城镇水系统研究与应用

杨至瑜, 税爱伦, 李倩, 等. 城市更新背景下老旧居住区雨洪管理优化[J]. 净水技术, 2026, 45(10): 141-152.
Yang Z Y, Shui A L, Li Q, et al. Optimization of stormwater management in old residential areas under the background of urban renewal[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(10): 141-152.

城市更新背景下老旧居住区雨洪管理优化

杨至瑜,税爱伦,李 倩,熊 林*
(中规院<北京>规划设计有限公司,北京 100044)

摘 要 **【目的】** 城市更新背景下,老旧小区低影响开发(LID)改造普遍存在针对性不足、效能适配性差等问题。**【方法】** 本文以某城市老旧小区海绵改造项目库为研究对象,采用 K-means 聚类算法将小区划分为高建低绿型、均衡型,通过现状调研、数据监测与暴雨洪水管理模型(SWMM)识别两类小区雨洪与污染物特征,并开展多情景下不同 LID 改造方案模拟,量化径流调控与污染物去除效能,确定不同类别小区的雨洪管理优化方案。**【结果】** 高建低绿型小区现状径流控制率仅为 1.3%~2.3%,雨洪调蓄与污染治理能力严重不足,面源污染负荷较重,现有 LID 设施对高污染负荷适应性较差。均衡型小区现状径流控制率为 21.33%~33.49%,排水基础较好但高重现期下减污效能衰减明显。高建低绿型、均衡型小区的最优单项 LID 措施分别为透水停车场、雨水花箱,其径流控制与污染物去除效能显著优于其他单项设施。高性价比组合措施(高建低绿型:绿色屋顶+透水停车场;均衡型:雨水花箱+前置塘)可平衡效能与成本,实现径流控制率和悬浮物(SS)去除率均超 37%。全设施组合方案径流控制率达 39%以上、SS 去除率超 42%,效能稳定但成本较高,适用于高负荷区域。**【结论】** 本文提出的差异化 LID 优化方案及"分类型、分级的 LID 优化"策略,兼顾雨洪调控、污染治理与成本控制,可为同类城市老旧小区海绵化改造提供可复制、可量化的技术参考,助力城市雨洪韧性提升。

关键词 海绵城市; 城市更新; 暴雨洪水管理模型; 居住小区; 雨水径流调控
中图分类号: TU992 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2026)10-0141-12
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.10.016

Optimization of Stormwater Management in Old Residential Areas under the Background of Urban Renewal

Yang Zhiyu, Shui Ailun, Li Qian, Xiong Lin*
(*CAUPD Beijing Planning & Design Consultants Co., Ltd., Beijing* 100044, *China*)

Abstract [**Objective**] Against the backdrop of urban renewal, the low impact development (LID) reconstruction of old residential communities generally faces problems such as insufficient pertinence and low efficacy. [**Methods**] Taking the sponge transformation project database of old residential communities in a certain city as the research object, the K-means clustering method was adopted to classify the communities into high-construction and low-green type and balanced type. The rainwater and flood as well as pollutant characteristics of the two types of communities were identified through current situation investigation, data monitoring and the storm water management model (SWMM). Multiple scenarios of different LID transformation schemes were simulated to quantify the runoff regulation and pollutant removal efficiency, and the differentiated optimization schemes for different types of communities were screened out. [**Results**] The current high-construction and low-green communities were severely deficient in hydrological performance, with a

[收稿日期] 2026-04-13
[作者简介] 杨至瑜(1987—),女,高级工程师,主要从事海绵城市建设、排水防涝、水环境治理、污水处理提质增效、市政工程等领域规划设计与咨询等工作,E-mail: yangzy276@126.com。
[通信作者] 熊林(1984—),男,高级工程师,主要从事海绵城市建设、排水防涝、水环境治理、城市更新规划设计与咨询等工作,E-mail: 155149067@qq.com。

runoff control rate of only 1.3%-2.3%. These communities have serious deficiencies in rainwater and flood regulation and pollution control capacity, and bear heavy non-point source pollution loads. High imperviousness was the main cause of excessive runoff, and the existing LID facilities had insufficient adaptability to high pollution loads. The current runoff control rate of balanced communities was 21.33%-33.49%, with a good drainage foundation but attenuation of pollution removal efficiency under high return periods. The optimal single LID control measures for the two types of communities were permeable pavement and rain flower boxes, respectively, whose runoff control and pollutant removal efficiency were significantly better than those of other single facilities. At the level of combined measures, the cost-effective schemes (high-construction and low-green type: green roof + permeable pavement; balanced type: rainwater flower boxes + pre-pond) could balance efficiency and cost, achieving a runoff control rate and SS removal rate of more than 37%. The full-facility combination scheme had stable efficiency but high cost, with a runoff control rate of more than 39% and an SS removal rate of more than 42%. It is suitable for high-load areas, while the economically adaptable scheme is applicable to low-risk areas. [**Conclusion**] The differentiated LID optimization schemes and classified and graded LID optimization strategy proposed in this paper take into account rainwater and flood regulation, pollution control and cost management. They can provide replicable and quantifiable technical references for sponge-oriented renovation of similar old urban residential communities and facilitate the improvement of urban flood resilience.

Keywords sponge city; urban renewal; storm water management model (SWMM); residential community; rainwater runoff control

全球气候变化背景下极端暴雨事件频次与强度持续提升。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第七次评估报告明确指出,极端降水引发的城市内涝、流域面源污染已成为威胁人居安全、制约生态可持续的全球性难题[1]。我国正处于城市更新与海绵城市建设深度融合的关键阶段,老旧居住区作为城市建成区的存量核心,普遍存在基础设施先天不足、后天运维缺失的双重困境[2]:管网老化破损、雨污混接错接、硬质铺装占比居高不下、绿地调蓄功能缺失、空间局促且改造约束极强,导致雨洪调蓄能力薄弱、内涝积水频发、径流污染负荷超标,成为城市涉水治理的薄弱环节与重点攻坚对象[3]。

低影响开发(LID)设施作为海绵城市建设的核心技术体系,通过透水铺装、绿色屋顶、雨水花园、植草沟等源头分散设施,实现雨水自然积存、渗透、净化,已被大量实践证实可有效破解老旧小区雨洪与污染治理难题。暴雨洪水管理模型(SWMM)作为城市雨洪模拟的主流工具,凭借高精度水文水力模拟、多情景方案对比优势,成为 LID 改造效能评估、设施布局优化的核心手段,现有研究已通过 SWMM 多级调控模拟等方式,验证了模型在老旧小区排水改造、LID 优化中的可靠性与实用性[4]。

国内外学者围绕老旧居住区雨洪管理、LID 技术应用、SWMM 模型模拟三大领域深耕多年,形成了相对完善的理论体系与技术方法[5],现有研究普遍认可 SWMM 模型在雨洪模拟[6]与方案优化中的核心价值,可有效实现管网负荷核算、改造效能定量对比[7];依托非支配排序遗传算法Ⅱ(NSGA-Ⅱ)等多目标优化算法,统筹溢流削减、建设成本[8]、占地面积等指标,完成 LID 设施最优组合方案的优选配置[9],并逐步构建源头滞蓄、中途转输、末端调控的体系,弥补了传统强排模式的治理短板,为老旧小区海绵改造提供了坚实的理论与实践支撑。

尽管现有研究已取得丰富成果,但仍存在三大短板尚未有效突破,与精细化、差异化改造的实际需求存在明显脱节:首先,分类施策体系缺失,无论是改造方案还是现有研究,均未结合小区建成年限、空间格局、排水基底、雨洪风险等指标开展量化聚类分型,多沿用“一刀切”模式或单案例分析,分类标准模糊、针对性不足,直接导致 LID 设施布局与实际需求脱节;其次,多目标优化设计缺位,实践与研究均聚焦单一水文调控、内涝治理标准,忽视径流污染同步削减,且未统筹全生命周期成本、占地规模、环境协调性开展多目标权衡,LID 情景设计同质化严重、缺乏定制化方案,改造性价比与落地性大打折扣;最后,多效耦合适配研究薄弱,对水文调控与水质净化的协同效应分析不足,尤其对老旧小区的专属适配性研究较少,进一步制约了改造方案的实操性。

宜昌市作为长江中上游区域性中心城市、“十四五”第二批国家系统化全域推进海绵城市建设示范城市,肩负着长江生态屏障保护与城市韧性提升的双重使命,老旧小区海绵化更新既是政策硬性要求,也是改善民生、筑牢生态防线的必然选择。宜昌地处山地丘陵区域,老旧居住区地形复杂、空间分化

明显,现有雨洪管理模式难以适配差异化改造需求。

基于此,本文立足城市更新战略针对性提出并验证一套面向老旧小区的分类海绵改造优化方法。研究流程具体分为 3 步:首先,采用 K-means 聚类算法实现小区精细化分类,解决传统改造分类模糊、标准单一的问题;其次,耦合 SWMM 模型开展多情景 LID 模拟,量化径流调控、污染削减、成本占地的综合效能,实现水文、水质与经济指标的多目标协同评估;最终,基于不同小区类型的治理短板筛选差异化优化改造方案,形成“一区一策”的精准改造模式,构建完善的老旧小区海绵化改造技术路径。本文有效弥补了现有老旧小区雨洪治理分类不精准、方案同质化、适配性不足的研究缺口,也为宜昌及同类山地丘陵城市老旧小区海绵化改造提供可复制、可量化的技术方案,兼具理论完善价值与工程实践意义。

1 研究区域与方法

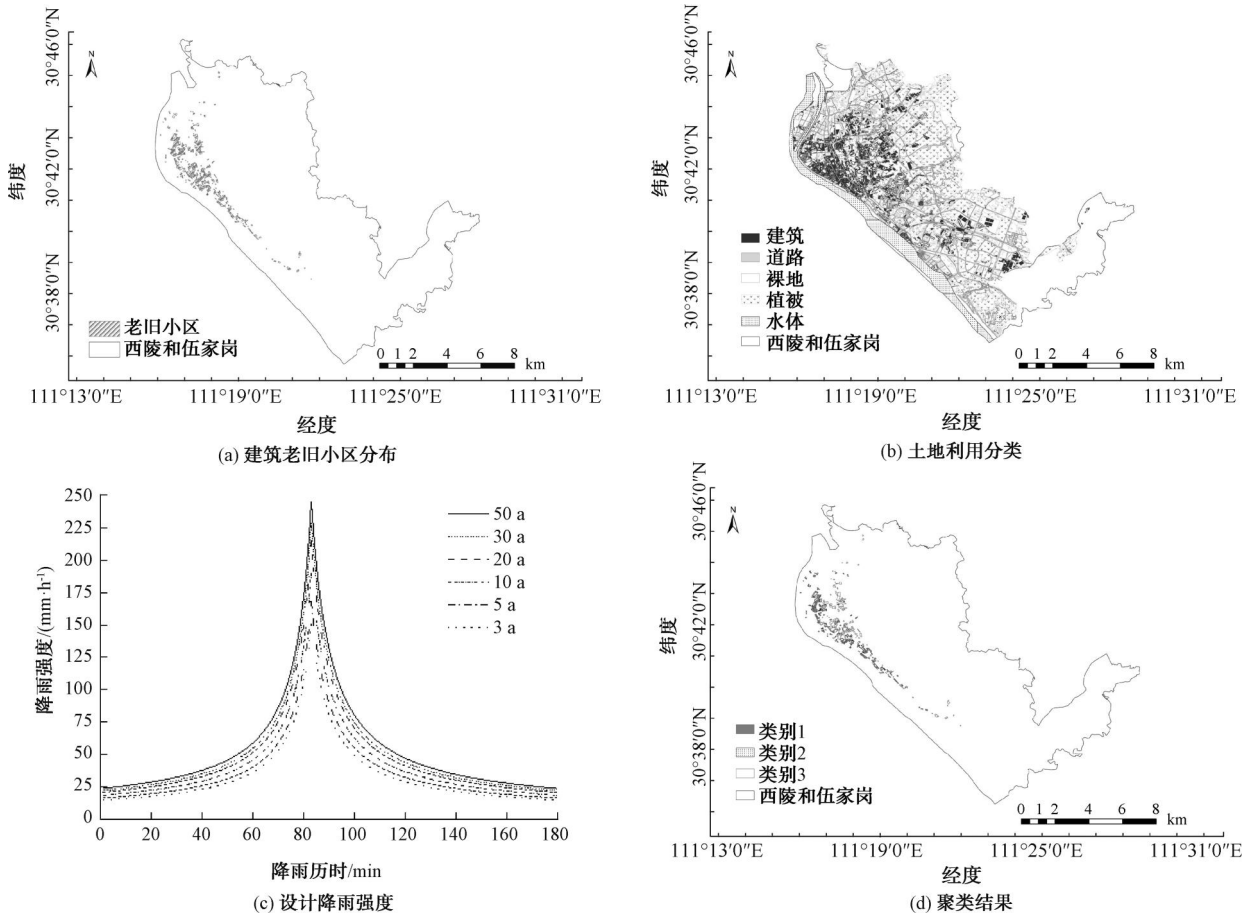
1.1 研究区域数据收集

本文研究区域所涉及的数据包括老旧小区矢量边界、名称及建筑年代特征、土地利用和降雨,如表 1 和图 1 所示。同时本文根据以上数据形成了老旧小区建筑分布图、土地利用分类图、设计降雨强度和聚类结果图,如图 1(a)~(c)所示。

表 1 研究区域数据收集

Tab. 1 Data Collection in the Research Area

数据类型	数据名称及特征	数据来源
老旧小区矢量边界	某市老旧小区改造规划数据库(.shp)	住房和城市更新局
老旧小区名称及建筑年代	老旧小区名称及建筑年代(.xlsx)	高德地图网页爬取
土地利用	1 米分辨率的国家级土地覆盖图(.tif)	SinoLC-1
降雨数据	暴雨强度公式,芝加哥降雨	暴雨强度公式 2023 年修编



(a) 建筑老旧小区分布　(b) 土地利用分类

(c) 设计降雨强度　(d) 聚类结果

图 1 研究区域数据及聚类结果

Fig. 1 Regional Data and Clustering Results in Research Area

1.2　基于 K-means 的老旧居住区分类

采用 K-means 聚类算法,对该市老旧小区改造规划数据库中的老旧小区进行聚类。选取建筑年代、道路面积占比、树木绿化面积占比、建筑占地面积占比、裸地面积占比、水体面积占比 6 项核心要素进行聚类,具体步骤如下:首先,将老旧小区名称、建筑年代等属性特征与小区矢量边界数据进行空间关联匹配,结合实际矢量边界对土地利用栅格数据进行掩膜提取与边界剪裁;其次,统计各独立小区单元内不同土地利用类型的栅格像元数量,精准核算各类下垫面要素的面积占比指标;最后,应用 SPSS 软件对多指标迭代计算。

聚类数量 K 的确定严格遵循肘部法误差判别与工程业务可解释性双重原则。当 $K=3$ 时,误差下降速率出现显著拐点,继续增加聚类数量后,误差降幅趋于平缓;同时,结合老旧小区海绵改造的下垫面特征、雨洪治理需求及改造潜力特征,可清晰地区分不同建设基底的小区类型。算法迭代 7 次后,聚类中心最大绝对坐标变动为 0.00,聚类结果收敛稳定。根据方差分析(ANOVA),其道路、树木和建筑显著性<0.05,变量分类效果较好。建筑年代、裸地和水体占比的组间差异相对较弱,对整体分型结果的影响有限。最终聚类中心及每个类别数目如表 2 和图 1(d)所示。类别 1 为高建低绿型小区:区域建筑和道路比例较高、绿化较少,可进行海绵化改造空间比例较小。类别 2 为均衡型小区:区域建筑、道路和绿化比例适中,可适度海绵化改造。类别 3 为低建高绿型小区:绿化比例较高、建筑和道路比例较低,海绵化改造不紧迫。

表 2　老旧小区聚类结果

Tab. 2　Clustering Results of Old Residential Communities

类别	聚类		
	1	2	3
道路	0~49.45%	0~49.44%	0~21.39%
树木	0~32.30%	0~63.60%	54.68%~100.00%
建筑	38.30%~99.40%	0~53.90%	0~26.66%
裸地	0~2.95%	0~6.80%	0~0.73%
水体	0	0~37.94%	0~0.48%
建筑年代	1965 年—2005 年	1970 年—2002 年	1965 年—2004 年

综合样本典型性、基础数据完整性、场地改造条件与海绵措施适配性多项原则,仅选取 2 类小区开展深度模拟研究:经实际调研,类别 3 小区硬化占比低、建设年限较新、管网设施完善、无低洼汇水问题,原生雨洪调控与污染净化能力较好,常态内涝与面源污染问题微弱,海绵改造刚需不足。其零星管网、局部地形问题属于个别现象,无需开展普适性分型优化研究。因此,本文聚焦雨洪污染问题突出、改造需求迫切的高建低绿型、均衡型 2 类小区开展模拟分析,也分别代表了老旧小区“硬化率高、改造短板突出、亟须提质整改”和“基底条件适中、可优化升级”的两类典型现状,问题特征鲜明、改造需求针对性强,具备极高的研究代表性。因此,本文最终选取土街头小区和三峡大学东家属区作为研究区域。土街头小区的道路和建筑分别占比 56% 和 43%,位于类别 1 的聚类中心附近,是高建低绿型的典型代表。三峡大学东家属区的道路、树木、建筑、裸地和水体分别占比 48%、31%、18%、0.4%、2%,位于类别 2 的聚类中心附近,是均衡型典型代表。

土街头小区:排水现状已完成沿江合流制区域分流改造。现状下垫面以不透水地面为主,绿地率低,停车空间紧张,整体空间不富余。场地平整,无明显高差,最大高差不足 1 m。土壤是以黏性土为主的软黏土类,局部是以砂、砾石为主的松散土类,渗透性很差。小区周边无污染源分布,且场地周边建筑也未见由于腐蚀性原因造成的基础损伤现象,不存在高污染、高风险情况。当前采用的 LID 设施为雨水花箱,并进行了雨污分流改造,如图 2 所示。地表硬化面积较高,不具备多种 LID 设施的改造条件。

三峡大学东家属区:排水现状为雨污分流制。



(a) 雨水花箱　(b) 雨污分流器　(c) 小区面源

图 2　土街头小区

Fig. 2　Tujietou Community

小区地形地势起伏较大,总体呈现东部、南部及西南部高,西北部和中部低的趋势,外围存在部分山体,存在山水汇入小区的客水入侵风险,现状小区及山体采用围墙、山洪沟或截水沟隔开,可有效阻止客水入侵。场地有改造空间、可布设多种 LID 设施。现场 LID 设施建设情况如图 3 所示。



(a) 蓄水池　(b) 生物滞留设施　(c) 透水铺装

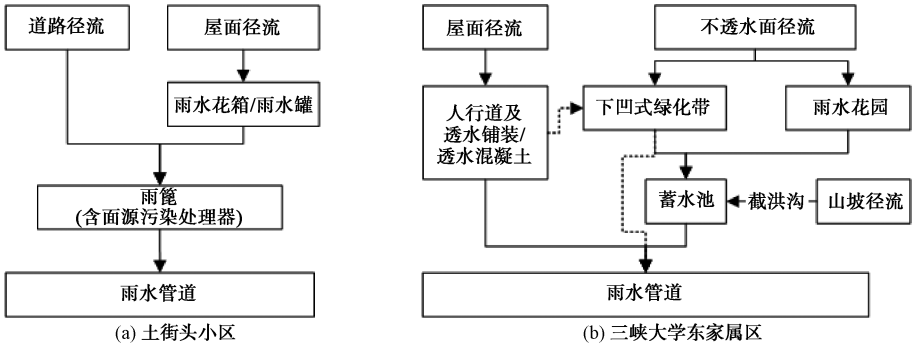
图 3　三峡大学东家属区

Fig. 3　Dongjiashu Region of Three Gorges University

1.3　基于 SWMM 模型的 LID 情景模拟

1.3.1　研究区域现状海绵基础

现有 LID 设施径流组织路径如图 4 所示。土街头小区采用雨污分流制。针对场地空间受限、下垫面硬化率高及地下条件复杂的特点,配置了 35 座容积为 0.4 m^3 的雨水花箱、5 座容积为 0.6 m^3 的雨水罐及 60 个内置面源污染处理器的雨篦。屋面雨水经花箱/罐体蓄排后溢流排入管网,构成现状基准情景,雨水汇流路径较为单一,就地滞蓄下渗空间有限。三峡大学东家属区则依托人行道透水铺装、下凹式绿化带、雨水花园及荷花池构建雨水收集回用系统。路面雨水通过侧石汇入绿化带渗透,人行道雨水经透水铺装下渗后排入管网,现状荷花池承担区域雨水调蓄功能,径流排布形式更为多元,形成初始海绵布局。



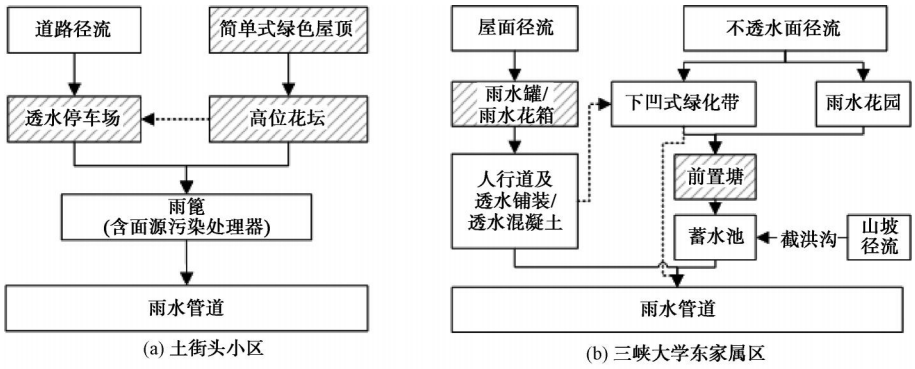
(a) 土街头小区　(b) 三峡大学东家属区

图 4　现有 LID 设施径流组织路径

Fig. 4　Existing Runoff Routing with LID Facilities

1.3.2　改造 LID 情景方案设计

结合城市更新需求与场地承载力,在现状基础上统一遵循“就近收水、沿汇水路径布置、利用闲置边角空间”的布设原则开展情景设计。改造 LID 设施径流组织路径如图 5 所示,2 类小区均通过增设源头滞蓄类设施重构场地汇水格局,优化雨水流动



(a) 土街头小区　　(b) 三峡大学东家属区

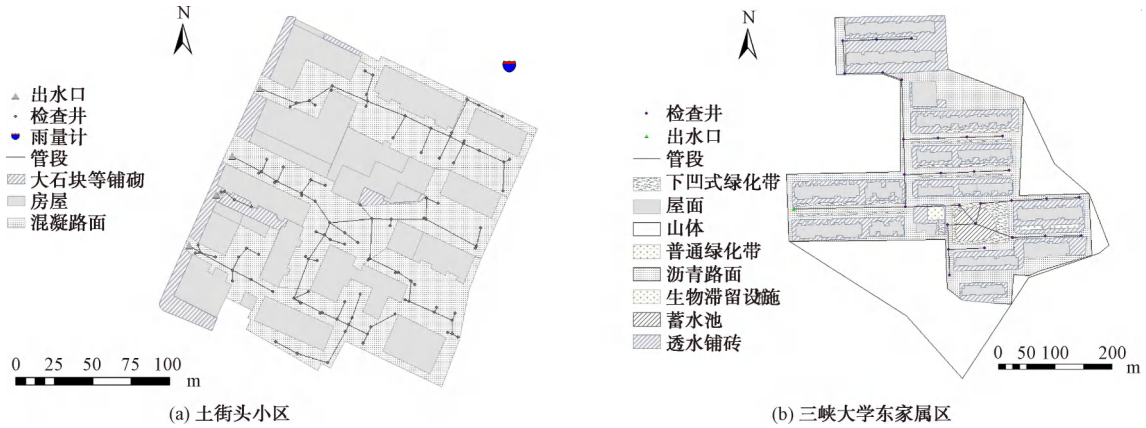
图 5　改造 LID 设施径流组织路径

Fig. 5　Runoff Path of Reconstructed LID Facilities

路线,延长径流汇集时长,从源头减少雨水快速直排管网体量,为后续削减洪峰、降低管网运行压力提供径流组织基础。土街头小区和三峡大学东家属区管线示意及下垫面分布情况如图 6 所示。土街头小区可布设简单式绿色屋顶总面积为 6 039 m^2,可改造透水停车场面积为 6 951 m^2;三峡大学东家属区可布设简单式绿色屋顶面积为 8 610 m^2,适宜布设前置塘有效容积为 210 m^3。本文以场地最大可利用空间、雨水汇水路径规律、现状 LID 设施布局为约束条件,在现状海绵基础上遴选简单式绿色屋顶、高位花坛/雨水花箱、透水生态停车场、前置塘为核心新增 LID 设施,统一遵循就近收水、沿汇水路径布置、利用闲置边角空间的布设原则开展情景设计。其中,高位花坛及雨水花箱优先布置于建筑墙角及院落闲置角落,布设位置主要依据建筑雨水落水管出水口位置、地表自然汇水路径及小区空余零散地块分布确定,可就近承接屋面径流、减少地表雨水漫流,同时不占用主要通行与活动空间,适配老旧小区用地局促的现实条件。各 LID 设施布设比例与数量均基于当地规划要求和可改造空间面积核算确定。土街头小区情景设计结合场地空间局促的特征,设定绿色屋顶覆盖率为建筑面积的 50%,透水停车场覆盖硬化地面的 50%,并新增 56 个单罐容积为 2.5 m^3 的高位花坛。三峡大学东家属区依托现有海绵改造基础开展优化设计,将绿色屋顶覆盖率提升至建筑面积的 60%,新增 85 个单罐容积为 2.5 m^3 的雨水花箱,并增设前置塘以强化初期雨水净化效能。本文共设计 3 个单一措施情景与 3 个组合措施情景,通过多情景对比筛选最优调控策略。具体情景设置如表 3 所示。

1.3.3　SWMM 模型参数校准

为验证模型的准确性,选取 2023 年 6 月 11 日(降雨量为 60.4 mm)、2023 年 8 月 26 日(降雨量为 141.8 mm)和 2024 年 9 月 12 日(降雨量为 30.6 mm)



(a) 土街头小区　　(b) 三峡大学东家属区

图 6　管线示意及下垫面分布

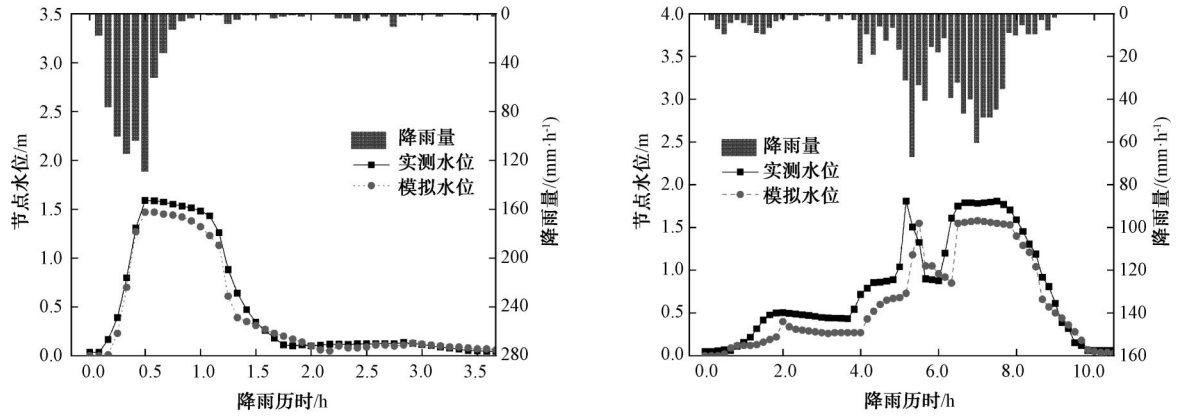
Fig. 6　Pipelines Sketch and Underlying Surface Distribution

表 3 海绵改造设计方案

Tab. 3 Design Plan of Sponge Reconstruction

小区	单项措施			组合措施		
	1	2	3	4	5	6
土街头小区	56 个高位花坛	50%绿色屋顶	50%透水停车场	56 个高位花坛+50%透水停车场	50% 绿色屋顶+50%透水停车场	56 个高位花坛+50%绿色屋顶+50%透水停车场
三峡家属区	60%绿色屋顶	85 个雨水花箱	前置塘	60%绿色屋顶+前置塘	85 个雨水花箱+前置塘	85 个雨水花箱+60%绿色屋顶+前置塘

3 场典型降雨事件,通过监测排水管网出水口末端的流量、水质,对模型进行率定与验证。采用纳什系数(NSE)评价模型的模拟结果,当 NSE 大于 0.65 时,表明模型可靠。土街头小区研究时段内受现场施工改造影响,管网出口流量无法开展现场检查,仅可获取悬浮物(SS)、氨氮、化学需氧量(COD)、总磷(TP)水质数据。因此,本文仅对模型水质模块进行率定。各水质指标的 NSE 分别为 0.78、0.89、0.78 和 0.72,均满足模型精度要求。在缺失实际流量约束条件下,结合水文入渗、曼宁系数、洼地蓄水等水文参数,结合区域土壤类型、下垫面结构特征,参考 EPA SWMM 官方模型使用手册,确定基础取值范围与经验范围并进行合理赋值,保证水文模型的合理性与适用性。三峡大学东区家属区模型率定结果如图 7 所示,三峡大学东区家属区水量 NSE 分别为 0.81 和 0.8、水质的 NSE 分别为 0.82、0.89、0.80 和 0.86,均满足模型精度要求。表 4 和表 5(其中土街头小区无绿地,无相关参数)分别为率定后水文模型相关参数和污染积累与冲刷相关参数。



(a) 2023年6月11日降雨模型率定验证曲线　　(b) 2023年8月26日降雨模型率定验证曲线

图 7 三峡大学东区家属区模型率定与验证结果

Fig. 7 Model Calibration and Validation Results of the Residential Quarter in the East District of China Three Gorges University

表 4 水文模型相关参数

Tab. 4 Related Parameters of Hydrological Model

参数类型	参数名称	参考范围	土街头小区取值	三峡大学东区家属区取值
霍顿参数	最大入渗/(mm·h^{-1})	10.0~100.0	77.0	77.0
	最小入渗/(mm·h^{-1})	0.5~52.0	24.0	30.0
	衰减常数/(h^{-1})	2.0~7.0	3.0	3.0
曼宁系数	不透水区	0.001~0.024	0.015	0.030
	透水区	0.100~0.800	0.350	0.200
洼地蓄水	不透水区/mm	1.27~2.25	1.30	1.20
	透水区/mm	0.25~7.62	2.50	5.00

表 5　污染积累与冲刷相关参数

Tab. 5　Parameters Related to Pollution Accumulation and Scouring

下垫面类型	参数名称	土街头小区				三峡大学东区家属区			
		SS	氨氮	COD	TP	SS	氨氮	COD	TP
屋顶	最大累积量/(kg·km^{-2})	7.220 0	0.025 0	0.170 0	0.010 0	2.500 0	0.002 4	0.170 0	0.001 0
	速率常数/(d^{-1})	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	冲刷系数	0.003	0.010	0.035	0.002	0.004	0.020	0.035	0.003
	冲刷指数	0.3	1.2	1.9	0.4	3.0	1.2	1.2	1.2
路面	最大累积量/(kg·km^{-2})	13.000	0.066	0.190	0.060	2.000	0.016	0.170	0.010
	速率常数/(d^{-1})	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	冲刷系数	0.003	0.010	0.035	0.002	0.003	0.020	0.035	0.003
	冲刷指数	0.3	1.2	1.9	0.4	5.0	1.2	1.2	1.5
绿地	最大累积量/(kg·km^{-2})	—	—	—	—	1.000 0	0.001 5	0.024 0	0.000 5
	速率常数/(d^{-1})	—	—	—	—	0.25	0.30	0.25	0.25
	冲刷系数	—	—	—	—	0.003	0.010	0.035	0.002
	冲刷指数	—	—	—	—	1.0	1.0	1.0	1.2

注:“—”表示数据不适用。

1.4　生命周期成本核算

为弥补单一水文水质效能评价的局限性,完善多情景 LID 改造方案的综合比选体系,本文引入全生命周期成本法(LCC)对各改造方案开展经济性量化评估。如式(1)所示,LCC 评价体系涵盖工程建设期一次性建设投资与设施设计年限内逐年运维管理成本,通过折现计算将远期运维费用统一转换为现值,能够客观、全面反映不同改造方案从建设到长期运营的整体投入水平,避免仅依靠治理效能定性优选导致的方案落地性偏差。

本文成本参数取值参照《海绵城市建设技术指南(试行)》及国内老旧小区海绵改造相关定额与典型研究成果[10],统一确定各类 LID 设施单位建设造价、单位年度运维成本、设计使用年限及社会折现率。其中绿色屋顶、透水停车场、前置塘设计使用年限取 30 a,高位花坛与雨水花箱取 25 a,社会折现率取值 6%,并采用年金现值系数对逐年运维成本进行折现换算,最终累加得到各方案全生命周期总成本,详细计算结果如表 6 和表 7 所示。

$$C_{\mathrm{LCC}} = C_{\mathrm{cap}} + \sum_{t=1}^{n} \frac{C_{\mathrm{com}}(1+r)^t}{(1+i)^t} \tag{1}$$

其中:C_{LCC}——全生命周期成本,元;

C_{cap}——建设成本,元;

C_{com}——年运维成本,元/年;

n——设计寿命,一般取 20~30 a;

r——年通胀率(2%~3%);

i——折现率(5%~7%)。

表 6　LID 设施经济参数取值

Tab. 6　Economic Parameter Values of LID Facilities

设施类型	单位建设造价	单位年运维费用	设计使用年限/a
简单式绿色屋顶	400 元/m^2	25 元/(m^2·a)	30
透水生态停车场	220 元/m^2	12 元/(m^2·a)	30
高位花坛/雨水花箱	43 600 元/个	240 元/(个·a)	25
前置塘	160 元/m	8 元/(m^3·a)	30

表 7 不同方案生命周期成本(单位:元)
Tab. 7 Life Cycle Costs of Different Schemes (Unit: yuan)

名称	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
土街头小区	373 409	2 246 870	1 338 685	1 712 094	3 585 555	3 958 964
三峡大学东家属区	3 844 134	566 781	56 725	3 900 859	623 506	4 467 640

2 结果和讨论

2.1 高建低绿型小区 LID 改造措施效能

采用“径流总量、峰值流量、峰现延缓时间”指标评价水文效益,“超载管道数量、超载节点数量、溢流量”指标评价水力效益;采用“SS、TP、COD、氨氮削减率”指标评价水质效益,同时引入 LCC 开展经济维度评价。

2.1.1 现状排水与污染特征

现状条件下,高建低绿型小区(土街头小区)径流控制能力极弱,径流控制率仅 1.3%~2.3%。随降雨重现期由 2 a 升至 50 a,径流量由 1 260 m^3 增至 2 270 m^3,峰值流量由 0.45 m^3/s 升至 0.84 m^3/s,峰现时间稳定在 84~85 min,表明系统无调蓄能力、洪峰响应固定。管道超载严重,超载管道数量由 7 条增至 40 条,溢流节点数量由 1 个增至 11 个,溢流量由 28 m^3 升至 51 m^3,说明现状排水能力严重不足,高强度降雨下极易发生内涝。

水质方面,污染物累积量随重现期显著上升,SS、COD、TP、氨氮分别增长 55.62%、78.74%、68.75%、57.69%。现状 LID 设施污染物去除量基本稳定,去除效率随负荷升高小幅下降,仅雨篦去除量随雨量增大略有提升。整体表明现状设施净化能力有限,高降雨重现期下面临明显处理瓶颈。

2.1.2 单项措施效能对比

方案一(56 个高位花坛):径流控制率提升至 6.52%~11.72%,但在单项措施中表现最弱;峰值流量与峰现时间无明显改善,溢流量削减 4~5 m^3,超载管道与溢流节点数量未显著减少。水质方面,SS、COD、TP、氨氮去除量稳定,去除率随重现期略有下降(降幅在 5%以内)。与现状相比,污染物去除率有所提升,但整体净化能力有限。该方案 C_{LCC} 约为 37 万元,经济投入最低,但综合治理效能偏低,仅适用于小区局部轻度补充改造。

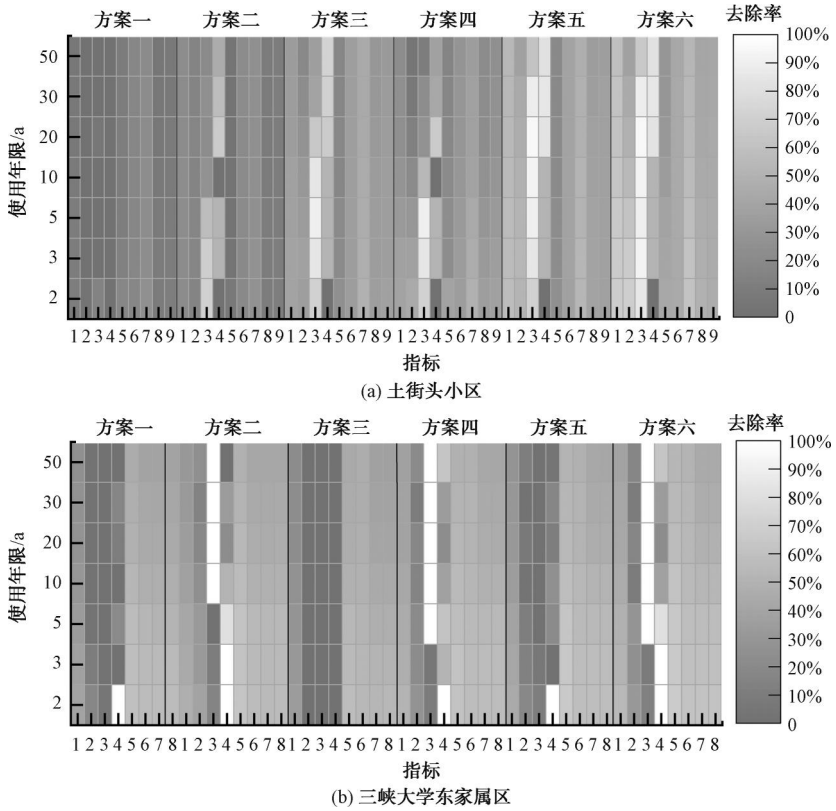
方案二(50%绿色屋顶):径流控制率显著提升至 21.88%~22.17%,且在不同重现期下表现稳定;峰值流量降至 0.38~0.71 m^3/s,溢流量削减 1~2 m^3,超载管道数量减少 5~11 根。水质净化效果优于高位花坛,SS、COD 去除率分别稳定在 20%和 25%左右,TP、氨氮去除率亦有提升。绿色屋顶与雨篦形成协同截污效应,在屋面径流控制与污染物削减方面优势明显。该方案布设规模大,C_{LCC} 高达约 225 万元,综合投入产出效益偏弱,整体治理效果弱于透水停车场改造模式。

方案三(50%透水停车场):为单项措施中性能最优。径流控制率大幅提升至 33.04%~39.06%,峰值流量降至 0.29~0.68 m^3/s;超载管道数量减少 5~22 根,溢流节点数量减少 1~8 个,溢流量削减 6~9 m^3,内涝缓解效果突出。水质方面,SS 去除率达 34.85%~35.35%,COD 去除率达 43.14%~49.12%,TP、氨氮去除率均超过 30%,显著优于其他单项措施。透水停车场可有效替代 26%以上的不透水面积,成为高建低绿型小区最适宜的单项 LID 设施。该方案 C_{LCC} 约为 134 万元,投入适中且治理成效突出,综合实用性最强。

2.1.3 组合措施效能对比

方案四(高位花坛+透水停车场):径流控制率提升至 20.87%~37.54%,低重现期(2~5 a)径流削减效果较好,溢流量削减 7~11 m^3,径流峰值削减作用更明显,降低至 0.25~0.8 m^3/s,超载管道数量减少了 4~17 根。溢流节点数量减少了 1~4 个。水质方面,2 a 重现期下净化效率最高,SS、COD、TP、氨氮去除率分别达 34.85%、49.12%、35.85%、37.74%;但随重现期增大,去除率明显下降,高重现期下效能弱于方案三。总体来看,方案四 C_{LCC} 约为 171 万元,适用于低重现期、低成本改造场景,高降雨强度下仍存在能力短板。

方案五(绿色屋顶+透水停车场):综合效能优良且稳定。径流控制率达 53.04%~57.03%,峰值流量降至 0.22~0.53 m^3/s;超载管道数量减少 5~32 根,溢流节点数量减少 1~9 个,内涝防控效果突出。水质方面,SS 去除率稳定在 37.80%~38.94%,COD、TP、氨氮去除率略有下降但仍保持较高水平。



注:1—径流控制率; 2—径流峰值削减率; 3—蓄水池调蓄量削减率; 4—超载管道数量削减率; 5—SS; 6—COD; 7—TF; 8—氨氮。

图 8　2 个典型小区不同方案的水量、水质效能

Fig. 8　Water Quantity and Quality Efficiency under Different Schemes for Two Typical Communities

与方案四相比,该组合 C_{LCC} 约为 359 万元,在全重现期范围内表现更均衡、稳定性更强,兼具水文调控与水质净化优势,性价比最优。

方案六(高位花坛+绿色屋顶+透水停车场):为全组合最优方案。径流控制率高达 59.13%~67.97%,峰值流量降至 0.14~0.53 m^3/s;溢流量削减 12~15 m^3,超载管道与溢流节点数量大幅下降。该方案即使在 50 a 一遇暴雨下仍保持强劲调控能力。污染物去除量随重现期持续上升,整体去除率仅小幅下降,SS、COD、TP、氨氮去除率分别稳定在 42%~44%、52%~62%、40%~48%、41%~46%,综合表现最均衡、最稳定。该方案 C_{LCC} 高达约 396 万元,适用于高风险、高污染负荷、高内涝敏感的重点区域。

2.2　均衡型小区 LID 改造措施效能

2.2.1　单项措施效能对比

均衡型小区现状排水基础较好,无检查井溢流现象,但径流调控与污染去除能力随降雨重现期升高显著衰减。随重现期由 2 a 升至 50 a,径流量由 0.29 m^3 增至 0.616 m^3,峰值流量由 0.96 m^3/s 升至 2.22 m^3/s,峰现时间稳定在 85 min 左右;径流控制率由 33.49%降至 21.33%,蓄水池调蓄量小幅上升(1 516~1 609 m^3)。

水质方面,SS、氨氮、COD、TP 累积量随降雨强度显著上升,增幅分别达 49.1%、78.3%、79.0%、77.5%。现状 LID 与蓄水池净化能力相近,低重现期总去除率约 50%,高重现期明显下降,4 类污染物去除率降幅均在 15%以上,表明现有设施在高降雨负荷下面临净化瓶颈。

2.2.2　单项措施效能对比

方案一(60%绿色屋顶):绿色屋顶可在低重现期(2 a 和 3 a)显著改善径流控制,径流量较现状降低 0.022 m^3,径流控制率由 33.49%提升至 38.53%,超载管道数量由 2 条降至 0 条。随重现期升高,调控效果逐步减弱,径流控制率降至

24.78%,峰现时间仅在低重现期延后约 3 min。水质方面,绿色屋顶对 SS、COD 去除优势突出,2 a 重现期去除率较现状提升 2.04%~3.28%;SS 去除量约为蓄水池的 2 倍。随重现期升高,去除率由 56.1%~59.33%降至 41%左右,整体净化能力优于蓄水池,但弱于雨水花箱。该方案改造模式布设面积大,C_{LCC} 约为 384 万元,经济投入高昂,综合推广价值较低。

方案二(85 个雨水花箱):雨水花箱为单项措施中综合效能最优。径流控制率由 47.48%降至 31.03%,径流量与峰值流量增幅显著放缓,2 a 和 3 a 重现期可实现无管道超载,排水压力缓解效果明显优于绿色屋顶。水质方面,低重现期去除率较现状提升 2.83%~4.80%;中高重现期(5~50 a)下,净化效果全面超过绿色屋顶与前置塘,尤其对 SS 控制效果稳定突出。雨水花箱可实现碎片化径流就近收集管控,避免零散雨水无序漫流汇聚形成集中洪峰;同时雨水花箱内部依托填料层完成 SS 沉降、有机质吸附与氮磷物质滞留,属于就近原位净化模式,相较于大面积改造的绿色屋顶、末端集中调蓄的前置塘,对小区多零散汇水面的适配管控性更强,在高降雨负荷下仍保持较强截留与净化能力,更适配均衡型小区的改造需求。该方案 C_{LCC} 约为 57 万元,低成本即可实现稳定的水量水质协同管控。

方案三(前置塘):单独增设前置塘对径流总量、峰值流量、峰现时间及排水能力无明显提升,与现状效果基本一致。水质方面,低重现期去除率与现状接近,略低于绿色屋顶和雨水花箱;但高重现期(20~50 a)对 COD 去除优势显著,得益于前置塘的沉淀与匀质缓冲作用,可强化颗粒物与有机物沉降,适合作为组合系统中的水质保障单元。该方案 C_{LCC} 约为 6 万元,仅适宜作为配套辅助设施使用。

2.2.3 组合措施效能对比

方案四(60%绿色屋顶+前置塘):该组合水文调控能力最强,径流控制率由 50.00%降至 36.91%,50 a 重现期超载管道仅 10 条,管网负荷显著降低,内涝防控效果优于所有单项措施。水质方面,净化效果整体优于现状与单项设施,2 a 重现期 SS、氨氮、COD、TP 去除率较现状提升 4.22%~4.31%;高重现期仍可保持 SS、COD 去除率接近 50%,绿色屋顶与前置塘协同作用显著。但 C_{LCC} 高达 390 万元,不符合老旧小区低成本更新改造理念,推广适用性较差。

方案五(85 个雨水花箱+前置塘):水文调控效果弱于方案四,径流控制率由 44.27%降至 28.61%,对排水压力缓解有限。但水质净化能力为组合方案中最优,2 a 重现期 4 类污染物去除率较现状提升 5.15%~7.73%,随重现期升高优势更明显。雨水花箱的源头截污与前置塘的沉淀净化协同增效,尤其对 SS 和 COD 控制稳定高效。该方案 C_{LCC} 约为 62 万元,工程经济性与落地性极强,是本类小区性价比最优改造模式。

方案六(85 个雨水花箱+60%绿色屋顶+前置塘):为均衡型小区最优组合方案。径流控制率达 54.59%~39.46%,径流量与峰值流量增幅最小,排水压力缓解效果略优于方案四。水质净化能力在所有方案中表现最强,2 a 重现期去除率较现状提升 7.40%~9.65%;50 a 重现期 SS、COD 去除率仍稳定在 50%以上。3 类设施耦合实现源头截流、中途净化、末端调蓄的全链条控制,综合效能最均衡、稳定性最高。C_{LCC} 高达约 447 万元,仅适合标杆类高标准改造项目。

3 结论

(1)高建低绿型老旧小区普遍存在地表硬化率高、连片不透水下垫面集中、天然雨水调蓄空间不足、管网排水承载力偏弱、面源污染负荷高等共性问题,仅靠现状 LID 设施难以满足雨洪与污染控制需求。单项措施中,透水停车场可大面积置换硬化路面、透水停车场在径流削减、内涝防控与污染物去除方面均最优,是该类小区改造的核心优选设施;绿色屋顶次之,高位花坛效果最弱。组合措施中,方案五(绿色屋顶+透水停车场)实现了效能与成本的最佳平衡,适合大范围推广;方案六(高位花坛+绿色屋顶+透水停车场)综合效能最强,适用于重点管控与高风险片区。各类 LID 组合均表现出低重现期效率高、高重现期效率略有衰减的规律,说明 LID 设施在极端降雨下存在容量上限。研究表明,老旧小区雨洪治理应采用“LID 源头调控+管网系统补强”的协同模式,才能实现全周期安全运行。高建低绿型小区改造的核心在于“开源”渗透空间,通过破除硬质下垫面、增设渗透设施,最大限度盘活场地雨水自然下渗空间。

(2)均衡型小区因排水基础较好、绿地条件相

对充足,LID 改造重点在于强化源头径流控制与稳定水质净化。单项措施中,雨水花箱“碎片化就近收集、就地消纳”的管控模式可有效截断零散汇流路径,减少坡面径流累积与污染物迁移,综合表现最优,适合作为主力设施;绿色屋顶适合低重现期径流调控;前置塘更适合作为组合单元提升高负荷下 COD 去除能力。绿色屋顶主要削减建筑屋面源头径流,降低初期污染负荷,前置塘承接路面、绿地末端汇流,实现径流调蓄与污染物沉淀净化,二者形成“源头减量-末端控污”的空间联动体系,有效提升整体调控效能。组合措施中,方案五(85 个雨水花箱+前置塘)性价比突出,水质净化优势明显;方案六(85 个雨水花箱+60%绿色屋顶+前置塘)综合效能最强,适用于高要求、高标准示范片区。均衡型小区的核心思路在于“提质增效”,依托现有场地空间优化设施布局、完善净化层级,以雨水花箱为核心、前置塘为辅助的配置模式,能在有限改造空间内实现径流控制与污染削减的协同提升。该差异化改造思路可为本市及国内同类型山地丘陵城市,依据老旧小区本底建设条件制定分类、分级海绵化更新方案提供科学依据与可落地的工程实践参考。

(3)受老旧小区场地条件约束,本文 LID 改造方案为贴合实际工程的差异化落地配置,存在措施布设比例与配置形式不完全一致的问题,横向对比结果存在一定边界限制,后续可在统一布设比例的理想工况下进一步开展控制性对比模拟,以弱化规模干扰、更精准揭示不同 LID 设施本身的效能差异。

参考文献

[1] 丁杰, 曹左男, 胡国铮, 等. IPCC 第七次评估报告第二工作组气候变化影响、适应与脆弱性大纲解读及启示[J]. 气候变化研究进展, 2025, 21(4): 484-493.
Ding J, Cao Z N, Hu G Z, et al. Climate change impacts, adaptation and vulnerability and implications in Working Group Ⅱ of the IPCC Seventh Assessment Report[J]. Climate Change Research, 2025, 21(4): 484-493.

[2] 汤钟, 刘枫, 程鹏, 等. 城市更新背景下老旧小区海绵城市改造探索与实践[J]. 水利规划与设计, 2026(3): 11-16, 20.
Tang Z, Liu F, Cheng P, et al. Exploration and practice of sponge city renovation in old residential areas under the background of urban renewal[J]. Water Resources Planning and Design, 2026(3): 11-16, 20.

[3] 仲笑林, 李迪华. 镇江海绵城市建设老旧小区改造中的挑战与对策[J]. 中国给水排水, 2020, 36(24): 34-38.
Zhong X L, Li D H. Challenges and strategies on retrofitting of old residential communities of Zhenjiang sponge city development [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(24): 34-38.

[4] 陈韬, 夏蒙蒙, 刘云鹏, 等. 基于SWMM 的海绵改建小区雨水径流调控研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(11): 103-111.
Chen T, Xia M M, Liu Y P, et al. Regulation of stormwater runoff in sponge reconstructed community based on SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(11): 103-111.

[5] 戎贵文, 甘丹妮, 李姗姗, 等. 不同 LID 设施的面积比例优选及径流污染控制效果[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 168-173, 204.
Rong G W, Gan D N, Li S S, et al. Area proportion optimization of different LID facilities and effect of runoff pollution control[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 168-173, 204.

[6] 蒋逸恺, 张阳, 袁文麒, 等. 基于 SWMM 的老旧小区排水系统改造及方案评估[J]. 市政技术, 2025, 43(6): 237-247.
Jiang Y K, Zhang Y, Yuan W Q, et al. Drainage system retrofitting and scheme evaluation for old neighborhoods based on SWMM[J]. Journal of Municipal Technology, 2025, 43(6): 237-247.

[7] 苏毅, 于子宇. 基于容积法的老旧小区海绵城市设计方法研究——以烟台市开发区黄金家园小区为例[J]. 北京建筑大学学报, 2025, 41(6): 38-47.
Su Y, Yu Z Y. Research on the sponge city design method for old residential areas based on the volume approach: a case study of Huangjin Garden Community in Yantai economic and technological development zone[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2025, 41(6): 38-47.

[8] 徐常青, 冷林源, 陈正侠, 等. 海绵城市源头设施生命周期环境经济集成评价[J]. 环境工程, 2024, 42(1): 144-149.
Xu C Q, Leng L Y, Chen Z X, et al. Life-cycle environmental and economic benefits assessment of source control facilities for sponge city[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(1): 144-149.

[9] 张潇月, 李玥, 王晨杨, 等. 面向不同需求的未来社区海绵源头设施布局方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(9): 1483-1492.
Zhang X Y, Li Y, Wang C Y, et al. Layout methods of sponge source facilities for future community based on different needs [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(9): 1483-1492.

[10] 程新月, 王昊, 李智, 等. 基于 OPUT 的城市 LID 设施防涝布设方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(4): 638-648.
Cheng X Y, Wang H, Li Z, et al. Urban LID layouts for controlling waterlogging based on OPUT[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2024, 64(4): 638-648.