

# 雨型对低影响开发设施径流控制效果的影响

成志轩<sup>1</sup>, 金家明<sup>2</sup>, 王 琚<sup>1</sup>

(1. 丹华水利环境技术<上海>有限公司, 上海 200235; 2. 浙江建设职业技术学院 城市建设工程系, 浙江 杭州 311231)

**摘 要:** 采用模糊识别法对 HZ 市近 10 年的降雨数据进行雨型分析,并模拟研究等雨量下不同雨型对 LID 设施径流控制效果的影响。结果表明,HZ 市的降雨多为较长历时的小雨,典型雨型为雨峰靠后的单峰雨型,该雨型对 LID 设施的蓄滞要求较高,因此在 LID 设施规模上建议考虑适当的安全冗余。另外,案例模拟结果表明,单峰雨型下,LID 设施的径流总量控制和峰值削减效果较好,但峰值延滞效果不及均匀雨型和双峰雨型。

**关键词:** 低影响开发; 雨型; 模糊识别法; 径流控制

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)01-0134-05

## Influence of Rainfall Pattern on Runoff Control of Low Impact Development Facilities

CHENG Zhi-xuan<sup>1</sup>, JIN Jia-ming<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>

(1. DHI China, Shanghai 200235, China; 2. Department of Urban Construction Engineering, Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

**Abstract:** The fuzzy recognition method was applied to analyze the rainfall pattern by inputting the recent 10 years rainfall data in HZ city, and the influence of various rainfall patterns with identical rainfall volume on runoff control effect of low impact development (LID) facilities was simulated. It was found that most common rainfalls in HZ city were the light rain with long duration. Besides, the typical rainfall pattern was unimodal type with a later peak, which required higher retention performance of LID facilities. Therefore, it was suggested to consider appropriate security redundancy in design scale of LID facilities scale. In addition, the LID facilities had a better effect on the total runoff volume control and peak reduction under the unimodal types rainfall, but it had a poorer effect on the peak delay compared with those of the uniform type rainfall and bimodal type rainfall.

**Key words:** low impact development; rainfall pattern; fuzzy recognition method; runoff control

低影响开发(LID)雨水系统作为海绵城市建设的重要组成部分,具有源头减排的重要作用。然而,当前国内 LID 在落地过程中仍面临诸多问题,如缺乏实际径流控制效果与雨型及降雨时间间隔等方面的研究<sup>[1]</sup>。设计雨型主要有短历时和长历时两大类。应用于市政排水规划设计的短历时雨型,降雨历时一般为 2~3 h,常见的有芝加哥雨型<sup>[2]</sup>。此

外,Huff、Chow 等都提出过各自的设计暴雨雨型<sup>[3]</sup>。水利部门则采用同频率分析法研究长历时雨型,主要应用于城镇及流域的防洪工程规划设计中,降雨历时一般为 24 h、3 d、7 d 等,雨型的时间步长一般不小于 1 h。上述两类雨型均不适用于 LID 设施的规划设计。当前具有调蓄容积的 LID 设施的规模一般采用容积法确定,其大小取决于设计降雨量、综合

雨量径流系数及汇水面积,其中,设计降雨量由近30年的日降雨数据统计得到,为LID设施目标控制的日降雨量,而LID设施的实际径流控制效果同时受降雨时程分配的影响<sup>[4]</sup>。因此,因地制宜地研究各地24 h降雨雨型有利于细化径流总量控制及峰值削减的认识,推进海绵城市建设的进一步科学落地。笔者基于HZ市典型雨量站近10年的逐小时降雨数据,采用统计分析和模糊识别法,分析了该市降雨的年际分布特点并识别其雨型特征;另外,模拟研究相等雨量下不同雨型对LID设施径流控制效果的影响,以期对LID设施的建设提供参考。

## 1 降雨统计与雨型分析

### 1.1 降雨数据及统计

本研究的降雨资料由HZ市区内某典型雨量站采集而来,采集时间为2007年1月1日0时—2016年12月31日24时,采集频率为1 h。经统计,HZ市近10年的年平均降雨量为1 451.6 mm,其中,2007年的降雨量最小,为994.8 mm;2015年的降雨量最大,为1 911.8 mm(如图1所示)。根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012),按24 h降雨量划分为大暴雨(>100 mm)、暴雨(50.0~99.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、小雨(0.1~9.9 mm)5个等级,该市近10年的降雨等级分布如图1所示。

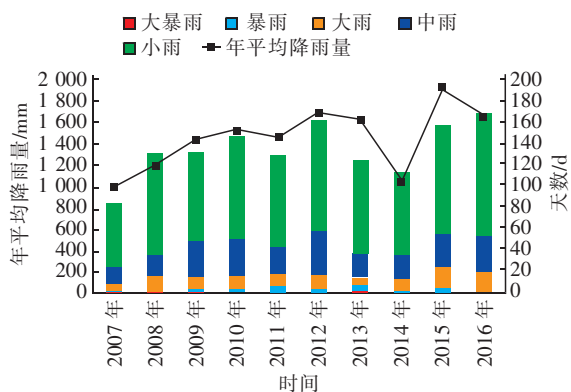


图1 HZ市2007年—2016年的年平均降雨量及各等级降雨天数

Fig.1 Annual rainfall and dates of each rainfall grade of HZ city from 2007 to 2016

由图1可知,HZ市近10年的暴雨天数年际变化较大,2011年和2013年最多,为6 d;2007年、2014年和2016年最少,为1 d。最大日降雨量发生在2013年10月7日,为267.8 mm,其余3次日降

雨量>100 mm的大暴雨分别发生在2007年10月8日、2008年6月10日及2009年7月24日,均处于受台风影响严重的月份,例如2007年10月的“罗莎”台风及2013年10月的“菲特”台风。因此HZ市的暴雨天数和暴雨雨量受台风等偶然因素影响较大,年际规律不明显。

国外一般将控制1英寸(25.4 mm)日降雨量作为LID设施设计的最低要求,国内海绵城市建设提出的年径流总量控制目标与此类似。根据对HZ市各年内中、小雨天数占全年总降雨天数的比例以及中、小雨雨量占全年总雨量的比例统计数据,控制中、小雨事件,即25 mm以下的降雨,可控制HZ市一年内87.9%的降雨天数及50.7%的降雨量,符合海绵城市雨水控制的理念。值得指出的是,由于大雨及暴雨等级的日降雨量较大,因此中、小雨的全年雨量占比必然小于天数占比;HZ市大雨天数占比相对较高(9.6%),所以该市中、小雨雨量占比远小于天数占比。

### 1.2 雨型分析

#### 1.2.1 场降雨划分

在进行雨型分析前,首先需明确场降雨的定义及划分。以降雨数据中的某一段为例,如图2所示,以最小降雨时间间隔 $T$ 作为划分标准,则图中3 d共计两场降雨,第1场为双峰降雨,第2场为单峰降雨;当缩小划分标准时间 $T$ 时,则可将该3 d的降雨划分为更多场单峰降雨事件。

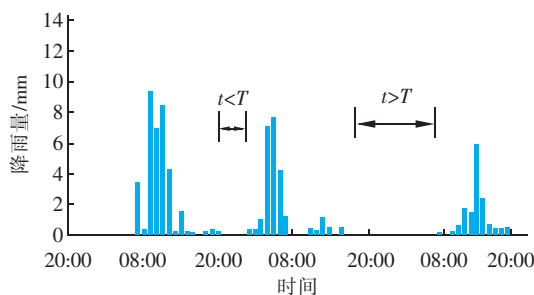


图2 场降雨划分时间间隔

Fig.2 Time interval of rainfall event division

根据HZ市近10年的逐小时降雨数据,按最小降雨时间间隔分别为6、12、24 h进行降雨场次划分(扣除 $\leq 2$  mm的降雨事件),统计结果表明,年平均降雨场次分别为67.2、59.0、48.0场,年平均场降雨量分别为21.16、24.30、30.01 mm,年平均降雨历时分别为18.54、25.96、41.71 h。可见,随着降雨时间

间隔的增大,平均降雨场次逐渐减少,平均场降雨量及降雨历时则逐渐增大。美国地质勘探局将场降雨定义为降雨间隔 $\geq 6$  h且降雨量超过1.3 mm的降雨事件。因此,本研究选取6 h作为场降雨划分依据,结合上述统计结果可知,HZ市的降雨属于较长历时的连绵小雨,对LID设施排空时间要求较高。

### 1.2.2 雨型分析方法

包高马佐娃和彼得罗娃基于乌克兰等地800场以上的降雨资料统计,归纳出7种典型雨型,如图3所示。前4种为单峰雨型,雨峰分别位于降雨开始时、前期、中期、后期;V型雨强大致均匀,VI和VII型为双峰雨型,其中VI型双雨峰位于降雨开始时和中期,VII型双雨峰则位于降雨开始时和后期。

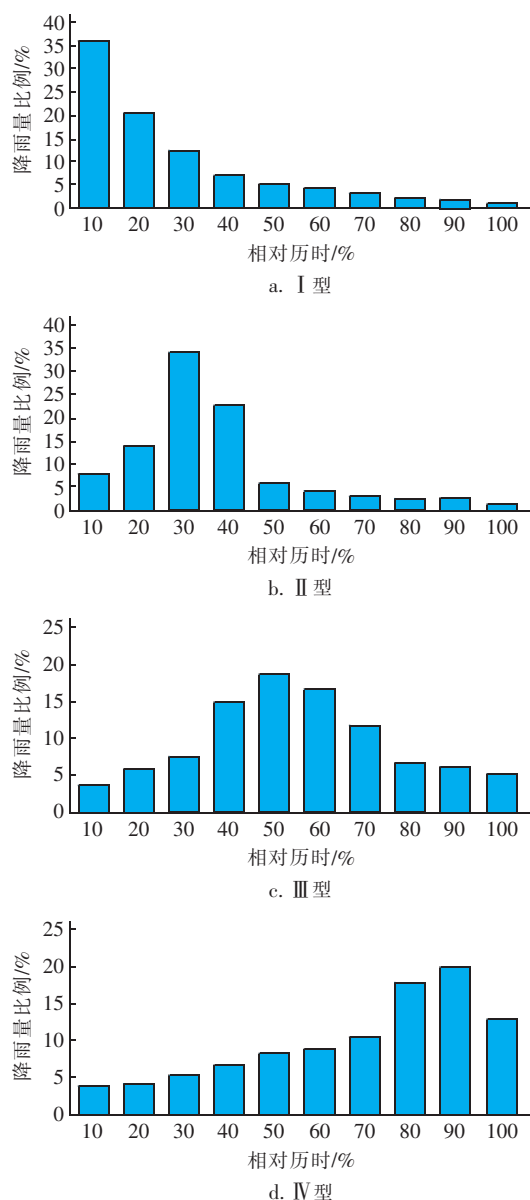


图3 7种典型雨型

Fig. 3 Seven rainfall patterns

将HZ市近10年的降雨按降雨间隔时间6 h进行划分,共得到1 211场降雨。扣除历时1 h的降雨事件(不具有代表性)后得到922场有效降雨。此外,将LID设施重点控制的中、小雨作为研究对象,扣除2 mm以下的降雨场次,得到共计504场降雨事件。采用模糊识别法组建这7种雨型的代表矩阵,将922场/504场实际降雨与7种典型雨型相比较,计算贴适度以确定每场降雨的雨型。

7种典型雨型的总历时分为10等份,每个时段雨量占总雨量的比例分别为:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i10}) \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (1)$$

同理,将实际降雨的总历时分为10等份,计算各时段雨量占该场降雨总量的比例:

$$Y_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{j10}) \quad (j = 1, 2, \dots, 504/922) \quad (2)$$

计算每一场实际降雨与各典型雨型的贴适度:

$$\sigma_{ij} = 1 - \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (y_{jn} - x_{in})^2} \quad (3)$$

采用就近原则,当第*j*场降雨第*i*个贴近度 $\sigma_{ij}$ 最大时,则第*j*场降雨属于第*i*种雨型。

1.2.3 雨型分析结果

922场有效降雨以及504场中、小降雨的雨型确定结果如图4所示。可知,HZ市的降雨主要为单峰雨型,占到72%,均匀雨型和双峰雨型占比较小,分别为13.1%和14.9%。单峰雨型中,占比最大的为雨峰靠后的IV雨型(24.7%),雨峰在中期的III雨型(22.6%)次之;雨峰位于开始时及前期的I和II雨型的占比稍小,分别为12.1%和12.6%。双峰雨型中,雨峰位于开始时和中期的VI雨型在7种典型雨型中占比最小,仅为4.4%。

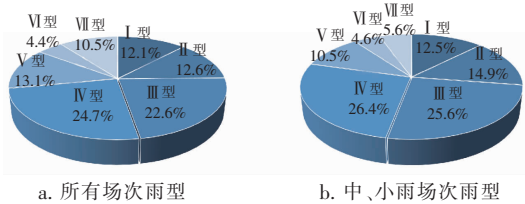


图4 雨型分析结果

Fig.4 Results of rainfall pattern analysis

降雨量在2~25mm之间的中、小雨雨型分析结果与整体样本规律基本一致,稍有区别的是均匀雨型和双峰雨型的比例更低,这可能是中、小降雨的雨量较小、历时较短,因此雨峰更为集中,导致单峰比例更高,出现多个峰乃至均匀雨强的概率较低。

综上,HZ市的典型雨型为单峰雨型,且雨峰相对靠后。LID设施建设应重点考虑降雨集中的单峰雨型影响。

2 雨型对LID设施径流控制效果的影响

2.1 案例模拟

HZ市某地块的总面积为2.4hm<sup>2</sup>,用地类型为

公建用地,建筑密度为25%,绿地率为35%。该地块拟基于LID理念,规划采用绿色屋顶、下沉式绿地及透水铺装等LID措施实现源头消纳削减雨水,达到径流控制目的。规划绿色屋顶、下沉式绿地和透水铺装的面积分别为0.06、0.168、0.129hm<sup>2</sup>。

采用SWMM模型模拟极端降雨的不同雨型下该地块LID设施的径流控制效果,主要的模型数据及参数如下:

① 降雨数据:暴雨(总雨量为50mm)和大暴雨(总雨量为100mm)条件下7种雨型的24h降雨数据。

② 汇水面的参数:面积为2.4hm<sup>2</sup>,坡度为0.05%,不透水率为64%,不透水区及透水区的洼蓄量分别为2和5mm,不透水区及透水区的糙率分别为0.011和0.1。

③ 下渗参数:采用霍顿下渗模型,最大下渗率为76mm/h,稳定下渗率为5mm/h,衰减系数为4h<sup>-1</sup>,干旱天数为7d。

④ LID设施的参数:下沉式绿地(生物滞留措施)的蓄水层为150mm、表面粗糙系数为0.2,种植层为300mm、孔隙率为0.3,填料层为200mm、孔隙比为0.75,排水层的排水系数为4、排水指数为0.5;透水铺装的面层为60mm、粗糙系数为0.1,找平层为20mm、孔隙比为0.15,基层为100mm、孔隙率为0.35,底基层为150mm、孔隙比为0.7;绿色屋顶的蓄水层为20mm、粗糙系数为0.2,种植层为150mm、孔隙率为0.46,排水层为50mm、孔隙率为0.5、粗糙系数为0.1。

2.2 模拟结果与分析

极端降雨的不同雨型下,该地块LID设施的径流控制效果如表1所示。

表1 雨型对LID设施径流控制效果的影响

Tab.1 Influence of rainfall pattern on runoff control effect of LID facilities

项 目			I 型	II 型	III 型	IV 型	V 型	VI 型	VII 型
暴雨	径流深度/mm	传统	31.66	31.66	31.63	31.62	31.63	31.64	31.62
		LID	13.48	13.48	13.39	13.35	13.36	13.40	13.35
		削减量	18.18	18.18	18.24	18.27	18.27	18.24	18.27
	径流峰值/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	传统	0.031 8	0.030 2	0.016 9	0.017 8	0.010 7	0.015 6	0.017 4
		LID	0.010 7	0.018 5	0.010 1	0.015 0	0.007 5	0.011 0	0.008 9
		削减量	0.021 1	0.011 7	0.006 8	0.002 8	0.003 2	0.004 6	0.008 5
	峰现时间/ min	传统	130	420	710	1 270	590	140	140
		LID	430	550	920	1 280	1 390	990	1 400
		延滞值	300	130	210	10	800	850	1 260



续表 1(Continued)

项 目			I 型	II 型	III 型	IV 型	V 型	VI 型	VII 型
大暴雨	径流深度/ mm	传统	67.82	71.45	65.95	66.06	63.62	63.63	63.61
		LID	45.07	46.97	44.04	44.09	42.73	42.76	42.72
		削减量	22.75	24.48	21.91	21.97	20.89	20.87	20.89
	径流峰值/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	传统	0.066 6	0.075 7	0.035 9	0.041 0	0.021 3	0.031 8	0.035 4
		LID	0.048 8	0.063 0	0.031 2	0.035 0	0.018 8	0.021 3	0.022 1
		削减量	0.017 8	0.012 7	0.004 7	0.006 0	0.002 5	0.010 5	0.013 3
	峰现时间/ min	传统	140	430	720	1 290	530	130	140
		LID	150	430	720	1 290	680	1 000	290
		延滞值	10	0	0	0	150	870	150

由表 1 可知:①对于 50 mm 的暴雨,不同雨型下 LID 设施对径流总量的削减效果较接近;单峰雨型中雨峰越靠后,由于前期降雨的累积,LID 设施的峰值流量削减效果和峰值延滞效果越不明显;相同雨量下,均匀雨型和双峰雨型对 LID 设施的冲击较小,设施的峰值延滞效果较好。②对于 100 mm 的大暴雨,单峰雨型下 LID 设施的径流总量控制效果较好,但峰值延滞效果不明显;而均匀雨型和双峰雨型下 LID 设施仍能起到延滞效果。③在所有典型雨型中,HZ 市雨型占比最大的 IV 雨型(雨峰靠后的单峰雨型)对 LID 设施的冲击较大,LID 设施的峰值蓄滞效果不佳,因此宜适当考虑 LID 设施的安全冗余。

### 3 结论与建议

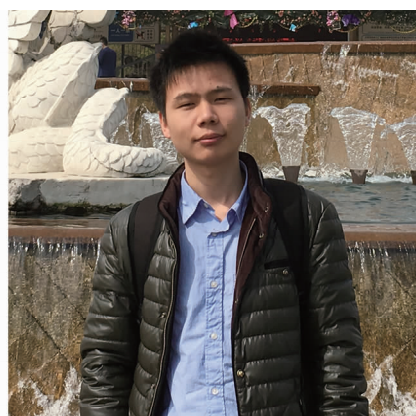
针对 HZ 市近 10 年逐小时降雨数据,采用统计分析和模糊识别方法进行了雨型分析,结果表明,HZ 市主要为较长历时的小雨,典型雨型为雨峰靠后的单峰雨型;同时,基于相等雨量不同雨型下 LID 设施径流控制效果的模拟分析可知,单峰雨型下,LID 设施的径流量控制和峰值削减效果较好,但峰值延滞效果不及均匀雨型和双峰雨型。

鉴于 HZ 市的降雨雨型对 LID 设施的蓄滞要求较高,因此建议在 LID 设施规模上应考虑适当的安全冗余,同时应注重 LID 设施的排空效果。

### 参考文献:

- [1] 宫永伟,刘超,李俊奇,等. 海绵城市建设主要目标的验收考核办法探讨[J]. 中国给水排水,2015,31(21):114-117.  
Gong Yongwei, Liu Chao, Li Junqi, et al. Discussion on acceptance evaluation method of main objectives for sponge city construction[J]. China Water & Wastewater, 2015,31(21):114-117(in Chinese).

- [2] 牟金磊. 北京市设计暴雨雨型分析[D]. 兰州:兰州交通大学,2011.  
Mou Jinlei. Design Storm Pattern Analysis in the City of Beijing[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011 (in Chinese).
- [3] 银磊,陈晓宏,陈志和,等. 广州市典型雨量站暴雨雨型研究[J]. 水资源研究,2013,2(6):409-414.  
Yin Lei, Chen Xiaohong, Chen Zhihe, et al. Study on storm pattern of typical rainfall station in Guangzhou[J]. Journal of Water Resources Research, 2013,2(6):409-414(in Chinese).
- [4] 王文亮,李俊奇,车伍,等. 雨水径流总量控制目标确定与落地的若干问题探讨[J]. 给水排水,2016,42(10):61-69.  
Wang Wenliang, Li Junqi, Che Wu, et al. Discussion on some problems in the determination and realization of total rainfall runoff flow rate control[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016,42(10):61-69(in Chinese).



作者简介:成志轩(1990-),男,江苏南京人,硕士,工程师,主要从事排水防涝、海绵城市模型相关研究工作。

E-mail:chengzhixuan111@163.com

收稿日期:2018-06-02