

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230427

# 基于海绵城市子汇水分区 LID 设施的峰值径流控制效应

陈泳帆<sup>1</sup>, 张华廷<sup>1</sup>, 吴晓林<sup>2</sup>, 刘雅丽<sup>1</sup>

(1. 中机中联工程有限公司, 重庆 400039; 2. 中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司, 重庆 400042)

**摘要:** 为探索海绵城市设计中子汇水分区的积水内涝风险的解决途径, 采用 SWMM 建模针对不同重现期下 LID 设施及组合的峰控特性、容积型 LID 设施增量规模的峰控规律进行研究。结果表明, 容积型 LID 设施主要通过延时达到峰控效果, 渗透型 LID 设施主要通过整体产流削减达到峰控效果, 容积型 LID 设施峰控效果更为明显; 仅渗透型 LID 设施组合对 5 年及以上重现期降雨无明显的峰控效果, 搭配容积型 LID 设施后能够对重现期为 10 年以内的降雨达到 20% 以上的削峰率; 渗透型 LID 设施规模增加 60% 及以上时, 对重现期 50 年及以内的降雨削峰效果较为明显; 其规模增加 80% 及以上时, 基本能够保证重现期 50 年及以内开发后径流总量不超过开发前。研究结果旨在探索局部区域的积水内涝风险的解决途径, 为实际海绵城市子分区峰值径流控制设计提供理论参考。

**关键词:** 海绵城市; 子汇水分区; LID 设施; 峰值径流

**中图分类号:** TV121<sup>+</sup>.1; TU992

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)09-0073-04

## 1 引言

由于城市化的快速进程及过度的城市硬化面积使得降雨径流无法经由现有管线顺畅地排泄, 从而导致城市建成区域容易积水内涝、对雨水灾害韧性不够的现象, 而海绵城市的低影响发展方式正是克服这些问题的有效途径。近年来, 关于海绵城市降雨径流控制方面的研究已较多, 如杜颖恩等<sup>[1]</sup>比较了在汇水分区内不同的低影响开发系统的情况, 并就其产生的径流管理作用开展了探讨; 王雷等<sup>[2]</sup>利用雨洪模型探讨了产业园绿色屋顶布置产生的径流影响效果和降水之间的联系; 左凌峰等<sup>[3]</sup>以海绵城市项目为例, 探讨了不同 LID 设计方法的降雨径流容积和产流峰值效应; 葛有成等<sup>[4]</sup>通过对比研究了三种典型入渗模型下 LID 的雨水产流控制效应, 并归纳了其应用原理; 张金萍等<sup>[5]</sup>关于构建城市片区内涝模型, 研究并分析了极端雨水环境下管网排涝功能。尽管海绵城市总体建设工作已见成效, 但部分工程区域通过 LID 设计后仍出现了积水内涝现象。为此, 本文从海绵城市子汇水分区的设计基本思想入手, 采用了 SWMM 计算模型, 围绕在不同重现期下 LID 设施及组合的峰值径流控制能力及特征进行

了深入研究, 为缓解海绵城市子分区积水内涝问题提供了技术支撑。

## 2 研究方法

### 2.1 降雨过程合成

为保证研究子汇水分区内 LID 设施的降雨径流峰控水平符合实际需要, 本文选择芝加哥雨型进行人工降雨合成<sup>[6]</sup>。以研究地点所在的重庆巴南暴雨强度公式为基础, 以 2 h 的短时降雨(雨峰系数  $r=0.4$ )进行暴雨峰值径流相关研究。重庆巴南雨强公式<sup>[7]</sup>为:

$$q = 1\,898(1 + 0.867 \lg P) / (t + 9.480)^{0.709} \quad (1)$$

式中,  $q$  为工程设计雨强,  $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ;  $P$  为重现期, 年;  $t$  为降雨历时, min。

芝加哥雨型合成的降雨过程见图 1。

### 2.2 SWMM 计算模型

采用 SWMM 模拟 LID 设施对子分区雨水峰值径流的控制效果, 同时通过改进的 Horton 模型计算动力波, 以进一步提高计算结果的准确性。

#### 2.2.1 改进 Horton 模型

Horton 模型原始形式为:

$$f_p = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) e^{-k_d t} \quad (2)$$

式中,  $f_p$  为潜在入渗性能, mm/h;  $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$  分别为最低、最高入渗性能, mm/h;  $k_d$  为衰减常数,

收稿日期: 2023-03-21, 修回日期: 2023-04-24

作者简介: 陈泳帆(1988-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为海绵城市与绿色建筑技术, E-mail: 812579493@qq.com

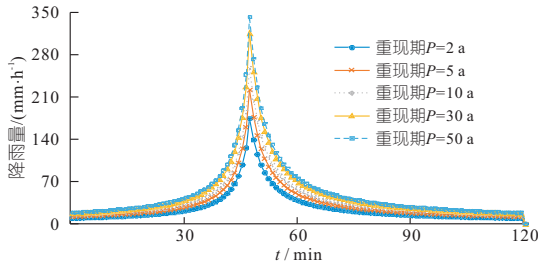


图 1 芝加哥雨型合成的 2 h 降雨过程

Fig. 1 Rainfall hydrograph on the synthesis of 2 h Chicago rain patterns

$h^{-1}$ ;  $t$  为入渗时长,  $h$ 。

为充分考虑土壤水饱和度及下渗衰减状况, 将式(2)积分, 改进 Horton 模型<sup>[8]</sup> 计算式为:

$$F(t_p) = \int_0^{t_p} f_p dt = f_{min} t_p + \frac{f_{max} - f_{min}}{k_d} (1 - e^{-k_d t_p}) \quad (3)$$

式中,  $F(t_p)$  为时刻  $t_p$  的累计下渗量, mm。

### 2.2.2 参数率定与验证

在计算峰值径流前, 首先进行模型参数率定。模型参数根据李媛媛<sup>[9]</sup> 对重庆地区地表径流及李鹏程等<sup>[10]</sup> 对雨水花园蓄滞效应的相关研究, 对子分区基本参数进行取值, 见表 1。LID 设施水文参数依照重庆地标进行取值, 见表 2。

表 1 子汇水分区基本参数<sup>[9,10]</sup>

Tab. 1 Basic parameters of sub-catchment area

参数	取值	参数	取值
子分区的总面积/ $m^2$	5 000	非透水部分洼地水深/mm	1.27
子分区原始透水率/%	20	透水部分洼地水深/mm	6.4
非渗透区域中无洼地蓄水率/%	25	最高入渗性能/ $(mm \cdot h^{-1})$	86
非透水下垫面阻尼	0.012	最低入渗性能/ $(mm \cdot h^{-1})$	12
透水下垫面阻尼	0.15	衰减常数/ $h^{-1}$	4

表 2 LID 设施关键参数<sup>[7]</sup>

Tab. 2 Critical parameters of LID facilities

参数类型	参数	取值	参数类型	参数	取值
雨水花园	持水深度/m	0.3	透水铺装	面层/m	0.13
关键参数	持水层表面阻尼	0.15	关键参数	渗透性能	360
	种植土厚度/m	0.3		孔隙比	0.15
	种植土渗透性能	23.4	绿色屋顶	表面阻尼	0.15
	砾石层厚度/m	0.2	关键参数	覆土/m	0.3
	砾石层孔隙比	0.5		排水板厚/m	0.03

注: 渗透性能单位为  $mm/h$ 。

以面积 5 000  $m^2$  的子分区(渗透下垫面率 20%)为验证范围, 参照重庆市地标中容积法<sup>[7]</sup> 对雨水花园进行规模计算。根据计算可得出, 在控制率分别为 65%、70%、75%、80%、85% 时, 雨水花园面积依次为 166. 20、198. 49、237. 99、290. 61、365. 98  $m^2$ 。取表 1、2 中水文数据进行模拟, 得出的控制率结果见表 3。由表 3 可知, 按照表 1、2 中水文数据取值进行雨水花园径流控制计算后, 可达到准确度较高的容积型 LID 模拟结果。

表 3 容积型 LID 设施模型参数验证

Tab. 3 Model parameters validation of volumetric LID facilities

海绵计算控制率/%	设计降雨量/mm	雨水花园控制容积/ $m^3$	子分区径流容积/ $m^3$	模型计算年径流总量控制率/%	偏差率/%
65	13. 60	50. 10	49. 55	65. 72	1. 01
70	16. 10	61. 74	61. 00	70. 85	1. 09
75	19. 10	74. 09	73. 10	76. 02	1. 17
80	23. 00	91. 45	90. 15	81. 16	1. 25
85	28. 40	115. 68	113. 80	86. 40	1. 33

以同样的方式对渗透型 LID 设施参数进行验证, 假设上述子分区中仅分别独立设置 20%~100% 比例的透水铺装或绿色屋顶, 其综合径流系数设计计算值与模拟计算值较为接近, 其偏差率在 2%~3. 5% 范围内。据此可判断按照表 1、2 中参数取值, 模拟计算可获得精确度较高的渗透型 LID 设施模拟结果。

## 3 结果与分析

### 3.1 单项容积型 LID 设施的峰控特性

以 5 000  $m^2$  的子分区为例, 在渗透型下垫面率取 20% 且未布置任何渗透型 LID 的前提下, 单项容积型 LID 设施(雨水花园)在重现期  $P=2$  a 时的子分区径流过程见图 2。

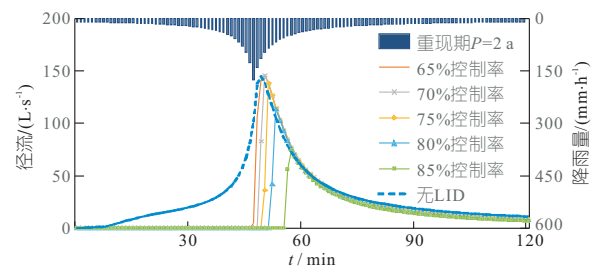


图 2 重现期  $P=2$  a 时容积型 LID 设施独立布置时的径流曲线

Fig. 2 Runoff hydrograph for single volumetric LID facility when recurrence interval  $P=2$  a

由图 2 可看出: ①径流峰值随控制率增加呈先升高后下降趋势, 在控制率较低时略有升高, 控制率为 80% 以上时有较为明显的削峰作用, 最大可削峰 49%。②增加雨水花园后, 每条径流过程线整体呈现三段式, 即无径流段、陡增段、持平段。陡增段为雨水花园蓄水达到溢流高度时, 径流突然达到该时段降雨强度的产流; 持平段与未增加雨水花园的过程线一致。③单项雨水花园的削峰表现为延时削峰效应, 即通过雨水花园控容推迟陡增时间到常规径流峰值后, 以达到削峰效果。

基于雨水花园对子分区径流曲线的典型共性特征, 分析不同重现期下雨水花园对子分区的峰控效应。通过对比分析发现, 此时雨水花园仅在

降雨重现期  $P \leq 5$  a 时具有削峰延时作用。图 3 为重现期  $P = 5, 10$  a 时单项雨水花园布置时的子分区径流峰控情况。由图 3 可看出,随着重现期的增加,容积型 LID 设施蓄满时间缩短,峰现时间前移,削峰效果逐渐变小。在  $P = 5$  a 时径流峰值最大可削减 23%,在  $P = 10$  a 时径流峰值最大仅削减 6%。

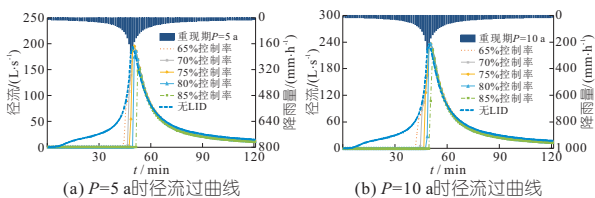


图 3 重现期  $P = 5, 10$  a 时单项雨水花园布置时径流曲线  
Fig. 3 Runoff hydrograph for single rain garden layout when recurrence interval  $P = 5$  a and  $P = 10$  a

### 3.2 单项渗透型 LID 设施的峰控特性

以相同子分区为分析对象,不设置任何容积型 LID 设施。在各区域内分别独立设置不同比例的透水铺装及绿色屋顶(两者未同时设置),其在  $P = 2$  a 时计算结果见图 4。

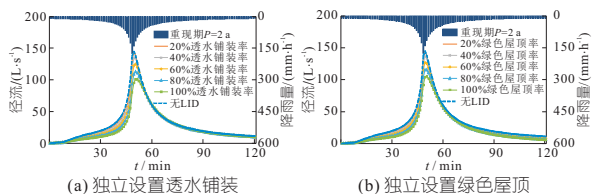


图 4 重现期  $P = 2$  a 时独立设置透水铺装及绿色屋顶时的径流曲线

Fig. 3 Runoff hydrograph for single permeable pavement and green roof when recurrence interval  $P = 2$  a

图 4 所示的径流曲线较无 LID 设施的径流曲线整体等形状上浮,径流峰值延迟效应不明显。随着渗透型下垫面比例增加,其削峰作用逐步加强;在硬屋面和硬质铺装分别占子分区面积的 20% 时,透水铺装率、绿色屋顶率 100% 时径流峰值可削减 31%,削峰能力明显低于雨水花园。

### 3.3 不同重现期下典型 LID 设施组合峰控效应

以相同子分区为分析对象,分析不同重现期下典型 LID 设施组合的径流峰控能力。由于实际海绵城市设计时,一方面,绝大多数项目均采用容积型及渗透型两种 LID 组合设计,且容积型 LID 设施通常需做到满足子分区 85% 的控制率要求;另一方面,海绵设计还需满足绿色建筑关于绿色屋顶及透水铺装的场地热环境基本要求(即 50% 的绿色屋顶率与 50% 的透水铺装率),因此 LID 设施组合峰控效果根据四种布置工况分析,以评估海绵工程设计实际峰控效果,见表 4。其中,工况 1 布置 50% 透水铺装 + 50% 绿色屋顶;工况 2 仅布置 85% 控制率雨水花园;工况 3 布置

表 4 四种 LID 设置工况对子分区径流峰控影响  
Tab. 4 The impact of four LID setting options on sub-catchment runoff peak control

布置 工况	重现 期/a	峰值径流 /(L·s <sup>-1</sup> )	削峰幅度 /(L·s <sup>-1</sup> )	削峰率 /%	峰延时 长/min
1	2	125	20	13.79	1
	5	180	15	7.69	1
	10	221	15	6.36	0
	30	290	15	4.92	0
	50	325	15	4.41	0
2	2	75	70	48.27	8
	5	150	45	23.08	4
	10	222	14	5.93	2
	30	291	14	4.62	1
	50	327	13	3.82	1
3	2	58	87	60.00	11
	5	138	57	29.23	5
	10	205	31	13.13	3
	30	290	15	4.92	1
	50	326	14	4.12	1
4	2	45	100	68.96	13
	5	122	73	37.43	6
	10	182	54	22.88	4
	30	280	25	8.20	2
	50	320	20	5.88	1

85% 控制率雨水花园 + 50% 透水铺装,工况 4 布置 85% 控制率雨水花园 + 50% 透水铺装 + 50% 绿色屋顶。

由表 4 可看出,随着重现期增大,四种工况对子分区径流削峰及延时效应逐渐减小,径流峰控能力逐渐降低。其中,工况 1 仅在  $P = 2$  a 时具有 10% 以上的削峰率能力且几乎无延时能力;工况 4 对子分区在  $P \leq 10$  a 时能达到 20% 以上的削峰率及 4 min 以上延时能力;当  $P \geq 30$  a 时,四种工况削峰能力几乎无差别,削峰率均在 10% 以下。模拟结果进一步说明,常规海绵城市 LID 组合设计可针对  $P \leq 10$  a 的降雨起到较为明显削峰效果,对于更高重现期暴雨则需增设容积型 LID 设施规模。

### 3.4 容积型 LID 设施增量规模的峰控规律

由于按照海绵城市基本设计指标要求所布置的 LID 设施规模仅针对中小雨产流有明显的控制作用,而难以对暴雨强度较大的峰值径流进行控制,因此在原海绵设计基础上增加容积型 LID 设施规模是一种较为有效的径流峰值控制手段。现分析容积型 LID 设施规模增量在 20% ~ 80% 时的峰值径流控制规律。以单项雨水花园在 85% 时的设施规模为基准并按比例进行增量,分析重现期分别在  $P = 2, 5, 10, 30, 50$  a 时的径流过程线,并在  $P = 50$  a 时额外增加 50% 的渗透型 LID 进行比对,见图 5。

由图 5 可看出:①随着雨水花园规模的增加,峰现时间逐步后移且峰值逐渐降低,随着重现期的增加峰现时间逐渐前移且峰值提高。②雨水花

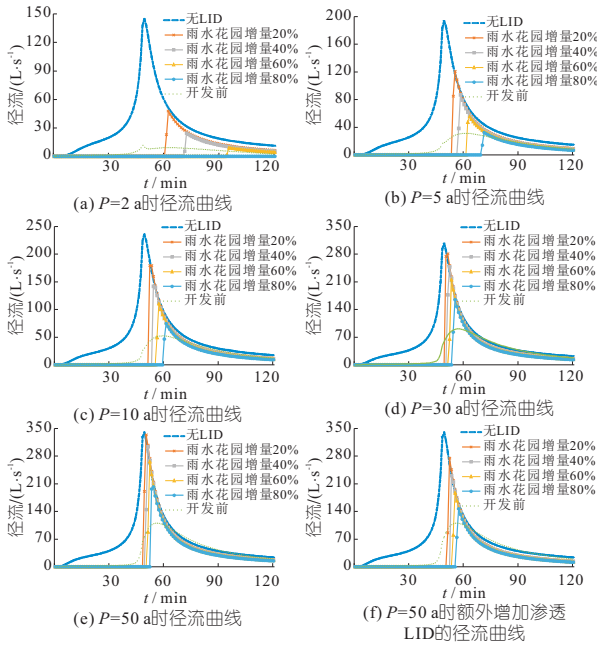


图 5 容积 LID 设施增量规模的峰控影响

Fig. 5 Peak runoff control impact of incremental scale of volumetric LID facilities

园规模增加 60%及以上对重现期  $P=50$  a 及以内的降雨均有较为明显的削峰效果。③仅在  $P=2$  a 时雨水花园规模增加 60%及以上时,开发后峰值产流才能恢复到开发前。④当雨水花园规模增加 80%及以上时,基本能够保证  $P=50$  a 及以内开发后径流总量不超过开发前。⑤当  $P=50$  a 时,雨水花园结合额外增加的渗透 LID 能明显提高子分区削峰与延峰效果。

## 4 结论

通过 SWMM 计算模型针对子汇水分区内各类 LID 设施的径流峰控特性研究,分析了不同重

现期下典型 LID 设施及其组合峰控特性及规律。研究发现,容积 LID 设施峰控效果明显高于渗透 LID 设施,且当暴雨强度较大时,可按相应规律增加设施规模并提高峰控效果。该研究可为实际海绵子分区设计提供指导性建议,从而提高局部区域抗积水内涝的韧性。

## 参考文献:

- [1] 杜颖恩, 侯精明, 马红丽, 等. 基于 SWMM 的 LID 设施空间格局优化模拟研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(19): 120-125.
- [2] 王雷, 张少松, 梁景坤, 等. 基于 SWMM 模型的绿色屋顶雨洪控制与效益分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(2): 65-69.
- [3] 左凌峰, 赵渔亨, 李继清. 典型海绵城市措施对雨洪过程的影响模拟[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(10): 42-49.
- [4] 葛有成, 唐双成, 单正清, 等. 不同入渗模型对 LID 措施效能评价的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 100-106.
- [5] 张金萍, 张朝阳, 左其亭. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 30-37.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇内涝防治技术规范: GB 51222-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017: 52-53.
- [7] 重庆市住房和城乡建设委员会. 低影响开发雨水系统设计标准: DBJ50/T-292-2018[S]. 重庆: 重庆市住房和城乡建设委员会, 2018: 44-72.
- [8] 贺娟, 梁小光, 温卫华, 等. SWMM 下渗模型算法改进研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 122-125.
- [9] 李媛媛. 基于 SWMM 的重庆主城区山地公园地表径流特征及低影响设计方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019: 1-82.
- [10] 李鹏程, 赵建利, 刘子苑, 等. 基于 SWMM 模型的雨水花园蓄滞效应模拟与评估[J]. 河北水利电力学院学报, 2019(1): 29-34, 55.

## Study on Peak Runoff Control Effect of LID Facilities Based on Sponge City Sub-catchment Area

CHEN Yong-fan<sup>1</sup>, ZHANG Hua-ting<sup>1</sup>, WU Xiao-lin<sup>2</sup>, LIU Ya-li<sup>1</sup>

(1. CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400039, China;

2. CCTEG Chongqing Engineering (Group) Co., Ltd., Chongqing 400042, China)

**Abstract:** In order to explore the solution to the risk of ponding and waterlogging in the sub-catchment area during sponge city design, SWMM modeling was used to study the peak runoff control characteristics of LID facilities and their combinations under different recurrence interval, as well as the peak runoff control laws of the incremental scale of volumetric LID facilities. The study shows that the peak runoff control effect of volumetric LID facilities is mainly achieved through peak time delay, while the peak runoff control effect of permeable LID facilities is mainly achieved through overall runoff reduction, and the peak runoff control effect of volumetric LID facilities is more significant; Only the combination of permeable LID facilities cannot significantly reduce peak runoff and delay peak time on a rainfall event with a recurrence interval of 5 years or more. When combined with volumetric LID facilities, it can achieve a peak runoff reduction rate of over 20% for rainfall with a recurrence interval of less than 10 years; When the scale of permeable LID facilities increases by 60% or more, the peak runoff reduction effect is more obvious for rainfall with a recurrence interval of 50 years or less; When its scale increases by 80% or more, it can basically ensure that the total runoff volume of post-development does not exceed which of pre-development with a recurrence interval of 50 years or less. The research results are aimed at exploring solutions to the risk of ponding and waterlogging in local areas, which provides theoretical reference for the design of peak runoff control in actual sponge city sub-catchments.

**Key words:** sponge city; sub-catchment area; LID facilities; peak runoff