

基于 Copula 函数的湖北省短时强降水 IDF 时空特征分析

高伟^{1,2}, 廖贞闵¹, 秦鹏程^{2,3*}

1. 中国地质大学（武汉）地理与信息工程学院，武汉，430078;
2. 全国暴雨研究中心，武汉 430074;
3. 湖北省气候中心，武汉，430074;

摘要：为探究气候变化背景下湖北省短时强降水时空演变特征，基于 1961-2025 年湖北省 74 个气象站分钟降水观测数据，采用 Copula 函数与多种候选边缘分布构建了适用于不同地理区域的短历时（5-180min）强降水强度-历时-频率（IDF）曲线。空间分析表明，中东部地区 IDF 曲线设计雨强较西部地区偏高 10%~224%，且在短历时、高重现期条件下差异更显著。时间序列分析表明，1991-2025 年间短时强降水 IDF 曲线估值较 1961-1990 年增幅达 1%~53%，且以短历时、高重现期增幅最显著。总体上，中东部城市化及平原与山地过渡区域的强降水强度与频率更高，极端强降水事件趋于集中、频发和增强，但东北部地区出现了强度下降的特征。研究结果可为支撑韧性城市规划与基础设施的适应性设计、优化防灾减灾规划提供科学支撑。

关键词：IDF 曲线；Copula 函数；短历时强降水；经验模型

中图分类号：P426 收稿日期：2025-11-06

Spatiotemporal Analysis of IDF Curves for Short Duration Heavy Rainfall in Hubei Province Based on Copula Functions

Wei Gao^{1,2}, Zhenmin Liao¹, Pengcheng Qin^{2,3}

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China;
2. Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan 430074, China;
3. Hubei Provincial Climate Center, Hubei Meteorological Bureau, Wuhan 430074, China;

基金项目：湖北省自然科学基金气象创新发展联合基金（2023AFD098）；全国暴雨研究开放基金（BYKJ2025M20）；中国气象局青年创新团队（CMA2023QN15）

第一作者简介：高伟（1980-），男，副教授，主要从事气象灾害监测与影响评估方面的工作。Email: Gaowei@cug.edu.cn。ORCID:0000-0001-7814-3712

*通讯作者：qinpengcheng027@163.com

Abstract: To investigate the spatiotemporal evolution characteristics of short duration heavy rainfall in Hubei Province under climate change, this study developed Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for short duration rainfall (5-180 min) using minute-level precipitation observations from 74 meteorological stations in Hubei from 1961 to 2025. Copula functions combined with multiple candidate marginal distributions were applied to construct region-specific IDF curves for different geographical areas. Spatial analysis indicates that design rainfall intensities in central and eastern regions are 10%~224% higher than those in western regions, with more pronounced differences under shorter durations and higher return periods. Temporal analysis reveals that IDF estimates for short duration heavy rainfall during 1991-2025 increased by 1%~53% compared to 1961-1990, with the most significant rises occurring at shorter durations and higher return periods. Overall, heavy rainfall intensity and frequency are greater in urbanized central-eastern areas and plains-to-mountain transition zones, where extreme rainfall events are becoming more concentrated, frequent, and intense. However, a decreasing trend in rainfall intensity was observed in northeastern Hubei. The findings provide scientific support for resilient urban planning, adaptive infrastructure design, and optimized disaster prevention and mitigation strategies.

Keywords: IDF Curve; Copula Function; Short Duration Heavy Rainfall; Empirical Model

0. 引言

联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第六次评估报告(IPCC,2023)指出, 2011-2020 年, 全球表面温度比 1850-1900 年高出 1.1°C 左右, 且未来一段时间仍将持续上升。根据克劳修斯-克拉珀龙（Clausius-Clapeyron）方程, 在相对湿度保持恒定的条件下, 地表温度每升高 1°C , 大气中的水汽含量将增加约 7%(Allen and Ingram,2002)。这意味着大气持水能力随之增强, 水文循环过程加剧, 从而导致强降水事件趋于频繁, 尤其表现为短历时强降水显著增加(Allen and Ingram,2002)。这类极端降水极易引发洪涝及次生地质灾害(冯文凯等,2025; 苏燕等,2025), 对城市运行和水坝等重要基础设施构成严重威胁。

降水强度-历时-频率（IDF）曲线(Chow et al.,1988), 也称暴雨强度曲线, 是定量描述降水强度、历时与频率关系的重要工具, 广泛应用于世界各地排水防洪设施的设计(Kourtis and Tsihrintzis,2022)。构建 IDF 曲线通常采用经验模型或理论模型, 通过综合不同重现期下各历时降水事件的强度得出。其中, 经验模型法因其参数化程度高、直观性强等特点, 广泛应用于区域性 IDF 曲线的构建与评估(Kourtis and Tsihrintzis,2022)。如 Chitrakar 等(2023)利用经验模型构建了阿曼苏丹国的 IDF 曲线, 并系统分析了其参数的空间特征。理论模型法则基于理论概率分布函数（PDF）拟合降水序列, 具有更强的理论基础和普适性。例如, Lima 等(2018)利用广义极值（GEV）分布构建了韩国汉江流域的 IDF 曲线; Noor 等(2021)则对比评估了广义极值（GEV）、广义帕累托（GP）和 Gumbel 分布在马来西亚半岛的适用性。由于不同理论分布对降水序列的适用性存在差异(Kourtis and Tsihrintzis,2022), 在实际应用时需首先确定适用于目标区域的降水理论分布类型。在 IDF 曲线构建过程中, 需对降水强度、历时和频率三个维度变量进行概率分布拟合, 传统的单变量拟合法隐含地假设各变量间相互独立, 忽略了内在的相依结构。近年来, 能够用于描述多个随机变量间依赖关系的 Copula 函数逐渐被应用于基于灾害过程的 IDF 曲线构建(Kourtis and Tsihrintzis,2022), 或是用于降水风险评估的相关研究(陈浩铭等,2024; 高鹏举等,2025)。Copula 函数允许在多变量问

题中使用更多的边际分布和依赖结构(Kao and Govindaraju,2008),能够基于各概率分布函数(边缘分布函数)更好地反映降水强度(I)、历时(D)与频率(F)间的非线性关系。

现阶段针对 IDF 曲线的研究主要针对较长历时的降水事件,对小时或分钟级分辨率的短历时强降水特征研究较少,特别是针对湖北省短历时强降水 IDF 曲线的研究匮乏。短历时强降水是指降水持续时间在数小时以内的强降水事件(Fowler et al.,2021),相关研究表明,短时强降水是有利的大气环境、特殊的地形动力作用与对流系统内部的关键物理过程三者协同作用的结果。当前,全球气候变化背景加剧了地球水循环,短历时强降水频次与强度总体呈现显著增加趋势(谌伟等,2022)。城市化过程通过热岛效应、地表粗糙度与水汽条件改变,增强大气不稳定与辐合,加剧了城市暴雨强度(Wu et al.,2019)。上述变化使得既有 IDF 曲线可靠性面临挑战,进而可能影响水文基础设施的规划设计与管理。本文旨在利用长序列分钟级降水观测数据,基于 Copula 联合分布函数,分区域构建湖北省短历时强降水 IDF 曲线,揭示气候变化背景下短历时强降水事件在 IDF 曲线中的响应规律与区域特征。

1. 研究区概况与资料说明

1.1 研究区概况

本文以湖北省为研究区域。湖北省地处中国中部、长江中游(图 1),地形复杂多样:西部为武陵山、大巴山和巫山余脉,山峦起伏,地势复杂;中部为开阔平坦的江汉平原;东部以低山丘陵与岗地相间分布为主。境内河网密布,湖泊众多,长江与汉江贯穿全境,属典型的亚热带湿润季风气候区,年平均气温 12~17℃,年平均降水量 800~1600 毫米,其中约 60%集中于汛期。

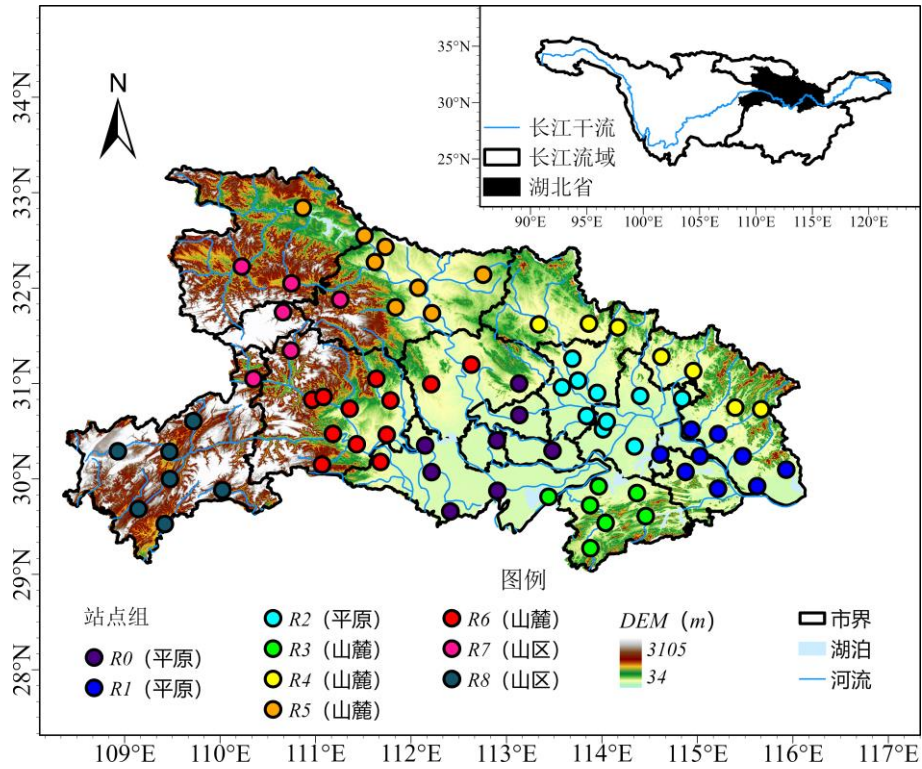


图 1 研究区概况

Figure 1 Overview of the Study Area

1.2 资料说明

本文使用的资料来源于湖北省气象信息与技术保障中心整编的湖北省国家气象站 1954-2025 年逐分钟降水观测资料。数据分析前，经质量控制检查，剔除连续缺失 1 小时以上的时段，并结合时间序列完整性，选取具有代表性且分布均匀的 74 个气象站 1961-2025 年观测资料。

以空间距离与地形特征作为降水空间相似性的度量(Burn,2014)，基于区域频率分析方法对 74 个气象站点进行基于经纬度与高程的聚类，并结合气象站点所在区域的城市化发展水平，将气象站点划分为具有明显特征的 9 类区域站点组，为保证 IDF 曲线构建的代表性，基于 L-矩进行站点组的同质性检验(Hoskings,1990)，并对站点组进行调整(见图 1)，各区域站点组特征信息见表 1，R0-R8 站点组平均高程递增。

表 1 站点组特征信息

Table 1 Characteristics of Station Groups

| 站点组 | 站点数 | 平均高程(m) | 描述 |
|-----|-----|---------|-----------------------|
| R0 | 8 | 39.25 | 平原站点，在一定程度上受城市发展影响 |
| R1 | 9 | 43.42 | 平原站点，在一定程度上受城市发展影响 |
| R2 | 10 | 46.57 | 平原站点，位于城市圈中心，受城市发展影响大 |
| R3 | 7 | 81.11 | 山麓站点，在一定程度上受城市发展影响 |
| R4 | 7 | 106.09 | 山麓站点，在一定程度上受城市发展影响 |
| R5 | 8 | 143.325 | 山麓站点，位于江汉平原与山地丘陵过渡地区 |
| R6 | 12 | 146.44 | 山麓站点，位于江汉平原与山地丘陵过渡地区 |
| R7 | 6 | 446.4 | 山地站点，受城市发展影响较小 |
| R8 | 7 | 635.83 | 山地站点，受城市发展影响较小 |

2. 方法

2.1 短历时强降水事件识别

根据前人对短历时强降水过程的定义(俞小鼎,2013; 严正宵等,2020; 曹经福等,2021)，结合湖北地区气候特点，本研究将满足以下两个条件的降水过程确定为一次短历时强降水事件：（1）60 分钟滑动累计降水量 ≥ 20 mm 或 180 分钟滑动累计降水量 ≥ 50 mm；（2）60 分钟内降水量 < 5 mm 即为强降水过程结束。

基于上述方法识别出各站历年短历时强降水事件，进一步通过滑动时间窗口（5、10、15、20、30、45、60、90 与 180 分钟）识别出各站各历时降水强度年最大值，并提取出各站点组的年最大值序列（Annual Maximum Series，AMS）。

2.2 基于 Copula 函数的 IDF 曲线构建

在 IDF 曲线构建中，首先对各历时下的 AMS 分别进行边缘分布拟合，采用理论极值分布对边缘概率分布进行刻画，利用 K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验各边缘分布对站点组数据的适用性。随后，利用最大似然法估计各 Copula 函数的依赖参数，构建二维联合分布函数，并通过赤池信息准则（AIC）综合评估备选 Copula 联结函数的拟合精度。通过联合分布构建与重现期降雨强度估算得到完整 IDF 曲线，最终通过决定系数（ R^2 ）判断理论模型与经验模型对数据的解释能力。

2.2.1 边缘分布函数

边缘分布用于描述单个历时下降雨强度的概率分布，本文选择 GEV 分布 (Koutsoyiannis et al.,1998)、Pearson-III 分布(Coronado-Hernandez et al.,2020)与 Gumbel 分布(Castillo,1988; Hong et al.,2013)作为待定分布函数，对湖北省各区域不同历时降水强度进行边缘分布拟合，并通过 K-S 检验确定最优边缘分布。

2.2.2 Copula 联结函数

Copula 联结函数用于描述不同历时下降雨强度之间的依赖结构。本文采用水文领域里较为常用的 3 种阿基米德 Copula 函数，包括 Frank Copula、Clayton Copula 与 Gumbel Copula(Ariff et al.,2012; Ribeiro et al.,2019; Huang and Zhao,2025)。表 给出了各 Copula 函数的表达式、参数域与适用场景。

表 2 选用 Copula 函数的表达式、参数域与适用场景

Table 2 Expressions, Parameter Domains, and Applicable Scenarios of the Selected Copula Functions

| Copula 函数 | $C(u, v; \theta)$ | 参数域 | 适用场景 |
|----------------|--|--|--|
| Frank Copula | $C(u, v; \theta) = -\frac{1}{\theta} \log \left(1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right)$ | $u, v \in (0,1)$ $\theta \in (-\infty, \infty) \setminus \{0\}$ | 变量间无明显尾部倚 有效捕捉下尾依赖性，适用于刻画极端小值之间的强依赖 |
| Clayton Copula | $C(u, v; \theta) = (\max(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0))^{-\frac{1}{\theta}}$ | $u, v \in (0,1)$ $\theta \in (0,1]$ | 有效捕捉上尾依赖性，适用于刻画极端大值之间的强依赖 |
| Gumbel Copula | $C(u, v; \theta) = \exp \left\{ -[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{\frac{1}{\theta}} \right\}$ | $u, v \in (0,1)$ $\theta \in (0, \infty)$ | |

其中， u, v 表示降水量在各自边缘分布下的标准化概率值为边缘分布函数的值。 θ 为 Copula 函数的依赖参数，用于控制变量间的相关性强弱和尾部依赖结构。

2.2.3 联合分布构建与重现期降雨强度估算

在确定各站点组的最优边缘分布与 Copula 函数后，进一步构建降水强度(x)与历时(t)的二维联合分布函数。联合分布函数形式如下：

$$\square(\square, \square) = \square(\square_{\square}(\square), \square_{\square}(\square); \square) \quad (1)$$

其中, $\square_{\square}(\square)$ 与 $\square_{\square}(\square)$ 分别为降水强度与历时的边缘分布函数, \square 为选定的 Copula 函数, \square 为 Copula 依赖参数。

对于特定的重现期 \square , 其联合超越概率为:

$$\square(\square > \square, \square > \square) = \frac{I}{\square} \quad (2)$$

固定的历时 \square 的边缘分布值 $\square = \square_{\square}(\square)$, 利用 Copula 函数的条件分布形式, 求解满足下式的 $\square = \square_{\square}(\square)$:

$$\square(\square, \square) = I - \frac{I}{\square} \quad (3)$$

通过反函数 $\square = \square_{\square}^{-1}(\square)$ 得到与历时 \square 重现期为 \square 对应的降水强度。

2.3 基于经验模型的 IDF 曲线构建

本文选择由 Bernard 提出的经过多次验证与改进后拥有良好的表达能力的经验公式(Bernard,1932; Hu and Ayyub,2019), 具体形式见公式 (4)。

$$\square(\square, \square) = \frac{\square \square^{\square}}{(\square + \square)^{\square}} \quad (4)$$

其中, I 为降水强度; t 为降水历时; T 为降水重现期; a 、 m 、 c 与 n 为经验模型中的待定参数, 分别代表 IDF 曲线的基础尺度参数、重现期影响指数、时间偏移参数与历时衰减指数, 通过大量降水事件的 (I, t) 数据对模型的拟合即可得到特定地区的 IDF 经验模型。

3. 结果与分析

3.1 短历时强降水的强度分布特征

基于湖北省 74 个气象站点 1961-2025 年分钟数据共识别出短历时强降水事件 11493 件, 事件平均降水量超过 46mm, 平均降水时长约为 93.6min。其中, 降水时长小于 3 小时的事件占比超过 84%, 即 3 小时内短历时强降水在短时强降水事件中占主导地位。各区域不同历时降水强度 AMS 小提琴图如图 所示, 整体上, 西部区域站点组 (R7、R8) 的降水强度年最大值小于其他区域, 这与冷亮等(2021)的研究发现鄂西山区为短时极端强降水的低阈值区一致, 这是由于短时强降水极大值与东部短时强降水高发区之间有一定的对应关系, 西部地区受山地

对水汽输送阻挡作用的影响短时强降水发生频率和强度相对较低，但在鄂西也存在零散分布的极大值，说明短时强降水极大值出现的偶然性较大；位于东部山地（R3、R4）区域和中部江汉平原（R0、R2）及平原与山地过渡区域（R5 与 R6）的站点组始终存在较高的极端值，这与中东部地区较好的水汽输送和热力条件导致极端暴雨多发有关，同时，较高的城市化水平可能也加剧了该区域短历时极端降水的强度(Gong et al.,2024)；位于东部两山之间的 R1 平原区降水强度极值略低于中部平原区和东部山区，这可能与南北山地地形阻挡有关(Zhang et al.,2023)。

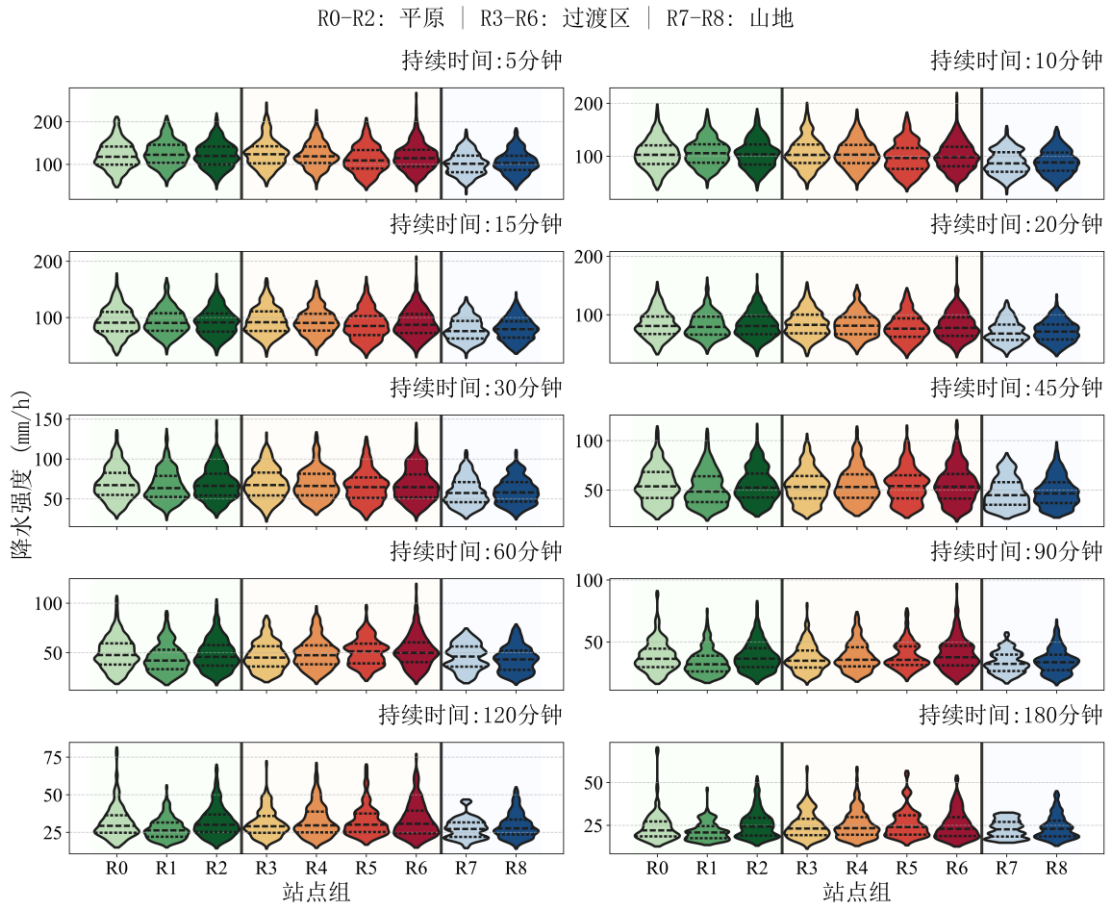


图 2 1961 年-2025 年湖北省强降水事件强度 AMS 小提琴图

Figure 2 Violin plot of the intensity AMS for heavy rainfall events in Hubei Province during 1961–2025

3.2 最优边缘分布与 Copula 联结函数

针对 GEV、Pearson-III 与 Gumbel 分布三种候选类型，采用 K-S 检验方法对各站点组不同历时 AMS 进行概率分布拟合检验。结果显示（图 ），Pearson-III 分布为最优分布，同时基于 Pearson-III 分布对候选 Copula 联结函数进行最优拟合检验，AIC 检验结果显示（表 ），各站点组的最优拟合 Copula 联结函数均为

Gumbel Copula。为此，后续将基于各站点组的最优拟合 Copula 函数结合 Pearson-III 分布进行 IDF 曲线的构建。

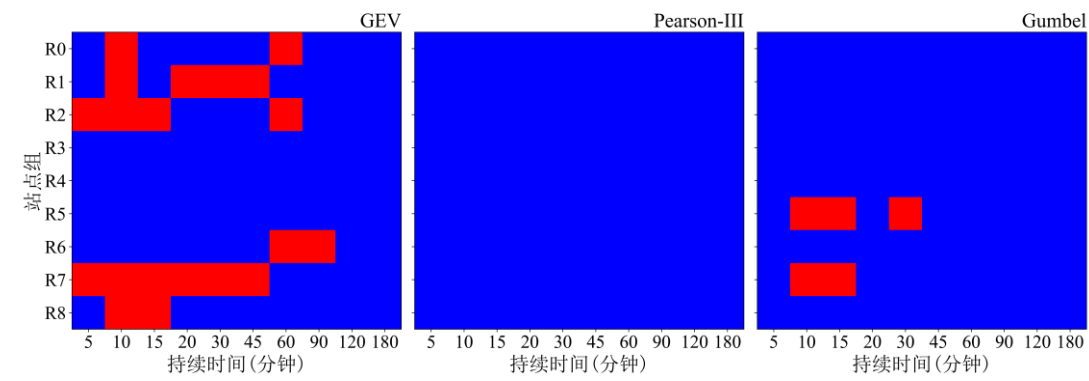


图 3 各站点组 K-S 检验结果（红色表示未通过检验，蓝色表示通过检验）
Figure 3 K-S test results for each station group
(Red indicates failure to reject the null hypothesis, blue indicates passing the test).

表 3 各站点组 Copula 联结函数 AIC 检测结果
Table 3 AIC detection results of the Copula function for each station group.

| | R0 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Clayton | -639.18 | -319.83 | -555.78 | -545.59 | -275.19 | -306.09 | -273.34 | -126.93 | -417.55 |
| Gumbel | -828.86 | -516.91 | -960.95 | -921.36 | -679.06 | -489.46 | -749.29 | -183.97 | -654.17 |
| Frank | -775.76 | -473.81 | -814.72 | -755.67 | -626.26 | -423.56 | -720.20 | -173.76 | -653.88 |

*表示为最优 Copula 联结函数

3.3 各站点组 IDF 曲线构建精度与经验模型参数

通过 Gumbel Copula 与 Pearson-III 分布构建各站点组重现期为 2、5、10、25、50 与 100 年的 IDF 理论分布和经验模型。表给出了不同重现期的 IDF 曲线构建精度。总体上，各站点组 IDF 曲线模型构建取得了较高精度。理论上，Gumbel Copula 适用于极端事件，但当模型样本中出现尾部数据（极端值）不足时，将影响 IDF 曲线拟合精度，例如：R1、R6 的极端事件样本量不均衡导致对应 χ^2 在高重现期上出现了下降。而经验模型基于历史数据拟合，在部分站点与基于 Copula 函数的 IDF 曲线形成互补，例如：R6 组中基于经验模型的 IDF 曲线能够弥补基于 Copula 函数的 IDF 曲线精度下降的不足。结合 3.2 节中的最优分布验证，上

述 IDF 曲线构建的结果有一定的合理性与适用性。但对于高重现期 IDF 曲线受极端降水事件影响的现象，需要利用更长序列样本或利用对尾部（极端）数据更加稳健的分布或模型进行 IDF 曲线的构建。

表 4 各站点组基于理论分布与经验模型不同重现期的 IDF 曲线精度 (R^2)

Table 4 Accuracy (R^2) of IDF curves based on theoretical distributions and empirical models for different return periods across station groups.

| 站点组 | 模型 | 重现期 | | | | | |
|-----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| R0 | Gumbel Copula- | 0.994 | 0.996 | 0.995 | 0.993 | 0.988 | 0.977 |
| | Pearson-III | | | | | | |
| R1 | 经验模型 | 0.979 | 0.947 | 0.958 | 0.985 | 0.954 | 0.796 |
| | Gumbel Copula - | 0.998 | 0.995 | 0.990 | 0.988 | 0.792 | 0.878 |
| | Pearson-III | | | | | | |
| R2 | 经验模型 | 0.999 | 0.953 | 0.987 | 0.968 | 0.834 | 0.669 |
| | Gumbel Copula - | 0.999 | 0.991 | 0.993 | 0.983 | 0.980 | 0.941 |
| | Pearson-III | | | | | | |
| R3 | 经验模型 | 0.980 | 0.979 | 0.995 | 0.978 | 0.972 | 0.991 |
| | Gumbel Copula - | 0.999 | 0.996 | 0.993 | 0.998 | 0.994 | 0.971 |
| | Pearson-III | | | | | | |
| R4 | 经验模型 | 0.984 | 0.965 | 0.971 | 0.995 | 0.976 | 0.910 |
| | Gumbel Copula - | 0.998 | 0.997 | 0.994 | 0.996 | 0.986 | 0.970 |
| | Pearson-III | | | | | | |
| R5 | 经验模型 | 0.984 | 0.985 | 0.973 | 0.988 | 0.979 | 0.930 |
| | Gumbel Copula - | 0.998 | 0.995 | 0.986 | 0.985 | 0.985 | 0.968 |
| | Pearson-III | | | | | | |
| R6 | 经验模型 | 0.977 | 0.987 | 0.983 | 0.975 | 0.990 | 0.966 |
| | Gumbel Copula - | 0.996 | 0.994 | 0.974 | 0.970 | 0.976 | 0.622 |
| | Pearson-III | | | | | | |
| R7 | 经验模型 | 0.988 | 0.977 | 0.975 | 0.961 | 0.952 | 0.914 |
| | Gumbel Copula - | 0.997 | 0.996 | 0.991 | 0.988 | 0.994 | 0.977 |
| | Pearson-III | | | | | | |
| R8 | 经验模型 | 0.990 | 0.989 | 0.983 | 0.977 | 0.987 | 0.951 |
| | Gumbel Copula - | 0.999 | 0.997 | 0.998 | 0.994 | 0.978 | 0.989 |
| | Pearson-III | | | | | | |
| | 经验模型 | 0.983 | 0.975 | 0.979 | 0.992 | 0.961 | 0.925 |

表给出了各站点组 IDF 曲线经验模型参数与公式。在经验模型中，各参数具有明确的物理意义，并分别对 IDF 曲线的形态与特征产生影响。整体上，R2 与 R6 组的 IDF 经验模型表现出高基准值（参数 a）、高重现期增长因子（参数 m）、高时间响应因子（参数 c）与高历时增长衰减（参数 n），城市化水平提高可能

造成强降水事件中降水量的增加与集中分布。在两个山区站点组中，R7 组的 IDF 经验模型虽表现出较高的基准值，但重现期增加因子较小，衰减因子较高，造成该组整体强度均较小，R8 则呈现出较为平稳的低强度。

表 5 湖北省各站点组短历时强降雨 IDF 曲线经验模型公式
Table 5 Empirical model formulas for short-duration heavy rainfall IDF curves by station group in Hubei Province.

| 站点组 | 经验模型参数 | | | | 经验模型 IDF 曲线公式 |
|-----|----------|-------|--------|-------|---|
| | a | m | c | n | |
| R0 | 1443.39 | 0.137 | 23.667 | 0.699 | $I(\lambda, T) = \frac{1443.39 \lambda^{0.137}}{(\lambda + 23.667)^{0.699}}$ |
| R1 | 809.142 | 0.185 | 12.121 | 0.627 | $I(\lambda, T) = \frac{809.142 \lambda^{0.185}}{(\lambda + 12.121)^{0.627}}$ |
| R2 | 8134.294 | 0.158 | 46.558 | 1.031 | $I(\lambda, T) = \frac{8134.294 \lambda^{0.158}}{(\lambda + 46.558)^{1.031}}$ |
| R3 | 1028.550 | 0.125 | 13.942 | 0.651 | $I(\lambda, T) = \frac{1028.550 \lambda^{0.125}}{(\lambda + 13.942)^{0.651}}$ |
| R4 | 1371.040 | 0.108 | 19.124 | 0.696 | $I(\lambda, T) = \frac{1371.040 \lambda^{0.108}}{(\lambda + 19.124)^{0.696}}$ |
| R5 | 924.329 | 0.120 | 13.555 | 0.626 | $I(\lambda, T) = \frac{924.329 \lambda^{0.120}}{(\lambda + 13.555)^{0.626}}$ |
| R6 | 3788.007 | 0.202 | 37.441 | 0.891 | $I(\lambda, T) = \frac{3788.007 \lambda^{0.202}}{(\lambda + 37.441)^{0.891}}$ |
| R7 | 4050.316 | 0.084 | 34.584 | 0.940 | $I(\lambda, T) = \frac{4050.316 \lambda^{0.084}}{(\lambda + 34.584)^{0.940}}$ |
| R8 | 558.529 | 0.101 | 10.491 | 0.539 | $I(\lambda, T) = \frac{558.529 \lambda^{0.101}}{(\lambda + 10.491)^{0.539}}$ |

3.4 短历时强降水 IDF 曲线区域响应特征

图 4 给出了各站点组的 IDF 曲线。不同历时下降水强度随重现期增大而增大，随着历时增加降水强度减少，这符合 IDF 曲线的一般规律。从不同重现期的差异来看，以 5 分钟历时为例，重现期从 2 年至 100 年的降水强度平均增幅为 52.4%，增幅随历时延长而增大，180 分钟时平均增幅达到 144.2%。从不同历时来看，以 100 年重现期为例，降水历时从 5 分钟延长至 180 分钟，强度平均降幅约为 72.3%，降幅随重现期增加而略有减小，2 年重现期时的平均降幅约为 82.6%。

各区域 IDF 曲线呈现出一定的空间分异特征。总体来看，平原地区的降水强度普遍高于山区。在极短历时强降水（历时小于 30 分钟）中，西部山区 R7 和

R8 组的各历时降水强度较低，其余站点组（以下简称“高值组”）的降水强度较高，差异幅度约为 10%~224%，且随着重现期增加，差异更显著。在高值组中，R6 组的降水强度显著高于其他组别。以重现期 100 年为例，其数值明显高于其他组；同时，在固定历时条件下，其重现期 2 年至 100 年的强度平均增幅超 105%，增幅优势显著。该组位于地形过渡区域，地形抬升作用有利于增强上升气流，提高大雨滴发生概率，从而可能提升降水效率(Zhang et al.,2023)。其余组别之间的差异相对较小。

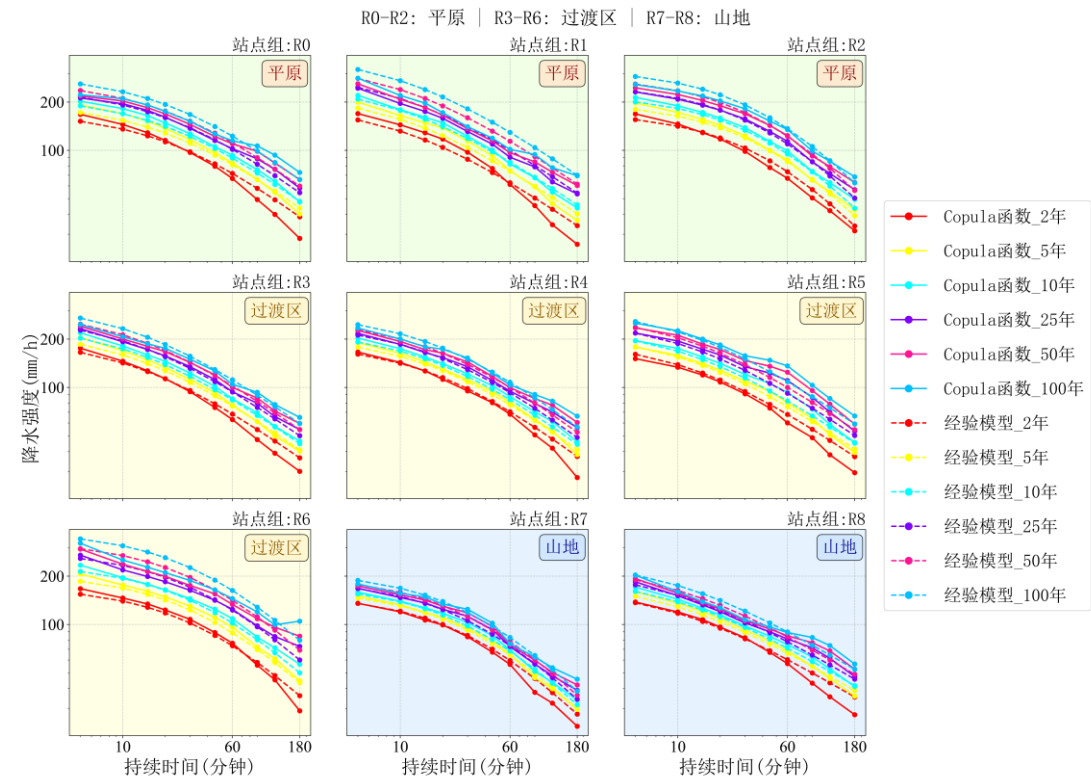


图 4 各站点组基于 Copula 函数与经验模型不同重现期的 IDF 曲线

（实线为 Copula 函数拟合结果虚线为经验模型拟合结果）

Figure 4 IDF curves for different return periods based on Copula functions and empirical models by station group.

(Solid lines represent the fitting results of the Copula function; dashed lines represent the fitting results of the empirical model.)

3.5 短历时强降水 IDF 曲线气候变化响应特征

为探究气候变化对短历时强降水发生频率、历时和强度等特征的影响，分别针对 1961-1990 年、1991-2025 年构建各站点组的 IDF 曲线，并统计 1991-2025 年与 1961-1990 年不同重现期和不同历时长降水强度的变化如

图 与图 所示。

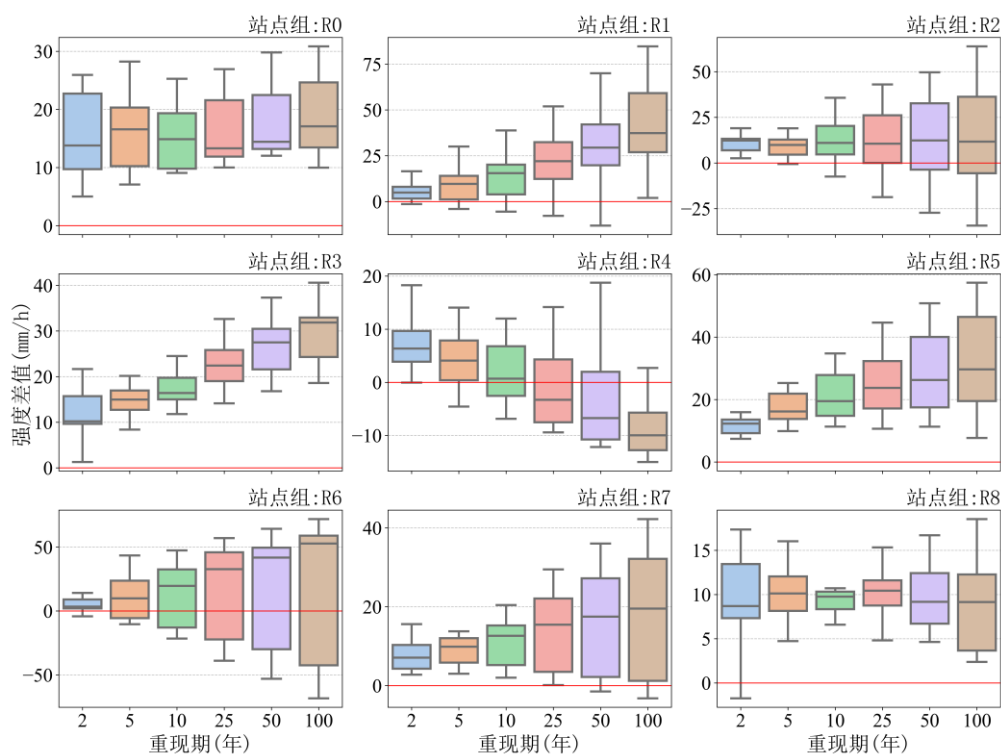


图 5 1961 年至 1990 年与 1991 年至 2025 年的 IDF 曲线各重现期降水强度变化箱线图

Figure 5 Box plot of changes in precipitation intensity across return periods for IDF curves between 1961 – 1990 and 1991 – 2025.

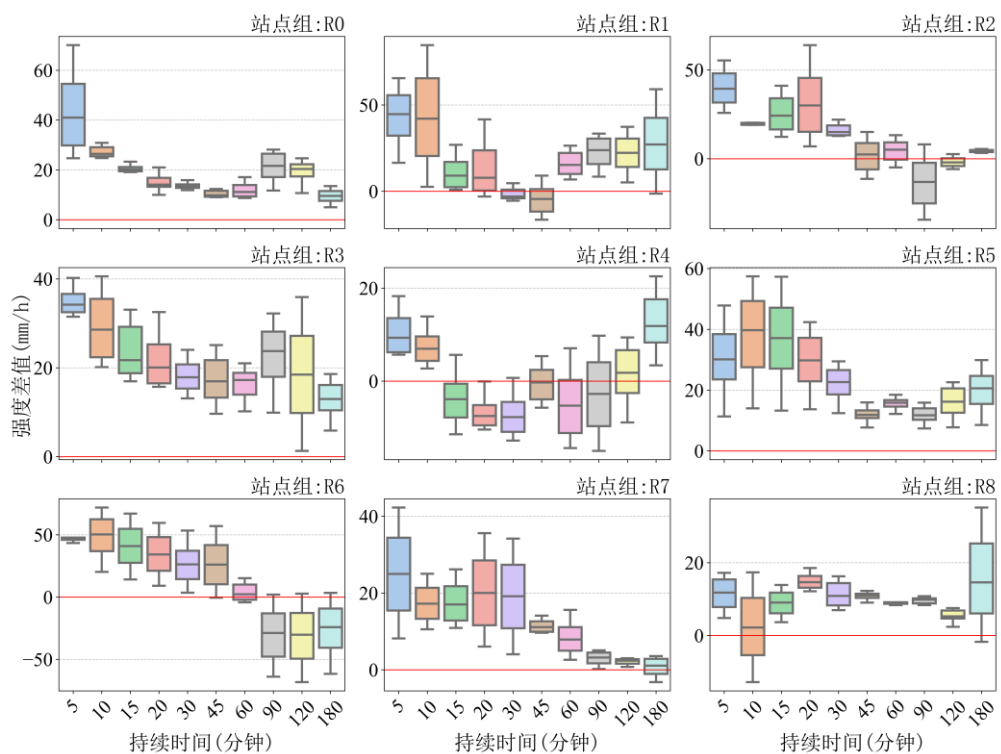


图 6 1961 年至 1990 年与 1991 年至 2025 年的 IDF 曲线各降水历时降水强度变化箱线图
Figure 6 Box plot of changes in precipitation intensity by rainfall duration for IDF curves between 1961–1990 and 1991–2025.

从各重现期降水强度变化看，与 1961-1990 年基准期相比，1991-2025 年多数站点组所代表区域的降水强度呈现不同程度增强。各重现期下降水强度的平均增量介于 1~41.8mm/h 之间，高重现期对应的增量更大，增幅为 1%~43%。从区域分布看，多数站点区域（R1、R3、R5、R6、R7）的降水强度增量随重现期增大而上升，反映出极端降水事件趋于增强。其中，位于平原及平原与山地过渡区的站点组（R0、R1、R3、R5、R6）增量普遍高于山区站点组（R7、R8），受城市化影响最弱的 R8 组增量最小。此外，R4 组在短重现期下降水强度增量较小，而在高重现期下甚至出现强度减弱现象。

从不同历时降水强度变化看，各站点组平均强度增量范围为 1~44 mm/h，短历时降水增量更为显著，增幅在 1%~53%之间。多数站点组的降水强度增量均与降水历时呈负相关，其中地形过渡区与受城市化影响高的区域（R0、R3、R5 与 R6 组）表现最为典型，R6 组呈现出 5~45 分钟降水强度明显增强，90~180 分钟强降水强度明显减弱的特征，说明强降水过程更加集中和突发。R4 组则在 5~15 分钟和 120~180 分钟时段呈现增加趋势，其余时段则有所减弱。

总体而言，在气候变化背景下，湖北省大部分区域短历时强降水强度均呈增强趋势，在较高重现期条件下增幅更为显著。该趋势在平原、地形过渡区及城市化程度较高的区域表现尤为显著。值得注意的是，位于东北部山地的 R4 站点组极端降水强度呈现减弱趋势，该区域作为湖北省传统的暴雨中心(唐永兰等,2018)，其变化特征及其成因有待进一步深入研究。

4. 结论与讨论

4.1 结论

本文基于 1961-2025 年湖北省分钟级降水观测数据，提取不同降水历时（5、10、15、20、30、45、60、90 和 180 分钟）的年最大值序列，采用 Copula 函数结合多种边缘分布与经验模型，构建了不同重现期（2、5、10、25、50 和 100 年）下湖北省短历时强降水的 IDF 曲线，系统分析了降水强度、频率与历时的空间分

异特征及其对气候变化的响应。主要结论如下：

1. Pearson-III 分布能够较好地拟合各站点组降水强度的统计特征，Gumbel Copula 是表征各站点组降水强度与降水历时二维联合分布的最优 Copula 函数。

2. 基于 Copula 函数的 IDF 曲线对湖北省各历时强降水具有较好的拟合效果，但在极端值较强时，高重现期下的拟合精度下降，此时，经验模型可提供更为精确的 IDF 曲线拟合结果，还可以给出物理意义明确、形式直观的参数化 IDF 公式。从 IDF 理论分布与经验模型的参数特征来看，相同降水历时下，降水强度随重现期增加而增大，长历时降水强度的增幅更显著；相同重现期下，降水强度随历时延长而减小，且高重现期下降水强度的衰减幅度较小。在地理区域上，IDF 曲线值呈现中东部平原和地形过渡区高于西部山区的分布特征，城市建设水平较高区域高于城市化程度较低的区域。

3. 在气候变化背景下，湖北省短历时强降水 IDF 曲线发生明显变化。与 1961-1990 年相比，1991-2025 年间各重现期下降水强度的站点组平均增量介于 1~41.8mm/h，增幅为 1%~43%；各历时下的强度增量介于 1~44 mm/h，增幅为 1%~53%。多数站点组的 IDF 曲线在短历时、高重现期下降水强度显著上升，反映出强降水事件趋于集中、频发和增强，该趋势在城市建设密集或大型水利设施分布区尤为突出。值得注意的是，位于东北部平原与山地过渡带的 R4 组在多个降水历时下强度出现减弱，其成因有待深入研究。

4.2 讨论

当前获取亚小时级或分钟级站点观测降水数据仍较为困难，卫星降水数据因重访周期长和精度不足，限制了短历时降水的相关研究(Kourtis and Tsihrintzis,2022)，本文采用分钟级数据构建了湖北省短历时强降水 IDF 曲线，为暴雨灾害预警、城市防洪排涝和应对气候变化提供了重要的数据支撑。对于 IDF 曲线的构建，基于 Copula 函数的理论模型能够有效刻画降水强度与历时之间的统计依赖结构，在本研究区表现出较高的拟合精度。然而，该模型的性能受数据记录长度影响，在极端值较强时，高重现期下的拟合精度会有所下降。此时，经验模型能提供更精确的 IDF 曲线拟合结果，本研究结果表明，联合应用两种模

型，能够在兼顾 IDF 曲线理论科学性的同时获得较高的拟合精度。

由全球变暖驱动的地球水循环加剧，正系统性改变强降水事件的统计特征 (Kourtis and Tsihrintzis,2022)，有研究指出，采用非平稳模型构建出的 IDF 曲线能够更加准确捕捉罕见极端强降水事件(Vishnupriya and Agilan,2025)。但是，非平稳模型也带入了许多不确定因素，使得结果可信度降低，所以在模型选用时应当考虑研究区域强降水特点与实际水文设施设计和管理需求，综合评估平稳与非平稳模型的选用问题。本文中，研究区的历史强降水数据整体上体现出平稳发展趋势，但随着强降水的特征与性质的变化，湖北省强降水可能需要利用非平稳模型进行 IDF 曲线的构建。

英文参考文献

- Allen M. R., Ingram W. J., 2002. Constraints On Future Changes in Climate and the Hydrologic Cycle. *Nature*, 419: 224.
- Ariff N. M., Jemain A. A., Ibrahim K, et al. 2012. IDF Relationships Using Bivariate Copula for Storm Events in Peninsular Malaysia. *Journal of Hydrology*, 470: 158-171.
- Bernard M. M., 1932. Formulas for Rainfall Intensities of Long Duration. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 96: 592-606.
- Burn D. H., 2014. A Framework for Regional Estimation of Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves. *Hydrological Processes*, 28: 4209-4218.
- Castillo E., 1988. *Extreme Value Theory in Engineering*. Boston: Academic Press. 389.
- Chitrakar P., Sana A., Almalki S. H. N., 2023. Regional Distribution of Intensity-Duration-Frequency (IDF) Relationships in Sultanate of Oman. *Journal of King Saud University Science*, 35: 14.
- Chow, Maidment D. R., Mays L. W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Coronado-Hernandez O. E., Merlano-Sabalza E., Diaz-Vergara Z., et al. 2020. Selection of Hydrological Probability Distributions for Extreme Rainfall Events in the Regions of Colombia. *Water*, 12: 12.
- Fowler H. J., Lenderink G., Prein A. F., et al. 2021. Anthropogenic Intensification of Short-Duration Rainfall Extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2: 107-122.
- Gong L., Zhang X., Liu J., et al. 2024. Exploring the Influence of Urban Agglomeration On Extreme Precipitation: Evidence From the Middle Reaches of the Yangtze River, China. *Journal of Hydrology-Regional Studies*, 55: 16.
- Hong H. P., Li S. H., Mara T. G., 2013. Performance of the Generalized Least-Squares Method for the Gumbel Distribution and its Application to Annual Maximum Wind Speeds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 119: 121-132.
- Hoskings J., 1990. L-Moment - Analysis and Estimation of Distributions Using Linear-Combinations of Order-Statistics. *Journal of The Royal Statistical Society Series B-Methodological*, 52: 105-124.

- Hu H., Ayyub B. M., 2019. Machine Learning for Projecting Extreme Precipitation Intensity for Short Durations in a Changing Climate. 9.
- Huang Z., Zhao T., 2025. How Suitable are Copula Models for Post-Processing Global Precipitation Forecasts? *Journal of Hydrology*, 656: 14.
- IPCC. 2023. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, 35-115.
- Kao S., Govindaraju R. S., 2008. Trivariate Statistical Analysis of Extreme Rainfall Events Via the Plackett Family of Copulas. *Water Resources Research*, 44: 19.
- Kourtis I. M., Tsihrintzis V. A., 2022. Update of Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves Under Climate Change: A Review. *Water Supply*, 22: 4951-4974.
- Koutsoyiannis D., Kozonis D., Manetas A., 1998. A Mathematical Framework for Studying Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationships. *Journal of Hydrology*, 206: 118-135.
- Lima C. H. R., Kwon H., Kim Y., 2018. A Local-Regional Scaling-Invariant Bayesian GEV Model for Estimating Rainfall IDF Curves in a Future Climate. *Journal of Hydrology*, 566: 73-88.
- Noor M., Ismail T., Shahid S., et al. 2021. Evaluating Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves of Satellite-Based Precipitation Datasets in Peninsular Malaysia. *Atmospheric Research*, 248: 15.
- Ribeiro A. F. S., Russo A., Gouveia C. M., et al. 2019. Copula-Based Agricultural Drought Risk of Rainfed Cropping Systems. *Agricultural Water Management*, 223: 11.
- Vishnupriya M. S., Agilan V., 2025. Expert System for Updating the Rainfall Intensity Duration Frequency Curve Under Climate Change and Non-Stationarity Over India. *Water Resources Management*: 16.
- Westra S., Fowler H. J., Evans J. P., et al. 2014. Future Changes to the Intensity and Frequency of Short-Duration Extreme Rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52: 522-555.
- Wu M., Luo Y., Chen F., et al. 2019. Observed Link of Extreme Hourly Precipitation Changes to Urbanization over Coastal South China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58: 1799-1819.
- Yan L., Xiong L. H., Jiang C., et al. 2021. Updating Intensity-Duration-Frequency Curves for Urban Infrastructure Design Under a Changing Environment. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water*, 8.
- Yu C., Cheng L., 2013. Distribution and Mechanisms of Orographic Precipitation Associated with Typhoon Morakot (2009). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70: 2894-2915.
- Zhang H., Zhang R., Ju Q., et al. 2023. Analysis of Extreme Precipitation Variation Characteristics and the Influencing Factors in the Yunnan-Guizhou Plateau Region, China. *Sustainability*, 15: 28.
- 中文参考文献
- 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. *气象与环境学报*, 37: 114-121.
- Cao J. F., Yang Y. J., Guo J., et al. 2021. Spatiotemporal Differentiation of Short-Duration Rainstorm Pattern and its Influence on Urban Waterlogging in Tianjin. *Journal of Meteorology and Environment*, 37(4) : 114-121.
- 曹伟华, 梁旭东, 赵晗萍, 等. 2016. 基于 Copula 函数的北京强降水频率及危险性分析. *气象学报*, 74: 772-783.

- Cao W., Liang X. D., Zhao H. P., et al. 2016. Copula-Based Frequency Analysis and its Application in Hazard Risk Assessment of Heavy Rainfall in Beijing. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(5): 772-783
- 陈浩铭, 庞博, 任汉承, 等. 2024. 基于 Copula 函数的昆明市降水特征组合风险空间分布研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 60: 607-616.
- Chen H. M., Pang B., Ren H. C., et al. 2024. Spatial Distribution of Combined Risk of Precipitation Characteristics in Kunming City Based on Copula Functions. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 60(5): 607-616.
- 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. *热带气象学报*, 38: 216-226.
- Chen W., Liu P. T., Xu Z. F., et al. 2022. Spatio-Temporal Characteristics of Frequency of Heavy Rainfall Events in Hubei Province and Analysis of Topographic Relationship Based on GWR. *Journal of Tropical Meteorology*, 38(2): 216-226.
- 冯文凯, 赵家琛, 易小宇, 等. 2025. 闽粤赣边区“6·16”强降雨诱发群发滑坡特征与驱动因素. *地球科学*, 50: 4111-4124.
- Feng W. K., Zhao J. C., Yi X. Y., et al. 2025. Characteristics and Drivers of Clustered Landslides Induced by Extreme Rainstorm on June 16 in Fujian-Guangdong-Jiangxi Junction Area. *Earth Science*, 50(10): 4111-4124.
- 高鹏举, 周翔, 郑玉烽, 等. 2025. 台风大风暴雨复合致灾的灾害风险评估研究: 以福州市为例. *水利水电技术(中英文)*, 56: 1-14.
- Gao P. J., Zhou X., Zheng Y. F., et al. 2025. Study on Risk Assessment of Compound Disasters Caused by Typhoon-Induced Gales Andstorms: A Case Study of Fuzhou City. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 56(5) :1- 14.
- 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. *暴雨灾害*, 40: 61-68.
- Leng L., Zhou L. L., Xiao Y. J., et al. 2021. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Hubei Province based on minute rain gauge data[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 40(1): 61-68.
- 刘思宇, 车军辉, 董旭光, 等. 2025. 基于 Copula 函数的山东强降水重现期分析. *气象*, 51: 1006-1017.
- Liu S. Y., Che J. h., Dong X. G., et al. 2025. Analysis on the Return Period of Heavy Precipitation in Shandong Based on Copula Function. *Meteor Mon*, 51(8):1006-1017.
- 苏燕, 付仲洋, 赖晓鹤, 等. 2025. 多特征空间自适应下的公路临水区地质灾害易发性评价. *地球科学*, 50: 3823-3843.
- Su Y., Fu Z. Y., Lai X. H., et al. 2025. Geohazard Susceptibility Assessment of Riverside Highway Zones under Multiple Feature Spaces Adaptation Network. *Earth Science*, 50(10): 3823-3843.
- 唐永兰, 于晓晶, 徐桂荣, 等. 2018. 近 54 a 湖北极端降水的变化特征及其与城市化的关系研究. *暴雨灾害*, 37: 73-82.
- Tang Y. L., Yu X. J., Xu G. R., et al. 2018. Study on the Change Characteristics of Extreme Precipitation and its Relationship with Urbanization in Hubei Province in Recent 54 Years. *Torrential Rain and Disasters*, 37(1): 73-82.
- 严正宵, 夏军, 宋进喜, 等. 2020. 中小流域设计暴雨雨型研究进展. *地理科学进展*, 39: 1224-1235.
- Yan Z. X., Xia J., Song J. X., et al. 2020. Research progress on design hyetographs in small and

- medium-scale basins. *Progress in Geography*, 39(7): 1224-1235
- 俞小鼎. 2013. 短时强降水临近预报的思路与方法. *暴雨灾害*, 32: 202-209.
- Yu X. D., 2013. Nowcasting Thinking and Method of Flash Heavy Rain. *Torrential Rain and Disasters*, 32(3): 202-209.
- 左斌斌, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 2021. 基于 Copula 函数的北京市设计降雨研究. *水力发电学报*, 40: 77-88.
- Zuo B. B., Xu Z. X., Ye C. L., et al. Study on Design Rainfalls in Beijing Based on Copula Functions . *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(2): 77-88.