

Study on the Simulation and Evaluation of LID Adaptation Measures Based on SWMM

Yuntao Wang¹, Hao Wang¹, Meng Wang², Yi Wu¹, Haixing Liu¹, Hexun Huang^{3,4}

¹School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

²Dalian Water Affairs Group Co., Ltd., Dalian Liaoning

³Shenzhen Water Group, Shenzhen Guangdong

⁴Shenzhen Municipal Wastewater Treatment and Recycling Engineering Laboratory, Shenzhen Guangdong

Email: ytwang@dlut.edu.cn

Received: Dec. 7th, 2019; accepted: Dec. 20th, 2019; published: Dec. 27th, 2019

Abstract

In the context of rapid urbanization and frequent extreme rainstorm, many cities in our country frequently suffer from waterlogging disasters. Low impact development is a new urban flood management idea, which reduces the impact of urbanization by reducing rainfall runoff and brings obvious effects on improving urban waterlogging. An urban area in Changsha is taken as an example in this paper, the current drainage capacity of drainage pipe networks and five LID reconstruction schemes are simulated and evaluated based on SWMM model, and the effects of different LID reconstruction schemes are analyzed with AHP method. The results show that different degrees of overflow occur for 59% of the nodes under the 50-year rainfall, and the total amount of node overflow can reach 126,041 m³. LID schemes can help to reduce the amount of node overflow and alleviate urban waterlogging disaster. The first scheme is the best scheme for flood control and drainage benefits, the second scheme is the best scheme for cost benefits, and the third scheme is the best scheme for social benefits. Considering the weight values of drainage benefit, cost benefit and social benefit, the calculation results show the third scheme is the best one. This study can guide the selection of LID reconstruction schemes and provide ideas for urban waterlogging disaster reduction.

Keywords

Urban Waterlogging, SWMM, LID, Analytic Hierarchy Process

基于SWMM的LID改造措施模拟与评估研究

王运涛¹, 王昊¹, 王猛², 吴仪¹, 刘海星¹, 黄河洵^{3,4}

¹大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连

²大连市水务集团有限公司, 辽宁 大连

³深圳市水务(集团)有限公司, 广东 深圳

⁴深圳城市污水处理与再生利用工程实验室, 广东 深圳

作者简介: 王运涛, 男, 博士后, 主要从事城市洪水模拟研究。

Email: ytwang@dlut.edu.cn

收稿日期: 2019年12月7日; 录用日期: 2019年12月20日; 发布日期: 2019年12月27日

摘要

在城市化快速发展和极端暴雨天气频发的背景下,我国很多城市频频遭遇暴雨内涝灾害。低影响开发是一种新的城市雨洪管理理念,它是通过减少降雨径流来降低城市化带来的影响,对改善城市内涝现象有明显的效果。本文以长沙市某城区为例,基于SWMM模型对该研究区的排水管网现状和5种LID改造方案进行模拟评估,并采用层次分析(AHP)法对比分析不同LID改造方案的效果。结果表明:在50年一遇的降雨情境下59%的管井节点发生了不同程度的溢流现象,其溢流总量可达126,041 m³; LID改造方案可以有效减少管井溢流,缓解内涝灾害;其中改造方案一为防洪排涝效益最优方案,方案二为成本效益最优方案,方案三为社会效益最优方案;综合排涝效益、成本效益和社会效益三个方面的权重比例,通过计算得到方案三为最优改造方案。该研究可以指导城市LID改造措施选取,有助于缓解城市内涝灾害。

关键词

城市内涝, SWMM, LID, 层次分析法

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化的快速发展,城市不透水面积大幅度增加导致下垫面的渗透能力减小,并且极端暴雨天气频繁出现,使得“城市看海”现象频频发生,给城市居民造成巨大的生命财产损失[1]。有数据统计,2016年河北省邢台市发生了特大洪涝灾情,21个县市区受灾,死亡35人,失踪12人,直接经济损失68.97亿元[2];2017年陕西省有6个市受到了洪涝灾害的影响,56.8万人受灾,2.6万余间房屋损坏,直接经济损失达90.1亿元[3];2019年受台风“利奇马”的影响,我国浙江、江苏、山东省的多个城市发生了严重的洪涝灾害,大量的交通、通讯、供电、供水设施被严重损坏[4]。

传统灰色排水的发展理念存在建设成本高、效果有限等不足,已经无法满足现代城市可持续发展的需要。为此,国内外学者致力于寻求更为有效的排水措施来应对城市洪涝问题。1987年,“雨洪最佳管理措施”一词最早出现在美国的《清洁水法》修正案中,指的是通过设置雨水湿地、雨水池塘、渗透设施等来蓄滞雨水以达到管理雨水资源的目的[5][6]。1990年,美国环境资源署在雨洪最佳管理措施的基础上提出了低影响开发(LID),该理念能从源头对降雨径流进行管理,从而综合缓解内涝、水污染等城市水问题。LID措施被认为是比传统排水系统更可持续的城市雨水管理方案,实践证实其在控制污染、充分利用雨水资源以及促进经济效益增长方面效果明显[7][8]。英国建立了可持续城市排水系统(SUDS)来减少城市内涝、控制排水造成的水体污染[9]。澳大利亚为了更好地实现雨水资源利用、雨洪控制及水质控制,提出水敏感性城市设计(WSUD)来改进传统开发措施[10][11]。德国、新加坡、瑞典等国家的雨洪管理技术也已达到了先进水平[6]。例如,2015年Baek等[12]利用SWMM模型进行仿真,对如何选择生物滞留池、雨水桶、下凹式绿地、透水铺装等LID设施的合适尺寸进行了研究;2016年,Daniel等[13]人将SWMM与ArcGIS耦合模拟并分析了西班牙多诺斯蒂亚(Donostia)的可持续城市排水系统

与传统排水系统在城市防洪中的效果,结果证明了可持续城市排水系统能有效减少径流量。2017年, Kyle 等[14]对 LID 的应用和功能进行了综述,详细介绍了绿色屋顶、透水铺装等典型 LID 设施的结构、费用、缺点等。

然而,我国对雨水的管理相对于国外起步较晚。随着国外低影响开发理念的传播和发展,越来越多的国内学者重视将城市发展与生态建设相结合,以降低暴雨径流并提高雨水利用率。例如,2009年,车伍等[15]提出了低影响开发绿色建筑体系来实现城市雨水的高效回收利用并分析了 LID 理念带来的效益;2015年,牛帅等[16]以天津大学新校区为例,分析讨论了 LID 设施对城市洪水的控制效果;2017年, XIE 等[17]基于二维模型 MIKE URBAN 模拟了上海杨浦区不同重现期、不同历时的设计暴雨下排水管道的水力负荷并基于全生命周期成本评价法对 LID 设计方案进行评价,结果表明在长历时降雨事件中,雨水桶、透水混凝土与绿色屋顶组合的效果最好。我国在 2012 年 4 月首次提出了“海绵城市”的概念,即城市在适应环境变化和应对自然灾害时能够像海绵一样具有良好的弹性;2013 年 12 月,习总书记强调要建设自然存积、自然渗透、自然净化的海绵城市。此后,全国各试点城市在相关部门的指导下陆续开展当地的海绵城市建设,从而达到综合控制、利用水资源的目的[18]。然而我国关于城市 LID 改造措施的评估相对较少,尤其是针对 LID 组合改造方案优选的研究,难以支撑目前国家海绵城市建设需求。因此,开展 LID 改造措施模拟与评估的研究是有必要的,其对于指导海绵城市建设具有重要的现实意义。

本文以湖南省长沙市的某城市片区为研究对象,基于 SWMM 构建降雨径流模型,对研究区域 50 年一遇降雨条件下的排水管网现状以及初选的五种 LID 改造方案对雨水径流量、洪峰流量等的控制效果进行模拟,并采用层次分析法选择较优的 LID 组合改造方案。该研究旨在缓解城市内涝灾害,为城区 LID 设施改造的规划与设计提供参考。

2. 研究区域概况及资料

2.1. 区域概况

长沙市(东经 111°53'~114°5',北纬 27°51'~28°40')位于湖南省东部偏北,处于湘江下游和长浏盆地西缘。2017 年,长沙市的城市化率达到 77.6%,城市化水平较高。长沙市属亚热带季风湿润区,年均气温 17.2℃,年平均降水量 1423 mm,降水充沛。本文研究区域位于长沙市东部,总面积为 3.76 km²,东邻浏阳河,其位置如图 1 所示。



Figure 1. Location of study area
图 1. 区域位置

2.2. 地形概况

研究区 10 m 精度的 DEM 数据及土地利用类型数据如图 2 所示。研究区域的最高高程为 72.8 m，最低为 28.6 m，地势由东向西呈升高趋势。土地利用类型主要包括住宅、商业用地、学校、路网等 9 种。

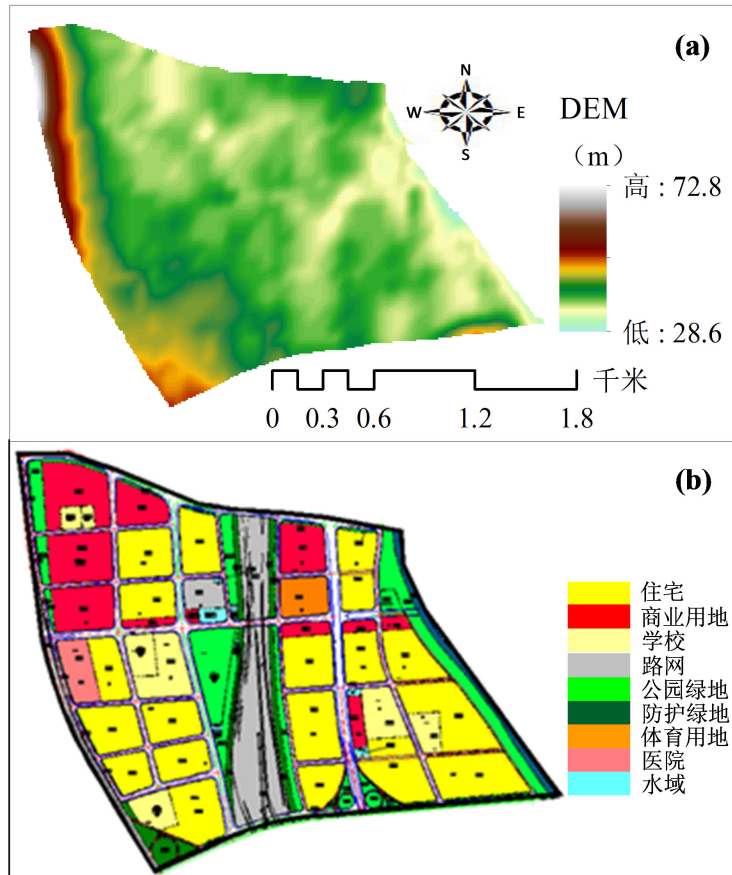


Figure 2. DEM data and Land use data of the study area
图 2. 研究区域 DEM 数据和土地利用数据

2.3. 降雨资料

收集研究区域 1970~2017 年的降雨数据并进行频率分析，采用同频率分析法得到重现期为 50 年一遇的设计降雨，如图 3 所示。该设计降雨的降雨量为 260 mm，降雨强度峰值为 132 mm/h。

3. 研究方法

3.1. SWMM 模型

目前国内外主要有几十种城市排涝系统模拟模型，其中 SWMM、InfoWorks、MOUSE 三个模型因集水文模块、水力模块与水质模块于一身并对场次序列与长序列均能够执行模拟而被广泛应用[19]。SWMM 模型不仅具备 LID 模块，而且供用户免费使用，可对模型进行二次开发，操作简便。因此本文采用该模型来完成排水管网现状和 LID 效果的模拟研究工作。

SWMM (Storm Water Management Model)是由美国环保署(Environmental Protection Agency)于 20 世纪 70 年代开发的暴雨径流模型，主要应用于城市排水、防涝工程的规划、设计与管理[20]。

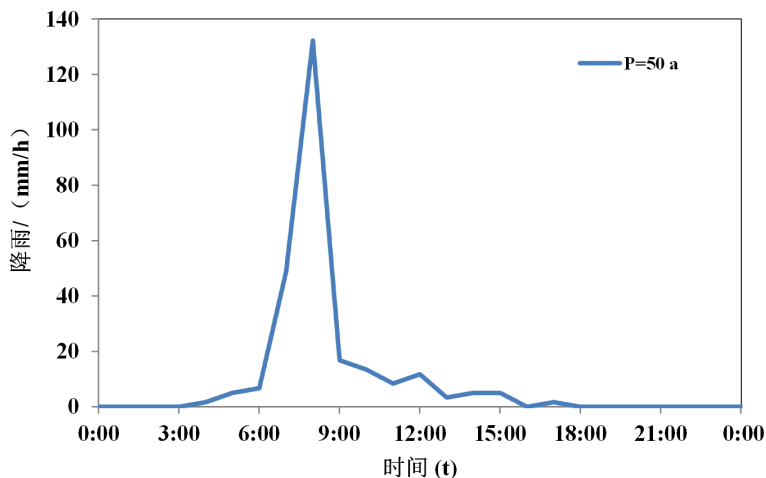


Figure 3. Design rainfall of 50-year return period
图 3. 50 年一遇设计降雨

3.1.1. 模型原理

1) 产流原理

产流是降雨扣除下渗、植物截留等的损失后形成径流的过程。SWMM 模型提供了 Horton、Green-Ampt、SCS-CN (曲线数) 三种方法来计算下渗损失。本研究采用在城市小流域降雨径流模拟中常用的 Horton 法。

2) 汇流原理

汇流是净雨汇入河网并通过河网汇集到出口断面的过程，可分为坡面汇流、管网汇流与河网汇流过程。SWMM 模型对于模拟管道汇流过程提供了恒定流模式、运动波与动力波三种方法。由于动力波模拟法可以进行准确有效的模拟计算，故本研究选择动力波法。

3.1.2. 管网概化结果

根据管网资料和下垫面的构成情况，将研究区域概化成 85 个子汇水单元，85 个汇水节点，89 段排水管道、2 个排放口和 2 座泵站。如图 4 所示。

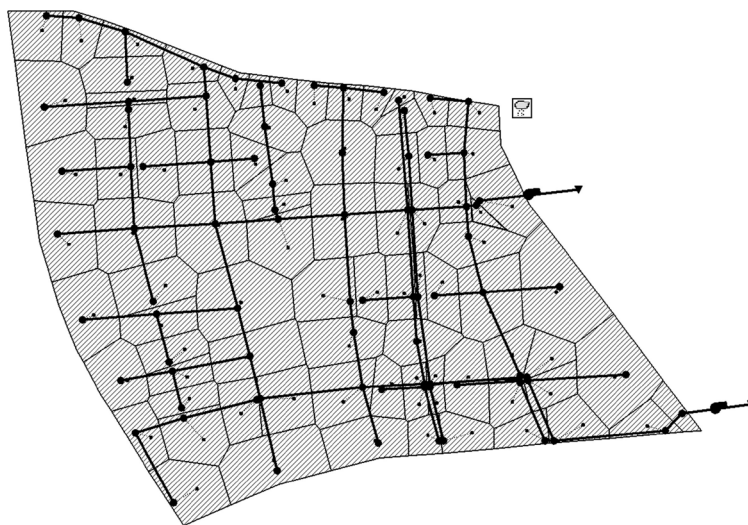


Figure 4. Drainage pipe network diagram for the study area
图 4. 研究区域排水管网概化图

分析 SWMM 模型各参数的敏感性,发现 N-imperv、Max.infil.Rate、Min.infil.Rate 和 Decay constant 这四个参数对模型模拟结果的影响较为明显。基于董欣等[21]人的研究,参数 N-imperv 的值分布在区间 0.012~0.025 内的频率最高。为了减小参数选取对模型不确定性的影响,N-imperv 取 0.012~0.025 区间的均值 0.018。根据参考文献[22],Max. infil. Rate、Min. infil. Rate 和 Decay constant 的值分别取为 76.2、3.81 和 2.5。由于研究区域无实测径流资料,本文根据刘兴坡[23]在《基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法》一文中提出的方法来验证模型,结果表明本文构建的模型参数设定是合理的。

3.2. LID 场景设定

选择低影响开发设施应因地制宜,充分考虑城市下垫面条件、空间因素以及其他特殊因素。经过多个指标的筛选,初步选择透水铺装、绿色屋顶、下沉式绿地、生态草沟、生物滞留设施及雨水储存设施共 6 种 LID 设施作为研究区的 LID 设施。结合研究区域的实际情况设计五种 LID 组合方案,具体如表 1 所示。

Table 1. LID scheme design
表 1. LID 方案设计

方案一		方案二		方案三		方案四		方案五	
LID 设施	面积/ha	LID 设施	面积/ha	LID 设施	面积/ha	LID 设施	面积/ha	LID 设施	面积/ha
透水铺装	118.73	透水铺装	118.73	透水铺装	118.73	透水铺装	118.73	透水铺装	118.73
绿色屋顶	24.65	生态草沟	14.04	绿色屋顶	24.65	绿色屋顶	24.65	雨水储存	24.60
雨水储存	24.60	雨水储存	24.60	生物滞留设施	30.10	生物滞留设施	30.10	生物滞留设施	30.10
下沉式绿地	106.39	下沉式绿地	106.39	下沉式绿地	106.39	生态草沟	14.04	生态草沟	14.04

3.3. 层次分析模型构建

层次分析法(Alytic Hierarchy Process)是 20 世纪 70 年代初由美国运筹学家 T. L. Saaty 教授提出的,简称 AHP [24]。其优点是使复杂问题层次化、条理化并且计算简便,因而在设计管理与风险投资等多个领域得到了广泛的应用[25] [26]。

构建 AHP 模型评价五种 LID 组合方案。将最优方案作为目标层要素,其评价指标作为中间层要素,五种 LID 方案作为最底层要素。确定各层次的两两判断矩阵,采用归一化方法给矩阵赋值。

综合评价分析的 AHP 模型见图 5。选取径流峰值、溢流节点数、排放量、径流系数、总溢流量评价方案防洪排涝效果,基于生态环境和社会公众效益评价方案的社会效益,并根据全寿命周期成本分析成本效益。其中,基于生态环境效益、社会公众效益的优选参考《海绵城市建设技术指南》等相关文献。全寿命周期成本包括年均建设成本及年均维护成本,参考相关文献[27],并假设 LID 改造方案的使用年限为 30 年。计算得到的建设和维护成本价格见表 2。

Table 2. Average annual cost price of construction and maintenance for LID schemes
表 2. 各 LID 方案年均建设与维护成本价格

费用(万元)	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
年均建设成本	1531.51	1156.16	1392.42	1850.87	1743.71
年均维护成本	2292.96	1380.48	3904.12	3871.85	3097.02

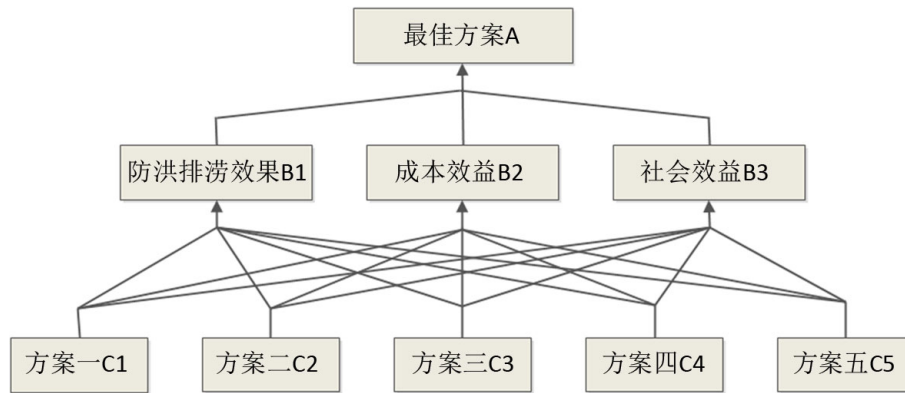


Figure 5. Analytic hierarchy process model for comprehensive evaluation analysis
图 5. 综合评价分析的 AHP 模型

4. 结果分析

4.1. 现状评估

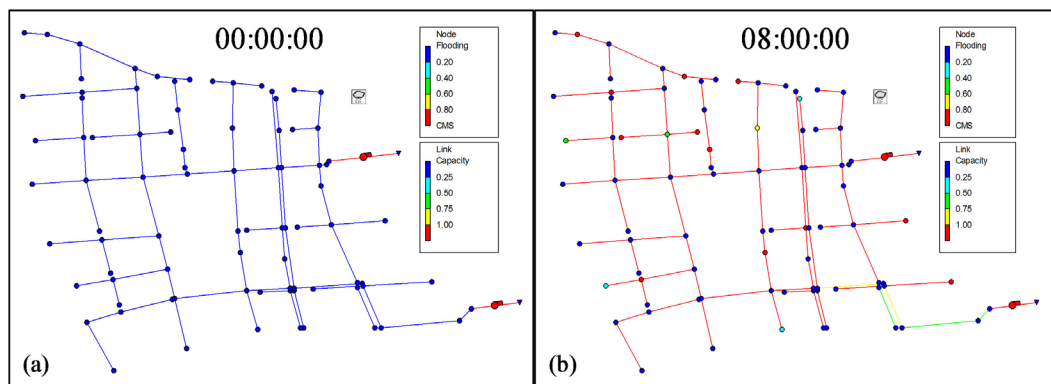
在 50 年一遇设计降雨情境下，研究区域现状模拟结果见表 3。研究区域的溢流节点数量占总结点个数的比例为 59%，溢流总量达到了 $1.26 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。节点大面积、长时间的溢流会形成大量积水，会严重威胁城市行人、车辆等的安全。

50 年一遇设计降雨情境下管网的排水能力变化过程如图 6 所示。其中图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)和图 6(d)分别代表了第 0 h、第 8 h、第 12 h 与第 24 h 的管道状态，用深蓝色到红色的变化表示管道超载程度和节点溢流程度的递增变化过程。图 6(a)为模拟的初始时刻，结果显示排水系统尚未发生节点溢流和管道超载；图 6(b)显示几乎所有管道超载，呈现红色；图 6(c)显示管道超载减弱，个别管道发生超载；图 6(d)为降雨过程的结束时刻，前期的溢流也已经排出，所有管段颜色恢复至蓝色。

Table 3. Simulation results of the current situation

表 3. 现状模拟结果

降雨量(mm)	系统径流总量(10^5 m^3)	系统排放总量(10^5 m^3)	系统径流峰值(m^3/s)	下渗量(10^5 m^3)
260	8.17	6.89	100.55	1.28
径流系数	节点溢流个数	节点溢流总量(10^5 m^3)	管道超载个数	超载管道占总管道百分比%
0.835	50	1.26	84	94
超载时间 0~10 min (个)	超载时间 10~60 min (个)	超载时间 60~120 min (个)	超载时间 120~180 min (个)	超载时间 > 180 min (个)
2	8	50	15	9



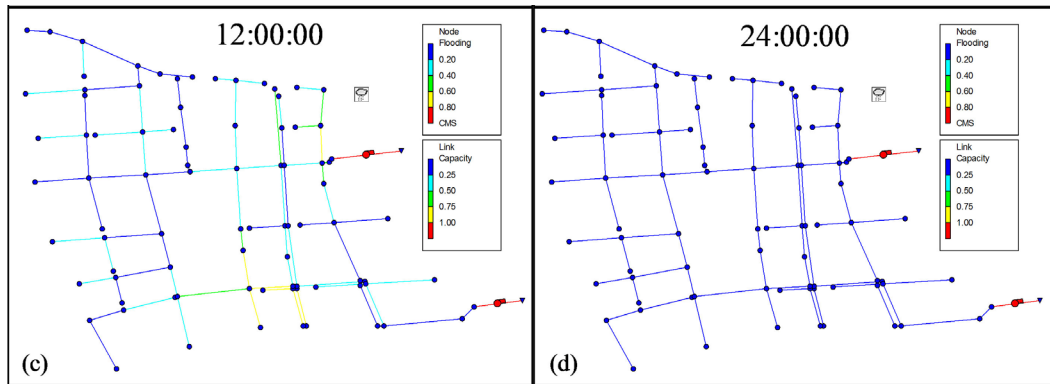


Figure 6. Overflow of pipes and nodes at different times
图 6. 不同时刻管道超载、节点溢流情况

4.2. LID 方案效果评估

利用 SWMM 模型中的 LID 模块模拟五种 LID 组合设计方案的效果。模拟结果见表 4。

Table 4. Simulation results of different schemes
表 4. 不同方案模拟结果

方案	改造前	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
系统排放总量(10^5 m^3)	6.89	3.05	3.24	3.16	4.43	4.31
径流系数	0.84	0.30	0.34	0.31	0.45	0.45
径流峰值(m^3/s)	100.55	68.70	71.63	62.41	64.08	64.04
下渗量(10^5 m^3)	1.28	3.50	3.53	5.18	3.73	3.73
管道超载个数(个)	84	53	66	56	69	69
节点溢流个数(个)	50	21	25	25	23	21
节点溢流总量(m^3)	126041	61	88	60	82	73
超载时间 0~10 min (个)	2	18	25	20	22	21
超载时间 10~60 min (个)	8	25	31	26	29	31
超载时间 60~120 min (个)	50	10	10	10	18	17
超载时间 120~180 min (个)	15	0	0	0	0	0
超载时间 > 180 min (个)	9	0	0	0	0	0

从各个方案对系统排放总量削减效果的角度来看，方案一 > 方案三 > 方案二 > 方案五 > 方案四。方案一对研究区域排放总量的优化效果优于方案三是因为方案一中的雨水储存设施对雨水蓄滞能力的上限大于生物滞留设施。即当降水量达到生物滞留设施的滞蓄上限时，方案一中的雨水储存设施仍能继续收集雨水，缩减总排放量；从径流系数削减的角度分析，方案优越性的大小顺序依次为方案一 > 方案三 > 方案二 > 方案四 = 方案五；在削峰效果方面以及下渗量的增加率方面，方案三均要优于其他四种方案。

可以看出，五种方案都能有效地减少超载管道的数量并缩短管道的超载时间。所有 LID 方案均可有效地将管道的超载时间控制在 2 h 之内。在节点溢流削减方面，五种 LID 方案的效果要更加明显。相比于改造前，五种 LID 方案的溢流节点均可减少 50% 以上；对于溢流总量，五种 LID 方案均将节点溢流总量缩减至 88 m^3 之内，与之前 $126,041 \text{ m}^3$ 的溢流量相比，LID 方案效果明显。综上所述，低影响开发理念在缓解城市洪涝问题上效果良好。

4.3. 方案优选评估

基于层次分析法分别构建防洪排涝效果、成本效益、社会效益以及综合评价模型。

1) 基于防洪排涝效果的 LID 方案优选

根据 SWMM 的模拟结果构造水文防洪作用的判断矩阵。计算并分析得出，五种 LID 方案的防洪排涝效果优劣次序依次为方案一 > 方案三 > 方案五 > 方案四 > 方案二。

2) 基于成本效益的 LID 方案优选

根据 LID 设施的年均建设成本与年均维护成本进行计算，结果显示五种 LID 方案成本效益的优劣次序依次为方案二 > 方案三 > 方案一 > 方案五 > 方案四。

3) 基于社会效益的 LID 方案优选

本文将节水效益、LID 运行稳定性效益与除污效益作为生态环境效益的评价指标，将 LID 景观效果带来的示范性效益作为社会公众效益的评价指标。计算结果显示五种 LID 方案的社会效益优劣次序依次为方案三 > 方案五 > 方案一 > 方案四 > 方案二。

参考相关文献[27] [28]的研究成果得到五个方案的防洪效果权重系数、成本效益权重系数及社会效益权重系数分别为 0.4、0.2、0.4。根据权重系数进行加权计算，可得到五种 LID 方案的综合能效权重值。

五种 LID 方案分别在防洪排涝效果、成本效益、社会效益三个不同侧重点下的优劣性如图 7 的(a)、(b)、(c)所示。从综合效益来看，方案三为兼顾防洪排涝效果、成本效益及社会效益的最优方案，并且由成本效益可以看出方案三的整体投资也是比较小的，因此在进行研究区域实际低影响改造时选择方案三具有一定的合理性。

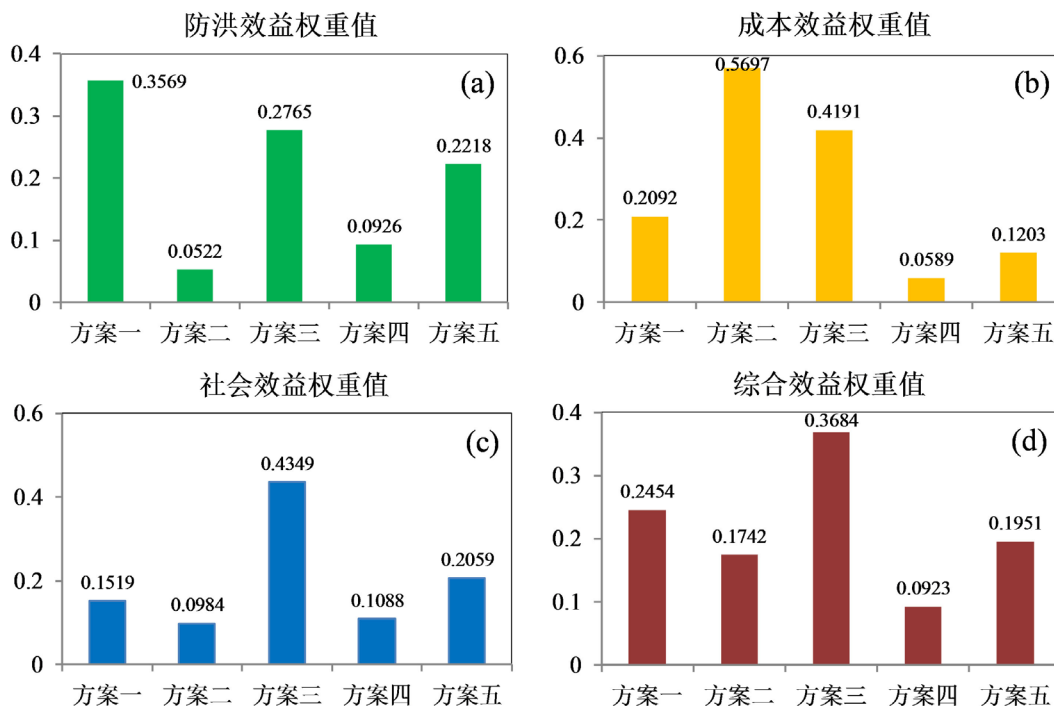


Figure 7. Comprehensive weight values of various schemes
图 7. 各方案综合权重值

5. 结论

本文基于 SWMM 模型对长沙市某城市片区进行排水管网现状模拟，遵循因地制宜的原则设计了五种 LID 组合方案，模拟其实施效果并利用层次分析法进行方案优选。主要结论如下：

1) 采用 SWMM 模型对长沙市的某城市片区进行排水管网现状模拟,发现在 50 年一遇的降雨条件下有 59% 的节点发生了不同程度的溢流现象,节点溢流总量达 $1.26 \times 10^5 \text{ m}^3$, 故基础设施的排水能力不足。

2) 综合排涝效益、成本效益、社会效益三个方面对五种 LID 组合方案进行评价,得出方案三为较优方案,即透水铺装、绿色屋顶、生物滞留设施和下沉式绿地四种 LID 设施组合。方案三可以使管道超载个数降低为原来的 67%, 超载时长控制在 2 h 以内,节点溢流个数降低为原来的 50%, 并且降低节点溢流总量至 60 m^3 。本文的研究框架同样适用于其他城市区域的 LID 改造, 研究结果可为城市防灾减灾及可持续发展提供更加准确、科学的参考依据。

基金项目

该研究是在国家重点研发计划课题(2016YFC0402203)、国家自然科学基金青年项目(51708086)、中央高校基本科研业务费(DUT18RC(3)072)的资助下完成的。

参考文献

- [1] 徐宗学, 赵刚, 程涛. “城市看海”: 城市水文学面临的挑战与机遇[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(5): 54-57.
XU Zongxue, ZHAO Gang and CHENG Tao. The challenges and opportunities of urban hydrology in the wake of urban flooding. *Flood Control and Drought Relief in China*, 2016, 26(5): 54-57. (in Chinese)
- [2] 吴智杰. “7·19”特大暴雨洪涝灾害引发的决策气象服务探讨[C]//中国气象学会. 第 35 届中国气象学会年会 S11 城市气象与环境——第七届城市气象论坛. 北京: 中国气象学会, 2018: 5.
WU Zhijie. Discussion on decision-making meteorological service caused by “7.19” torrential rain and flood disaster. In *China Meteorological Society. 35th Annual Meeting of China Meteorological Society S11 Urban Meteorology and Environment 7th Urban Meteorology Forum*. Beijing: China Meteorological Society, 2018: 5. (in Chinese)
- [3] 晓金. 2017 年全国十大自然灾害事件盘点[J]. 生命与灾害, 2018(5): 4-5.
XIAO Jin. Inventory of top ten natural disaster events in 2017. *Life and Disasters*, 2018(5): 4-5. (in Chinese)
- [4] 韩永奇. “利奇马”对山东农药市场影响几何[J]. 农药市场信息, 2019(17): 20-21.
HAN Yongqi. What is the impact of “Lichtma” on the pesticide market in Shandong. *Pesticide Market Information*, 2019(17): 20-21. (in Chinese)
- [5] QIN, H. P., LI, Z. X. and FU, G. T. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>
- [6] 米文静, 张爱军, 任文渊. 国外低影响开发雨水资源利用对中国海绵城市建设的启示[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 345-352.
MI Wenjing, ZHANG Aijun and REN Wenyuan. Oversea utilization and development of urban rainwater resources with low impact and its implications for construction of sponge city in China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(3): 345-352. (in Chinese)
- [7] 邢薇, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 基于低影响开发(LID)的可持续城市雨水系统[J]. 中国给水排水, 2011, 27(20): 13-16.
XING Wei, ZHAO Dongquan, CHEN Jining, et al. Sustainable urban rainwater system based on low impact development. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(20): 13-16. (in Chinese)
- [8] 欧阳如琳, 程哲, 蔡文婷, 等. 从中美案例经验谈海绵城市 PPP 模式的关键实施要点[J]. 中国水利, 2016(21): 35-40.
OUYANG Rulin, CHENG Zhe, CAI Wenting, et al. Critical factors for PPP model of Sponge City in China: Experiences from China and America. *China Water Resources*, 2016(21): 35-40. (in Chinese)
- [9] MELVILLE-SHREEVE, P. A preliminary sustainability assessment of innovative rainwater harvesting for residential properties in the UK. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2014, 30(2): 135-142.
- [10] 车伍, 吕放放, 李俊奇, 等. 发达国家典型雨洪管理体系及启示[J]. 中国给水排水, 2009, 25(20): 12-17.
CHE Wu, LV Fangfang, LI Junqi, et al. Typical stormwater and flood management systems in developed countries and their inspiration. *China water & Wastewater*, 2009, 25(20): 12-17. (in Chinese)
- [11] 高嘉, 王云才. 美英澳 3 国雨水管理系统比较与启示[J]. 中国城市林业, 2016, 14(3): 22-25.
GAO Jia, WANG Yuncai. Comparison and enlightenment of stormwater management systems in the USA, the UK and Australia. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2016, 14(3): 22-25. (in Chinese)
- [12] BAEK, S., CHOI, D., JUNG, J., et al. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach. *Water Research*, 2015, 86: 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.038>

- [13] JATO-ESPINO, D., CHARLESWORTH, S., BAYON, J., et al. Rainfall-runoff simulations to assess the potential of SuDS for mitigating flooding in highly urbanized catchments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(1): 149. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010149>
- [14] ECKART, K., MCPHEE, Z. and BOLISETTI, T. Performance and implementation of low impact development—A review. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 413-432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>
- [15] 王建龙, 车伍, 易红星. 低影响开发与绿色建筑的雨水控制利用[J]. *工业建筑*, 2009, 39(3): 123-125.
WANG Jianlong, CHE Wu and YI Hongxing. Stormwater management in green building on the base of low impact development. *Industrial Construction*, 2009, 39(3): 123-125. (in Chinese)
- [16] 牛帅, 黄津辉, 曹磊, 等. 基于水文循环的低影响开发效果评价[J]. *建筑节能*, 2015, 43(2): 79-84.
NIU Shuai, HUANG Jinhui, CAO Lei, et al. Evaluation on the effect of low impact development for stormwater management system on the hydrologic cycle. *Building Energy Efficiency*, 2015, 43(2): 79-84. (in Chinese)
- [17] XIE, J. Q., CHEN, H., LIAO, Z. L., et al. An integrated assessment of urban flooding mitigation strategies for robust decision making. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 95: 143-155.
- [18] 孙晓峰, 叶青, 宋昆, 等. 基于实际问题的海绵城市建设与管理实践——以中新天津生态城为例[J]. *给水排水*, 2019, 55(4): 67-71.
SUN Xiaofeng, YE Qing, SONG Kun, et al. Discussion on penetration technology in sponge city construction. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(4): 67-71. (in Chinese)
- [19] 王海潮, 陈建刚, 张书函, 等. 城市雨洪模型应用现状及对比分析[J]. *水利水电技术*, 2011, 42(11): 10-13.
WANG Haichao, CHEN Jiangang, ZHANG Shuhan, et al. Application status and comparative analysis of urban storm water models. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(11): 10-13. (in Chinese)
- [20] RAI, P. K., CHAHAR, B. R. and DHANYA, C. T. GIS-based SWMM model for simulating the catchment response to flood events. *Hydrology Research*, 2016, 48(2): 260-274. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.260>
- [21] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J]. *环境科学*, 2008(6): 1495-1501.
DONG Xin, DU Pengfei, LI Zhiyi, et al. Parameter identification and validation of SWMM in simulation of impervious urban land surface runoff. *Environmental Science*, 2008(6): 1495-1501. (in Chinese)
- [22] 刘兴坡. 排水管网计算机模拟方法及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2006: 66.
LIU Xingpo. Computer simulation method of drainage pipe network and its application research. Shanghai: Tongji University, 2006: 66. (in Chinese)
- [23] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. *给水排水*, 2009, 35(11): 213-217.
LIU Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(11): 213-217. (in Chinese)
- [24] SAATY, T. L. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [25] 董雨, 张筱希, 王国华. 方案比较中 AHP 方法的改进[J]. *统计与决策*, 2006(2): 14-16.
DONG Yu, ZHANG Xiaoxi and WANG Guohua. Improvement of AHP method in scheme comparison. *Statistics and Decision*, 2006(2): 14-16. (in Chinese)
- [26] 荆全忠, 姜秀慧, 杨鉴淞, 等. 基于层次分析法(AHP)的煤矿安全生产能力指标体系研究[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(9): 74-79.
JING Quanzhong, JIANG Xiuhui, YANG Jiansong, et al. Study on index system of capability of production safety in coal mine based on AHP. *China Safety Science Journal*, 2006, 16(9): 74-79. (in Chinese)
- [27] 李思. 排水模型和 LID 技术在海绵城市中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2015.
LI Si. Application of drainage system model and LID on sponge city. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [28] 柯胜. 低影响开发技术径流削减体系及效能优化研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2017.
KE Sheng. Research on runoff reduction system and performance optimization of low impact development technology. Shanghai: Donghua University, 2017. (in Chinese)