

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.017

镇江市中长历时设计暴雨计算

严方家¹, 李琼芳^{1,2}, 王 燕³, 周正模¹, 杜 尧¹, 和鹏飞¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心, 江苏 南京 210098; 3. 镇江新鸿智慧水务技术有限公司, 江苏 镇江 212000)

摘要:基于丹徒站 1981—2016 年长系列实测降雨资料,采用 Mann-Kendall 检验分析了 3 h、6 h、12 h、24 h 共 4 种中长历时的年最大降水量的变化趋势,采用模糊识别法识别了 4 种历时暴雨的雨型特征,并基于优选得到的分布函数计算不同历时、不同重现期的设计面雨量;依据 5 场典型场次暴雨,分别应用同频率法和 P&C (Pilgrim & Cordery) 法推求相应的设计暴雨过程并进行了对比分析。结果表明:4 种历时的年最大降水量虽均呈现不同程度的增加趋势,但仅 6 h 和 12 h 的年最大降水量通过了 90% 的显著性检验;4 种历时暴雨的雨型均以雨峰偏前的单峰型为主;P-Ⅲ型分布函数在降雨频率分析中拟合最优;与 P&C 法相比,同频率法推求得到的设计暴雨过程峰值更大,有利于保障防洪安全。

关键词:设计暴雨;同频率法;P&C 法;P-Ⅲ型分布;镇江市

中图分类号:TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0108-04

Medium and long duration design rainstorm calculation in Zhenjiang City // YAN Fangjia¹, LI Qiongfang^{1,2}, WANG Yan³, ZHOU Zhengmo¹, DU Yao¹, HE Pengfei¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center of World Water Valley and Water Ecological Civilization, Nanjing 210098, China; 3. Zhenjiang Xinhong Intelligence Water Affairs Co. Ltd., Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Based on the long series of measured precipitation data of Dantu station from 1981 to 2016, Mann-Kendall test was used to analyze the variation trend of maximum annual precipitation with four medium and long durations of 3, 6, 12 and 24 hours. Fuzzy identification method was adopted to identify the rainfall pattern characteristics of four duration rainstorms. The design rainfall in different durations and return periods was calculated based on the optimized distribution function. According to five typical rainstorms, the same frequency method and Pilgrim & Cordery method were used to deduce the corresponding design rainstorm process and comparative analysis was conducted. The results show that although the maximum annual precipitation of four durations all showed increasing trends to different degrees, only the maximum annual precipitation of 6 h and 12 h passed the 90% significance test. The rainfall patterns of four duration rainstorms were all dominated by single peak with a slight front. P-Ⅲ distribution function fitted optimally in rainfall frequency analysis. The peak value obtained by the same frequency method was larger than that obtained by Pilgrim & Cordery method, which was beneficial to ensure flood control safety.

Key words: design rainstorm; same frequency method; Pilgrim & Cordery method; P-Ⅲ distribution; Zhenjiang City

近年来,受全球气候变化与快速城镇化的影响,城市地区极端暴雨频发,再加上城市现有防洪排涝设施标准普遍偏低,城市洪涝灾害日趋严重,在一定程度上制约了中国城市的可持续发展^[1-3]。利用最新的长系列暴雨资料科学合理地推求设计暴雨过程对制定防洪排涝基础设施的建设标准至关重要^[4],

为此,众多学者针对不同城市开展了设计暴雨的研究。朱勇年^[5]采用同频率法推求得到杭州市 24 h 的设计暴雨过程,并建议优先使用同频率法推求中长历时设计暴雨;沈红霞等^[6]选择最优拟合分布函数,采用同倍比法和同频率法由设计面雨量推求得到南京市主城区历时 12 h 的不同重现期设计暴雨

基金项目:国家自然科学基金(51879069)

作者简介:严方家(1996—),男,硕士研究生,研究方向为城市防洪与排涝。E-mail: 523910961@qq.com

通信作者:李琼芳(1966—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: qfli@hhu.edu.cn

过程;袁婷婷等^[7]对常州 16 种历时年最大暴雨进行了频率分析,采用综合典型暴雨同频率放大推求 24 h 的设计雨型,但未与 P&C(Pilgrim & Cordery)法等进行比较;王安琪等^[8]在雨型判别的基础上采用 P&C 法分别对单峰型和双峰型中长历时暴雨进行雨型设计,得到具有代表性的上海市设计暴雨雨型;黄津辉等^[9]采用 Huff 雨型法研究了天津市设计暴雨雨型及其年代变化;庄智福等^[10]基于镇江市 1980—2013 年的降水资料推求了其短历时设计暴雨,但关于镇江市中长历时设计暴雨的研究较少。

本文在明晰镇江市雨型特征的基础上,结合多场实测典型暴雨过程,采用同频率法分别推求重现期为 10 a、20 a 和 50 a 的中长历时设计暴雨,并与 P&C 法推求的设计暴雨进行对比分析,以期镇江市防洪排涝基础设施改造与建设标准的确定提供参考。

1 研究区概况与研究方法

镇江市地处长江下游南岸,江苏省西南部,辖区总面积 3843 km²,属北亚热带季风气候,常年平均降水量 1063.1 mm,降雨主要集中在 7、8、9 月。城市化进程的推进和高强度开发,造成城区不透水面积快速增长,导致降雨后径流量增大。主城区部分管网设计标准偏低,排水能力小于 1 年一遇的管道占比 48.07%。镇江市主城区面积相对较小,以点代面的方法误差较小^[11],因此本文采用丹徒站 1981—2016 年的逐分钟实测降雨资料计算得到的设计点雨量代表镇江市的设计面雨量。

参照 GB 50014—2006《室外排水设计规范》规定,选取 3 h、6 h、12 h、24 h 的暴雨作为中长历时暴雨。基于镇江市丹徒站 1981—2016 年逐分钟降雨数据,按照两场降雨之间的时间间隔为 2 h 进行降雨场次划分,以吴滨等^[12]建议的各历时暴雨的临界值作为不同历时的暴雨标准,滑动选取对应历时的暴雨过程。采用 Mann-Kendall(M-K)检验^[13]分析镇江市不同中长历时年最大降水量的变化规律,采用模糊识别法^[13]识别镇江市中长历时暴雨的雨型特征。利用年最大值法选取得到年最大 3 h、6 h、12 h 和 24 h 的降水量统计样本,在 P-Ⅲ型、耿贝尔型和指数型 3 种分布函数中优选与实测资料拟合最佳的分布函数进行频率分析,求得重现期分别为 10 a、20 a 和 50 a 的年最大 3 h、6 h、12 h 和 24 h 设计暴雨量。最后结合统计得到的暴雨雨型特征,依据“可能”和“不利”的原则从实测降雨资料中选取 5 场 6 h 和 5 场 12 h 的典型暴雨过程,分别采用同频率法和 P&C 法推求不同除涝标准下的不同中长历

时设计暴雨过程。

2 中长历时暴雨特征变化规律

2.1 不同中长历时年最大降水量变化趋势

丹徒站 1981—2016 年历年最大 3 h、6 h、12 h 和 24 h 降水量距平百分率的变化趋势如图 1 所示。总体来看,4 种历时的年最大降水量变化趋势基本一致,均呈现缓慢增加的趋势,在 1992 年和 2003 年出现两个峰值,这与镇江短历时暴雨从 20 世纪 90 年代后期开始至 21 世纪前 10 年的中期转为增强的趋势基本吻合^[10]。

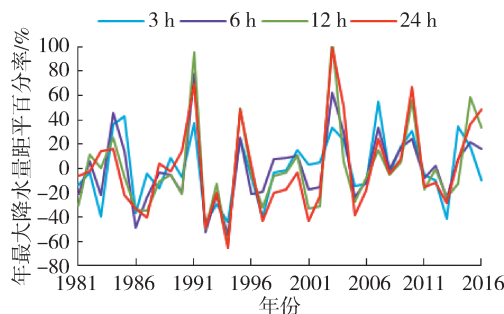


图 1 不同历时年最大降水量距平百分率

Fig.1 Percentage of maximum annual precipitation anomaly over different durations

1981—2016 年镇江市 4 种历时年最大降水量的 M-K 检验结果表明,年最大 3 h、6 h、12 h 和 24 h 降水量均呈现不显著的增加趋势,其中年最大 3 h 降水量和年最大 24 h 降水量的 M-K 统计量均为 0.99,未通过显著性检验,而年最大 6 h 降水量和年最大 12 h 降水量的增加趋势相对明显,M-K 统计量分别为 1.62 和 1.40,通过了置信度 90% 的显著性检验。可见镇江市 1981—2016 年中长历时年最大降水量未发生明显的趋势性变化。

2.2 不同中长历时暴雨雨型特征

莫洛可夫^[14]通过 800 多场降雨过程的时程分配,归纳得到 7 种典型雨型,其中,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类分别为雨峰位置在前、后、中的单峰型,Ⅳ类为均匀型,Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ为雨峰处于不同位置的双峰型。为避免人工判断产生的误差,本文采用模糊识别法进行雨型判断,将每场实际降雨过程分为 6 个时段,根据每段时间内雨量占总雨量的比例建立该场降雨过程的模式矩阵,并用每一场降雨过程的实际指标分别与模式矩阵进行比较,然后根据均方误差最小原则确定雨型。

4 种中长历时暴雨雨型统计结果如表 1 所示。可以看出,镇江市中长历时暴雨雨型以单峰型为主,占 71.50%,双峰型次之,占 21.37%,而仅有 7.13% 为均匀型。在单峰型中,雨峰在前部所占的比例最大,高达 39.09%,其次是雨峰居中的雨型(Ⅲ型),

占 16.77%,雨峰偏后的雨型(Ⅱ型)占 15.64%。

表 1 镇江市不同历时暴雨雨型统计

Table 1 Rainfall pattern statistics of different duration rainstorms in Zhenjiang City

历时/h	不同雨型占比/%						
	单峰型			均匀型	双峰型		
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	(Ⅳ类)	V类	Ⅵ类	Ⅶ类
3	59.38	12.50	6.25	3.13	9.37	9.37	0
6	37.50	8.33	25.00	4.17	12.50	8.33	4.17
12	31.70	19.51	21.95	7.32	7.32	4.88	7.32
24	27.78	22.22	13.89	13.89	5.56	8.33	8.33
平均	39.09	15.64	16.77	7.13	8.69	7.73	4.95

单峰型暴雨和双峰型暴雨在模式上差别较大,单峰型暴雨雨量更为集中,尤其是长历时的单峰型暴雨对城市地区除涝构成严重威胁,并且越来越多的研究表明雨峰偏前的单峰型暴雨更为常见。

3 中长历时设计暴雨过程推求

3.1 不同中长历时年最大暴雨量频率

常用的城市暴雨资料选样方法有年最大值法、年多个样法、年超大值法和超定量法等^[12]。因镇江市暴雨资料系列足够长,采用年最大值法进行不同历时点暴雨选样,得到年最大 3 h、6 h、12 h 和 24 h 暴雨量统计样本。

采用我国常用的暴雨理论频率分布线型——P-Ⅲ型、耿贝尔型和指数型 3 种分布函数进行拟合,并采用均方根误差(RMSE)进行拟合优度检验。表 2 给出了不同历时暴雨的 3 种分布函数拟合结果,可以看出,4 种历时中,P-Ⅲ型分布函数计算得到的 RMSE 值始终是最小的,因此优选 P-Ⅲ型分布函数推求镇江市中长历时设计面雨量。

表 2 不同历时暴雨不同分布函数拟合结果

Table 2 Fitting results of different distribution functions of different duration rainstorms

历时/h	不同分布函数计算的 RMSE 值		
	P-Ⅲ型	耿贝尔型	指数型
3	3.11	3.89	6.01
6	3.69	4.26	6.36
12	6.41	14.09	6.89
24	4.47	4.63	8.52

基于优选得到的 P-Ⅲ型分布函数推求 4 种中长历时不同重现期标准下的设计面雨量,结果如表 3 所示。

3.2 典型暴雨的选择

根据上文分析的 4 种历时暴雨的雨型特征,依照“可能”和“不利”的要求选择单峰型典型暴雨过程。由表 1 可见,对于出现频次较高且对城市防洪

表 3 不同重现期设计面雨量计算结果

Table 3 Calculated results of design rainfall in different recurrence periods

重现期/a	不同历时设计面雨量/mm			
	3 h	6 h	12 h	24 h
2	58.7	73.9	84.4	104.3
5	74.7	95.4	120.4	145.6
10	84.4	108.1	145.7	171.8
20	93.1	119.5	170.2	195.9
50	103.7	133.2	202.0	225.9
100	111.3	142.9	225.5	247.6

排涝最为不利的 6 h 和 12 h 两种历时暴雨,单峰偏前的暴雨最多,占比分别达到了 37.50% 和 31.70%,因此,选取镇江市致灾较严重的 6 h 和 12 h 两种历时各 5 场单峰偏前的典型暴雨过程(表 4)来推求不同除涝标准下的设计暴雨过程。

表 4 典型场次暴雨过程

Table 4 Typical rainstorm process

6 h 暴雨		12 h 暴雨	
降雨时间	降水量/mm	降雨时间	降水量/mm
1988-07-25	46.5	1984-07-20	118.1
1995-08-10	69.9	1995-06-20	139.7
2005-08-17	41.8	1996-07-03	89.7
2012-09-03	43.8	1999-10-09	56.7
2013-07-05	40.9	2009-09-17	60.7

3.3 设计暴雨过程推求

以除涝标准 10 年一遇、20 年一遇和 50 年一遇为例,对 6 h 和 12 h 两种历时各 5 场典型暴雨过程取均值,采用同频率法对综合典型暴雨各时段雨量进行放大,并与 P&C 法得到的设计暴雨过程进行对比,结果见图 2 和图 3(图中以 1 h 为一个时段)。

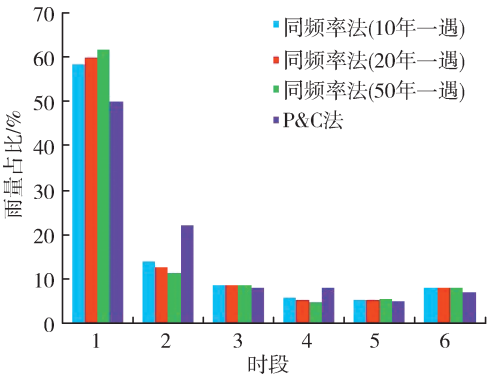


图 2 6 h 设计暴雨过程

Fig. 2 Design rainstorm process for 6 hours

从图 2 和图 3 可以看出,两种历时在不同除涝标准下采用同频率法得到的设计暴雨过程近似,且峰值占比较高,其中 6 h 的雨峰雨量占比均为 60% 左右,12 h 的雨峰雨量占比也均超过了 40%。

与同频率法相比,两种历时的情况下,P&C 法

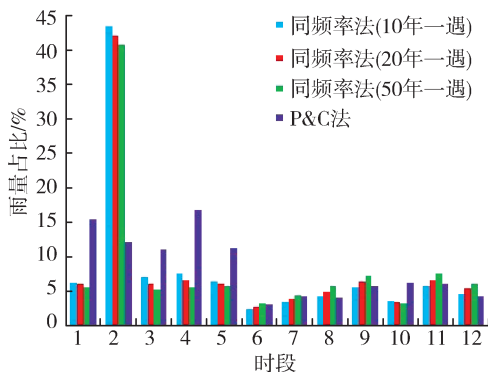


图3 12 h设计暴雨过程

Fig.3 Design rainstorm process for 12 hours

得到的设计暴雨过程更接近实际降雨过程,但同频率法得到的设计暴雨过程峰值更高,对城市防洪排涝设计更有利,这与朱勇年^[5]建议优先选用同频率法进行长历时设计暴雨计算的想法一致。因此,本文推荐镇江市采用同频率法计算设计暴雨。

4 结 论

a. 1981—2016年镇江市3 h、6 h、12 h、24 h等4种历时的年最大降水量虽然均呈现不同程度的增加趋势,但仅6 h和12 h的年最大降水量通过了90%的显著性检验。

b. 镇江市3 h、6 h、12 h、24 h等4种历时暴雨雨型均以单峰型为主,暴雨雨量集中,且雨峰偏前的居多。

c. 与耿贝尔型和指数型分布函数相比,P-Ⅲ型分布函数在降雨频率分析中拟合最优。

d. 与P&C法相比,同频率法推求得到的镇江市中长历时设计暴雨偏安全,推荐采用。

参考文献:

- [1] 张建云,王银堂,胡庆芳,等.海绵城市建设有关问题讨论[J].水科学进展,2016,27(6):793-799. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 793-799. (in Chinese))
- [2] 夏军,石卫,王强,等.海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J].水资源保护,2017,33(1):1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 1-8. (in Chinese))
- [3] 张伟,车伍.海绵城市建设内涵与多视角解析[J].水资源保护,2016,32(6):19-26. (ZHANG Wei, CHE Wu. Connotation and multi-angle analysis of sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 19-26. (in Chinese))
- [4] 周玉文.海绵城市建设中的设计暴雨探讨[J].给水排

水,2019,45(3):59-63. (ZHOU Yuwen. Discussion on the design hyetography of sponge city construction[J]. Water and Wastewater Engineering, 2019, 45(3): 59-63. (in Chinese))

- [5] 朱勇年.设计暴雨雨型的选用:以杭州市为例[J].中国给水排水,2016,32(1):94-96. (ZHU Yongnian. Selection of design rainfall pattern: case of Hangzhou[J]. China Water and Wastewater, 2016, 32(1): 94-96. (in Chinese))
- [6] 沈红霞,杜付然,江海涛,等.南京主城区设计暴雨计算研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(6):74-78. (SHEN Hongxia, DU Furan, JIANG Haitao, et al. Study on design rainstorm in Nanjing main urban area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 74-78. (in Chinese))
- [7] 袁婷婷,李国芳,王艺晗.常州市区设计暴雨公式及雨型研究[J].水电能源科学,2019,37(6):16-19. (YUAN Tingting, LI Guofang, WANG Yihan. Study on design rainstorm formula and rainstorm pattern in Changzhou urban area[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(6): 16-19. (in Chinese))
- [8] 王安琪,瞿宁玲,陈元芳,等.上海市杨浦区设计面暴雨量与设计暴雨雨型研究[J].水电能源科学,2018,36(8):1-4. (WANG Anqi, QU Ningling, CHEN Yuanfang, et al. Design storm intensity and design storm pattern of Yangpu District in Shanghai City[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(8): 1-4. (in Chinese))
- [9] 黄津辉,王超,范泽华.天津市设计暴雨雨型的演变[J].水资源保护,2020,36(1):38-43. (HUANG Jinhui, WANG Chao, FAN Zehua. Evolution of design rainfall pattern in Tianjin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 38-43. (in Chinese))
- [10] 庄智福,王珂清,杨杰,等.镇江市新一代暴雨强度公式研制及雨型设计[J].气象科学,2015,35(4):506-513. (ZHUANG Zhifu, WANG Keqing, YANG Jie, et al. Research on new generation rainstorm intensity formula and design of rainfall hyetograph in Zhenjiang[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2015, 35(4): 506-513. (in Chinese))
- [11] 梁忠民,钟平安,华家鹏.水文水利计算[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [12] 吴滨,文明章,李玲,等.福建省不同短历时暴雨时空分布特征[J].暴雨灾害,2015,34(2):153-159. (WU Bin, WEN Mingzhang, LI Ling, et al. Temporal and spatial distribution of different short-time rainstorm in Fujian[J]. Torrential Rain and Disasters, 2015, 34(2): 153-159. (in Chinese))
- [13] 杜尧,陈启慧,和鹏飞,等.南京地区暴雨变化特性分析[J].水资源保护,2019,35(6):89-95. (DU Yao, CHEN Qihui, HE Pengfei, et al. Analysis of rainstorm variation characteristics in Nanjing region[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 89-95. (in Chinese))
- [14] 莫洛可夫.雨水道与河流水道[M].北京:建筑工程出版社,1956.

(收稿日期:2019-09-04 编辑:熊水斌)