

南通城市设计暴雨方法比较及公式修订

刘 森¹, 周 荣², 辛朋磊², 陈海峰²

(1.江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210098;
2.江苏省水文水资源勘测局南通分局, 江苏 南通 226006)

摘 要:以南通市为研究对象,以 31 年实测降雨资料作为样本,采用年最大值法、年多个样法进行选样,通过皮尔逊-Ⅲ型频率曲线分析和高斯-牛顿法对暴雨强度公式进行求解,以绝对均方差作为暴雨强度公式评价指标。结果表明,年最大值法选样使其得到的暴雨公式较年多个样法得到的暴雨公式精度要高。新编暴雨公式与现有公式的比较表明,新编公式比现行公式雨强总体偏大 8.5%左右,体现了南通市城区短历时降雨强度较 20 世纪 80 年代增幅明显的现实,说明新公式更能反映南通城区现状降雨情况。

关键词:设计暴雨;年最大值法;年多个样法;高斯—牛顿法

中图分类号:TV122.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2019)04-0024-05

建立完善的城市排水防涝系统,是提高城市防灾减灾能力、保障人民群众生命财产安全的基本要求,是促进城镇化健康发展、建设生态文明社会的重要内容。基于历史降雨记录资料,采用数理分析方法,科学表达城市暴雨特征,是一项关键的基础性工作。

已有数据表明,部分城市每隔 10 年左右出现超过历史记录的特大暴雨。南通市现行暴雨公式使用 1949~1979 年的暴雨资料编制,已无法反映 20 世纪 80 代以来气候与城市环境变化对暴雨的影响。沿用 1979 年编制的老公式,难以满足现今南通城市排水设计与雨水管理的需要。因此,纳入最近几十年的资料,确立新的统计样本,重新编制南通市城区短历时暴雨强度公式。

暴雨强度公式的编制方法,概括起来有三种:图解法、解析法和数理统计法,为便于进行编程和提高公式精度,常采用数理统计法^[1]。目前,我国城市暴雨强度公式常用形式为: $i=A_1(1+C1gP)/(t+b)^n$,确定其参数的全过程分三个步骤:①暴雨选样;②频率分布与抽样误差计算;③暴雨公式求参与误差计算。其中选样最

为重要^[2]。

年最大值取样法和年多个样法均是我国推荐的暴雨公式选样方法^[2-7]。年最大值法是以年份为序,每年选取一个最大值,N 年共选取 N 个最大值。年最大值法选样简单,独立性强,在水文统计中应用较广;年多个样法是从每年挑选 6~8 组最大雨样,不论年次,各历时按降序排列,选择资料年数 3~4 倍数量的最大值^[8]。该法是由超定量法派生出来的,在水文统计学中未见介绍。

笔者以南通市为例,对年最大值法和年多个样法这两种设计暴雨的选样方法进行了探讨及对比,并对南通市城区的设计暴雨强度公式进行了修正。

1 研究方法

1.1 数据和选样方法

南通市地处江苏省东南部,南倚长江,东临黄海,位于东经 120°12'~121°55',北纬 31°41'~32°43'之间。全市总面积 9 120 km²,分属长江、淮河两大流域。本次研究采用南通闸和营船港闸实测雨量资料。南通闸位

收稿日期:2018-05-08

基金项目:江苏省水利科技项目(2015006)

作者简介:刘森(1982-),女,吉林吉林人,工程师,硕士,主要从事水文水资源研究工作。E-mail:49351463@qq.com

通讯作者:周荣(1970-),男,江苏海安人,高级工程师,本科,主要从事水文水资源研究工作。E-mail:156345742@qq.com

于南通市主城区西北,代表崇川区和港闸区面雨量情况,研究区面积 349.2 km²,不透水面积占比 18.1%,自 1921 年开始有实测雨量资料;营船港闸位于经济技术开发区,能够代表开发区面雨量情况,研究区面积 134.2 km²,不透水面积占比 14.3%,自 1975 年开始有实测雨量资料。两测站实测雨量资料测验精度高、整编情况好,满足《室外排水设计规范》(GB50014—2006)^[2]的要求。本次选取两测站 1981~2011 年连续 31 年实测降雨资料系列。

年最大值法、年多个样法两种选样方法均采用 5、10、15、20、30、45、60、90、120min 九种历时。

本次采用 Spearman 秩次相关检验法、Mann-Kendall 检验法对南通闸和营船港闸站年最大 5、10、15、20、30、45、60、90、120 min 暴雨资料的进行一致性检验。由 Spearman 秩次相关法、Mann-Kendall 检验法检验结果均得出:两站各时段暴雨资料系列无突变,均呈现较好的一致性,满足使用要求。

1.2 频率分布曲线拟合

目前,我国一般采用的频率分布曲线主要有四种分布线型:皮尔逊-Ⅲ型、指数型、极值Ⅰ型或者耿贝尔型、对数型。前三种在城市暴雨强度公式的统计中应用较为广泛,至于哪种更为适合一直处于争论之中^[8-11]。本次选用皮尔逊-Ⅲ型频率分布曲线,按照均方差最小的原则优化求取适当的均值 \bar{Ex} 、变差系数 Cv 和偏态系数 Cs 。在 Microsoft EXCEL 中使用 Visual Basic for Applications 编程工具进行计算机自动适线,自动适线采用矩法,适线分析评价指标采用绝对均方差,公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I'_i)^2}{n}} \quad (1)$$

式中: I 为实际降雨强度,mm/min; I' 为频率曲线确定的降雨强度,mm/min; n 为样本数。

1.3 暴雨公式拟合及精度检验

暴雨强度公式形式如下:

$$i = \frac{A_1 (1 + C \lg P)}{(t + b)^n} \quad (2)$$

式中: A_1 、 C 、 b 、 n 为待求的参数,根据统计方法进行计算确定; i 为暴雨强度,mm/min; P 为设计重现期,a; t 为降雨历时,min。

采用高斯—牛顿法求解参数,具体方法为:

(1)根据频率曲线调整的结果,绘制各历时 i - $\lg P$ 关系图,纵坐标为降雨强度 i ,横坐标为重现期的对数

值 $\lg P$,采用图解法估算各参数初值。

当 $i=0$ 时, $A(1+C \lg P)=0$,于是 $C = -1/\lg P$,由 i - $\lg P$ 关系图可以看出: C 值实际是各历时公式线与横轴 $i=0$ 的公共交点的截距 $\lg P_0$ 的负倒数,因此求参数 C 时,只须图解出最佳的 $\lg P_0$ 即可得出 C 的初值。其它三个参数亦可粗略估算出来。

(2)采用高斯—牛顿法^[11],用矩阵反复迭代编程计算,对四个参数非线性寻优:

首先对暴雨公式中 A_1 、 C 、 b 、 n 分别求偏导数,即:

$$\begin{aligned} \frac{\partial i}{\partial A_1} &= \frac{1 + C \lg P}{(t + b)^n} \\ \frac{\partial i}{\partial C} &= \frac{A_1 \lg P}{(t + b)^n} \\ \frac{\partial i}{\partial b} &= \frac{-A_1 (1 + C \lg P)}{(t + b)^{n+1}} \\ \frac{\partial i}{\partial n} &= \frac{-A_1 (1 + C \lg P) \ln(t + b)}{(t + b)^n} \end{aligned} \quad (3)$$

然后估算参数迭代初值: $\theta_0 = (A_{1(0)}, C_{(0)}, b_{(0)}, n_{(0)})'$ 。

将暴雨公式分解为两部分:

$$i = A / (t + b)^n \quad (4)$$

$$A = A_1 + C \lg P \quad (5)$$

首先确定单一重现期参数的初值:将某一重现期 i - t 资料分成三组,求各组平均值 (i_1, t_1) 、 (i_2, t_2) 、 (i_3, t_3) ,代入式(4)得一方程组:

$$i_1 = A / (t_1 + b)^n; \quad (6)$$

$$i_2 = A / (t_2 + b)^n; \quad (7)$$

$$i_3 = A / (t_3 + b)^n; \quad (8)$$

解方程组得 A 、 b 、 n ,作为单一重现期的参数初值,对于各重现期均可求出一组 $A'_{(0)}$ 、 $b'_{(0)}$ 、 $n'_{(0)}$ 。

确定各重现期综合参数的初值:将上述求得的各单一重现期 $b'_{(0)}$ 、 $n'_{(0)}$,分别取平均值作为各重现期综合参数的初值 $b_{(0)}$ 、 $n_{(0)}$ 。而将 $(\lg P, A'_{(0)})$ 分成两组,求各组平均值 $(\lg P, A'_{(0)})$,代入式(5)得二元线性方程组并求解易得 (C, A_1) ,由此,四参数的初值已求出,可以减少迭代次数。

应用上述偏导数式, θ_0 以及 m 组实测值 (P_i, t_i, i_i) , $i=1 \sim m$,计算偏导数矩阵 $J(\theta_0)$ 以及 $f(\theta_0)$ 。

根据递推公式可求 $\theta_{(1)}$ 。

再以 $\theta_{(1)}$ 作为初值,重复上面两个步骤,根据给定 δ 值(例如 $\delta=0.0005$),经若干次递推迭代,可求得暴雨公式参数 θ 的值。

2 结果及讨论

本次暴雨公式采用南通闸、营船港闸 1981~2011 年连续 31 年的雨量资料,分别用年多个样法、年最大值法求解暴雨公式参数,通过比较分析,从而得出最新的南通市综合暴雨强度公式。

2.1 暴雨样本选样结果

年多个样法、年最大值法两种选样方法均采用 5、10、15、20、30、45、60、90、120 min 九种历时。各历时在所有年份的最大值、最小值及多年平均值列于表 1。可见,两种方法样本各历时最大值暴雨量均相同,最小值、平均值存在差异。

2.2 暴雨特征分析

分析南通闸站和营船港闸站近 31 年暴雨数据发现(见图 1 和图 2),南通闸近 31 年各历时最大雨强均呈现明显的逐年增大的趋势。南通闸最大雨强前三名出现在 1990 年、1997 年、2003 年;营船港闸各历时最大雨强前三名出现在 1992 年、2001 年、2009 年。两站最大雨强前 3 名均出现在 1990 年以后。

2.3 理论频率曲线适线成果

对于年多个样法和年最大值法得到的数据样本,分别采用皮尔逊-Ⅲ型分布曲线进行适线分析。采用均方差评价适线成果的好坏,见表 2。

根据皮尔逊-Ⅲ型频率曲线适线结果,南通闸年多个样法、最大值法取得的数据样本频率曲线的平均均方差分别为 0.049mm/min、0.047mm/min;营船港闸年多个样法、最大值法取得的数据样本频率曲线的平均均方差分别为 0.054mm/min、0.052mm/min。各历时

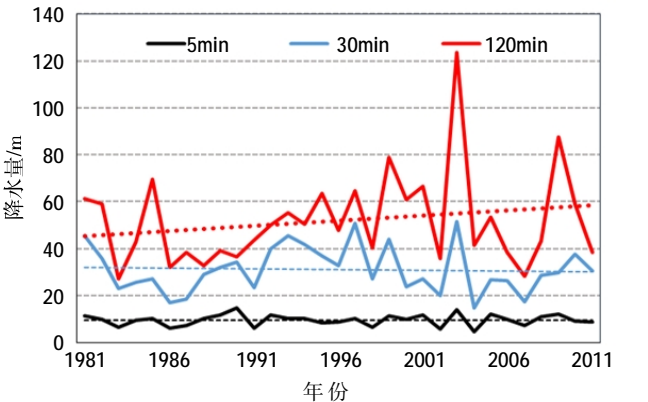


图 1 南通闸历年各历时最大暴雨量图
Fig.1 The maximum rainstorm during the various durations at the Nantong sluice in 31 years

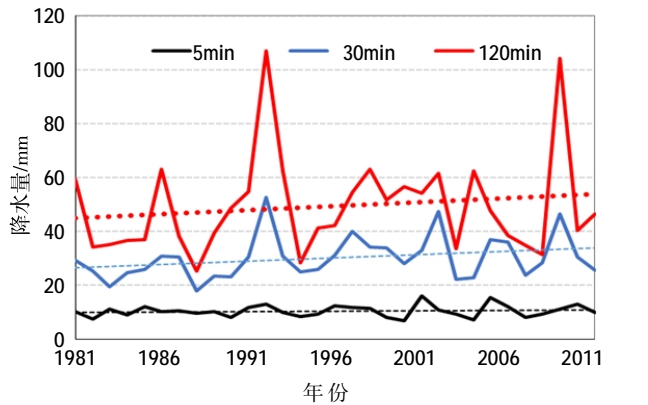


图 2 营船港闸历年各历时最大暴雨量图
Fig.2 The maximum rainstorm during the durations at Yingchuangang sluice in 31 years

均方差在 0.025~0.079mm/min 之间。可见,南通闸、营船港闸年多个样法与年最大值法取得的数据样本在

表1 各历时最大暴雨强度统计(mm/min)
Table1 The statistics of maximum rainstorm intensity in the durations

历时 /min	南通闸						营船港闸					
	年多个样法			年最大值法			年多个样法			年最大值法		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
5	2.96	0.80	1.47	2.96	0.92	1.90	3.20	0.92	1.56	3.20	1.40	2.10
10	2.66	0.68	1.22	2.66	0.76	1.59	2.58	0.77	1.27	2.58	1.11	1.70
15	2.29	0.57	1.06	2.29	0.68	1.38	2.25	0.67	1.09	2.25	0.93	1.46
20	2.02	0.50	0.94	2.03	0.57	1.23	1.96	0.60	0.95	1.96	0.80	1.26
30	1.71	0.42	0.78	1.71	0.49	1.03	1.76	0.49	0.76	1.76	0.60	1.01
45	1.53	0.36	0.62	1.53	0.42	0.83	1.47	0.38	0.59	1.47	0.44	0.78
60	1.48	0.30	0.51	1.48	0.37	0.69	1.27	0.32	0.49	1.27	0.38	0.66
90	1.22	0.24	0.39	1.22	0.26	0.53	1.07	0.24	0.37	1.07	0.26	0.50
120	1.03	0.20	0.32	1.03	0.22	0.43	0.89	0.20	0.30	0.89	0.21	0.41

采用P-Ⅲ型分布曲线适线后,年最大值法的适线结果优于年多个样法。

表2 暴雨频率曲线适线结果比较

Table2 The comparison of fitting results of rainstorm frequency curve

历时 /min	RMSE 南通闸/mm·min ⁻¹		RMSE 营船港闸/mm·min ⁻¹	
	年多个样法	年最大值法	年多个样法	年最大值法
5	0.075	0.075	0.079	0.078
10	0.059	0.055	0.070	0.067
15	0.071	0.069	0.059	0.055
20	0.062	0.060	0.046	0.044
30	0.043	0.041	0.047	0.044
45	0.036	0.033	0.045	0.047
60	0.041	0.038	0.043	0.039
90	0.028	0.027	0.048	0.037
120	0.028	0.025	0.046	0.034
平均值	0.049	0.047	0.054	0.052

2.4 暴雨公式成果比较

年多个样法取样得到的暴雨公式与年最大值法取样得到的暴雨公式*i-t-lgP*关系曲线分别见图3和图4。根据公式计算结果与实测数据比较,年多个样法得到的数据样本,南通闸、营船港闸暴雨公式绝对均方差分别为0.047mm/min、0.043mm/min;年最大值法得到的数据样本,南通闸、营船港闸暴雨公式绝对均方差分别为0.039mm/min、0.037mm/min,均满足规范要求的0.050mm/min的精度要求^[6],但年最大值法得到的暴雨公式绝对均方差更小,表明了最大值法取样的优越性。

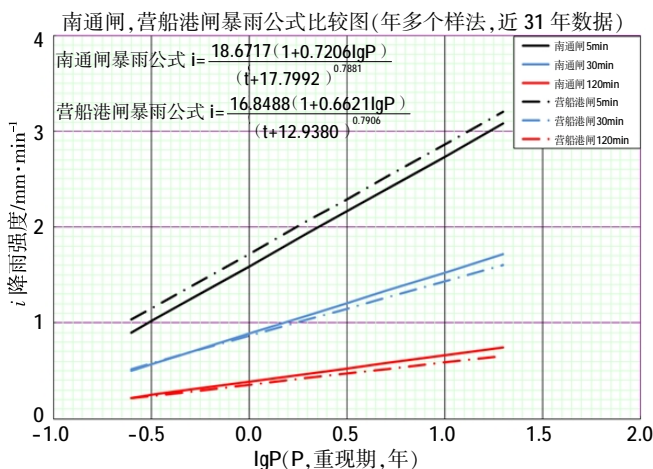


图3 年多个样法暴雨公式*i-t-lgP*关系曲线图

Fig.3 The relationship graph for *i-t-lgP* of rainstorm formula of annual multi-sampling method

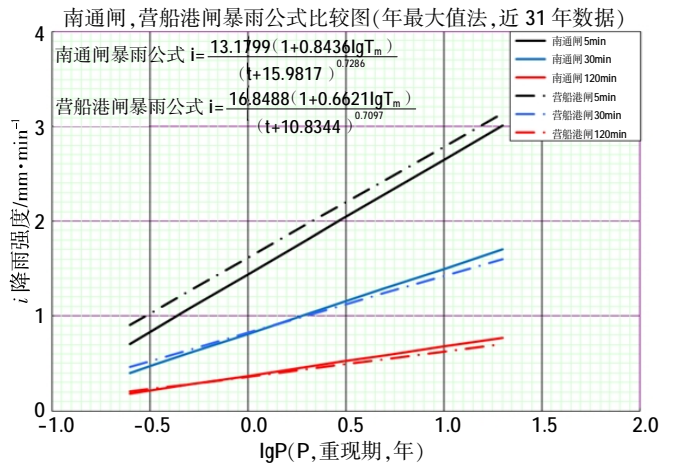


图4 年最大值法暴雨公式*i-t-lgP*关系曲线图

Fig.4 The relationship graph for *i-t-lgP* of rainstorm formula of annual maximum method

通过对南通闸站、营船港闸站1981~2011年连续31年暴雨资料采用年最大值法取样编制的暴雨公式比较可见:营船港闸比南通闸公式总体偏大3.3%,其5~20min雨强比南通闸偏大4.1%~12.7%。其它各历时雨强跟南通闸偏差均在1.9%以内。由于营船港闸站靠近新城区,能代表未来城区的发展方向,因此采用营船港闸站年最大值法取值编制的暴雨公式,作为南通市综合暴雨公式。

2.5 新编暴雨公式与现行公式比较

采用新的降雨统计数据重新编制南通市短历时暴雨公式,探讨了选样方法、重现期范围等问题。新公式应用于城市排水设计最终反映在设计雨量或强度上,为此将新编公式的*i-t-lgP*关系曲线与现行公式进行对比,以反映城区降雨的现状以及新编公式的意义,结果见图5。

根据最新规范要求^[7],以年最大值法取样得到的暴雨公式作为南通市城区新编暴雨公式。比较结果表明:新编公式比现行公式雨强总体偏大8.5%左右,其中5~20min雨强分别偏大23.9%,17.3%,13.2%和10.4%;30~90min雨强分别偏大6.8%,3.8%,2.0%和0.1%;120min雨强两者基本一致。符合南通市城区短历时降雨强度较20世纪80年代增幅明显的现实,说明新编公式更能反映南通城区现状降雨情况。

3 结论

(1)以31年南通闸站、营船港闸站实测降雨资料作为样本,采用年最大值法、年多个样法进行选样,通过皮尔逊-Ⅲ型频率曲线分析和高斯-牛顿法对暴雨强度公式进行求解,以绝对均方差作为暴雨强度公式

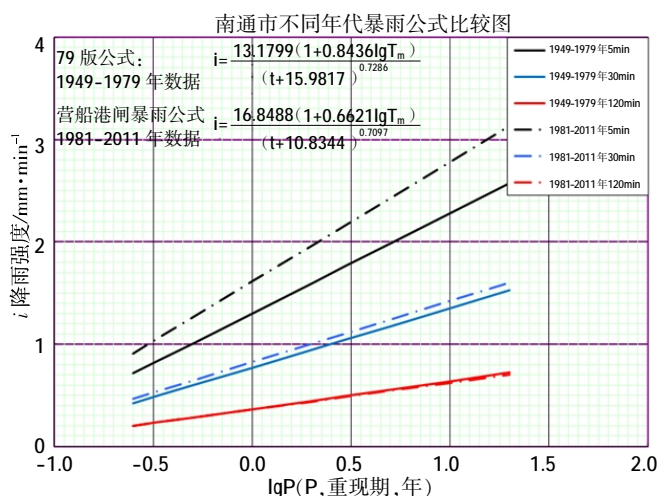


图5 新版公式与79版公式比较

Fig.5 The comparison between the former and new formulas

评价指标。结果表明,年最大值法选样使其得到的暴雨公式较年多个样法得到的暴雨公式精度要高。

(2)新编公式比现行公式雨强总体偏大 8.5%左右,符合南通市城区短历时降雨强度较 20 世纪 80 年代增幅明显的现实,说明新编公式更能反映南通城区现状降雨情况。

参考文献:

- [1] 邱兆富,周琪,张智,等. 暴雨强度公式推求方法探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2004,1(1):47-49. (QIU Zhaofu, ZHOU Qi, ZHANG Zhi, et al. Discussion on calculation method of rainstorm intensity formula [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2004,1(1):47-49. (in Chinese))
- [2] GB50014-2006, 室外排水设计规范[S]. (GB50014-2006, Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering [S]. (in Chinese))
- [3] 邓培德. 城市暴雨两种选样方法的概率关系与应用评述[J]. 给水排水, 2006,32(6):39-42. (DENG Peide. Review on probability and application of two sampling methods for urban storm [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006,32(6):39-42. (in Chinese))
- [4] 金光炎. 水文统计原理与方法 [M]. 北京: 中国工业出版社,1964. (JIN Guangyan. The Principle and Method of Hydrology Statistics [M]. Beijing: China Industrial Press, 1964. (in Chinese))
- [5] 岑国平. 暴雨资料的选择与统计方法 [J]. 给水排水, 1999,25(4):1-4. (CEN Guoping. Sampling and statistical method for rainstorm data [J]. Water & Wastewater Engineering, 1999,25(4):1-4. (in Chinese))
- [6] 黄津辉,向文艳,卢超,等. 天津市设计暴雨方法比较及公式修正[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013,46(4):354-360. (HUANG Jinhui, XIANG Wenyan, LU Chao, et al. Comparison of design storm method and formula revision for Tianjin city [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013,46(4):354-360. (in Chinese))
- [7] 宁静. 上海市短历时暴雨强度公式与设计雨型研究[D]. 上海:同济大学环境科学与工程学院,2006. (NING Jing. Study on Short Duration Rainstorm Intensity Formula and Design Rainfall Pattern in Shanghai [D]. Shanghai: College of Environmental Sciences and Engineering, Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [8] 张子贤,孙光东,孙建印,等. 城市暴雨公式拟合方法研究[J]. 水利学报, 2013,44 (11):1263-1271. (ZHANG Zixian, SUN Guangdong, SUN Jianyin, et al. Study on fitting methods for urban storm intensity formula [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(11):1263-1271. (in Chinese))
- [9] 邓培德,韦鹤平,俞庭康,等. 城市暴雨公式统计方法的研究[J]. 同济大学学报, 1985,(1):17-29. (DENG Peide, WEI Heping, YU Tingkang, et al. Study on statistical methods of urban rainstorm formula [J]. Journal of Tongji University, 1985,(1):17-29. (in Chinese))
- [10] 夏宗尧. 编制暴雨公式中应用 P-III 曲线与指数曲线的比较[J]. 中国给水排水, 1990,6(3):32-38. (XIA Zongyao. Comparison of P-III curve and exponential curve in formulating rainstorm formula [J]. Water & Wastewater Engineering, 1990,6(3):32-38. (in Chinese))
- [11] 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. (ZHANG Zixian. Application of Gauss-Newton method to determination of parameters for storm formula [J]. Journal of Hohai University, 1995,23(5):106-111. (in Chinese))

Comparison of Design Rainstorm Method and Formula Revision for Nantong City

LIU Miao¹, ZHOU Rong², XIN Penglei², CHEN Haifeng²

(1. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210098, China;

2. Nantong Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Nantong 226006, China)

Abstract: Nantong City was selected as the study area, and the sampling was chosen by annual maximum method and annual multi-sampling method based on the collection of precipitation data over 31 years. The rainstorm formulas were achieved by P-III distribution frequency analysis and Gauss-Newton method, and the absolute mean square error was utilized to evaluate it. The results indicate that the annual maximum method is more appropriate than the annual multi-sampling method for Nantong. Besides, this paper combined the existing rainstorm formula with the new rainstorm formula for calibration, the results reveal that the new formula rainfall intensity is increased about 8.5%, which is more accurately reflects the current rainfall situation in Nantong.

Key words: design storm; annual maximum method; annual multi-sampling method; Gauss-Newton method