

污水处理设施利旧改造的初期雨水污染控制探究 ——以山西运城市为例

荆壁

运城市生态环境局临猗分局，山西 运城 044100

DOI:10.61369/EAE.2025050003

摘要：初期雨水携带大量污染物，直接排放会严重威胁水体环境。山西运城市作为黄河流域重要城市，受温带季风气候影响，雨季初期雨水污染问题突出，而现有污水处理设施存在处理能力不足、功能单一等问题。本文以运城市为研究对象，通过实地调研、数据分析等方法，探究污水处理设施利旧改造在初期雨水污染控制中的应用。首先分析运城市初期雨水污染来源与特征提出针对性的利旧改造技术方案，包括设施功能升级、工艺优化、管网衔接改造等；最后验证改造方案的处理效果与经济可行性。结果表明，通过利旧改造，污水处理设施对初期雨水中 COD、SS、总氮、总磷的去除率分别提升至 85%、90%、78%、82%，且改造成本较新建设设施降低 40%–50%，可有效缓解运城市初期雨水污染问题。

关键词：污水处理设施；利旧改造；初期雨水；污染控制；山西运城

Exploration of Early Rainwater Pollution Control through the Renovation and Repurposing of Existing Sewage Treatment Facilities—A Case Study of Yuncheng City, Shanxi Province

Jing Bi

Linyi Branch of Yuncheng Ecological Environment Bureau, Yuncheng, Shanxi 044100

Abstract : Early rainwater carries a significant amount of pollutants, and its direct discharge poses a serious threat to the aquatic environment. As an important city in the Yellow River basin, Yuncheng City in Shanxi Province is affected by the temperate monsoon climate, resulting in prominent early rainwater pollution issues during the rainy season. However, the existing sewage treatment facilities face challenges such as insufficient treatment capacity and limited functionality. This paper takes Yuncheng City as the research object and explores the application of renovating and repurposing existing sewage treatment facilities for early rainwater pollution control through methods such as field investigations and data analysis. Firstly, it analyzes the sources and characteristics of early rainwater pollution in Yuncheng City and proposes targeted technical solutions for renovation and repurposing, including facility function upgrades, process optimization, and pipeline network integration modifications. Finally, it verifies the treatment effectiveness and economic feasibility of the renovation plan. The results indicate that through renovation and repurposing, the removal rates of COD, SS, total nitrogen, and total phosphorus in early rainwater by sewage treatment facilities are increased to 85%, 90%, 78%, and 82%, respectively. Moreover, the renovation cost is reduced by 40%–50% compared to constructing new facilities, effectively alleviating the early rainwater pollution problem in Yuncheng City.

Keywords : sewage treatment facilities; renovation and repurposing; early rainwater; pollution control; Yuncheng, Shanxi

引言

初期雨水污染物浓度普遍高于城市生活污水，其中 SS 浓度可达 500–1500mg/L，COD 浓度可达 300–800mg/L，若直接排入河流、湖泊等受纳水体，会导致水体富营养化、水质恶化，破坏水生生态系统。运城市地处黄河流域，境内涑水河、汾河等支流为主要纳污水体，近年来因初期雨水污染，部分河段水质长期处于 IV 类以下，严重影响黄河流域生态保护与高质量发展。新建污水处理设施需

占用大量土地资源，且投资成本高、建设周期长，难以快速应对初期雨水污染问题。运城市现有污水处理厂共 8 座，其中建成超过 10 年的设施占比达 62.5%，部分设施存在处理负荷不饱和、功能模块闲置、工艺落后等问题，具备利旧改造的潜力。通过利旧改造，可充分利用现有设施的土建结构、设备基础与管网系统，降低改造成本与环境影响，同时提升设施对初期雨水的处理能力，符合“低碳环保、集约高效”的城市发展理念。

一、运城市初期雨水污染与污水处理设施现状

(一) 初期雨水污染现状

1. 污染来源

运城市初期雨水污染物主要来源于三类区域：一是城市建成区，道路灰尘、机动车尾气沉降物、生活垃圾渗沥液等构成主要污染源，占初期雨水污染负荷的 45%；二是农业种植区，运城市是山西农业大市，耕地面积达 600 万亩，雨季初期雨水冲刷农田，携带化肥、农药残留，贡献 30% 的氮磷污染负荷；三是工业集中区，境内煤化工、有色金属加工等企业周边，初期雨水可能含有微量重金属（如镉、铅）与有机污染物，虽占比仅 25%，但风险较高。

2. 污染特征

通过对运城市 2023 年雨季（7—8 月）的 3 次典型降雨事件监测发现，初期雨水污染具有“高浓度、短历时、强波动”特征：降雨初期 15—30 分钟内，污染物浓度达到峰值，SS 平均浓度 1280mg/L、COD 平均浓度 650mg/L；30 分钟后，随着降雨稀释，污染物浓度逐渐下降，1 小时后趋于稳定，浓度仅为峰值的 30%—40%。此外，不同区域初期雨水水质差异显著，工业集中区 COD、重金属浓度较高，农业区总氮、总磷浓度突出，城市建成区 SS 浓度最高。

(二) 污水处理设施现状

运城市现有 8 座污水处理厂设计总处理能力为 45 万 m³/d，2023 年实际日均处理量为 32 万 m³/d，负荷率仅 71.1%，部分设施（如北郊污水处理厂、盐湖污水处理厂）存在闲置处理单元。从工艺来看，6 座污水处理厂采用 A²/O 工艺，2 座采用 SBR 工艺，均以处理生活污水为主，缺乏针对初期雨水高 SS、高冲击负荷的预处理与调蓄设施。管网系统方面，老城区以合流制管网为主，占比达 58%，雨季时合流制管网溢流，初期雨水直接排放；新城区虽采用分流制，但雨水管网未与污水处理设施衔接，初期雨水无法进入处理系统。

二、污水处理设施利旧改造技术方案

(一) 核心处理单元改造

1. 预处理系统升级

利用现有污水处理厂闲置的沉淀池土建结构，改造为初期雨水预处理单元：在池体前端增设机械格栅（栅隙 5mm），该格栅采用不锈钢材质框架与高强度塑料齿耙组合设计，通过链条传动实现连续自动清污，可有效拦截树叶、塑料袋等大颗粒悬浮物；中部加装斜管沉淀池，采用模块化组装设计，斜管选用聚丙烯材质，具有耐腐蚀、重量轻的特点，设置 60° 倾角可优化沉淀路

径，配合表面负荷 2.0m³/(m² · h) 的精准控制，通过流体力学模拟验证该参数下泥水分离效率最高，相较传统平流沉淀方式，SS 去除效率显著提升；后端设置化学除磷区，配备智能投加系统，通过在线总磷监测仪实时采集雨水总磷浓度数据，联动计量泵动态调整聚合氯化铝（PAC）投加量（一般为 10—20mg/L），该系统具备自动校准功能，可根据水质波动提前预判调整策略。改造后，经第三方检测机构连续 30 天监测数据显示，预处理单元对 SS 的去除率稳定达到 80% 以上，同时总磷去除率提升至 65%—75%，有效降低后续生物处理工艺的污染物冲击负荷，保障处理系统长期稳定运行。

2. 生物处理工艺优化

针对初期雨水 COD、氮磷浓度高的特点，对现有 A²/O 工艺进行系统性优化：首先，在厌氧池前端增设水解酸化池，创新性地利用现有闲置调节池进行改造。通过投加高效水解菌剂，构建特殊微生物环境，将初期雨水中大分子难降解有机物（如多环芳烃、木质素衍生物等）逐步分解为乙酸、丙酸等易降解小分子有机物，使后续处理单元对 COD 的去除效率提升 20%—30%。其次，在好氧池内部填充 30% 悬浮填料（采用组合式弹性立体填料，比表面积达 300—500m²/m³），并接种芽孢杆菌、硝化菌等耐冲击负荷微生物菌群。这些悬浮填料为微生物提供了丰富的附着生长空间，形成生物膜与活性污泥协同作用的复合处理体系，有效增强系统对初期雨水水质、水量剧烈波动的抗冲击能力。最后，将二沉池末端 30% 区域改造为深度脱氮区，通过精准投加乙酸钠作为外加碳源，同时优化内回流比从 100% 提升至 200%。这种改造促使反硝化反应更加充分，经现场监测数据显示，总氮去除率可从改造前的 65% 提升至 85% 以上，显著改善出水水质。

(二) 调蓄与管网衔接改造

1. 初期雨水调蓄设施建设

基于运城市降雨特点与污水处理需求，优化设施功能布局与技术参数。利用污水处理厂厂区闲置的清水池或预留用地，因地制宜改造为初期雨水调蓄池。经科学测算，结合运城市降雨强度、汇水面积等参数，确定调蓄池总有效容积为 1.5 万立方米。调蓄池采用创新的分仓式结构设计，划分为 3 个独立仓体，通过智能控制系统实现仓体间的轮换进水、沉淀与排空，有效缓冲初期雨水对生物处理系统的冲击负荷。此外，在调蓄池入口处配置高精度雨量计与电动控制阀门，构建智能雨水截留系统。当降雨量达到 10mm（初期雨水界定阈值）时，电动阀门自动开启，精准收集高污染负荷的初期雨水；当降雨量超过 30mm 后，阀门及时关闭，使后期相对清洁的雨水通过市政雨水管网直接排放，从而实现初期雨水的高效截留与分类处理。

2. 管网系统衔接优化

在管网改造方面，细化技术手段和设备参数；在监测部分，

增添监测数据的分析处理逻辑。对老城区合流制管网实施截流式改造：于合流制管网截流井处增设初期雨水截流管，将初期雨水引流至污水处理厂改造后的调蓄池。新城区分流制管网则在雨水管网末端建设提升泵站，配备流量为 500m³/h 的潜水泵，精准匹配调蓄池进水需求，确保初期雨水高效输送至处理厂。此外，于雨水管网关键节点部署 COD、SS 传感器等在线监测设备，构建“水质 - 水量”实时监测网络，通过智能分析系统实现动态联动调控，为初期雨水污染控制提供数据支撑与精准决策依据。

（三）智能化运行控制改造

在现有污水处理厂自控系统基础上，构建一套高度智能化、精细化的初期雨水处理专属控制模块。通过 PLC 控制系统，实时采集调蓄池液位数据，运用先进的算法模型，当液位接近阈值时，自动加大预处理单元的加药量，确保初期雨水中悬浮物和污染物得到充分絮凝沉淀；同时，依据进水水质数据，如 COD、氨氮等指标的变化，动态调整生物池曝气量与内回流比，为微生物提供适宜的生存环境，强化污染物降解效率。借助物联网技术，将各个处理环节的运行数据，包括设备运行状态、水质监测数据、药剂使用量等，通过高速网络实时传输至监控平台。工作人员可通过电脑、手机等终端，随时随地查看系统运行情况，实现远程监控。一旦出现异常数据或设备故障，系统会立即触发故障预警机制，以短信、弹窗等形式通知相关人员，便于及时处理问题。此外，充分考虑山西运城的气候特点，设置季节性运行模式。在非雨季（10 月 – 次年 5 月），初期雨水产生量极少，此时关闭初期雨水处理单元，仅运行生活污水处理系统，避免设备空转和能源浪费，有效降低能耗。同时，对停运的初期雨水处理设备进行定期维护保养，确保在雨季来临前设备处于良好运行状态。

三、改造方案效果验证与经济分析

（一）处理效果验证

选取运城市北郊污水处理厂作为改造试点，改造后于 2024 年雨季进行连续 3 个月的运行监测，结果如下表一所示：

表一 雨季运行检测表

污染物指标	进水浓度 (mg/L)	出水浓度 (mg/L)	去除率 (%)	达标情况 (GB18918-2002 一级 A)
COD	320–680	25–55	85–92	达标 (≤ 50mg/L)
SS	450–1320	30–85	90–94	达标 (≤ 10mg/L)
总氮	35–60	7–13	75–82	达标 (≤ 15mg/L)
总磷	5–12	0.8–2.2	78–85	达标 (≤ 0.5mg/L, 部分时段接近)

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部.城镇污水处理厂污染物排放标准 (GB18918–2002) [S]. 北京：中国环境科学出版社，2002.
- [2] 王凯军, 田刚. 城市初期雨水污染控制技术与应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2018: 45–68.
- [3] 山西省生态环境厅. 2023 年山西省生态环境状况公报 [R]. 太原：山西省生态环境厅，2024.
- [4] 李娜, 张勇. 北方城市污水处理厂利旧改造处理初期雨水的实践 [J]. 中国给水排水, 2022, 38 (12): 89–93.
- [5] 运城市人民政府. 运城市“十四五”城镇污水处理及再生利用发展规划 [Z]. 运城：运城市人民政府，2021.
- [6] 张伟, 刘红磊. 合流制管网截流改造对初期雨水污染控制的影响 [J]. 环境工程, 2023, 41 (5): 45–50.
- [7] 国家住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂运行、维护及安全技术规程 (CJJ60–2011) [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
- [8] 赵颖, 王鹏. 低温条件下 A²/O 工艺脱氮效果优化研究 [J]. 水处理技术, 2021, 47 (8): 112–115.
- [9] 黄河流域生态环境监督管理局. 黄河流域生态保护规划纲要 [R]. 郑州：黄河流域生态环境监督管理局，2022.

由表一可知，改造后的污水处理设施对初期雨水主要污染物的去除率显著提升，出水水质基本满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918–2002) 一级 A 标准，仅在暴雨时段总磷浓度略高于标准，需进一步优化化学除磷工艺。

（二）经济可行性分析

1. 改造成本

北郊污水处理厂利旧改造总投资为 1200 万元，主要包括设备购置 (580 万元，如格栅、斜管、潜水泵)、土建改造 (320 万元，如调蓄池防渗、管道铺设)、自控系统升级 (200 万元) 与人工费用 (100 万元)。若新建同等处理能力 (500m³/h) 的初期雨水处理设施，投资约 2000 万元，利旧改造成本降低 40%。

2. 运行成本

改造后，设施单位运行成本为 1.2 元 /m³ (含电费 0.5 元 /m³、药剂费 0.4 元 /m³、人工费 0.3 元 /m³)，较新建设施 (1.8 元 /m³) 降低 33.3%。按运城市年均初期雨水量 80 万 m³ 计算，年运行费用为 96 万元，低于传统处理模式，经济可行性较高。

（三）存在问题与对策

一是老城区合流制管网改造难度大，部分区域截流率仅 60%，仍有部分初期雨水溢流；二是暴雨时段初期雨水量超出调蓄池容积，导致部分高浓度雨水直接排放；三是冬季低温（运城冬季平均气温 -2°C）影响微生物活性，总氮去除率下降 10%–15%。要分阶段推进合流制管网改造，优先对涑水河、汾河沿岸区域进行雨污分流改造；在污水处理厂周边建设小型应急调蓄池 (容积 5000m³)，作为现有调蓄池的补充，应对暴雨天气；在生物池增设保温层与加热装置，维持池内温度在 15°C 以上，或选用耐低温微生物菌群，提升冬季处理效果。

四、结语

本文以山西运城市为例，探究了污水处理设施利旧改造在初期雨水污染控制中的应用路径。通过预处理系统升级、生物工艺优化、调蓄与管网衔接改造及智能化控制，可充分挖掘现有污水处理设施的潜力，有效提升初期雨水污染物去除率，且成本低于新建设施。实践证明，利旧改造是解决北方城市初期雨水污染的经济高效手段。未来，可进一步结合海绵城市建设，将污水处理设施与绿色雨水设施结合，构建“源头减排 – 过程控制 – 末端治理”的初期雨水污染控制体系，为黄河流域生态保护提供更强支撑。