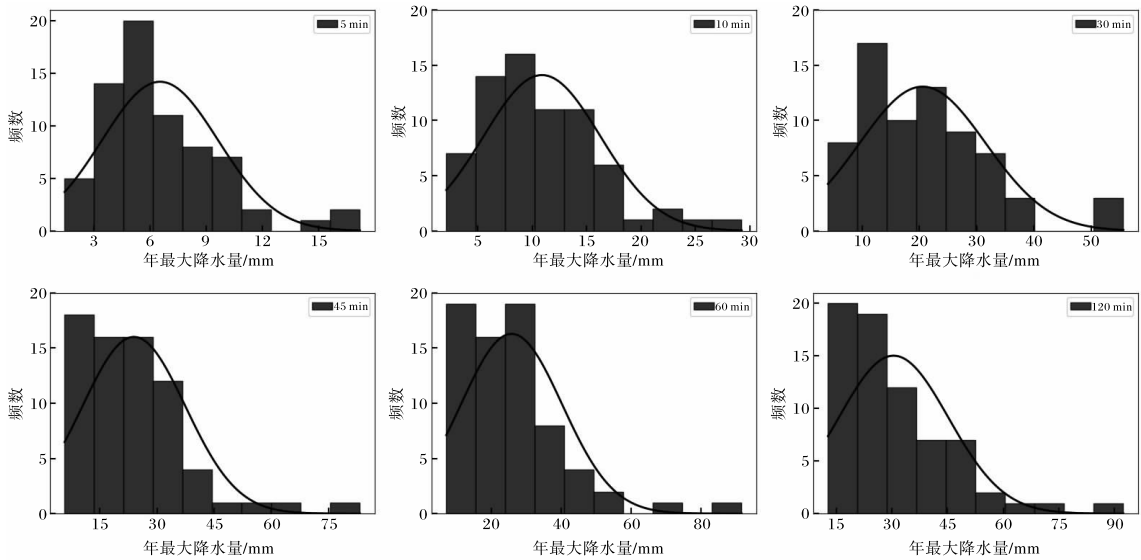


图 2 西安市各典型代表时段年最大降水量频数直方图

#### 2.4 各典型代表时段年最大降水量暴雨等级

各典型代表时段年最大降水量暴雨等级研究结果显示(表略),达到暴雨级别的年份均超过 50%,其中 10 min、30 min、45 min 和 60 min 历时达到暴雨量级的年份占比在 71%~77%,达到大暴雨量级的年份占比在 43%~51%,而达到特大暴雨量级的年份占比在 20%~34%。

根据各典型代表时段年最大降水量数据分析结果,各典型代表时段的 95%分位数降水量均超

过了对应的大暴雨等级标准,后文以此作为极端降水的阈值(表 4)。在 75%的年份中,10 min 最大降水量可达 7.0 mm 以上,有 5%的年份可达 20.8 mm 以上;在 75%的年份中,30 min 分钟最大降水量可达 12.6 mm 以上,有 5%的年份可达 38.3 mm 以上;而在 75%的年份中,60 min 最大降水量可达 14.6 mm 以上,且有 5%的年份可达到 50.3 mm 以上;120 min 历时有超过 5%的年份最大降水量为 56.5 mm。

表 4 西安各典型代表时段年最大降水量阈值

历时/min	降水量/mm			
	25%分位数	50%分位数	75%分位数	95%分位数
5	4.5	5.6	8.0	11.9
10	7.0	9.4	14.0	20.8
30	12.6	19.2	26.8	38.3
45	13.3	22.2	29.9	45.3
60	14.6	23.8	31.6	50.3
120	19.9	27.0	38.7	56.5

## 2.5 各典型代表时段年最大降水量的趋势变化

基于线性倾向估计方法分析结果可知(图3),西安各典型代表时段的年最大降水量年际变化大,且均呈现明显的增加趋势,其中60 min历时的增加趋势尤为突出,增速为1.6 mm/10 a。各历时年最大降水量均具有明显的阶段性变化特征,20世纪50年代后期、80年代后期以及21世

纪20年代初期,年最大降水量呈现相对较高的水平,表明该时段内短历时降水强度较大。其次,各典型代表时段通常存在若干降水量显著偏高的年份,如1975年、1989年、2015年和2020年,且这些年份在大部分历时均表现出一致性偏多的特征,即不同历时的年最大降水量通常存在显著的同现性。

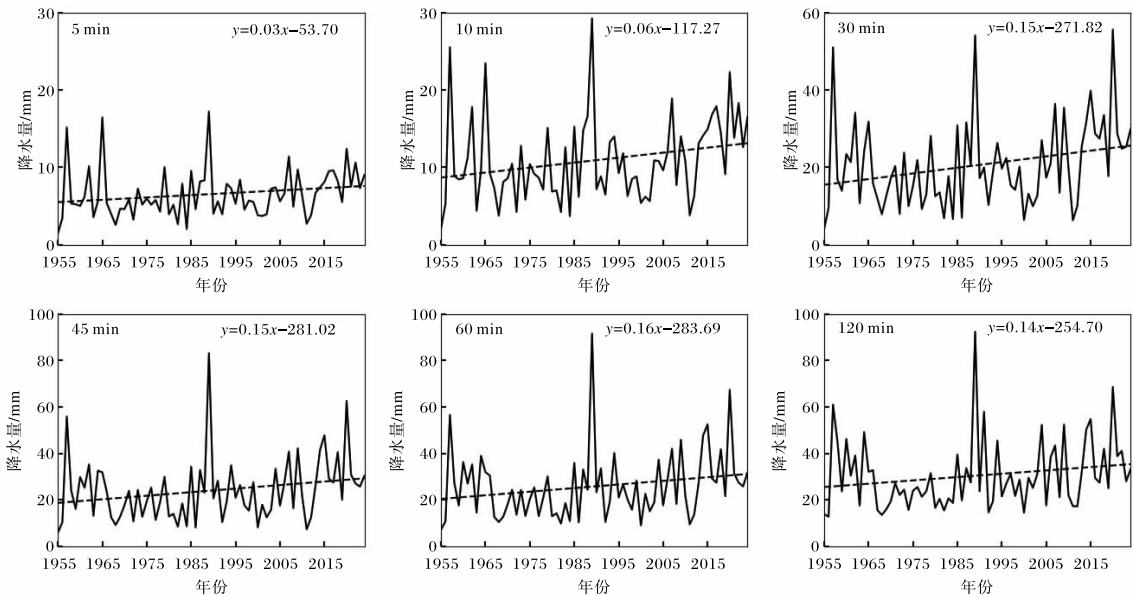


图3 西安市各典型代表时段年最大降水量的年际变化图

## 2.6 极值分布拟合及不同重现期下极值降水的估算

2.6.1 广义极值分布拟合 采用GEV对西安站典型代表时段的年最大降水数据进行曲线拟合和分析。基于5 min、10 min、30 min、45 min、60 min和120 min的分位数-分位数图(Q-Q图)(图4),横坐标为GEV拟合的理论分布分位数,

纵坐标为观测序列分位数,在模拟结果非常好的情况下,数据将沿着对角线排列。六个典型代表时段短历时降水序列的GEV分布模型仅在分布尾部区域有个别奇异点,即模型模拟值与实际观测值之间存在一定程度的偏差。概率密度图中实际观测值和模拟的密度曲线较为一致,说明参数估计结果是合理的(图5)。综合来看,西安各典

型代表时段的降水极值数据总体上符合 GEV 分布特征,呈现出较好的拟合效果。因此,后续研究

将以 GEV 分布为概率框架,构建分布函数来估算不同重现期的降雨极值。

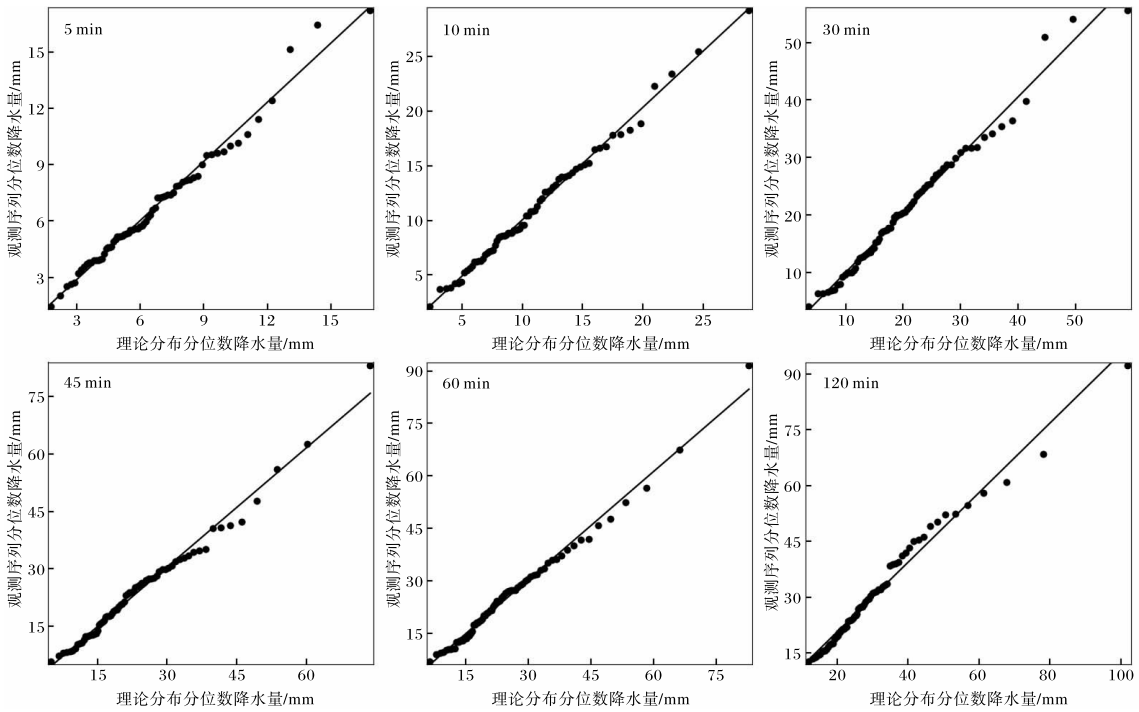


图 4 利用 GEV 模拟西安各典型代表时段年最大降水量的 Q-Q 图

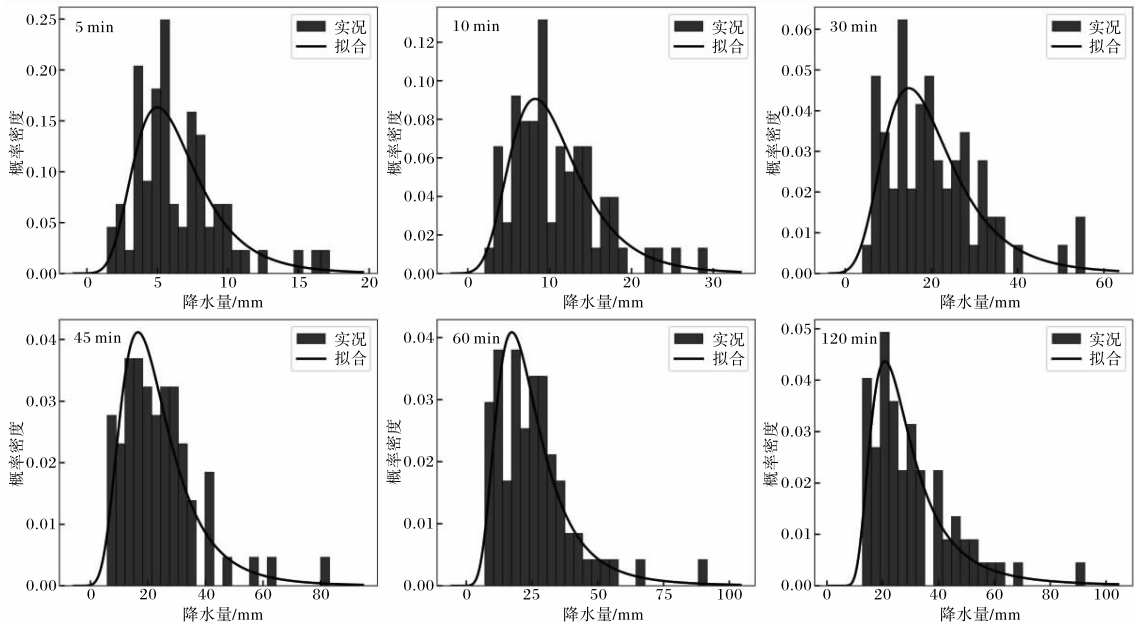


图 5 利用 GEV 模拟西安各典型代表时段年最大降水量的概率密度图

2.6.2 不同历时重现期降雨极值 应用 GEV 方法计算西安 5~100 a 内 6 个重现期各典型代表时段的降雨极值(表 5),结果表明,各重现期下降雨极值及其随重现期增加的增幅均随降雨历时

增加而增大。其中 5 min 历时的极值随重现期增加的增幅最小(8.2 mm),而 120 min 历时的极值增幅最大(62.7 mm),表明长历时降雨对重现期变化最为敏感。对比实测资料(表 3),各典型代

表时段的最大降水量均超过了 50 a 一遇水平,其中 5 min、10 min、45 min 和 60 min 的年最大降水量已超过 100 a 一遇的水平。值得注意的是,超过 100 a 一遇阈值的 4 个短历时年最大降水量,并非独立发生的极端事件,而是源于同一极端降雨的影响。

表 5 各典型代表时段不同历时重现期降雨极值

单位:mm

历时/min	5	10	30	45	60	120
5 a	8.6	14.7	28.1	32.4	34.4	38.8
10 a	10.5	17.9	35.0	41.0	43.8	49.6
20 a	12.4	21.1	41.9	49.9	54.1	62.2
30 a	13.5	23.0	46.1	55.5	60.6	70.7
50 a	14.9	25.4	51.4	62.8	69.4	82.6
100 a	16.8	28.7	59.0	73.5	82.6	101.5

### 3 结论

以 1955—2024 年西安市不同历时年最大降水量序列为基础,系统开展其变化特征统计分析。首先结合强降水发生频率与概率分布特征等,识别各历时年最大降水量的变化特征;进而采用 GEV 对典型代表时段的年最大降雨极值进行概率分布拟合,最终推算出各历时在不同重现期下的设计降雨极值,主要结论如下。

(1)年最大降水量之间的相关性随历时间隔的变化呈现显著规律:历时间隔越近,年最大降水量之间的相关性越强。各历时年最大降水量之间的相关系数均 $\geq 0.66$ ,为强正相关,并通过 0.01 的显著性检验。不同历时年最大降水量与 5 个相邻的降水量之间相关性极强;其中 45 min 与各历时年最大降水量之间均存在极强的相关性。

(2)从总体趋势看,随着降雨历时的延长,年最大降水量的标准差呈逐步增大趋势,表明长时间尺度下降雨极值的波动性更为显著。典型代表时段年最大降水量的变异系数为 0.5~0.6,表明年最大降水量与均值的离散程度基本一致,整体表现为较高的离散水平。典型代表时段年最大降水量的偏度系数为 1.0~1.8,属正偏度。从峰度系数来看,45 min 和 60 min 历时的历年最大降水

量的偏度系数分别为 4.3 和 5.0,在直方图中“峰”的坡度相对陡峭。

(3)线性倾向估计分析表明,西安市各典型代表时段的年最大降水量序列均呈增强趋势,并且年际变化幅度大。其中 60 min 历时的增强趋势尤为突出,增速为 1.6 mm/10 a。各典型代表时段年最大降水量具有明显的阶段性变化特征,且不同历时的年最大降水量通常存在显著的同现性。

(4)西安典型代表时段的降水极值数据总体上符合 GEV 特征,呈现出较好的拟合效果。各重现期降雨极值及其随重现期增加的增幅均随降雨历时增加而增大,反映出长历时降雨对重现期变化更为敏感的特征。与实测资料比对显示,各典型代表时段的最大降水量均超过了 50 a 一遇水平,个别历时年极端降水量超过 100 a 一遇水平。

### 参考文献:

- [1] 张礼,杨娜,张叶晖,等. 长江流域极端降水事件时空变化特征及其与洪水响应关系[J]. 水文,2025,45(2):49-55.
- [2] 杨雯婷,孙建华,傅慎明,等. 1981—2020 年华南地区区域性极端降水事件研究[J]. 大气科学,2024,48(3):906-922.
- [3] 刘子堂,李谢辉,杨静坤. 四川盆地极端降水事件时空变化特征及未来趋势分析[J]. 成都信息工程大学学报,2022,37(4):456-463.
- [4] 张芳华,孔期,袁溢,等. 河南 2021 年“21.7”暴雨极端性特征及其与 1975 年“75.8”暴雨的对比[J]. 大气科学,2024,48(6):2405-2423.
- [5] 段修荣,罗伟,郭海燕. 1963—2017 年四川自贡市不同历时年最大降水量变化特征[J]. 干旱气象,2020,38(1):40-49.
- [6] 左璇,朱业玉,郭鹏,等. 郑州市短历时强降水变化特征及重现期研究[J]. 气象与环境科学,2021,44(2):25-32.
- [7] 孙娟,杨溢,段玮,等. 昆明不同历时降水极值变化特征及其重现期研究[J]. 楚雄师范学院学报,2024,39(3):100-108.
- [8] WEI N,SUN X,BI X,et al. The spatial characteris-

- tics of precipitation and water-logging disaster during rainy season for urban planning in Xi'an[J]. *Indoor and Built Environment*, 2019, 28(9): 1263-1271.
- [9] 丁莹莹,邱德勋,吴常雪,等. 关中平原极端降水时空变化及其与大气环流的关系[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 104-112.
- [10] 张高健,高山,郭庆元,等. 基于小时数据的西安市汛期降水的精细化特征分析[J]. *甘肃科学学报*, 2023, 35(6): 51-57.
- [11] 蔡新玲,蔡依暉,叶殿秀,等. 1981—2020年陕西省暖季不同历时强降水时空变化特征[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(1): 1-10.
- [12] 高宇星,刘峰,刘瑞芳,等. 基于稠密观测资料的近10年西安地区暴雨特征[J]. *陕西气象*, 2024(1): 29-36.
- [13] 高绍凤,陈万隆,朱超群,等. 应用气候学[M]. 北京:气象出版社,2001:278.
- [14] REED D W. Flood estimation handbook [M]. Wallingford: Institute of Hydrology, 1999: 15-16.
- [15] 胡德华. 统计学原理(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社,2017:80-88.
- [16] 吴浩然,兰甜,陈永勤,等. 基于非平稳 GEV 模型的城市化进程对极端降水事件的影响[J]. *人民珠江*, 2025, 46(1): 23-31.
- [17] 韩清禹,刘伟,刘标胤,等. 基于非平稳 GEV 模型的雅鲁藏布江流域极端温度事件风险归因研究[J]. *水文*, 2024, 44(5): 106-112.