

杨译舒, 叶兴成, 王飞, 等. 基于不同频率分布的乐山市暴雨参数分析[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 214-218. [YANG Yishu, YE Xingcheng, WANG Fei, et al. Analysis of Rainstorm Parameters in Leshan City Based on Different Frequency Distribution [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 214-218. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.036.]

基于不同频率分布的乐山市暴雨参数分析*

杨译舒¹, 叶兴成², 王 飞², 朱程亮², 游志康¹, 欧淑芳¹, 刘 俊¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 宿迁市水务局, 江苏 宿迁 223800)

摘 要: 利用四川省乐山市气象站 1981-2015 年短历时暴雨雨量资料, 采用年最大值法选择推求暴雨公式, 分析皮尔逊-Ⅲ型分布曲线、耿贝尔分布曲线、指数分布曲线三种频率分布曲线模型与原始暴雨资料的适配性, 并对不同频率分布的暴雨参数进行分析。结果表明三种频率分布曲线导出的暴雨公式在计算重现期为 2-20 年时, 仅耿贝尔分布曲线符合精度要求。将新编的暴雨公式与现行暴雨公式、周边城市暴雨公式及《中国暴雨统计参数图集》进行了对比分析, 新一代乐山市暴雨公式参数合理性得以验证, 为乐山市排水系统的优化设计、排水管网建设与改造提供了新的理论参考。

关键词: 暴雨强度公式; 皮尔逊-Ⅲ型分布曲线; 耿贝尔分布曲线; 指数分布曲线; 暴雨参数; 四川乐山市

中图分类号: P426.6; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)04-0214-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.036

暴雨公式是作为城市防洪、排涝规划, 各种水系规划以及相关工程设计的雨量计算依据。工程建设的合理性以及防洪安全性与暴雨公式计算精度的高低密切相关。选择反映地区暴雨特性的暴雨频率分布曲线是得到准确合理的设计暴雨的首要条件, 同时基于不同频率分布曲线的暴雨公式参数的确定也直接影响到公式精度的高低, 因此选取最优的暴雨频率分布曲线型得到相应的暴雨公式参数, 用以提高暴雨公式的精确度就显得尤为重要。邓培德^[1]论证了多个具有代表性的地区的暴雨资料后认为年最大值法选择适用于耿贝尔分布曲线, 年多个样法适用于指数分布曲线; 陈正洪^[2]等利用深圳市气象局 1954-2003 年 50 年间的暴雨记录, 用指数分布和 P-Ⅲ分布进行分布曲线拟合和选优, 得到了理论上的雨强-历时-重现期三联表, 在此基础上再分别采用最优法、二分搜索法和广义逆法等 3 种方法求解暴雨公式参数, 根据误差最小的原则确定最优方法; 王睿^[3]等对合肥市董铺站 1965-2012 年共 48 年的全部暴雨资料进行分析, 用年最大值法取样, 采用皮尔的数据分别采用皮尔逊-Ⅲ型分布, 指数分布和耿贝尔分布曲线进行拟合, 对频率分析后用了麦夸尔特法, 高斯-牛顿法, 遗传算法, 拟牛顿法, 模拟退火法, 粒子群算法共 6 种优化算法进行公式参数推求, 最终确定以指数分布配合麦尔特法确

定的公式精度最好。

乐山市现行的暴雨强度公式已有 40 多年历史, 为 1973 年编制。随着近年来全球气候特征发生突变, 极端降水事件发生频率较编制年份有了较大增长; 同时, 由于乐山市城市化规模的不断扩张, 使得水文气象特性发生变化, 原公式的暴雨强度已不能代表现状及未来一段时间的暴雨特性, 不能适应排水工程设计有关部分的要求。乐山市气象局已累积有自 1981-2015 年 35 年降雨资料, 满足新规范规定的年最大值法选择的年限要求, 乐山市暴雨强度公式的重新编制是一项十分必要的工作, 由此展开对不同频率分布下的乐山市新编暴雨公式参数分析。

1 乐山市短历时降雨特性分析

乐山市位于四川盆地的西南边缘部分, 东及东南方向跨川中丘陵, 向北连接成都平原, 西部连接川南山地, 市域内盛行东南季风和西南季风, 同时受地形抬升作用的影响, 乐山市具有雨量充裕, 气候湿润的特点。大部分地区的年均降水量在 1 000 mm 以上。夏、秋两季雨量占全年总降水量的约 80%, 冬春季雨量只占约 20%, 此类地区内季节降水量不均是由于海陆季风季节性变迁造成的。

* 收稿日期: 2017-04-14 修回日期: 2017-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41471015)

第一作者简介: 杨译舒(1994-), 女, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要从事城市防洪与排水方面的研究。

E-mail: arashi@hhu.edu.cn

通讯作者: 刘俊(1968-), 男, 安徽当涂人, 教授、博士生导师, 主要从事城市防洪与减灾等研究. E-mail: ljohuai@163.com

根据乐山市气象站 1981—2015 年共计 35 年的暴雨雨量资料, 选取 60、120、180 min 共 3 个历时雨量最大值形成雨量样本系列, 计算逐年各历时的平均降雨强度, 对 3 个历时平均降雨强度取 5 年进行滑动平均, 计算结果见图 1。

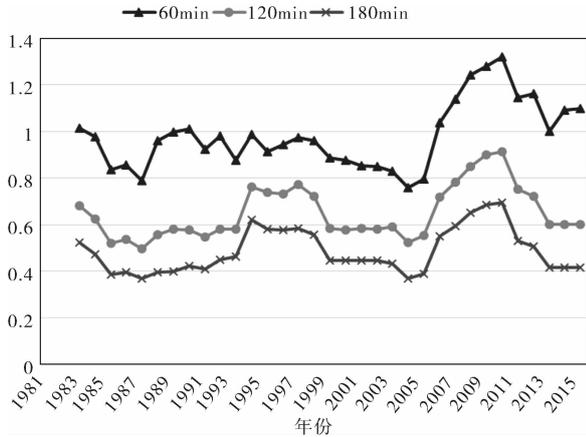


图 1 乐山市各历时平均降雨强度滑动平均图

从图 1 可以看出, 自 1981 年以来, 乐山市短历时的降雨强度总体趋势是呈先减小后增大, 再减小再增大又减小。第一次增大是由 1985 年及 1988 年的大暴雨导致, 其中长历时、大范围致洪暴雨的主要成因是由于高原涡^[4], 该系统的特殊结构有利于暴雨的形成和维持。第二次增大发生在近十年, 迅速发展的城市经济、城市化进程的加快, 引起区域水循环和水文过程发生变化, 由此引发“热岛效应”、“雨岛效应”、“干/湿岛效应”等城市化水文效应, 导致城市区域降雨过程特性突变, 城市降水量增加。

2 暴雨强度公式参数分析

2.1 不同线型拟合离差分析

新编乐山市暴雨强度公式采用年最大值法^[5]选取暴雨样本, 资料系列为 1981—2015 年共计 35 年的短历时暴雨雨量资料, 采用 5、10、15、20、30、

45、60、90、120、150、180 min 共 11 个时段作为计算降雨历时。采用指数频率分布曲线、耿贝尔频率分布曲线和皮尔逊Ⅲ型频率分布曲线进行频率计算。根据样本资料进行雨量频率计算, 综合考虑各种分布曲线频率计算的离差及其相对应的暴雨强度公式统计误差, 最终将按照综合误差最小的原则选定雨量频率计算所采用的频率分布曲线^[6]。

采用矩法确定皮尔逊 - Ⅲ型分布模型的初始统计参数, 运用最小二乘法原理估算指数分布及耿贝尔分布模型的参数, 然后在计算机上采用综合目估适线法调整参数后定线。根据样本与频率曲线之间的离差大小判断拟合效果的优劣, 均方差越大, 表明本次拟合结果效果越差, 反之则表明拟合效果越好。

从表 1 中可以看到, 年最大值法选样时, 不同降雨历时的拟合程度不同, 三种频率曲线均在降雨历时 $t = 10 \text{ min}$ 的绝对均方差为最大, 在 $t = 180 \text{ min}$ 的绝对均方差最小。说明三种频率曲线在 $t = 10 \text{ min}$ 的样本资料拟合度最低, 而对 $t = 180 \text{ min}$ 的样本资料拟合度最高。在皮尔逊 - Ⅲ型频率分布曲线、指数频率分布曲线和耿贝尔频率分布曲线三种线型中, 指数分布拟合得到的平均绝对均方差和平均相对均方差最大, 为 0.066 和 6.9%; 皮尔逊 - Ⅲ型分布与耿贝尔分布拟合得到的平均绝对均方差相近, 分别为 0.040 与 0.046, 二者的平均相对均方差也较为接近, 分别为 4.1% 和 4.4%, 均符合规范规定的误差要求。综上, 三种频率曲线对样本点的拟合优劣顺序依次为: 皮尔逊 - Ⅲ型分布、耿贝尔分布、指数分布。但是, 仅依据上述拟合精度选择适线线型, 得到的暴雨强度公式精度不一定能满足规范要求, 求得的暴雨强度公式之精度高低才是最终选取的依据。

2.2 频率分布线型的选定

本次暴雨公式编制采用我国现行《室外排水设计规范》^[7]所推荐的暴雨强度公式型式:

$$I = \frac{A}{(t+b)^n} = f(A, b, n)。 \quad (1)$$

表 1 样本频率计算拟合离差比较

降雨历时 t/min	P - Ⅲ型分布拟合离差		指数分布拟合离差		耿贝尔分布拟合离差	
	绝对均方差 /(mm/min)	相对均方差/%	绝对均方差 /(mm/min)	相对均方差/%	绝对均方差 /(mm/min)	相对均方差/%
5	0.057	2.7	0.081	4.1	0.054	2.4
10	0.059	3.0	0.105	6.1	0.065	3.5
15	0.038	2.6	0.096	6.5	0.050	3.3
20	0.034	2.3	0.096	7.5	0.046	3.6
30	0.038	2.9	0.080	7.4	0.050	4.6
45	0.045	3.9	0.053	5.7	0.053	4.3
60	0.052	4.6	0.061	6.4	0.054	4.7
90	0.035	4.9	0.049	8.0	0.039	5.3
120	0.039	6.8	0.043	8.8	0.041	6.1
150	0.025	5.9	0.032	8.1	0.028	5.3
180	0.021	5.0	0.026	7.3	0.024	4.6
平均均方差	0.040	4.1	0.066	6.9	0.046	4.4

式中： I 为暴雨强度计算值(mm/min)； n 为暴雨衰减指数； A 为称雨力(mm/min)，其中雨力公式型式为 $A = A_1 + ClgP$ ； b 为降雨历时附加参数。

暴雨公式为无法线性化的非线性方程，求解其参数时很难用手算法计算出结果。常用高斯-牛顿法、麦夸尔特法、牛顿迭代法、优选回归分析法等方法求解非线性方程。并采用加速遗传算法、蚁群算法等方法进行最优化。暴雨强度公式精度的进一步提高可以借助于计算机的解析法。本文采用高斯-牛顿法^[8]求解四参数非线性方程，从而得出暴雨强度公式。

根据上述频率分布模型的拟合结果，分别建立皮尔逊-III型分布、耿贝尔分布、指数分布曲线与降雨资料的“重现期-降雨雨强-历时(简称 $P-i-t$)经验数据表”。采用高斯-牛顿法计算暴雨强度公式中各参数值，求出不同条件下公式的雨强值 x ，根据此雨强值与前述频率分析后产生的 $P-i-t$ 表格中的雨强值可以计算出3种频率分布模型的精度。

《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》^[9]规定：计算重现期在2~20年时，在一般降雨强度的地方，平均绝对方差不宜大于0.05 mm/min。在较大降雨强度的地方，平均相对方差不宜大于5%。

此次用三种频率曲线拟合开发的暴雨公式中，耿贝尔分布函数进行理论修正所得暴雨公式精度最高，在重现期2~20年、2~30年、2~50年时参数精度均满足要求。但是在重现期进一步增大后，误差也会进一步增大。以满足规范为前提选择精度最高的一组参数，即重现期2~20年时的暴雨强度公式参数。由此确定用耿贝尔分布函数拟合乐山市暴雨强度的经验频率。

2.3 公式参数的确定

乐山市暴雨强度的经验频率确定采用耿贝尔分布函数拟合，因此采用由耿贝尔分布函数估算的参数推求暴雨公式，其中 $A_1 = 13.270$ ， $C = 7.567$ ， $b = 17.392$ ， $n = 0.665$ 。

据以上计算和分析，得乐山市暴雨强度公式为：

$$q = \frac{2213.141(1 + 0.571 \lg P)}{(t + 17.392)^{0.655}} \quad (2)$$

3 暴雨强度公式参数合理性分析

暴雨强度公式的合理性反映了参数估计的准

表2 不同重现期3种理论分布模型精度分析评定表

分布模型	误差	重现期范围				
		2~100年	2~10年	2~20年	2~30年	2~50年
皮尔逊-III型分布	绝对均方差	0.047	0.060	0.070	0.080	0.093
	相对均方差	4.635	5.957	6.834	7.648	8.561
指数分布	绝对均方差	0.047	0.057	0.064	0.070	0.078
	相对均方差	4.619	5.493	6.012	6.418	6.819
耿贝尔分布	绝对均方差	0.038	0.045	0.049	0.053	0.057
	相对均方差	3.769	4.254	4.536	4.786	5.061

确性，由此对新编暴雨公式与现用暴雨公式、周边城市暴雨公式以及《中国暴雨统计参数图集》进行比较分析，论证暴雨公式参数率定方法的正确性和结果的准确合理性。

3.1 与原暴雨强度公式的比较分析

由表3分析发现，与73版公式相比，在重现期 $P = 2 \sim 30$ 年时，新公式得出的暴雨强度总体呈增大的趋势，且平均偏差随着重现期的增大而减小。例如，在降水历时90 min时，重现期为2年时，新编暴雨强度公式较73版暴雨强度公式计算的雨强偏大3.78%，重现期10年时偏大只有1.51%。根据《四川省近50年降水的变化特征及影响》^[10]的研究，四川盆地西南部乐山地区，近年来虽然暴雨日数是呈减小的趋势，但暴雨强度却是增强的，随着历时，重现期的增加，雨强变化的幅度趋小。这与本次分析的结论是一致的，主要原因有：①乐山市降水正处于丰水段，极短历时降水量增大，较长历时变化不明显；②近年来乐山市社会经济和城市建设快速发展，城市规模迅速扩张，城市化使短历时暴雨几率增加，但影响并不明显，这表现在较长历时，高重现期降雨强度变化不大。

3.2 与周边城市暴雨强度公式的比较分析

眉山市位于四川盆地成都平原西南部，岷江中游，南连乐山，年均降雨量983~1490 mm，气象条件与乐山市相近；2015年，眉山市编制了新的暴雨公式，编制方法采用年最大值法，资料具有较好的代表性和可靠性。

现将新编的乐山市年最大值法暴雨强度公式与眉山市2015年编制的暴雨强度公式各指定重现期(年)和降雨历时(min)的降雨强度的偏差进行计算，结果见表4。

由表4可以看出，与眉山市暴雨强度公式计算值相比，乐山市新编年最大值法暴雨强度公式5、10、15、20、30、45、60、90和120min计算平均值分别小15.2%、15.0%、14.5%、13.9%、12.5%、10.5%、8.6%、5.1%和2.3%，150和180min计算平均值分别大0.3%、2.4%。综上，新编乐山市年最大值法暴雨强度公式与眉山市2015年编制的暴雨强度公式各指定重现期和降雨历时的降雨量相差10%左右。本次推算的暴雨强度公式参数是合理的。

表 3 新编暴雨强度公式与现用 73 版暴雨强度公式计算雨强的偏差 ((新编 - 现用)/现用) %

t/min	P/年						
	2	3	5	10	15	20	30
5	16.02	16.00	16.35	17.30	18.06	18.66	8.85
10	10.63	10.49	10.66	11.36	11.95	12.44	3.79
15	7.15	6.91	6.95	7.45	7.93	8.33	0.53
20	4.84	4.52	4.45	4.80	5.17	5.50	-1.64
30	2.28	1.83	1.59	1.69	1.92	2.15	-4.04
45	1.09	0.50	0.07	-0.09	-0.01	0.11	-5.15
60	1.40	0.69	0.12	-0.22	-0.25	-0.22	-4.87
90	3.78	2.90	2.13	1.51	1.32	1.25	-2.63
120	7.01	6.00	5.07	4.25	3.96	3.81	0.40
150	10.45	9.33	8.27	7.31	6.92	6.72	3.62
180	13.89	12.67	11.51	10.42	9.97	9.71	6.85
平均偏差	7.14	6.53	6.11	5.98	6.09	6.22	0.52

表 4 新编乐山市暴雨强度公式与眉山市强度公式计算雨强的偏差 ((乐山 - 眉山)/眉山) %

t/min	P/年							平均偏差
	2	3	5	10	15	20	30	
5	-1.15	-7.21	-12.85	-18.30	-20.73	-22.21	-24.02	-15.21
10	-0.87	-6.95	-12.60	-18.07	-20.51	-21.99	-23.81	-14.97
15	-0.30	-6.41	-12.09	-17.60	-20.05	-21.54	-23.34	-14.48
20	0.41	-5.74	-11.47	-17.01	-19.48	-20.98	-22.81	-13.87
30	1.99	-4.26	-10.08	-15.71	-18.21	-19.74	-21.60	-12.52
45	4.37	-2.02	-7.98	-13.74	-16.30	-17.86	-19.77	-10.47
60	6.61	0.08	-6.00	-11.89	-14.51	-16.10	-18.06	-8.55
90	10.56	3.78	-2.52	-8.62	-11.34	-12.99	-14.96	-5.16
120	13.92	6.94	0.44	-5.84	-8.64	-10.35	-12.51	-2.29
150	16.84	9.68	3.02	-3.43	-6.30	-8.05	-10.20	0.22
180	19.42	12.10	5.29	-1.30	-4.23	-6.02	-8.25	2.43

3.3 与《中国暴雨统计参数图集》的比较分析

根据《中国暴雨统计参数图集》(以下简称:《图集》)查得 6 种重现期下标准历时 10min、60min、6h 的设计雨量及暴雨强度,运用指数公式求得 6 种重现期下 15、20、30、45、90、120、150 和 180min 的设计雨量,进而求得对应暴雨强度。将《图集》中计算得出的各重现期下不同设计历时的暴雨强度与暴雨强度公式算出的暴雨强度进行比较,结果见表 5。

从表格对比可以看出,二者的相对差呈现出随着降雨历时的增大而减小的趋势,其相对暴雨强度平均差值为 7.2%,总体相差不大。由此从空间分布来看,本次修订的乐山市暴雨强度公式是合理的。

4 结论

本文以乐山市 35 年短历时暴雨雨量资料为依据,结合最新室外排水设计规范,编制乐山市新一代暴雨强度公式,并展开基于不同频率曲线分

布的暴雨参数分析,得出结论如下。

(1)三种频率分布曲线对乐山市气象站 35 年降水样本资料的拟合优劣顺序依次为:皮尔逊 - III 型分布、耿贝尔分布、指数分布。

(2)此次用三种频率曲线拟合开发的暴雨公式中,耿贝尔分布函数进行理论修正所得暴雨公式精度最高,在重现期 2~20 年、2~30 年、2~50 年时参数精度均满足要求。乐山市新一代暴雨公式采用由耿贝尔分布函数所导出的暴雨公式。

(3)乐山市新编暴雨强度公式与现行暴雨公式对比,新公式得出的暴雨强度总体呈增大的趋势,且平均偏差随着重现期的增大而减小。这与四川盆地西南部乐山地区,近年来暴雨日数呈减小而暴雨强度呈增强的趋势是一致的;与眉山市 2015 年编制的暴雨强度公式对比分析,各指定重现期和降雨历时的降雨强度相差 10% 左右;与《图集》对比分析,各重现期和降雨历时的降雨强度平均差值为 7.2%,总体相差不大。因此,乐山市暴雨强度公式率定方法正确、参数求解合理,符合四川盆地西南部地区暴雨空间分布规律。

表5 新编乐山市暴雨强度公式与《图集》计算雨强的偏差((乐山-图集)/图集)

t/min	P/年					
	2	3	5	10	20	30
10	18.12	9.94	3.38	-3.04	-7.43	-5.04
15	20.83	13.26	7.3	1.54	-2.28	3.49
20	21.44	14.2	8.51	3.17	-0.42	7.95
30	20.55	13.51	8.16	3.16	-0.08	12.02
45	17.57	10.66	5.5	0.77	-2.23	13.83
60	14.31	7.37	2.26	-2.34	-5.23	13.93
90	18.51	10.64	4.51	-1.48	-5.56	16.39
120	20.55	12.05	5.09	-1.79	-6.73	17.18
150	21.84	12.86	5.29	-2.53	-8.03	17.37
180	22.79	13.34	5.07	-3.24	-9.45	17.26
平均偏差	19.65	11.78	5.51	-0.58	-4.74	11.44

(4)分布线型对原始数据的拟合程度高低是选取线型分布的关键所在,由于我国各地区的水文气象条件及降雨分布规律并不一致,同一分布模型无法满足不同地区的需求,不能用来拟合不同地区的水文资料,各地宜根据降雨分布规律选择合适的分布线型。

参考文献:

- [1] 邓培德. 暴雨选样与频率分布模型及其应用[J]. 给水排水, 1996, 22(2): 5-9.
- [2] 陈正洪, 王海军, 张小丽. 深圳市新一代暴雨强度公式的研制[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(3): 29-34.
- [3] 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.
- [4] 陈贝, 高文良. 引发四川盆地西南地区暴雨的高原涡特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(1): 9-15.
- [5] 周玉文, 翁窈瑶, 张晓昕, 等. 应用年最大值法推求城市暴雨强度公式的研究[J]. 给水排水, 2011, 37(10): 40-44.
- [6] 李兴凯, 陈元芳. 暴雨频率分布线型优选方法的研究[J]. 水文, 2010, 30(2): 50-53.
- [7] GB50014-2006 室外排水设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [8] 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.
- [9] 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[Z]. 北京: 住房和城乡建设部, 中国气象局, 2014.
- [10] 周长艳, 岑思弦, 李跃清, 等. 四川省近50年降水的变化特征及影响[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 619-630.

Analysis of Rainstorm Parameters in Leshan City Based on Different Frequency Distribution

YANG Yishu¹, YE Xingcheng², WANG Fei², ZHU Chengliang², YOU Zhikang¹,
OU Shufang¹ and LIU Jun¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Suqian Water Authority, Suqian 223800, China)

Abstract: Based on the data of short rainstorm rainfall from 1981 to 2015 in Leshan City, Sichuan Province, the annual maximum value method was used to calculate the rainstorm formula, and analyzed the three frequency distribution curves of Pearson-III distribution curve, Gumbel distribution curve and exponential distribution curve to research on the adaptability of the three kinds of frequency distribution curve model and the original rainstorm data. The rainstorm parameters of different frequency distributions are also analyzed. The results show that the average absolute variance of the Gumbel distribution curve is less than 0.05mm/min and the average relative variance is less than 5% when the calculated recurrence period is 2-20a, which accords with the accuracy requirement. The new rainstorm formula and the current rainstorm formula, the surrounding city rainstorm formula and the "Chinese rainstorm statistics parameter Atlas" were compared, and the rationality of the new generation of Leshan city rainstorm formula parameters is validated. It provides a new theoretical reference for the optimal design of drainage system in Leshan City and the construction and reconstruction of drainage pipe network.

Key words: Leshan City; Rainstorm Intensity Formula; pearson-III type distribution curve; gumbel distribution curve; exponential distribution curve; rainstorm parameters