

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.019

不同年限降雨资料编制暴雨强度公式适用性分析

刘焕彬¹, 邱 粲^{1,2}, 王 荣³

(1. 山东省气候中心, 山东 济南 250031; 2. 上海师范大学 环境与地理科学学院, 上海 200234; 3. 国家气候中心, 北京 100081)

摘 要: 依据济南气象站 1961 年—2017 年的分钟降雨资料, 采用年最大值选样法构建 11 个历时的雨量系列, 应用皮尔逊-Ⅲ型分布、耿贝尔分布和指数分布进行曲线拟合, 最小二乘法求参数, 得到 1961 年—2017 年、1971 年—2017 年、1981 年—2017 年、1991 年—2017 年等 4 个不同年限降雨资料的暴雨强度公式。皮尔逊-Ⅲ型分布曲线拟合公式的平均绝对均方差和相对均方差均满足规范要求, 其中 1991 年—2017 年降雨资料编制的暴雨强度公式得出的降雨强度最大, 符合济南市的降雨规律, 更偏安全。结果表明, 在编制暴雨强度公式时, 选取不同的降雨年份作为样本, 其暴雨强度公式的计算结果会有所不同。不能仅仅以长期降雨资料为依据, 应根据样本特点, 分析判断数据段的选取方法, 以使得到的设计暴雨强度更加合理。

关键词: 暴雨强度公式; 降雨资料; 年限; 适用性分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)19-0114-07

Applicability Analysis of Rainstorm Intensity Formula Establishment by Using Different Time Periods of Rainfall Data

LIU Huan-bin¹, QIU Can^{1,2}, WANG Rong³

(1. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 2. School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 3. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: According to rainfall data (1961–2017) of Jinan meteorological station, rainfall series of 11 durations were constructed by using annual maximum sample selection method. Pearson-Ⅲ type distribution, Gumbel distribution and exponential distribution were used to fit the sample sequence, and the least squares method was used to obtain the parameters. Based on this, rainstorm intensity formulas of rainfall data from four different time periods (1961 to 2017, 1971 to 2017, 1981 to 2017, and 1991 to 2017) were obtained. The average absolute mean square error and relative mean square error of the formula fitted by the Pearson-Ⅲ distribution curve met the requirements of the specification. Among them, the maximum rainfall intensity was obtained from the formula compiled by the rainfall data from 1991 to 2017, which was in line with the rainfall law of Jinan and was more secure. When compiling a rainstorm intensity formula, calculation results of the formula would be different if different rainfall years were selected as samples, and it should not be only depended on long-term rainfall data. The selection

method of the data segment should be judged according to the characteristics of the sample, so as to make the design rain storm intensity more reasonable.

Key words: rainstorm intensity formula; rainfall data; time period; applicability analysis

近年来,随着气候变暖,各类极端性天气多发,城市内涝已成为突出问题。随着城市化进程的不断推进,城市区域中不透水地面的面积不断扩张,产汇流特点较天然流域发生了较大变化。目前,我国已有很多城市发生了严重的洪涝灾害,暴雨的趋势性变化对城市防灾减灾提出了挑战,特别是短历时高强度暴雨造成的内涝灾害日趋严重,人民的生命财产、城市的安全受到严重威胁^[1]。

暴雨强度公式是反映降雨规律和计算城市雨水排水设计流量的主要依据,是指导城市排水防涝系统规划、工程设计和建设的基础^[2-3],对科学规划设计城市排水管网及设施、提高城市排水防涝能力、降低城市内涝风险具有指导意义。其正确性直接关系到投资的合理性和城市雨水排水设施的运行安全。数据序列的长度直接影响暴雨强度公式的计算结果,如果系列相对较短,则该系列的位置可能处于连续发生多雨或干旱年份时期。计算结果通常要大得多或小得多,所以应该两者都选。为了确保计算结果的准确性,代表性样本应由干湿年份的降雨量数据组成^[4],所以合理选取数据段对提高暴雨强度公式的安全性与可靠性至关重要^[5]。2016年版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)规定年最大值法的基础数据至少需要20 a才能编制暴雨强度公式,条件允许的地区可使用30 a以上数据。《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,通过对降雨时间变化特征的分析,合理选择数据年限,但应包括近几年的数据。笔者以济南气象站57 a原始降雨资料为基础,对不同年份降雨资料编制的暴雨强度公式结果进行差异分析,探讨不同年份暴雨强度公式的适用性。

1 资料与方法

1.1 资料

以济南气象站1961年1月—2017年12月的分钟降雨资料为基础,该资料来源于山东省气象信息中心,其中1961年—2003年的分钟数据利用气象站雨量计自记纸记录经数字化处理后获得,在质量检查过程中与人工观测的雨量进行了对比检查,整体数据质量可靠^[6];2004年—2017年数据直接取自

动气象站分钟降雨量资料,并通过人工审核。以计算的每年5、10、15、20、30、45、60、90、120、150和180 min等11个短历时的连续滑动最大值(可以跨时、日、月,不跨年)作为原始分析样本,采用年最大值选样法构建各指定历时的雨量系列,满足了样本的代表性、独立性、一致性和统计规律等方面的要求。

1.2 方法

1.2.1 暴雨强度公式推求方法

暴雨强度按式(1)计算。

$$q = \frac{167A_1(1 + ClgP)}{(t + b)^n} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, $L/(s \cdot hm^2)$; P 为重现期, a ; t 为降雨历时,min; A_1 、 C 、 b 、 n 是待求的相关系数。

对式(1)两端求对数,得到式(2)。

$$\ln q = \ln 167A_1 + \ln(1 + ClgP) - n \ln(t + b) \quad (2)$$

设 $y = \ln q - \ln(1 + ClgP)$, $b_0 = \ln 167A_1$, $b_1 = -n$, $x = \ln(t + b)$, 则上式可变为式(3)。

$$y = b_0 + b_1 x \quad (3)$$

通过最小二乘法求出式(3)中的 b_0 、 b_1 值。

给定不同 b 值,计算相应的 A_1 、 n 以及 q' (拟合值),并求出公式的平均绝对均方差 $\bar{\sigma}$, 见式(4)。

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^{m_0} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (q_{ij} - q'_{ij})^2} \quad (4)$$

式中: m 为11个历时; m_0 为8个重现期。

《室外排水设计规范》规定,重现期为2~20 a时,在一般降雨强度的地方,平均绝对均方差不宜大于0.05 mm/min;在较大降雨强度的地方,平均相对均方差不宜大于5%。平均绝对均方差和平均相对均方差分别按式(5)和式(6)计算。

$$X_m = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{R'_i - R_i}{t_i} \right)^2} \quad (5)$$

$$U_m = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{R'_i - R_i}{R_i} \right)^2} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R'_i 为理论降雨量; R_i 为拟合曲线确定的降雨量; t_i 为降水历时; n 为样本数。

1.2.2 气候倾向率

采用气候趋势分析不同时段暴雨强度的变化特

征^[7],气候趋势为正值表示要素序列为上升趋势,负值表示下降趋势,并进行显著性检验。

假设数据系列 x_i 可用一元线性回归数学模拟进行拟合($x = at + b$),气候趋势系数为 R_{xt} ,定义为 n 个时刻(年)的要素序列与自然数列 $1, 2, 3, \dots, n$ 的相关系数,见式(7)。

$$R_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (7)$$

式中: n 为年数; x_i 是 i 年的要素值; \bar{x} 为其样本均值; $\bar{t} = (n + 1)/2$ 。

显然,气候倾向率(为气候趋势 10 a 的变化量)为正(负)时表示该要素在所计算范围内有线性增加(减少)的趋势。

1.2.3 小波分析

为了解不同时段降雨周期的变化特征,采用小波函数对各历时降雨量进行相关分析。小波分析在时域和频域具有良好的局部性质,它可以分析降雨时间序列周期性变化的局部特征和周期性随时间变化的特征。

小波系数等值线图可以反映降雨量在不同时间尺度上的振荡周期,其大小可以反映信号强度,大于 0 表示降雨偏多,小于 0 表示降雨偏少,为 0 则对应着突变点。方差图可以反映降雨时间序列的波动能量随时间尺度变化的分布情况,对应峰值处的时间尺度可以反映降雨量演变的主周期。

2 暴雨强度公式推算

根据济南气象站 1961 年—2017 年 11 个历时降雨数据,计算得到济南 1961 年—2017 年、1971 年—2017 年、1981 年—2017 年、1991 年—2017 年等 4 个不同年限降雨资料的暴雨强度公式。表 1 给出了暴雨强度公式推算结果的精度检验,可以看出,4 个不同年限中,皮尔逊-Ⅲ型分布曲线拟合的暴雨强度公式精度均满足规范要求且误差最小;指数

型分布曲线拟合的暴雨强度公式只有 1991 年—2017 年资料序列满足规范要求;耿贝尔型分布曲线拟合的暴雨强度公式有 1971 年—2017 年、1981 年—2017 年、1991 年—2017 年资料序列满足规范要求。因此,笔者推荐采用皮尔逊-Ⅲ型分布拟合的暴雨强度公式进行分析。推荐的暴雨强度公式参数见表 2。

表 1 暴雨强度公式精度检验结果

Tab. 1 Precision test results of rainstorm intensity formula

年 限	皮尔逊-Ⅲ型		指数型		耿贝尔型	
	$X_m /$ (mm · min ⁻¹)	$U_m /$ %	$X_m /$ (mm · min ⁻¹)	$U_m /$ %	$X_m /$ (mm · min ⁻¹)	$U_m /$ %
1961 年—2017 年	0.033	3.38	0.047	6.75	0.045	5.56
1971 年—2017 年	0.032	3.25	0.038	5.12	0.036	4.36
1981 年—2017 年	0.037	3.27	0.049	5.98	0.038	4.09
1991 年—2017 年	0.036	3.23	0.040	3.96	0.035	2.67

表 2 推荐的暴雨强度公式参数

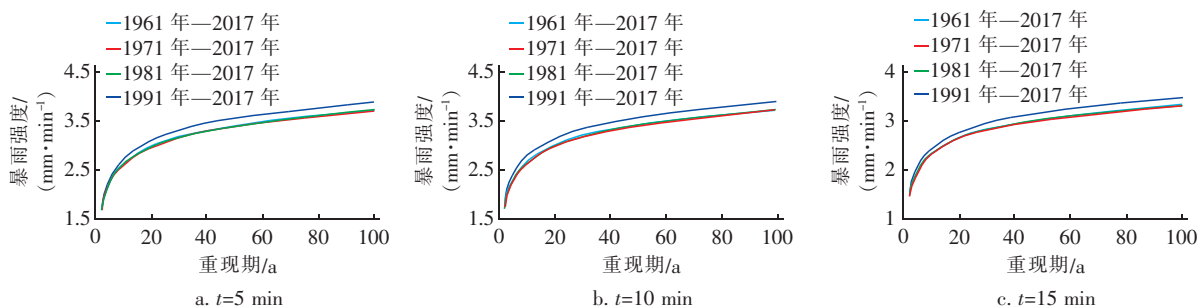
Tab. 2 Recommended rainstorm intensity formula parameters

年 限	A_1	C	b	n
1961 年—2017 年	16.976	0.997	17.780	0.769
1971 年—2017 年	19.955	0.997	19.822	0.802
1981 年—2017 年	20.513	0.997	21.129	0.799
1991 年—2017 年	20.176	0.984	19.899	0.789

3 适用性分析

3.1 暴雨强度公式计算结果对比

对推求的皮尔逊-Ⅲ型分布的 4 个不同年限(1961 年—2017 年、1971 年—2017 年、1981 年—2017 年、1991 年—2017 年)暴雨强度公式分别计算不同历时和不同重现期的暴雨强度值,结果如图 1 所示。可以看出,利用 1991 年—2017 年降雨资料编制的暴雨强度公式得出的降雨强度最大,1981 年—2017 年降雨资料编制的公式得出的降雨强度次之,1961 年—2017 年、1971 年—2017 年降雨资料编制的公式得出的降雨强度相差不大。



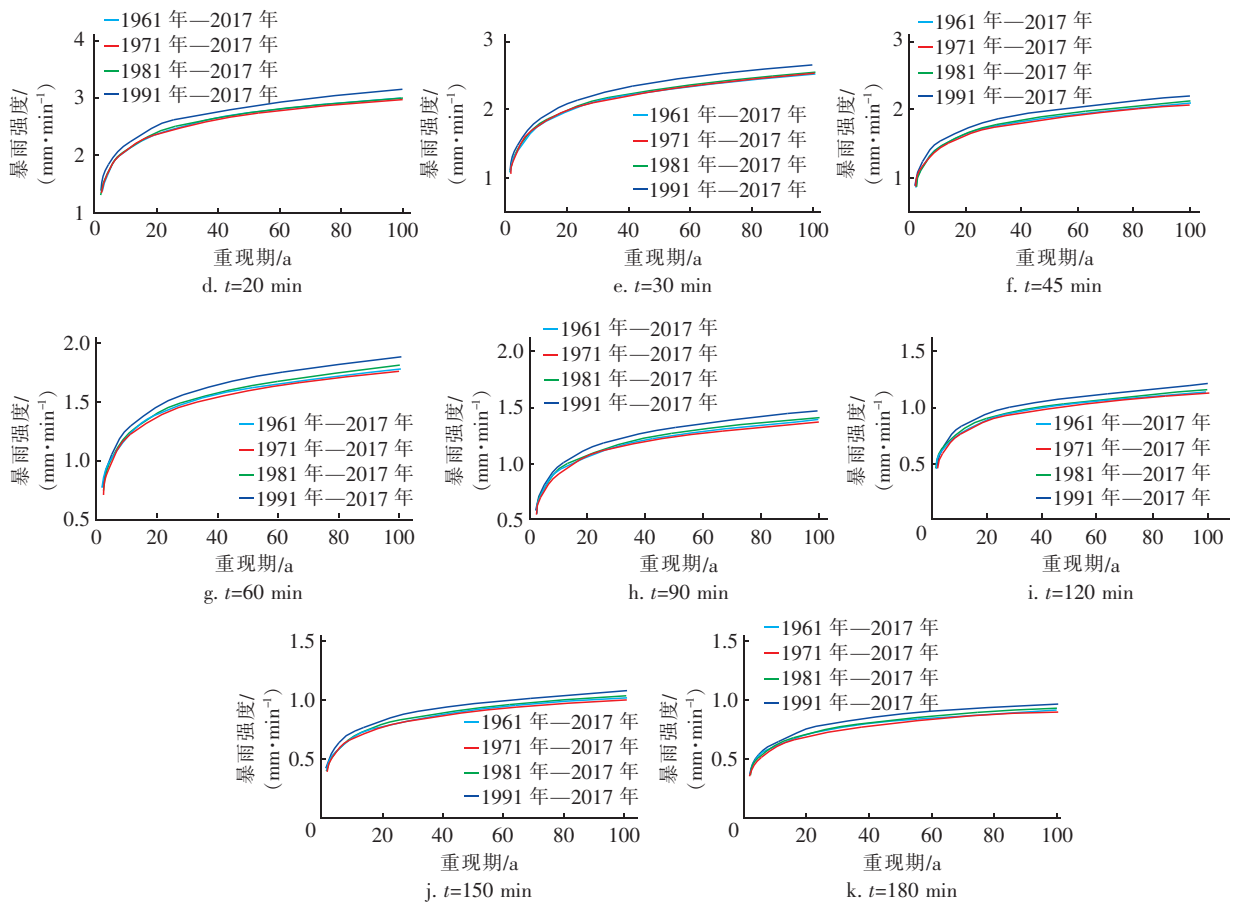


图1 不同选择年限暴雨强度公式的计算结果

Fig. 1 Calculated values of rainstorm intensity formula under different time periods

从1991年—2017年相对于1981年—2017年的暴雨强度来看,变化率在3.0%~5.5%以内(见图2)。对于同一重现期,历时短的暴雨强度,尤其在20 min以内时,变化率相对较大,可反映出短历时强降雨在1991年—2017年之间有增大的趋势。

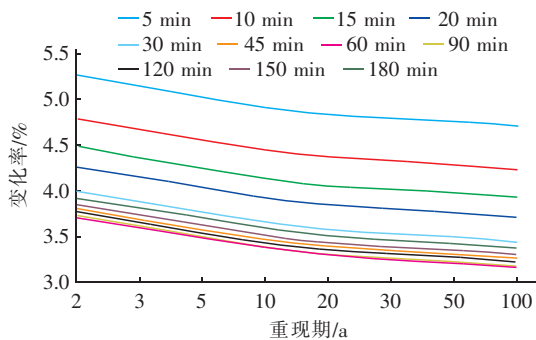


图2 1991年—2017年相对于1981年—2017年暴雨强度的变化率

Fig. 2 Change rate of rainstorm intensity from 1991 to 2017 relative to 1981 to 2017

1961年—2017年,当降雨历时为5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180 min时,最大降雨量平均值分别为10.7、18.0、23.9、28.5、35.5、42.5、47.9、55.0、60.1、65.0、68.1 mm;1971年—2017年,相应的最大降雨量平均值分别为10.7、18.0、23.8、28.4、35.2、42.4、48.0、54.8、59.6、63.8、66.3 mm;1981年—2017年,相应的最大降雨量平均值分别为10.7、18.0、23.8、28.4、35.9、43.6、49.7、56.5、61.7、65.7和68.2 mm;1991年—2017年,相应的最大降雨量平均值分别为11.1、18.8、24.9、29.7、37.5、45.0、51.4、59.0、64.2、68.1、70.9 mm。

从上述结果可以看出,1991年—2017年的降雨量平均值比1981年—2017年、1971年—2017年、1961年—2017年的大,抛弃降雨量偏小的样本,其编制的暴雨强度公式会比采用更长年限资料编制的公式得出的降雨强度大。因此,以不同降雨年限作为样本时,计算结果会有所不同。不能仅仅以长期降雨资料为依据,应根据样本的特点,分析判断数据

段的选取方法。根据计算结果,推荐在编制济南市暴雨强度公式时,样本年限选取最近的1991年—2017年的降雨资料,这样既能满足规范要求,又符合近年来的降雨规律,更偏安全。

3.2 年最大降雨强度变化趋势

济南市5 min年最大降雨强度的变化如图3所示。可以看出,1961年—2017年济南市5 min年最大降雨强度随着年份的变化呈现波动变化。从气候倾向率来看(见表3),除1961年—2017年、1991年—2017年180 min时段为弱下降趋势以外,其他年限150 min以内均随年份变化呈上升趋势,而1981年—2017年11个时段年最大降雨强度气候倾向率分别为0.221、0.191、0.143、0.103、0.099、0.061、0.054、0.049、0.040、0.026以及0.018 mm/(min·10 a);1991年—2017年11个时段的年最大降雨强度气候倾向率分别为0.270、0.202、0.115、0.044、0.066、0.040、0.033、0.034、0.029、0.012、-0.002 mm/(min·10 a)。

表3 气候趋势倾向率

Tab.3 Climate trend tendency rate

mm·min⁻¹·10 a⁻¹

项 目	1961年—2017年	1971年—2017年	1981年—2017年	1991年—2017年
$t = 5 \text{ min}$	0.052	0.114	0.221 *	0.270 *
$t = 10 \text{ min}$	0.050	0.093	0.191 *	0.202
$t = 15 \text{ min}$	0.032	0.072	0.143 *	0.115
$t = 20 \text{ min}$	0.022	0.054	0.103	0.044
$t = 30 \text{ min}$	0.027	0.073	0.099	0.066
$t = 45 \text{ min}$	0.026	0.057	0.061	0.040
$t = 60 \text{ min}$	0.028	0.053	0.054	0.033
$t = 90 \text{ min}$	0.018	0.042	0.049	0.034
$t = 120 \text{ min}$	0.013	0.036	0.040	0.029
$t = 150 \text{ min}$	0.004	0.025	0.026	0.012
$t = 180 \text{ min}$	-0.001	0.019	0.018	-0.002

注: *表示通过0.05的显著水平检验。

3.3 年最大降雨强度的周期特征

由上述分析可知,近年来济南市15 min以内降雨强度增加趋势相对明显,因此针对济南市5、10、15 min最大降雨强度,采用小波进行周期分析。小波方差图反映了年降雨强度时间序列的波动能量随时间变化的分布情况,通过图像可以确定年降雨强度演变的主周期。

图4为济南市5、10、15 min年最大降雨强度的小波方差。可以看出,济南市5、10和15 min降雨强度的小波方差有3个峰值,对应的时间分别在3、5、15 a左右。

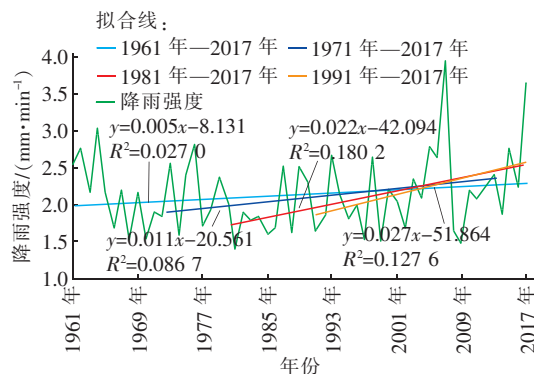
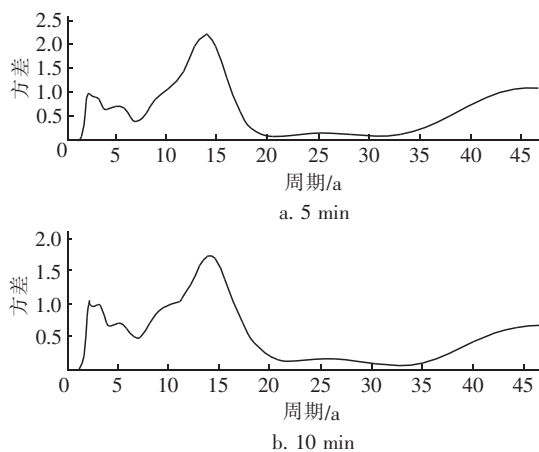


图3 济南市5 min年最大降雨强度的变化

Fig.3 Change of 5-minute maximum rainfall intensity in Jinan

从显著性水平来分析,1981年—2017年的5、10、15 min时段和1991年—2017年5 min时段通过0.05的显著水平检验,其他各时段年最大降雨强度变化趋势均不明显。近年来济南市5、10、15 min年最大降雨强度呈增加趋势,表明济南市短历时极端强降雨事件特征更为突出,其原因还有待研究。



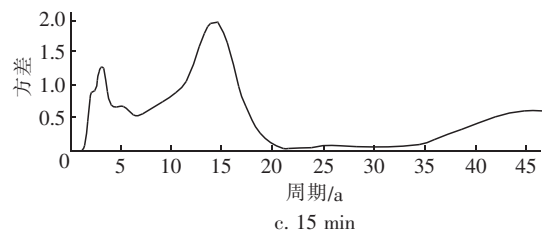


图 4 济南市 5、10、15 min 年最大降雨强度的小波方差
Fig. 4 Wavelet variance of 5-minute, 10-minute and 15-minute annual maximum rainfall intensity

其中,15 a 是年降雨强度演变的第一主周期,所对应的峰值最大,说明 15 a 前后的周期振荡最强;3 a 是降雨量变化的第二主周期,对应着第二峰值;第

三峰值对应着 5 a,为第三主周期。上述 3 个周期的波动控制着降雨强度在整个时间域内的变化特征。

3.4 暴雨强度公式应用结果对比分析

城市暴雨强度公式是城市排水规划、建设和管理的主要依据,使用暴雨强度公式计算设计排水量,能更科学地确定市政管道直径的大小、管道的排列布局,以及排涝工程量的大小。现以某小区某段雨水管道的计算为例加以说明,对应的综合径流系数为 0.65,延缓系数取 1,初始集水时间为 10 min,管材粗糙系数取 0.013,表 4 和表 5 分别为 1981 年—2017 年、1991 年—2017 年暴雨强度公式计算管道的结果。

表 4 1981 年—2017 年暴雨强度公式计算管道的结果

Tab. 4 Pipeline parameters calculated according to rainstorm intensity formula from 1981 to 2017

重现期/a	管段编号	管段长度/m	本段面积/hm ²	汇流时间/min	管内时间/min	暴雨强度/(L·s ⁻¹ ·hm ⁻²)	径流系数	流量/(L·s ⁻¹ ·hm ⁻²)	设计流量/(L·s ⁻¹)	设计管径/mm	水力坡度/%	流速/(m·s ⁻¹)	最大流量/(L·s ⁻¹)
2	1-2	180	1.5	0	2.78	285.56	0.65	185.61	278.42	700	0.2	1.08	414.21
	2-3	100	1.4	2.78	1.41	266.70	0.65	173.36	502.74	800	0.2	1.18	591.37
	3-4	80	0.8	4.19	1.05	258.15	0.65	167.80	620.86	900	0.2	1.27	809.60
5	1-2	180	1.5	0	2.78	372.70	0.65	242.26	363.39	700	0.2	1.08	414.21
	2-3	100	1.4	2.78	1.31	348.09	0.65	226.26	656.15	900	0.2	1.27	809.60
	3-4	80	0.8	4.09	0.97	337.69	0.65	219.50	812.15	1 000	0.2	1.37	1 072.23
10	1-2	180	1.5	0	2.54	438.62	0.65	285.10	427.65	800	0.2	1.18	591.37
	2-3	100	1.4	2.54	1.31	411.95	0.65	267.77	776.53	900	0.2	1.27	809.60
	3-4	80	0.8	3.85	0.97	399.56	0.65	259.71	960.93	1 000	0.2	1.37	1 072.23

表 5 1991 年—2017 年暴雨强度公式计算管道的结果

Tab. 5 Pipeline parameters calculated according to rainstorm intensity formula from 1991 to 2017

重现期/a	管段编号	管段长度/m	本段面积/hm ²	汇流时间/min	管内时间/min	暴雨强度/(L·s ⁻¹ ·hm ⁻²)	径流系数	流量/(L·s ⁻¹ ·hm ⁻²)	设计流量/(L·s ⁻¹)	设计管径/mm	水力坡度/%	流速/(m·s ⁻¹)	最大流量/(L·s ⁻¹)
2	1-2	180	1.5	0	2.78	298.94	0.65	194.31	291.47	700	0.2	1.08	414.21
	2-3	100	1.4	2.78	1.41	278.71	0.65	181.16	525.36	800	0.2	1.18	591.37
	3-4	80	0.8	4.19	1.05	269.56	0.65	175.21	648.28	900	0.2	1.27	809.60
5	1-2	180	1.5	0	2.78	389.25	0.65	253.01	379.52	700	0.2	1.08	414.21
	2-3	100	1.4	2.78	1.31	362.90	0.65	235.89	684.08	900	0.2	1.27	809.60
	3-4	80	0.8	4.09	0.97	351.80	0.65	228.67	846.08	1 000	0.2	1.37	1 072.23
10	1-2	180	1.5	0	2.54	457.57	0.65	297.42	446.13	800	0.2	1.18	591.37
	2-3	100	1.4	2.54	1.31	429.04	0.65	278.88	808.75	900	0.2	1.27	809.60
	3-4	80	0.8	3.85	0.97	415.82	0.65	270.28	1 000.04	1 000	0.2	1.37	1 072.23

由表 4 和表 5 可以看出,设计暴雨重现期的选择会决定排水管渠系统防止积水的程度。从暴雨强度公式可知,暴雨强度随着重现期的不同而不同。若选用较高的设计重现期,则所得设计暴雨强度大,相应的雨水设计流量大,管渠的断面也相应变大。这对防止地面积水是有利的,安全性高,但经济上则因管渠设计断面的增大而增加了工程造价^[8]。若

选用较低的设计重现期,管渠断面相应减小,这样虽然可以降低工程造价,但可能会造成排水不畅^[8]。计算结果表明,1991 年—2017 年暴雨强度公式的降雨强度较 1981 年—2017 年略有增大,因单位面积径流量增大,设计流量均有所增加,但对管渠的断面影响较小,这样从雨水管渠建设角度来看,总体社会经济成本并未增加。

4 结语

① 根据济南市 57 a 的暴雨资料,采用年最大值法,并结合指数分布、耿贝尔分布及皮尔逊-Ⅲ型分布 3 种理论频率分布曲线适线法和最小二乘法求参,编制不同年限资料选样方法下的暴雨强度公式,相比之下,各年限皮尔逊-Ⅲ型分布曲线拟合公式的精度均满足规范要求。

② 根据不同年限降雨资料建立的暴雨强度公式计算的暴雨强度结果,济南市设计暴雨强度有逐年增加的趋势,尤其是短历时暴雨强度增加最显著。因此,在建立城市暴雨强度公式时,应根据当地的样本特性选择符合当前降雨规律的数据段,以使得到的设计暴雨强度更加合理。

③ 济南市短历时降雨强度随着时间的变化明显存在 15 a 左右的振荡周期。同时,近 27 a 设计暴雨强度较近 37 a 略有增大,应用于实际工程的设计流量有所增加,提高了排水系统的安全性。因此,建议每隔 10~15 a 对暴雨强度公式进行修订。

参考文献:

- [1] 任敏,郝莹,陈焱. 暴雨落区的统计与分析研究[J]. 气象科学,2007,27(2):214-219.
Ren Min, Hao Ying, Chen Yan. Statistics and analysis of rainstorm areas[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2007, 27(2):214-219 (in Chinese).
- [2] 李龙. 宝鸡市暴雨强度公式推求与设计暴雨雨型分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.
Li Long. Derivation of Rainstorm Intensity Formula and Analysis on Designing Rainstorm Rainfall Pattern in the City of Baoji [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015 (in Chinese).
- [3] 陈宇亭. 城市雨水花园调蓄过程对雨水径流量削减效应[D]. 成都:西南交通大学,2018.
Chen Yuting. The Effect of Urban Rainwater Garden Storage Process on Rainwater Runoff Reduction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018 (in Chinese).
- [4] 马玉峰. 城市暴雨强度公式推求方法研究综述[J]. 内蒙古农业科技,2015,43(5):78-83.
Ma Yufeng. Study on deriving methods of urban rainfall intensity formula [J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2015, 43(5):78-83 (in Chinese).
- [5] 吴群. 历史数据的选取及处理方法对暴雨强度公式推

求的影响研究——以赣州市为例[D]. 南昌:南昌大学,2016.

Wu Qun. Study on the Selection of Historical Data and Treatment Effect on Rainfall Intensity Formula: Take the Ganzhou as an Example [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016 (in Chinese).

- [6] 王伯民,吕勇平,张强. 降水日记纸彩色扫描数字化处理系统[J]. 应用气象学报,2004,15(6):737-744.

Wang Bomin, Lü Yongping, Zhang Qiang. The color scanning digitizing processing system of precipitation autographic record paper [J]. Journal of Applied Meteorology Science, 2004, 15(6):737-744 (in Chinese).

- [7] 董旭光,刘焕彬,汤子东,等. 气候变化背景下山东大气自净能力特征分析[J]. 海洋气象学报,2018,38(4):93-102.

Dong Xuguang, Liu Huanbin, Tang Zidong, et al. Spatial-temporal characteristics of the atmospheric self-purification capacity index in the context of climate change in Shandong from 1961 to 2017 [J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4):93-102 (in Chinese).

- [8] 张桂彬. 基于可靠性的城市雨水管网优化设计研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.

Zhang Guibin. The Research of Optimal Design of Urban Rainwater Pipe Networks Based on Reliability [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009 (in Chinese).



作者简介:刘焕彬(1964—),男,山东博兴人,本科,高级工程师,主要研究方向为气候变化与气候可行性论证。

E-mail: liu_hb@126.com

收稿日期:2019-05-05