

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.018

降雨事件间隔时间对海绵城市规划设计的影响

曾向红^{1,2}, 蒋元华^{1,2}, 杨清清³, 余年³, 吴浩^{1,2}, 廖玉芳^{1,4},
段丽洁^{1,2}, 杜东升^{1,4}

(1. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410118; 2. 湖南省气候中心, 湖南 长沙 410118; 3. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410007; 4. 湖南省气象科学研究所, 湖南 长沙 410118)

摘要: 目前海绵城市规划和设计采用的降雨事件间隔时间(IETD)是根据城市排水管渠设计的5~120 min降雨历时中的上限值,没有考虑到海绵城市的渗滞蓄功能,对海绵城市的规划、设计和工程应用具有一定的局限性。为此,从城市流域角度出发,采用耦合气象特征和流域水文特征的分析方法,将IETD定义为降雨结束到流域径流结束的时间,此定义不仅考虑了城市流域的自然特征,也考虑了海绵城市的功能,因此适用于大多数城市。以长沙市为例,通过1990年—2017年逐分钟降雨资料分析及两个具有代表性的行政区水文模拟,得出以下结果:IETD与汇水区面积显著相关,同时也受下垫面不透水率、坡度等其他因素影响,汇水区的IETD中值为4 h。考虑到海绵城市规划设计大多数以汇水分区为单元,因此,长沙市的IETD取4 h较为合理。最后采用4 h的IETD对暴雨雨型进行设计,其结果与目前使用2 h的IETD暴雨雨型相比,雨峰位置明显提前。

关键词: 降雨事件间隔时间; 气象特征; 流域水文特征; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0102-08

Effect of Rainfall Inter-event Time Definition on Sponge City Planning and Design

ZENG Xiang-hong^{1,2}, JIANG Yuan-hua^{1,2}, YANG Qing-qing³, SHE Nian³, WU Hao^{1,2},
LIAO Yu-fang^{1,4}, DUAN Li-jie^{1,2}, DU Dong-sheng^{1,4}

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation in Hunan Province, Changsha 410118, China; 2. Hunan Climate Center, Changsha 410118, China; 3. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Changsha 410007, China; 4. Hunan Institute of Meteorological Sciences, Changsha 410118, China)

Abstract: At present, rainfall inter-event time definition (IETD) adopted in sponge city planning and design is the upper limit of the rainfall duration (5-120 min) according to the design of urban drainage pipes and canals, which does not take into account the infiltration, retention and storage function of sponge city, and has certain limitation on planning, design and engineering application of

基金项目: 海绵城市建设集成技术研究及工程应用示范项目(GCCT-KJYF-01); 长沙市雨花区重大科技专项(YHKJ-2018-ZDG-02)

通信作者: 余年 E-mail: nian.she@qq.com

sponge city. Therefore, an analysis method of coupling meteorological features and watershed hydrological characteristics from the perspective of urban basin was proposed, and IETD was defined as the time from the end of rainfall to the end of the runoff of the basin. This definition not only took into account the natural characteristics of urban watersheds, but also the functions of sponge city, which was thus applicable to most cities. The rainfall data of Changsha from 1990 to 2017 was analyzed and hydrologic simulation of two representative districts were carried out. IETD was significantly related to the catchment area, and was also affected by other factors such as impervious ratio and slope of the underlying surface. The median IETD of the catchment area was 4 h. Since most sponge cities planning and design were focused on catchment unit scale, therefore, it was reasonable to determine IETD of 4 hours in Changsha. Finally, the 4-hour IETD was applied to design a storm event. The results showed that the peak of the IETD rainstorm appeared significantly earlier than that of 2-hour IETD rainstorm.

Key words: rainfall inter-event time definition; meteorological characteristics; watershed hydrological characteristics; sponge city

海绵城市建设对城市排水提出了新的要求,由原来的快排直排模式改变为“渗、滞、蓄、净、用”模式,改变了城市水文特征。但是目前全国海绵城市规划设计仍然沿用管渠排水设计的2 h降雨事件间隔时间(IETD)来划分降雨场次、推导暴雨强度公式和设计雨型,没有考虑海绵城市年径流控制率和非点源污染物削减所对应的降雨特征,因此与实际情况明显不符,对海绵城市的规划、设计和工程应用具有一定的局限性。

降雨量、降雨强度、降雨历时等都是降雨事件的重要特征参数^[1-2],而IETD对这些降雨特征参数有显著影响^[3]。从气象学的角度来说,IETD定义为两个降雨事件之间的最小时间间隔(MIT)。目前划分IETD主要有4种方法:一是利用降雨脉冲的自相关系数来确定IETD,将降雨脉冲的自相关系数收敛到0时的滞后时间定义为IETD^[4],该方法基于独立的降雨脉冲数据进行统计而得到IETD;二是通过统计分析不同间隔的MIT变量对应的年平均降雨场次的变化趋势来确定^[5-6],随着MIT的增加,降雨事件的年平均数量减少,当MIT增加不会显著改变降雨事件数量时的MIT值被确立为合适的IETD,但是这种方法非常具有主观性,IETD与年平均降雨事件数量之间没有物理关系;三是通过MIT变量的变异系数来确定^[7],此方法中,假设MIT的概率密度服从指数分布,当其变异系数=1时可确定IETD值;四是利用降雨数据进行多重分型分析来确定^[8-10],该方法基于降雨尺度不变,利用多重分型和自组织

临界理论进行分析而得出IETD值。

在市政排水规划和设计中,暴雨强度公式、设计降雨及雨型直接影响到排水系统的大小和投资,这些参数直接与IETD有关,而上述的IETD定义仅仅考虑气象特征,没有考虑流域水文特征和应用目的^[11],鉴于此,笔者基于海绵城市对水文循环的影响,从城市流域的角度出发,对IETD采用耦合气象特征和流域水文特征的方法进行统计分析和水文模拟,将IETD定义为降雨结束到流域径流结束的时间。这个定义不仅考虑了城市流域的自然特征,也考虑了海绵城市的功能,因此适用于大多数城市。笔者以长沙市雨花区和芙蓉区为研究对象,分析望城区国家地面气象观测站1990年—2017年逐分钟降雨资料,采用二维的城市排水模型模拟汇水区的汇流过程,对IETD进行科学划分,以期海绵城市规划设计提供水文学依据。

1 研究资料与方法

1.1 研究资料

本研究中逐分钟降雨数据来自长沙市望城区国家地面气象观测站1990年—2017年降雨自记纸和自动雨量计资料,并进行了质量控制。考虑到计算机运算效率等因素,将逐分钟降雨数据处理成每10 min降雨数据。数字高程模型(DEM)数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),本数据集利用ASTER GDEM第一版本(V1)的数据进行加工得来,是空间分辨率为30 m的数字高程数据产品。

1.2 研究方法

1.2.1 排水模型

本研究选择加拿大水利工程中心的 PCSWMM 模型。PCSWMM 是在 EPA SWMM 的基础上二次开发的商业化软件,具有强大的水文水动力模块,可模拟与降雨径流相关的水量和水质问题,能够计算降雨地表产流、地表汇流、管网水动力传输和水质传输,支持 1D/2D 模型耦合,还包含低影响开发(LID)控制模块,能够模拟 LID 设施对降雨径流的减缓程度。地表汇流综合非线性水库方程和曼宁公式,联立求解;管网汇流采用一维圣维南方程组进行管网流量和水位演算。PCSWMM 内嵌 GIS 功能,支持多种格式数据,对于数据的前后处理更加便利,结果可视化更加强大,功能更加多样化。

在众多的城市排水模型中之所以采用 PCSWMM,除了友好使用界面和 GIS 无缝对接的功能外,主要是 2D 的计算快于其他类似模型,对于本研究来说这是关键。PCSWMM 模型参数主要包括产流参数和汇流参数,各参数的取值主要参考规范和手册。依据 2016 年版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)将模拟区域分为建筑较密集区和建筑稀疏区,不透水率分别取值为 65% 和 30%。根据 SWMM 用户手册中典型取值建议,本研究中透水区域基本为普通草地,因此透水区的初损填洼深度取值为 5 mm、不透水区的取值为 2.5 mm。下渗模型(Horton)参数设置:区域的土壤主要为素填土,由黏土掺杂少量砂构成,最大入渗率设为 8.5 mm/h,稳定入渗率为 1.3 mm/h,回干时间设为 7 d。汇水分区特征宽度:汇水分区面积开根号;汇水分区坡度:根据地面高程数据计算汇水分区的加权平均坡度;二维管道曼宁系数:二维道路概化管道设为 0.014,二维非道路概化管道设为 0.05。

本研究利用地面高程数据建立 PCSWMM 二维模型,因为缺乏管网资料,故将道路概化为排水通道,其中二维概化管道的曼宁系数与地表性质有关,鉴于城市的主干管网一般铺设于市政道路下,所以模型中由道路概化的二维管网的曼宁系数取市政管网的曼宁系数即 0.014,比道路粗糙度略低,以此将管网的快速排水功能考虑进来,从而使 IETD 的研究更具地方代表性。

1.2.2 子汇水区划分

选取雨花区和芙蓉区作为长沙市区典型代表区

域,其中雨花区位于长沙市区东南部,傍浏阳河下游之西,圭塘河穿境而过,东北侧为花岗岩低山丘陵地带,地表发育的土壤多为沙土,山势较陡峭,山脊多不相连;东侧和东南侧为红岩丘岗,海拔一般在 100 m 左右。芙蓉区地势平缓,浏阳河从芙蓉区蜿蜒而过。基于 30 m × 30 m 的高程 DEM 数据划分子汇水区,得到雨花区和芙蓉区共 19 个子汇水区,如图 1 所示,其面积分别为 1 269、2 259、2 237、1 164、851、823、1 256、1 288、585、235、659、373、1 639、1 232、461、504、87、694、351 hm²,平均坡度分别为 5.7%、6.4%、6.0%、4.2%、7.0%、7.1%、7.1%、6.0%、8.7%、24.4%、4.1%、2.6%、4.5%、4.5%、2.5%、2.7%、2.5%、2.4%、2.1%。

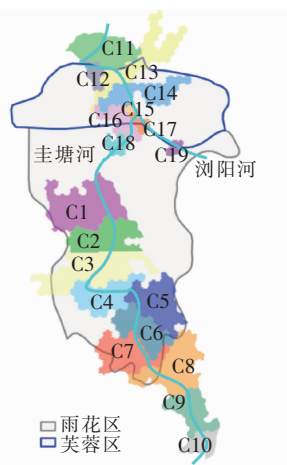


图1 长沙市雨花区和芙蓉区的子汇水区分布

Fig. 1 Distribution of subcatchments in Yuhua District and Furong District of Changsha City

1.2.3 IETD 定义

降雨事件往往由数个降雨时段以及相邻降雨时段之间的无雨时间构成。考虑到海绵城市既具有渗滞蓄功能,又具有管渠排水功能的特点,在定义降雨事件时间间隔时,既要考虑降雨的气象特征,又要考虑流域特征和应用对象,特别是需要考虑 LID 对径流的滞留和缓释以及雨前干燥时段对污染物去除的影响,在设计时一般要求前期降雨所形成的径流对后期降雨所形成的径流量没有显著影响,即两次降雨的径流水位线不叠加^[11-13],所以本研究将降雨结束至径流结束的时间段确定为降雨事件时间间隔(见图2)较为合理。一般来说,较短的 IETD 适用于小流域的调蓄设施和城市的管渠排水,较长的 IETD 适用于大流域水资源管理和大江大河的防洪应急调度,而海绵城市的 IETD 则应该介于两者之间。

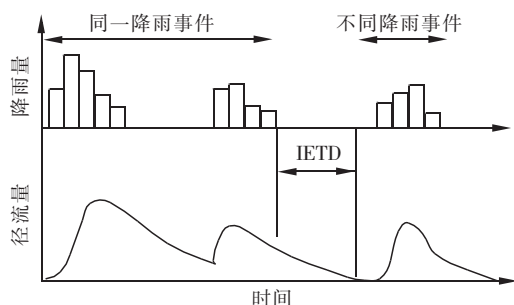


图2 基于降雨和径流特征的 IETD 定义示意

Fig.2 Definition of IETD based on precipitation and runoff characteristics

2 结果与分析

2.1 径流峰值与降雨强度相关性分析

根据 IETD 定义,利用 PCSWMM 模型的降雨 - 径流关系来确定 IETD 值,首先需要确定径流结束的阈值。降雨量与径流峰值密切相关,通过模拟雨花区和芙蓉区共 19 个子汇水区 1990 年—2017 年每 10 min 的降雨 - 径流关系,分别统计分析归一化的 1~6 h 降雨强度与径流峰值的相关性,见图 3,各时段归一化的降雨强度与对应的径流峰值呈很强的线性相关性,相关系数均通过 0.01 置信度检验。

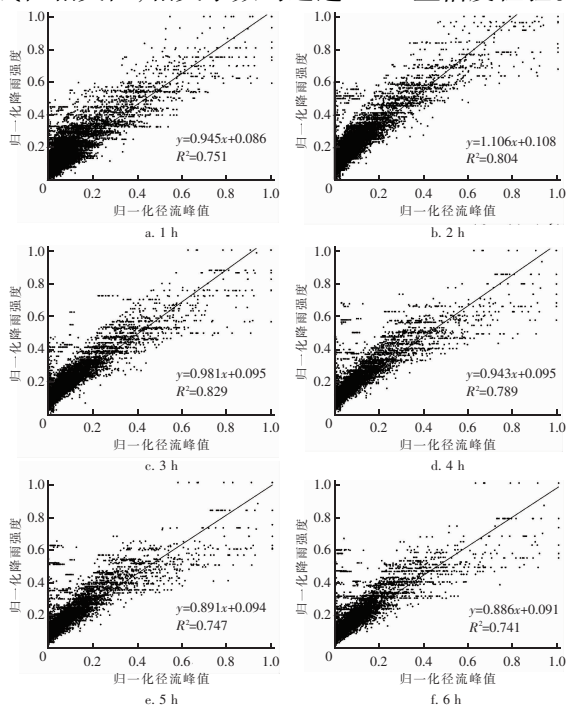


图3 19 个子汇水区归一化的 1~6 h 降雨强度与径流峰值的线性相关分析

Fig.3 Linear correlation analysis of normalized 1~6 h rain intensity and peak runoff in 19 subcatchments

从不同时段降雨强度与径流峰值的相关系数及拟合曲线的斜率来看,3 h 降雨强度与径流峰值的相关性最好,且斜率最接近 1,因此选取 3 h 降雨强度来分析径流结束的阈值。同一场降雨过程,各子汇水区的径流曲线差异明显,特别是径流峰值相差很大,且径流量衰减速率也存在很大差别,因此,用同一径流流量值作为判断径流结束的阈值可能与实际差别较大。根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012),当降雨量 < 3 mm 时为小雨量级,根据经验判断,小雨不会产生明显径流,因此在本研究中,各子汇水区以 3 h 降雨量为 3 mm 产生的最小径流值作为判断该子汇水区径流结束的阈值。

2.2 IETD 概率密度分布

利用 PCSWMM 模型,分别对 1990 年—2017 年雨花区和芙蓉区共 19 个子汇水区进行降雨 - 径流过程模拟,分析降雨结束至径流结束的时长,统计各子汇水区的 IETD 频率分布。图 4 为 19 个子汇水区的 IETD 概率密度分布曲线。在计算累计概率时, IETD 从 1 h 开始计算,且频率统计中的间隔也为 1 h,由于个别子汇水区的 IETD 分布范围较广,且当 IETD ≥ 12 h 时,其累计概率很小,因此 IETD 为 12 h 的累计概率表示 IETD ≥ 12 h 的累计值。

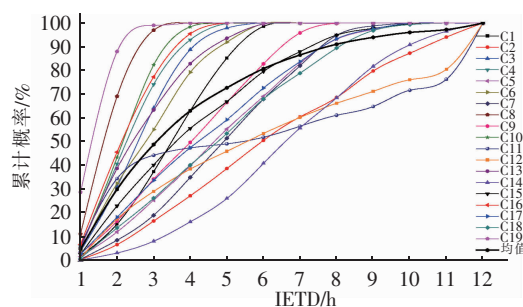


图4 19 个子汇水区各 IETD 累计概率分布曲线

Fig.4 Cumulative probability distribution curve of each IETD in 19 subcatchments

从各子汇水区的 IETD 累计概率分布曲线来看,当 IETD ≤ 4 h 时,累计概率增长速率较大,说明此区间样本量增长幅度较大;当 IETD > 4 h,累计概率增长的速度显著变慢。当 IETD ≤ 4 h 时,有 53% 的子汇水区累计概率超过 50%;当 IETD ≤ 5 h 时,有 79% 的子汇水区累计概率超过 50%;当 IETD ≤ 6 h 时,有 95% 的子汇水区累计概率超过 50%。根据 19 个子汇水区 IETD 对应的累计概率取平均值,得到代表整个示范区的 IETD 累计概率分布曲线,当

IETD ≤ 4 h 时,累计概率增长速率较快;当 IETD = 4 h 时,累计概率为 63%;随后累计概率增长较为缓慢,当 IETD = 8 h 时,累计概率为 91%,说明子汇水区 IETD 的总样本量主要集中在 1~4 h, IETD > 4 h 的样本量较少。

中位数是以它在所有标志值中所处的位置确定的全体单位标志值的代表值,不受分布数列的极大或极小值影响,从而在一定程度上提高了中位数对分布数列的代表性。本研究以子汇水区的 IETD 中值作为该区域的典型 IETD 值。统计分析得到雨花区 C1~C10 的 IETD 中值分别为 230、125、320、310、190、160、180、380、270、150 min,芙蓉区 C11~C19 的 IETD 中值分别为 270、150、240、420、170、310、90、350、340 min。

雨花区和芙蓉区位于长沙市中心,其城市化进展能很好地代表长沙市的发展状况,因此,综合雨花区和芙蓉区 19 个子汇水区的 IETD 中值作为长沙市典型 IETD 值。图 5 为雨花区和芙蓉区 19 个子汇水区的综合频率分布情况,统计得出, IETD 频率分布为单峰型,峰值为 2 h。IETD ≤ 4 h 的累积频率为 60%, IETD ≤ 6 h 的累积频率为 79%, IETD ≤ 10 h 的累积频率为 96%。所有样本的 IETD 中值为 230 min ≈ 4 h,因此综合考虑,选取 4 h 作为长沙市典型 IETD 值。

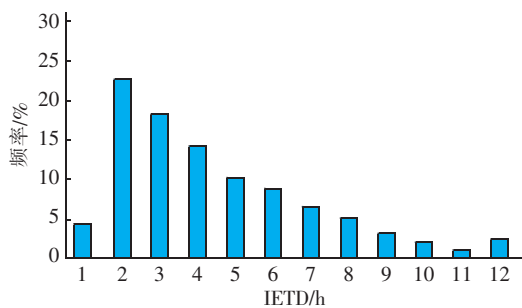


图5 长沙市雨花区和芙蓉区 19 个子汇水区综合频率分布

Fig. 5 Comprehensive frequency distribution of 19 subcatchments in Yuhua District and Furong District of Changsha City

2.3 IETD 与汇水区相关性分析

IETD 与汇流时间密切相关,而在此模型中,汇流时间与汇水面积、汇水区不透水面积和坡度有关,汇水面积和不透水面积越大,则汇流时间越长;坡度越大,则汇流时间越短。利用模型计算得出的各子汇水区 IETD 值与对应的汇水面积、汇水区不透水

面积和坡度进行相关性分析,以便在工程实践中合理应用。

图 6 为各汇水面积与 IETD 的关系,可以看出, IETD 与汇水面积呈正相关性,多项式拟合公式如下 ($r = 0.668$):

$$\ln y = -0.121 \times (\ln x)^2 + 1.812 \times \ln x - 1.183 \quad (1)$$

式中: y 为 IETD, h; x 为汇水面积, hm^2 。

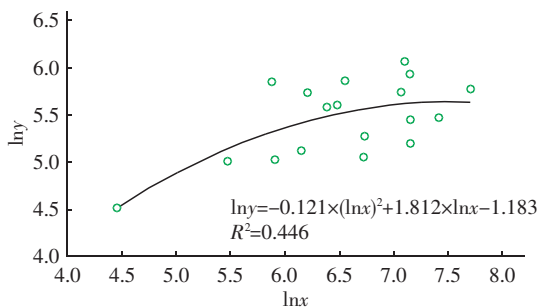


图6 汇水面积与 IETD 的关系

Fig. 6 Relationship between catchment area and IETD

各汇水面积、汇水区不透水面积和坡度与 IETD 的多项式拟合公式如下 ($r = 0.745$):

$$\ln y = -0.465 \times (\ln x_1 - 7.24)^2 + 0.445 \times (\ln x_2 - 6.228)^2 - 0.563 \times x_3 + 6.502 \quad (2)$$

式中: y 为 IETD, h; x_1 为汇水面积, hm^2 ; x_2 为不透水面积, hm^2 ; x_3 为坡度, %。

式(2)能较好地反映出汇水区参数与 IETD 的关系,可用于未测量过的城市排水设计。但是,分析的流域面积在 87~2 259 hm^2 之间,如果下垫面差异较大,如坡度、不透水面积等差别很大,或汇水面积超过模拟数据,需要谨慎考虑 IETD 值的选取。图 6 显示,当 IETD > 5.5 h 时,与汇水面积的关系不明显。

2.4 降雨特征分析

基于水文水动力学模型选取的 IETD = 4 h,根据长沙市 1980 年—2017 年的逐分钟降雨数据,对持续时间为 24 h 以内的独立降雨事件的降雨特征进行了分析,考虑到降雨量小会显著增加降雨事件数量,对统计造成一定的影响,本研究选取降雨量 ≥ 5 mm 的降雨事件进行分析。

从降雨事件数量分布特征来看,长沙市 1980 年—2017 年共发生 1 602 场次降雨量 ≥ 5 mm 的降雨事件,平均年降雨场次为 42 次。降雨场次随降雨

历时总体呈先增加后减少的趋势,所有降雨事件样本中,降雨历时中值为 11 h。降雨历时 1~12 h 的总降雨场次累积频率为 58.1%。从降雨总量和降雨强度特征总体来看,降雨总量的平均值、最大值和

中值随降雨历时的增加而增加,其中最大降雨量为 132.1 mm。降雨强度的平均值、最大值和中值随降雨历时的增加而减小,其中最大降雨强度为 132 mm/h,详见表 1。

表 1 基于 IETD = 4 h 的降雨事件特征参数统计

Tab. 1 Statistics of characteristic parameters of rainfall events based on IETD = 4 h

降雨历时/ h	降雨事件			降雨量/mm			降雨强度/(mm·h ⁻¹)		
	样本量	百分比/%	累计百分比/%	平均值	最大值	中值	平均值	最大值	中值
1~2	132	8.2	8.2	14.6	64.6	10.2	13.5	132.0	9.5
3~4	145	9.1	17.3	14.2	78.6	10.5	4.2	18.8	3.0
5~6	166	10.4	27.7	15.6	96.2	10.5	2.8	15.4	1.8
7~8	170	10.6	38.3	17.5	82.7	12.3	2.3	10.8	1.7
9~10	137	8.6	46.8	17.7	85.2	11.9	1.9	9.7	1.3
11~12	180	11.2	58.1	17.2	83.0	12.8	1.5	7.1	1.1
13~14	135	8.4	66.5	18.3	119.8	14.0	1.4	9.1	1.1
15~16	140	8.7	75.2	21.3	103.5	14.7	1.4	6.9	1.0
17~18	133	8.3	83.5	18.2	89.1	13.9	1.0	5.1	0.8
19~20	97	6.1	89.6	24.9	109.2	16.7	1.3	5.8	0.9
21~22	85	5.3	94.9	30.0	128.6	21.0	1.4	5.7	1.0
23~24	82	5.1	100	28.6	132.1	23.6	1.2	5.8	1.0

2.5 基于不同 IETD 值的雨型分析

IETD 的划分会直接影响到降雨场次的划分,进而影响到暴雨雨型的确定。暴雨雨型是雨水排水设计流量计算、城市排水管网设计和城市规划设计等工作的基础。由于目前确定设计雨型的方法很多,除均匀雨型外,其余多为单峰雨型,考虑到实际降雨也多为单峰型,因此本研究选取海绵城市规划与设计采用最多的芝加哥雨型作为分析不同 IETD 值对雨型影响的代表雨型。

芝加哥法是假定短历时雨型为单峰型,而后根据综合雨峰位置系数和暴雨强度公式来确定最终形态。推求短历时暴雨雨型,首先要确定雨峰所在位置。通常,雨峰位置系数是根据每场降雨峰值时刻与整个历时的比值统计确定的。对历时相同的暴雨过程求出雨峰位置系数的平均值,将各历时的雨峰位置系数按照各历时的长度进行加权平均,得到综合雨峰位置系数。根据传统的 IETD = 2 h 和本研究耦合气象和流域水文特征计算得出的 IETD = 4 h,分别推算出芝加哥雨型的雨峰位置系数,如表 2 所示。可以看出,利用芝加哥法推求设计的长沙市暴雨雨型,雨峰位置系数随降雨历时的增加整体呈减小-增大-减小的变化趋势。当 IETD = 2 h 时,不同历时雨峰位置多在 2/4 分位;当 IETD = 4 h 时,不同历时雨峰位置多在 1/3 分位。雨峰位置随 IETD

的增大而明显提前,综合雨峰位置提前了 9.4%,历时 30 min 的设计暴雨雨型雨峰位置提前了 15.8%。因此,当发生短历时暴雨时,水利、水文、住建、防洪等部门需要在第一时间做好排水防涝准备。

表 2 长沙市基于不同 IETD 确定的雨峰位置系数

Tab. 2 Rain peak location coefficients based on different IETD in Changsha City

降雨历时/ min	雨峰位置系数		雨峰相对提前百分比/%
	IETD = 2 h	IETD = 4 h	
30	0.379	0.319	15.8
60	0.263	0.225	14.4
90	0.314	0.322	-2.5
120	0.308	0.285	7.5
150	0.228	0.207	9.2
180	0.231	0.204	11.7
综合雨峰位置系数	0.287	0.260	9.4

3 讨论

降雨事件间隔时间(IETD)是水文学上的一个重要参数,国外一般采用流域水文监测的方法,在流域汇末端(一般是河道)布置流量监测,通过实测的降雨量和径流的关系,计算出 IETD。在没有监测的流域则是采用概率模型模拟降雨分布。最常用的概率模型就是泊松分布模型,因此得出的 IETD 为指数分布。IETD 的取值直接影响到场次降雨如何定义,而场次降雨则关系到水质控制体积的计算。在

美国,水质控制体积是设计最佳管理措施(BMP)和LID设施的关键依据,几乎写在了各州的设计导则中。水质控制体积的计算方法有两种,一种是从长期的降雨时间序列中统计出相对于80~95百分位降雨场次的降雨深度作为设计依据,例如,科罗拉多州城市排水和雨洪控制区采用80百分位的场次降雨作为设计水质处理设施的标准^[14];另一种是采用日降雨作为统计基础,例如美国环保署(USEPA)建议取95百分位的日降雨,因为它代表在自然条件下的渗雨量^[15]。所以IETD对采用场次降雨计算水质控制体积的州县影响较大。

目前全国海绵城市规划设计多建议采用连续降雨模拟,但是由于管网数据的缺失、地形数据质量不高以及缺乏流量监测数据,大多数模型结果没有经过率定和校核,不确定性太大,难以用于海绵设施的设计。另外由于降雨的不均匀分布及雨量站的缺失(很多排水分区没有雨量站),使得模型模拟的结果针对性相对减弱,所以在工程设计方面,仍然采用设计雨型,而设计雨型的推导则直接与场次降雨有关,因此IETD的取值是关键因素。为了说明IETD的重要性,本研究以长沙市为例,对IETD=2h与IETD=4h的设计雨型进行了比较,发现IETD=4h的峰值位置较IETD=2h的峰值位置显著提前,这可能直接影响到以峰值削减或错峰为目的LID设施的尺寸大小。

考虑流域特征的IETD可能在评估合流制溢流(CSO)次数和面源污染负荷计算方面更有指导意义。国外有研究表明,CSO的溢流频率随着IETD的减少而增加,特别是有些县市按一段周期内的溢流频率来决定溢流次数,IETD的影响就更为重要。所以合理定义降雨场次对CSO控制和面源污染负荷估算十分重要,直接影响到工程投资和运维成本。

4 结论

从水文学角度出发,以长沙市建成区为代表,研究了降雨特征和流域特征,推导出基于流域径流特征的IETD计算方法,比传统选定的2h划分降雨事件更具有代表性。本研究的建成区子汇水区面积范围在87~2 259 hm²,属于建筑稀疏区和较密集区,坡度平均值为5.8%,不透水率范围为30%~65%,土壤类型以砂质黏土或黏性壤土为主,所以本研究提出的IETD计算方法适用于我国大部分城市。IETD的长短与汇水区面积显著相关,同时也受下垫

面不透水率、坡度等其他因素影响,但当IETD>5.5h后,IETD与汇水区面积的关系不太明显。

参考文献:

- [1] 唐炉亮,胡锦程,刘章,等. 基于SWMM的城市排水管网瓶颈分析与改造评价[J]. 中国给水排水,2018,34(21):112-117.
Tang Luliang, Hu Jincheng, Liu Zhang, et al. Bottleneck analysis and reform evaluation of urban underground drainage pipe network based on SWMM [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (21): 112 - 117 (in Chinese).
- [2] 李俊,吴珊,赵昕,等. 滨海区域LID措施模型的模拟效果分析[J]. 中国给水排水,2018,34(21):118-122,126.
Li Jun, Wu Shan, Zhao Xin, et al. Simulation of LID practices in coastal area based on PCSWMM [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (21): 118 - 122, 126 (in Chinese).
- [3] Adams B J, Fraser H G, Howard C D D, et al. Meteorological data analysis for drainage system design [J]. J Environ Eng, 1986, 112(5): 827-848.
- [4] Nojumuddin N S, Yusof F, Yusop Z. Determination of minimum inter-event time for storm characterisation in Johor, Malaysia [J]. J Flood Risk Manage, 2018, 11: S687-S699.
- [5] Balistocchi M, Grossi G, Bacchi B. Deriving a practical analytical-probabilistic method to size flood routing reservoirs [J]. Adv Water Resour, 2013, 62 (Part A): 37-46.
- [6] Nix S J. Urban Stormwater Modeling and Simulation [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994.
- [7] Restrepo-Posada P J, Eagelson P S. Identification of independent rainstorms [J]. J Hydrol, 1982, 55(1/4): 303-319.
- [8] Medina-Cobo M T, García-Marín A P, Estévez J, et al. The identification of an appropriate minimum inter-event time (MIT) based on multifractal characterization of rainfall data series [J]. Hydrol Process, 2016, 30(19): 3507-3517.
- [9] Gires A, Tchiguirinskaia I, Schertzer D, et al. Influence of small scale rainfall variability on standard comparison tools between radar and rain gauge data [J]. Atmospheric Res, 2014, 138: 125-138.
- [10] Deluca A, Corral A. Scale invariant events and dry spells for medium resolution local rain data [J].

Nonlinear Proc Geoph,2014,21:555-567.

- [11] Joo J, Lee J, Kim J H, *et al.* Inter-event time definition setting procedure for urban drainage systems [J]. Water, 2014, 6(1): 45-58.
- [12] Guo J C Y, Urbonas B. Runoff capture and delivery curves for storm-water quality control designs [J]. J Water Resour Plan Manage, 2002, 128(3): 208-215.
- [13] Cho K W, Yoon M H, Song K G, *et al.* The effects of antecedent dry days on the nitrogen removal in layered soil infiltration systems for storm run-off control [J]. Environ Technol, 2011, 32(7/8): 747-755.
- [14] UDUC. Urban Storm Drainage Criteria Manual Volume 3: Best Management Practices, Denver, Colorado [M]. Denver: Urban Drainage and Flood Control District, 2010.
- [15] Peter S S. Technical Guidance on Implementing the Stormwater Runoff Requirements for Federal Projects Under Section 438 of the Energy Independence and

Security Act [M]. Washington: USEPA, 2009.



作者简介:曾向红(1962-),女,湖南长沙人,本科,高级工程师,主要从事应用气候研究与服务工作。

E-mail: 627694002@qq.com

收稿日期:2020-03-20

(上接第101页)

参考文献:

- [1] 赵玉华,贾莹,张旭. 不同改性石英砂去除有机物的效能比较[J]. 中国给水排水, 2007, 23(19): 15-18.
Zhao Yuhua, Jia Ying, Zhang Xu. Comparison of removal efficiency of organic matter by different modified quartz sands [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(19): 15-18 (in Chinese).
- [2] Benjamin M M, Sletten R S, Bailey R P, *et al.* Sorption and filtration of metals using iron-oxide-coated sand [J]. Water Res, 1996, 30(11): 2609-2620.
- [3] 包彩霞,未碧贵,常青. 硅烷偶联剂对石英砂滤料的表面改性[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 848-853.
Bao Caixia, Wei Bigui, Chang Qing. Silane coupling agent for surface modification of quartz sand filter medium [J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 848-853 (in Chinese).
- [4] Wang Y P, Yuan K, Li Q L, *et al.* Preparation and characterization of poly(N-isopropylacrylamide) films on a modified glass surface via surface initiated redox polymerization [J]. Materials Letters, 2005, 59(14/15): 1736-1740.
- [5] Jiang J Q, Wang H Y. Comparative coagulant demand of polyferric chloride and ferric chloride for the removal of

humic acid [J]. Separation Science and Technology, 2009, 44(2): 386-397.

- [6] 沈钟,赵振国,康万利. 胶体与表面化学[M]. 4版. 北京:化学工业出版社,2012.
Shen Zhong, Zhao Zhenguo, Kang Wanli. Colloid and Surface Chemistry [M]. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2012 (in Chinese).



作者简介:赵建益(1993-),男,湖北武汉人,硕士,主要研究方向为水处理技术。

E-mail: 1311121268@qq.com

收稿日期:2019-04-26