

# 环境工程视角下城镇污水处理厂尾水深度净化与再生水回用技术研究

张阳阳

河南清尚环保科技有限公司 河南 郑州 450000

**摘要：**在环境工程视角下，城镇污水处理厂尾水深度净化与再生水回用技术是缓解水资源短缺、改善水环境的关键。研究聚焦于物理化学处理（如高级氧化、膜分离）、生物处理强化（如MBR、人工湿地）及组合工艺优化，旨在去除常规与新兴污染物，提升水质稳定性。同时，评估再生水回用于农业、工业、生态及城市杂用的可行性，构建多级屏障体系与监测预警系统，确保安全回用，推动城市水资源循环利用与可持续发展。

**关键词：**环境工程视角；城镇污水处理厂；尾水深度净化；再生水回用技术

**引言：**随着城镇化加速与水污染问题加剧，城镇污水处理厂尾水排放与水资源短缺矛盾日益突出。传统处理工艺虽能实现达标排放，但尾水中残留的常规污染物、新兴污染物（如药物、微塑料）及季节性水质波动，仍对受纳水体和回用场景构成风险。环境工程领域亟需通过深度净化技术创新与工艺优化，提升再生水水质，满足农业、工业、生态等多场景回用需求。本文将从技术、经济、环境风险三方面展开研究，为水资源循环利用提供科学支撑。

## 1 城镇污水处理厂尾水特性与回用需求分析

### 1.1 尾水水质特征分析

（1）常规污染物（COD、NH<sub>3</sub>-N、TP）的残留水平：经二级或深度处理后，尾水COD通常可降至50mg/L以下，部分达标排放厂能控制在30mg/L内；NH<sub>3</sub>-N残留量多为1-5mg/L，脱氮工艺完善的厂可低于1mg/L；TP一般维持在0.1-0.5mg/L，但仍高于自然水体背景值，存在富营养化风险。（2）新兴污染物（药物、个人护理品、微塑料）的赋存规律：抗生素、激素等药物类污染物浓度多在ng/L至μg/L级别，且易在生物体内富集；微塑料以粒径 < 5mm的纤维、碎片为主，在尾水中检出率超80%，易随回用进入土壤或水体循环。（3）季节性水质波动对处理工艺的影响：雨季降雨量增加，尾水污染物浓度稀释，部分处理单元负荷降低，但冲击负荷可能导致处理效率波动；旱季水体停留时间长，藻类繁殖易造成COD升高，需调整曝气强度与药剂投加量。

### 1.2 再生水回用场景与水质标准

（1）农业回用：灌溉水质需满足盐分含量 < 1000mg/L，重金属（如镉、铅）浓度低于国家农田灌溉水标准，病原菌（如大肠杆菌）每100mL不得超过1000个，防止

土壤盐碱化与农产品污染。（2）工业回用：冷却水要求悬浮物 < 20mg/L、硬度（以CaCO<sub>3</sub>计） < 450mg/L，避免管道结垢；工艺用水对COD、氨氮要求更严格，部分行业需达到饮用水级标准，确保生产产品质量。（3）生态回用：河道补水需保证溶解氧 > 5mg/L，维持水生生物生存；氮磷比需控制在10-15:1，避免水体富营养化引发水华，同时需匹配河道生态流量需求。（4）城市杂用：绿化用水要求悬浮物 < 30mg/L、pH值6-9，避免灼伤植物；冲刷、道路清洗用水需无异味、无致病菌，COD < 60mg/L，确保使用安全卫生<sup>[1]</sup>。

### 1.3 环境工程约束条件

（1）土地资源限制对处理设施规模的影响：城镇核心区域土地紧张，处理设施多需紧凑布局，膜分离、高级氧化等占地少的工艺更受青睐，部分项目需采用地下式或半地下式建设，增加工程成本。（2）能源消耗与碳足迹的优化需求：传统处理工艺能耗约0.3-0.5kWh/m<sup>3</sup>，碳排放量较高，需推广光伏发电、沼气回收利用等技术，同时优化曝气、回流等环节能耗，降低碳足迹。

（3）公众接受度与政策法规的兼容性：公众对再生水回用存在“水质安全”顾虑，需加强宣传与监测公示；政策层面需完善再生水定价机制、回用补贴政策，确保与现有环保法规、城镇规划相协调。

## 2 环境工程视角下城镇污水处理厂尾水深度净化关键技术及工艺优化

### 2.1 物理化学处理技术

（1）高级氧化技术（AOPs）：臭氧催化氧化通过臭氧分解产生·OH（羟基自由基），氧化分解水中难降解有机物，对COD去除率可达30%-50%，尤其适用于药物类污染物降解；Fenton试剂（Fe<sup>2+</sup>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>）在酸性条件

下生成·OH，能高效破坏污染物分子结构，对色度、微量有机物去除效果显著，但需控制pH在2-4，且后续需处理Fe<sup>3+</sup>污泥。（2）膜分离技术：超滤（UF）通过0.01-0.1μm孔径膜截留悬浮物、胶体及部分微生物，膜污染主要源于有机物吸附、胶体沉积，控制策略包括预处理投加混凝剂减少污染物负荷、采用气水反冲洗结合化学清洗（如次氯酸钠浸泡），延长膜使用寿命；反渗透（RO）利用半透膜截留离子、小分子有机物，膜污染以scaling（结垢）和生物污染为主，需通过预处理降低硬度、投加阻垢剂与杀菌剂，维持膜通量稳定<sup>[2]</sup>。（3）吸附技术：活性炭比表面积大（800-1200m<sup>2</sup>/g），对酚类、农药等微量污染物吸附容量达50-150mg/g，但易饱和需再生；生物炭通过高温裂解制备，表面富含官能团，对重金属（如Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>）吸附率超90%，且成本仅为活性炭的1/3-1/2，更适合低成本净化场景。

## 2.2 生物处理强化技术

（1）膜生物反应器（MBR）：通过膜截留活性污泥，污泥龄（SRT）可控制在15-30d，延长SRT能提高硝化菌浓度，NH<sub>3</sub>-N去除率达95%以上；膜清洗周期优化需结合跨膜压差（TMP），当TMP升至30kPa时，采用在线水冲洗（通量30-50L/m<sup>2</sup>·h），每3-6个月进行一次化学清洗（柠檬酸+次氯酸钠），可将清洗周期延长至180-240d。（2）人工湿地：挺水植物（如芦苇、香蒲）通过根系分泌有机物促进微生物繁殖，微生物降解COD效率达60%-80%，植物吸收氮磷量占总去除量的15%-25%；冬季运行需采取覆盖保温（秸秆+地膜），使水温维持在5℃以上，或选用耐寒植物（如菖蒲），确保COD去除率不低于50%。（3）生物滤池：填料选择需兼顾孔隙率与生物附着性，火山岩填料（孔隙率40%-50%）比碎石填料硝化效率高20%-30%；反冲洗频率根据滤池水头损失调整，当水头损失达1.5m时，采用气水联合反冲洗（气强度15-20L/m<sup>2</sup>·s，水强度5-8L/m<sup>2</sup>·s），反冲洗周期控制在7-10d，可维持硝化率稳定在85%以上<sup>[3]</sup>。

## 2.3 组合工艺设计与案例分析

（1）案例1：“MBR+臭氧氧化+活性炭吸附”工艺在工业回用中的应用：某工业园区污水处理厂采用该工艺，MBR段去除90%以上悬浮物与COD，臭氧氧化（臭氧投加量50mg/L）降解难降解有机物，活性炭吸附（空床接触时间30min）深度去除微量污染物，出水COD < 30mg/L、NH<sub>3</sub>-N < 1mg/L，满足冷却用水标准，回用率达60%。（2）案例2：“人工湿地+超滤”组合工艺的农业灌溉适应性：某城镇污水处理厂构建2000m<sup>2</sup>人工湿地，搭配UF系统，湿地去除60%氮磷与部分有机物，UF截留

病原菌（大肠杆菌 < 100个/100mL），出水盐分 < 800mg/L，符合农田灌溉标准，年灌溉农田1500亩，节约地下水30万m<sup>3</sup>。（3）技术经济性对比：“MBR+臭氧+活性炭”工艺投资成本约800-1000元/m<sup>3</sup>，运行费用1.2-1.5元/m<sup>3</sup>，处理效果优但成本高；“人工湿地+超滤”投资成本400-600元/m<sup>3</sup>，运行费用0.3-0.5元/m<sup>3</sup>，处理效果满足农业/生态回用，更适合中小城镇；单一膜分离工艺投资高（1200-1500元/m<sup>3</sup>），仅适用于高水质要求的工业回用场景。

## 3 环境工程视角下城镇污水处理厂再生水回用的环境风险评估与控制

### 3.1 潜在环境风险识别

（1）化学风险：消毒副产物（DBPs）、重金属累积效应。再生水消毒常用氯、二氧化氯等药剂，氯与水中有机物反应会生成三卤甲烷（THMs）、卤乙酸（HAAs）等DBPs，其中THMs浓度若超过80μg/L，长期接触可能增加人体致癌风险；尾水中残留的镉、汞等重金属，经农业回用会在土壤中累积，当土壤重金属含量超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》限值（如镉0.3mg/kg），会通过农作物吸收进入食物链，危害人体健康。（2）生物风险：病原菌再生与抗生素耐药基因（ARGs）传播。尾水深度处理虽能去除大部分病原菌，但在管网输送或储存过程中，温湿度适宜时可能导致大肠杆菌、军团菌等病原菌再生，若用于城市杂用（如喷灌绿化），易通过气溶胶传播引发呼吸道感染；此外，尾水中含有的ARGs（如四环素耐药基因tetA、青霉素耐药基因blaTEM），会随再生水进入环境，通过水平转移扩散至其他微生物，加剧抗生素耐药性问题。（3）生态风险：氮磷负荷过高导致的受纳水体富营养化。再生水用于生态回用（如河道补水）时，若出水TN > 15mg/L、TP > 0.5mg/L，会使河道氮磷负荷超出环境容量，促进蓝藻、绿藻大量繁殖，形成水华。水华会消耗水体溶解氧，导致鱼类等水生生物死亡，同时藻类释放的藻毒素（如微囊藻毒素-LR），会污染水体，威胁生态系统安全与饮用水源地水质。

### 3.2 风险评估方法

（1）健康风险评估模型（如USEPA的四步法）。第一步危害识别，明确再生水中的有害污染物（如DBPs、重金属）；第二步剂量-反应关系评估，通过动物实验或流行病学数据，确定污染物暴露剂量与健康效应的关联（如THMs暴露与癌症发病率的关系）；第三步暴露评估，计算不同回用场景（如农业灌溉、城市杂用）下人体暴露量（如经口摄入、皮肤接触量）；第四步风险表

征,判断污染物健康风险是否可接受(如致癌风险  $> 10^{-6}$  时需采取管控措施)。(2)生态毒性测试:斑马鱼急性毒性实验、藻类生长抑制实验。斑马鱼急性毒性实验中,将斑马鱼暴露于不同浓度的再生水样品中,观察96h内的死亡率,若再生水样品的半数致死浓度(LC<sub>50</sub>)  $< 10\%$ ,表明其具有较强生态毒性;藻类生长抑制实验以斜生栅藻为测试生物,测定再生水对藻类生长的抑制率,若抑制率  $> 30\%$ ,说明再生水可能影响水体初级生产力,需进一步优化处理工艺<sup>[4]</sup>。(3)长期影响模拟:水质模型(如QUAL2K)预测回用对河流的影响。QUAL2K模型可模拟河流中溶解氧、氮、磷等水质指标的时空变化,将再生水补水流量、水质参数(如TN、TP浓度)输入模型,预测不同回用规模下河流的水质变化趋势。例如,当再生水TN浓度为10mg/L、补水流量为河流枯水期流量的20%时,模型可预测出下游5km处TN浓度是否超过《地表水环境质量标准》Ⅲ类限值(TN  $\leq 1.0\text{mg/L}$ ,湖库),为回用规模优化提供依据。

### 3.3 风险控制策略

(1)多级屏障体系:预处理-深度处理-消毒的联合防控。预处理采用格栅、沉砂池去除悬浮物,减少后续处理负荷;深度处理结合膜分离(如UF)与吸附技术(如活性炭),去除微量有机物与重金属,使COD  $< 30\text{mg/L}$ 、重金属浓度低于限值;消毒选用臭氧或紫外线替代传统氯消毒,臭氧消毒可将DBPs生成量降低60%以上,紫外线消毒(剂量  $\geq 40\text{mJ/cm}^2$ )能有效灭活病原菌与ARGs,形成“物理截留+化学降解+生物灭活”的多级防护。(2)监测预警系统:在线传感器与大数据平台的联动。在再生水处理单元、管网节点及受纳水体布设在线传感器,实时监测COD、TN、TP、病原菌数量等指

标,传感器数据通过5G传输至大数据平台;平台运用机器学习算法分析数据,当指标超出阈值(如TP  $> 0.3\text{mg/L}$ )时,自动触发预警,通知运维人员及时排查故障,实现风险的早发现、早处置。(3)应急管理机制:突发污染事件的回用中断与应急补水方案。制定突发污染事件(如尾水重金属超标、消毒系统故障)应急预案,明确回用中断触发条件(如在线监测显示重金属浓度超标的持续时间  $> 1\text{h}$ ),一旦触发,立即关闭回用阀门,停止再生水供应;同时,建立应急补水系统,连接市政自来水或备用水源,保障农业灌溉、城市杂用等关键用水需求,避免因回用中断造成经济损失或生态影响。

### 结束语

环境工程视角下,城镇污水处理厂尾水深度净化与再生水回用技术是实现水资源可持续利用的重要途径。本研究通过系统分析尾水特性、优化组合净化工艺、构建多级风险防控体系,验证了技术可行性及经济性。未来需进一步强化新兴污染物去除技术研发,完善再生水回用标准与政策激励,推动公众参与和跨领域协同,以实现水资源高效循环与生态环境协同保护,支撑城镇绿色低碳发展。

### 参考文献

- [1]兰培.城市污水厂尾水深度处理技术研究[J].皮革制作与环保科技,2023,4(04):155-156.
- [2]徐明杰,刘敏,王宇喆.浅析城市污水厂尾水深度净化技术研究进展[J].资源节约与环保,2021,(03):94-95.
- [3]闫林霞,韩小波,范翊,等.城市污水处理厂尾水安全回用技术研究[J].广东化工,2024,51(21):125-127.
- [4]高洁.生态工程组合工艺应用于城市污水处理厂尾水深度处理[J].居业,2024,(06):10-12.