

海绵城市绿色基础设施运维评价研究

李美含

北京建筑大学 城市经济与管理学院, 中国·北京 100044

摘要: 随着城市化进程的加速与气候变化的影响, 传统的城市排水系统已难以应对越来越频繁的极端天气事件。海绵城市作为应对城市水灾害的一种创新解决方案, 绿色基础设施在提升城市水文调节能力、改善生态气候方面起到了至关重要的作用。然而, 绿色基础设施的长期高效运维通常涉及大量财政资金的持续投入, 因此构建一个科学合理的运维评价体系对于绿色基础设施的可持续管理具有重要意义。论文基于熵权法与模糊评价法相结合, 提出了一种海绵城市绿色基础设施运维评价体系。首先, 构建多维度评价指标体系; 其次, 结合熵权法和模糊评价法计算各指标权重并进行综合评估; 最后, 通过实例分析验证了该评价体系的有效性和实用性。研究成果填补了运维阶段多维度评估方法的空白, 推动海绵城市从“重建设”向“重管养”转型, 具有显著的工程应用价值。

关键词: 海绵城市; 绿色基础设施; 运维评价; 熵权法; 模糊评价法

Research on the Evaluation of Green Infrastructure Operation and Maintenance in Sponge Cities

Meihan Li

School of Urban Economics and Management, Beijing Jianzhu University, Beijing, 100044, China

Abstract: With the acceleration of urbanization and the impact of climate change, traditional urban drainage systems are no longer able to cope with increasingly frequent extreme weather events. Sponge cities, as an innovative solution to urban water disasters, have played a crucial role in enhancing urban hydrological regulation capabilities and improving ecological climate through green infrastructure. However, the long-term efficient operation and maintenance of green infrastructure usually involves a significant amount of continuous investment of financial funds. Therefore, building a scientific and reasonable operation and maintenance evaluation system is of great significance for the sustainable management of green infrastructure. The paper proposes a sponge city green infrastructure operation and maintenance evaluation system based on the combination of entropy weight method and fuzzy evaluation method. Firstly, establish a multidimensional evaluation index system; Secondly, the entropy weight method and fuzzy evaluation method are combined to calculate the weights of each indicator and conduct a comprehensive evaluation; Finally, the effectiveness and practicality of the evaluation system were verified through case analysis. The research results have filled the gap in multidimensional evaluation methods during the operation and maintenance stage, promoting the transformation of sponge cities from “heavy construction” to “heavy management and maintenance”, and have significant engineering application value.

Keywords: sponge city; green infrastructure; operation and maintenance evaluation; entropy weight method; fuzzy evaluation method

0 前言

随着全球气候变化的加剧, 城市内涝、洪涝灾害频发, 大量污染随着径流污染城市环境, 海绵城市理念应运而生。2014 年, 住房和城乡建设部在对国内外现状进行研究并做出总结, 编制印发了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》, 对中国海绵城市建设发挥了顶层设计的作用。海绵城市是指城市能够像海绵一样, 在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”, 下雨时吸水、蓄水、渗水、净水, 需要时将蓄存的水“释放”并加以利用^[1]。海绵城市通过绿色基础设施(如绿色屋顶、垂直绿化、透水铺装、雨水花园、渗透设施等)来增强城市的雨水吸纳、渗透和净化能力, 从而有效缓解城市内涝问题。

作为海绵城市建设的核心载体, 城市绿色基础设施(urban green infrastructure, UGI)能够显著发挥调节气候和雨水径流、增强雨水就地消纳滞蓄能力和增加生物多样性等生态系统服务功能^[2]。同样合理进行设施养护管理、维修和更换费用也是其中的关键。2022 年 4 月 18 日, 住房和城乡建设部办公厅发布了《关于进一步明确海绵城市建设工作有关要求的通知》^[3], 强调做好运行维护的管理, 明确海绵城市相关设施责任主体, 由相应运行维护主体负责海绵城市设施的日常检修、维护和保养, 确保相关设施正常发挥功能。尽管绿色基础设施在设计 and 建设阶段已取得一定成效, 但其长期运维阶段仍面临诸多挑战, 特别是在维护成本、管理效率和系统运行的稳定性方面。

现有的海绵城市绿色基础设施相关研究集中在以下几个方面：①绿色基础设施设计与功能评估：早期的研究多集中于绿色基础设施的设计标准与功能评估，如水文效益^[4-6]（雨水渗透、调蓄能力、洪水调节）、生态效益^[7,8]（水质净化、生物多样性）等。研究表明，绿色基础设施在城市暴雨管理^[9]、减缓城市热岛效应^[10]和缓解城市蔓延^[11]方面具有显著作用；②绿色基础设施运维管理：随着绿色基础设施在多个城市的实施，如何高效地进行运维管理成为研究的热点问题。国内外的研究者通过对绿色基础设施运维过程的长期跟踪，提出了优化运维管理的方案。例如，李俊奇等人根据多方维护主体角度（政府、物业公司、项目公司和业主自治）提出四种城市雨水系统运行维护管理模式^[12]；马越以全生命周期视角（项目可行性研究、设计与施工图审查、验收与移交和运维阶段四个环节），构建针对海绵城市绿色雨水设施的运维管理模式^[6]；王宁按照“事前强管控，事中抓监督，事后重评价”的思路，构建了完善的海绵城市建设管控体系^[13]；单溪环等人针对国内现有的不同雨水设施的运行维护需求，提出了科学运行维护管理的技术体系（如日常巡护制度、运行效能监测和衰减性能监测）^[14]等；③智能运维与大数据分析：随着智能化技术的发展，绿色基础设施的智能运维逐渐成为研究的趋势。通过多维度监测数据整合，进行数据与智慧海绵管控平台融合，通过不同层次的运维（预警—重点—一周一次—常规运维），形成监测运维规程，进而建立起智慧海绵监测运维管理机制^[15]。但相关研究仍存在部分局限：其一，评价维度偏重技术指标，对经济成本、社会接受度等多元价值的整合不足；其二，智能化评价工具与运维实践的耦合机制尚未健全，缺乏可推广的标准化评价框架。现有评价体系多聚焦于多时期和多主体绩效评估，缺乏对运维阶段持续性效能的多维度综合评价模型，这已成为制

约绿色基础设施长效运行的瓶颈。

近年来针对海绵城市绿色基础设施评价体系的研究大致有以下几类方法，如基于层次分析法（AHP）和主成分分析法（PCA）的景观生态适宜度评价^[16]，远程耦合的智慧绩效生态评价^[7]，层次分析法、熵权法和TOPSIS方法进行优先度评价^[17]和MCR模型与软件平台进行适宜性评价^[18]等。这些方法能够在多个维度上同时考虑不同的影响因素，确保评价的全面性和科学性。尽管已有研究提出了一些运维评价方法，但基于熵权法与模糊综合评价法来针对运维评价体系尚不多见，尤其是在具体应用中的研究仍有较大的提升空间。

基于此，本研究提出融合熵权法与模糊综合评价的创新方法，构建涵盖设施性能、运维管理、经济效益和社会生态效益的四维评价体系。通过熵权法动态解析指标间信息差异度，结合模糊数字处理运维状态的不确定性特征，旨在突破传统评价方法在权重固化与数据离散化方面的局限。研究选取武汉海绵城市试点开展实证分析，其典型性体现在：作为长江中游水网城市，武汉具有年均1150mm降雨量的季风气候特征，试点区域涵盖38.5平方公里新建区与旧城改造区，设施类型齐全且运维问题具有代表性。研究成果可为海绵城市绿色基础设施运维方面提供理论支撑与实践指导。

1 指标体系建立

鉴于绿色基础设施具有运维周期长、种类复杂的特点，遵循评价体系的系统性、科学性及可操作性原则，建立了两级评价体系。通过调研城市建设专家、运营管理人员以及工程师，并参考相关政策规范与文献理论^[19-24]，综合考虑不同维度的需求，最终确定绿色基础设施运维状态的评价应从以下四个方面建立指标体系：设施性能、运维管理、经济效益和社会生态效益评价（见表1）。

表 1 海绵城市绿色基础设施运维指标体系

评价目标	一级指标	二级指标	数据来源（单位）	单位	评价依据
海绵城市绿色基础设施运维评价指标体系	设施性能 A1	滞留能力 B1	现场水文监测数据	mm/h	《海绵城市建设技术指南》《低影响开发雨水系统设计标准》
		抗堵塞能力 B2	清淤频率	次/年	《海绵城市设施维护技术规程》
		排水能力 B3	暴雨响应时间	min	《城市防洪排涝设计规范》
		设施物理结构完整性 B4	定期巡检记录	次/每年	《城市排水设施养护规范》
	运维管理 A2	维护效率 B5	实际维护任务完成率	%	《海绵城市设施运行维护标准》
		日常巡检频率 B6	巡检记录台账	次/月	《城市基础设施运维管理规范》
		应急预案有效性 B7	突发事件响应时间	min	《城市防洪应急预案编制导则》
		智能化管理水平 B8	传感器覆盖率	%	《智慧城市基础设施评价标准》
	经济效益 A3	运维成本控制 B9	年度运维成本占初始投资比例	%	《建设项目经济评价方法与参数》
		资源循环利用率 B10	雨水回用率	%	《水资源综合利用评价标准》
		设施使用寿命延长效益 B11	设施维修更换周期	年/次	《基础设施全生命周期成本分析指南》
	社会生态效益 A4	热岛效应缓解效果 B12	地表温度监测数据	℃	《城市热岛效应评价技术规范》
		生物多样性提升 B13	植物种类数量提升率	%	《城市生物多样性保护与恢复导则》
		碳汇能力提升 B14	植被固碳量测算	万吨 CO ₂ e/a	《城市绿地碳汇计量与评估技术规程》

2 基于熵权法改进的模糊综合评价法的基础设施运维评价分析

2.1 研究背景与目标

武汉市作为中国首批海绵城市试点城市之一，自 2015 年起开展海绵城市建设试点工作。武汉位于长江中游，是中国重要的水网城市，江河湖泊密布，水域面积占城市总面积的 25% 左右，被誉为“百湖之市”。武汉市选择了 3 个片区作为海绵城市试点区域，总试点面积为 38.5 平方公里，涉及新建区和旧城改造区，典型性强，涵盖了各类功能需求。武汉属于亚热带季风气候，降水量充沛但时空分布不均，集中在每年 6 月至 8 月的汛期。多年的平均年降雨量为 1150 毫米，其中夏季暴雨频繁，极端降雨事件时有发生，城市内涝问题长期存在，给居民生活和城市运行带来较大挑战。

武汉市海绵城市试点区域通过引入绿色基础设施和低影响开发措施，在城市防涝、雨水资源利用和生态保护方面取得了显著成效。武汉市虽然通过海绵城市建设在一定程度上缓解了城市内涝问题，但随着设施长期运行，仍面临设施运维压力大，部分设施因维护不及时，出现渗透能力下降、系统完整性降低等问题。监控系统智能化不足，监测设备覆盖率和精度有待提升，难以满足实时监测需求。

综上所述，武汉海绵城市建设的复杂性和典型性，为绿色基础设施智能运维评价体系的研究提供了良好的实践场景和数据支持。

2.2 数据来源

基于绿色基础设施种类繁多，因此论文数据来源于 2019 年至 2023 年武汉海绵城市试点区域内的绿色基础设施（透水铺装）运维监测记录及相关研究成果，包括传感器实时采集的设施运行数据、运维单位的定期巡检报告以及政府部门发布的年度统计数据。具体而言，滞留性能、抗堵塞能力和排水能力等定量数据通过传感器采集，结构完整性、巡检记录、成本控制和设施维修周期等通过运维记录和专家评估获得，而热岛效应等生态效益结合遥感影像分析与调查结果综合统计。

2.3 数据处理

2.3.1 权重计算—熵权法

熵权法（EWM）是一种客观赋权方法，利用各指标数据的分布情况（信息熵）来计算权重。数据分布越均匀，熵越高，说明指标的差异性较小，其权重应降低；反之，数据差异性越大，说明该指标对评价结果的影响越显著，权重应提高。

具体步骤如下：

第一，数据标准化。

现有 m 个样本， n 个评价指标，形成原始数据矩阵。

$$R = (x_{ij})_{m \times n} : R = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中， x_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个样本的评价值。

第二，对不同指标进行归一化处理。

由于不同二级指标的量纲和取值范围差异较大，为了保证评价结果的科学性与可比性，对指标数据进行最小—最大标准化处理。标准化的结果使所有指标值均处于 $[0, 1]$ 的范围内，方便后续权重计算和模糊评价矩阵构建。

对效益型属性 x_{ij} ，令：

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (2)$$

对成本型属性 x_{ij} ，令：

$$x_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (3)$$

式中： x_{ij} ——第 i 个对象的第 j 项指标；

n ——评价对象个数。

第三，计算第 j 项指标下第 i 个取值在此指标中所占的比重。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n;$

m ——评价指标个数。

第四，计算第 j 个指标的熵值。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

其中， $k = 1/\ln(n) > 0$ 。

第五，计算第 j 个指标的熵权。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (6)$$

通过熵权法计算武汉试点的 14 个二级指标权重后，得到以下结果，见表 2。

权重分析结果显示，资源循环利用率（B10，13.37%）与设施使用寿命延长效益（B11，13.64%）作为关键评价指标，在综合评价体系中占据显著优势地位，二者合计贡献率达 26.01%。该分布特征突显了运维成本效益优化和资产全生命周期管理在绿色基础设施可持续运维中的核心价值，其权重设定可能反映了武汉地区 2023 年极端降雨事件对设施耐久性要求的实证影响。进一步观察发现，经济效益维度（A3，32.23%）作为权重最高的系统层，印证了基础设施运维体系中经济可持续性的主导地位。

值得关注的是，应急预案有效性（B7，5.29%）与运维成本控制（B9，5.22%）虽在二级指标中权重占比较低，但作为设施健康度的重要表征指标，仍需纳入常态化监测体系。从整体权重分布来看，四级指标变异系数控制在合理区间（5.22%~13.64%），系统层权重级差保持在

18.71%~32.23% 的适度范围, 既避免了单一指标主导风险, 又兼顾了多维评价需求, 其均衡性特征印证了指标体系设计的科学性与层次合理性, 为构建基于模糊数学的综合评价模型提供了可靠的基础框架。

表 2 基础设施运维一级和二级指标权重表

一级指标	权重	二级指标	信息熵值 e	权重	总排序
设施性能 A1	25.86%	滞留能力 B1	0.8089	7.11%	4
		抗堵塞能力 B2	0.8443	5.79%	9
		排水能力 B3	0.8481	5.65%	10
		设施物理结构完整性 B4	0.8033	7.31%	3
运维管理 A2	23.21%	维护效率 B5	0.8226	6.60%	6
		日常巡检频率 B6	0.8381	6.02%	8
		应急预案有效性 B7	0.8576	5.29%	13
		智能化管理水平 B8	0.8575	5.30%	12
经济效益 A3	32.23%	运维成本控制 B9	0.8595	5.22%	14
		资源循环利用率 B10	0.6405	13.37%	2
		设施使用寿命延长效益 B11	0.633	13.64%	1
社会生态效益 A4	18.71%	热岛效应缓解效果 B12	0.8551	5.39%	11
		生物多样性提升 B13	0.8134	6.94%	5
		碳汇能力提升 B14	0.8284	6.38%	7

2.3.2 模糊评价法

通过应用模糊数学理论, 模糊综合评价法 (FCEM) 能够对收集的数据进行客观化分析, 进而对与被评价目标相关的各个因素进行合理的综合评价^[25]。其具体步骤为:

①确定因素集和评语集。

因素集为影响评价对象的因素构成的集合, 根据指标体系建立的因素集为:

$$U_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}\} = \{\text{设施性能, 运维管理, 经济效益, 社会生态效益}\} \quad (7)$$

$$U_{11} = \{u_{111}, u_{112}, u_{113}, u_{114}\} = \{\text{滞留能力, 排水能力, 抗堵塞能力, 设施物理结构完整性}\} \quad (8)$$

$$U_{12} = \{u_{121}, u_{122}, u_{123}, u_{124}\} = \{\text{维护效率, 日常巡检频率, 应急预案有效性, 智能化管理水平}\} \quad (9)$$

$$U_{13} = \{u_{131}, u_{132}, u_{133}\} = \{\text{运维成本控制, 资源循环利用率, 设施使用寿命延长效益}\} \quad (10)$$

$$U_{14} = \{u_{141}, u_{142}, u_{143}\} = \{\text{热岛效应缓解效果, 生物多样性提升, 碳汇能力提升}\} \quad (11)$$

评价集为对评价对象可能作出的评价结果的集合, 建立的估评价集为:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{非常好, 比较好, 中等, 不太好, 非常不好}\} \quad (12)$$

指标评价标准如表 3 所示。

表 3 指标评价标准

等级	I	II	III	IV	V
评语得分	非常好 [8, 10]	比较好 [6, 8]	中等 [4, 6]	不太好 [2, 4]	非常不好 [1, 2]
等级描述	运维状态极为健康, 整体表现优秀, 持续改进空间小。	运维状态较为健康, 大部分指标达到较高水平, 但仍需优化部分环节。	运维状态中等, 部分指标表现良好, 但存在明显的改进空间。	运维状态不佳, 多数指标需要改进, 整体运维效率较低。	运维状态严重不达标, 需全面整改, 无法满足运维要求。

②确定权重集。

由于每个因素的重要性不同, 为全面评估不同因素对系统的影响, 需要为因素集 U 提供一个权重向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, 其中 a_i 为因素 u_i 的影响程度系数。论文运用上面节中的熵权法来确定各因素的权重: $A = (25.86, 23.21, 32.23, 18.71)$ 。

③模糊评价矩阵的构建。

对于由 14 个指标构成的评价指标体系, 计算每个指标对应于评价集 V 的模糊评价向量 r_i , r_i 表示某个被评价指标隶属于模糊子集的隶属度。在模糊集合理论中, 隶属度函数描述一个元素对于模糊集合的隶属程度, 通常在 $[0, 1]$ 区

间内取值, 表示元素对概念的归属程度, 值越接近 1 表示归属程度越高, 越接近 0 表示归属程度越低^[26]。本研究采用梯形隶属度函数构造模糊矩阵, 将 $[0, 1]$ 平均分为 5 个区间, 相邻评价等级模糊边界的中心值分别为 0.15、0.35、0.55、0.75, 头尾间隔和中间间隔设为 0.1, 见表 4、表 5。

将这些指标的评价向量对应评价集 V 进行组合, 得到因素 u_i 的综合评价矩阵 R :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (13)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

表 4 隶属度

指标层	权重	非常好	比较好	中等	不太好	非常不好
B1	0.0615	0.167	0.833	0	0	0
B2	0.0577	0.167	0.667	0.167	0	0
B3	0.0542	0.167	0.667	0.167	0	0.167
B4	0.0662	0.167	0.5	0.167	0.167	0
B5	0.0507	0	0.167	0.5	0.333	0
B6	0.0573	0	0.667	0.167	0.167	0
B7	0.087	0.333	0.333	0.333	0	0
B8	0.0617	0	0.667	0.167	0.167	0
B9	0.0544	0	0.667	0.167	0.167	0
B10	0.0573	0.167	0.667	0.167	0	0
B11	0.0671	0.167	0.167	0.333	0.333	0.167
B12	0.0721	0	0.667	0.333	0	0
B13	0.0636	0	0.5	0.333	0.167	0
B14	0.0636	0	0.833	0.167	0	0

④确立模糊综合评价集。

评估对象的各种风险因素对于评语等级的隶属度可以通过矩阵 R 中的不同性来体现。通过将各隶属度与权重集 A 进行综合评价，可以生成模糊综合评价结果向量。根据模糊综合评价算子表的对比，加权平均型算子 $M(\bullet, \oplus)$ 综合利用 A 矩阵和 R 矩阵信息，故论文采用加权平均型算子 $M(\bullet, \oplus)$ 进行综合最优评价：

$$M(\wedge, \oplus): s_k = \min \left\{ 1, \sum_{j=1}^m \min(a_j, r_{jk}) \right\} \quad (14)$$

根据广义模糊合成运算得到模糊综合评价集：

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (15)$$

其中，“ \circ ”表示模糊算子。

构建出 14×5 权重判断矩阵 R ，最终进行分析出 5 个评语集的权重值，见表 5。评语集中比较好 [6, 8] 的权重值最高 (0.526)，结合最大隶属度法则可知，综合评价结果为：比较健康 [6, 8]。

表 5 隶属度权重值

	非常好	比较好	中等	不太好	非常不好
隶属度归一化	0.131	0.526	0.253	0.090	0.001

⑤进行模糊综合评价。

传统的模糊综合评价运用最大隶属度法则，根据模糊综合评价集 B 得到最终评价结果。模糊综合评价集 B 是一模糊向量，不能直观展示各评价对象的评价结果排序。为了明确地得到各评价对象的评价结果，论文将熵权法计算出权重，再采用评分等级向量 $C = [10, 8, 6, 4, 2]$ ，将模糊向量明确化，将其转化为一简单分数作为模糊综合评价值 Z ，计算综合得分： $Z=7.40$ ：

$$Z = B \times C^T \quad (16)$$

通过以上分析，我们可以得出以下结论：①实例分析

表明，试点城市的绿色基础设施综合评分为 0.74，这表明整体运维状态健康，具备良好的可持续发展潜力。根据表 4 中的评价标准，这一分数落在“比较健康 (H)”等级范围内得分为“中等偏上”，整体运维状态健康，具备良好的可持续发展潜力，但在监测精度和系统完整性方面仍需优化，以进一步提升设施的稳定性与运行效率；②建议优先强化智能化运维体系，通过物联网传感器与 AI 预测模型提升监测精度 (权重 8.7%) 与实时响应能力；完善设施全生命周期动态档案，针对抗堵塞能力 (B2) 与物理结构完整性 (B4) 制定预防性维护计划。同时，推动雨水回用 (B10) 与碳汇技术 (B14) 的集成应用，并制定《智能运维管理标准》，明确数据精度与应急响应时效要求，构建“技术—经济—生态”协同优化的运维框架，支撑海绵城市可持续发展。

3 结语

论文基于熵权法与模糊综合评价模型，构建了绿色基础设施智能运维评价指标体系，从设施性能、运维管理、经济效益与社会生态效益四个方面对绿色基础设施的运维状态进行了科学合理的评价。实证分析表明，该体系能够精准识别运维短板，并量化生态效益与社会效益，为优化资源配置与提升智能监测覆盖率提供了科学依据。所构建的评价体系与分析方法具备科学性与适用性，不仅能够全面、合理地反映绿色基础设施的运维状态，还可为其他海绵城市项目的智能运维管理提供参考和借鉴。然而，论文在实际设施的实时数据动态更新与长期效能追踪深度应用方面尚有不足，后续研究可结合实时数字孪生技术与自适应算法，进一步优化评价体系，提升对复杂运维场景的适应能力，影响因素可根据实际情况进行调整，构建实时诊断模型，进一步强化设施韧性，为极端气候下的城市水系统管理提供前瞻性支撑。

参考文献：

- [1] 住房和城乡建设部《海绵城市建设技术指南(试行)》(摘要)——低影响开发雨水系统构建[J].建筑砌块与砌块建筑,2015(1):45-50.
- [2] 朱逊,张雅倩,朱慧明,等.城市绿色基础设施政策工具的系统综述和研究前沿分析[J].风景园林,2024,31(11):86-93.
- [3] 住房和城乡建设部办公厅.住房和城乡建设部办公厅关于进一步明确海绵城市建设工作有关要求的通知[Z].2022-4-18
- [4] 颜文涛,黄欣,王云才.绿色基础设施的洪水调节服务供需测度研究进展[J].生态学报,2019,39(4):1165-77.
- [5] 车伍,闫攀,曾捷,等.绿色建筑雨水管理及其评价标准的修编[J].建筑科学,2012,28(12):25-30.
- [6] 马越,杨正,姬国强,等.关于海绵城市绿色雨水设施运维管理的关键问题探讨[J].净水技术,2023,42(12):1-7+141.
- [7] 王云才,刘玲.远程耦合:绿色基础设施绩效评价的空间生态智慧[J].中国园林,2023,39(10):51-5.
- [8] 李咏华,马洪蔚,范雪怡.基于绿色基础设施评价的城市生态带划定--以杭州市为例[J].地理研究,2017,36(3):583-91.

- [9] 陈倩云,余弘婧,高学睿,等.当前我国城市内涝问题归因分析与应对策略[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(1):55-63.
- [10] 朱玲,由阳,程鹏飞,等.海绵建设模式对城市热岛缓解效果研究[J].给水排水,2018,54(1):65-9.
- [11] 李悦,杨玖伦,谢子涵,等.海绵城市建设能否缓解城市蔓延?[J].城市规划,2024,48(6):25-35+46.
- [12] 李俊奇,徐享,杨正,等.城市雨水系统维护管理模式及关键问题的思考[J].给水排水,2019,55(2):45-52.
- [13] 王宁.海绵城市建设事中事后监管的实践与思考[J].中国给水排水,2024,40(6):7-12.
- [14] 单溪环,房志达,谢文霞,等.海绵城市源头工程设施运行维护管理技术体系研究[J].中国给水排水,2021,37(12):42-9.
- [15] 蒋艳灵,魏艳,石炼,等.智慧海绵监测数据有效性识别与运维管理研究[J].给水排水,2020,56(9):127-32.
- [16] 肖湘东,孙玮泽,王利芬,等.缓解热岛效应的城市聚合型绿色基础设施植物景观生态适宜度评价[J].园林,2024,41(8):39-46.
- [17] 魏新星,陈一欣,黄静,等.城市低效用地更新为绿色基础设施优先度评价[J].生态学报,2022,42(16):6565-78.
- [18] 曹畅,车生泉.融合MCR模型的绿色基础设施适宜性评价——以上海市青浦区练塘镇为例[J].西北林学院学报,2020,35(6):304-12.
- [19] 陈德业,石顺权,吴瑶,等.海绵城市年径流总量控制率概念梳理及探讨[J].中国给水排水:1-17.
- [20] 张继升,刘家琳,孟瑶,等.湿塘生境质量特征与营建管理策略——以重庆海绵城市试点为例[J].风景园林,2024,31(9):76-85.
- [21] 张恒,常江.国家海绵城市建设对城市水生态环境质量的影响[J].自然资源学报,2024,39(11):2721-34.
- [22] 刘志迎,高迎宾,李萌,等.基于山地河谷型海绵城市在线监测体系的构建与评估[J].给水排水,2024,60(S1):389-96.
- [23] 陈建刚,龚应安,郑凡东,等.基于AHP和熵权法的北京水务韧性评价体系构建[J].北京师范大学学报(自然科学版),2024,60(5):782-8.
- [24] 李奥,向代勤,董研,等.综合考虑经济和水文效益的海绵小区灰-绿结合设施布局优化研究[J].南水北调与水利科技(中英文):1-14.
- [25] 霍善欣,王新刚,薛晨,等.熵权法改进的模糊数学滑坡稳定性评价方法研究[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(1):19-27.
- [26] 赵经华,马世骄,房城泰.基于熵权-模糊综合评价法的无人机多光谱春玉米长势监测模型研究[J].农业机械学报,2024,55(8):214-24.

作者简介: 李美含(1997-),女,中国山东青岛人,硕士,从事海绵城市绿色基础设施研究。