

翁时超. 基于 SWMM 模型的海绵城市措施效果模拟分析——以坡地小区为例[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 166-173.

WENG S C. Simulation analysis of effectiveness of sponge city measures based on SWMM model; Case of a sloping landform community [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 166-173.

基于 SWMM 模型的海绵城市措施效果模拟分析——以坡地小区为例

翁时超*

(中国联合工程有限公司, 浙江杭州 310052)

摘要 【目的】海绵城市建设是我国当下大力推行的新型城市建设模式,旨在解决城市雨洪管理难题。为在海绵城市建设过程中充分发挥不同类型海绵城市措施的优势,探究不同类型海绵城市措施组合配置对建设区域内雨水径流的影响成为迫切的需求。【方法】以杭州市某新建坡地小区为例,将小区按地形情况、雨水管网分布、场地坡向以及绿地等因素概化入 SWMM 模型,模拟不同模式海绵城市措施对不同重现期设计降雨下水文水质过程影响。【结果】模拟结果:在重现期为 0.5 年的设计降雨情况下,采用低影响开发(LID)措施模式的年径流总量控制率较传统模式提升 40%左右,同时年径流污染控制率可以达到 80%左右;在重现期为 10 年的设计降雨情况下,LID 措施模式对小区的雨水控制能力不足,但在 LID 模式基础上增加大容积蓄水池时,径流峰值能得到较大的削减和峰现时间较大的延迟。【结论】研究表明:小区范围内采用 LID 措施模式可以在常规降雨时,较好地控制雨水径流及雨水面源污染;但在极端降雨情况下,仅采用 LID 措施模式对雨水的控制能力有限,需增设蓄水池才能有效控制雨水。研究结果可为海绵城市设计及管理提供一定的技术支持。

关键词 SWMM 海绵城市 雨水径流控制 低影响开发(LID)措施 蓄水池

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)02-0166-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.019

Simulation Analysis of Effectiveness of Sponge City Measures Based on SWMM Model; Case of a Sloping Landform Community

WENG Shichao*

(China United Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

Abstract [Objective] Sponge city construction is a new urban construction model promoted in China, aims at solving the problem of urban rainwater and flood management. In order to fully use the advantages of different types of sponge city measures in the process of sponge city construction, it is an urgent demand to explore the impact of different combinations of sponge city measures on rainwater runoff in the construction area. [Methods] A newly hillside residential area in Hangzhou was selected, the SWMM model was generalized according to topography, rainwater pipe network distribution, site slope and green space. The influence of different models of sponge city scheme on design rainfall hydrological and water quality processes in different return periods was studied in this paper. [Results] The simulation results showed that: Under the condition of design rainfall with a return period of 0.5 years, the volume capture ratio annual runoff under the low impact development (LID) measure model had increased by about 40% compared to the traditional model, and the annual runoff pollution control rate could reach about 80%. But when the design rainfall with a return period was 10 years, the LID scheme had insufficient rainwater control ability for the area but when a large-volume reservoir was added to the LID model, the peak flow could be greatly reduced and the peak flow rate can be delayed. [Conclusion] Research has shown that using LID scheme within a community can effectively control rainwater runoff and non-point source pollution during regular rainfall. However, in extreme rainfall situations, the ability to control rainwater using only LID measures is limited, and it is necessary to add a reservoir to effectively control rainwater. The research results can improve the technical support for sponge city design and management.

Keywords SWMM sponge city stormwater runoff control low impact development (LID) measure reservoir

[收稿日期] 2023-05-04

[通信作者] 翁时超(1995—),男,硕士,工程师,研究方向为建筑给排水技术、海绵城市设计,E-mail:wengsc@chinacuc.com。

随着我国城市化进程的加快,城市内不透水下垫面范围不断扩大,降雨形成的雨水径流量呈明显增大的趋势^[1-2]。加之,受全球气候变化的影响,极端降水灾害频发,直接导致了雨水径流无法得到有效控制,城市内涝灾害频发^[3-5]。日益严峻的城市内涝问题已经严重影响到城镇居民的生活及人员财产安全,控制雨水径流、缓解城市内涝问题已成为迫在眉睫的工作。

2013年12月,习总书记首次提出海绵城市建设的理念。2014年,《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》的正式发布代表着我国海绵城市建设工作的全面推进。2021年4月,住房和城乡建设部与多部门联合发布《关于开展系统化全域推进海绵城市建设示范工作的通知》,标志着我国海绵城市建设朝着系统化、全域化的方向不断前进。低影响开发(LID)措施是从源头控制洪涝径流的一种有效途径并在我国的海绵城市建设中得到广泛应用^[6]。在城镇的海绵城市建设中,通过生物滞留设施(bioretention)、植草沟(grass swale)、绿色屋面(green roof)、透水路面(porous pavement)等分散式措施的布置,构建与天然状态下功能相似的水文特性,从而达到提高城市防洪排涝减灾能力、改善城市生态环境、缓解城市水资源压力的目标^[7]。LID措施主要通过入渗、滞留、蓄水、过滤、生物吸附等机制削减径流峰值、延缓径流产生时间,同时达到去除径流污染物的功能^[8-9]。随着海绵城市的研究与实践,基于SWMM、MIKE URBAN等雨洪模型研究各项海绵城市措施对雨水径流等水文过程的影响成为热点^[10-11]。目前,许多研究集中在场地高差较小的平地小区,而对场地高差较大的坡地小区的相关研究较少。同时,基于SWMM模型研究不同LID措施对径流总量控制、径流污染控制及径流峰值影响的研究尚不多见。

本研究基于SWMM模型对坡地小区中海绵城市措施展开了分析,发现了不同海绵城市措施对径流总量控制、径流污染控制及径流峰值的影响,对坡地小区海绵城市建设及雨水控制具有科学意义与应用价值。

1 评价区域及相关资料

1.1 建设项目分析

本研究选取杭州市某新建居民小区为研究对象,充分考虑坡地小区地形并进行相应概化,基于

SWMM构建小区尺度的雨洪模型,定量分析不同海绵城市措施对小区径流总量控制、径流污染控制及径流峰值的影响。研究区域地处钱塘江下游,属于亚热带季风气候,夏季和冬季温差较大,年平均降雨为1454 mm,降雨量年分配不均,降雨主要出现在夏季汛期。根据相关文件的要求,本项目的设计年径流总量控制率不低于75%,综合雨量径流系数不宜大于0.6。

1.2 区域下垫面分析

研究区域平均坡度为5.77%,整体地势北高南低,是典型的山前坡地区域。小区用地面积为9.32 hm²,(1 hm² = 10 000 m²)其下垫面基本情况如图1所示,其中屋面约占32.44%,绿地约占41.46%,沥青路面约占12.40%,透水铺装约占12.96%,景观水体约占0.74%。综合径流系数为0.465。

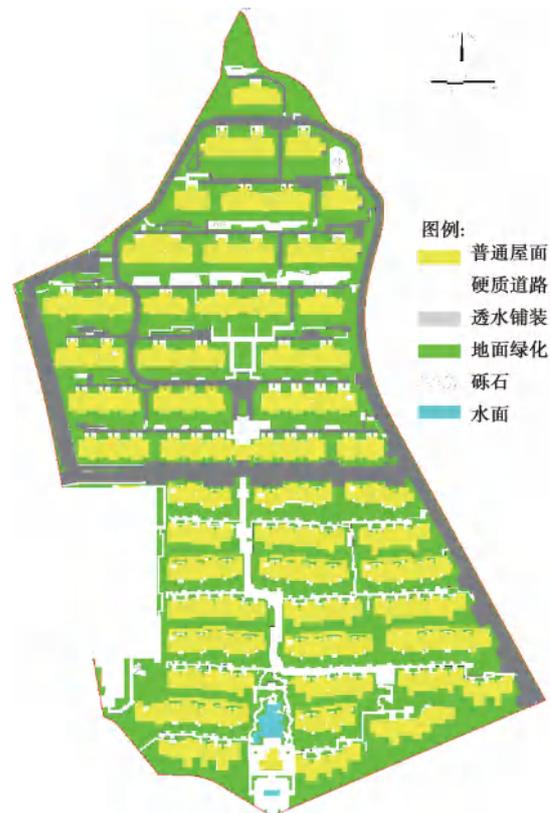


图1 下垫面分布

Fig. 1 Distribution of Underlying Surface

1.3 海绵城市措施

为评估海绵城市措施在本研究范围内实施的效果,本文分别研究了3种措施模式下场地径流情况:传统模式、LID模式、LID+蓄水池模式。传统模式主要利用绿地及铺装路面的下渗,降低雨水径流量;

LID 模式是在传统模式的基础上,将部分绿地改造成具有蓄水能力下凹绿地,通过截留部分地表雨水径流的方式达到控制径流总量的目的;LID+蓄水池模式是在 LID 模式的基础上,在雨水管网中设置蓄水池,通过截留雨水管道中的雨水达到控制径流总量的目的。

1.4 降雨资料分析

本研究采用芝加哥模型确定降雨曲线,根据《暴雨强度计算标准》(DB33/T 1191—2020),杭州地区的设计暴雨强度如式(1)。在 K. C 法和 P. C 法设定 2 h 暴雨雨型中,雨峰位于第 8 个 5 min 序位,即芝加哥雨型的雨峰位置系数为 0.33^[12],降雨时间间隔(T)=5 min,降雨历时 2 h;设计重现期取 0.5、1、5、10 年。经过模拟计算杭州市不同重现期 2 h 降雨强度分布,如图 2 所示。

$$q = \frac{1455.55 \times (1 + 0.958 \lg P)}{(T + 5.861)^{0.674}} \quad (1)$$

其中: P ——设计重现期,年;

T ——降雨时间间隔,min。

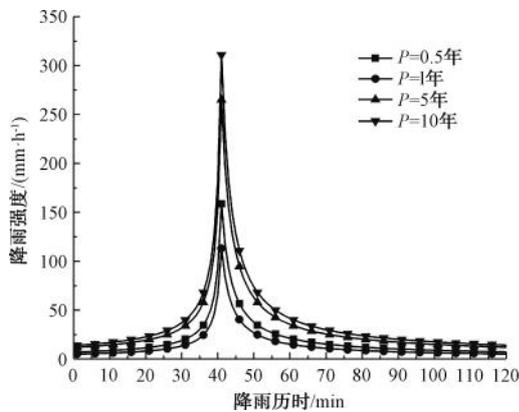


图2 不同重现期下 2 h 降雨强度分布

Fig. 2 Rainfall Intensity Distribution under Different Return Periods

由图 2 可知,0.5 年重现期 2 h 总降雨为 28.84 mm,1 年重现期 2 h 总降雨为 40.54 mm,5 年重现期 2 h 总降雨为 67.68 mm,10 年重现期 2 h 总降雨为 79.37 mm。降雨峰值出现在第 40 min 位置。

2 SWMM 模型构建

SWMM 是目前计算机模拟短历时降雨或年降雨事件下水表径流特征的主要模型之一。通过率定地理信息的数据,确定研究区域进行海绵城市措施布置及设定合理的水文参数、水力参数及水质

参数,SWMM 可在研究区域内进行海绵城市措施效果的模拟。SWMM 模拟结果的合理性和精确度取决于汇水分区的划分及基本参数的设置^[13]。在进行海绵城市措施模拟分析前,本文将对模型进行概化及参数的选定。

2.1 模型概化

根据本研究坡地小区的地形情况、雨水管网分布、场地坡向以及就地绿地等因素,将本坡地小区划分为南北 2 个排水分区(含有 2 个雨水排出口 OUT1、OUT2),其中北区整体平均坡度为 8.2%,南区整体平均坡度为 5.5%。根据楼栋位置及地面径流形式路径,本研究将每一栋住宅楼与其周围的绿化和铺装道路概化为一个汇水分区;将消防车道及道路旁绿化按道路长度概化为一个汇水分区。

本研究区域中,北区为 52 个子汇水分区(其中 N-S1~N-S24 为住宅范围汇水分区,S25~S52 为有坡度的小区道路汇水分区),54 条雨水管段,62 个管网节点,1 个出水口(OUT1);南区为 31 个子汇水分区(其中 S-S1~N-S25 为住宅范围汇水分区,S26~S21 为有坡度的小区道路汇水分区),37 条雨水管段,42 个管网节点,1 个出水口(OUT2),模型中地理信息概化结果如图 3 所示。

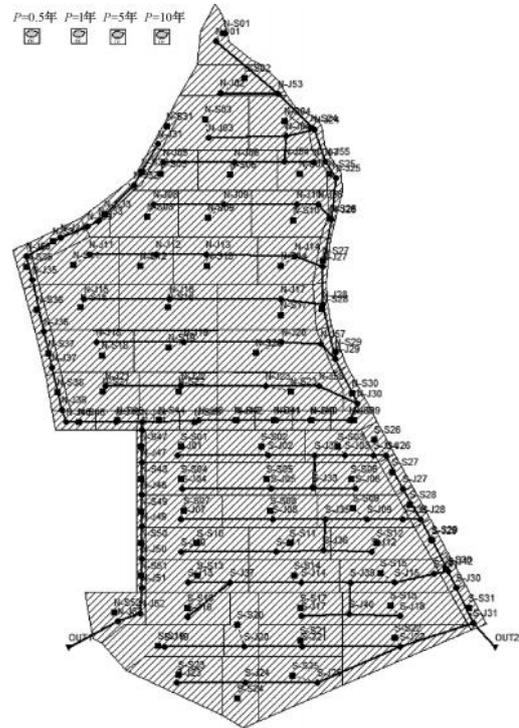


图3 研究区域概化

Fig. 3 Physical Model Generalization of the Study Area

2.2 模型参数设置

为研究海绵城市措施对坡地小区雨水控制及利用的影响,本文对已概化的 SWMM 模型进行参数的设定,其中汇水分区的水文参数如表 1 所示。由于可渗透区域(透水路面、透水铺装及绿地等)的径流系数随降雨历时的增加是不断减少的,为提高地面汇水产流的准确性,产流计算模型采用 Horton 下渗模型^[14-15],研究区域水力模型采用动态波模型进行演算。

表 1 水文水力参数值

Tab. 1 Hydrological and Hydraulic Parameters

模型分类	参数	参数值
产流模型	最大渗透速率/(mm·h ⁻¹)	76.2
	最小渗透速率/(mm·h ⁻¹)	3.18
	衰减常数/(h ⁻¹)	4
汇流模块	不渗透百分比	35%
	不渗透区曼宁系数	0.017
	渗透区曼宁系数	0.24
	不渗透区注蓄量/mm	2
	渗透区注蓄量/mm	20
管渠模块	非洼地蓄水不渗透性	25%
	曼宁系数(塑料管)	0.01

为研究不同海绵城市措施对雨水径流的影响,本文深化坡地小区内的下凹绿地与蓄水池的设置,具体参数如表 2 所示。

表 2 LID 设施设置参数

Tab. 2 Design Parameters of LID Facilities

LID 措施	面层类型	设计参数	参数值
下凹绿地	表面层	蓄水深度/mm	200
		曼宁系数	0.15
	结构层	厚度/mm	300
		孔隙率	50%
蓄水池		占地面积/m ²	10~60
		蓄水深度/mm	1000

SWMM 模拟水质主要从污染物累积量和污染物冲刷量 2 个方面进行模拟分析。其中污染物累积模型通过 3 个累积方程进行描述:幂函数累积、指数函数累积和饱和污染物累积函数。污染物冲刷模型通过 3 个冲刷方程进行描述:指数函数冲刷、曲线冲刷函数和平均浓度函数^[16]。本研究为模拟研究区域的年径流污染削减率,以总悬浮固体(TSS)指标

为研究对象,污染物累积模型采用饱和污染物累积方程如式(2),污染物冲刷模型采用指数函数冲刷方程如式(3)。

$$B = \frac{D_1 t}{D_2 + t} \quad (2)$$

其中: B ——污染物累积量,kg/hm²;
 D_1 ——累积增长量,kg/hm²;
 D_2 ——累积半饱和时间系数,d;
 t ——时间,d。

$$W = F_1 q^{F_2} B \quad (3)$$

其中: W ——污染物冲刷量,mg/L;
 F_1 ——冲刷系数,h/mm;
 F_2 ——冲刷指数;
 q ——流量,mm/h。

基于前人^[17-19]相关研究,确定了水质模型中相关参数,具体数值如表 3 所示。

表 3 水质模型参数值

Tab. 3 Parameters of Water Quality

项目区域分类	设计参数	参数值
绿化区域	累积增长量/(kg·hm ⁻²)	50
	半饱和系数/d	10
	冲刷系数	0.004
	冲刷指数	1.2
居住区域	累积增长量/(kg·hm ⁻²)	100
	半饱和系数/d	10
	冲刷系数	0.007
	冲刷指数	1.8
其他参数	降雨前干旱天数/d	5

3 核心指标计算与分析

本研究通过 SWMM 模型模拟了不同重现期设计降雨下,不同海绵城市措施模式对径流水文水质过程的影响。海绵城市设计的主要指标包括年径流总量控制率及年径流污染削减率。本项目中,根据芝加哥雨型进行短时降雨模拟,重现期为 0.5 年时的降雨量(28.85 mm)等同于项目区域的 83.2%年径流总量控制率的设计降雨量。本研究将从两方面进行模拟研究:低重现期($P=0.5$ 年)设计降雨情况下海绵城市措施对雨水径流控制效果;高重现期($P \geq 5$ 年)设计降雨情况下海绵城市措施对雨水径流控制效果。

3.1 低重现期下海绵城市措施对年径流总量控制率影响及分析

SWMM 中研究模拟了研究区域南区在重现期为 0.5 年设计降雨情况下,传统模式、LID 模式及 LID+蓄水池模式分别对南区出水口雨水排放量的影响情况。具体 OUT2 出口流量随降雨历时的变化情况,如图 4 所示。

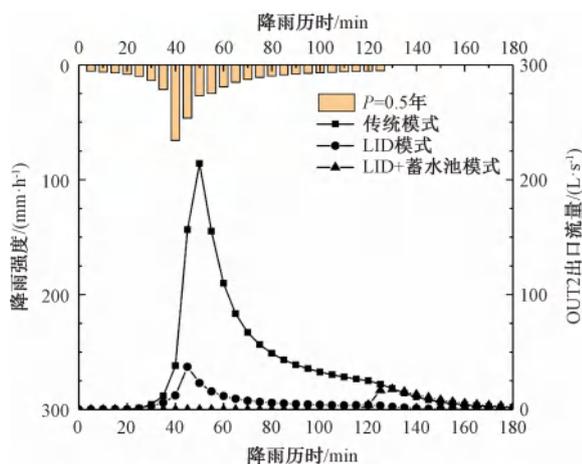


图 4 重现期为 0.5 年 OUT2 出口流量

Fig. 4 Outlet Flow of OUT2 with 0.5 Year Return Period

由图 4 可知,传统模式、LID 模式及 LID+蓄水池模式下出口 OUT2 处的排水量分别为 399、56 m³ 和 43 m³,即传统模式下的研究小区南区室外经过海绵城市措施改造建设后,雨水径流总量分别削减了 85.6%与 89.9%,南区的年径流总量控制率从传统模式下的 39.41% 分别提升到 80.44% 与 81.09%,满足区域年径流总量控制要求的 75%~85%。由图 4 可知,在 LID 模式基础上增加了 15 m³ 的蓄水池后,径流峰值延后 80 min 左右,这一延迟主要归因于蓄水池的调蓄功能。当雨水汇流产生的径流洪峰时,蓄水池能够容纳一部分径流,并逐渐利用其有效容积。只有当蓄水池内的容积得到充分利用后,才会发生蓄水池溢流并将雨水排出至排出口。

3.2 低重现期下海绵城市措施对径流污染削减率影响及分析

在进行雨水径流模拟的过程中,本文加入水质模型探究传统模式、LID 模式及 LID+蓄水池模式分别对南区出水口雨水污染负荷(以 TSS 计)的影响情况。具体 OUT2 出口污染负荷总量,如图 5 所示。

由图 5 可知,传统模式、LID 模式及 LID+蓄水池模式下出口 OUT2 处的污染负荷量别为 27.426、

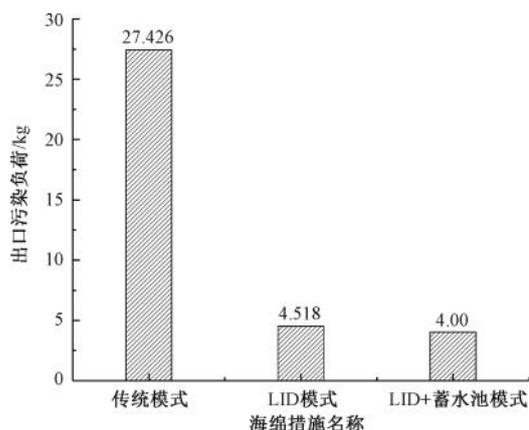


图 5 重现期为 0.5 年 OUT2 出口污染负荷

Fig. 5 Pollution Load Flow of OUT2 with 0.5 Year Return Period

4.158 kg 和 4.040 kg,即通过海绵城市措施,径流污染物削减率分别达到了 83.55%与 85.27%,满足区域年径流污染削减率控制要求的 60%。研究表明,对径流污染的削减主要由 LID 措施完成,蓄水池的增加对污染负荷的削减影响较小。这主要是由于 LID 设施对污染物浓度较高的初期雨水进行了截留与消纳,经过蓄水池调蓄排放的中后期雨水中污染物浓度较低。

3.3 不同重现期对雨水径流控制的影响

为探究海绵城市措施在不同降雨重现期设计降雨情况下对径流控制、污染控制及径流峰值控制的影响情况,本文分别模拟重现期在 0.5、1 年和 10 年情况下,研究区域排水出口的排水量、污染负荷及径流峰值特征,模拟结果如表 4 所示。

在低重现期降雨情况下,研究发现 LID 措施对出口排水量、污染负荷及径流峰值特征的影响都较大。研究区域出口排水量从传统模式的 399 m³ 削减到 56 m³,当增加蓄水池后可做到雨水零排放;由于低重现期下的暴雨强度较低,雨水对地面污染物的冲刷较弱,排出口的污染负荷较小;同时 LID 措施具有一定的调蓄容积,径流峰值得到了较大的削减,从传统模式下的 214.03 L/s 减小到 37.16 L/s;在 LID 措施模式基础上增加蓄水池模块,管道径流峰值的峰现时间随蓄水池调蓄雨水径流而大大延后。

与之相反,在高重现期降雨情况下,短时降雨强度大、降雨量大,导致研究区域的排水量及污染负荷比低重现期情况下要高许多,同时海绵城市措施的调蓄能力相较于较高的降雨量显得非常有限,其在出口流量及污染负荷控制方面的影响较弱。

表 4 不同重现期下排出口雨水
Tab. 4 Rainwater at Outlet under Different Return Periods

重现期/年	海绵措施模式	排水量/m ³	污染负荷/kg	径流特征		
				径流峰值/(L·s ⁻¹)	峰现时间/min	推延时间/min
0.5	传统模式	399	27.426	214.03	50	/
	LID	56	4.518	37.16	55	5
	LID+蓄水池	0	0	/	/	/
1	传统模式	570	42.129	302.43	50	/
	LID	141	7.796	52.26	55	5
	LID+蓄水池	40	2.395	17.74	130	80
5	传统模式	1 468	69.018	523.51	45	/
	LID	1 023	61.170	237.10	45	0
	LID+蓄水池	922	59.390	236.98	70	25
10	传统模式	1 919	69.573	632.06	45	/
	LID	1 474	66.308	411.19	60	15
	LID+蓄水池	1 372	65.656	409.54	60	15

3.4 蓄水池大小对雨水径流控制的影响

在重现期为 0.5 年的降雨情况下, 本文将有效容积为 10、40 m³ 和 60 m³ 的蓄水池分别代入模型

模拟, 模拟不同蓄水池有效容积的大小对海绵城市设计的影响, 模拟结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 在重现期为 0.5 年设计降雨情况

表 5 不同蓄水池容积下排出口雨水

Tab. 5 Rainwater at Outlet Under Different Reservoir Volumes

蓄水池容积/m ³	排水量		污染负荷		径流特性			
	水量/m ³	水量削减率	污染物质量/kg	污染削减率	径流峰值/(L·s ⁻¹)	径流峰值削减率	峰现时间/min	推延时间/min
0	56	0	5.397	0	37.16	0.00	45	0
10	43	23.21%	4.041	25.13%	23.89	35.71%	50	5
40	16	71.43%	1.443	73.26%	5.25	85.87%	85	40
60	0	100.00%	0	100.00%	0	100.00%	0	0

下, 增加的蓄水池容积大小与出口水量、污染物质量及径流峰值呈负相关, 及至所有的排出流量均被管网末端蓄水池收集。但比较各蓄水池容积情况下的年径流总量控制率及年径流污染削减率, 研究发现年径流总量控制率处于 80.44% ~ 83.23%, 年径流污染率均处于 77% 以上。当 LID 措施能够较好的控制径流时, 蓄水池容积的增加对年径流总量控制率的影响不大。

为探究在极端降雨情况下 (P=10 年) 蓄水池对暴雨径流的控制情况, 本文分别调整 SWMM 模型中蓄水池容积为 100、400、700 m³ 和 1 000 m³, 并模拟计算排出口的流量情况, 如图 6 所示。

研究表明: 在极端降雨情况下, 蓄水池的容积大小对管网的径流峰值与峰现时间的变化影响取决于蓄水池的容积是否超过出现径流峰值前的排水总量。当蓄水池容积为 100 m³ 时, 蓄水池容积小于径流峰值前的排水总量, 蓄水池对峰现时间及径流峰值无明显影响; 当蓄水池容积大于 400 m³ 后, 蓄水

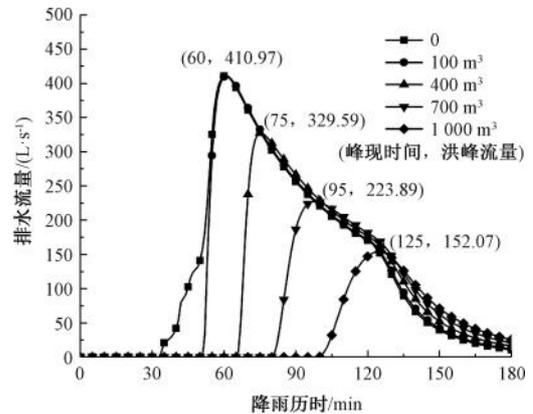


图 6 高重现期下不同蓄水池容积对排水流量影响

Fig. 6 Influence of Different Reservoir Volumes on Drainage Flow under High Return Period

池的容积增大能极大延迟峰现时间与降低径流峰值。

蓄水池的容积大小决定了在极端降雨情况下, 对雨水径流的控制, 但在工程实际设计过程中, 应综合考虑发生极端降雨的频率、设置大容积蓄水池的

经济技术情况。

3.5 场地坡度对雨水径流控制的影响

由于本研究区域根据整体坡度分为南北 2 个研究区域,其中北区整体平均坡度为 8.2%,南区整体

平均坡度为 5.5%。为研究坡度对雨水径流控制的影响,本文分别模拟南北 2 个研究分区的排水出口的排水量、污染负荷及径流特征,南区结果如表 4 所示,北区模拟结果表 6 所示。

表 6 不同重现期下排出口雨水
Tab. 6 Rainwater at Outlet under Different Return Periods

重现期/年	海绵措施	排水量/m ³	污染负荷/kg	径流特征		
				径流峰值/(L·s ⁻¹)	峰现时间/min	推延时间/min
0.5	传统模式	455	18.194	228.54	55	/
	LID	96	6.229	32.85	60	5
	LID+蓄水池	0	0	/	/	/
1	传统模式	652	45.985	334.27	50	/
	LID	138	10.395	51.38	55	5
	LID+蓄水池	37	2.665	10.39	110	60
5	传统模式	1 747	76.018	585.20	50	/
	LID	863	47.901	159.65	80	30
	LID+蓄水池	763	42.852	161.18	85	35
10	传统模式	2 297	73.750	708.48	50	/
	LID	1 303	71.182	269.12	75	15
	LID+蓄水池	1 203	66.655	268.72	75	15

研究分析表明,场地整体坡度对雨水径流控制情况的影响非常小。坡地小区在整体设计时会将小区分为多个不同标高的场地,排水支管沿等高线设置,排水干管沿较大坡度的车行道设置,排水干管之间通过跌水井减少管道坡度,因此排水管网内流速处于正常范围,排水管网的峰现时间不会有较大的提前。

4 结论

本文通过 SWMM 模型研究不同海绵城市措施模式在不同重现期下对坡地小区排出口水量、水质和径流峰值控制效果,模拟分析出口排水量、出口污染负荷、径流峰值及峰现时间等指标。结果表明:(1)低重现期降雨情况下,合理设置 LID 措施能够极大削减年径流总量控制率及年径流污染;(2)高重现期降雨情况下,LID 措施对暴雨径流的控制能力较弱,但大蓄水池的调蓄能力对排出口流量的影响较大;(3)实际工程中应结合现场情况及经济技术比较,确定蓄水池容积,避免常规降雨情况下,蓄水池容积的浪费。在类似坡地小区的建设中可结合使用 LID 措施与蓄水池达到有效控制雨水径流的目的。

参考文献

[1] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对

措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 7-17.

XU Z X, LI P. Progress on hydrological response to urbanization: Mechanisms, methods and solutions[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 7-17.

[2] 陈娜,向辉,马伯,等. 基于韧性理念的中国城市雨洪管理研究热点与趋势[J]. 应用生态学报, 2022, 33(11): 3137-3145.

CHEN N, XIANG H, MA B, et al. Research hotspots and trends of urban stormwater management in China based on resilience theory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(11): 3137-3145.

[3] 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.

ZHANG J Y, WANG Y T, HE R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491.

[4] 罗英杰,张娜,李琪,等. 基于 SWMM 的地表径流量与城市下垫面和降雨特征关系的空间分析——以中国科学院大学雁栖湖校区为例[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 27-38.

LUO Y J, ZHANG N, LI Q, et al. Spatial analysis of the effects of urban underlying surface and rainfall events on surface runoff based on SWMM: A case study of Yanqi Lake campus of University of Chinese Academy of Sciences [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(1): 27-38.

[5] 黄华兵,王先伟,柳林. 城市暴雨内涝综述:特征、机理、数据与方法[J]. 地理科学进展, 2021, 40(6): 1048-1059.

HUANG H B, WANG X W, LIU L. A review on urban pluvial

- floods: Characteristics, mechanisms, data, and research methods [J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(6): 1048–1059.
- [6] 孙艳伟, 魏晓妹, POMEROY C A. 低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 287–293.
- SUN Y W, WEI X M, POMEROY C A. Review of current research and future directions of low impact development practices for storm water [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 287–293.
- [7] 徐宗学, 李鹏, 程涛. 基于海绵城市理念的 LID 措施优化布局——以济南市黄台桥流域为例 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2022, 20(3): 552–562.
- XU Z X, LI P, CHENG T. LID optimization layout facilities in sponge city: A case study of Huangtaiqiao catchment in Jinan City [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(3): 552–562.
- [8] 吴盈盈, 余敦先, 夏军, 等. 典型 LID 措施对城市降雨径流过程影响 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2021, 19(5): 833–842.
- WU Y Y, SHE D X, XIA J, et al. Impact of LID on urban rainfall and runoff process [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(5): 833–842.
- [9] 麦叶鹏, 黄国如, 解河海, 等. 基于 Hydrus-1D 模型的 LID 措施雨水径流控制效应研究 [J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 811–822.
- MAI Y P, HUANG G R, XIE H H, et al. Study on rainwater runoff control effect of LID measures based on Hydrus-1D [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7): 811–822.
- [10] 陈言菲, 李翠梅, 龙浩, 等. 基于 SWMM 的海绵城市与传统措施下雨水系统优化改造模拟 [J]. *水电能源科学*, 2016, 34(11): 86–89.
- CHEN Y F, LI C M, LONG H, et al. Storm-water system simulation optimization of sponge city and traditional measures based on SWMM model [J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(11): 86–89.
- [11] 李春林, 刘森, 胡远满, 等. 基于暴雨径流管理模型 (SWMM) 的海绵城市低影响开发措施控制效果模拟 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2405–2412.
- LI C L, LIU M, HU Y M, et al. Simulation on the control effect of low impact development measures of sponge city based on storm water management model (SWMM) [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2405–2412.
- [12] 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.
- ZHU Y P. Selection of design rainfall pattern: Case of Hangzhou [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(1): 94–96.
- [13] 明瑞平, 谢艾利. 基于 SWMM 的海绵城市建设效果评估方法研究 [J]. *市政技术*, 2021, 39(6): 110–112.
- MING R P, XIE A L. Research on evaluation method of sponge city construction based on SWMM [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2021, 39(6): 110–112.
- [14] 潘若平. LID 组合措施在杭州低影响开发区项目中的应用研究——基于 SWMM 模型 [J]. *工业用水与废水*, 2021, 52(2): 43–47.
- PAN R P. Research on application of LID combined measures in low impact development zone of Hangzhou——based on SWMM model [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2021, 52(2): 43–47.
- [15] 苏东霞, 吕放放, 刘学锋, 等. 北京某区域低影响开发措施实施效果分析 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(3): 110–115.
- SU D X, LÜ F F, LIU X F, et al. Analysis on implementation effect of low impact development measures in a region of Beijing [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(3): 110–115.
- [16] 孙许. 基于 SWMM 水质模型的某水库上游河流水质状态演化特征模拟应用研究 [J]. *水利科学与寒区工程*, 2021, 4(1): 19–24.
- SUN X. Research on simulation application of water quality state evolution characteristics at upstream of a reservoir based on SWMM water quality model [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2021, 4(1): 19–24.
- [17] 谭明豪, 姚娟娟, 张智, 等. 基于 Morris 的 SWMM 水质参数灵敏度分析与应用 [J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(6): 117–122.
- TAN M H, YAO J J, ZHANG Z, et al. Analysis and application of sensitivity of water quality parameter based on SWMM of Morris [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(6): 117–122.
- [18] 陈曦, 熊鸿斌, 杜浩强, 等. 基于 SWMM 的某市政道路降雨径流和水质分析 [J]. *合肥工业大学学报 (自然科学版)*, 2022, 45(7): 967–973.
- CHEN X, XIONG H B, DU H Q, et al. Rainfall runoff and water quality analysis of a municipal road based on SWMM [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2022, 45(7): 967–973.
- [19] 陶文华, 李元松, 冉小青, 等. 基于暴雨洪水管理模型的海绵道路非点源污染负荷削减效果评估 [J]. *武汉工程大学学报*, 2022, 44(2): 219–225.
- TAO W H, LI Y S, RAN X Q, et al. Effect assessment of non-point source of pollution load reduction on sponge road based on storm water management model [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2022, 44(2): 219–225.