海绵城市雨水资源化回用集成技术与水质安全保障研究

单红辉 刘新文
中国电建集团港航建设有限公司，天津 300467

[摘要]当前城市发展过程中，普遍存在雨水资源流失、地面雨水径流污染严重、城市水资源供需紧张等各类问题。立足海绵城市低碳水循环的建设发展需求，针对城市雨水资源化回用的整套技术流程开展了系统研究。搭建了集源头控污、中途调蓄、深度净化、末端回用于一体的雨水处理集成技术，从工艺优化升级、全流程动态管控、实时水质监测、规范标准管控四个关键角度，建立了全面、系统的雨水回用水质安全保障体系。明确了多工艺组合集成技术的适用场景和应用优势，完善海绵城市雨水资源化利用的技术体系与安全保障框架，可为城市雨水资源高效、安全、规模化回收利用提供参考。

[关键词]海绵城市；雨水资源化；回用集成技术；径流污染；水质安全保障
DOI：10.33142/sca.v9i10.20621 中图分类号：TU991.1 文献标识码：A

Research on Integrated Technology of Rainwater Resource Utilization and Water Quality Safety Guarantee in Sponge City

SHAN Honghui, LIU Xinwen
PowerChina Harbour Co., Ltd., Tianjin, 300467, China

Abstract: In the current process of urban development, there are various problems such as the loss of rainwater resources, serious pollution of surface rainwater runoff, and tight supply and demand of urban water resources. Based on the construction and development needs of low-carbon water circulation in sponge cities, a systematic study has been conducted on the entire technical process of urban rainwater resource utilization and reuse. We have established an integrated rainwater treatment technology that integrates source pollution control, intermediate regulation and storage, deep purification, and end use reuse. From four key perspectives of process optimization and upgrading, dynamic control of the entire process, real-time water quality monitoring, and standardized control, we have established a comprehensive and systematic rainwater reuse water quality safety guarantee system. The applicable scenarios and application advantages of multi process combination integration technology have been clarified, and the technical system and safety guarantee framework for the utilization of rainwater resources in sponge cities have been improved, which can provide reference for the efficient, safe and large-scale recycling and utilization of urban rainwater resources.

Keywords: sponge city; rainwater resource utilization; reuse integrated technology; runoff pollution; water quality safety guarantee

引言

在我国城市化进程不断推进的过程中，城市硬质路面、建筑屋面等硬化地面的占比逐年增加。硬化地面不透水的特性，让降雨后雨水汇流速度更快、雨水峰值流量升高，增加了城市内涝的发生概率。与此同时，雨水在冲刷城市道路、建筑屋面和绿地的过程中，裹挟大量悬浮物、有机物、氮磷养分以及重金属等污染物，形成城市面源污染[1]。在此发展背景下，海绵城市建设成为修复城市健康水循环、实现雨水资源化利用的核心手段。雨水回用能够有效收集利用闲置的雨水资源，可替代自来水应用于城市绿化浇灌、道路清扫、景观补水、生态水系补水等场景，既能有效缓解城市自来水供水压力，又能大幅提升水资源利用效率[2]。目前，国内海绵城市的雨水回用工程大多采用单一水处理工艺，普遍存在技术零散、适配场景有限、雨水资源利用率低、出水水质不稳定等问题。基于此，以海绵城市理念为核心，围绕雨水回用全生命周期开展研究，整合多种雨水处理工艺，搭建一体化的雨水回用集成技术体系。同时系统分析雨水径流污染成因与水质波动风险，建立全流程水质安全保障机制，提升雨水回用的高效性与安全性。

1 海绵城市雨水资源化回用集成技术体系构建

1.1 源头收集与初雨控污集成技术

初期雨水的污染物浓度高、污染负荷大，是导致雨水

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

回用水质不达标的核心源头问题。因此，从源头做好雨水收集、舍弃高污染初期雨水，是保障雨水回用效果、减少后续水处理压力的关键前置步骤。其中，屋面雨水污染物少、污染负荷低，仅通过带过滤格栅的收集管道，拦截树叶、泥沙等大颗粒杂质即可；路面雨水容易积攒重金属、油脂等污染物，污染成分复杂，因此配套前置沉淀沟槽和截污挂篮，在雨水汇集初期就地拦截、去除污染物；绿地雨水则利用生态浅沟和植被缓冲带，通过土壤吸附、植被吸收的自然作用，削减雨水中的氮、磷类污染物。系统搭载智能初雨弃流技术，结合降雨强度、降雨时长、前期干旱天数等关键数据，精准判断雨水高污染时段。同时，配套由火山岩、石英砂组成的复合生态滤料净化层，进一步过滤中后期雨水中的悬浮杂质，有效稳定雨水进水水质，降低后续深度水处理工艺的运行负荷和处理难度[3]。

1.2 雨水调蓄与水土净化集成技术

雨水经过源头控污处理后水中残留少量悬浮颗粒、溶解性有机物以及微量营养盐。同时，降雨具有随机性、间断性的特点，导致收集到的雨水水量、水质波动很大，不稳定。因此，需要依靠调蓄净化集成技术平衡雨水水量、稳定雨水水质。采用生态防渗调蓄池+地下模块化储水设施的集成方案，实现储水、沉淀、水质净化、防渗防污染多重作用。整套设施内部划分了分层沉淀区、生态净化区、储水回用区三个功能区域。雨水进入设施后，首先在分层沉淀区依靠重力沉降，去除水中残留的悬浮物，降低水体浑浊度；随后流入生态净化区，通过专用复合生态填料以及填料上附着的微生物菌群，吸附并分解水中的溶解性有机物、氨氮和总磷，实现水质净化。系统配套有水力自控设备，能够根据现场雨水汇流的实时水量，自动调整进水和出水流量，平稳化解水量波动，避免暴雨大流量水流冲击导致整套净化工艺失效[4]。同时，设施全程采用环保防渗材料，彻底隔绝水体与周边环境的交叉污染，保障出水水质稳定。

1.3 深度净化耦合集成处理技术

经过调蓄预处理的雨水，依然会残留少量重金属、低浓度有机物和超标的微生物，无法直接达到雨水回用的规范标准。因此，需要通过多工艺耦合的深度净化技术提升水质。针对性适配城市雨水污染浓度低、水质波动小的特点，采用“生物净化+物理过滤+消毒灭菌”的组合工艺，既能保证优质的水处理效果，又能控制设备运行成本、提升经济性。在净化环节中，改良生物滤池单元依靠多孔生态填料以及附着在填料上的微生物，有效分解去除雨水中低浓度的溶解性有机物和氮、磷营养盐，从根源改善水质指标。双层物理过滤工艺分为两级处理，首先通过石英砂过滤拦截水中细小的悬浮杂质、降低水体浊度，再利用0.1μm中空纤维膜，精准截留水中胶体污染物、微量重金属和浮游微生物，进一步细化净水效果。消毒环节采用紫外线+次氯酸钠复合消毒模式，既能快速杀灭各类致病病原微生物，又能在输水管网中保留适量余氯，持续抑制细菌微生物滋生，全方位保障出水生物安全。

1.4 智能输送与高效回用集成技术

针对传统雨水回用系统存在的管网布局混乱、水资源利用率低、易产生二次污染等痛点，通过智能输送、分质回用方案，实现达标雨水的高效合理利用。系统采用双管网独立输送架构，按照水质等级匹配不同用水场景：常规净化达标的雨水，用于城市绿化浇灌、道路清扫等普通用水场景；高标准净化雨水用于景观补水、生态湿地补水，按需分配水资源，有效降低系统整体运行能耗。配套的智能调控系统可全天候实时监测管网水量、水质、水压等核心参数，根据用水需求动态调整管网流量和水泵运行状态，实现全自动按需供水。同时，管网配备定期冲洗和抑菌防护装置，可及时清除管道内的沉积物、生物膜，彻底杜绝管网内水质二次变差的问题，实现雨水精准化、安全化、高效化回用。

2 海绵城市雨水回用水质安全风险识别

2.1 源头径流污染风险

城市各类地面积攒的污染物是雨水径流污染的主要源头，屋面雨水主要携带大气粉尘、有机物和少量重金属，老旧屋面还会因建材老化析出污染物；道路雨水的污染问题最突出、成分最复杂，包含交通扬尘、轮胎磨损碎屑、路面油污、重金属以及氮磷类污染物；绿地雨水则容易裹挟泥土泥沙和残留肥料中的营养盐，极易引发水体富营养化问题。除此之外，雨水中还含有大肠杆菌、霉菌等病原微生物，若处理不彻底，会对人居环境和生态环境造成卫生安全隐患。

2.2 工艺处理系统安全风险

一体化雨水处理工艺运行稳定性较差，存在多项水质安全隐患。遇到极端降雨天气时，雨水汇流量会瞬间大幅暴涨，超出工艺设计处理负荷，导致沉淀、过滤、生物处理等核心单元无法正常运行，污染物去除效率大幅下降，出水水质不达标。设备长期运行后，生物滤池填料会出现堵塞、微生物菌群老化失效，膜过滤组件也会积污堵塞，如果运维养护不及时，会造成水体悬浮物、有机物残留超标。另外，常规处理工艺对雨水中微量持久性污染物、重金属离子的去除效果有限。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

2.3 储输环节二次污染风险

雨水储存和输送环节容易产生二次污染，是保障水质安全的关键隐患。调蓄池内水体流动性差、长期静置，会出现溶解氧含量下降、藻类和细菌大量繁殖、池底淤泥腐化等问题，造成水质浑浊、产生异味、污染物浓度回升，同时池壁附着的生物膜脱落，进一步增加水体悬浮物含量。回用管网长期使用后，内壁会滋生生物膜、产生锈蚀沉积物，雨水静置或低速流动时，沉积物脱落会导致水体浊度、微生物指标超标，易造成交叉污染。此外，雨水处理系统频繁启停、长期闲置时，储水设施和管网内部的潮湿环境极易滋生微生物，系统再次投入使用时，容易出现水质突然超标的突发问题。

3 雨水资源化回用水质安全保障体系构建

3.1 源头污染精准防控机制

常态化对城市道路、建筑屋面、城市绿地等所有雨水汇流下垫面开展清扫、保洁和消杀工作，持续减少地表积存的污染物。针对干旱少雨的天气，增加清扫频次，同时，对老旧屋面、破损路面开展翻新整治。同时，结合区域常年降雨监测数据，根据不同季节、不同雨势的雨水污染规律，动态调整初雨弃流时长和弃流量，适配各类降雨场景。严格截留污染浓度最高的初期雨水，杜绝高污染初雨进入雨水回用系统，从关键环节把控雨水水质。此外，在雨水汇流入口、排水沟槽、调蓄池前端等关键位置，分层设置截污挂篮、沉淀装置和生态过滤层，逐级拦截、过滤雨水中的大颗粒杂物和表层污染物，完成雨水前期净化。

3.2 集成工艺优化与稳定性管控

为全面提升水处理系统运行质量，增强系统应对水质、水量突变的抗冲击能力，结合实时降雨大小、进水污染物浓度、进水水量波动等实际工况，动态调整各个污水处理单元的运行参数。同时新增专用负荷缓冲模块，应对极端降雨、水质突变带来的冲击负荷。规范日常运维工作，定期对生物滤池填料进行冲洗、活化和更换作业，及时恢复填料的吸附能力和微生物活性，保证生物处理单元的污水净化效率稳定。采用“紫外线瞬时灭菌+低浓度余氯持续抑菌”的协同消毒模式，优化消毒工艺耦合运行方式。精准把控消毒剂投加比例和用量，保障污水管网全程水质稳定达标、安全可控。增设微量污染物深度处理单元，配套专项吸附过滤设施，针对性处理水体中重金属、持久性有机物等难降解复合污染物，全面提升污水处理系统的污染物综合去除能力，大幅改善出水水质。

3.3 全流程智能水质监测预警体系

搭建覆盖雨水收集、净化处理、储水留存、循环回用全流程的智能水质监测预警系统。系统配套高精度在线监测设备，24 小时不间断采集雨水核心水质指标，包含浊度、COD、氨氮、总磷、pH 值、大肠杆菌、余氯等；同时实时监测管网水量、水流流速，以及所有水处理设备的运行状态、启停情况和运行参数，实现全流程动态管控。系统严格依据国家回用水质标准，设置分级预警阈值，划分正常、预警、超标三个管控等级。一旦水质指标出现异常波动，平台会立即发出声光预警，精准定位出问题的工艺环节，自动追溯排查污染源头。同时，系统搭载智能调控机制，可自动适配水质情况调整工艺，针对轻微水质波动，系统会自主优化水处理设备运行参数，实现设备自适应稳定运行；针对水质严重超标的情况，系统可自动切断回用供水管道，将超标雨水回流至净化处理单元重新处理，保障用水安全。

3.4 储输环节二次污染防控管控

聚焦污水回用的储水、管网输送两大关键环节，全方位防范治理二次污染，建立标准化、常态化的运维管护机制。持续优化调蓄储水系统运行方式，推广应用间歇曝气、水体微循环等成熟技术，有效提升调蓄池水体流动性和水中溶解氧含量，从源头遏制藻类爆发、水体腐坏变质等水质问题。严格落实常态化、周期性管护工作，定期对调蓄池开展排空、清洗和全面消杀作业。精准调整储水运行状态，科学管控储水水位、换水轮换周期，避免水体长期静置停滞。同步健全回用管网日常运维体系，定期对管网开展高压冲洗、消毒杀菌工作，清理管壁附着的污染物和生物膜，及时修补破损管网、更换老化密封接口，严防外部污染物渗入管网造成污染。细化管网闲置、重启全流程管控，管网闲置期间定时开展水体循环与消杀处理，重启运行前完成全面水质检测。同时，在管网末端增设二次水质检测点位，全面规避污水回用系统的二次污染风险。

3.5 标准化管控与安全运维体系

遵循国家及行业雨水回用相关规范标准，搭建了系统化、标准化的雨水回用运维管控体系，对雨水收集、处理、储水、输送到回用的全流程进行合规管控。针对绿化浇灌、道路降尘、景观补水等不同回用场景，制定差异化的水质管控标准。定期对雨水收集装置、水处理设备、水质监测仪器及输送管网进行检修、清洁、校准和养护，及时排查并消除设备运行隐患。除此之外，完善安全应急处置机制，针对极端暴雨、设备突发故障、水质指标超标等各类突发风险，制定了专项应急预案，明确处置流程、责任分工和管控措施，保障雨水回用系统长期稳定运行。

4 结论

构建源头控污、调蓄净化、深度处理、智能回用的一

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

体化雨水资源化回用集成技术体系，实现了雨水处理与资源化利用的高效协同。同时搭建起技术集成、风险防控、智能监测、规范运维相结合的五位一体全维度水质安全保障框架，提升了雨水处理效率和出水水质稳定性。该体系能够有效提高城市雨水资源收集利用率，缓解城市水资源短缺问题，改善区域水生态环境，有力支撑海绵城市建设，具备良好的资源效益、生态效益和社会效益。

[参考文献]

[1]钟东平,李俊霖,韩金蓉.海绵城市理念下住宅建筑雨水资源化利用技术研究[J].住宅产业,2026(8):80-83.

[2]王小姝.绿色建筑设计中的雨水回收系统优化与技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2026(9):46-48.

[3]钟瑞霖.海绵城市理念下的地埋式污水处理厂景观设计研究与实践[D].陕西:西北农林科技大学,2025.

[4]段晓涵.基于海绵城市的工程建设模式及雨水净化回用研究[D].郑州:华北水利水电大学,2019.

作者简介：单红辉（1999—），男，汉族，河南周口市商水县人，助理工程师。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.