

南京市短历时设计暴雨雨型研究

倪志楠^{1,2}, 李琼芳^{1,2}, 杜付然³, 江海涛⁴

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 国际河流研究所, 江苏 南京 210098;
3. 河南省许昌水文水资源勘测局, 河南 许昌 461000; 4. 河南省水文水资源局, 河南 郑州 450000)

摘要: 设计暴雨的确定是城市管网系统排水能力规划设计的重要基础。以南京市中心城区为研究区, 首先应用暴雨强度公式分别计算历时 60 min 和 120 min 的不同重现期设计暴雨量, 再基于 1982-2015 年降水资料利用年最大法选取得到年最大降雨序列, 并计算综合雨峰系数, 最后应用 Pilgrim & Cordery 雨型和芝加哥雨型推求南京市中心城区历时 60 min 和 120 min 的设计暴雨过程, 并对峰值大小、雨峰位置、雨峰出现时累计暴雨量进行对比分析。结果表明: 历时 60 min 和历时 120 min 设计暴雨的雨峰分别处于整场降雨过程的 1/2 时间和前 1/3 时间; 两种方法得到的雨峰值大小相当; Pilgrim & Cordery 雨型法计算的雨峰出现时累计暴雨量大于芝加哥雨型法; 短历时设计暴雨雨型推荐选用芝加哥雨型。研究成果可为南京市中心城区地面积水风险评估与排水管网系统的规划和建设提供参考。

关键词: 短历时设计暴雨; Pilgrim & Cordery 雨型; 芝加哥雨型; 雨峰位置; 累计暴雨量; 南京中心城区
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2019)02-0057-06

Study on design of rainstorm pattern based on short duration in Nanjing City

NI Zhinan^{1,2}, LI Qiongfang^{1,2}, DU Furan³, JIANG Haitao⁴

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Institute of International River Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China
3. Xuchang Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Henan Province, Xuchang 461000, China;
4. Hydrology and Water Resources Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The determination of design storm is an important foundation for the planning and design of urban flood protection and drainage projects. The paper takes the central area of Nanjing City as the research area. First, the storm rainfall intensity formula was used to calculate the stormwater volume at different recurrence periods of 60 and 120 min, respectively. Then the annual maximum rainfall sequence was selected based on precipitation data from 1982 to 2015 and the synthesized rain-peak modulus was calculated. Finally, the Pilgrim & Cordery pattern and the Chicago rain pattern methods were used to deduce the design storm process lasting 60 min and 120 min in the central area of Nanjing, and the peak size, rain peak position and accumulated rainfall before the rain peak were compared. The results showed that the rainstorm peaks of 60 min and 120 min are at the time of 1/2 and the first 1/3 of the whole rainfall process, respectively. The rainfall peak values obtained by the two methods are not significantly different. The rainfall calculated by Pilgrim & Cordery pattern when the peak appeared is larger than that of the Chicago pattern. The Chicago pattern is recommended for the short duration design storm. The research results provide a reference for the urban waterlogging risk assessment and drainage and waterlogging prevention project planning and construction in the central area of Nanjing.

Key words: short duration design storm; Pilgrim & Cordery pattern; Chicago pattern; rain peak position

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171220); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT13062)

作者简介: 倪志楠(1993-), 女, 黑龙江七台河人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文学及生态水力学。

通讯作者: 李琼芳(1966-), 女, 湖北武汉人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。

tion; accumulated rainfall; Nanjing central area

1 研究背景

随着全球气候变化及城市化快速发展的“雨岛”效应,城市区域短历时高强度暴雨事件呈增加趋势,再加上设计标准普遍偏低的城市排涝设施难以满足城市排涝要求,导致城市内涝频发,严重影响了人们的生产生活^[1]。鉴于设计暴雨是城市室外排水系统规划、设计和建设的重要标准,其可靠性事关城市安全保障^[2]。因此,如何科学合理地确定短历时设计暴雨过程一直受到水文、给排水、城市管理等相关专业学者的高度重视^[3-5]。在确定设计暴雨过程中,设计暴雨雨型的选择至关重要。一些学者对不同区域的设计雨型进行了研究:范泽华^[6]采用 Huff 雨型研究了天津市设计雨型,但该方法目前还没有形成一套完整的理论体系;王光明等^[7]分别利用模糊识别法、芝加哥法、Pilgrim & cordery 法及同频率法对湖南省各地区短历时的暴雨雨型进行了识别和推求,结果表明芝加哥法和 Pilgrim & cordery 法的计算结果更接近于实际,同频率法效果相对差一些;朱勇年^[8]通过模拟杭州市不同历时的降雨情景,探讨了杭州市雨洪模拟中设计暴雨雨型的选用方法,建议短历时设计暴雨雨型优先选用 Pilgrim & cordery 法成果。目前,城市设计暴雨雨型的选取没有统一的标准^[6]。在江苏省,徐州、镇江、沐阳等市已通过设计暴雨雨型的研究确定了适合各自城市的设计暴雨雨型^[9-11],南京市城市管理局也修订了暴雨强度公式,但关于南京市设计暴雨雨型的研究不多见。本文首先应用设计暴雨公式计算南京市中心城区的设计暴雨量,再基于 34 a 的实测降水资料分别应用 Pilgrim & Cordery 法^[7]和芝加哥雨型^[7]推求南京市中心城区不同重现期设计暴雨过程,最后通过分析比较推荐更适用于南京市中心城区的设计暴雨雨型。研究成果可以为南京市排水管网系统的规划设计或改造提供支撑。

2 数据与方法

2.1 研究区域概况

南京位于长江下游中部地区,江苏省的省府所在地,是国家区域中心城市。南京中心城区包括鼓楼区、玄武区、秦淮区、建邺区、雨花台区 5 个区(见图 1)。受热带和副热带海洋性气候影响,降水主要集中在汛期 5-10 月份。随着南京市城市化建设加快,下垫面发生显著改变,城区“雨岛”效应明

显,高强度短历时暴雨频发,再加上老城区面积占比较大的南京中心城区排水管网设计标准偏低^[12],不能迅速及时排泄高强度短历时暴雨的产水量,以至于在南京常发生“看海”现象。因此,亟需开展南京市中心城区设计暴雨研究,为城市排水管网的规划设计或改造提供参考。

2.2 数据来源与研究方法

选择南京中心城区为研究区,依据南京雨量站 1982-2015 年的 34 a 的降水资料,利用年最大值法^[13]分别选取年最大 60 min 和 120 min 暴雨量及其降雨过程,计算相同历时雨峰位置系数,加权平均不同历时雨峰位置系数得到综合雨峰系数,再根据南京市暴雨强度公式计算暴雨历时分别为 60 min 和 120 min、重现期分别为 1、2、5、10 和 20a 的设计暴雨量;鉴于芝加哥雨型法是《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》(2014 版)^[14]推荐的用于推求设计暴雨的方法,而 Pilgrim & Cordery 法是基于大量实测降水资料且得到的设计雨型更接近于实际降雨雨型,本文选用 Pilgrim & Cordery 法和芝加哥雨型法推求设计暴雨过程,并对比分析两种方法得到的降雨过程的雨峰位置、峰值大小、雨峰出现前累计暴雨量及对城市排水的影响,推荐适合于南京市中心城区的设计暴雨雨型。

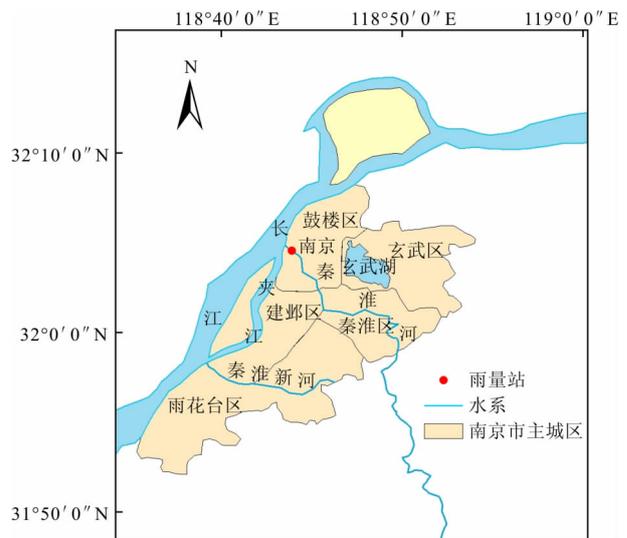


图 1 南京中心城区图

3 不同重现期设计暴雨量的推求

3.1 不同短历时设计暴雨量计算

雨水管渠设计标准因受城区重要程度、地形条件、气候、资金等多重因素影响而有所不同。根据

《室外排水设计规范》(GB50014-2006,2016版)^[15]的要求(见表1),鉴于研究区包含的地区类型比较复杂,而南京市城区雨水排水管道的设计标准是“1~3年一遇”,并且存在管网老化或不达标的情况,因此本文选取重现期为1、2、5、10、20 a共5种设计标准推求设计暴雨。设计历时一般根据雨水从汇水面积的最远点汇流到设计出口断面所需的时间来确定。考虑到近年来极端强降水事件持续时间呈现出短历时性倾向^[18],同时中心城区是商业集聚区,不透水面积大,汇流快,因此本文选择60 min和120 min两种不同降雨历时对不同重现期设计暴雨量进行研究。

表1 雨水管渠设计重现期 a

城市类型	城区类型			
	中心城区	非中心城区	中心城区的重要地区	中心城区地下通道下沉式广场等
超大城市和特大城市	3~5	2~5	5~10	30~50
大城市	2~5	2~3	5~10	20~30
中等城和小城市	2~3	2~3	3~5	10~20

本文依据2014年修订、能反映近年来土地利用和气候等变化对短历时降雨的影响的南京市暴雨公式^[16](公式1)计算设计暴雨量,计算结果见表2。

$$i = \frac{64.3 + 53.8 \lg P}{(t + 32.9)^{1.011}} \quad (1)$$

式中: i 为降雨强度,mm/min; P 为重现期,a; t 为降雨历时,min。

表2 设计暴雨量计算结果

重现期	历时/ min	降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	降雨量/ mm
5年一遇	60	1.04	63
	120	0.63	75
10年一遇	60	1.21	73
	120	0.72	87
20年一遇	60	1.37	83
	120	0.83	99
50年一遇	60	1.59	96
	120	0.96	115
100年一遇	60	1.76	106
	120	1.06	127

3.2 不同短历时设计暴雨过程推求

由于暴雨过程中雨强变化很大,相同设计暴雨量采用不同分配过程对城市局部积水过程的变化有很大影响。雨型是设计暴雨量进行时程分配的依据,描述一场设计暴雨的雨强随时间发展变化的过程。雨型的选择直接关系到降雨所形成的径流过程,必须基于当地长系列实测降水资料,分析降雨过程随时间的变化规律,选定更符合研究区降雨规律且不利于城市排水的降雨时程分配过程。本文选用Pilgrim & cordery雨型和芝加哥雨型等两种雨型来确定南京中心城区短历时设计暴雨过程。

3.2.1 基于Pilgrim & Cordery法的设计暴雨过程推求 Pilgrim & Cordery法是基于数理统计原理确定事关设计暴雨过程推求的两个最为重要的要素,即雨峰位置和雨量分配过程。以暴雨历时120 min为例,推算设计暴雨过程的具体步骤如下:

(1) 样本选取:应用年最大值法选取1982-2015年的最大历时约为120 min(±15 min)的降水资料;

(2) 分段编号:按照所期望的时间步长,将整个历时分为若干时段,本文以5 min为间隔进行分段,按时间顺序依次编号1段至24段;

(3) 按雨量排序:针对选取的每场降雨,按各时段雨量从大到小的顺序进行由小到大的序号排序,排序号越小表明该时段雨量越大;

(4) 确定雨峰位置:计算步骤(3)中各场降雨按雨量排序的结果中相同排序号所对应步骤(2)中分段编号的平均值,数值由小到大的顺序即为最大可能的雨强由大到小的顺序,最小者即为雨峰所在位置;

(5) 确定雨量分配比例:计算24个时段各段降雨量与总雨量的比值,将每个相同时段的比值取平均值,作为最终的分配比例

(6) 设计雨型推求:将步骤(4)得到的各时段排序与步骤(5)得到的各时段雨量分配比例相结合即可得到最大可能的设计雨型。

利用Pilgrim & Cordery法计算得到60 min和120 min设计暴雨的时程分配过程如表3所示。基于此,分别推求得到60 min和120 min设计标准为1年一遇、2年一遇、5年一遇、10年一遇和20年一遇的设计暴雨过程分别见图2和图3。由图2可见,南京市中心城区历时60 min的暴雨过程接近于单峰型,雨峰出现在第5时段,即25 min前后,峰前降雨量持续增大,峰前累计雨量占总雨量的58%,峰后降雨量迅速减小,后趋于平稳;由图3可见,南

京市中心城区历时 120 min 的设计暴雨过程呈现“双峰”,但主峰明显高于次峰,主峰出现在第 8 时段,即整场降雨的 1/3 分位,峰前累计雨量占总雨量的 65%,次峰出现在第 13 时段。

表 3 不同短历时 Pilgrim & Cordery 雨型分配比例结果

历时 60 min		历时 120 min			
t / min	降雨比例 / %	t / min	降雨比例 / %	t / min	降雨比例 / %
5	5.04	5	2.44	65	2.44
10	7.20	10	2.44	70	2.44
15	10.91	15	4.88	75	2.44
20	15.40	20	6.10	80	1.22
25	19.62	25	8.54	85	1.22
30	11.40	30	8.54	90	1.22
35	9.47	35	12.20	95	1.22
40	6.14	40	20.73	100	1.22
45	5.59	45	10.98	105	1.22
50	3.31	50	2.44	110	1.21
55	3.04	55	1.22	115	1.21
60	2.88	60	1.22	120	1.21

3.2.2 基于芝加哥法的设计暴雨过程推求 芝加哥法是基于某一重现期的暴雨公式的参数,结合综合雨峰位置系数推求得到设计降雨过程。每场暴雨的雨峰位置系数 r_i 是暴雨峰值时刻与暴雨历时的比值。综合雨峰位置系数 r 由不同历时暴雨的雨峰位置系数 r_i 加权平均确定。

令峰前的瞬时强度为 i_b ,相应历时为 t_b ,峰后的瞬时强度为 i_a ,相应历时为 t_a ,以雨峰为界,峰前和峰后的瞬时暴雨强度分别用公式(2)和公式(3)表示,再通过积分计算得出累积降雨量及各时段的平均降雨量,得到每个时段内平均降雨强度,确定出对应某一重现期及暴雨历时的芝加哥法雨型。

$$\text{峰前: } i_b = \frac{a[(1-c)\frac{t_b}{r} + b]}{[(\frac{t_b}{r}) + b]^{1+c}} \quad (2)$$

$$\text{峰后: } i_a = \frac{a[(1-c)\frac{t_a}{1-r} + b]}{[(\frac{t_a}{1-r}) + b]^{1+c}} \quad (3)$$

式中: i_b 为峰前的瞬时降雨强度,mm/min; i_a 为峰后的瞬时降雨强度,mm/min; r 为雨峰系数,峰前历时 $t_b = r \cdot t_d$,min,峰后历时 $t_a = (1-r)t_d$,min, a 、

b 、 c 为暴雨公式参数。

图 4 和 5 给出了由芝加哥法推求得到的南京市历时 60 和 120 min 的不同重现期的设计暴雨雨型。根据芝加哥雨型原理求出综合雨峰系数为 0.39,历时 60 和 120 min 的雨峰位置分别位于第 5 时段和第 10 时段,雨峰出现时累计雨量分别占总雨量的 49% 和 53%;高强度暴雨非常集中,雨峰处暴雨强度突然增大,且重现期越大,雨强增大速率越大,雨峰后暴雨强度持续减小。不同历时雨峰强度随重现期的增加而增大。

4 结果分析与讨论

雨峰大小与位置以及雨峰出现时累计暴雨量占总暴雨量的大小对设计暴雨过程推求有较大影响。由芝加哥雨型与 Pilgrim & Cordery 法得到的南京市中心城区设计暴雨在上述几个方面的对比如表 4 所示,图 6 和 7 以 5 年一遇为例给出了历时 60 min 和 120 min 的两种设计暴雨过程。

由图 6 可以看出,同一重现期条件下,由两种雨型推求得到的历时 60min 设计暴雨过程均呈单峰型,且雨峰位置出现在第 5 时段,接近于整场降雨过程的 1/2 时间;表 4 表明 Pilgrim & Cordery 雨型计算出的峰前降雨强度均大于芝加哥雨型,且峰前累积雨量约为芝加哥雨型法的 1.18 倍。根据 Pilgrim & Cordery 雨型法的计算结果可知,前期强降雨填充了排水管道的内部空间,管道本身强大的调蓄功能用以调节峰前的该部分降水,雨峰后雨强显著减小,一般不超过管道排水能力,因此出现径流溢出地面的情况较少;芝加哥雨型在降雨的初始阶段雨强较小,雨峰来临时管道内部空间被迅速填满,而雨峰后降雨强度仍然较大,大部分大于管道排水能力,因此造成溢流情况较多,增加了内涝风险。从降低内涝风险考虑,在推求历时 60min 的设计暴雨时应选择芝加哥雨型雨型。

从图 7 可以发现,同一重现期条件下,由两种雨型推求得到的历时 120min 设计暴雨过程峰现时间基本处于整场降雨过程的前 1/3 时间,但 Pilgrim & Cordery 雨型的雨峰出现在第 40 分钟,比芝加哥雨型的峰现时间早 10 min;Pilgrim & Cordery 雨型降雨集中在降雨峰值出现前(尽管 Pilgrim & Cordery 雨型存在次峰,但次峰峰值远远小于主峰峰值,暂不予考虑),且雨强明显大于芝加哥雨型,雨峰出现后降水强度迅速降低,且递减速率远远超过芝加哥雨型,因此由于管道的调蓄作用使得 Pilgrim & Cordery 雨

型的降雨更易于排出。芝加哥雨型雨峰偏后,峰值过后降水强度仍然较大,高强度降水对城市排水造成巨大压力,不利于防洪排涝,增加了城市内涝风

险。为防止内涝事件出现,在推求历时 120 min 的设计暴雨时应选择芝加哥雨型。

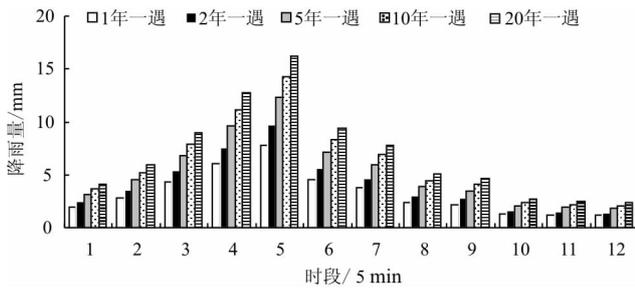


图 2 南京市中心城区历时 60 min 的不同重现期 Pilgrim & Cordery 雨型暴雨过程

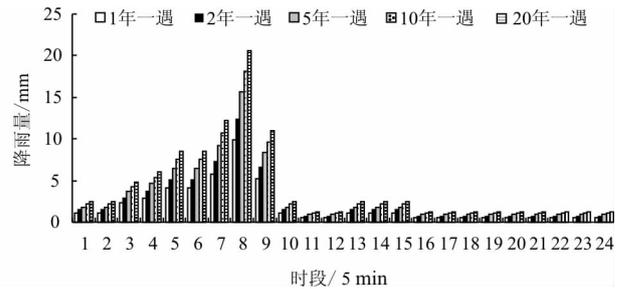


图 3 南京市中心城区历时 120min 的不同重现期 Pilgrim & Cordery 雨型暴雨过程

表 4 两种雨型不同历时的雨峰大小、出现时刻和雨峰出现时累计雨量的大小对比

雨 型	60 min			120 min		
	雨峰出现时刻/min	雨峰出现时累计雨量/%	雨峰大小	雨峰出现时刻/min	雨峰出现时累计雨量/%	雨峰大小
P & C 雨型	30	58	P&C 法约为芝	40	65	P&C 法约为芝
芝加哥雨型	30	49	加哥法的 95%	50	53	加哥法的 125%

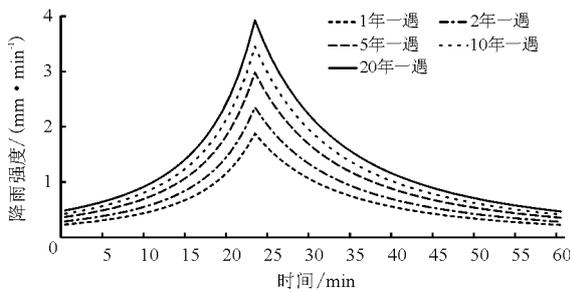


图 4 南京市历时 60 min 的不同重现期芝加哥雨型

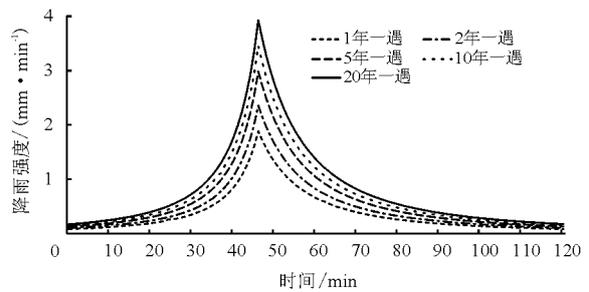


图 5 南京市历时 120 min 的不同重现期芝加哥雨型

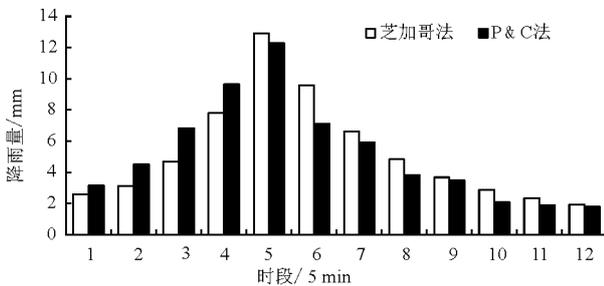


图 6 历时 60 min 5 年一遇设计暴雨过程

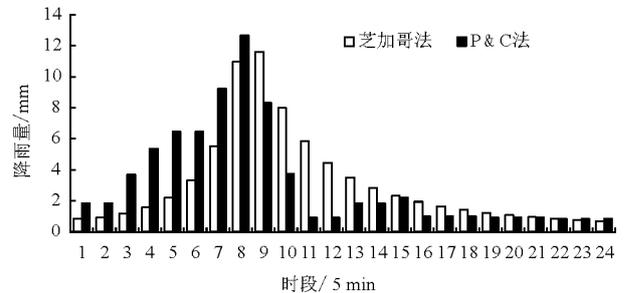


图 7 历时 120 min 5 年一遇设计暴雨过程

文中只对比分析了 5 年一遇的设计暴雨过程,其他重现期的设计暴雨雨型的推求方法相同,得到的结论相近。

本文主要研究了南京主城区的短历时设计暴雨雨型。实际上,南京主城区与非主城区的暴雨特性是有所不同的^[17],其短历时设计暴雨雨型应该分别

开展研究。对于南京主城区,鉴于其面积较小,不同行政区城市化程度与降雨特性差别不大^[18],选择国家基本雨量站——南京站的长系列降水资料研究南京主城区的短历时设计暴雨雨型是可行的,且具有代表性。

5 结 论

根据 1982 - 2015 年南京雨量站的降雨数据,应用暴雨强度公式分别计算重现期为 1、2、5、10、20 a 下历时 60 min 和历时 120 min 的设计暴雨量;运用 Pilgrim & Cordery 法和芝加哥法推求了南京市中心城区的设计暴雨过程,得到以下结论:

(1) 历时 60 min 和历时 120 min 设计暴雨雨型雨峰位置分别处于整场降雨过程的 1/2 时间和前 1/3 时间;Pilgrim & Cordery 雨型和芝加哥雨型计算得到的 60min 设计暴雨过程的峰值相当,但 Pilgrim & Cordery 雨型在雨峰前的累积雨量远大于芝加哥雨型的,更有利于借助管道调蓄功能来排除雨水;芝加哥雨型峰值后降雨强度递减速度远小于 Pilgrim & Cordery 雨型的,容易造成径流溢出地面,造成地面积水。

(2) 对比 Pilgrim & Cordery 雨型和芝加哥雨型表明,芝加哥雨型推求的设计暴雨过程更不利于城市排水,可用于南京市中心城区短历时暴雨雨型设计。同时考虑到实际工作的简便性以及与其他地区的一致性,推荐工程设计者采用芝加哥法得到的短历时暴雨雨型结果来进行实际使用。

(3) 本文应用暴雨强度总公式计算设计暴雨量,其精度低于单一重现期下的暴雨强度分公式,在制定南京市排水管网建设或改造标准时,建议构建参数随重现期变化的暴雨强度分公式来计算不同重现期和不同历时的设计暴雨。

参考文献:

- [1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4):485 - 491.
- [2] 梅超,刘家宏,王浩,等. 城市设计暴雨研究综述[J]. 科学通报, 2017,62(33):3873 - 3884.
- [3] 张建云. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. 水利水运工程学报, 2012(1):1 - 4.

- [4] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦. 论城市排水防涝工程水文问题[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1):42 - 48.
- [5] 姜仁贵,韩浩,解建仓,等. 变化环境下城市暴雨洪涝研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3):11 - 17.
- [6] 范泽华. 天津市降雨趋势分析及设计暴雨研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [7] 王光明,廖玉芳,曾向红,等. 湖南短历时暴雨雨型分析[J]. 暴雨灾害, 2017,36(1):86 - 90.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 慕瑞琪,孙康远,段培发. 徐州市暴雨雨型的研究[C]//第33届国气象学会年会 S9 水文气象灾害预报预警,西安:2016.
- [11] 欧淑芳,叶兴成,王飞,等. P&C 雨型在城市排水计算中的适用性分析[J]. 水电能源科学, 2018,36(2):32 - 35.
- [12] 胡茂川,张兴奇. 南京市内涝灾害成因分析[J]. 重庆交通大学学报(社会科学版)社会科学版, 2011, 11(3):28 - 30.
- [13] 王昆,王超,王洁,等. 城市暴雨强度公式选样方法研究[J]. 人民长江, 2014,45(19):6 - 8.
- [14] 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]. 北京,2014.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50014 - 2006: 室外排水设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2016.
- [16] 南京市城市管理局. 南京市暴雨强度公式(修订)查算表[EB/OL]. [2014 - 03 - 12] http://cgj.nanjing.gov.cn/information/extrfile/1/20140312140428_4714.
- [17] 南京典型易涝区雨洪模拟及减涝措施研究[D]. 南京:河海大学,2017.
- [18] 江苏省水文水资源勘测局. 江苏省暴雨参数图集[DS]. 江苏省水利厅,2005.