

任泽凌, 李彬权, 王国庆, 等. 城市暴雨强度公式复核: 以杭州主城区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 80-89. REN Z L, LI B Q, WANG G Q, et al. Revisited urban rainfall intensity formula: An example of the main urban area of Hangzhou[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 80-89. (in Chinese)

# 城市暴雨强度公式复核

——以杭州主城区为例

任泽凌<sup>1</sup>, 李彬权<sup>1,2</sup>, 王国庆<sup>3</sup>, 刘加进<sup>4</sup>, 鲍振鑫<sup>3</sup>, 刘翠善<sup>3</sup>, 张磊磊<sup>4</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 南京 210024; 3. 南京水利科学研究院  
水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122)

**摘要:** 在气候变化与快速城镇化共同影响下, 很多城市暴雨特性发生变化, 现行的暴雨强度计算公式可能不再适用, 需要复核和更新。以杭州市主城区为例, 根据钱塘江江畔闸口站 1982—2022 年降雨极值资料, 分别选用皮尔逊Ⅲ型分布和耿贝尔分布曲线进行线型拟合, 采用粒子群优化算法推求暴雨强度公式参数, 与现行规范给出的暴雨强度公式进行复核分析。结果表明: 在重现期为 2~20 a 时, 根据皮尔逊Ⅲ型分布和耿贝尔分布推求得到暴雨强度新公式的平均绝对均方差均小于 0.05 mm/min, 平均相对均方差均小于 5%, 符合精度要求; 仅当降雨历时为 10 min 时, 2 个新公式的暴雨强度要小于现行公式的暴雨强度, 其他历时下 2 个新公式的暴雨强度都明显大于现行公式的暴雨强度; 经合理性分析, 本研究根据最新暴雨资料推求的暴雨强度公式可为杭州市主城区排水防涝工程设计和相关设施建设提供参考。

**关键词:** 降雨极值; 暴雨强度公式; 皮尔逊Ⅲ型分布; 耿贝尔分布; 杭州

**中图分类号:** TU992 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0010

气候变化背景下极端暴雨事件趋多增强<sup>[1-4]</sup>。观测资料表明, 局地降水效应与区域气候变化影响叠加造成城市暴雨特性发生了变化<sup>[5]</sup>, 大城市与都市圈极端暴雨屡破历史记录, 从而引起城市内涝灾害频发<sup>[6-8]</sup>。因此, 一些地区的降雨系列一致性已经不复存在<sup>[9]</sup>, 原有的暴雨强度公式以及相应设计成果需要重新检视, 以免低估设计暴雨的强度<sup>[10-12]</sup>。根据《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》要求, 一般建议 5~10 a 对暴雨强度公式进行误差复核或修编, 以反映最新降雨规律、指导城市排水防涝工程设计和相关设施建设<sup>[13]</sup>, 为此许多城市均采用最新降雨资料开展了暴雨强度公式修订工作<sup>[14-17]</sup>。例如: 刘焕彬等<sup>[18]</sup>采用 4 个不同年限降雨资料推求济南市暴雨强度公式, 对比分析表明应根据样本特点判断资料年限的选取方法; 袁冯

等<sup>[19]</sup>推导了北京市 1961—1990 年和 1991—2017 年 2 个气候态下的暴雨强度公式并进行比较分析; 贾卫红等<sup>[20]</sup>利用上海市代表站 65 a 实测雨量资料分析了城市暴雨衰减特征, 推导出长历时综合暴雨公式, 并纳入治涝地方标准。现有暴雨强度公式推求相关体系已较为完善, 其中 2 个环节最为重要: 一是选择合适的理论分布线型对降雨资料进行线型拟合; 二是暴雨强度公式参数求解。目前不同学者求解暴雨强度公式参数所用的优化方法有所不同, 但设定参数收敛的目标函数多采用平均绝对均方差, 这会造成低重现期(2 a)下平均绝对均方差高于其余重现期下平均绝对均方差的不合理情况<sup>[21]</sup>。

目前存在暴雨强度公式修订后纳入相关地方标准的审核周期较长, 可能造成颁布时新公式已经不能反映当前暴雨极值特征, 因而需要缩短误差复核

收稿日期: 2023-09-05 修回日期: 2023-12-04 网络出版时间: 2023-12-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231228.0855.008>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209204); 杭嘉湖南排工程科研项目“立体韧性城市洪涝防控体系构建研究”

作者简介: 任泽凌(2000—), 男, 浙江宁波人, 主要从事水文不确定性理论与应用研究。E-mail: 221301010028@hhu.edu.cn

通信作者: 李彬权(1984—), 男, 江苏淮安人, 副教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: libinquan@hhu.edu.cn

或修订的周期。例如杭嘉湖南排工程是太湖综合治理规划中排泄杭嘉湖平原洪涝水入杭州湾的一项关键性水利基础设施,在工程设计阶段需要采用适用的暴雨强度公式,推求不同重现期的设计暴雨成果。然而目前最新的浙江省工程建设标准《暴雨强度计算标准》是2020年发布的,资料年限为1974—2013年,其适用性需复核。本研究以杭嘉湖南排工程所在主要区域(即杭州市主城区,包括上城、拱墅、西湖、滨江、临平、钱塘6区)的现行暴雨强度公式误差复核为例,收集闸口站1982—2022年降雨资料,分析降雨极值变化规律,分别选用皮尔逊Ⅲ型分布和耿贝尔分布为理论分布线型,对不同历时暴雨强度经验频率点进行适线拟合,基于将平均绝对均方差与平均相对均方差按一定权重比例设置的目标函数,采用粒子群优化算法推求新的暴雨强度公式,与现行标准推荐的公式进行对比和复核。

## 1 研究方法 with 数据

### 1.1 降雨资料

根据现有资料情况,选用钱塘江江畔闸口站(30°12'N, 120°08'E)作为杭州主城区的代表站,与现行暴雨强度公式的取样站点杭州国家基准气候站邻近。采用年最大值法选样,收集得到闸口站1982—2022年的10、20、30、45、60、90、120、180、240、360、540、720和1440 min共13个历时的降雨极值资料,结合《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定,选取10、20、30、45、60、90、120和180 min共8个历时推求暴雨强度公式。此外,还收集到主城区闸口、拱宸桥、中村、七堡、余杭5站的1、2、3 h和60、120、180 min共6个历时降雨极值资料(表1)和闸口站1963—1981年的10、20、30、60、90和120 min共6个历时的降雨极值资料,用于暴雨强度公式的合理性分析。

表1 主城区闸口、拱宸桥、中村、七堡、余杭5站的降雨极值资料

Tab. 1 Rainfall extreme data information at Zhakou, Gongchenqiao, Zhongcun, Qibao and Yuhang stations in the main urban area

站点	年最大1、2、3 h降雨量的资料年限	年最大60、120、180 min降雨量的资料年限
闸口站	2012—2022年	1982—2022年
拱宸桥站	1989—2022年	2012—2022年
中村站	1982—2022年	2012—2022年
七堡站	1982—2022年	2012—2022年
余杭站	1964—1986年、2007年—2020年	1982—1986年、2007年—2020年

利用杭州主城区内拱宸桥、中村、七堡3个雨量站降雨极值资料间接分析暴雨强度公式的合理性。由于仅收集到3站年最大60、120和180 min降雨资料(2012—2022年),因此需要基于5个站点现有极值资料(表1)来估算年最大1、2、3 h降雨量与年最大60、120、180 min降雨量的比值系数,推求3站年最大60、120、180 min降雨系列。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 降雨趋势性分析

采用Mann-Kendall(M-K)趋势分析法分析闸口站年极值降雨量的趋势变化规律。M-K趋势分析法是世界气象组织推荐并广泛应用的非参数检验方法,它不要求样本必须符合某一特定分布,且样本中的特异值对检验结果影响不大,因此在暴雨、洪水等水文变量的趋势检验中适用性好,具体计算过程可参考文献[22]。

### 1.2.2 降雨突变性分析

采用Pettitt检验法分析闸口站不同时段降雨极

值是否存在突变。Pettitt突变检验法是一种基于秩的非参数突变点检测方法<sup>[23]</sup>,计算简便且受异常值影响较小,广泛应用于水文气象样本的突变分析,具体计算过程可参考文献[24]。

### 1.2.3 暴雨强度公式的推求

考虑到杭州市主城区现行暴雨强度公式选用的理论分布为耿贝尔分布<sup>[25]</sup>,而皮尔逊Ⅲ型分布<sup>[26]</sup>则是水利部门推求设计暴雨和设计洪水时广泛采用的理论分布,因此分别采用皮尔逊Ⅲ型分布和耿贝尔分布曲线对闸口站1982—2022年不同历时样本进行频率分布曲线适线拟合。采用粒子群优化算法进行暴雨强度公式参数求解,并对比分析新公式与现行公式的适用性。

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)要求,需计算暴雨强度计算结果抽样误差和暴雨公式均方差;重现期在2~20 a时,一般降雨强度的地方平均绝对均方差不宜大于0.05 mm/min,较大降雨强度的地方平均相对均方差不宜大于5%<sup>[27]</sup>。

平均绝对均方差计算公式为

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{m_0} \sum_{k=1}^{m_0} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (i'_{jk} - i_{jk})^2} \quad (1)$$

平均相对均方差计算公式为

$$\bar{\sigma}_g = \frac{1}{m_0} \sum_{k=1}^{m_0} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left( \frac{i'_{jk} - i_{jk}}{i_{jk}} \right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

式(1)和(2)中:  $m_0$  为重现期个数;  $m$  为不同历时个数;  $i'_{jk}$  为暴雨强度公式计算出的设计暴雨强度, mm/min;  $i_{jk}$  为经频率分布曲线拟合后确定的暴雨强度, mm/min。

城市设计暴雨强度公式的一般形式为

$$q(t) = \frac{166.7A_1(1 + C \lg P)}{(t + b)^n} \quad (3)$$

式中:  $A_1$ 、 $C$ 、 $b$ 、 $n$  为待求的参数;  $q$  为设计暴雨强度, L/(s·hm<sup>2</sup>);  $P$  为设计暴雨重现期, a;  $t$  为降雨历时, min。

### 1.2.4 粒子群优化算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法<sup>[28]</sup> 是一种模拟自然界鸟群觅食行为的随机搜索算法, 其流程见图 1。

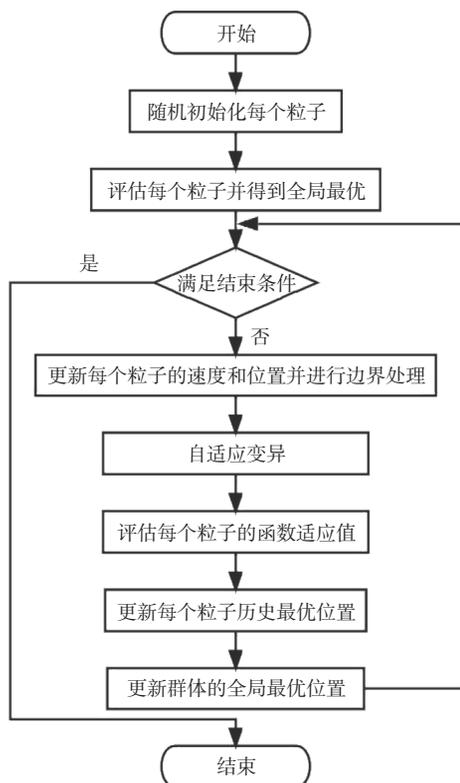


图 1 PSO 算法流程

Fig. 1 Flowchart of PSO algorithm

粒子更新公式为

$$v_{i,d}(t+1) = \omega \times v_{i,d}(t) + c_1 \times r_1 \times (p_{\text{Best},i,d} - x_{i,d}(t)) + c_2 \times r_2 \times (g_{\text{Best},d} - x_{i,d}(t)) \quad (4)$$

$$x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1) \quad (5)$$

式(4)和(5)中:  $v_{i,d}$  为第  $i$  个粒子的第  $d$  维自变量在相应时刻的速度;  $x_{i,d}$  为第  $i$  个粒子的第  $d$  维自变量在相应时刻的位置;  $p_{\text{Best},i,d}$  为第  $i$  个粒子的第  $d$  维自变量的最佳位置;  $g_{\text{Best},d}$  为群体最佳位置对应粒子的第  $d$  维自变量的位置;  $\omega$  为惯量权重;  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为 0 至 1 之间的随机数。

应用 PSO 算法求解暴雨强度公式参数的基本步骤如下:

设定参数  $A_1$ 、 $C$ 、 $b$ 、 $n$  的位置与速度边界, 将各参数范围设定为  $A_1 \in (0, 70)$ 、 $C \in (0.3, 1.5)$ 、 $b \in (0, 50)$ 、 $n \in (0, 1.2)$ ; 惯量权重  $\omega$  设定为 0.8; 学习因子  $c_1$ 、 $c_2$  分别设定为 2.0 和 2.5; 种群规模设定为 400; 迭代数设定为 50。

考虑到将目标函数设为全部重现期下的平均绝对均方差会造成重现期(2 a)下的平均绝对均方差高于其余重现期下的平均绝对均方差的情况, 不符合暴雨强度公式重点考察期为 2~20 a 重现期的要求, 因此目标函数将全部重现期下的平均绝对均方差与重现期为 2~20 a 下的平均相对均方差按一定权重比例设置, 目标函数为

$$F = 0.5\bar{\sigma}_{2\sim 100} + 0.5\bar{\sigma}_{2\sim 20} \quad (6)$$

根据 PSO 算法流程图进行迭代并寻找全局最优解, 将 PSO 算法程序运行一定次数, 根据历次优选出的最优参数不断缩小参数范围, 并选取目标函数最小的一组参数为最优参数。

## 2 暴雨强度公式推求及对比

### 2.1 降雨趋势性与突变检测

利用 M-K 趋势检验方法分析闸口站 1982—2022 年在 10~1 440 min 共 13 种不同历时下降雨极值序列的趋势性。结果表明, 不同历时降雨极值序列的统计特征值  $|Z|$  均小于 1.96, 年最大 10、20、30、45、90、360、540 和 720 min 降雨序列呈下降趋势, 而年最大 60、120、180、240 和 1 440 min 降雨序列呈上升趋势, 但 2 种变化趋势均未通过 95% 置信度的显著性检验。由此可认为闸口站 1982—2022 年各时段年最大雨量未发生显著的趋势性变化。

根据 Pettitt 突变分析, 在 0.05 显著性水平下, 闸口站 1982—2022 年 10~1 440 min 共 13 种不同历时的降雨极值序列均不存在显著的突变点。

## 2.2 频率分布曲线拟合

### 2.2.1 皮尔逊 III 型分布拟合结果

考虑到皮尔逊 III 型分布是水利部门工程水文设计规范推荐采用的理论分布线型,因此选用皮尔逊

III 型分布对闸口站 8 个历时(10、20、30、45、60、90、120 和 180 min)降雨极值序列进行频率分析。采用目估适线法与优化适线法相结合,得到拟合后的统计参数和精度结果见表 2。不同重现期(2~100 a)和不同历时条件下的设计雨强成果表见表 3。

表 2 皮尔逊 III 型分布参数

Tab. 2 Parameter values for Pearson type III model

参数	降雨历时/min							
	10	20	30	45	60	90	120	180
$E_x$	1.79	1.42	1.18	0.96	0.80	0.60	0.47	0.35
$C_v$	0.33	0.36	0.38	0.40	0.40	0.43	0.43	0.40
$C_s$	0.99	1.08	1.27	1.25	1.20	1.29	1.29	1.20
拟合度	0.989 2	0.970 0	0.966 5	0.972 0	0.982 3	0.972 6	0.969 7	0.982 0

表 3 采用皮尔逊 III 型分布的设计雨强成果

Tab. 3 Design rainfall intensities based on Pearson type III model

单位: mm/min

重现期/a	降雨历时/min							
	10	20	30	45	60	90	120	180
2	1.69	1.33	1.09	0.88	0.74	0.55	0.43	0.32
3	1.95	1.55	1.28	1.05	0.88	0.66	0.52	0.38
5	2.24	1.80	1.50	1.24	1.03	0.79	0.62	0.45
10	2.58	2.11	1.78	1.47	1.23	0.95	0.74	0.54
20	2.90	2.39	2.04	1.70	1.41	1.10	0.86	0.62
30	3.07	2.54	2.19	1.82	1.51	1.18	0.93	0.66
50	3.29	2.74	2.37	1.98	1.64	1.29	1.01	0.72
100	3.57	2.99	2.61	2.18	1.81	1.43	1.12	0.79

### 2.2.2 耿贝尔分布拟合

由于杭州主城区现行暴雨强度公式采用的理论分布是耿贝尔分布,为保持比较基础的一致性,本次同样选用耿贝尔分布对闸口站 8 个历时降雨极值

序列进行频率分析。拟合后的统计参数和精度结果见表 4,不同重现期(2~100 a)和不同历时条件下的设计雨强成果表见表 5。

表 4 耿贝尔分布参数

Tab. 4 Parameter values for Gumbel distribution model

参数	降雨历时/min							
	10	20	30	45	60	90	120	180
$\alpha$	2.35	2.72	3.11	3.71	4.40	5.49	6.89	10.03
$u$	1.54	1.21	0.99	0.81	0.67	0.50	0.39	0.29
拟合度	0.976 9	0.962 1	0.957 9	0.964 2	0.975 8	0.968 6	0.966 1	0.970 8

表 5 采用耿贝尔分布的设计雨强成果

Tab. 5 Design rainfall intensities based on Gumbel distribution

单位: mm/min

重现期/a	降雨历时/min							
	10	20	30	45	60	90	120	180
2	1.70	1.35	1.11	0.91	0.75	0.56	0.44	0.33
3	1.92	1.54	1.28	1.05	0.87	0.66	0.52	0.38
5	2.18	1.76	1.48	1.21	1.01	0.77	0.61	0.44
10	2.50	2.04	1.72	1.41	1.18	0.91	0.72	0.52
20	2.80	2.30	1.95	1.61	1.34	1.04	0.82	0.59
30	2.98	2.45	2.08	1.72	1.44	1.11	0.88	0.63
50	3.20	2.64	2.25	1.86	1.56	1.21	0.96	0.68
100	3.50	2.90	2.47	2.05	1.72	1.33	1.06	0.75

### 2.3 暴雨强度公式计算

采用粒子群优化算法,分别拟合上述 2 种理论分布线型条件下的暴雨强度公式,结果见式(7)和式(8)。

皮尔逊Ⅲ型分布暴雨强度新公式为

$$q(t) = \frac{8\,417.867(1+0.9641\lg P)}{(t+35.305)^{0.994}} \quad (7)$$

耿贝尔分布暴雨强度新公式为

$$q(t) = \frac{9\,855.817(1+0.8371\lg P)}{(t+34.736)^{0.995}} \quad (8)$$

经计算:对于皮尔逊Ⅲ型分布暴雨强度新公式,重现期在 2~20 a 时,计算所得的暴雨强度平均绝对均方差为 0.031 mm/min,平均相对均方差为 3.55%;对于耿贝尔分布暴雨强度新公式,重现期在 2~20 a 时,计算所得的暴雨强度平均绝对均方差为 0.022 mm/min,平均相对均方差为 2.61%。2 种理论分布推求的暴雨强度公式均满足《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)的精度要求。对比来看,耿贝尔

分布的暴雨强度新公式精度要稍优于皮尔逊Ⅲ型分布的暴雨强度新公式。

### 2.4 新公式与现行公式比较

杭州主城区现行的暴雨强度公式选用的是杭州国家基准气候站 1974—2013 年资料,采用年最大值法选样与耿贝尔分布理论线型编制而成,公式为

$$q(t) = \frac{1455.550(1+0.958\lg P)}{(t+5.861)^{0.674}} \quad (9)$$

对比分析新公式和现行公式在不同历时、不同重现期下的暴雨强度计算成果,见图 2。皮尔逊Ⅲ型分布新公式计算的 10 min 历时暴雨强度要比现行公式计算的暴雨强度偏小 3.6%~3.9%;其他历时下新公式的计算暴雨强度要比现行公式计算的暴雨强度偏大 7.2%~20.1%。类似地:耿贝尔分布新公式计算的 10 min 历时暴雨强度要比现行公式计算的暴雨强度偏小 3.1%~8.6%,其他历时下新公式计算的暴雨强度要比现行公式计算的暴雨强度偏大 0.9%~19.9%。

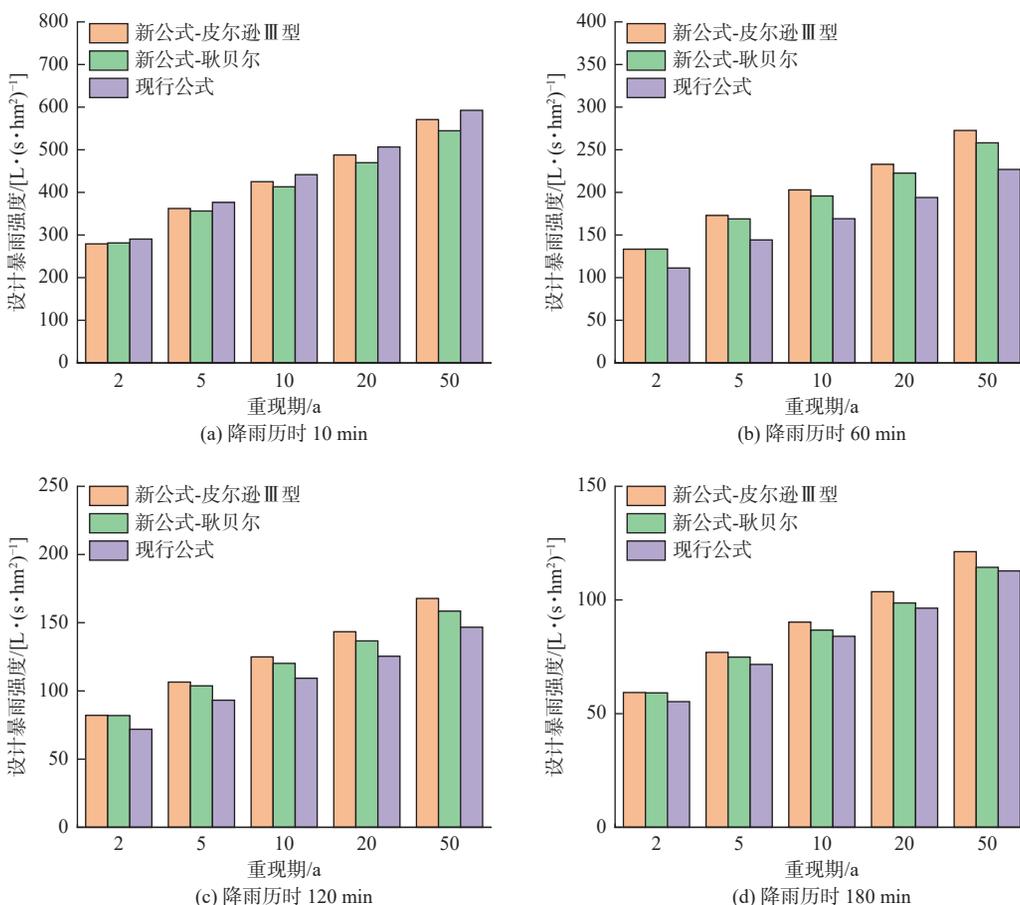


图 2 新推求的暴雨强度公式与现行公式计算的设计雨强对比

Fig. 2 Comparison of design rainfall intensities calculated using new and current rainfall intensity formulas

表 6 给出了新公式与现行公式 3 套参数  $A_1$ 、 $C$ 、 $b$ 、 $n$  对比。 $A_1$  和  $C$  分别是雨力参数和雨力变动参数,二者反映出同一历时下设计雨强随重现期增长

而增长的程度, $b$  和  $n$  分别是降雨历时修正参数和暴雨衰减指数,二者联用并共同反映出同一重现期下设计雨强随历时增长而递减的程度。对比表 6 中

参数变化,新公式的  $b$  和  $n$  较现行公式增大,这反映出同一重现期下设计雨强随历时增长而递减的程度在减弱,其与新公式 10 min 历时暴雨强度较现行公式偏小而其余历时下暴雨强度较现行公式偏大这一结果相符合;观察暴雨强度公式形式可以看出,  $A_1$  和  $C$  与设计雨强  $q$  成正比,  $b$  和  $n$  与设计雨强  $q$  成反比,由于新公式除 10 min 历时外的暴雨强度较现行公式偏大,而新公式的  $b$  和  $n$  较现行公式增大,新公式的  $A_1$  较现行公式增大也是合理的。

### 3 暴雨强度公式合理性讨论

#### 3.1 基于拱宸桥、中村、七堡三站资料的间接验证

利用杭州主城区内拱宸桥、中村、七堡 3 个雨

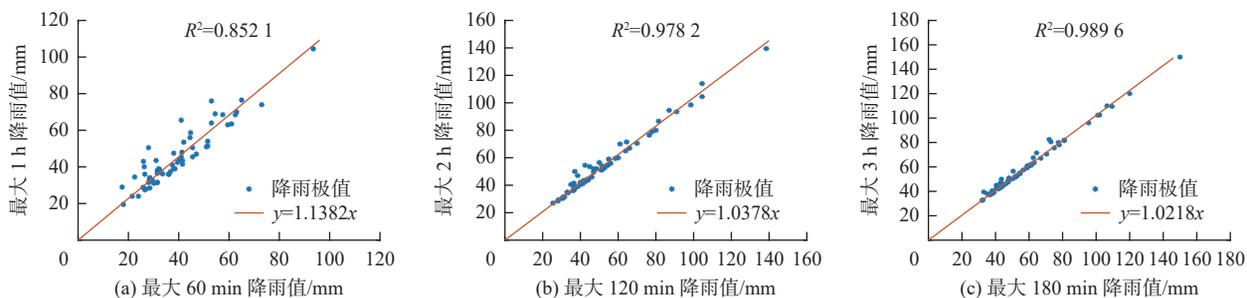


图3 分钟级降雨极值与小时级降雨极值的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between minute and hourly rainfall extremes

由图3可知:2 h和120 min与3 h和180 min降雨序列的决定系数大于0.97,相关性强,推求得到的120和180 min降雨极值资料具有可靠性;1 h和60 min降雨序列的决定系数为0.85,相关性稍低,但亦可推求60 min降雨极值作为间接资料使用。由此可推求得到拱宸桥站1989—2022年与中村、七堡站1982—2022年的年最大60、120和180 min降雨量资料,并分别选用皮尔逊Ⅲ型分布和耿贝尔分布进行适线,得到不同重现期和历时条件下的设计雨强成果。

结果表明,皮尔逊Ⅲ型分布新公式和耿贝尔分布新公式在历时60、120和180 min时的设计雨强要高于现行公式:在历时为60 min时,3站在不同频率下的设计雨强均大于现行公式对应频率下的设计雨强;在历时为120 min时,3站在1%~33%频率下的设计雨强大于现行公式对应频率下的设计雨强,仅在50%频率下的设计雨强偏小于现行公式对应频率下的设计雨强;在历时为180 min时,七堡站在不同频率下的设计雨强均偏小于现行公式对应

量站降雨极值资料间接分析暴雨强度公式的合理性。由于收集到的3站60、120和180 min降雨极值资料年限(2012—2022年)较短,因此需要建立年最大1、2、3 h降雨量与年最大60、120、180 min这2种数据序列同期的相关关系(图3),进而延长3站的年最大60、120和180 min降雨量资料年限。

表6 新推求的暴雨强度公式与现行公式的参数对比  
Tab. 6 Comparison of parameters between the new and current rainfall intensity formulas

公式	$A_1$	$C$	$b$	$n$
现行公式	8.733	0.958	5.861	0.674
新公式-皮尔逊Ⅲ型	57.507	0.964	35.305	0.994
新公式-耿贝尔	59.135	0.837	34.736	0.995

频率下的设计雨强,拱宸桥、中村站在低频率下设计雨强偏大于现行公式对应频率下的设计雨强,在高频率下设计雨强偏小于现行公式对应频率下的设计雨强。因此,上述结果间接证明了现行公式的设计暴雨成果是偏小的。以历时120 min为例,给出不同频率下的3站实测点数据与3个公式频率曲线的对比情况,见图4。

#### 3.2 新公式与现行公式存在差异的原因分析

从取样站点来看,为保证比较基础的一致性,同样基于闸口站1974—2013年的10、20、30、60、90、120 min共6个历时的降雨极值资料,选用耿贝尔分布进行适线,得到不同重现期和历时条件下的设计雨强成果,计算现行公式以及耿贝尔新公式较闸口站1974—2013年的设计雨强结果在各重现期下暴雨强度的增长率,见图5。

由图5(a)可以看出:基于相同资料年限(1974—2013年)以及相同理论线型分布(Gumbel分布),在10 min历时下现行公式较闸口站1974—2013年设计雨强的暴雨强度增长率均为正值,在其余历时下

暴雨强度增长率为负值; 取样站点的变化是本次新公式在除 10 min 历时下其余历时的暴雨强

度计算结果大于现行公式的原因之一。

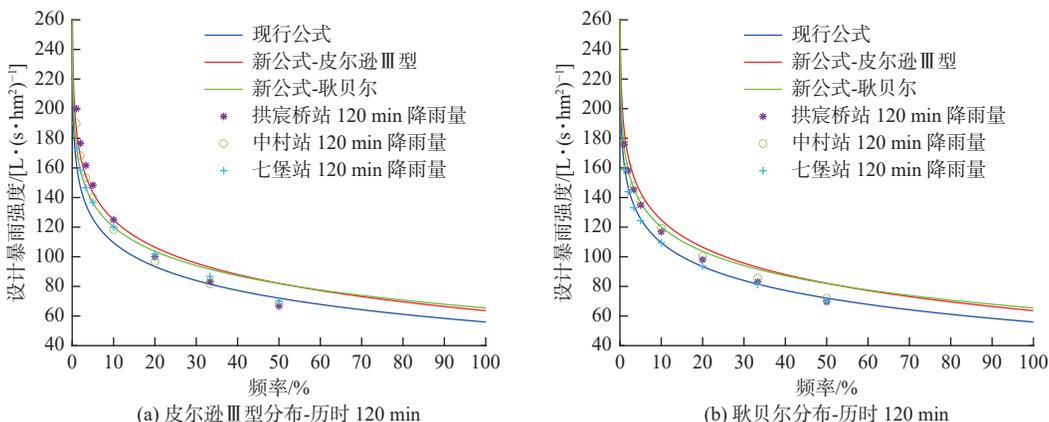


图 4 基于拱宸桥、中村、七堡 3 站 120 min 降雨极值的暴雨强度公式结果对比

Fig. 4 Comparison of three rainfall intensity formulas with the 120 min rainfall extremes at Gongchenqiao, Zhongcun and Qibao stations

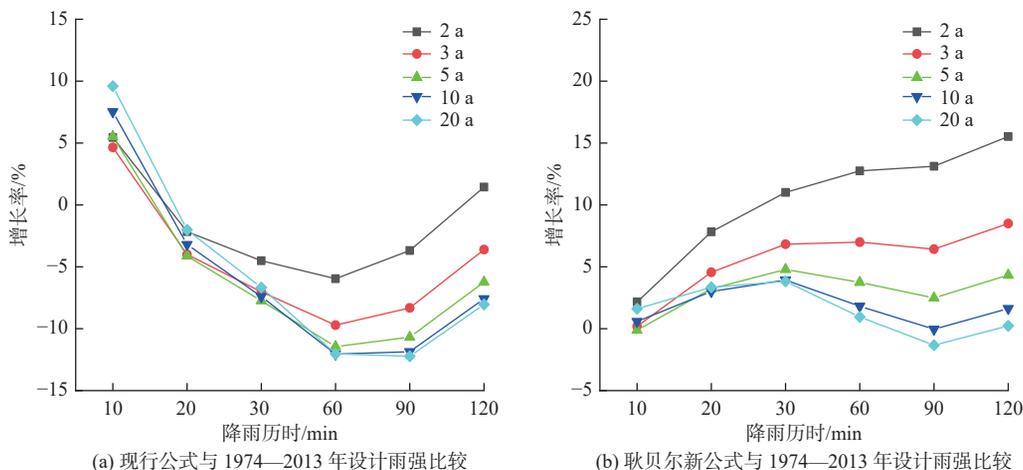


图 5 现行公式与耿贝尔新公式较闸口站 1974—2013 年的设计雨强在各重现期下暴雨强度的增长率

Fig. 5 The growth rate of rainstorm intensity under each return period for the current formula and the Gumbel new formula compared to the design rainfall intensity at Zhakou station from 1974 to 2013

从资料年限来看, 新公式采用的资料年限为 1982—2022 年, 而现行公式采用的资料年限为 1974—2013 年。因此, 比较闸口站两段不同资料年限的非重叠年份(即 1974—1981 年和 2014—2022 年)降雨极值特征, 结果见图 6。可以看出: 闸口站 2014—2022 年 20~120 min 历时下降雨极值的均值都要明显大于 1974—1981 年的结果, 2 个非重叠年份 10 min 历时长雨极值均值较为接近; 结合分析图 5(b), 各个历时下耿贝尔新公式较闸口站 1974—2013 年设计雨强的暴雨强度增长率为正值, 这说明资料年限的变化也是本次新公式在除 10 min 历时下其余历时的暴雨强度计算结果大于现行公式的原因之一, 本次新公式与现行公式存在差异的原因在于取样站点的变化与资料年限的变化。

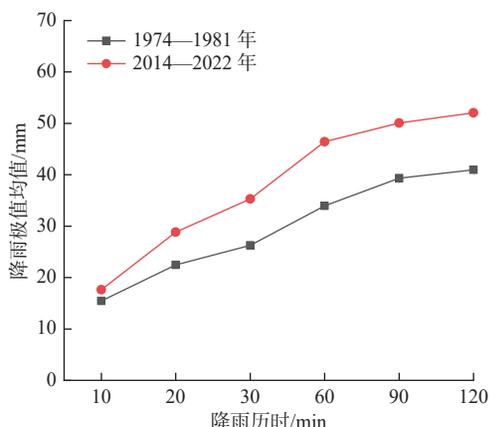


图 6 闸口站 1974—1981 年和 2014—2022 年的降雨极值特征  
Fig. 6 Characteristics of rainfall extremes for the periods of 1974-1981 and 2014-2022 at Zhakou Station

利用 M-K 趋势检验方法分析闸口站 1963—2022 年 10、20、30、60、90、120 min 共 6 种不同历时的降雨极值序列的趋势性, 见表 7。

表7 闸口站1963—2022年降雨序列趋势分析结果

Tab. 7 Trend analysis results of rainfall series from 1963 to 2022 at Zhakou Station

降雨历时/min	Z	趋势性	5%显著性
10	0.006 4	上升	不显著
20	1.001 6	上升	不显著
30	1.116 3	上升	不显著
60	1.856 1	上升	不显著
90	1.537 1	上升	不显著
120	1.447 8	上升	不显著

从表7可以看出,1963—2022年年最大10、20、30、60、90、120 min降雨序列均呈不显著上升趋势,说明杭州市主城区极端暴雨呈现不显著增强趋势,且拱宸桥、中村、七堡3站资料间接验证了现行公式计算结果偏小,说明与现行公式相比,本次推求的新公式兼顾合理性与安全性。

从暴雨强度公式的取样站点来看,杭州气候站与闸口站的距离邻近,均应具有较好的代表性和可对比性,气象部门在选取代表站点时未考虑到水利部门雨量站点的布设,建议后续进一步收集杭州气候站最新降雨极值资料,而本次推求出的新公式可为杭州市主城区排水防涝工程设计和相关设施建设提供参考。

#### 4 结论

采用杭州市主城区代表站(闸口站)1982—2022年降雨极值资料,推求皮尔逊Ⅲ型分布和耿贝尔分布2种理论分布下的暴雨强度公式,并与现行公式进行比较。纵观已有相关研究,对理论分布的线型选择还没有统一的规范,仅根据频率曲线拟合精度或暴雨强度公式拟合精度进行优选容易导致结果的不一致;考虑到频率曲线拟合是暴雨强度公式推求的基础,建议更侧重于选用频率曲线拟合较好的分布,或采用多个分布线型综合分析。

除10 min降雨历时下2个新公式的设计暴雨强度小于现行公式外,其他历时(20~180 min)下2个新公式的设计暴雨强度都明显大于现行公式结果。新公式与现行公式存在差异的原因在取样站点与资料年限范围的变化,经合理性分析,针对当前易涝的城市现状,本研究推求的新公式较现行公式更具合理性与安全性,并建议后续进一步收集杭州气候站降雨资料。

#### 参考文献:

- [1] 姜仁贵,王思敏,解建仓,等.变化环境下城市暴雨洪涝灾害应对机制[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 102-109. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2022.0012.
- [2] 张海凤,孔锋.透视我国农村地区暴雨洪涝灾害风险防范及提升对策[J].*水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(9): 13-24. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.09.002.
- [3] 朱慧琴,陈生,李晓俞,等.GPM卫星降水产品在“7·21”河南极端暴雨过程中的误差评估[J].*水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(1): 1-13. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.01.001.
- [4] MENG Y, HAO Z C, ZHANG Y, et al. Projection of compound wind and precipitation extremes in China based on phase 6 of the coupled model intercomparison project models[J]. *International Journal of Climatology*, 2023, 43(3): 1396-1406. DOI: 10.1002/joc.7922.
- [5] 徐卫红,李娜,王艳艳,等.基于城市洪涝仿真模型的天津中心城区内涝特征分析[J].*水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(6): 20-33. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.06.002.
- [6] 谌舟颖,孔锋.河南郑州“7·20”特大暴雨洪涝灾害应急管理碎片化及综合治理研究[J].*水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(8): 1-14. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.08.001.
- [7] 陈阿萍,柳杨,刘国庆,等.常州市主城区暴雨内涝风险分析[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 160-170. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2022.0018.
- [8] 兰仟,林凯荣,黄利燕,等.深圳城市两级排水系统设计暴雨重现期的衔接关系[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(3): 522-530. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0052.
- [9] 王银堂,李伶杰,胡庆芳,等.考虑局部趋势的非一致性水文频率分析方法[J].*水科学进展*, 2017, 28(3): 406-414. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.03.011.
- [10] HOSSEINZADEHTALAEI P, TABARI H, WILL-EMS P. Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity-duration-frequency curves over Europe[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125249. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125249.
- [11] VINNARASI R, DHANYA C T. Time-varying intensity-duration-frequency relationship through cli-

- mate-informed covariates[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127178. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.127178](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127178).
- [12] WRIGHT D B, BOSMA C D, LOPEZ - CANTU T. U. S. hydrologic design standards insufficient due to large increases in frequency of rainfall extremes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(14): 8144-8153. DOI: [10.1029/2019GL083235](https://doi.org/10.1029/2019GL083235).
- [13] 住房和城乡建设部, 中国气象局. 城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则[M]. 北京: 住房和城乡建设部, 中国气象局, 2014.
- [14] 袁婷婷, 李国芳, 王艺晗. 常州市区设计暴雨公式及雨型研究[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(6): 16-18,131.
- [15] 蒋明. 新暴雨形势下上海市暴雨强度公式修编研究[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(15): 114-117. DOI: [10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2015.15.028](https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2015.15.028).
- [16] 王睿, 徐得潜. 合肥市暴雨强度公式的推求研究[J]. *水文*, 2016, 36(1): 71-74. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0852.2016.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0852.2016.01.011).
- [17] 叶姗姗, 叶兴成, 王以超, 等. 淮安市暴雨强度公式的推导与对比[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(3): 9-12.
- [18] 刘焕彬, 邱黎, 王荣. 不同年限降雨资料编制暴雨强度公式适用性分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(19): 114-120. DOI: [10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.019](https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.019).
- [19] 袁冯, 张君枝, 王冀, 等. 气候变化背景下北京市短历时暴雨的强度及雨型变化特征[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(5): 802-809. DOI: [10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191129001](https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191129001).
- [20] 贾卫红, 徐卫忠, 李琼芳, 等. 基于暴雨衰减特性的上海市长历时综合暴雨公式[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 211-217. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2021.02.006](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2021.02.006).
- [21] 叶姗姗, 俞芳琴, 刘俊, 等. 不同资料年限下城市暴雨公式型式研究[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(5): 18-21.
- [22] PIRNIA A, GOLSHAN M, DARABI H, et al. Using the Mann-Kendall test and double mass curve method to explore stream flow changes in response to climate and human activities[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2019, 10(4): 725-742. DOI: [10.2166/wcc.2018.162](https://doi.org/10.2166/wcc.2018.162).
- [23] 邹磊, 张彦, 陈婷, 等. 汉江流域降水与径流演变特征研究[J]. *水文*, 2023, 43(2): 103-109. DOI: [10.19797/j.cnki.1000-0852.20210351](https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20210351).
- [24] 李艺珍, 岳春芳. 金沟河流域径流极值时间序列平稳性检验[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(10): 21-24.
- [25] 钱龙霞, 王红瑞, 张韧, 等. 小样本观测资料条件下的耿贝尔极值水文频率分析模型[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(5): 41-48. DOI: [10.15961/j.jsuese.201800311](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.201800311).
- [26] SONG X Y, LU F, WANG H. Penalized maximum likelihood estimators for the nonstationary Pearson type 3 distribution[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 579-589. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2018.10.035](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.035).
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京: 中国计划出版社.
- [28] 刘欣蔚, 王浩, 雷晓辉, 等. 粒子群算法参数设置对新安江模型模拟结果的影响研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 69-74,208. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180011](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180011).

## Revisited urban rainfall intensity formula: An example of the main urban area of Hangzhou

REN Zeling<sup>1</sup>, LI Binquan<sup>1,2</sup>, WANG Guoqing<sup>3</sup>, LIU Jiajin<sup>4</sup>, BAO Zhenxin<sup>3</sup>, LIU Cuishan<sup>3</sup>, ZHANG Leilei<sup>4</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** Extreme rainstorms in many cities have broken historical records repeatedly, thus urban flooding disasters occur frequently. Under the background of global warming, extreme rainstorm events showed an increasing trend. In the past few decades, China's urbanization process advanced rapidly, and the rain island effect caused by rapid urbanization also led to the frequent occurrence of extreme rainstorm events to some extent. The characteristics of

many urban rainstorms changed significantly, and the consistency of rainfall series no longer existed, so the current rainfall intensity formula may no longer be applicable. The rainfall intensity formula is one of the basic bases for the construction of urban drainage and waterlogging prevention infrastructure. To objectively reflect the characteristics and rules of urban rainfall and avoid underestimating the intensity of design rainstorms, the current formula needed to be reviewed and updated.

The main urban area of Hangzhou was taken as an example, based on the rainfall extreme data from 1982 to 2022 at Zhakou station, the Mann-Kendall trend analysis method and the Pettitt test method were selected to analyze the trend and abrupt change of the annual rainfall extreme and selected Pearson type III distribution and Gumbel distribution curve for model fitting, respectively. The particle swarm optimization algorithm was used for parameter estimation of the rainfall intensity formula, and the newly derived rainfall intensity formulas were reviewed and analyzed. The rationality of the newly derived rainfall intensity formulas was indirectly analyzed using the rainfall extreme data of Gongchenqiao, Zhongcun, and Qibao rainfall stations and the extended historical rainfall extreme data of Zhakou station.

The following results were obtained: (a) At the significance level of 0.05, the maximum rainfall series of 10, 20, 30, 45, 90, 360, 540 and 720 min at Zhakou station showed an insignificant downward trend. The annual maximum rainfall series of 60, 120, 180, 240 and 1 440 min showed an insignificant upward trend, and there were no significant abrupt change points in different duration rainfall series. (b) The average absolute mean square deviations of the new rainfall intensity formulas obtained from Pearson type III distribution and Gumbel distribution were less than 0.05 mm/min, and their average relative mean square deviations were less than 5%. (c) The rainfall intensities of the two new formulas were significantly larger than that of the current formula for considering different durations except for the 10-minute duration. (d) Based on the rainfall extreme data of Gongchenqiao, Zhongcun, and Qibao rainfall stations, the design rainfall intensities of the current formula were indirectly verified to be small. (e) It was shown that the difference between the new formulas and the current formula was due to the change in sampling stations and the change in the data years. Trend analysis results of the rainfall series showed that extreme rainfall in the main city of Hangzhou showed an insignificant increase, so the new formulas were more reasonable and safer than the current formula.

The rainfall intensity formulas of Pearson type III distribution and Gumbel distribution were deduced and compared with the current formula based on the rainfall extreme data from 1982 to 2022 at Zhakou station. The new rainfall intensity formulas derived from the latest rainstorm data could be used as a reference for the design of drainage and flood prevention projects and the construction of related facilities in the main urban area of Hangzhou.

**Key words:** rainfall extreme; rainfall intensity formula; Pearson type III distribution; Gumbel distribution; Hangzhou