

城市设计暴雨研究综述

梅超¹, 刘家宏^{1,2*}, 王浩^{1,2}, 向晨瑶¹, 周晋军¹

1. 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100044

* 联系人, E-mail: liujh@iwhr.com

2017-03-25 收稿, 2017-04-11 修回, 2017-04-11 接受, 2017-08-14 网络版发表

国家自然科学基金(51522907)、国家重点研发计划(2016YFC0401401)和流域水循环模拟与调控国家重点实验室团队重点课题(2017ZY02)资助

摘要 城市设计暴雨是推求城市排水工程设计洪水的基础, 对确定城市排水工程设计规模与投资具有重要影响, 关系到城市排水工程的安全性和经济性, 国内外对此开展了大量研究. 近年来, 我国城市内涝形势十分严峻, 未来一段时期内, 城市排水管网和地下综合管廊建设任务相当繁重, 这对包括城市设计暴雨在内的城市水文学理论与方法提出了新的更高要求. 本文系统地综述了城市设计暴雨相关理论, 包括城市设计暴雨选择方法、频率分析、强度公式和时空分解等方面, 主要梳理了相关方面的主流方法, 比较其优缺点; 总结了城市设计暴雨研究和应用存在的主要问题, 展望了未来一段时期的重点研究方向.

关键词 城市设计暴雨, 选择方法, 频率分析, 强度公式, 时空分解

城市设计暴雨是城市室外排水工程设计的重要依据, 关系到工程的安全性和经济性^[1]. 近年来, 我国城市内涝事件频发, 给经济社会发展和人民生命财产安全造成重大损失, 已引起了政府、学者和社会各界的广泛关注^[2]. 随着我国城市化进程的快速推进, 城市内涝问题受到高度重视, 我国提出海绵城市理念, 旨在通过“渗、滞、蓄、净、用、排”等六大措施, 系统治理, 综合施策, 实现城市“自然积存、自然渗透、自然净化”, 综合解决城市水问题^[3]. 对于现阶段我国城市内涝防治和海绵城市建设, 城市蓄水和排水工程设施的建设是重要方面, 而城市蓄排水工程的设计, 都需要通过城市设计暴雨推求设计洪水来确定适当的工程规模^[1], 因此, 城市设计暴雨研究是进行城市水问题治理的重要基础. 随着经济社会发展、降雨资料累积和计算理论与方法的进步, 我国城市设计暴雨研究取得多方面进展, 选择方法逐步从年多个样法向年最大值法转变^[4], 理论布线型从单

一的P-III型分布向多种分布线型并用发展^[5], 设计暴雨的时空分解也得到更大的关注^[6]. 2011年, 住建部发布新版《室外排水设计规范》^[7], 全面修编了我国606座城市的城市设计暴雨, 2014版又根据当前面临的市内涝等实际问题作了修正, 至此我国城市设计暴雨的计算和应用已形成了一整套相对完备的理论与方法^[8].

近几十年来, 我国城市建设环境发生了较大的变化, 加之气候变化和城市化对城市降雨特性产生了较大影响^[9], 城市设计暴雨研究取得了许多新进展^[10-12], 整体上城市设计暴雨理论和实践都发生了较大变化. 为此, 对城市设计暴雨理论与方法进行全面的梳理, 以更好地推进相关研究, 十分必要. 城市设计暴雨的计算一般包括暴雨资料统计调整和设计暴雨计算公式或关系确定两个方面, 近年来也有一些研究实现了由暴雨雨样直接拟合设计暴雨强度公式^[1,13], 但目前应用不多, 本文仍按照一般的城市设

引用格式: 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市设计暴雨研究综述. 科学通报, 2017, 62: 3873-3884

Mei C, Liu J H, Wang H, et al. Review on urban design rainstorm (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3873-3884, doi: 10.1360/N972016-01295

计暴雨制定步骤(如图1所示),从城市设计暴雨选择方法、频率分析、强度公式和时空分解4个方面对城市设计暴雨的相关研究进行综述.

1 城市设计暴雨选择方法

1.1 不同暴雨选择方法及其比较

暴雨资料选择是从现有大量雨量资料中合理地选择若干组雨样以组成样本,直接客观地反映城市排水设计中一定重现期范围内的暴雨规律,并为编制城市排水设计所用的暴雨强度公式提供具有代表性和可靠性的统计基础资料^[14].选择方法必须使所选样本具有一致性、代表性、可靠性和独立性,使选取的样本能代表总体的分布规律^[15].目前,城市暴雨资料选择方可以分为年最大值法及非年最大值法两类,各方法分类及其内涵见表1.

我国目前应用最多的城市设计暴雨选择方法为年最大值法和年多个样法,其中年最大值法主要被水利部门和气象部门采纳,年多个样法主要被市政排水部门所采纳,超定量法和年超大值法应用相对较少.20世纪60年代,发达国家由于雨量资料比较全

且室外排水设计标准较高,多采用年最大值法选择^[16],90年代后则改用年超大值法^[17];国内由于降雨记录资料缺乏,长期以来都是采用年多个样法选择,2006版以前的《室外排水设计规范》规定城市设计暴雨采用年多个样法进行选择,20世纪80年代以后,随着资料的积累和计算技术的提高,周文德等学者^[18]呼吁我国城市设计暴雨采用年最大值法选择;2006版《室外排水设计规范》规定,具有20年以上自记雨量记录的地区,应采用年最大值法推求排水系统设计暴雨强度公式^[19].

研究和实践表明,年最大值法具有原理简单、独立性好的优点,缺点是没有选择多雨年份中的较大降雨,对于暴雨较小年份选取的最大值则偏小,结果易导致小重现期内暴雨强度明显偏小^[20],也有学者针对此问题提出修正的年最大值法^[21];年多个样法从每年选取多个最大暴雨降雨历时,有效地弥补年最大值法的缺点,兼顾了多雨年份和少雨年份,也能在一定程度上弥补暴雨资料缺失的问题,特别是对于小重现期暴雨较多的年份,能比较真实地反映暴雨的统计规律,缺点是工作量较大^[4,22];年超大值法特点在于资料个数与年数无关,减少了统计中一些

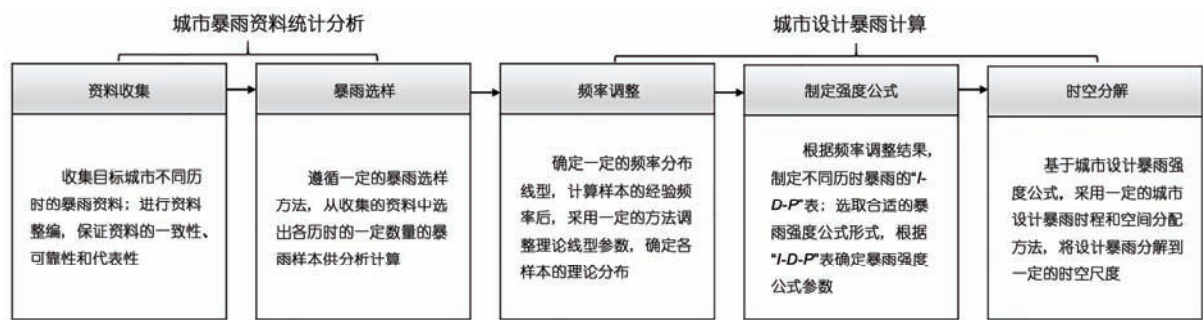


图1 城市设计暴雨推求过程

Figure 1 Calculation steps of urban design rainstorm

表1 城市设计暴雨选择方法

Table 1 Sampling methods for urban design rainstorm

类型	方法	方法内涵
年最大值法 ^[16]	年最大值法	从每年各历时雨量资料中选用一组最大雨量, <i>N</i> 年中选用 <i>N</i> 组,组成统计样本
	年多个样法 ^[4]	在 <i>N</i> 年资料系列中,每年各历时取6~8个最大值统一排序,然后取资料年限的3~4倍的最大雨样组成统计样本
非年最大值法	年超大值法 ^[17]	在 <i>N</i> 年资料系列中,大雨较多年份每年各历时选2~3个最大值雨样,大雨较少年份每年各历时选1个最大值雨样,然后各历时按大到小排列,各历时取前 <i>N</i> 个最大观测值组成统计样本
	超定量法 ^[12]	选取 <i>N</i> 年观测资料中某暴雨强度标准值以上的各历时所有降雨强度资料,资料序列前面最大的 <i>N</i> 个观测值组成统计样本

降雨量小的资料,资料易得,统计工作量小且费用较少,当城市自记录雨量资料健全时,其统计结果与年多个样法接近^[23]。

年最大值法和年多个样法在实际中的应用相对广泛,已有许多学者开展了二者的比较研究。Chow等人^[24]研究表明,当重现期小于5年时,年多个样法与年最大值法两者之间重现期的暴雨强度相对差值约为10%,但当重现期大于10年时,暴雨强度差异则不大;谢华等人^[25]研究指出,年最大值法选样适用于重现期较高的水利排涝,年多个样法能够反映一年多遇的情况,更适合小重现期的市政排水工程;黄国如等人^[26]研究表明,两种不同选样方法经频率分布适线拟合所得暴雨强度公式的重现期对应关系不仅随降雨历时的改变而改变,也与理论频率分布模型有关,其重现期对应关系随理论频率分布模型不同呈现较大的差异。城市设计暴雨主要用于城市室外排水工程设计洪水的计算,与水利工程的设计重现期通常大于20年不同,城市排水工程的设计重现期通常小于2年,因此采用年最大值法进行城市设计暴雨的计算,通常会出现较大的偏差,需要进行一定的修正。在我国室外排水设计推行年最大值选样法后,研究比较年多个样法和年最大值法选样结果的联系和差异,实践需求迫切且意义重大。

1.2 不同选样方法间关系与换算

不同的选样方法重现期和经验频率计算方法有一定的差别^[27]。设 N 年中取出样本个数为 n 的系列,则平均每个取样个数为 $k=n/N$ 。关于城市暴雨经验频率和重现期的计算,也存在一些争论^[28],但目前基本取得了统一,式(1)和(2)是比较公认的城市暴雨经验频率和重现期计算的通用公式。

$$P = \frac{m}{1+n} = \frac{m}{1+kN}, \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{P} = \frac{1+n}{m} = \frac{1+kN}{m}, \quad (2)$$

式中, $m=1, 2, \dots, n$,为样本各值从大到小的排列序号。 P 为暴雨经验频率, T 为暴雨重现期。当 $k=1$ 时,抽样方法为年最大值法;当 $k \neq 1$ 时,抽样方法为非年最大值法。

不同选样方法经验频率和重现期的内涵不同,年最大值法选样所得累积频率为年频率,重现期为年重现期,而非年最大值法所得累积频率为次频率,

重现期为次重现期。为便于比较和使用,两者选样方法的重现期须进行转换,周文德等人^[18]提出了二者的转换关系,按概率计算年最大值法选样与非年最大值法的概率关系为

$$P_M = 1 - e^{-P_E}, \quad (3)$$

P_M 为年最大值选样法所得的暴雨频率, P_E 为非年最大值选样法所得的暴雨频率。邓培德^[29]通过理论推导也得出了同样的关系式,并特别强调指出 P_M 和 P_E 不是函数关系,而是概率关系。概率关系只有在资料年份很长的情况下,特别是符合推理过程假设的条件下才可靠。根据重现期与频率的关系,经转换后两方法重现期的转换关系为

$$T_E = \frac{1}{\ln T_M - \ln(T_M - 1)}, \quad (4)$$

式中, T_M 为年最大值选样法所得的重现期, T_E 为非年最大值选样法所得的重现期。由式(4)可以得到年最大值法和非年最大值法所得重现期的对应关系,由此可以得到常用的两者间的重现期对比如表2所示,从该表中也可以看出,在设计重现期较小时,二者差异较大,随着设计重现期的增大,二者的差异在逐渐缩小,在设计重现期大于10年以后,二者基本相等。黄国如等人^[26]对年最大值法和年多个样法,分别采用多种分布线型进行频率分析,推导得到广州市设计暴雨,结果表明从两种选样方法的重现期对应关系来看,两种选样方法经频率分布适线后拟合所得暴雨强度公式并不服从式(4)所示的概率关系,而且暴雨强度公式的重现期对应关系与降雨历时和频率

表2 年最大值法和非年最大值法设计暴雨重现期对应表

Table 2 Comparison of design rainstorm recurrence by using annual maximum value method and non-annual maximum value method

年最大值法 T_M (年)	非年最大值法 T_E (年)
1.02	0.25
1.05	0.33
1.16	0.5
1.58	1
2.54	2
3.35	3
5.54	4
10.5	10
20.4	20
50.5	50
100.5	100

分布线型都有关系。

年最大值法和非年最大值法两种选样方法所得重现期之间的关系是由暴雨频率的概率关系推导得来的,仍是一种概率关系,而不是一一对应关系,当城市设计暴雨由年多个样法改用年最大值法选样后,仅用换算公式和对应表格去换算而得到设计结果的作法是不可取的,而应采用新的选样方法进行暴雨选样后重新推求暴雨公式。此外,国外对于设计暴雨重现期的选取有更加详细的规定,例如欧洲采用设计重现期和洪灾重现期两组重现期体系^[30],美国和澳大利亚则分别选取小暴雨排水系统重现期和大暴雨排水系统重现期^[31]。

2 城市设计暴雨频率分析

编制城市设计暴雨公式时,首先要制定“*I-D-P*”或“*I-D-T*”表,即“雨强-历时-频率”或“雨强-历时-重现期”表,该表是推求城市设计暴雨公式的基础。设计暴雨选样完成后,需对暴雨资料进行调整,即暴雨频率分析。

2.1 城市设计暴雨频率分布线型

从概率意义上看,暴雨是一种随机事件,而暴雨频率究竟符合何种分布线型,尚无统一认识^[32]。不同的国家和地区采用不同的分布线型,邓培德、周文德、刘光文、詹道江、夏宗尧等学者^[33]曾对城市设计暴雨频率分布线型的问题发表过不同意见,展开

学术争鸣与讨论,但究竟采用哪一种线型更好,没有最终结论,他们主张对理论频率分布线型不宜作统一的规定,并且指出分布线型应与暴雨选样方法和暴雨强度公式进行最佳配合。表3给出了常用的三大类分布线型及其相应的使用国家,我国长期以使用P-III型分布^[34]为主,近年来也有研究采用耿布尔(Gumbel)分布和指数分布等分布线型进行城市设计暴雨频率分析的相关研究,表4给出了这3种线型的主要特征。

任伯帜^[27]通过理论推导证明,Gumbel分布与指数分布在形式上具有一致性;而指数分布是P-III型分布在 $C_s=2$ 时的特例,因此,理论上P-III型分布包含指数分布;这表明,以上3种分布线型存在一定的内在联系。许多学者开展了多种分布线型的比较研究,黄津辉等人^[35]采用年最大值法和年多个样法分别选样,采用Gumbel分布、GEV分布、指数分布和P-III型分布4个方法分别进行理论频率分析,对天津市52年暴雨资料进行分析推求相应的设计暴雨,结果表明P-III型分布更为适用;金光焱^[36]根据城市设计暴雨历时短、设计标准不高和统计分布呈反S形的特点,提出了采用两端有限对数正态分布和广义指数分布进行计算的方法。

相关研究的结果迥异,至今没有一种分布线型被公认为最合适,无论采用哪一种分布线型进行城市设计暴雨频率分析,都必定存在误差^[37];在进行城市设计暴雨制定时,暴雨频率分析不是孤立的,而

表3 暴雨理论频率分布线型分类

Table 3 Classification of distribution types of the theoretical rainstorm frequency

类型	主要线型	采用国家
P-III型 ^[34]	P-III型分布、对数P-III型	中国、美国、加拿大、墨西哥
正态分布型 ^[21]	正态分布、对数正态分布、三参数正态分布	日本
极值分布型 ^[33]	Gumbel分布、GEV分布、指数分布	英国、法国

表4 我国常用的3种城市设计暴雨频率分布线型

Table 4 Three commonly used urban design rainstorm frequency distributions in China

分布线型	概率密度函数	频率调整计算式
P-III型分布 ^[21]	$f(\alpha, x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)}$	$x_p = (1 + \phi_p C_v) \cdot \bar{x}$
Gumbel分布 ^[35]	$f(x) = a e^{-(x/a + e^{-x/a})}$	$x_p = b - \frac{1}{a} \ln[-\ln(1-p)]$
指数分布 ^[36]	$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)}$	$x_p = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln p$

是与选样方法和强度公式紧密联系的,要提高城市设计暴雨的整体水平,应该将暴雨频率分布型与暴雨选样方法、暴雨样本实际分布规律及暴雨强度公式四者有机结合,综合分析.这说明,城市设计暴雨各步骤的联合研究十分必要.

2.2 城市设计暴雨频率分布参数估计方法

选定合适的频率曲线分布模型后,需要估计其相应的参数,参数确定的过程即暴雨频率分布模型建立过程,参数估计没有普适的方法^[35,38].设计暴雨与设计洪水频率分布参数估计本质上是同一类问题,郭生练等人^[39]综述了设计洪水频率分析参数估计的方法,其中所述用设计洪水频率分析参数估计的方法对于城市设计暴雨频率分析的研究同样适用.目前常用于城市设计暴雨频率分布曲线参数估计的方法有适线法^[40]、线性矩法^[41]、概率权重矩法^[42]和权函数法^[43]等,此处重点介绍前两者.

适线法是城市设计暴雨频率分布参数估计应用最普遍的方法.适线法由实测样本直接推求参数的估计值,基本原理是调整频率分布曲线的参数,使样本的经验分布与理论分布曲线拟合,常用的有目估适线法和优化适线法两种.目估适线法^[32]是先估计出一组参数作为初值,然后根据经验判断目估调整参数,选定一条与经验点据拟合较好的频率曲线,该方法在我国曾长期采用,优点是适线灵活、可照顾重要的点,缺点是适线成果因人而异、随机性较大、缺乏明确的理论意义和依据.优化适线法^[44]是通过建立一定的目标函数,并基于一定的准则调整分布曲线的参数,使得目标函数达到最优,来确定相应频率分布线型的参数的;已有许多优化方法被用于优化适线法的参数估计,如任伯帜^[45]将改进的遗传算法用于优化分布线型的相关参数;崔俊蕊等人^[46]基于OLS、ABS和WLS最小准则对样本序列进行频率分布线型的拟合;张婷^[47]提出了对拟合曲线进行分段设定优化目标的思路,结合邻域搜索的逼近策略和模拟退火算法实现了对P-III型参数寻优,结果表明该法在频率<10%的区域拟合效果较好.优化适线法是目前城市设计暴雨频率分析参数估计的重要方法,但同时需要注意的是,城市设计暴雨理论频率分析不是单纯的数学寻优问题,对其参数的求解要高度注意实际情况与参数的物理意义^[48].

线性矩法(L-moment/L-矩)是设计暴雨频率分布

参数估计的另一种重要方法.线性矩法在1990年由Hosking^[49]首先提出,目前在美国、英国等涉水工程设计中得到广泛应用,我国工程水文和城市设计暴雨计算中也有一些涉及,但相对较少.20世纪90年代开始,美国国家海洋大气管理总署(NOAA)下属的水文局(OHD)开展了分区线性矩法在防洪设计标准应用的研究^[50],2006年,其提出了一套应用线性矩法结合地区分析法进行暴雨频率分析的完整系统^[51],可以提供对于全国任何地理位置查询离散型的IDF/DDF(Intensity/Depth-Duration-Frequency)数据,包括历时从5 min到60 d,重现期2年到1000年的特征降雨值,这种方法省去了逐个城市制定设计暴雨公式的麻烦,相对高效,我国香港地区也有类似的研究成果^[52].线性矩在概率权重矩的基础上将排序系列的值进行一定的线性组合来计算矩,二者在数学上是等价的,但更容易解释,使用也更加方便,且它相比于常规矩法在参数估计方面要稳健得多,其估计值可以用来估算不同概率分布函数的参数,在城市设计暴雨的参数估计方面具有良好的前景.

3 城市设计暴雨公式推求

3.1 城市设计暴雨强度公式形式

城市设计暴雨强度公式是城市设计暴雨研究的核心成果.暴雨强度公式的编制就是在“*I-D-P*”表的基础上,采用合适的暴雨强度公式形式,并确定其参数的过程.不同的国家采用的城市设计暴雨强度公式有所不同,如表5所示.历史上我国曾采用过表5中俄罗斯和日本所采用的暴雨强度公式形式,夏宗尧^[53]通过理论分析证明这两种公式实际上是统一的.现今我国常用的城市设计暴雨强度公式有两种,分别是两参数公式和三参数公式,其中前者表征的是暴雨强度与降雨历时的关系,称为单一公式;后者表征了暴雨强度/降雨历时和设计重现期三者之间的关系,称为综合公式.单一公式经过进一步整编可以得到综合公式,我国《室外排水设计规范》中推荐直接使用综合公式,对于公式形式的选择,相关研究未见异议,普遍认可三参数的综合公式.

3.2 城市设计暴雨强度公式参数确定方法

选取合适的暴雨强度公式之后,确定暴雨强度公式的参数是十分重要的环节,参数的准确性直接

表 5 不同国家城市设计暴雨强度公式^[12,47]

Table 5 Urban design rainstorm intensity formulas from different countries^[12,47]

国家	暴雨强度公式	待求参数
美国/加拿大	$i = \frac{A}{(t+B)^c}$	A, B, C
俄罗斯	$i = \frac{A}{t^n}$	A, n
日本	$i = \frac{A}{t+b}$	A, b
中国	$i = \frac{A}{(t+b)^n}$ 或 $i = \frac{A_1(1+C \lg P)}{(t+b)^n}$	A, b 或 A_1, C, b

关系到暴雨强度公式的计算结果的精度. 城市设计暴雨强度公式是一个超定非线性模型, 其参数的求解实际上是一个无约束条件下非线性模型参数的优化问题. 我国过去曾长期使用图解法和最小二乘法进行城市设计暴雨公式的参数求解, 随着计算机和优化算法的发展, 许多优化方法被应用于该参数求解, 林齐等人^[54]采用15种优化算法进行参数求解, 结果表明麦夸尔特法效果最好; 王睿等人^[55]采用3种分布线型和6种优化算法推求了合肥市城市设计暴雨, 发现指数分布配合麦夸尔特法确定的公式精度最好.

各种参数求解方法的应用均有一定的优点与缺点, 表6对传统和优化两大类方法进行了比较. 现今条件下, 推荐采用一定的优化方法求解城市设计暴雨公式参数以提高精度, 但对方法的初值的选取以及与理论分布线型的配合等仍需进一步研究.

4 城市设计暴雨时空分解

城市设计暴雨主要用于推求城市设计洪水, 以确定城市排水工程的建设规模. 众多研究表明, 暴雨的时程分布对于城市流域产流和汇流都有重要影响, 张小娜等人^[56]通过实验得出, 同一降雨量、历时和下

垫面条件下, 三角形雨型比矩型雨型产流量多12.5%; 岑国平等^[57]通过对比不同雨型实验结果表明, 不均匀降雨下汇流形成的洪峰一般要大于均匀降雨所形成的洪峰, 而且雨峰位置对汇流也有影响, 雨峰偏后的降雨能形成更大的洪峰. 因此, 城市设计暴雨不仅要考虑雨强和历时, 还必须考虑其时程分解. 随着计算机技术和城市水文学理论的发展, 许多具有物理基础的半分布式甚至是分布式城市雨洪模型得以研发, 并应用到城市排水管网设计洪水的推求和优化设计中, 而使用降雨径流模拟的方法推求设计洪水, 首先必须解决城市设计暴雨的时间^[58]和空间^[59]分解问题.

4.1 城市设计暴雨时间分解

城市设计暴雨的时间分解, 即确定城市设计雨量随时间的变化过程, 该变化过程又称雨型^[54], 它反映了降雨发生、发展直至消亡的过程. 对于设计暴雨雨型目前还存在不同的认识, 芮孝芳等人^[1]通过比较分析提出, 能够确定工程规模达到设计标准的暴雨过程线即为设计暴雨雨型; 1998年, 岑国平等^[60]统计了我国75年的282场短历时暴雨雨型特征, 结果表明, 雨强大致均匀的降雨比例很小, 单峰雨型占多数, 单峰雨型中雨峰靠前的占多数. 流域设计暴雨和设计洪水推求中, 由于历时较长, 时程分解通常采用典型暴雨同频率缩放法, 在资料缺乏时则采用当地《水文手册》中按地区综合概化的典型雨型. 不同于流域设计暴雨, 城市设计暴雨历时很短, 时程分解更加复杂多变, 且对城市排水管网设计洪水的影响更大, 因此必须采用更加复杂可靠的方法进行时程分解, 并加强不同雨型对城市排水管网设计洪水推求结果影响规律的研究.

对于城市设计暴雨的时间分解, 表7给出了常用的城市设计暴雨雨型分解方法的分类及其主要内涵.

表 6 暴雨强度公式参数求解方法^[48,49]

Table 6 Parameter solving methods of rainstorm intensity formula^[48,49]

分类	方法	优点	缺点
传统方法	图解法和最小二乘法, 代表性方法有北京法, 北京简化法, 南京法等	原理简单明确, 便于操作应用	计算过程烦琐, 工作量大, 精度不高
	牛顿迭代法, 拟牛顿法, 高斯-牛顿迭代法, 优选回归分析法, 麦夸尔特法, 遗传算法, 粒子群算法	精度较高, 工作量小, 自动化寻优计算, 人为因素的影响较小	原理复杂, 难以理解和掌握; 程序可移植性差; 不易确定初始值; 有时陷入局部最优

我国《室外排水设计规范》推荐采用地区典型经验法或者芝加哥雨型法^[67]；国外有一些地区统计了短历时降雨时程分布表供选用，但这些方法都具有经验性较强或者不具普适性的缺点。近年来，也有学者采用更加复杂的级联过程法^[68]，样条法^[69]，混沌过程法^[70]，神经网络法^[71]和copula函数法^[58]等方法进行设计暴雨时程分解，这些研究丰富了设计暴雨时间分解方法，但总体上应用还不多，尚处在探索阶段。目前常用的城市设计暴雨时程分解方法可分为均匀法和非均匀法两类，其中非均匀法包括Hershfield法，Huff法，K.C法，P.C法和Y.C法等^[72]。

均匀法是最简单的雨型分解方法，应用也最为广泛，但其设计洪水计算结果通常偏小，且其本质上是不符合实际降雨特点的；Y.C法是最简单的一种非均匀雨型分解方法。均匀法和Y.C法最大的缺陷在于二者只考虑了历时为 T 的降雨核心部分，而未考虑雨头和雨尾部分，对此也有一些进一步的研究^[73]。

岑国平等^[60]研究表明，Huff法和Y.C法推求的设计洪水洪峰受历时影响非常显著，历时选取不当会造成较大误差；而P.C法和K.C法受降雨历时影响较小，其中K.C法雨峰部分与历时无关，采用K.C法确定降雨过程后在各管道计算时均适用，较为简便；P.C法所得的雨型更加接近实际降雨过程，该方法的缺点在于对当地降雨过程资料的依赖性过强，资料要求多，使用较为麻烦；综合比较后推荐K.C法作为城市设计暴雨雨型分解方法。

芮孝芳等人^[1]分析认为，表7的非均匀类方法中，K.C法本质上是同频率法，而其他方法本质上只是提

出了确定典型雨型的方法，既可以是同频率法也可以是同倍比法；由于同倍比法受典型雨型影响较大，而同频率法则较少，因此如果采用同倍比法，结果就会出现差异，如果采用同频率法，这些方法的结果则基本一致；也就是说，表7中的非均匀方法，本质上仍属于传统同频率法或同倍比法中的一种。

4.2 城市设计暴雨空间分解

通常认为，城市集水区面积较小，降雨的空间分布比较均匀，且汇流时间很短，点雨量即可代替面雨量，可不考虑城市设计暴雨的空间变异性，如美国丹佛市排水手册规定，对于集水区面积小于 25.9 km^2 和暴雨历时小于 2 h 不进行空间修正，我国香港地区规定集水区面积小于 25 km^2 时不进行空间修正，直接用点雨量代替面雨量^[58]。但在变化环境下，由于城市小气候影响及城市高层建筑物的物理阻挡作用，加之气候变化对城市地区降雨的叠加影响，城市降雨的空间变异性有时表现得非常明显，如李明财等人^[74]研究发现天津市滨海新区3个区域各历时不同重现期下的暴雨强度均高于中心城区。为了更加合理地考虑城市设计暴雨的空间分异，城市设计暴雨的空间分解研究就显得十分必要。我国2014版的《室外排水设计规范》规定，当汇水面积超过 2 km^2 时，就应考虑降雨时空分布的不均匀性。考虑城市设计暴雨的空间差异性对城市设计暴雨的空间分解一般有两种方法：点面折减系数法和分区设计暴雨法。

点面折减系数法^[75]通过一定系数将点设计暴雨修正得到空间面上的设计暴雨。该方法关键之一是

表7 常用城市设计暴雨雨型分解方法

Table 7 Common disaggregation methods of urban design storm pattern

方法		提出者	内涵	年份
均匀	均匀法	—	假设降雨过程均匀，降雨强度不随时空变化	—
非均匀	K.C法 ^[61] (CHM)	Keifer和Chu	引入雨峰系数 r 描述暴雨峰值时刻，将降雨历时分为峰前和峰后两部分，分别采用不同公式计算暴雨强度	1957
	Hershfield法 ^[62]	Hershfield	经统计分析制定不同历时平均降雨降度的时程分解表，供当地选用	1961
	Huff法 ^[63]	Huff	根据最大雨强发生位置把暴雨分为4类，每类统计出平均的无因次累计曲线	1967
	P.C法 ^[64]	Pilgrim和Cordery	把雨峰时段放在出现可能性最大的位置上，而雨峰时段在总雨量中的比例取各场降雨雨峰所占比例的平均值，其他各时段的位置和比例用同样方法确定	1975
	Y.C法 ^[65]	Yen和Chow	雨型为三角形，雨峰位置根据“三角形无因次一阶矩与暴雨过程的平均无因次一阶矩相等”规则来确定	1980
	SCS法 ^[66]	美国农业部	利用6 h和24 h暴雨资料建立了综合雨型曲线，纵坐标为雨量的百分率，横坐标为时间	1986

计算面雨量,传统计算面雨量的方法包括算术平均法、泰森多边形法和等雨量线图法等,新型面雨量计算方法包括基于GIS网格的插值方法(距离平方倒数法、克里金插值法和趋势面法等)、遥感方法和雷达测雨法等.划定暴雨特性较为一致的分区,然后计算不同分区不同历时不同频率的暴雨点面关系,最后进行地区综合得到最终的点面折减系数成果,这种方法的局限性在于分区受人为主因素影响较大.

分区设计暴雨法^[76]是在进行城市设计暴雨的推求之前,先对城市降雨进行分区,然后对不同分区分别推求城市设计暴雨的强度公式,这样就只需要对各分区的城市设计暴雨进行时程分解即可.如北京市将北京划分为山后背风区、山前区南部、山前区北部和南部平原区四个暴雨分区,张晓婧^[76]根据该分区分别选取了四个代表站推求了其城市设计暴雨的强度公式.分区设计暴雨法能够较好地考虑城市降雨的空间分布,但是同时成倍地增加了计算工作量,对数据特别是设站密度的要求也更高,因此更加适合在资料较为完整的地区使用.

5 总结与展望

本文系统地综述了城市设计暴雨在选样方法、频率分析、强度公式推求和时空分解等方面的研究,对各部分的主要方法和主要问题进行了梳理和总结.通过深入地分析和归纳,认为我国城市设计暴雨的研究需着重推进以下几方面的工作.

(1) 进行城市设计暴雨各环节误差产生规律与

控制方法研究.研究暴雨选样/频率分析和公式拟合等各个环节的误差产生规律,加强对各个环节之间联系的研究,厘清选样方法、分布线型、公式形式和雨型分解方法等对结果精度的联合影响,从整体误差控制的角度出发,提出城市设计暴雨误差控制理论与方法.

(2) 开展“暴雨选样-频率分析-强度公式-时空分解”全过程城市设计暴雨研究.城市设计暴雨的精度,取决于全过程各个环节的精度,但各个环节并不完全独立,暴雨选样方法对频率分析和雨型分解结果,频率分布线型与选样方法的匹配对暴雨公式拟合精度等都有一定的影响,应开展全过程城市设计暴雨研究,寻找各环节最优搭配方法及其应用规律;此外,要深入研究如何逐步减少城市设计暴雨的实现步骤,探索采用实测雨强样本直接拟合暴雨强度总公式的方法推求城市设计暴雨;研究推广使用全国性的IDF曲线.这一方面已有很好的研究成果,但仍需开展深入的理论研究和应用比较.

(3) 加强对变化环境下城市地区短历时暴雨特性的研究.城市设计暴雨是对城市暴雨规律认识的集中反映,要使得城市设计暴雨的研究和制定水平进一步提高,就必需对城市短历时暴雨的特性有更深刻的认识.在气候变化和城市化的双重影响下,城市暴雨发生机制和主要特性已经发生了显著的变化,迫切需要对城市短历时暴雨的发生与演化机理、时空结构与变化特征、气候变化和城市化对城市短历时暴雨的影响机制等进行深入研究.

致谢 中国水利水电科学研究院杨志勇教授为论文的完善提出了宝贵的建议,特此致谢!

参考文献

- 1 Rui X F, Jiang C Y, Chen J Q. Hydrological problems for engineering of drainage and water log prevention in urban areas (in Chinese). *Adv Sci Tech Water Rerc*, 2015, 35: 42–48 [芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦. 论城市排水防涝工程水文问题. *水利水电科技进展*, 2015, 35: 42–48]
- 2 Zhang J Y, Wang Y T, He R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2016, 27: 485–491 [张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析. *水科学进展*, 2016, 27: 485–491]
- 3 Qiu B X. Connotation, path and expectation of eco-sponge city (LID) (in Chinese). *Urb Rur Dev*, 2015, (2): 8–15, 4 [仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望. *城乡建设*, 2015, (2): 8–15, 4]
- 4 Wang K, Wang C, Wang J, et al. Research on sampling methods for urban storm intensity formula (in Chinese). *Yangtze Riv*, 2014, 45: 6–8 [王昆, 王超, 王洁, 等. 城市暴雨强度公式选样方法研究. *人民长江*, 2014, 45: 6–8]
- 5 Ren H Q, Wu L Q, Li X H, et al. Fitting research of urban rainstorm intensity formula of Kunming (in Chinese). *Yangtze Riv*, 2009, 40: 21–23, 76 [任恒钦, 伍立群, 李学辉, 等. 昆明市城市暴雨强度公式拟合研究. *人民长江*, 2009, 40: 21–23, 76]

- 6 Wang N. Research on rainstorm distribution rule and design rainstorm in Tianjin urban district (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Tianjin: Tianjin University, 2007 [王宁. 天津市降雨趋势分析及设计暴雨研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2007]
- 7 Shao D N, Shao Y M. Introduction to new urban storm intensity formula in China (in Chinese). Chin Water Wastewater, 2013, 29: 37–39, 43 [邵丹娜, 邵尧明. 《中国城市新一代暴雨强度公式》成果介绍. 中国给水排水, 2013, 29: 37–39, 43]
- 8 Work Group of The New Version. An interpretation of the revision of Code for design of outdoor wastewater engineering, 2014 version (in Chinese). Water Wastewater Eng, 2014, 40: 7–11 [新版规范局部修订编制组. 2014 版《室外排水设计规范》局部修订解读. 给水排水, 2014, 40: 7–11]
- 9 Alam M S, Elshorbagy A. Quantification of the climate change-induced variations in intensity-duration-frequency curves in the Canadian Prairies. J Hydrol, 2015, 527: 990–1005
- 10 Marra F, Morin E. Use of radar QPE for the derivation of intensity-duration-frequency curves in a range of climatic regimes. J Hydrol, 2015, 531: 427–440
- 11 Lima C H R, Kwon H H, Kim J Y. A Bayesian beta distribution model for estimating rainfall Idf curves in a changing climate. J Hydrol, 2016, 540: 744–756
- 12 Ghanmi H, Bargaoui Z, Mallet C. Estimation of intensity-duration-frequency relationships according to the property of scale invariance and regionalization analysis in a Mediterranean coastal area. J Hydrol, 2016, 541: 38–49
- 13 Zhang Z X, Sun G D, Sun J Y, et al. Study on fitting methods for urban storm intensity formula (in Chinese). J Hydrual Eng, 2015, 44: 1263–1271 [张子贤, 孙光东, 孙建印, 等. 采用不同路径推求城市暴雨强度总公式的拟合误差分析. 水利学报, 2015, 44: 1263–1271]
- 14 Deng P D. Establishment and application of mathematical model for storm sampling and frequency distribution (in Chinese). Water Wastewater Eng, 1996, (2): 5–9, 2 [邓培德. 暴雨选样与频率分布模型及其应用. 给水排水, 1996, (2): 5–9, 2]
- 15 Maidment D R, Zhang J Y, Li J S. Handbook of Hydrology (in Chinese). Beijing: Science Press, 2008. 735–781 [Maidment D R, 张建云, 李纪生. 水文学手册. 北京: 科学出版社, 2008. 735–781]
- 16 Ren Y, Li M C, Guo J, et al. The estimation and application of design rainstorm intensity in Tianjin area (in Chinese). J Appl Met Sci, 2012, 23: 364–368 [任雨, 李明财, 郭军, 等. 天津地区设计暴雨强度的推算与适用. 应用气象学报, 2012, 23: 364–368]
- 17 Falkovich A, Lord S, Treadon R. A new methodology of rainfall retrievals from indirect measurements. Meteorol Atmos Phys, 2000, 75: 217–232
- 18 Chow V T, Zhang Y P. Prediction of problems in urban storm drainage design: Probability consideration (in Chinese). J Chin Hydrol, 1983, 1: 38–41 [周文德, 张永平. 城市暴雨排水设计问题的预测——概率的考虑. 水文, 1983, 1: 38–41]
- 19 Shanghai Municipal Engineering Design Institutur (Group) CO.LID. GB50014—2006 Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2006 [上海市市政工程设计研究总院. GB50014—2006 室外排水设计规范. 北京: 中国计划出版社, 2006]
- 20 Zhou Y W, Weng Y Y, Zhang X X, et al. Feasibility study on deriving the urban storm intensity formula through annual maximum value method (in Chinese). Water Wastewater Eng, 2011, 37: 40–44 [周玉文, 翁窈瑶, 张晓昕, 等. 应用年最大值法推求城市暴雨强度公式的研究. 给水排水, 2011, 37: 40–44]
- 21 Cen G P. Sampling and statistical methods of rainstorm data (in Chinese). Water Wastewater Eng, 1999, 25: 4–7 [岑国平. 暴雨资料的选择与统计方法. 给水排水, 1999, 25: 4–7]
- 22 Onof C, Townend J. Comparison of two hourly to 5-min rainfall disaggregators. Atmos Res, 2005, 77: 176–187
- 23 Ren B Z, Long T R, Wang L. Using the annual super large value method for rainstorm data sampling (in Chinese). Chin Water Wastewater, 2003, 19: 79–81 [任伯帜, 龙腾锐, 王利. 采用年超大值法进行暴雨资料选样. 中国给水排水, 2003, 19: 79–81]
- 24 Chow V T. Statistical and probability analysis of hydrologic data. In: Handbook of Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill Education, 1964
- 25 Xie H, Huang J S. Study on the relationship of municipal drainage and hydrological for urban area (in Chinese). J Irrig Drain, 2007, 26: 10–13, 26 [谢华, 黄介生. 城市化地区市政排水与区域排涝关系研究. 灌溉排水学报, 2007, 26: 10–13, 26]
- 26 Huang G R, Zeng J J, Zhang M Z, et al. Study on convergence of rainstorm return periods and different sampling methods (in Chinese). J Water Resour Archit Eng, 2015, 13: 30–35, 41 [黄国如, 曾娇娇, 张明珠, 等. 不同选样方法设计暴雨重现期衔接关系探讨. 水利与建筑工程学报, 2015, 13: 30–35, 41]
- 27 Ren B Z. Study on the urban design rainstorm and rainfall runoff calculation model (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Chongqing: Chongqing University, 2004 [任伯帜. 城市设计暴雨及雨水径流计算模型研究. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2004]
- 28 Deng P D. Some problems in the statistics of urban rainstorm (in Chinese). Chin Water Wastewater, 1992, 8: 45–48 [邓培德. 城市暴雨公式统计中若干问题. 中国给水排水, 1992, 8: 45–48]
- 29 Deng P D. Review on probability and application of two sampling methods for urban storm (in Chinese). Water Wastewater Eng,

- 2006, 32: 39–42 [邓培德. 城市暴雨两种选择方法的概率关系与应用评述. 给水排水, 2006, 32: 39–42]
- 30 Safari M J S, Aksoy H, Unal N E, et al. Non-deposition self-cleansing design criteria for drainage systems. *J Hydro-Environ Res*, 2017, 14: 76–84
- 31 Marrone J F, Robinson D R, Jones B N. Experience with implementation of the American society of civil engineers underwater investigations standard practice manual. In: *Proceedings of International Conference on Civil Engineering in the Oceans*. New York: American Society of Civil Engineers, 2005. 513–525
- 32 Zhang Z X, Sun G D, Sun J Y, et al. Fitting error analysis for determining urban storm intensity multi-period formula by different paths (in Chinese). *J Hydrual Eng*, 2015, 46: 97–101 [张子贤, 孙光东, 孙建印, 等. 采用不同路径推求城市暴雨强度总公式的拟合误差分析. 水利学报, 2015, 46: 97–101]
- 33 Deng P D. One's again on problems in urban storm statistics (in Chinese). *Water Wastewater Eng*, 1998, 24: 15–19 [邓培德. 再论城市暴雨公式统计中的若干问题. 给水排水, 1998, 24: 15–19]
- 34 Griffis V W. Log-Pearson type 3 distribution and its application in flood frequency analysis (II): Parameter estimation methods. *J Hydrol Eng*, 2007, 12: 492–500
- 35 Huang J H, Xiang W Y, Hu C, et al. Comparison of design storm method and formula revision for Tianjin city (in Chinese). *J Tianjin Univ*, 2013, 46: 354–360 [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. 天津大学学报, 2013, 46: 354–360]
- 36 Jin G Y. Study on frequency curve type of urban design storm (in Chinese). *J Chin Hydrol*, 2002, 22: 20–22, 26 [金光炎. 城市设计暴雨频率曲线线型的研究. 水文, 2002, 22: 20–22, 26]
- 37 Aart O. Rainfall depth-duration-frequency curves and their uncertainties. *J Hydrol*, 2008, 348: 124–134
- 38 Jin G Y. A review of hydrologic frequency analysis (in Chinese). *Adv Water Sci*, 1999, 10: 319–327 [金光炎. 水文频率分析述评. 水科学进展, 1999, 10: 319–327]
- 39 Guo S L, Liu Z J, Xiong L H. Advances and assessment on design flood estimation methods (in Chinese). *J Hydrual Eng*, 2016, 47: 302–314 [郭生练, 刘章君, 熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价. 水利学报, 2016, 47: 302–314]
- 40 Bao Z X. Parameter estimation on curve-fitting methodology in hydrologic frequency analysis (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Nanjing: Graduate School of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010 [鲍振鑫. 水文频率分析适线法参数估计研究. 硕士学位论文. 南京: 南京水利科学研究院, 2010]
- 41 Chen Y F, Li X K, Chen M, et al. Study on parameter estimation by using l-moment method for gumbel distribution in consideration of historical flood information (in Chinese). *Water Resour Power*, 2008, 26: 1–4 [陈元芳, 李兴凯, 陈民, 等. 考虑历史洪水时 Gumbel 分布线性矩法的研究. 水电能源科学, 2008, 26: 1–4]
- 42 Zhang M, Bo S G. Application of probability-weighted mixed moment method to parameters estimation for three-parameter probability distribution (in Chinese). *Water Resour Power*, 2008, 2013, 31: 16–18 [张明, 柏绍光. 概率权重混合矩法在几种三参数概率分布参数估计中的应用. 水电能源科学, 2013, 31: 16–18]
- 43 Liu G W. Pearson III type distribution parameter estimation (in Chinese). *J Chin Hydrol*, 1990, 4: 1–15 [刘光文. 皮尔逊III型分布参数估计. 水文, 1990, 4: 1–15]
- 44 Song S B, Kang Y. Design flood frequency curve optimization fitting method based on 3 intelligent optimization algorithms (in Chinese). *J Northwest A F Univ*, 2008, 36: 205–209 [宋松柏, 康艳. 3 种智能优化算法在设计洪水频率曲线适线法中的应用. 西北农林科技大学学报, 2008, 36: 205–209]
- 45 Ren B Z, Long T R. Hybrid genetic algorithm optimum curve-fitting method for estimating the parameters of pearson type-III distribution (in Chinese). *J Chongqing Univ*, 2005, 28: 82–85, 94 [任伯帜, 龙腾锐. P-III型分布参数估计的改进混合遗传优化适线法. 重庆大学学报, 2005, 28: 82–85, 94]
- 46 Cui J R, Wang Z R, Liang S. Frequency curve fitting and parameter optimization for urban design rainstorm (in Chinese). *Water Resour Power*, 2014, 32: 48–51, 128 [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. 水电能源科学, 2014, 32: 48–51, 128]
- 47 Zhang T. Study on curve fitting methodology of frequency analysis of rainstorms (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Hefei: Hefei University of Technology, 2015 [张婷. 暴雨频率分析的适线方法研究. 硕士毕业论文. 合肥: 合肥工业大学, 2015]
- 48 Gao L, Zhou Y W, Tang Z, et al. Research on the fitting of pearson type III in urban storm water intensity equation (in Chinese). *Water Wastewater Eng*, 2016, 42: 47–51 [高琳, 周玉文, 唐颖, 等. 城市暴雨强度公式皮尔逊III型适线问题研究. 给水排水, 2016, 42: 47–51]
- 49 Hosking J R M. L-moments analysis and estimation of distributions using linear combination of order statistics. *J Roy Stat Soc*, 1990, 52: 105–124
- 50 Lin B Z, Vogel J L. A comparison of L-moments with method of moments. In: *Proceedings of the Symposium*, San Francisco ASCE. New York: American Society of Civil Engineers, 1993. 443–448

- 51 Lin B, Bonnin G M, Martin D L, et al. Regional frequency studies of annual extreme precipitation in the United States based on regional L-moments analysis. In: Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress. New York: American Society of Civil Engineers, 2006. 1: 16
- 52 Jiang P, Tung Y K. Establishing rainfall depth-duration-frequency relationships at daily raingauge stations in Hong Kong. *J Hydrol*, 2013, 504: 80–93
- 53 Xia Z Y. Opinions on some problems in compiling rainstorm intensity formula (in Chinese). *Water Wastewater Eng*, 1982, 5: 15–24 [夏宗尧. 对编制暴雨强度公式中一些问题的看法. *给水排水*, 1982, 5: 15–24]
- 54 Lin Q, Fu J X. The calculation and optimization of rainstorm intensity formula for the city of Tieling (in Chinese). *J Shenyang Jianzhu Univ*, 2006, 22: 613–616 [林齐, 傅金祥. 铁岭市暴雨强度公式的推求与优化. *沈阳建筑大学学报*, 2006, 22: 613–616]
- 55 Wang R, Xu D Q. Derivation of rainstorm intensity formula for Hefei City (in Chinese). *J Chin Hydrol*, 2016, 36: 71–74 [王睿, 徐得潜. 合肥市暴雨强度公式的推求研究. *水文*, 2016, 36: 71–74]
- 56 Zhang X N, Feng J, Liu F G. Development and application of storm flood computation model for urban rain pipe network (in Chinese). *Water Resour Power*, 2008, 26: 40–42 [张小娜, 冯杰, 刘方贵. 城市雨水管网暴雨洪水计算模型研制及应用. *水电能源科学*, 2008, 26: 40–42]
- 57 Cen G P. Study on calculation method of urban rainwater runoff (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Nanjing: Hohai University, 1989 [岑国平. 城市雨水径流计算方法的研究. 博士学位论文. 南京: 河海大学, 1989]
- 58 Liu C L. Research methodology of temporal and special characteristic of design storm of urban drainage and flooding prevention system (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Beijing University of Technology, 2015 [刘成林. 城市排水防涝系统设计降雨时空分布特性研究. 博士学位论文. 北京: 北京工业大学, 2015]
- 59 Gyasi-Agyei Y. Use of observed scaled daily storm profiles in a copula based rainfall disaggregation model. *Adv Water Resour*, 2012, 45: 26–36
- 60 Cen G P, Shen J. Research on rainfall pattern of urban design storm (in Chinese). *Adv Water Sci*, 1998, 9: 41–46 [岑国平, 沈晋. 城市设计暴雨雨型研究. *水科学进展*, 1998, 9: 41–46]
- 61 Keifer C J, Chu H H, Keifer C J, et al. Synthetic storm pattern for drainage design. *J Hydraul Div*, 1957, 83: 1–25
- 62 Hershfield D M. Estimating the probable maximum precipitation. *J Hydraul Div*, 1961, 87: 99–106
- 63 Huff F A. Time distribution of heavy rain storms in illinois. *Water Resour Res*, 1967, 3: 1007–1019
- 64 Pilgrim D H, Cordery I. Rainfall temporal patterns for design floods. *J Hydraul Div*, 1975, 101: 81–95
- 65 Yen B C, Chow V T. Design hyetographs for small drainage structures. *J Hydraul Div*, 1980, 106: 1055–1076
- 66 Cronshey R. Urban Hydrology for Small Watersheds: TR-55. New York: American Society of Civil Engineers, 1986. 55: 1268–1273
- 67 Zhang C, Zhi X H, Zhu G H, et al. Interpretation for the partial modification in the new edition of “Code for design of outdoor wastewater engineering” (in Chinese). *Water Wastewater Eng*, 2012, 38: 34–38 [张辰, 支霞辉, 朱广汉, 等. 新版《室外排水设计规范》局部修订解读. *给水排水*, 2012, 38: 34–38]
- 68 Müller H, Haberlandt U. Temporal rainfall disaggregation using a multiplicative cascade model for spatial application in urban hydrology. *J Hydrol*, 2016, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.0
- 69 Rodrigueziturbe I, Cox D R, Isham V. Some models for rainfall based on stochastic point processes. In: Proceedings of the Royal Society A. New York: Oxford University Press, 1987. 410: 269–288
- 70 Kavvas M L, Delleur J W. A stochastic cluster model of daily rainfall sequences. *Water Resour Res*, 1981, 17: 1151–1160
- 71 Onof C, Chandler R E, Kakou A, et al. Rainfall modelling using Poisson-cluster processes: A review of developments. *Stoch Environ Res Risk A*, 2000, 14: 384–411
- 72 Fan Z H. Research on precipitation trend analysis and design storm of Tianjin city (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Tianjin: Tianjin University, 2011 [范泽华. 天津市降雨趋势分析及设计暴雨研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2011]
- 73 Arnell V, Harremoës P, Jensen M, et al. Review of rainfall data application for design and analysis. *Waterence Tech*, 1984, 16: 1–45
- 74 Li M C, Ren Y, Xiong M M. Spatial distribution characteristics of design rainstorm in Tianjin (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2012, 32: 1538–1544 [李明财, 任雨, 熊明明, 等. 天津市设计暴雨的空间分布特征. *地理科学*, 2012, 32: 1538–1544]
- 75 Liu C L, Zhou Y W, Sui J. Study on spatial distribution characteristics of rainfall in urban drainage and waterlogging system (in Chinese). *Water Wastewater Eng*, 2016, 42: 46–49 [刘成林, 周玉文, 隋军, 等. 城市排水防涝系统降雨空间分布特性研究. *给水排水*, 2016, 42: 46–49]
- 76 Zhang X J. The features of summer precipitation and the influence of design storm in Beijing area (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015 [张晓婧. 北京市暴雨特性及对设计暴雨时程的影响分析. 硕士学位论文. 南京: 南京信息工程大学, 2015]

Summary for “城市设计暴雨研究综述”

Review on urban design rainstorm

MEI Chao¹, LIU JiaHong^{1,2*}, WANG Hao^{1,2}, XIANG ChenYao¹ & ZHOU JinJun¹¹ State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;² Engineering and Technology Research Center for Water Resources and Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100044, China

* Corresponding author, E-mail: liujh@iwhr.com

Design rainstorm is the basis of calculating design floods for the design of urban hydraulic infrastructures and many other fundamental facilities. It has significant influence on the planning scale and investment of urban drainage engineering. Without a wise selection of the design rainstorm pattern, it is impossible to guarantee the safety and economic effectiveness of designed urban drainage infrastructures regardless of simulation accuracy or any remarkable techniques. In recent years, cities in China have suffered from severe urban floods, so urban drainage system construction and comprehensive underground corridor building are two enormous and vital task in the near future. In addition, urban construction in China (especially water-related projects aiming at urban areas, such as sponge city project that China is currently implementing nationwide, drainage pipe systems construction and underground reservoir installation) has put forward new challenges to and raised higher requirements for urban hydrological theory and mechanism research, including urban design rainstorm research. In this context, it is highly necessary to systematically summarize the theory and research methods of domestic and foreign urban design rainstorms, to summarize the existing key problems, to clarify the main aspects of the nodus, to discuss and propose the development direction of urban design rainstorm researches. Researches on urban design rainstorms have been conducted both in China and abroad. In the past 30 years, urban design rainstorm research in China has made great progress and important changes, and the theory and research methods of urban design rainstorms in the world become more consummate. Through methods of literature research and analysis, researches all around the world on urban design rainstorm have been sorted and classified, and the theories of urban design rainstorm are systematically reviewed after screening and comparison. The main content of this paper contains summary on sampling methods, frequency analysis, storm formulas and spatio-temporal disaggregation methods of urban design rainstorm. The mainstream methods are summarized and compared; their advantages and disadvantages are analyzed, and the main problems existing are discussed. Finally, combined with the results of literature review, the future research direction of urban design rainstorm researches is proposed. The study of urban design rainstorm in the future may pay more attention to the following aspects: (1) illustrating principles and control methods of error generation in each step of forming an urban design rainstorm, and searching for the link between various aspects during urban design rainstorm forming, to find the optimal matching method between those aspects; (2) conducting urban design rainstorm studies that cover the whole “rainstorm sampling-frequency analysis-intensity formula-spatio/temporal disaggregation” process, searching for regional analysis methods based on linear moment (L-moment), and developing tentative national IDF curves as well as popularizing their usage; (3) enhancing the study on evolution laws and characteristics of short-duration urban storms under changing environments, evaluating the impacts of urbanization and climate change on urban rainfall characteristics, and analyzing how urban design rainstorms should reform in response. This paper provides a wide range of perspectives on the study of rainstorms in China and even in the world, and provides important guidance for future research on urban design rainstorm.

urban design rainstorm, sampling method, frequency analysis, rainstorm intensity formula, spatio/temporal disaggregation

doi: 10.1360/N972016-01295