

安楠. 乌兰浩特市短历时暴雨强度公式推算与研究[J]. 陕西气象, 2026(1): 52-57.

文章编号: 1006-4354(2026)01-0052-06

乌兰浩特市短历时暴雨强度公式推算与研究

安楠

(兴安盟气象局, 内蒙古乌兰浩特 137400)

摘要:选取兴安盟乌兰浩特站 1994—2023 年的逐年逐分钟降雨资料, 基于年最大值法滑动提取 11 个历时逐年最大降雨量建立样本, 利用耿贝尔、指数、P-III 型三种频率曲线拟合, 得到重现期-降雨强度-降雨历时的关系曲线, 通过最小二乘法与高斯-牛顿法求解暴雨强度公式中的参数, 最终构建了乌兰浩特市短历时暴雨强度总公式。结果表明, 耿贝尔分布配合最小二乘法拟合的公式精度最高, 平均绝对均方差为 0.031 mm/min, 适用于本地暴雨强度计算。新旧公式差异显著, 新公式在 5~30 min 历时计算的暴雨强度较旧公式偏小, 45~180 min 历时偏大, 且变化率随历时延长而增大。未来可结合更长序列数据和区域气候差异进一步优化公式。

关键词:年最大值法; 频率分布曲线; 暴雨强度公式

中图分类号: P463.3

文献标识码: A

洪涝灾害具有突发性强、破坏性大、影响范围广泛的特点, 严重威胁社会经济发展。近年来, 全球极端天气事件增多, 极端暴雨多发频发, 每逢雨季, 很多城市连连内涝, 影响城市安全运行, 甚至威胁群众生命财产安全。城市化进程的加快造成的城市热岛效应、下垫面变化和气溶胶排放等影响机制也对降水产生影响^[1-2]。提升城市内涝风险防范应对能力, 让城市在暴雨面前更具韧性, 必须加强城市排水防涝基础设施建设, 积极推进海绵城市建设。科学编制能够客观反映城市降雨特征与规律的城市暴雨强度公式, 是合理确定城市排水防涝与海绵城市建设工程规模的重要前提^[3]。

在《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》^[4](下文称导则)中, 明确指出一般建议 5 到 10 年对暴雨强度公式进行误差复核或修编。暴雨选样方法、频率分布曲线线型的选择、暴雨公式的型式以及相应统计参数的计算等方面, 均在一定程度上影响着公式的精度^[5]。很多城市已利用最新的降雨数据和编制方法, 进行暴

雨强度公式的更新与完善工作。例如, 任泽凌等^[6]利用闸口站 1982—2022 年降雨极值资料, 分别采用 P-III 型分布和耿贝尔分布曲线拟合, 结合粒子群优化算法推求杭州主城区暴雨强度公式参数, 并与现行规范公式进行对比分析; 于长文等^[7]利用雄县 40 a 分钟级降雨数据, 采用年最大值法选样, 结合 P-III 型曲线进行频率分析, 通过高斯-牛顿法求解参数, 得到雄安新区长历时综合暴雨强度公式; 周梦洁和袁慧玲^[8]基于 7 个城市的年最大降雨数据, 编制了不同年代的暴雨强度公式, 分析了各城市暴雨强度的年代际变化规律, 并探讨了城市化进程及气候变化对城市降雨特征的影响。

当前, 兴安盟乌兰浩特市所采用的暴雨强度公式编制所依据的降雨数据年代较为久远, 难以有效匹配当前城市快速发展的步伐与排水系统设计的新要求。从科学严谨性的角度出发, 亟需依据最新收集的降雨数据进行系统性修订, 以确保公式能够精准反映当前降雨特征, 助力提升城市应对暴雨洪涝灾害的能力。本文基于年最大值

收稿日期: 2024-09-09

作者简介: 安楠(1997—), 女, 汉族, 内蒙古兴安盟人, 学士, 工程师, 从事中短期预报工作。

基金项目: 兴安盟气象局科研开发项目(xaqx2024-1); 内蒙古自治区气象局引导性创新基金项目(nmqxydcx202207)

法,选用了耿贝尔型、指数型以及 P-III 型这三种不同的频率分布曲线对不同历时逐年最大降雨量进行拟合。同时,为了更准确地求解公式参数,采用了导则所推荐的最小二乘法与高斯-牛顿迭代法^[9],针对乌兰浩特市地区特点,推导出了短历时暴雨强度的新公式,并对新旧公式进行对比分析,旨在为乌兰浩特市城市排水防涝系统的规划设计以及关联基础设施的建设提供理论支撑。

1 资料与方法

1.1 资料来源

选取兴安盟乌兰浩特国家气象站(下文称乌兰浩特站)1994—2023 年的逐年逐分钟降雨资料,其中 1994—2004 年分钟降雨数据为降水自记纸记录经数字化处理及人工审核或修正后得到的资料,资料来自天擎数据平台,2005—2023 年为自动气象站记录数据,资料从内蒙古自治区气象数据中心获取,所有资料均通过质量控制。

1.2 暴雨公式推求方法

1.2.1 选样方法 采用年最大值法,遵循“不漏场次、不漏大值”的原则,以分钟为单位滑动选取 11 个不同历时的降雨数据(5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180 min),数据涵盖所有降雨场次。对于每种数据,逐年提取出对应的最大值。对筛选出来的样本进行了质量控制和特大值验证^[10],保证了数据质量。

1.2.2 样本频率和重现期计算 暴雨强度的经验频率表达式:

$$\rho = \frac{M}{N+1}, \quad (1)$$

式中, M 是样本按递减次序排列时的顺序号, N 是样本的总数, ρ 代表经验频率。

重现期 P 反映了某一特定强度或更高强度的暴雨事件平均多久发生一次。重现期 P 与经验频率 ρ 之间互为倒数,由此得出重现期计算公式为:

$$P = \frac{N+1}{M}. \quad (2)$$

1.2.3 理论频率分布曲线拟合 根据导则推荐,选取拟合效果较好的 P-III 型、耿贝尔型和指数型 3 种理论频率曲线对暴雨强度公式进行拟合。

P-III 型曲线又称为伽马分布,这种分布模型能够很好地模拟具有对称性和正态倾向的数据分布,但允许尾部比正态分布更重或者更轻,因此在处理极端值时具有一定的灵活性。其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)}. \quad (3)$$

式中,P-III 型分布由三个参数定义: α 、 β 和 a_0 。这三个参数与总体的三个统计参数均值 \bar{x} 、离差系数 C_v 和偏态系数 C_s 具有下列关系:

$$\alpha = 4/C_s^2, \quad (4)$$

$$\beta = \bar{x}/C_v C_s, \quad (5)$$

$$a_0 = \bar{x}(1-2C_v/C_s). \quad (6)$$

通过矩估计法间接推求出三个统计参数的近似值。 $\Gamma(\alpha)$ 为 α 的伽马函数。

耿贝尔分布根据极值定理导出,用于模拟不同分布的样本的最大(或最小)分布。耿贝尔分布函数是趋于广义极值分布的一种特殊形式,当形状参数 k 趋于 0 时,就成为了耿贝尔分布,也称为第 I 类极值分布。其概率密度函数为:

$$f(x) = a \exp(-y^{-e^{-y}}). \quad (7)$$

式中, $y = a(x-b)$, a 为分布的尺度参数, b 为分布的位置参数。

指数分布是一种用于描述非负型随机变量的概率分布。它的名字来源于其累积分布函数(CDF)的形状,该形状类似于指数函数。其概率密度函数为:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda(x-\lambda_0)}. \quad (8)$$

式中, $\lambda > 0$ 是分布的一个参数,常被称为率参数,即每单位时间内发生某事件的次数。 λ_0 表示分布的下限,对于短历时暴雨来说, $\lambda_0 > 0$ 。

1.2.4 暴雨强度公式拟合 我国现行的《室外排水设计标准》^[11](下文称标准),由中华人民共和国住房和城乡建设部于 2021 年颁布,其中明确定义了暴雨强度计算公式为:

$$q = \frac{167A_1(1+c \lg P)}{(t+b)^n}. \quad (9)$$

式中, q 为设计暴雨强度(L/(s·hm²)), P 为设计重现期(2~100a), t 为降雨历时(min)。 A_1 是雨力参数(mm); c 是雨力变动参数,没有量纲;

b 是降雨历时修正参数(min); n 是暴雨衰减指数。

对暴雨强度公式采用等号两侧取对数的线性化处理方式将其简化,使用数值逼近法和高斯-牛顿法,求解公式中的各参数。

1.2.5 精度检验 采用平均绝对均方差和平均相对均方差检验暴雨强度公式拟合精度。依据标准,当计算重现期位于 2~20 a 的区间内时,对于一般降雨强度区域,其平均绝对方差值应控制在不大于 0.05 mm/min 的水平;而对于强度较大的区域,平均相对均方差的值则不宜超过 5%。

平均绝对均方差计算公式:

$$X_m = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{R' - R}{t} \right)^2}{N}}, \quad (10)$$

平均相对均方差计算公式:

$$U_m = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{R' - R}{R} \right)^2}{N}} \times 100\%, \quad (11)$$

两式中, R' 是理论降水量, R 是实际降水量, t 是降水历时, N 是样本总数。

1.2.6 新旧暴雨强度公式对比 变化率计算公式是一种常见的统计理论,可以用来研究相关变量之间的变化趋势。计算新旧两版公式暴雨强度的变化率有助于分析两者之间的差异。其数学表达式为:

$$\Delta q = \frac{q_n - q_o}{q_o} \times 100\%, \quad (12)$$

式中: q_n 表示新公式计算的雨强, q_o 表示旧公式计算的雨强, Δq 表示变化率。

2 暴雨强度公式推求

2.1 频率分布曲线拟合

依据筛选出的统计样本,运用经验或理论频率曲线模型,对降水数据的趋势性特征进行了拟合与优化处理。鉴于研究设定的重现期超出了现有资料的时间覆盖范围,采用了理论频率分布曲线,对降水观测数据序列进行了必要的调整。选用了 P-III 型、指数型及耿贝尔型三种分布曲线,针对选取的 11 个不同降水历时样本分别进行拟合,推求出基于重现期、降雨强度、降雨历时的乌兰浩特站暴雨强度公式 $P-i-t$ 三联表(表略),用来后续推导并优化乌兰浩特站的暴雨强度公式。

乌兰浩特站的三种分布曲线和原始数据散点图如图 1 所示。从图中可以看出,理论频率曲线和经验频率曲线基本重合。

2.2 暴雨强度公式参数确定

本文聚焦于 P-III 型、指数型以及耿贝尔型这三类频率分布曲线,通过综合运用最小二乘法与高斯-牛顿法,对暴雨强度总公式进行了拟合分析。为了筛选出最优拟合效果的频率分布曲线,计算了各曲线的均方差指标,并把均方差的绝对值与相对值作为衡量拟合误差的双重标准。精度检验分为频率拟合的精度检验(表 1)和暴雨公式的精度检验(表 2)。乌兰浩特市降雨强度特征为一般强度,根据标准,首先考虑平均绝对均方差,再辅以平均相对均方差作为参考。

由表 1 可见,指数分布的平均绝对均方差和平均相对均方差均大于耿贝尔分布和 P-III 分布,对原始数据的拟合偏差最大。耿贝尔分布和 P-III 分布的拟合结果差别不大,P-III 分布的平均绝对均方差略小于耿贝尔分布,但平均相对均方差略大于耿贝尔分布,综合来看,两者对原始数据的拟合效果均较优。

表 1 不同理论频率曲线拟合值与原样本数据之间的误差比较

频率分布拟合	平均绝对均方差 /(mm/min)	平均相对均 方差/%
耿贝尔	0.067	8.054
P-III	0.064	8.880
指数	0.179	14.125

表 2 呈现了在不同计算方法下,上述三种理论频率曲线在 2 到 20 年设定重现期内的拟合误差表现。从总公式的拟合精度看,采用最小二乘法对参数进行估算的过程中,仅耿贝尔分布曲线拟合得出的暴雨强度公式通过了误差检验。相比之下,采用高斯-牛顿法计算出的平均绝对均方差除指数分布外均小于 0.05 mm/min,满足标准中既定的误差范围。在这两种计算方法下指数分布的平均绝对均方差均未通过检验,而耿贝尔分布均通过检验且误差最小,说明指数分布不适用

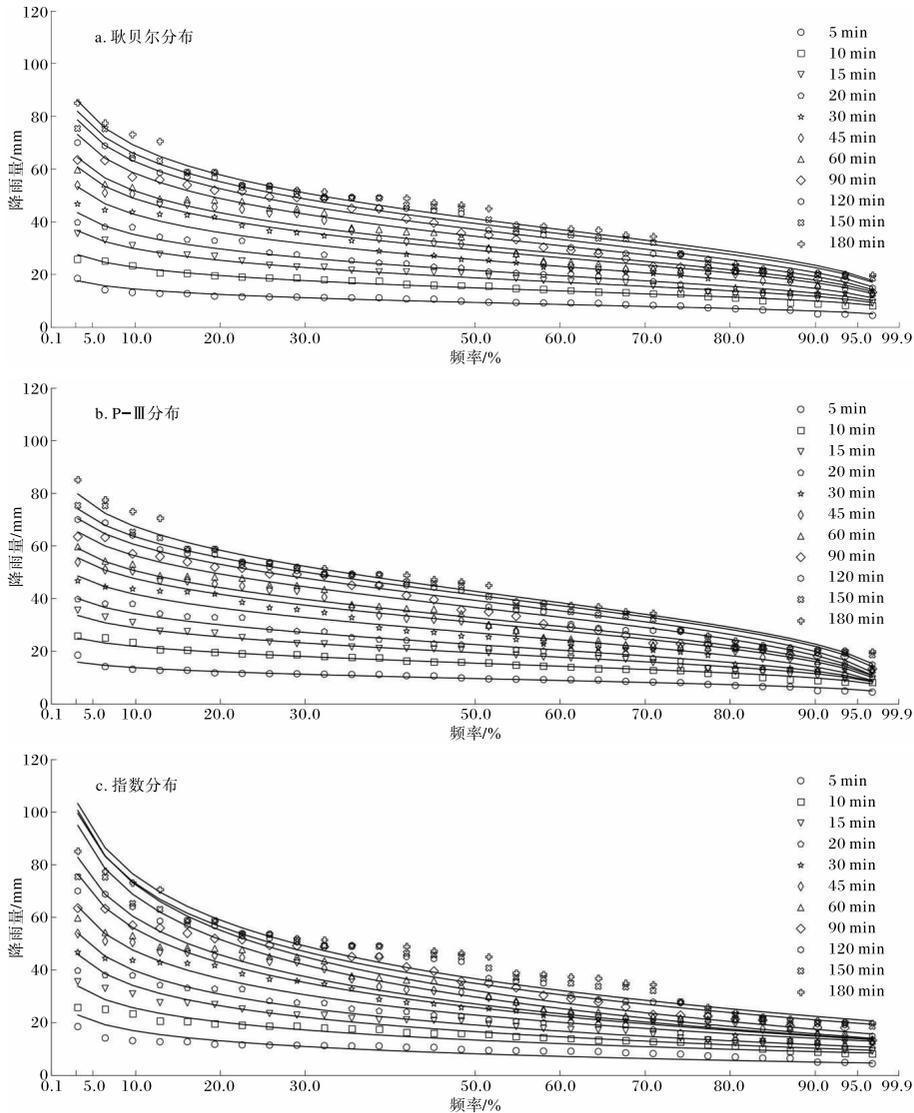


图1 1994—2023年乌兰浩特站不同历时年最大降雨量理论分布曲线及原始资料点图

表2 不同理论频率曲线对暴雨强度总公式拟合结果的误差比较

公式计算方法	耿贝尔分布		P-III分布		指数分布	
	平均绝对均方差/(mm/min)	平均相对均方差/%	平均绝对均方差/(mm/min)	平均相对均方差/%	平均绝对均方差/(mm/min)	平均相对均方差/%
最小二乘法	0.031	2.118	0.051	3.146	0.106	8.143
高斯-牛顿法	0.034	2.167	0.048	3.506	0.065	3.564

于本地区暴雨强度公式的拟合,耿贝尔分布最有优势,P-III分布次之。当分别采用最小二乘法和高斯-牛顿法拟合耿贝尔分布曲线时,运用最小二乘法所得总公式的平均绝对均方差和平均相对均方差都更小。

因此,可以得出结论,采用最小二乘法对耿贝尔分布曲线进行拟合所得的总公式具有更高的精度,为总公式中最优结果,由此得到的暴雨强度公式:

$$q = \frac{3044.410(1 + \lg P)}{(t + 13.788)^{0.867}} \quad (13)$$

3 新旧两版暴雨强度公式对比

旧版乌兰浩特市暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{4771.52 \times (1 + \lg P)}{(t + 15.9)^{0.97}} \quad (14)$$

为了深入对比旧版公式与本文推算的公式的

差异,分别计算 11 个不同降水历时及 5 个设定重现期的相应暴雨强度并计算两者的变化率,由于在同一个降雨历时条件下计算出来的不同重现期的暴雨强度变化率相同,表 3 变化率一栏不再重复列出相同数据。

表 3 乌兰浩特市不同重现期新旧公式暴雨强度及变化率

降雨历时/min	旧版公式暴雨强度/(mm/min)					新版公式暴雨强度/(mm/min)					变化率/%
	2 a	3 a	5 a	10 a	20 a	2 a	3 a	5 a	10 a	20 a	
5	1.948	2.212	2.544	2.995	3.446	1.865	2.117	2.435	2.867	3.298	-4.295
10	1.582	1.797	2.066	2.433	2.799	1.520	1.725	1.985	2.336	2.688	-3.962
15	1.333	1.514	1.741	2.050	2.358	1.288	1.462	1.682	1.980	2.278	-3.402
20	1.153	1.309	1.506	1.772	2.039	1.121	1.273	1.464	1.723	1.983	-2.759
30	0.908	1.031	1.186	1.396	1.607	0.895	1.017	1.169	1.376	1.584	-1.429
45	0.690	0.784	0.902	1.061	1.221	0.694	0.787	0.906	1.066	1.227	0.450
60	0.558	0.633	0.728	0.857	0.986	0.570	0.647	0.744	0.876	1.007	2.126
90	0.404	0.458	0.527	0.621	0.714	0.424	0.481	0.553	0.651	0.749	4.953
120	0.317	0.360	0.414	0.487	0.561	0.340	0.386	0.444	0.523	0.601	7.267
150	0.261	0.297	0.341	0.402	0.462	0.285	0.324	0.373	0.439	0.505	9.223
180	0.222	0.252	0.290	0.342	0.393	0.247	0.280	0.322	0.379	0.436	10.919

由表 3 可知,新公式在不同重现期 5~30 min 历时的暴雨强度值均小于旧版公式,而 45~180 min 历时的暴雨强度值均大于旧版公式,这一变化幅度介于 0.450%~10.919%,平均达到了 4.617%。其中 45 min 历时在不同重现期下的平均相对误差最小,为 0.450%,90~180 min 历时平均相对误差较大。在相同的重现期条件下,随着降雨持续时间的增加,降雨强度的变化率逐渐增大,其中 180 min 历时的增幅达到了最大,为 10.919%。两个公式在计算上存在的差异,可以归因于它们在编制过程中所依据的样本时段、采用的采样方法以及公式推导方法的不同^[12]。新旧暴雨公式差异较大,这与暴雨特性的改变有关。新公式基于最新的降雨数据和更优的模型及方法,修正了旧公式对 5~30 min 历时降雨强度的高估和 45~180 min 历时降雨强度的低估,反映了气候变暖背景下长历时暴雨的增强趋势。

4 结论

本文基于乌兰浩特站逐分钟降雨资料,采用

年最大值法对样本数据进行筛选,并结合耿贝尔型、指数型以及 P-III 型频率分布曲线进行拟合,通过运用最小二乘法和高斯-牛顿法,推算出了乌兰浩特市新版短历时暴雨强度公式,并将其与旧版公式进行了对比分析。研究结果表明:

(1)在众多方法中,采用耿贝尔分布曲线配合最小二乘法进行推算所得到的暴雨强度公式误差最小,精度最高,更适合乌兰浩特市本地应用。

(2)在相同重现期下,随着降雨历时的延长,新旧暴雨公式雨强变化率逐渐增大。相较于旧版暴雨强度公式,新公式 5~30 min 历时计算的暴雨强度值比旧公式偏小,45~180 min 历时计算的暴雨强度值偏大。

兴安盟立体气候特征明显,地区差异显著,未来可推算和研究兴安盟不同气候态下或不同区域内的暴雨强度公式。此外,由于降水资料年限的选取对暴雨强度公式的编制影响很大,建议用更加全面的降雨资料和多样的编制方法对公式修订和完善。

参考文献:

- [1] 胡庆芳,张建云,王银堂,等. 城市化对降水影响的研究综述[J]. 水科学进展,2018,29(1):138-150.
- [2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491.
- [3] 刘俊,周宏,鲁春辉,等. 城市暴雨强度公式研究进展与述评[J]. 水科学进展,2018,29(6):898-910.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,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:中国城市出版社,2014.
- [5] 梅超,刘家宏,王浩,等. 城市设计暴雨研究综述[J]. 科学通报,2017,62(33):3873-3884.
- [6] 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.
- [7] 于长文,许启慧,杨宜昌,等. 雄安新区长历时暴雨强度公式及其设计雨型推求[J]. 气象与环境学报,2021,37(5):78-85.
- [8] 周梦洁,袁慧玲. 中国部分城市暴雨强度增长率及城市化影响研究[J]. 中国给水排水,2022,38(19):126-131.
- [9] 张子贤. 用高斯-牛顿法确定暴雨公式参数[J]. 河海大学学报,1995,23(5):106-111.
- [10] 马玉峰. 特大值对暴雨强度公式计算精度的影响分析[J]. 内蒙古气象,2015(4):23-26.
- [11] 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,2021.
- [12] 白龙,吴滨,杨丽慧,等. 基于多种拟合方法的福州长短历时暴雨强度公式研究[J]. 海峡科学,2020(9):15.