

# 不同拟合方法推求暴雨强度公式研究

万永静<sup>1</sup>, 叶兴成<sup>2</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 刘俊<sup>1</sup>, 李岱远<sup>3</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省宿迁市水务局, 江苏 宿迁 223800;  
3. 南京水利科学研究院 水文水资源研究所, 江苏 南京 201129)

**摘要:** 人口大县沭阳县一直借用临近城市的暴雨公式, 急需编制能反映本地降雨规律的暴雨强度公式, 为其城市排水防涝系统规划和设计提供科学依据。基于沭阳县气象站 1981-2015 年共计 35a 的自记暴雨雨量资料, 选取 11 个降雨历时的年最大值作为实测样本, 分别基于 P-III 型分布、指数分布和耿贝尔分布进行理论频率曲线分析, 确定重现期-降雨强度-历时关系推求暴雨强度公式, 绘制新公式和现行采用公式的暴雨强度-历时-重现期关系曲线进行对比分析。结果表明: 新公式与现行采用公式的计算结果相差较大, 因此有必要对沭阳县进行暴雨强度公式重新编制。

**关键词:** 城市暴雨强度公式; 排水防涝; 频率分布曲线拟合; 误差分析

中图分类号: TV125

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0076-04

## Study on the formula of deducing heavy rain intensity by different fitting methods

WAN Yongjing<sup>1</sup>, YE Xingcheng<sup>2</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>, LI Daiyuan<sup>3</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Conservancy Bureau of Suqian, Suqian 223800, China; 3. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 201129, China)

**Abstract:** The populous County Shuyang County has been borrowing nearby city's rainstorm formula. It is necessary to compose its own formula of rainstorm intensity to provide scientific basis for the planning and design of urban drainage and waterlogging system. In this paper, based on the precipitation data of Shuyang county collected for 35 years from 1981 to 2015, 11 annual rainfall maximum were selected as the measured samples. Based on the P-III distribution, exponential distribution and Gumbel distribution, the theoretical frequency curve analysis is carried out to determine the recurrence period-rainfall intensity to the time (P-i-t) relationship table, and to calculate the storm intensity formula. By drawing the new formula and the old formula of rainstorm intensity~period curve the comparative analysis was made. The results show that the difference between the two models is large, so it is necessary to compose the formula of rainstorm intensity in Shuyang county.

**Key words:** urban storm intensity formula; drainage and water protection; frequency distribution curve fitting; error analysis

## 1 研究背景

城市短历时暴雨强度大且具有很强的局地性<sup>[1-4]</sup>, 尤其是在多雨的长江流域, 暴雨经常造成严重的洪涝灾害, 导致重大损失。排水系统是解决现代城市内涝问题的重要基础设施, 暴雨强度公式是

确定城市雨水排水系统规划与设计的基本依据之一, 它直接影响到排水工程的投资和城市的安全<sup>[5-6]</sup>。目前, 我国大部分的县级小城市借用临近市区的暴雨强度公式进行有关排水工程的规划设计计算, 随着社会经济快速发展及城市规模迅速扩张, 借用临近城市的暴雨强度公式已经不满足 GB

收稿日期: 2017-04-11; 修回日期: 2017-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471015)

作者简介: 万永静(1993-), 女, 重庆人, 在读硕士研究生, 研究方向为城市防洪与排水。

通讯作者: 刘俊(1968-), 男, 安徽当涂人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市水务规划与管理。

50014-2006《室外排水设计规范》(2016年版)<sup>[7]</sup>的要求,不能代表现状及未来一段时间的暴雨特性,不能满足工程安全及人民生活财产安全的要求。

世界上许多国家都颁布了设计暴雨(洪水)规范或导则,统一采用某一种标准分布线型;也有一些国家没有制定统一的规范或标准,应用经验或统计检验比较,在本国不同区域根据实际情况选择最合适本区域的分布线型。我国普遍采用的暴雨频率分析计算线型主要有 P-III 型分布曲线、指数分布曲线和耿贝尔极值分布曲线,关于何种频率分布曲线更为适合一直处于争论及研讨之中<sup>[8-15]</sup>。因此,本文以沭阳县为例,对不同频率分析方法进行对比分析,推求沭阳县城市暴雨强度公式。

## 2 城市暴雨强度公式拟合方法

### 2.1 暴雨强度公式计算方法

暴雨强度公式型式的选择,直接影响着能否较好地反映重现期-降雨强度-降雨历时三者间的规律。不同地区气候不同,降雨差异较大,暴雨公式的选择需大量分析统计降雨资料,以符合客观暴雨规律为出发点,同时考虑公式在统计与应用上的简易性及方便性<sup>[16]</sup>。我国现行《室外排水设计规范》<sup>[5]</sup>所推荐的暴雨强度公式型式为:

$$I = \frac{A_1 + C \lg P}{(t + b)^n} = f(A, b, n) \quad (1)$$

式中: $I$ 为暴雨强度计算值,mm/min; $A_1$ 为雨力参数; $C$ 为雨力变动参数; $P$ 为设计暴雨重现期; $t$ 为降雨历时,min; $b$ 为降雨历时附加参数; $n$ 为暴雨衰减指数。

暴雨强度公式参数的推导实际上就是无约束条件下的非线性模型的参数率定问题。依据重现期 $P$ 、暴雨强度 $i$ 、降雨历时 $t$ 的关系,建立以暴雨强度值 $i_k$ 的绝对均方差最小为目标函数 $F(A, b, n)$ ,确定公式的最优参数,其中目标函数 $F(A, b, n)$ 为:

$$F(A, b, n) = \sum_{k=1}^k \left( \frac{A_1 + C \lg P}{(t_k + b)^n} - i_k \right)^2 \quad (2)$$

式中: $k$ 为公式所包含的降雨历时总项数; $i_k$ 为对应于降雨历时 $t_k$ 的设计暴雨强度值。

对于非线性模型,通常都是通过不断地迭代优化最终确定参数。常用求解非线性方程的方法有:牛顿迭代法、高斯-牛顿法、麦夸尔特法、优选回归分析法等。麦夸尔特法迭代最稳定,初值选择好坏的影响较小,其他几种算法的迭代结果对初值十分敏感,本次计算选用麦夸尔特法进行推导,通过计算

机程序 Matlab 不断迭代,最终确定各个参数。

对雨量样本系列进行频率适线,根据频率分布曲线拟合,可以得出各历时不同重现期的设计降雨强度,由此进行迭代计算暴雨强度公式参数。

### 2.2 拟合精度比较

为对采用不同计算路径求得的暴雨公式进行比较,需对暴雨强度计算结果进行精度检验。计算暴雨强度公式理论值和频率拟合设计值的误差,分别按平均绝对均方差根误差计算(式3),和平均相对均方差根误差计算(式4)。

误差统计表达式:

$$X = \sqrt{\frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k (i_i - i'_i)^2} \quad (3)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \left( \frac{i_i - i'_i}{i_i} \right)^2} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $X$ 为平均绝对均方差根误差; $U$ 为平均相对均方差根误差; $i_i$ 为频率拟合设计值; $i'_i$ 为暴雨强度公式理论值; $k$ 为样本数。

## 3 暴雨强度公式推算实例分析

沭阳县气象站为国家基本气象站,采用沭阳县气象站 1981-2015 年共计 35 a 的自记暴雨雨量资料,根据导则规定,采用年最大值法选取了 11 个降雨历时(5、10、15、20、30、45、60、90、120、150、180 min)每年的最大值为暴雨强度公式计算样本。

暴雨强度公式参数确定分为两步:(1)理论频率曲线拟合,确定重现期-设计降雨强度-降雨历时关系( $P-i-t$ );(2)以 $P-i-t$ 关系进行暴雨强度总公式参数迭代计算。

### 3.1 公式参数拟定

分别采用 P-III 型分布、指数分布和耿贝尔分布进行频率曲线拟合。先根据离差最小原则计算单历时暴雨统计参数,再用多历时综合目估适线法进行各历时暴雨统计参数间总体的综合调节确定各历时暴雨统计参数,重点考虑重现期为 2~20 a 的拟合(图 1),对 3 种曲线的频率计算拟合误差进行比较,见表 1。

由表 1 分析可知,在皮尔逊 III 型分布频率曲线、指数分布频率曲线和耿贝尔分布频率曲线 3 种线型中,依拟合指标而言,P-III 型曲线和耿贝尔型曲线拟合稍微好一些。然而,单纯依据上述拟合精度选择适线线型,得到的暴雨公式精度不一定令人满意,选取的最终判据应考虑所得暴雨强度公式计算精度的高低。

3.2 计算结果比较

根据 P - III 型频率分布、指数分布和耿贝尔分布理论频率曲线可以确定各历时不同重现期的设计降雨强度,由此作为基础数据进行迭代计算暴雨强

度公式参数,并计算暴雨强度公式误差,按式 3 计算绝对均方根误差,公式(4)计算相对均方根误差,计算结果见表 2。

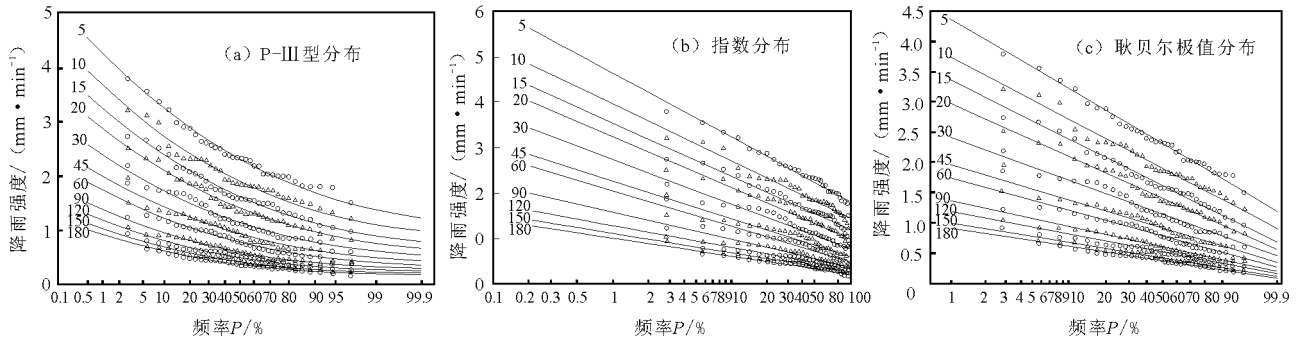


图 1 不同降雨历时的优化适线

表 1 样本频率计算拟合误差比较

降雨历时 $t/min$	P - III 型分布拟合误差		指数分布拟合误差		耿贝尔分布拟合误差	
	绝对均方根	相对均方根	绝对均方根	相对均方根	绝对均方根	相对均方根
	误差/( $mm \cdot min^{-1}$ )	误差/%	误差/( $mm \cdot min^{-1}$ )	误差/%	误差/( $mm \cdot min^{-1}$ )	误差/%
5	0.080	3.4	0.113	5.6	0.065	3.6
10	0.085	4.1	0.097	5.1	0.075	3.2
15	0.055	3.1	0.093	6.1	0.051	2.8
20	0.049	3.2	0.083	6.1	0.049	3.1
30	0.060	5.5	0.088	7.8	0.056	4.5
45	0.074	10.9	0.091	10.6	0.063	6.3
60	0.070	6.7	0.071	8.2	0.063	5.5
90	0.066	5.7	0.062	6.6	0.066	7.9
120	0.049	5.9	0.055	9.0	0.051	6.5
150	0.039	6.0	0.039	8.2	0.040	6.7
180	0.030	5.3	0.030	7.7	0.031	5.9
平均均方差	0.060	5.4	0.075	7.4	0.058	5.2

表 2 暴雨强度参数误差计算

线型	$A_1$	$C$	$b$	$n$	平均绝对均方根 误差/( $mm \cdot min^{-1}$ )	平均相对均方根 误差/%
P - III 分布	14.214	10.004	12.6	0.703	0.039	4.5
指数分布	12.066	12.312	14.3	0.688	0.058	7.0
耿贝尔分布	12.399	8.837	11.7	0.673	0.040	5.1

根据《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定导则》<sup>[17]</sup>规定:计算重现期在 2 ~ 20 a 时,在一般降雨强度的地方,平均绝对均方根误差不宜大于 0.05 mm/min;在较大降雨强度的地方,平均相对均

方根误差不宜大于 5%。

由表 2,指数分布设计值求得总公式参数在重现期为 2 ~ 20 a 时的平均绝对均方根误差和平均相对均方根误差分别为 0.058 mm/min 和 7%,不满足

规范精度要求;按照 P - III 型频率分布和耿贝尔分布设计值求得总公式参数在重现期为 2 ~ 20 a 时的平均绝对均方根误差分别为 0.038 和 0.040, 小于 0.05 mm/min, 且平均相对均方根误差分别为 4.6% 和 5.1%, 小于 5%, 均满足规范精度要求。但相比之下 P - III 型频率分布设计值求得总公式拟合精度更高, 因此, 沭阳县暴雨强度公式采用 P - III 分布的设计值确定暴雨公式参数。沭阳县暴雨强度公式为:

$$i = \frac{12.874 + 10.004 \lg P}{(t + 12.6)^{0.703}} \quad (5)$$

宿迁市暴雨强度公式是 2012 年由江苏省水文水资源勘测局采用蚁群算法 (ACA) 结合寻优算法 (OC) 编制的公式, 采用 1981 - 2011 年宿迁闸站资料, 其公式为:

$$i = \frac{61.2(1 + 1.05 \lg T)}{(t + 39.4)^{0.996}} \quad (6)$$

根据拟合的暴雨强度公式参数和现行采用的暴雨强度公式参数, 绘制降雨重现期为 2 a 和 5 a 的暴雨强度 - 历时 - 重现期关系曲线图, 如图 2。

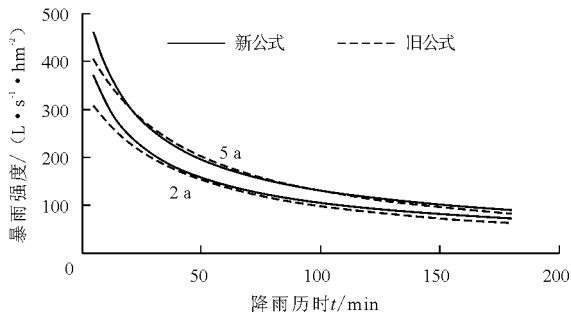


图2 新旧公式计算结果比较

由图 2 可知, 降雨重现期为 2 a 和 5 a 时, 沭阳县暴雨强度公式与宿迁市暴雨强度公式计算值相比, 平均偏差总体上随着降雨历时的增大先减小后增大, 暴雨强度的变化具有一定的趋势性。重现期为 2 a 时, 沭阳县新编暴雨强度大于现行所用暴雨强度值, 重现期为 5 a 时, 在区间 0 ~ 30 min 和区间 90 ~ 180 min, 沭阳县新编暴雨强度大于现行所用暴雨强度值, 在区间 30 ~ 90 min, 沭阳县新编暴雨强度小于现行所用暴雨强度值。可能原因是短历时暴雨随下垫面改变其分布变化复杂, 表明沭阳县有必要编制适用于沭阳县城区的暴雨强度公式。

## 4 结 论

以沭阳县气象站 1981 - 2015 年共计 35 a 的自记暴雨雨量资料为基础, 分别采用 P - III 型分布、指

数分布和耿贝尔分布进行理论频率曲线分析, 根据频率拟合设计值计算暴雨强度公式及其拟合误差, 分析计算结果表明:

(1) 在 P - III 型分布频率曲线、指数分布频率曲线和耿贝尔分布频率曲线 3 种线型中, 依拟合指标而言, P - III 型曲线和耿贝尔型曲线拟合稍微好一些, 但选取的最终判据应考虑所得暴雨强度公式精度高低;

(2) 根据设计降雨强度, 计算暴雨强度公式误差, 指数分布设计值求得总公式参数不满足规范精度要求; 按照 P - III 型频率分布和耿贝尔分布设计值求得总公式参数均满足规范精度要求。但相比之下 P - III 型频率分布设计值求得总公式拟合精度更高, 因此, 沭阳县暴雨强度公式采用 P - III 分布的设计值确定暴雨公式参数;

(3) 分析暴雨强度 - 历时 - 重现期关系曲线图, 可以看出, 同一重现期暴雨强度随着降雨历时的增加而减小且变化变得逐渐平缓;

(4) 比较新拟合的暴雨强度公式参数和现行采用的暴雨强度公式参数, 结果表明, 重现期为 2 a 和 5 a 年时, 在历时区间 0 ~ 30 min 和 90 ~ 180 min 时, 两者相差较大, 且沭阳县新编暴雨强度大于现行所用雨强度值, 因此, 有必要对沭阳县进行暴雨强度公式编制。

## 参考文献:

- [1] 兰小建, 余丽萍. 衢州市突发灾害性天气 - 短历时强降雨时空分布特征[J]. 浙江气象, 2017, 38(1): 34 - 36 + 40.
- [2] 李琛, 李津, 张明英, 等. 北京短历时强降雨的时空分布[J]. 气象科技, 2015, 43(4): 704 - 708.
- [3] 马京津, 李书严, 王冀. 北京市强降雨分区及重现期研究[J]. 气象, 2012, 38(5): 569 - 576.
- [4] 黄津辉, 向文艳, 户超, 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.
- [5] Hossain Z, López - Climent M F, Arbona V, et al. Modulation of the antioxidant system in citrus under waterlogging and subsequent drainage [J]. Journal of Plant Physiology. 2009, 166(13): 1391 - 1404.
- [6] 翁窈瑶. 城市暴雨强度公式推求方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [7] 上海市政工程设计总院. GB50014 - 2006 室外排水设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [8] 公维龙. 陕西省短历时暴雨频率分布及暴雨公式研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

“三条红线”约束下的 KH - MEPP 水安全评价模型,并构建 ABC - MEPP、CA - MEPP 和 PSO - MEPP 模型作为对比,以云南省所辖 16 个行政分区为例进行研究分析,模型及评价方法具有参考意义。

(2)通过对目标函数的优化验证了 KH 算法优化性能优于 ABC、CA 和 PSO 算法,具有较好的极值寻优能力和收敛稳定性。通过实例验证表明,对于 MEPP 技术,决定评价或分类精度的关键因素是智能算法的极值寻优能力。

(3)KH - MEPP 模型对迪庆州、德宏州、怒江州和西双版纳州水安全评价为“安全”;丽江市评价为“不安全”;其余行政分区评价为“基本安全”。KH - MEPP 模型的评价结果与 PSO - MEPP 模型相同,但在排序上存在差异;与 CA - MEPP、ABC - MEPP 模型在评价结果及排序上均存在差异。

#### 参考文献:

- [1] 刘传旺,吴建平,任胜伟,等.基于层次分析法与物元分析法的水安全评价[J].水资源保护,2015,31(3):27-32.
- [2] 汪嘉杨,刘韵,李祚泳,等.基于指标规范化概率神经网络的水安全评价模型[J].水力发电学报,2014,33(6):78-83.
- [3] 贡力,靳春玲.基于水贫困指数的城市水安全评价研究[J].水力发电学报,2014,33(6):84-90.
- [4] 汪嘉杨,王文圣,李祚泳,等.基于 TS - SVM 模型的水安全评价[J].水资源保护,2010,26(2):1-4+9.
- [5] 宋培争,汪嘉杨,刘伟,等.基于 PSO 优化逻辑斯蒂曲线的水资源安全评价模型[J].自然资源学报,2016,31(5):886-893.
- [6] 沈俊源,吴凤平,于倩雯.基于模糊集对分析的最严格水安全综合评价[J].水资源与水工程学报,2016,27(2):92-97.
- [7] 王子茹.基于可变模糊集对立统一定理的水安全评价研究[J].人民长江,2011,42(9):1-3.
- [8] 张明,王贵作,张寅熙.水文相似流域最大熵优选模型研究[J].水利水电技术,2012,43(2):14-17.
- [9] Gandomi A H, Alavi A H. Krill herd: a new bio - inspired optimization algorithm [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17 (12): 4831-4845.
- [10] 牛培峰,陈科,马云鹏,等.基于磷虾群算法的汽轮机热耗率建模应用[J].动力工程学报,2016,36(10):781-787.
- [11] 黄璇,郭立红,李姜,等.磷虾群算法优化支持向量机的威胁估计[J].光学精密工程,2016,24(6):1448-1455.
- [12] 李丛,胡文军,丁勇,等.基于改进磷虾群优化的中心极大化 KFCM 算法在 IDS 的应用[J].计算机应用研究,2016,33(2):507-512.
- [13] 王磊,张汉鹏.基于混沌搜索与精英交叉算子的磷虾觅食算法[J].计算机工程,2015,41(3):156-161.
- [14] 黄健元,金广宇,于彦博.投影寻踪模型在行蓄洪区运用风险评估中的应用[J].水利经济,2016,34(5):60-63.
- [15] 崔东文.鸡群优化算法投影寻踪洪旱灾害评估模型[J].水利水电科技进展,2016,36(2):16-23.
- [9] 崔俊蕊,王政然,梁爽,等.城市设计暴雨频率曲线的拟合及参数优化[J].水电能源科学,2014,32(11):48-51+128.
- [10] Awadallah A. G. Regional intensity - duration - frequency curves for Jeddah region, Saudi Arabia, using ordinary and L - moments approaches [J]. Journal of Flood Risk Management. 2015, 8(3):195-207.
- [11] 周浩澜,陈洋波,徐会军.基于 GEV 分布模型参数与历时关系的暴雨强度公式推求[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(S1):37-41.
- [12] 张子贤,孙光东,孙建印,等.城市暴雨强度公式拟合方法研究[J].水利学报,2013,44(11):1263-1271.
- [13] Rahman A S, Rahman A, Zaman M A, et al. A study on selection of probability distributions for at - site flood frequency analysis in Australia [J]. Natural Hazards. 2013, 69(3):1803-1813.
- [14] Vidal I. A Bayesian analysis of the Gumbel distribution: an application to extreme rainfall data [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2014, 28(3):571-582.
- [15] van Dijk A I J M, Meesters A G C A, Schellekens J, et al. A two - parameter exponential rainfall depth - intensity distribution applied to runoff and erosion modelling [J]. Journal of Hydrology. 2005, 300(1-4):155-171.
- [16] 邵尧明,何明俊.现行规范中城市暴雨强度公式有关问题探讨[J].中国给水排水,2008,24(2):99-102.
- [17] 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[S].2014.

(上接第 79 页)