

刘安康, 许青, 朱文谨, 等. 基于容量交易和多尺度网格划分的海绵城市建设优化方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 68-82. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.005

LIU Ankang, XU Qing, ZHU Wenjin, et al. Optimization method for sponge city construction based on capacity trading and multi-scale mesh division[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 68-82. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.005

基于容量交易和多尺度网格划分的海绵城市建设优化方法

刘安康, 许青, 朱文谨, 张洋, 匡丽洁, 黄德龙, 谢青海, 闫家坤

(江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 【目的】针对海绵城市建设中 LID 设施应用面临的高建设成本和资源配置效率低等问题, 【方法】提出了一种基于容量交易和多尺度网格划分的优化策略。通过将研究区域进行 100 m、200 m、500 m 和 1 000 m 尺度的网格划分, 结合 SLSQP 优化算法和容量交易机制, 模拟不同单元间径流“传递”的潜力, 并按需配置 LID 设施。【结果】结果表明: 随着交易尺度的增大, 径流削减效果逐渐增强。相较于 100 m 交易尺度, 在满足径流系数的控制目标情况下, 200 m、500 m 以及 1000 m 交易尺度所需 LID 设施建设面积分别减少了 28.48hm²、87.33 hm² 和 138.16 hm²; 当径流控制率成为约束条件时, 200 m、500 m 以及 1 000 m 交易尺度所需 LID 设施建设面积分别减少了 24.74 hm²、117.32 hm² 和 192.18 hm²。【结论】综合分析表明: 随着交易尺度的增大, LID 设施的建设面积逐渐减少, 但当交易尺度过大时, 效益提升的幅度开始趋于平缓。500 m 交易尺度被认为是研究区域的最佳交易尺度, 这一尺度通过有效整合区域间的削减潜力, 在降低建设成本的同时, 避免了因尺度过大导致的效益递减。在实际应用中, 应根据具体区域的地形、气候和功能需求, 灵活选择适当的交易尺度, 以实现最佳的资源配置和径流削减效果, 该方法能够为海绵城市建设提供精细化与高效协同的路径。

关键词: 网格划分; 海绵容量交易; 空间尺度; 海绵城市; 绿色基础设施; 径流削减

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU98

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0068-15



听语音
聊科研
与作者互动

Optimization method for sponge city construction based on capacity trading and multi-scale mesh division

LIU Ankang, XU Qing, ZHU Wenjin, ZHANG Yang, KUANG Lijie, HUANG Delong, XIE Qinghai, YAN Jiakun
(School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China)

Abstract [Objective] To address the issues of high construction costs and low resource allocation efficiency in the application of Low Impact Development (LID) facilities in sponge city construction, [Methods] an optimization strategy based on capacity trading and multi-scale mesh division is proposed. The study area was divided into meshes at scales of 100 m, 200 m, 500 m, and 1 000 m. The Sequential Least Squares Quadratic Programming (SLSQP) optimization algorithm and capacity trading mechanism

收稿日期: 2025-01-02; 修回日期: 2025-02-24; 录用日期: 2025-03-17; 网络出版日期: 2025-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52408537, 52408177); 江苏省自然科学基金项目(BK20230692); 博士科研启动经费(KQ23036)

作者简介: 刘安康(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事城市雨洪管理及水文水资源方面研究。E-mail: 1529595982@qq.com

通信作者: 许青(1992—), 女, 讲师, 博士, 主要从事城市雨洪管理及水文水资源方面研究。E-mail: ydslgexq@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

were integrated to simulate the runoff “transfer” potential between different units and allocate LID facilities as required. [Results]The result showed that as the trading scale increased, the runoff reduction effect gradually strengthened. Compared to the 100 m trading scale, when the runoff coefficient control target was met, the required LID facility construction areas for the 200 m, 500 m, and 1 000 m trading scales were reduced by 28. 48 hm², 87. 33 hm², and 138. 16 hm², respectively. When the runoff control rate was set as a constraint, the required LID facility construction areas for the 200 m, 500 m, and 1 000 m trading scales were reduced by 24. 74 hm², 117. 32 hm², and 192. 18 hm², respectively. [Conclusion]Comprehensive analysis shows that as the trading scale increases, the required construction area for LID facilities gradually decreases. However, when the trading scale becomes excessively large, the rate of benefit improvement begins to level off. The 500 m trading scale is considered the optimal scale for the study area, as it effectively integrates runoff reduction potential across regions, reduces construction costs, and avoids the diminishing returns associated with excessive large scales. In practical applications, the trading scales should be flexibly selected based on the topography, climate, and functional needs of the specific area to achieve optimal resource allocation and runoff reduction effects. The proposed approach provides a refined and highly coordinated pathway for sponge city construction.

Keywords: mesh division; sponge capacity trading; spatial scale; sponge city; green infrastructure; runoff reduction

0 引言

随着城市化进程的加速,城市传统水循环系统正面临严峻挑战。大规模不透水面的增加导致了雨水径流量的大幅上升,进一步加剧洪涝问题,严重威胁城市的可持续发展及居民的生活质量^[1-2]。为应对这一问题,诸多国家提出了基于自然的雨水管理方案,如美国的低影响开发(Low Impact Development, LID)和最佳管理措施(Best Management Practices, BMP)^[3],英国的可持续排水系统(Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)^[4],以及中国的海绵城市^[5-6]。其中,LID设施作为一种绿色基础设施(Green Infrastructure, GI),通过恢复地表透水性有效减少城市雨水径流^[7]。研究表明,其对缓解城市径流问题具有显著成效^[8-9],但LID设施的推广与应用仍面临着建设成本高昂及局部配置优化效果有限等挑战^[10-11]。

在城市雨水管理中,LID设施通常依据功能区的水文特性进行配置^[12],如住宅区、商业区、工业区和绿地等。由于下垫面类型的差异,不同区域的径流系数存在显著差异;商业区和工业区通常由于大面积的不透水表面导致径流系数较高,径流总量较大;而公园、绿地等生态保护区由于透水性强,径流系数较低,削减效果显著。因此,基于功能区水文特性的传统配置方式虽然为城市雨水管理提供了基础框架,但也存在明显局限性^[13-14]。由于功能区间土地利用差异显著,部分区域可能出现设施过度建设、资源浪费,而另一些区域削减能力不足,难以应对过高的径流量^[15]。因此,在不同区域间调配削减潜力,对实现城市整体径流控制目标显得尤

为重要^[16]。为解决上述问题,FU等^[17]提出容量交易概念(Capacity Trading, CT),旨在通过不同区域径流的“传递”,以满足各区域的径流削减需求,CT机制的核心在于允许透水性较好的盈余单元将其削减潜力“转让”给径流管理压力大的亏缺单元。相关研究表明,CT机制可以有效优化城市径流管理,例如,李静思等^[18]通过优化汇流单元间的资源分配,利用暴雨洪水管理模型(Storm Water Management Model, SWMM)模拟验证协同改造在削减径流、减少LID建设需求方面具有显著效果;XU等^[19]探讨了两种交易尺度下(邻近交易和20 m范围的交易)的有效性,发现交易尺度对径流管理效果具有显著影响;李奥等^[20]对灰—绿海绵设施进行多目标优化,实现了溢流控制量的显著提升。尽管已有研究证明,随着交易尺度的增加,所需LID建设强度逐渐减少,但过大的交易尺度与海绵城市建设中“就近处理”雨水径流的理念相冲突^[21],因此,如何精确寻找最佳交易尺度就显得尤为重要。此外,以功能区为载体进行容量交易时,虽然与城市的整体规划相符合,但由于功能区面积差异较大,部分盈余单元的削减潜力难以满足亏缺单元的削减需求,从而削弱了容量交易的效果。因此,在容量交易中,需要合理控制交易规模,以平衡资源整合效率与建设效益,同时需要探索新的交易方法,解决功能区交易中削减潜力不匹配、资源浪费等问题,从而进一步提升海绵城市建设的整体效益。

为解决上述问题,本研究引入网格划分方法,通过将研究区域划分为不同尺度的网格单元,从而更精

准确地定位径流削减需求, 该方法使区域间径流削减潜力能够在更灵活的尺度上进行交易, 提升整体优化效果, 并为不同尺度的 LID 设施配置提供更加精细的调整空间^[22-23]。此外, 本研究还结合序列最小二乘规划优化算法 (Sequential Least Squares Programming, SLSQP), 进一步探讨了如何在多尺度交易的框架下平衡成本与效益, 最大化发挥城市雨水管理的整体效益。研究的具体目标包括: (1) 分析不同网格尺度对容量交易实施效果的影响, 尤其是不同尺度下削减潜力与资源配置效率的变化; (2) 寻找最优交易尺度, 以实现成本最小化的同时, 保持较高的径流削减效果和资源配置效率, 从而为城市径流管理提供一种高效且可持续的优化路径。

1 材料和方法

本文根据不同的网格尺度 (如 100 m、200 m、500 m 和 1 000 m) 将研究区域进行划分, 以实现精细化的雨水管理。基于研究区域相关数据 (管网、汇水区、降雨数据等), 使用 SWMM 模型对不同尺度的汇水单元的雨水径流进行模拟, 评估各区域的水文特性与 LID 设施需求。研究引入了 CT 机制, 通过分析盈余单元和亏缺单元之间的削减潜力, 同时利用 SLSQP 优化算法, 对不同网格单元中的 LID 设施进行优化配置, 旨在最小化建设面积并最大化径流削减效果。最后, 通过模拟和分析不同交易尺度下的径流削减效果, 评估 LID 设施配置与建设需求, 提出最优方案, 技术流程如图 1 所示。

1.1 研究区域

1.1.1 区域概况

连云港市位于江苏省东北部, 地理坐标为 33°58'55"N—35°08'30"N, 118°24'03"E—119°54'51"E, 属于温带季风气候, 年均降水量约 982 mm, 降水时空分布不均, 其中夏季降水较为集中, 占全年降水总量的 60% 左右, 由于该地区暴雨和风暴潮等极端天气事件频繁发生, 存在较大的城市洪涝灾害隐患。

本研究选取连云港市海州区作为研究区域, 南至海连中路及苍梧路、北至玉带河、西临大浦河、东临东盐河, 区域三面临水, 总面积约 12.68 km²。龙尾河穿流而过, 将区域分为东西两部分, 西侧老城区绿地面积比例较少, 雨水削减潜力较低, 东侧新城区人口密集, 雨水削减需求较大, 且东西侧内部显著的土地利用差异为容量交易机制的应用创造了良好条件。研究区域不透水面积占比高达 80.3%, 如图 2 所示。

区域内土壤类型以砂土和黏土为主, 具有较强的渗透性, 但由于区域内土地开发强度大, 城市化率高, 且沿海地区风暴潮、台风等极端天气频发, 传统排水系统已难以消纳超负荷的雨水径流, 易引发局部洪涝, 雨洪管理问题突出, 这与中国大部分城市发展特征相对一致。根据《海绵城市建设技术指南》《连云港市海绵城市专项规划(2016—2030)》的要求, 年径流总量控制率应达到 70%, 并在 2030 年将城市建设用地的径流系数控制在 0.49 以内。

1.1.2 设计降雨

根据连云港市气象局修订的设计暴雨强度公式, 设计降雨历时为 2 h, 雨峰系数 r 取 0.417, 为更准确反映不同重现期的降雨情景及雨洪响应特性, 本文采用芝加哥雨型生成器构建降雨过程, 得到研究区域 2a、3a、5a、10a 一遇的降雨情景 (见图 3)。计算公式为

$$i = \frac{9.5 \times (1 + 0.719 \lg T)}{(t + 11.2)^{0.619}} \quad (1)$$

式中, i 为降雨强度 (mm/min); t 为降雨历时 (min); T 为重现期 (a)。

1.2 研究方法

1.2.1 SWMM 模型与汇水区划分

SWMM 是一种广泛应用于城市雨水管理和水文分析的模型, 能够模拟降雨条件下的径流生成、地表流动和水质变化等^[24-25]。在 SWMM 模型中, 汇水区划分、管网配置和设计降雨数据是模型运行的核心要素。本文利用 ArcGIS 中的“创建渔网”工具, 将研究区域划分为 100 m、200 m、500 m 和 1 000 m 的不同尺度网格作为汇水区。与 Thiessen 多边形、水文特性及功能区等传统划分方法相比^[26], 网格划分展现出更高的灵活性, 能够适应不同尺度的容量交易, 提升资源调配效率和优化能力 (见表 1)。

1.2.2 SWMM 参数率定与验证

SWMM 模型中的关键参数包括不透水面糙率、透水面糙率、最大下渗速率和最小下渗速率等^[27]。模型参数取值通常依赖于模拟流量与实测流量的比较分析, 但由于研究区域缺乏实测数据, 因此, 本研究参考郭海星等^[28]针对连云港市徐圩区进行的 SWMM 参数率定结果, 并在此基础上使用综合径流系数法进行参数率定, 综合径流系数法通过比较模型模拟的径流系数与城市区域径流系数经验值来调整模型参数^[29]。SWMM 模型的径流系数是基于各子汇水区的加权平均值计算的, 而城市区域径流系数经验值

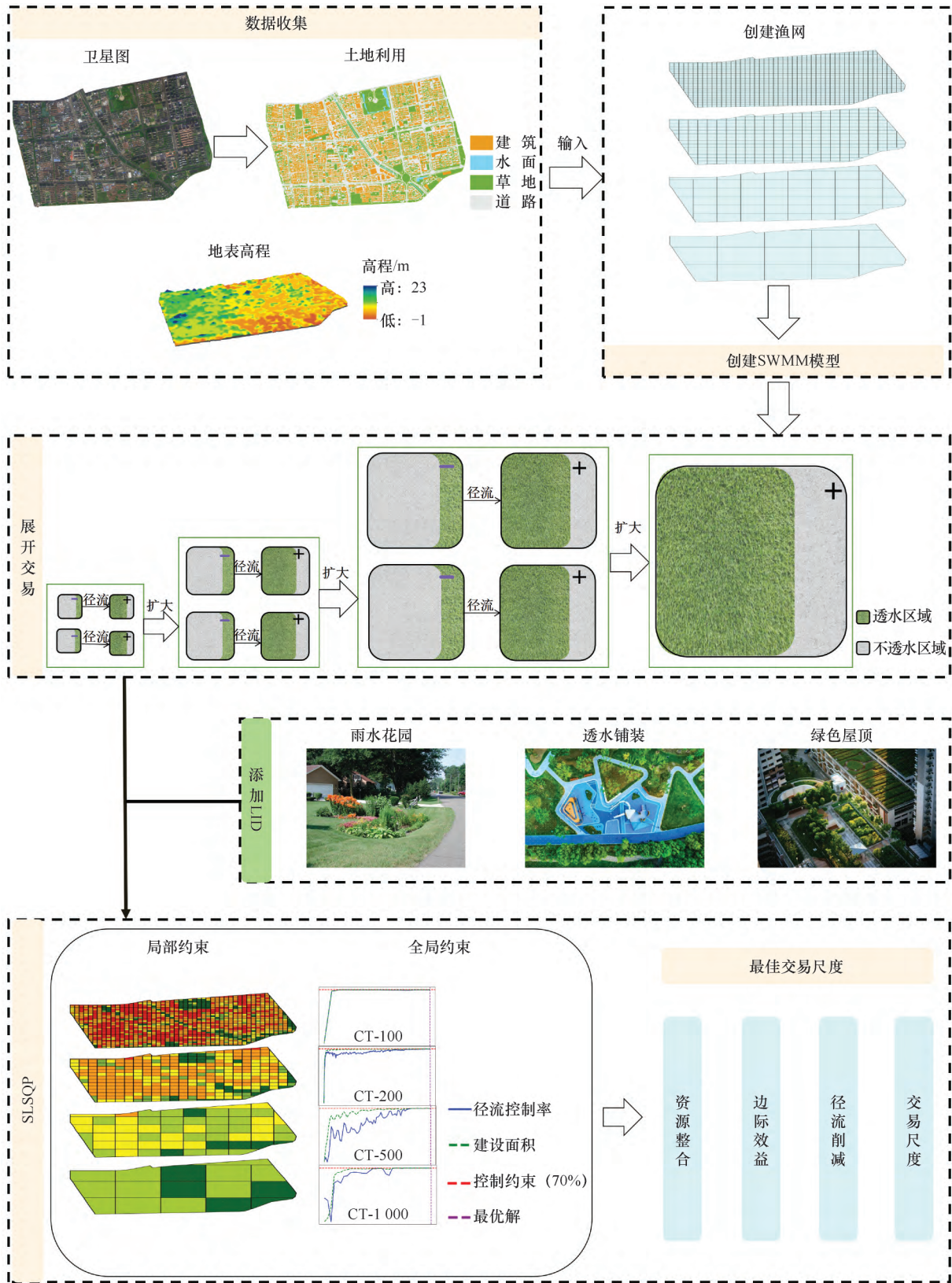


图1 技术流程

Fig. 1 Technical flowchart

则依据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021) 确定, 如表 2 所列。计算公式为

$$\varphi_{\text{total}} = \frac{1}{A_{\text{total}}} \sum A_i \varphi_i \quad (2)$$

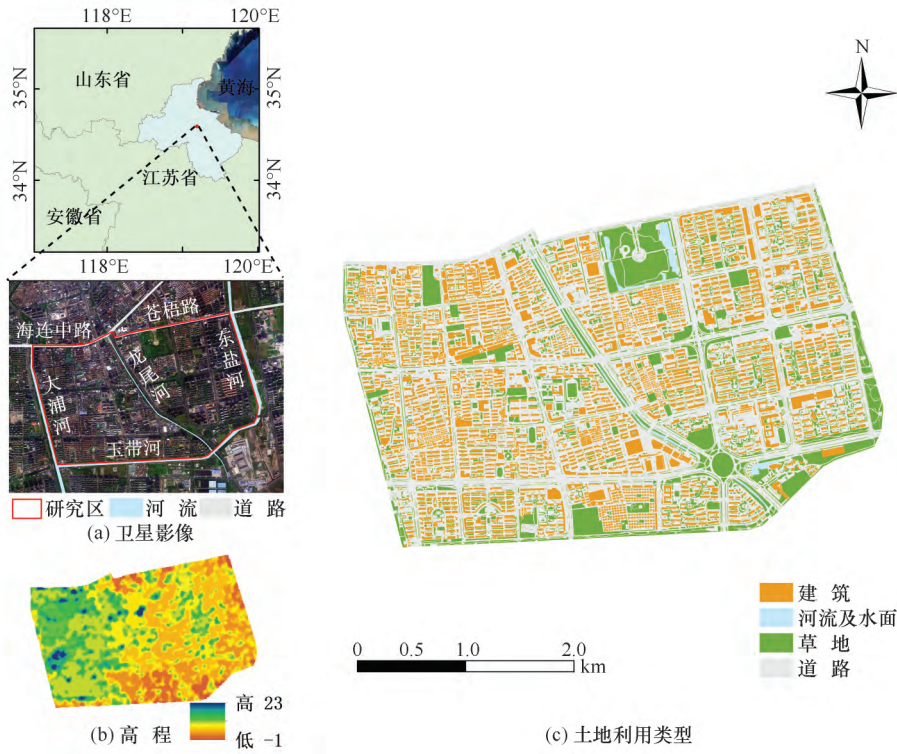


图2 研究区位置

Fig. 2 Location map of the study area

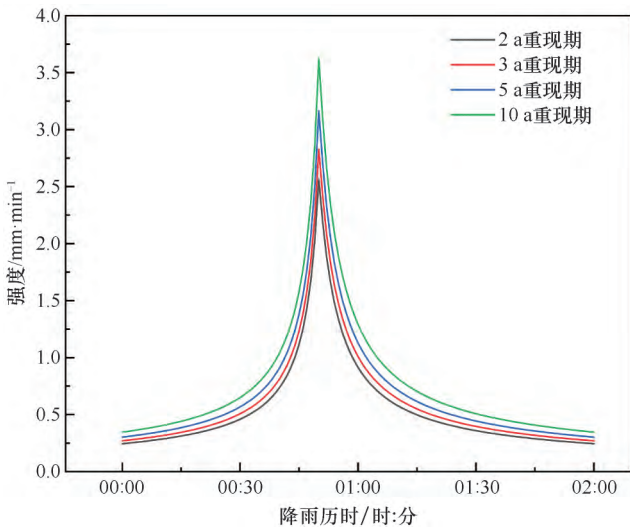


图3 降雨历程

Fig. 3 Rainfall process

式中, A_i 为第 i 个单元面积 (km^2); φ_i 为第 i 个单元的综合径流系数; A_{total} 为研究区域总面积 (km^2); φ_{total} 为研究区域综合径流系数。

根据 ArcGIS 目视解译的结果, 研究区域的不透水面积为 80.3%, 属于建筑密集的中心区, 综合径流系数应在 0.6~0.8 范围内。模拟结果显示在未添加 LID 设施的情况下, 径流系数与尺度之间呈显著

负相关(见表 3), 径流系数的变化表明不同尺度径流削减需求与削减潜力存在显著差异, 为 CT 机制的应用提供了理论基础。在模拟的四次设计降雨事件中, 径流系数均维持在 0.6~0.8 范围内, 符合《室外排水设计标准》(GB 50014—2021) 要求, 表明模型具有较高的稳定性和可信度, 模型参数如表 4 所列。

1.2.3 容量交易的概念

CT 机制旨在通过 LID 设施与各单元地块间的联动, 推动亏缺单元(径流系数 >0.49)向盈余单元(径流系数 <0.49)“借力”, 实现径流削减潜力的动态调配, 其核心在于通过优化单元间的资源流动与配置, 实现削减潜力的最优调配。在实际交易过程中, 可以结合动力设备、自然溢流或依靠坡向建设 LID 设施的方式, 将客水引导至透水性较好的区域进行处理, 水流以推流方式前进, 并在流动过程中与地表接触, 从而增加径流的下渗。具体而言, 亏缺单元可通过借助 LID 设施将超出其削减能力的径流转移至盈余单元, 从而利用盈余单元的削减潜力, 实现更高效的径流控制。在此机制中, 盈余单元具有较强的雨水渗透能力, 而亏缺单元需要通过 LID 设施或容量交易达到控制目标, 通过径流“传递”, 盈余单元的削减潜力可“转移”至亏缺单元, 实现资源的优化配置, 减

表 1 不同汇水区划分方式的优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different division methods for catchment area

划分方式	优点	缺点
网格	1. 灵活性高, 能够适应不同尺度的容量交易 2. 便于优化资源配置, 提高效率 3. 能更精细地反映不同区域的水文特征	可能需要较高的计算资源和时间
Thiessen 多边形	1. 适用于较为均匀的区域, 计算简单 2. 能较好地反映降水分布	1. 对于具有较大差异的区域, 划分效果较差 2. 不适合处理容量交易等复杂问题
水文特征	1. 能基于土地利用和水文特性进行合理划分 2. 能有效反映不同功能区的水文行为	1. 划分过程复杂, 需大量数据支持 2. 需要较强的专业知识进行判断和处理
功能区划分	1. 适用于有明确功能区域的城市, 能够反映不同区域的需求 2. 管理性较强, 符合城市规划	1. 可能导致资源配置不均, 某些区域可能过度开发而其他区域不足 2. 不适用于快速变化或不规则的城市结构

表 2 城市综合径流系数经验值

Table 2 Empirical values of urban composite runoff coefficients

区域特征	不透水面积占比/%	综合径流系数
建筑稠密的中心区	>70	0.6~0.8
建筑较稠密的中心区	50~70	0.5~0.7
建筑较稀的居住区	30~50	0.4~0.6
建筑很稀的居住区	<30	0.3~0.5

表 3 不同重现期下径流系数

Table 3 Runoff coefficients under different return periods

交易尺度	2 a	3 a	5 a	10 a
CT-100	0.735	0.755	0.775	0.798
CT-200	0.714	0.733	0.753	0.776
CT-500	0.668	0.686	0.706	0.730
CT-1 000	0.612	0.629	0.650	0.674

表 4 模型参数

Table 4 Model parameters

参数名称	参考取值	率定后取值
不透水面糙率(N-Imperv)	0.010	0.025
透水面糙率(N-Perv)	0.25	0.25
不透水区洼地蓄水深度(D-Imperv) /mm	2.5	2.5
透水区洼地蓄水深度(D-Perv) /mm	7.0	7.0
最大下渗速率/mm · h ⁻¹	90	90
最小下渗速率/mm · h ⁻¹	4	4
渗入衰减系数/h ⁻¹	4.0	1.7
干燥时间/d	7	7
管道曼宁糙率(Roughness)	0.012	0.012

1.2.4 容量交易计算公式

盈余区域满足径流系数 $\varphi \leq 0.49$ 后, 多余的削减能力可以通过容量交易用于补偿亏缺区域, 关系函数如下。

盈余区域补偿能力

少 LID 设施建设面积, 进一步提高整体径流削减效率, 交易过程如图 4 所示。

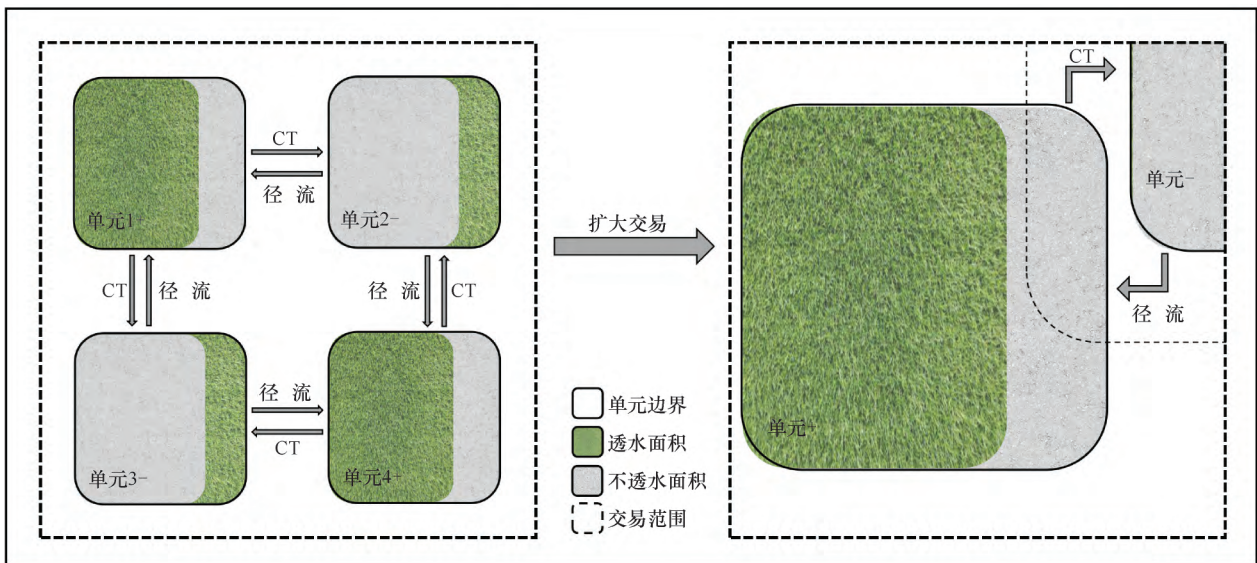


图 4 容量交易概念模型

Fig. 4 Conceptual model of capacity trading

$$T_{\text{surplus, total}} = \sum_{i \in \text{surplus}} Q_{(X_i)} \times \frac{\varphi_{\text{target}}}{\varphi_{(X_i)}} - Q_{(X_i)} \quad (3)$$

亏缺区域的削减需求

$$T_{\text{deficit, total}} = \sum_{i \in \text{deficit}} Q_{(X_i)} - Q_{(X_i)} \times \frac{\varphi_{\text{target}}}{\varphi_{(X_i)}} \quad (4)$$

式中, $Q_{(X_i)}$ 为第 i 个单元建设比例 X_i 条件下的径流量 (10^3 m^3); φ_{target} 为单元目标径流系数 (0.49); $\varphi_{(X_i)}$ 为第 i 个单元建设比例 X_i 条件下的径流系数; $T_{\text{surplus, total}}$ 为区域盈余总量 (10^3 m^3); $T_{\text{deficit, total}}$ 为区域亏损总量 (10^3 m^3)。

理论交易后的剩余削减需求

$$T_{\text{net}} = T_{\text{surplus, total}} - T_{\text{deficit, total}} \quad (5)$$

式中, T_{net} 为盈余区域的削减能力 $T_{\text{surplus, total}}$ 用于补偿亏缺区域的削减需求 $T_{\text{deficit, total}}$ 后剩余的削减需求, $T_{\text{net}} \geq 0$ 表示展开交易后, 盈余区域完全补偿亏缺, 无需新增 LID 设施, $T_{\text{net}} < 0$ 表示盈余不足补偿亏缺, 需新增 LID 设施或继续寻求交易。

1.2.5 SLSQP 规划模型

为反映不同交易尺度的建设需求, 本研究构建了以最小化 LID 设施建设面积为目标的函数。由于目标函数的线性特性未知, 本研究选择适用于线性与非线性的优化模型——SLSQP。SLSQP 能够有效计算非线性和不等式约束, 通过迭代优化, 其能够有效规避局部最优解的局限性, 在全局范围内实现多目标优化平衡, 如最小化 LID 设施建设面积与最大化径流削减效益, 从而提升资源配置效率, 确保在满足径流系数、削减需求等多项条件下找到最优解。

在研究区域内, 研究选择雨水花园、绿色屋顶和透水铺装三类 LID 设施, 以满足不同土地利用类型的需求。已有研究表明, LID 设施建设比例与径流系数及径流总量呈明显的线性关系^[30], 在 LID 设施配置过程中, 径流系数和径流控制率等约束通常表现为不等式的形式, SLSQP 能够直接将这些不等式条件纳入优化过程, 并在满足不等式约束的情况下, 找到最优解^[31], 这种特性使 SLSQP 特别适合在多重不等式约束优化 LID 设施的配置。

设计变量: 对研究区域不同单元分别建设 0~49.5% 的 LID 设施, 即

$$X_{(i+1)} = X_i + \Delta X \quad (6)$$

式中, ΔX 为每次增加的 LID 设施比例; ΔX 为 1.5%, 其中雨水花园、绿色屋顶以及透水铺装各占 0.5%。

优化目标: 最小化所有单元的建设面积, 即

$$\min \sum_{i=1}^n A_i \times X_i \quad (7)$$

式中, A_i 为第 i 个单元的面积 (km^2); X_i 为第 i 个单元的建设比例。

局部约束: 每个单元的径流系数必须小于或等于 0.49, 即

$$\varphi_{(X_i)} \leq 0.49 \quad (8)$$

式中, $\varphi_{(X_i)}$ 为在第 i 个单元建设比例为 X_i 条件下的径流系数。

全局约束: 整体的径流控制率大于 70%, 即

$$\eta = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{P \times A_{\text{total}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, η 为径流控制率; Q_i 为第 i 个单元的残余径流量 (10^3 m^3); P 为降雨量 (mm); A_{total} 为研究区域总面积 (km^2)。

边界条件

$$0 \leq X_i \leq 0.495 \quad (10)$$

1.2.6 边际效益

过度提高建设强度, 所取得的建设效益会逐步下降, 为量化分析不同比例 LID 设施带来的效益, 本研究引入了边际效益 (Marginal Rate, MR) 指标, 即每增加 3% 建设比例所带来的径流系数削减效益。计算公式为

$$MR = \left| \frac{R_{i+1} - R_i}{P_{i+1} - P_i} \right| \quad (11)$$

式中, R_i 、 R_{i+1} 分别为第 i 阶段和第 $i+1$ 阶段的径流系数; P_i 和 P_{i+1} 分别为第 i 阶段和第 $i+1$ 阶段的 LID 设施建设比例。

2 结果与讨论

2.1 SWMM 模拟运行

2.1.1 不同交易尺度的径流特征

海绵城市的核心目标之一是通过源头控制和分散式管理措施, 减少城市内涝和径流污染。2 a 一遇的降雨事件由于发生频率较高, 其对城市水文过程的影响尤为显著^[32]。这些频繁的降雨事件可能造成较小范围的水流集中, 从而引发局部的内涝问题。此外, 根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006) 中的规定, 中等城市和小城市的雨水管网设计重现期为 2~3 a。因此, 选择 2 a 一遇的重现期作为优化目标, 可以有效反映海绵城市在应对高频降雨事件时的调控效果。研究结果显示, 在未建设 LID 设施的情况下, 综合径流系数和交易尺度之间存在显著的负相关关系, CT-100、CT-200、CT-500、CT-1000 综合径流系数分别为 0.735、0.714、0.668 和 0.612。盈余面积和交

易尺度之间存在负相关关系,这主要是由于过度扩大交易尺度,更多的亏损区域被纳入到局部盈余区域的交易中,使得盈余区域无法满足新增亏损区域的需求,从而导致盈余单元超负荷。但由于较大交易尺度(如CT-500和CT-1000)盈余单元的径流削减潜力可较为充分地交易至亏损单元,单元径流系数大多维持在0.601~0.700之间,表现出更优的径流削减效果,相比之下,小交易尺度(如CT-100和CT-200)由于盈余单元的削减潜力未能完全交易至亏损单元,导致研究区域综合径流系数保持在较高水平,单元径流系数大多维持在0.701~0.800(见表5、图5)。

表5 不同交易尺度下各径流系数区间的面积 hm^2
Table 5 Area of each runoff coefficient range under different trading scales hm^2

径流系数	CT-100	CT-200	CT-500	CT-1000
0~0.490(盈余)	70.36	52.47	24.99	0.00
0.491~0.600(亏损)	74.14	63.85	97.16	300.55
0.601~0.700(亏损)	140.90	240.26	790.76	967.46
0.701~0.800(亏损)	590.76	877.35	355.10	0.00
0.801~0.900(亏损)	391.85	34.08	0.00	0.00

2.1.2 径流系数变化趋势

本研究通过在不同交易尺度内逐步增加LID设施

建设比例(0~49.5%),探讨了不同交易尺度和建设比例对径流削减效果的影响,结果如图6所示。随着LID设施建设比例的增加,不同交易尺度的径流系数均显著下降,验证了LID设施在不同尺度下的有效性^[33]。数据显示,在未建设LID设施时,如CT-100、CT-200、CT-500以及CT-1000的初始径流系数分别为0.735、0.714、0.668和0.612。随着LID设施比例逐步增加至49.5%,径流系数分别降至0.217、0.203、0.131和0.088,各交易尺度的径流系数降幅均超过70%,其中CT-500径流系数降幅最大,达到0.537。

由SWMM模拟结果可知,不同交易尺度的边际效益存在显著差异,如图7所示。在初始建设LID设施时,CT-500的边际效益最优,达1.41,相比之下,CT-100的边际效益最低,仅为1.28。随着LID设施建设比例逐步增加到48%,CT-100的边际效益逐渐优于其他尺度,为0.82,而CT-500略低于CT-100,为0.76。这一现象表明,相较于其他交易尺度,CT-500在不同建设比例下始终能够实现较为优越的边际效益。总体而言,随着建设比例增加,边际效益逐渐减少。高曼等^[34]以及李沐寒等^[35]先前的研究同样指出径流削减效率会随着建设比例的增加而趋于平缓。

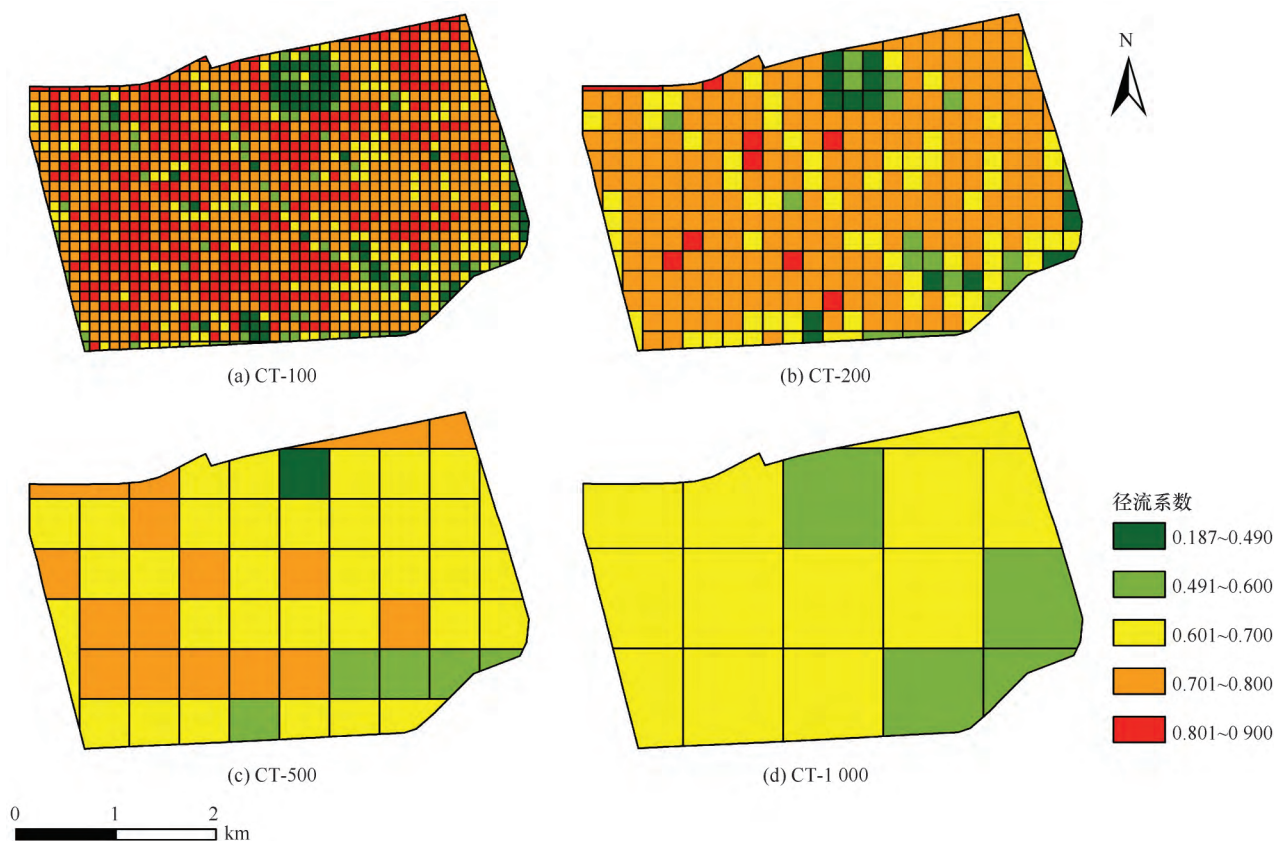


图5 研究区域径流系数分布

Fig. 5 Distribution of runoff coefficients in the study area

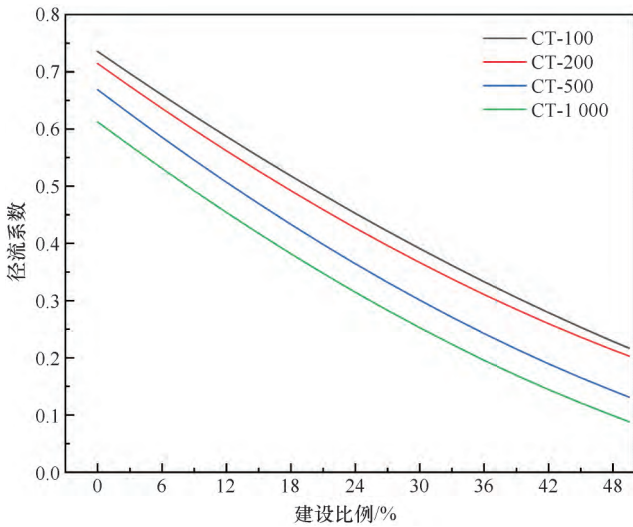


图 6 不同建设比例下径流系数

Fig. 6 Curves of runoff coefficients under different construction proportions

因此在实际建设 LID 设施时, 应选择适度的 LID 比例, 以平衡径流削减效益与经济效益。这一结果为后续容量交易和优化配置提供了数据支持, 进一步验证了 LID 设施配置在多尺度交易条件下的有效性。

2.2 容量交易优化效果

2.2.1 典型区域的盈余变化

在未建设 LID 设施的情况下, 研究发现盈余面积主要集中于图中所示的典型区域, 因此选择该区域进行分析展示。分析表明, 该典型区域内包含一块较大的透水面积, 这成为 CT-100、CT-200 和 CT-500 盈余单元的主要来源。然而在 CT-1000 中, 由于交易尺度增大, 盈余潜力被分配到更广范围的亏损区域, 导致该区域的盈余能力不足以完全平衡全局的亏损, 最终

使 CT-1000 在未建设 LID 设施时表现为亏损状态。进一步对比不同建设比例下, 不同交易尺度盈余分布的特征, 可以发现大交易尺度的盈余往往来源于小交易尺度中局部盈余区域的交易。这主要是因为随着扩大交易尺度的过程中, 盈余区域的削减潜力通过 CT 机制逐渐“传递”给亏损区域, 因此在大交易尺度上展现出更显著的盈余效果, 如图 8 所示。

不同建设比例下的盈余量如表 6 所列。由表 6 可知, 在 15%、12% 的建设强度下, CT-100 和 CT-200 已分别达到理论上的盈余平衡, 而通过 SWMM 模拟运行, CT-500 仅需建设 15% 的 LID 设施即可满足区域内的全部盈余需求, CT-100 和 CT-200 分别需要建设区域内 27% 和 24% 的 LID 设施面积才能满足区域的全部盈余需求, 这表明小交易尺度中潜在的资源浪费在 CT-500 的资源整合过程中得到了有效利用。

从实际应用的角度看, 在进行海绵城市规划时, 针对典型区域(如公园等透水性强的区域或是交通枢纽等透水性较差的区域)的分布特点应进行更精细的识别和处理, 可以考虑采用小交易尺度划分或赋予更高的权重, 以避免规模效应掩盖其特性, 确保资源配置的效率和精确性, 同时这也提示了在扩大交易尺度时需谨慎评估整体资源整合能力, 避免因过度整合导致局部资源的浪费或亏缺区域的进一步扩大。

2.2.2 交易尺度的盈余变化

随着 LID 设施建设比例的增加, 交易尺度和盈余面积间的关系逐渐清晰, 但不同交易尺度的表现存在明显差异, 如图 9 所示。在 LID 设施建设比例较低(如 0~9%) 时, 不同交易尺度的盈余面积增长较为缓慢, 未呈现出显著增长趋势。随着建设比例的进

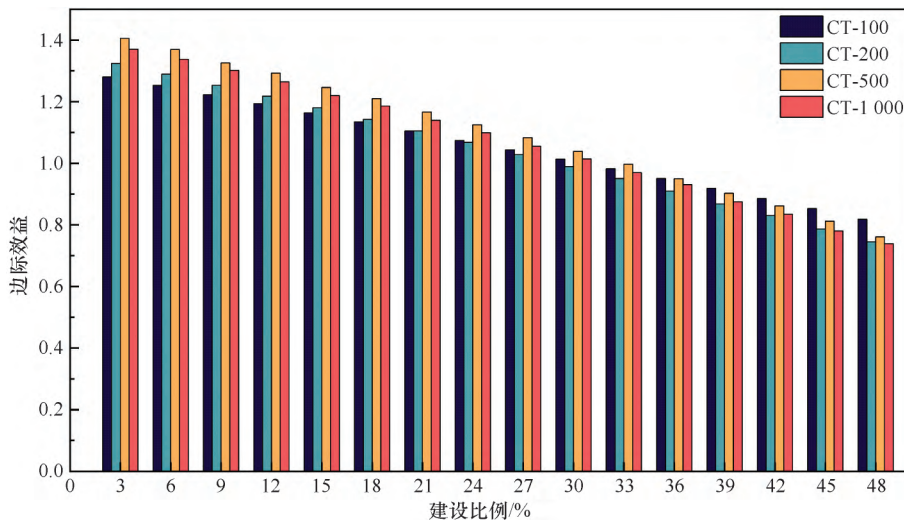


图 7 不同建设比例下边际效益

Fig. 7 Marginal benefits under different construction proportions

表 6 不同建设比例下的盈余量

10^3 m^3

Table 6 Surplus volumes under different construction proportions

10^3 m^3

交易尺度	单元个数	0	3%	6%	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%
CT-100	98	-9.73	-7.52	-5.37	-3.28	-1.23	0.76	2.71	4.60	6.43	8.22
CT-200	25	-8.59	-6.31	-4.09	-1.93	0.17	2.21	4.18	6.07	7.91	9.67
CT-500	4	-6.18	-3.71	-1.31	0.98	3.22	5.39	7.49	9.50	11.45	13.33
CT-1000	1	-3.23	-0.79	1.58	3.89	6.13	8.30	10.41	12.39	14.36	16.21

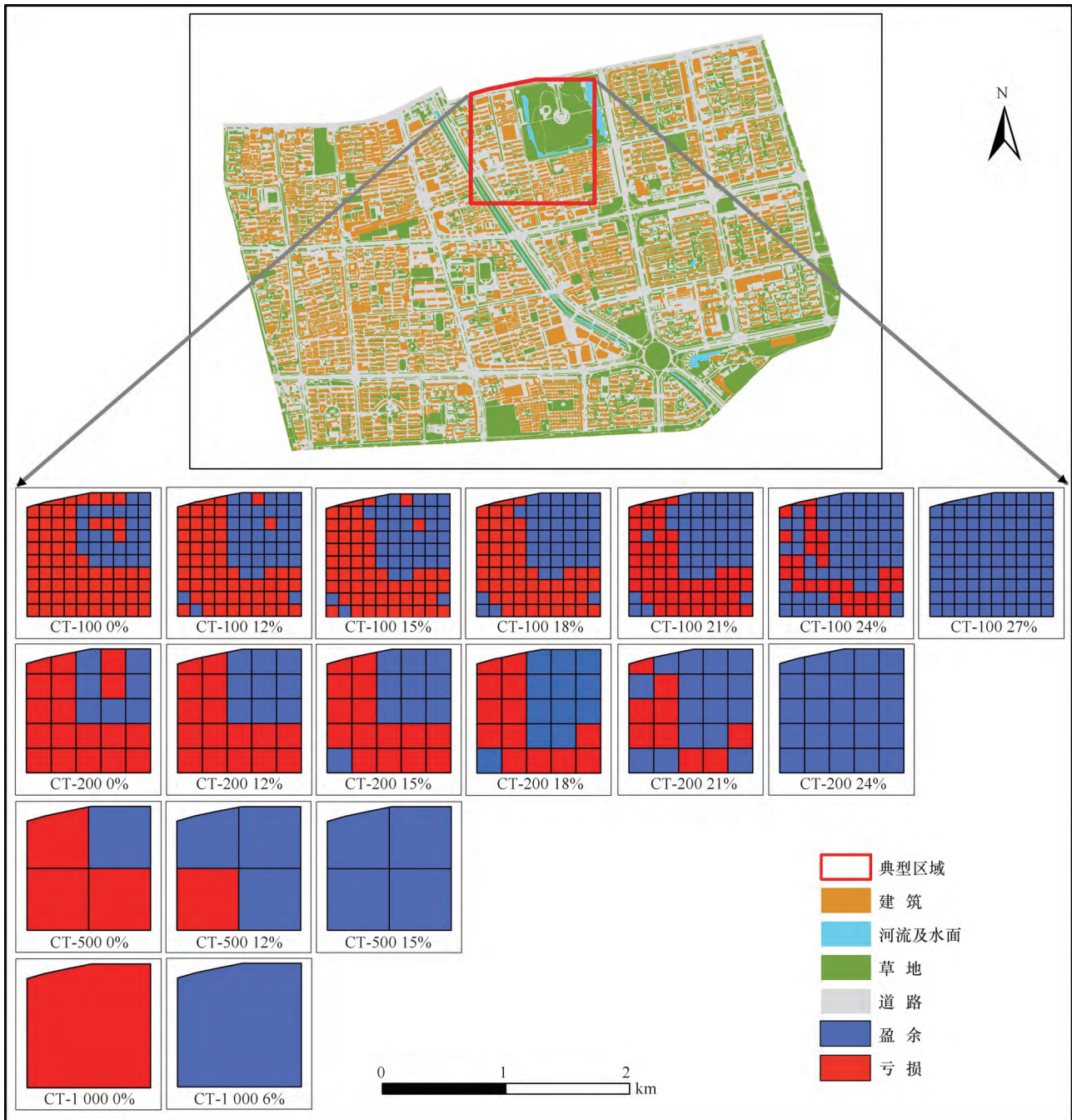


图 8 典型区域的盈余变化

Fig. 8 Surplus variations in typical areas

一步提高, 交易尺度的扩大对盈余面积的影响逐渐显现, 在建设比例达到 12% 时, CT-1000 的盈余面积显著增加; CT-500 在建设比例为 15% 时开始显著增长; 而 CT-200 和 CT-100 分别在建设比例为 21% 和 24% 时才开始显著增长。当建设比例逐渐增加到 15% 时, CT-1000 所有单元均满足径流系数的要求, 而此时 CT-100 的盈余面积仅达到 200.43 hm², 仅为研究区域面积的 15.8%, 这表明小交易尺度在低建设比例阶段仅依赖局部交易难以实现与大交易尺度相同的效果。

从 CT 角度分析, 这一趋势反映了不同交易尺度的盈余和亏缺单元在资源调配上的差异, 大交易尺度能够更有效地利用盈余单元的削减潜力, 从而降低亏缺单元的径流削减需求; 而较小交易尺度则因其交易范围有限, 需要更高的 LID 设施建设比例才能满足亏缺单元的削减需求。总体而言, 适当扩大海绵交易的尺度, 有助于更高效地整合盈余与亏缺单元的资源调配, 更好地实现城市整体径流削减目标。

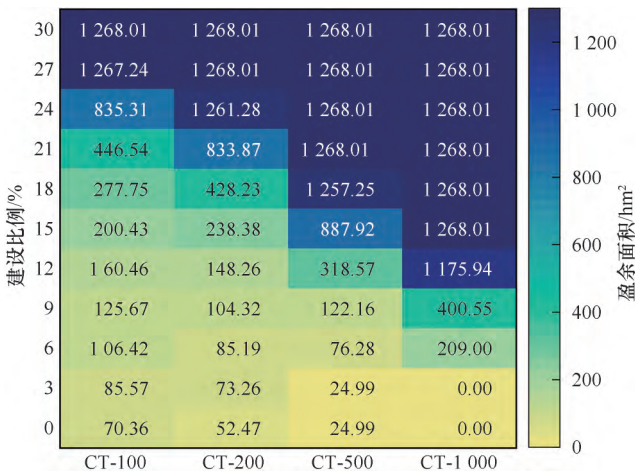


图 9 不同建设比例下盈余面积分布 heatmap

Fig. 9 Heatmap of surplus area distribution under different construction proportions

2.2.3 局部约束下不同交易尺度的建设比例分布

在满足局部约束条件下(单元径流系数 ≤ 0.49), 不同交易尺度的建设比例分布表现出显著差异, 如图 10 所示。小交易尺度(如 CT-100)中建设需求的差异显著, 这主要受建筑密集区和交通枢纽等高密度区域的影响, 这些区域因径流量较大需要更高比例的 LID 设施以满足径流削减目标。相反, 绿地等透水区域建设需求较低, 甚至为零。然而, 这些透水区域的削减潜力未能通过 CT 机制得到充分利用, 导致盈余资源浪费, 分配效率降低。随着交易尺度的增大(如 CT-200 和 CT-500), 盈余单元的径流削减潜力逐步交

易至亏缺单元中。这种交易使得建设比例的空间分布更加均衡, 例如在 CT-500 下, 高建设需求区域的比例显著减少, 大多数单元仅需建设 10%~20% 的 LID 设施即可达到径流系数要求。在最大交易尺度(CT-1000)下, 资源整合效应进一步优化, 所有单元的建设需求趋于均匀, 所需建设比例显著降低, 这与徐晨旋等^[21]先前研究中得出的结论一致, 即建设强度随着交易区面积的增大而减小。具体而言, CT-100、CT-200、CT-500 和 CT-1000 在满足区域内全部盈余所需的 LID 设施面积分别为 264.78 hm²、236.30 hm²、177.45 hm²、126.62 hm²。这一结果表明, 扩大交易尺度能够有效优化资源配置, 减少建设需求, 从而实现更加均衡的资源分配和削减目标。总体而言, 小交易尺度的不同单元建设需求差异性较大, 而大交易尺度通过 CT 有效减少了局部高密度区域的建设需求, 使得建设强度分布的离散程度较低。

2.2.4 全局约束下不同交易尺度的建设需求

各交易尺度下的径流控制率与建设面积的迭代优化过程如图 11 所示。CT-100 仅需 15 次迭代优化模型便得出了最优建设方案, 这主要因为优化模型的容差设置, 当目标函数值(建设面积)的变化小于 0.001 时, 算法将停止迭代, 此外 CT-100 包含较多的网格单元, 这些单元之间的相互影响较小, 每个单元的建设比例具有较高的独立性。因此, 优化算法能够同时调整大部分单元, 快速找到全局最优解。

优化结果表明, 随着交易尺度的扩大, LID 设施的总建设面积逐步减少, 各交易尺度建设面积分别为 484.50 hm²、459.76 hm²、367.18 hm²、292.32 hm²。与 CT-100 相比, CT-200、CT-500 和 CT-1000 的建设面积分别比 CT-100 减少了 5.11%、24.21% 和 39.67%。然而, 当交易尺度从 CT-500 扩大到 CT-1000 时, 建设面积仅减少了 20.39%, 张蒙达等^[20]以及王爽^[36]同样指出随着交易尺度的扩大, 资源的整合效益趋于饱和, 其效益提升的幅度开始逐渐减缓。将得到的建设方案重新输入 SWMM 模型进行模拟, 结果显示各交易尺度的径流控制率分别为 70.04%、69.59%、69.95% 和 69.97%, 均基本达到约束要求。为进一步验证 2 a 重现期下优化方案的有效性, 本研究将优化方案应用于 3 a、5 a 和 10 a 重现期下, 结果如表 7 所列。除 CT-100 在 10 a 重现期条件下径流控制率略低于 60%, 其余模拟结果径流控制率均维持在 60% 以上, 且在相同重现期下, 随着交易尺度的扩大径流控制率逐步增高, 进一步验证了容量交易的有效性。然而, 随着重现期的增加, 径流控制率在各交

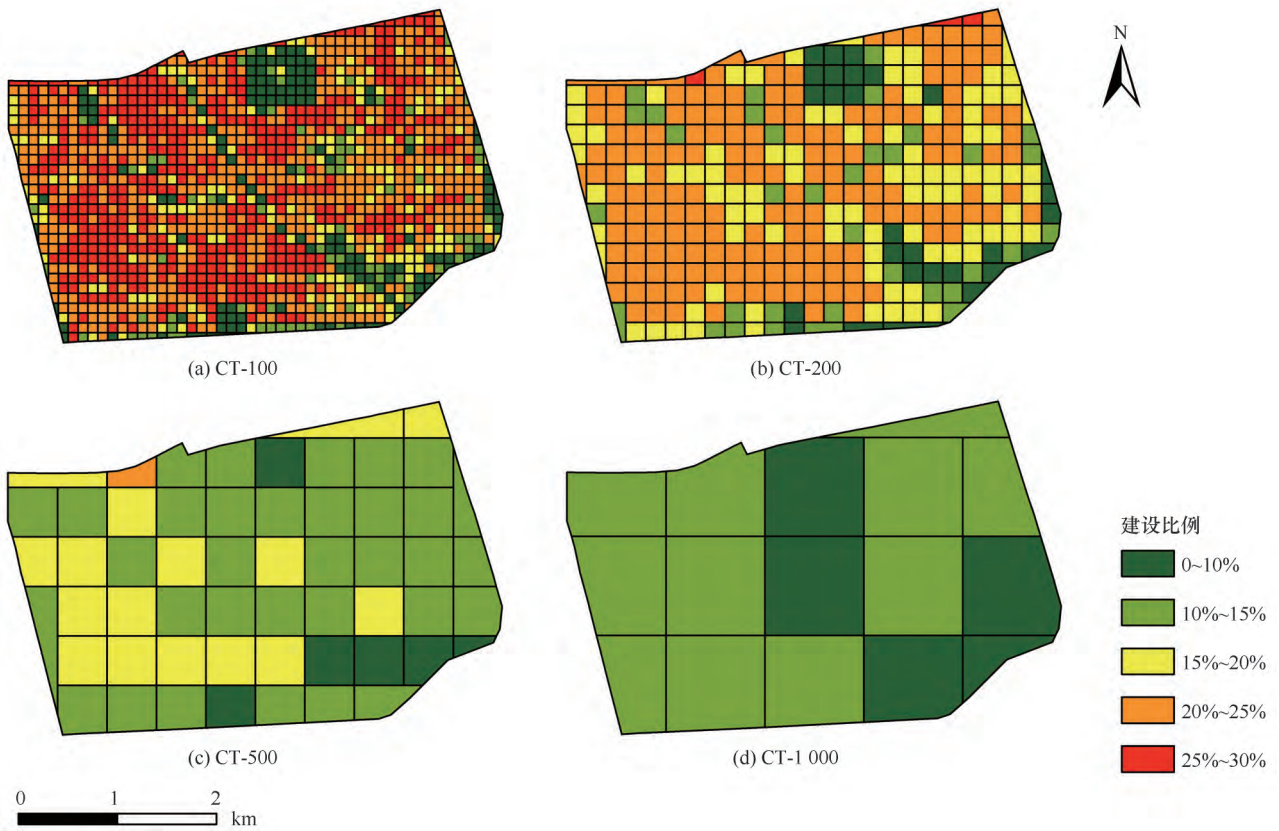


图 10 不同交易尺度建设所需比例

Fig. 10 Required construction proportions at different trading scales

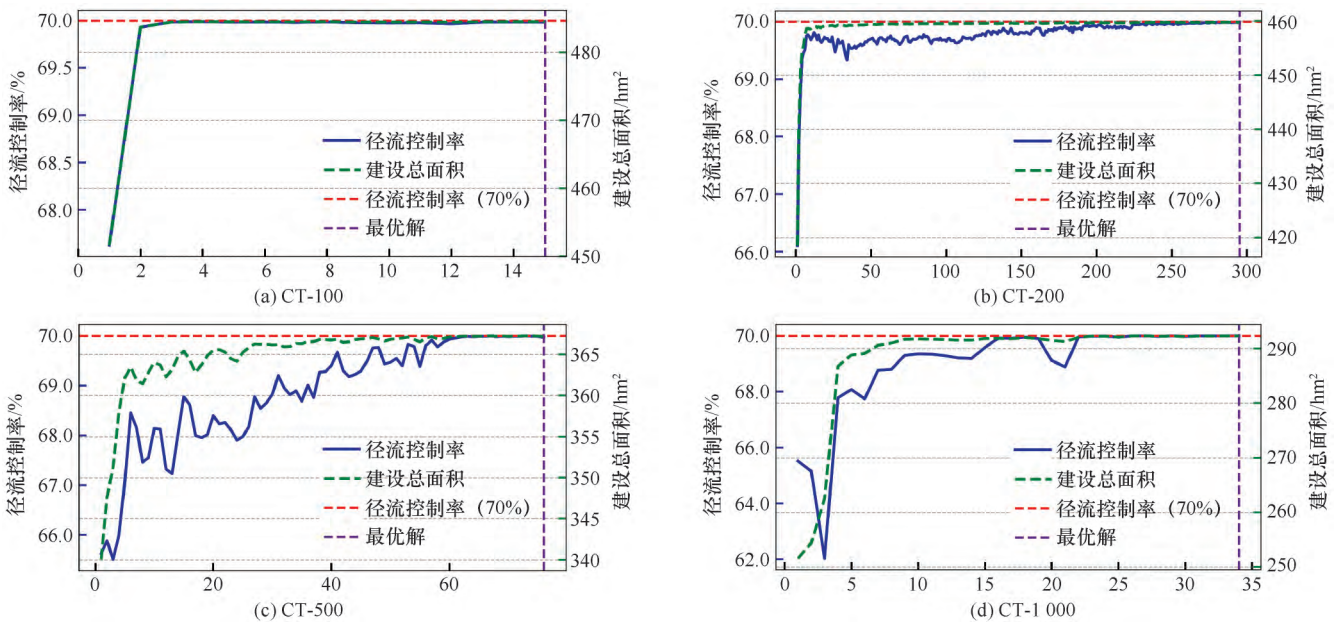


图 11 各交易尺度径流控制率与建设总面积的迭代优化分析

Fig. 11 Iterative optimization analysis of runoff control rates and total construction areas at different trading scales

易尺度下呈现逐步下降的趋势。这表明, 尽管扩大尺度交易能够带来更优的径流削减效果, 但在应对强降雨时, 可能由于 LID 设施设计承载能力有限以及局部

区域的削减潜力不足, 仍面临局部控制效果不足的困境^[8, 37]。因此, 在实际应用中, 应根据地形、区域差异、气候特点等因素, 选择最优的交易尺度, 提升

表 7 不同重现期下的径流控制率 %

Table 7 Runoff control rates under different return periods %

交易尺度	2 a	3 a	5 a	10 a
CT-100	70.04	66.60	63.02	59.17
CT-200	69.59	66.83	63.83	60.41
CT-500	69.95	67.65	65.05	62.04
CT-1000	69.97	68.01	65.80	63.21

LID 设施规模承载能力, 并充分发挥传统排水系统与 LID 设施的协同作用, 同时, 蓝绿基础设施的有机融合也至关重要。蓝色基础设施(如水体、湿地等)与绿色基础设施(如雨水花园等)应相互配合, 共同构建一个综合的雨水管理系统^[38-39]。

2.3 结果讨论

在以往的容量交易研究中, 大多数依赖于功能区类别来划定交易区域, 并将这种交易范围在一定程度上进行扩展^[19, 40]。各级政府发布的相关政策也主要采用了区域划分计划来设定建设目标, 并分配责任以达成这些目标^[41]。虽然以功能区为载体进行容量交易的方法在管理和政策实施上较为便利, 但由于功能区大小不一, 交易双方盈亏差异较大, 难以达到理想的交易效果。相比之下, 多尺度网格可灵活调整尺度, 使得交易双方在更加平等的条件下进行。但网格划分在实际应用中也面临着一些挑战, 如高数据采集成本和协调复杂度增加^[22], 未来的研究可以在初步规划阶段采用功能区划分, 以明确 LID 设施建设相关方的责任。在局部区域内, 可采用精细化网格划分, 捕捉小尺度细节, 并规划“传输”路径。通过这种方法, 以平衡宏观层面的管理与微观层面的优化, 从而实现更高效的资源配置。

3 结论

本研究通过多尺度网格划分(100 m、200 m、500 m、1 000 m)和容量交易机制, 提出了一种优化城市雨水径流控制的新方法。以连云港市为研究区域, 研究表明, 多尺度网格划分能够有效适应不同削减需求, 通过交易区域逐步扩大, 实现了更高效的资源调配和径流控制效果。具体结论如下。

(1) 在 CT-100 和 CT-200 的小尺度下, 可识别出单元内部的“热点”区域, 最大径流系数差异达 0.6, 局部削减需求得到了较为精准的捕捉, 相比之下, 大尺度(CT-500、CT-1000)通过整合更广泛的区域, 显著提升了径流削减效率。

(2) 建设强度与径流削减效益呈显著负相关关系, 在低建设比例区间, 相较于其他交易尺度, CT-

500 和 CT-1000 展现出较好的边际效益; 而在高建设比例区间, CT-100 和 CT-500 则表现出较优的边际效益。综合来看, CT-500 在不同建设比例下均能取得较为优越的边际效益, 表现出较好的资源配置和削减效果, 在实际规划中具有较大的应用优势。

(3) 随着建设尺度的增大, 所需的 LID 设施面积逐渐减少, 但当交易规模扩大到一定程度时, 所能获得的效益会显著递减。在实际应用中, 应根据具体区域的地形、降水特征、功能区分布以及资源配置需求等因素, 灵活选择合适的交易尺度, 以实现最优的资源调配和削减效果。

(4) CT-500 被认为是本研究区域最佳交易尺度, 其能够较好地整合盈余区域的削减潜力, 并在不同的建设强度下实现显著的径流削减效果。它既避免了小交易尺度带来的高建设成本, 也克服了大交易尺度的效益递减, 确保了容量交易的高效性和经济性。

(5) 传统功能区依靠土地利用特性展开交易, 其划分方式在资源调配上缺乏灵活性, 部分盈余单元的削减潜力难以满足亏缺单元的需求。多尺度网格划分使得交易在更加平等的条件下进行, 容量交易在精细化资源调配上表现出更高的效率。

综上所述, 与传统功能区划分相比, 多尺度网格划分展现了显著的灵活性与精细化管理能力, 不过传统功能区划分在明确责任主体和政策实施方面仍具备不可替代的作用。因此, 未来研究和实际应用中, 可结合功能区划分的宏观管理能力与网格划分的微观优化特性, 在不同场景下灵活选择, 推动城市雨水管理向精细化、智能化发展。

参考文献(References):

- [1] TANAKA T, KIYOHARA K, TACHIKAWA Y. Comparison of fluvial and pluvial flood risk curves in urban cities derived from a large ensemble climate simulation dataset: A case study in Nagoya, Japan [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124706.
- [2] MOUSTAKIS Y, PAPALEXIOU S M, ONOF C J, et al. Seasonality, intensity, and duration of rainfall extremes change in a warmer climate [J]. *Earth's Future*, 2021, 9(3): e2020EF001824.
- [3] SUI X X, VAN DE VEN F H M. The influence of low impact development (LID) on basin runoff in a half-urbanized catchment: A case study in San Antonio, Texas [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 616: 128793.
- [4] FERRANS P, TORRES M N, TEMPRANO J, et al. Sustainable urban drainage system (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150447.
- [5] GUO Z, ZHANG X, WINSTON R, et al. A holistic analysis of

- Chinese sponge city cases by region: Using PLS-SEM models to understand key factors impacting LID performance [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 637: 131405.
- [6] WEI Y, CAO X Y, LI J N, et al. Greenhouse gas, water, and economic implications of permeable pavements: Quantification for pilot sponge cities in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 471: 143424.
- [7] ESSAMLALI I, NHAILA H, EL KHAILI M. Optimizing runoff and pollution mitigation through strategic low-impact development (LID) integration in the Bouznika city development plan [J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2024, 10: 100838.
- [8] TAN Y Q, CHENG Q M, LYU F W, et al. Hydrological reduction and control effect evaluation of sponge city construction based on one-way coupling model of SWMM-FVCOM: A case in university campus [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119599.
- [9] XIAO F N, QIN H P, SUN T T. Effects of low impact development on runoff pollution and water quality resilience in an urbanized estuary area [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 644: 132129.
- [10] YANG B Y, ZHANG T, LI J Z, et al. Optimal designs of LID based on LID experiments and SWMM for a small-scale community in Tianjin, North China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 334: 117442.
- [11] 赵宇桑, 詹雨尘. SWMM 模型耦合 MOPSO 算法优化配置大型城市绿地海绵设施 [J]. *水资源开发与管理*, 2024, 10(9): 15-23. ZHAO Y S, ZHAN Y C. Optimization of large urban green space sponge facilities using the SWMM model coupled with the MOPSO algorithm [J]. *Water Resources Development and Management*, 2024, 10(9): 15-23.
- [12] RONG Q Q, LIU Q M, YUE W C, et al. Optimal design of low impact development at a community scale considering urban non-point source pollution management under uncertainty [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139934.
- [13] WANG T, WANG H M, WANG Z Q, et al. Dynamic risk assessment of urban flood disasters based on functional area division: A case study in Shenzhen, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118787.
- [14] ZHU Y F, XU C Q, YIN D K, et al. Environmental and economic cost-benefit comparison of sponge city construction in different urban functional regions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114230.
- [15] LI S S, WANG Z L, WU X S, et al. A novel spatial optimization approach for the cost-effectiveness improvement of LID practices based on SWMM-FTC [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 307: 114574.
- [16] ZHU Y F, XU C Q, LIU Z J, et al. Spatial layout optimization of green infrastructure based on life-cycle multi-objective optimization algorithm and SWMM model [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 191: 106906.
- [17] FU X, HOPTON M E, WANG X H, et al. A runoff trading system to meet watershed-level stormwater reduction goals with parcel-level green infrastructure installation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 1149-1159.
- [18] 李静思, 李山, 李智录, 等. 基于协同改造理念的城市雨洪削减效果模拟研究 [J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(4): 79-89. LI J S, LI S, LI Z L, et al. Simulation study on urban stormwater reduction effect based on synergistic transformation concept [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(4): 79-89.
- [19] XU Q, JIA Z H, TANG S C, et al. Achieving urban stormwater mitigation goals on different land parcels with a capacity trading approach [J]. *Water*, 2019, 11(5): 1091.
- [20] 李奥, 向代勤, 董研, 等. 综合考虑经济和人文效益的海绵小区灰-绿结合设施布局优化 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(1): 130-140. LI A, XIANG D Q, DONG Y, et al. Layout optimization of gray-green combined facilities in sponge community considering economic and hydrological benefits [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2025, 23(1): 130-140.
- [21] 王泉, 汤明杰, 施珮, 等. 智慧海绵城市研究进展与展望 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(5): 47-58. WANG Q, TANG M J, SHI P, et al. Research progress and prospects of smart sponge cities [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(5): 47-58.
- [22] 陈雪, 乔梁, 刘艳华, 等. 基于网格的暴雨洪涝灾害风险评价 [J]. *水文*, 2023, 43(1): 84-89. CHEN X, QIAO L, LIU Y H, et al. Risk assessment of rainstorm disasters based on grid [J]. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(1): 84-89.
- [23] 杨芳, 胡豫英, 宋利祥, 等. 基于动态网格和局部时间步长技术的城市洪涝模型加速方法 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(12): 2132-2143. YANG F, HU Y Y, SONG L X, et al. Acceleration method of the urban flood model based on the dynamic grid system and local time step technology [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(12): 2132-2143.
- [24] TEBYANIAN N, FISCHBACH J, LEMPERS R, et al. Rhodium-SWMM: an open-source tool for green infrastructure placement under deep uncertainty [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2023, 163: 105671.
- [25] ELLIOTT A H, TROWSDALE S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(3): 394-405.
- [26] 廖如婷, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 典型 LID 设施多尺度径流调控效应研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(3): 61-75. LIAO R T, XU Z X, YE C L, et al. Study on the runoff regulation effects of typical low impact development facilities in multiple scale regions [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(3): 61-75.
- [27] JIANG Y S, LI J K, XIA J, et al. Sensitivity identification of SWMM parameters and response patterns of runoff pollution on hydrological and water quality parameters [J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2024.09.001>.
- [28] 郭海星, 杨建, 戴青松, 等. 基于 SWMM-MIKE21 耦合模型的圩区海绵城市建设效果评估研究 [J]. *市政技术*, 2024, 42

- (10): 164-172.
GUO H X, YANG J, DAI Q S, et al. Evaluation of sponge city construction in polder areas based on the SWMM-MIKE21 coupling model[J]. *Journal of Municipal Technology*, 2024, 42(10): 164-172.
- [29] 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, 45(11): 213-217.
LIU X P. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 45(11): 213-217.
- [30] WADHWA A, PAVAN KUMAR K. Selection of best stormwater management alternative based on storm control measures (SCM) efficiency indices[J]. *Water Policy*, 2020, 22(4): 702-715.
- [31] GONG M, ZHAO F, ZENG S Y, et al. An experimental study on local and global optima of linear antenna array synthesis by using the sequential least squares programming [J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 148: 110859.
- [32] 姚飞, 段尧彬, 秦勇, 等. 基于 Copula 函数的江淮流域梅雨期台风降水量与梅雨雨强遭遇概率分析[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(11): 41-45.
YAO F, DUAN Y B, QIN Y, et al. Encounter probability analysis of typhoon precipitation and Meiyu rain intensity in the Yangtze-Huaihe River Basin based on copula function [J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(11): 41-45.
- [33] LUAN B, YIN R X, XU P, et al. Evaluating Green Stormwater Infrastructure strategies efficiencies in a rapidly urbanizing catchment using SWMM-based TOPSIS [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223: 680-691.
- [34] 高曼, 池勇志, 赵建海, 等. 基于边际效益分析的 LID 设施组合比例研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(9): 127-132.
GAO M, CHI Y Z, ZHAO J H, et al. Composition ratio of low impact development facilities based on marginal benefit analysis [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(9): 127-132.
- [35] 李沐寒, 尹海伟, 唐爽. SUSTAIN 支持下的 LID 建设成本效益研究: 以南京市鼓楼区为例[J]. *风景园林*, 2020, 27(11): 57-63.
LI M H, YIN H W, TANG S. Research on cost-effectiveness of LID construction under support of SUSTAIN system: A case study of Gulou district, Nanjing [J]. *Landscape Architecture*, 2020, 27(11): 57-63.
- [36] 王爽. 基于容量交易的海绵城市建设效益分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
WANG S. Benefit analysis of sponge city construction based on capacity transaction[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.
- [37] ZHA X B, FANG W, ZHU W, et al. Optimizing the deployment of LID facilities on a campus-scale and assessing the benefits of comprehensive control in Sponge City [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 635: 131189.
- [38] WANG J, LIU J H, YANG Z X, et al. Green infrastructure optimization considering spatial functional zoning in urban stormwater management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118407.
- [39] BAKHSHIPOUR A E, DITTMER U, HAGHIGHI A, et al. Hybrid green-blue-gray decentralized urban drainage systems design, a simulation-optimization framework [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109364.
- [40] JIA Z, XU C, LUO W. Optimizing green infrastructure implementation with a land parcel-based credit trading approach on different spatial scales [J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(5): 1709-1723.
- [41] JI M, XUE B. Construction of the sponge city regulatory detailed planning index system based on the swmm model [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101645.

(责任编辑 王璐)