

城市海绵城市建设中雨水径流调控效果及效益评估

史雅楠 袁程 钱晓 周华健 王彬

江苏省苏州市昆山市水事综合管理中心淀山湖管理站，江苏苏州，215300；

摘要：海绵城市建设是破解城市内涝、优化水资源配置、改善生态环境的重要途径，雨水径流调控作为核心功能，其效果与综合效益直接决定海绵城市建设的质量与价值。当前海绵城市建设存在径流调控效果量化不足、效益评估体系不完善等问题，制约了建设模式的优化升级。本文从雨水径流调控机理分析、调控效果量化指标体系、综合效益评估框架三个维度，构建海绵城市雨水径流调控效果与效益评估的完整体系。通过整合水文监测、生态评估、经济核算等多学科方法，创新提出“水文-生态-经济-社会”四维效益评估模型，精准量化径流总量控制、峰值削减、污染净化等调控效果，系统评估海绵城市建设的综合价值。研究旨在为海绵城市建设成效评判提供科学依据，为优化雨水径流调控方案、推动海绵城市高质量发展提供理论支撑与实践指引。

关键词：海绵城市；雨水径流调控；调控效果；效益评估

DOI：10.69979/3060-8767.25.12.031

引言

随着城市化进程加速，硬化地面面积持续扩大，传统城市排水系统难以应对强降雨引发的雨水径流，城市内涝、水资源短缺、水环境污染等问题日益突出。海绵城市以“自然积存、自然渗透、自然净化”为核心，通过低影响开发设施与传统排水系统协同作用，实现雨水径流的有效调控。雨水径流调控效果直接关系到内涝防治、水资源利用等核心目标的实现，而综合效益评估则是检验海绵城市建设成效、优化建设方案的关键手段。当前，海绵城市雨水径流调控效果评估多聚焦单一水文指标，效益评估缺乏系统性与全面性，难以反映建设的综合价值。在生态文明建设与新型城镇化推进的背景下，构建科学完善的调控效果与效益评估体系，量化海绵城市建设的多维价值，成为推动海绵城市规范化、精准化发展的重要课题。

1 海绵城市雨水径流调控机理与核心目标

1.1 雨水径流调控机理

海绵城市雨水径流调控依托“渗、滞、蓄、净、用、排”六字方针，通过低影响开发设施、城市水系、绿化系统等多重载体，实现对雨水径流全流程的干预。在降雨初期，透水铺装、绿色屋顶等设施通过渗透作用，减少地表径流产生，补充地下水；调蓄池、下沉式绿地等设施通过滞留与储存功能，延缓径流峰值出现时间，削减峰值流量；植被缓冲带、生物滞留设施等通过物理拦截、化学分解、生物净化等作用，去除径流中的污染物；储存的雨水经净化处理后，可用于绿化灌溉、道路清扫

等，实现水资源循环利用；最终通过合理排放系统，将多余雨水安全排入自然水体，形成“降雨-渗透-储存-净化-利用-排放”的完整调控链条，实现雨水径流的资源化、生态化管理。

1.2 雨水径流调控核心目标

海绵城市雨水径流调控以解决城市水问题、提升城市水生态韧性为核心，具体目标包括三个层面。一是水文调控目标，通过削减雨水径流总量、延缓径流峰值、缩短汇流时间，降低城市内涝风险，保障城市排水安全；二是资源利用目标，通过收集、净化、储存雨水，提高雨水资源化利用率，缓解城市水资源短缺压力；三是生态保护目标，减少雨水径流对城市水系的冲击，降低径流污染负荷，改善城市水生态环境，提升城市生态系统服务功能。三大目标相互关联、协同推进，共同实现海绵城市建设的综合价值。

1.3 影响调控效果的关键因素

海绵城市雨水径流调控效果受多重因素影响，主要包括设施配置、城市规划、气候条件与管理维护四个方面。设施配置方面，低影响开发设施的类型、规模、布局与工艺参数，直接决定调控能力的强弱；城市规划方面，城市地形地貌、硬化地面比例、绿地率等空间布局特征，影响雨水径流的生成与汇流路径；气候条件方面，降雨量、降雨强度、降雨历时等降雨特征，对调控效果的发挥具有显著影响；管理维护方面，设施的日常养护、运行监管与应急处置，关系到设施功能的长期稳定发挥，直接影响调控效果的持续性。

2 海绵城市雨水径流调控效果量化指标体系

2.1 水文调控效果指标

水文调控效果是雨水径流调控的核心，选取径流总量控制率、径流峰值削减率、汇流时间延长率、内涝控制频率四个关键指标。径流总量控制率反映海绵城市对雨水径流的收集与渗透能力，即经调控后截留的雨水径流总量与总降雨量的比值；径流峰值削减率体现对径流峰值流量的削减效果，为调控前后径流峰值流量的差值与调控前峰值流量的比值；汇流时间延长率反映调控措施对径流汇流速度的延缓作用，为调控后汇流时间与调控前汇流时间的差值与调控前汇流时间的比值；内涝控制频率指在一定时期内，通过调控措施避免城市内涝发生的次数与总降雨次数的比值，直观反映内涝防治效果。

2.2 水质净化效果指标

水质净化是雨水径流调控的重要功能，选取悬浮物去除率、化学需氧量去除率、氮磷去除率、重金属去除率四个指标。悬浮物去除率反映设施对雨水径流中固体颗粒物的拦截净化能力；化学需氧量去除率体现对有机污染物的降解去除效果；氮磷去除率反映对水体富营养化关键因子的净化能力；重金属去除率则针对工业城市或交通密集区域的雨水径流污染特点，评估对重金属污染物的去除效果，全面反映海绵城市对雨水径流的净化能力。

2.3 资源利用效果指标

资源利用效果聚焦雨水资源化潜力的发挥，选取雨水资源化利用率、替代自来水率、地下水补给量三个指标。雨水资源化利用率指经收集净化后实际利用的雨水量与可收集雨水量的比值；替代自来水率反映雨水利用对城市自来水的替代程度，为雨水利用量与城市总用水量的比值；地下水补给量指通过渗透设施补充的地下水水量，体现海绵城市对地下水资源的涵养作用，量化雨水资源的生态与经济价值。

2.4 指标量化方法

采用“监测数据采集-基准值设定-效果计算”的量化流程。通过在海绵城市建设区域及周边未建设区域布设水文水质监测站点，实时采集降雨量、径流流量、污染物浓度等数据；以未建设区域的监测数据或历史统计数据作为基准值，消除气候、地形等自然因素的干扰；运用统计分析方法，根据各指标的定义公式计算调控效果数值，确保量化结果的客观性与准确性。

3 海绵城市雨水径流调控综合效益评估框架

3.1 评估框架构建原则

海绵城市雨水径流调控综合效益评估遵循系统性、科学性、可操作性、动态性四项原则。系统性原则要求涵盖生态、经济、社会等多个维度，全面反映调控的综合价值；科学性原则强调评估指标的选取、方法的应用需符合客观规律与学科理论；可操作性原则要求指标数据易于获取、计算方法简便可行；动态性原则考虑海绵城市建设的长期性与环境条件的变化，评估体系可根据实际情况进行调整优化。

3.2 四维效益评估体系

3.2.1 生态效益指标

生态效益聚焦对城市生态环境的改善作用，选取水生态修复率、绿地生态服务价值提升量、生物多样性改善程度、热岛效应缓解率四个指标。水生态修复率反映对城市河流、湖泊等水体生态系统的修复效果；绿地生态服务价值提升量量化因海绵设施建设增加的绿地所产生的固碳、释氧、净化空气等生态价值；生物多样性改善程度评估海绵城市建设对城市动植物生存环境的优化作用；热岛效应缓解率体现透水铺装、绿地等设施对城市温度的调节效果，反映对城市微气候的改善作用。

3.2.2 经济效益指标

经济效益从直接与间接经济价值两方面考量，选取内涝损失减少额、自来水替代节约成本、地下水开采节约成本、设施运维净收益四个指标。内涝损失减少额指因内涝风险降低减少的财产损失、交通延误损失等；自来水替代节约成本为雨水利用替代自来水所节约的水费支出；地下水开采节约成本反映因地下水补给增加减少的地下水开采费用；设施运维净收益为雨水利用产生的直接经济效益减去设施建设与运维成本，全面体现海绵城市建设的经济可行性。

3.2.3 社会效益指标

社会效益关注对城市居民生活质量与社会发展的积极影响，选取人居环境满意度、公共安全保障水平、城市宜居性提升度、公众环保意识提高率四个指标。人居环境满意度通过问卷调查等方式获取居民对城市水环境、生态环境的满意程度；公共安全保障水平量化因内涝风险降低、水资源供应稳定提升的城市公共安全能力；城市宜居性提升度反映海绵城市建设对城市居住、生活、休闲等环境的优化效果；公众环保意识提高率体现海绵城市建设过程中对公众生态环保理念的传播与强化作用。

3.2.4 水文效益指标

水文效益作为核心效益，直接反映雨水径流调控的核心目标实现程度，选取径流总量控制达标率、峰值削减达标率、水质净化达标率、水资源循环利用率四个指标。径流总量控制达标率指实际径流总量控制率达到规划目标的比例；峰值削减达标率反映峰值削减效果满足防洪要求的程度；水质净化达标率体现经处理后的雨水水质达到使用或排放标准的比例；水资源循环利用率量化雨水在城市水资源循环系统中的参与程度，综合反映水文调控的成效。

3.3 评估方法与权重确定

采用层次分析法与熵权法相结合的组合赋权法确定各指标权重。层次分析法通过构建递阶层次结构，结合专家打分确定主观权重，体现专业经验与决策意图；熵权法基于指标数据的离散程度计算客观权重，反映数据本身的信息价值；将主观权重与客观权重加权融合，得到综合权重，兼顾主观性与客观性。评估过程中，采用模糊综合评价法对各维度效益进行量化评分，通过加权求和得到综合效益评分，实现对海绵城市雨水径流调控综合效益的全面量化评估。

3.4 评估流程优化

构建“数据采集-指标计算-权重确定-综合评价-结果反馈”的闭环评估流程。首先通过监测、调查、统计等方式收集各类指标数据；其次根据指标定义与计算方法完成各指标数值计算；然后运用组合赋权法确定指标权重；接着采用模糊综合评价法进行综合评分；最后根据评估结果分析调控效果与效益的优势与不足，提出针对性的优化建议，为海绵城市建设方案的调整与完善提供依据，形成“评估-优化-再评估”的动态提升机制。

4 评估体系应用与优化建议

4.1 评估体系的应用场景

该评估体系适用于海绵城市建设项目的全过程评估，包括规划阶段的预评估、建设阶段的过程评估与建成后的成效评估。规划阶段通过预评估优化海绵设施的布局与规模，确保调控效果与效益最大化；建设阶段通过过程评估及时发现建设过程中存在的问题，调整建设方案；建成后通过成效评估全面检验海绵城市建设的综合成效，为后续项目建设提供参考借鉴。同时，该体系可用于不同区域、不同规模海绵城市项目的对比评估，为海绵城市建设模式的推广与优化提供支撑。

4.2 数据采集与质量控制

数据采集是评估工作的基础，需建立“监测-调查-统计”多源数据采集机制。水文水质数据通过自动监测站点实时采集，确保数据的连续性与准确性；生态、社会类数据通过实地调查、遥感监测、问卷调查等方式获取，保证数据的真实性与代表性；经济类数据通过政府统计部门、企业财务报表等渠道收集，确保数据的可靠性与完整性。建立数据质量控制体系，对采集的数据进行筛选、校验、修正，剔除异常值与错误数据，保障评估结果的科学性。

4.3 评估体系优化路径

评估体系优化需结合海绵城市建设发展阶段、区域特点与评估需求动态调整。针对不同气候区、城市规模，优化指标选取与权重配置；紧跟技术创新趋势，新增智慧海绵设施运行效率、数字孪生技术应用效益等指标，提升体系适应性与先进性。引入大数据、人工智能、遥感等先进技术，通过深度挖掘多源数据关联、构建AI效益预测模型、快速获取生态指标数据，提升评估精准度与时效性。立足区域自然条件、经济水平、功能定位差异，构建差异化评估标准：北方干旱半干旱地区强化水资源利用效益权重，南方多雨地区突出内涝防治与水质净化指标，经济发达地区侧重智慧设施应用与人居环境提升，欠发达地区强调成本控制与基础功能保障，确保评估体系兼具针对性与实用性。

5 结论

海绵城市建设中雨水径流调控效果与效益评估是检验建设成效、优化建设方案的核心手段。本文构建的“水文-生态-经济-社会”四维评估体系与量化指标框架，实现了对雨水径流调控效果的精准量化与综合效益的全面评估，破解了传统评估单一化、片面化的难题。通过科学的指标选取、合理的权重确定与规范的评估流程，能够客观反映海绵城市建设的多维价值，为海绵城市建设的规划、实施与优化提供科学依据。

参考文献

- [1] 吴家俊. 城市绿地土壤调蓄与净化雨水径流性能及生物炭对其改良效果研究[D]. 浙江大学, 2021(06): 15-17.
- [2] 王乃琪. 海绵城市理论指导下的城市公园景观设计[D]. 沈阳建筑大学, 2021(05): 12-13.
- [3] 兰江巍. 西安市海绵城市建设的使用后评价及优化设计研究[D]. 西安建筑科技大学, 2023, (09): 77-79.