

海绵城市建设中雨水收集利用系统的优化设计

靳立军

天津市宁河区水利设施事务中心, 中国·天津 301500

摘要: 在城市化进程不断加快的背景下, 传统城市建设模式对自然水文循环造成了显著干扰, 导致内涝频发、水资源短缺与生态环境退化等问题日益突出。海绵城市作为一种新型可持续城市发展范式, 旨在通过系统性构建低影响开发设施, 实现雨水的就地消纳、蓄滞与资源化利用。其中, 雨水收集利用系统作为核心构成单元, 其设计的科学性与运行效能直接决定了整体建设成效。论文围绕海绵城市建设中雨水收集利用系统的优化设计展开深入探讨, 基于水文循环机理与城市功能需求, 提出以集水效率、存储容量与回用匹配为核心的多目标协同设计框架。结合不同下垫面特性与降雨时空分布规律, 构建动态模拟模型, 并引入适应性调控策略, 提升系统应对极端气候的韧性。研究强调全生命周期视角下的技术集成与空间布局优化, 为实现城市水资源的高效循环利用提供理论支持与实践路径。
关键词: 海绵城市; 雨水收集; 利用系统; 优化设计

Optimization Design of Rainwater Collection and Utilization System in Sponge City Construction

Jin Lijun

Ninghe District Water Conservancy Facilities Affairs Center, China Tianjin 301500

Abstract: Against the backdrop of accelerating urbanization, traditional urban construction models have significantly disrupted the natural hydrological cycle, leading to increasingly prominent issues such as frequent waterlogging, water scarcity, and ecological degradation. Sponge cities, as a new paradigm of sustainable urban development, aim to achieve on-site consumption, storage, and resource utilization of rainwater through the systematic construction of low impact development facilities. Among them, the rainwater collection and utilization system serves as the core component unit, and its scientific design and operational efficiency directly determine the overall construction effectiveness. The paper explores in depth the optimization design of rainwater collection and utilization systems in sponge city construction. Based on the hydrological cycle mechanism and urban functional requirements, a multi-objective collaborative design framework is proposed with collection efficiency, storage capacity, and reuse matching as the core. Based on the characteristics of different underlying surfaces and the spatiotemporal distribution of rainfall, a dynamic simulation model is constructed, and adaptive control strategies are introduced to enhance the system's resilience to extreme weather conditions. The study emphasizes technology integration and spatial layout optimization from the perspective of the entire lifecycle, providing theoretical support and practical paths for achieving efficient recycling of urban water resources.

Keywords: Sponge city; Rainwater collection; Utilize the system; Optimized design

0 引言

随着全球气候变化加剧与城市化进程持续深化, 传统城市排水系统在应对极端降雨事件和水资源供需矛盾方面暴露出日益突出的脆弱性。不透水地表的大规模扩张打破了自然水文循环过程, 导致雨洪径流剧增、内涝频发, 同时大量可利用雨水资源未经有效调蓄便迅速流失, 加剧了城市的水资源压力。在此背景下, 海绵城市建设理念应运而生, 强调通过生态化手段实现雨水的就地消纳与资源化

利用, 重塑城市水系统的韧性与可持续性。作为海绵城市核心组成部分, 雨水收集利用系统不仅承担着削减径流峰值、缓解内涝的功能, 更肩负着将降水转化为可回用资源的重要使命。然而, 当前多数系统仍存在设计粗放、集水效率低下、储用不匹配等问题, 难以充分发挥其综合效益。因此, 亟需从系统整体性能出发, 深入探讨雨水收集利用系统的优化设计路径, 提升其在复杂城市环境下的适应性与运行效能, 为构建高效、稳定、可持续的城市水循环体

系提供技术支撑。

1 海绵城市理念下雨水资源化的理论基础与系统定位

1.1 城市化进程中水文失衡的成因解析

现代城市扩张普遍伴随着土地利用方式的根本性转变,大量天然透水地表被不透水硬化层所取代,显著削弱了土壤入渗能力与地表蓄水功能。这一过程打破了原有的自然水文平衡机制,使得降水径流系数大幅提高,汇流时间缩短,峰值流量急剧上升。与此同时,传统排水系统以“快速排走”为核心导向,依赖管网集中输送,不仅加剧了下游河道的行洪压力,也导致大量可利用雨水资源未经调蓄便直接排入接纳水体。这种线性排水模式在高强度降雨事件中极易诱发城市内涝,暴露出基础设施对气候变化适应能力的不足。更为深远的影响在于,过度依赖外调水源与地下水开采的城市供水体系,在面临季节性干旱或长期水资源紧张时显得尤为脆弱。因此,城市水系统正面临双重挑战:一方面是雨洪风险的持续累积,另一方面是淡水资源供给的结构性短缺。二者共同指向一个亟待解决的核心问题——如何重构城市与降水之间的关系,将原本被视为负担的雨水转化为可利用的资源。

1.2 海绵城市范式中的雨水管理逻辑转型

海绵城市概念源于对自然生态系统水文调节功能的模仿与复现,其本质是在城市建成环境中重建“弹性”水文循环路径。相较于传统的灰色基础设施主导模式,该理念倡导采用绿色基础设施与灰色设施协同运作的方式,强调“渗、滞、蓄、净、用、排”的综合管控原则。在此框架下,雨水不再仅仅是需要尽快排除的废弃物,而是被重新定义为一种分布式、可再生的城市水资源。雨水收集利用系统由此获得了全新的功能定位:它不仅是削减地表径流、缓解内涝的技术手段,更是连接降水输入与用水需求输出的关键纽带。系统的运行目标从单一的防灾减灾拓展至多重效益叠加,包括补充地下水、降低市政供水负荷、改善微气候以及支持景观生态用水等。这种功能复合性要求设计思维必须超越工程层面的流量控制,转向更深层次的资源转化效率与环境服务价值的提升。

1.3 雨水收集利用系统的结构要素与作用机制

典型的雨水收集利用系统通常由集水面、传输通道、预处理装置、储存单元、净化模块及回用管网六大基本组件构成。各部分之间存在紧密的功能耦合关系,共同决定系统的整体性能。集水面作为系统的前端入口,其材质属性(如屋顶材料类型、道路铺装渗透性)直接影响初期径

流水质与产流量;传输通道需兼顾导流效率与污染物拦截能力,常结合植草沟或渗透管渠实现多功能集成;预处理环节用于去除树叶、泥沙等大颗粒杂质,防止后续设施堵塞,常见形式有弃流井、格栅与旋流分离器;储存单元承担着调节供需错配的核心任务,其容积设计需综合考虑区域降雨特征、用水规律与安全余量;净化模块则根据回用用途确定处理深度,生活杂用需达到较高水质标准,而绿化灌溉可适度放宽;最终通过独立布设的回用管网将处理后的雨水输送至终端用户。整个系统呈现出明显的闭环特征,但其闭合程度受制于收集效率、储存稳定性与回用可靠性的协同水平。唯有各环节参数匹配合理、运行协调有序,方能实现水资源的高效循环。

2 雨水收集利用系统优化设计的关键影响因素与建模方法

2.1 区域降雨特征与下垫面响应的耦合分析

优化设计的前提是对本地水文条件进行精细化刻画。不同气候区的降雨模式存在显著差异,表现为年均降水量、降雨频率、单次降雨历时、强度分布及季节集中度等多个维度的变化。例如,季风气候区常出现短历时强降雨,易引发瞬时积水,而地中海气候则以冬半年集中降水为特点,夏季干旱期长,储水需求更为迫切。这些差异直接决定了系统的设计重点:前者侧重于峰值削减与快速响应能力,后者则更关注长期蓄存与稳定供应。同时,城市内部下垫面的空间异质性进一步增加了复杂性。建筑屋顶、沥青路面、人行道砖石、绿地草坪等表面具有不同的径流系数与污染负荷,导致相同降雨条件下产生的径流量与水质成分迥异。为此,需建立基于地理信息系统(GIS)的空间分区模型,划分典型汇流单元,并赋予相应的水文参数。通过叠加数字高程模型(DEM),可精确模拟地表径流路径与汇流方向,识别潜在的集水潜力区域。此外,还需考虑前期干旱期长度对初期冲刷效应的影响,合理设定污染物浓度衰减函数,以提高水质预测精度。

2.2 多目标约束下的系统容量协同配置

雨水收集利用系统的规模设计本质上是一个多目标决策问题,涉及经济效益、环境效益与技术可行性的权衡。过大的储水设施虽能提高利用率,但会增加建设成本与占地空间,尤其在高密度城区难以实施;过小则无法有效应对连续降雨或满足高峰用水需求,造成频繁溢流与补水依赖。因此,必须寻求最优容量组合点。常用的方法包括雨量频率法、水量平衡法与时序模拟法。其中,时序模拟法因能反映逐日甚至逐小时的水量动态变化,成为当前主流

选择。该方法依托长期历史降雨数据,按时间步长迭代计算每日的来水量、蒸发损失、渗漏损耗、用水消耗与储水状态,从而评估不同容积方案下的年收集量、利用效率、溢流量与缺水率等指标。为进一步提升模型实用性,可引入蒙特卡洛随机模拟,考虑未来降雨不确定性对系统稳健性的影响。此外,还需结合当地水价、节水政策与碳减排目标,构建包含经济成本、节水量、碳足迹在内的综合评价矩阵,辅助决策者在多重约束下做出最优选择。

2.3 系统内部流程的动态调控与自适应机制

传统静态设计往往假设系统各部件固定不变,忽视了实际运行中外部扰动与内部状态变化带来的影响。随着物联网与智能传感技术的发展,构建具备实时感知与反馈调节能力的动态控制系统已成为可能。此类系统可通过部署液位计、流量计、电导率传感器等设备,连续监测储水罐水位、进水流量与水质参数,结合天气预报信息预判未来降雨趋势。当预测到强降雨来临前,可自动启动提前放空程序,预留调蓄空间以最大限度吸纳雨水;而在持续晴天期间,则可根据剩余水量动态调整非必要用水(如景观喷灌)的优先级,延长供水周期。更重要的是,通过机器学习算法对历史运行数据进行训练,系统能够识别典型工况模式并生成最优调度规则库,实现从被动响应向主动干预的转变。例如,基于强化学习的控制器可在不断试错中优化阀门开启时序与泵送功率,使单位能耗下的水资源回收效率最大化。这种智能化升级不仅提升了系统运行的灵活性与可靠性,也为应对极端天气事件提供了更强的适应能力。

3 面向可持续发展的雨水收集利用系统集成优化路径

3.1 技术 - 空间协同布局的系统整合策略

雨水收集利用设施并非孤立存在的工程单元,其效能发挥高度依赖于与其他城市基础设施的空间整合与功能联动。在规划层面,应打破部门分割与条块管理的惯性思维,推动雨水系统与绿地系统、交通系统、建筑系统的一体化设计。例如,在新建居住区开发中,可将地下储水模块嵌入停车场下方,既节约地面空间又便于集中管理;在道路改造项目中,结合路缘石开口与生物滞留带建设,使道路径流自然导入侧边雨水花园,经过初步净化后再汇入区域蓄水池;公园绿地则可作为大型天然调蓄体,通过地形微改造形成季节性湿地,兼具生态展示与应急蓄洪功能。此外,鼓励公共建筑与大型商业综合体安装屋顶集雨装置,并与中水回用系统衔接,形成分布式微型水网。通过建立

“点-线-面”相结合的空间组织架构,实现雨水资源在城市尺度上的梯级利用与网络化调配,避免局部优化导致的整体失衡。

3.2 全生命周期视角下的性能评估与维护管理

系统的长期有效性不仅取决于初始设计水平,更受到施工质量、运行维护与更新改造等后续环节的影响。许多已建成项目在投入使用数年后出现效率下降甚至失效的现象,主要原因包括过滤装置堵塞未及时清理、管道接口老化渗漏、控制系统故障停摆等。因此,必须建立覆盖全生命周期的性能监控体系。在建设阶段,应制定严格的材料选型标准与施工验收规范,确保关键部件(如防水膜、水泵、阀门)的质量可靠性;在运营阶段,推行定期巡检制度,记录关键运行参数,利用大数据平台进行趋势分析,预测潜在故障并安排预防性维修;在报废阶段,考虑主要构件的可拆解性与材料回收率,减少环境遗留负担。同时,应建立标准化的绩效评价指标体系,除常规的年雨水利用量、替代自来水比例外,还可纳入单位面积节水效益、单位投资回报率、系统可用率等量化参数,为后期优化提供数据支撑。

3.3 政策激励与社会参与机制的协同推进

技术方案的成功落地离不开制度环境的支持与公众认知的认同。政府应在法规层面明确新建项目配建雨水收集设施的强制性要求,并将其纳入建设工程规划审批流程;对于既有建筑改造,可通过财政补贴、税收减免或容积率奖励等方式降低业主投资门槛。同时,完善相关技术标准与设计导则,统一计量方法与验收程序,保障市场秩序与工程质量。另一方面,加强公众宣传教育同样至关重要。通过开放示范工程参观、举办社区节水讲座、发布家庭雨水利用指南等形式,普及雨水资源化的环保意义与实用价值,激发居民参与的积极性。特别是在学校、机关单位等公共机构推广小型集雨桶应用,不仅能产生实际节水效果,更能培养公民的生态责任感。唯有形成“政府引导、企业实施、公众参与”的多元共治格局,才能为雨水收集利用系统的广泛推广创造有利的社会基础。

4 结语

雨水收集利用系统在海绵城市建设中扮演着不可或缺的角色,其优化设计需突破传统工程思维的局限,转向融合水文科学、系统工程与城市管理的综合性范式。通过对降雨特征与下垫面响应的精准解析,构建基于动态模拟的多目标容量配置模型,能够显著提升系统的资源转化效率与运行稳定性。进一步引入智能调控机制与空间整合策略,

则有助于增强系统应对复杂环境变化的适应能力。然而，技术层面的优化必须与健全的政策体系和社会参与机制相配合，方能实现从个体项目成功到城市级推广应用的跨越。未来的雨水管理系统将不仅仅是基础设施的集合，更将成为城市生命支持系统的重要组成部分，推动城市向着更具韧性、更可持续的方向演进。

参考文献：

[1] 张锋. 海绵城市措施在雨水回收利用系统工程中应用研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024,23(11):90-92.

[2] 步佳李, 易旻旻. 海绵城市中单体建筑全年雨水收

集利用系统研究[J]. 海河水利, 2023,(03):57-60.

[3] 万孝军, 张伟. 江苏农林职业技术学院北校区低影响开发雨水收集利用系统设计研究[J]. 内江科技, 2023,44(02):54-56.

[4] 陈俊宇, 李伟英等. 浅议两种屋面雨水收集利用系统[J]. 净水技术, 2019,38(02):114-120.

[5] 王洪健. 雨水收集系统在海绵城市中的利用[J]. 住宅与房地产, 2018,(31):215-216.

作者简介：靳立军（1978.09-），男，汉族，天津宁河，工程师，研究方向：水利水电工程建设管理。