

水资源节约利用与污水处理协同发展探讨

赫晓玉

河南钢铁集团安阳钢铁股份有限公司 河南 安阳 455000

摘要:我国面临水资源短缺与水环境污染双重压力,节水与治水长期分离致资源利用效率低。水资源节约利用与污水处理协同发展意义重大,其以水循环系统物质平衡、水环境容量等理论为核心,通过MBR-RO双膜法再生水回用、源头清洁生产与过程控制、污水处理厂厌氧消化产沼与污泥热解资源回收、区域水循环系统集成等技术路径,配合水价阶梯调节、排污权交易、智慧水务协同监管等管理机制,可实现水资源利用率提升、污染物减排与碳减排的综合效益。

关键词:水资源节约;污水处理;协同发展;再生水利用;水循环经济;MBR-RO双膜法

引言:我国人均水资源量不足世界平均1/4,同时全国地表水V类及劣V类水质断面仍占一定比例,水资源短缺与水质型缺水并存。传统模式下节水侧重减少取水量,污水处理侧重达标排放,二者分离导致再生水回用率偏低(不足20%)。本文从工程技术角度,探讨节水与治水的技术协同路径,为破解水资源困境提供技术支撑。

1 水资源节约利用与污水处理协同发展的理论基础

水资源节约利用与污水处理协同发展,其技术理论核心依托水循环系统的物质守恒、水环境容量及水处理工艺单元耦合原理,构建“节水-治污-回用”的物质闭环与能量梯级利用体系。水循环物质守恒原理注重各环节水量与污染物质量平衡,节水与后续处理工艺负荷存在定量耦合。水环境容量理论要求污水排放总量不超接纳水体自净能力,通过节水与处理实现排放负荷与水环境容量匹配。工艺单元耦合原理将节水器具、管网输送、污水处理及再生回用单元系统集成,优化运行参数匹配^[1]。此外,水处理热力学与动力学理论为工艺选择提供依据,像高级氧化工艺的反应速率常数、膜通量与跨膜压差关系等,为后续技术路径设计提供理论支撑。

2 水资源节约利用与污水处理协同发展的现实必要性

2.1 水资源短缺与水环境污染的双重压力

我国面临水资源短缺与水环境污染双重技术约束。供需上,全国年均缺水约500亿立方米,北方水资源开发利用超40%,部分河流生态流量不足。水环境质量方面,工业和生活污水主要污染物排放量居高不下,部分湖泊水库富营养化,水质型缺水突出,南方丰水地区也“有水不能用”。城镇污水处理厂一级A排放标准难满足高要求回用。单纯节水或污水处理提标改造都有局限,节水无法解决水质问题,污水处理提标改造投资大且难缓解水量短缺。唯有通过水质水量协同控制技术,在节水时控制污染物排放总量,处理时规划再生水用途,才

能实现水资源梯级利用与循环再生。

2.2 节水与治水长期分离的弊端

长期以来,节水与治水在技术路线、设施布局、运行管理上“各自为战”,产生多重技术弊端。在设施层面,节水改造(如更换节水龙头、推广中水冲厕)与污水处理厂提标扩容缺乏协同规划,导致部分污水厂进水浓度偏低(COD<150mg/L),碳源不足影响生物脱氮效率,需额外投加乙酸钠等碳源,增加运行成本20%以上。在管网层面,雨污分流改造滞后,汛期合流制溢流污染严重,污水厂进水水量波动达3-5倍,冲击生化系统稳定性。在技术标准层面,节水器具流量标准与污水收集管网设计参数缺乏衔接,节水器具过度节流可能导致管道流速过低、沉积堵塞。在管理层面,水利部门考核用水量,环保部门考核污染物减排量,二者未建立水量-水质联合调度机制,再生水回用工程与取水许可、排污许可缺乏联动^[2]。技术经济分析表明,节水与治水分离导致的设施闲置、重复建设、运行低效等问题,造成额外投资浪费约15%-25%。因此,需要从系统工程技术角度,推动节水与治水的工艺耦合、设施共享、联合调度。

2.3 协同发展的综合效益

水资源节约利用与污水处理协同发展具有可量化的技术经济与生态环境效益。技术经济层面:再生水替代新鲜水,工业冷却水采用再生水可降低取水成本2-4元/吨;污水源热泵回收污水余热,制热/制冷能效比(COP)可达3.5-4.5,较电锅炉节能30%-50%;污泥厌氧消化产沼气,每吨干污泥产气300-500m³,发电可满足污水厂能耗的30%-60%。生态环境层面:每回用1万吨再生水,相当于减少新鲜水开采1万吨、减少污水排放1万吨,COD减排量约0.5-1吨;节水同时减少排水量,降低污水管网溢流风险。系统优化层面:通过水量-水质联合调度,可将污水厂平均进水COD提升至250mg/L以上,减少外加碳源

费用；再生水就近回用减少长距离输水能耗，吨水输配电耗可降低0.3-0.5kWh。以某工业园区为例，实施节水-治污-回用协同改造后，新鲜水取用量下降40%，污水排放量下降35%，年综合运行成本降低约22%。

3 水资源节约利用与污水处理协同发展的主要技术路径

3.1 再生水回用：MBR-RO双膜法技术集成

再生水回用是实现“治污”与“节水”双向赋能的核心技术路径。工艺路线：污水处理厂二级出水→超滤(UF)或微滤(MF)→反渗透(RO)→消毒(紫外线/臭氧)→再生水。其中MBR(膜生物反应器)将生化处理与膜分离耦合，污泥浓度可达8-12g/L，占地面积减少30%-50%，出水浊度<0.5NTU，可直接作为RO进水。RO对盐分、重金属、微量有机物的去除率>95%，产水水质可达工业纯水标准。技术参数：MBR膜通量控制在15-25L/(m²·h)，RO膜通量控制在12-18L/(m²·h)，系统回收率75%-85%，浓水约15%-25%需进一步处理或排放。应用场景：工业冷却水、锅炉补水、城市杂用水(绿化、道路清扫)、农业灌溉(需控制盐分)。工程案例：某大型再生水厂采用“A²O-MBR-RO”工艺，日处理规模10万吨，再生水回用率超60%，年替代新鲜水约2000万吨。技术经济分析显示，再生水制水成本约1.5-2.5元/吨，低于当地工业水价3-5元/吨，具有经济可行性。

3.2 源头减量与过程控制技术

源头减量与过程控制从污染产生的源头降低负荷，是节水与治污协同的基础技术环节。工业领域：推行清洁生产审核，优化工艺流程，推广逆流漂洗、干法除尘、循环冷却等节水技术。具体技术包括：电镀行业采用逆流漂洗+离子交换回收，废水减排80%以上，重金属回收率>95%；印染行业采用高温高压溢流染色+冷凝水回收，吨布水耗从200吨降至80吨以下；化工行业实施工艺水分质回用，高浓度废水预处理后回用，低浓度废水直排或生化处理。生活领域：推广节水型器具(节水龙头≤6L/min、节水马桶≤4L/次)，结合雨污分流改造，雨水单独收集用于绿化、景观补水，减少污水厂雨季水力负荷。农业领域：推广滴灌、微喷灌等高效节水灌溉技术，灌溉水利用系数从0.5提升至0.9以上；结合生态沟渠+人工湿地拦截农田退水中的氮磷，总氮去除率30%-50%，总磷去除率40%-60%。上述源头控制技术可削减污水总量20%-40%，降低污染物浓度30%-50%，显著减轻末端处理压力^[1]。

3.3 污水处理厂节能降耗与资源回收

污水处理厂从“能耗单元”向“能源工厂”转型，是协同发展的关键技术方向。节能技术：采用高效曝

气系统(微孔曝气器氧利用率25%-35%，较传统提高1倍)+精确曝气控制(DO在线反馈调节，节省电耗15%-25%)；采用变频调速水泵、风机，匹配实际水量变化；推广水源热泵回收出水余温(冬季12-15℃)，用于厂区供暖。能源回收技术：污泥厌氧消化(中温35-38℃，停留时间20-30天，每吨干污泥产沼气300-500m³，甲烷含量60%-65%)→沼气净化→热电联产(CHP)，发电效率35%-40%，余热回收用于消化罐保温，可满足污水厂电耗的30%-60%。资源回收技术：污泥热解炭化(400-600℃，绝氧条件下热解，产热解炭可作为土壤改良剂或燃料)；从污泥厌氧消化上清液中回收磷(鸟粪石结晶法，磷回收率70%-90%)；从污水中回收热能(进出水温差3-5℃，水源热泵提取热量)。技术经济分析表明，采用“厌氧消化+热电联产+磷回收”的组合工艺，污水厂运行成本可降低20%-40%，碳排放减少30%-50%。

3.4 区域水循环系统集成技术

区域水循环系统集成借助水量-水质联合调控，达成“取-用-耗-排-治-回”全链条技术耦合。其技术框架是构建区域智慧水网，整合供排水管网、再生水管网及自然水体的监测数据与调控设施。关键技术有三：一是分布式污水处理与回用，在大型居民区、工业园区设小型污水处理站(如MBR一体化设备，处理规模100-5000吨/日)，出水就近回用；二是生态补水技术，污水厂尾水经人工湿地(水力停留2-5天，种芦苇等水生植物)深度处理后补充河道生态基流；三是地下水回灌技术，再生水经RO处理后回灌地下含水层。区域协同模式为企业间水梯级利用。集成后，水资源重复利用率超85%，外排废水量减少70%以上，可实现近零排放目标。

4 水资源节约利用与污水处理协同发展的管理机制

4.1 政策法规与标准体系协同

技术落地需政策标准配套。标准层面，推进节水、排水、处理、回用各环节水质标准统一：节水器具流量限值≤6L/min，应与污水管网经济流速0.6m/s相协调，防止管道沉积；再生水执行GB/T 18920-2020，按用途分质供水——工业冷却浊度≤5NTU，城市杂用≤10NTU。政策层面，实行居民阶梯水价(第一阶梯2-3元/吨、第三阶梯6-9元/吨)，将排污许可与取水许可联动，企业取水量、排水量、回用量统筹核定；对再生水项目给予投资补贴15%-30%、运营补贴0.5-1元/吨。规范层面，加快出台《再生水回用工程技术规范》《污水厂能源回收技术导则》，明确设计参数与验收标准^[4]。

4.2 规划建设与设施布局协同

设施优化布局是协同发展的硬件保障。规划上，运

用GIS空间分析,叠加人口、产业、水源、管网、水环境敏感度等图层,科学确定污水厂、再生水厂及回用管网的位置与规模。设施配置上,采取“大型集中+小型分散”模式:10万吨/日以上集中式污水厂搭配1000-5000吨/日分布式再生站,集中处理与就近回用互补,管网投资可降30%-50%。管网建设上,新建区推行供水、污水、再生水“三管同步”,老城区结合改造逐步增补再生水管。方案比选上,采用全生命周期成本法(建设+运营-再生水收益)择优确定布局方案。

4.3 经济政策与市场机制协同

市场化机制为技术应用注入动力。水权交易方面,将区域用水总量指标分解到户,节余指标自由交易,价格由市场形成,激励主动节水。排污权交易方面,流域COD、氨氮等总量指标分配到排污单位,减排指标可交易,推动低成本治污。合同节水管理方面,节水服务企业先行投资改造(更换器具、查漏补漏、建设中水系统),与用户分享节水收益,投资回收期一般3-5年。第三方治理方面,排污单位委托专业公司运营污水设施,按水量与达标情况付费,运行成本可降10%-20%。绿色金融方面,对协同项目提供绿色信贷(利率优惠0.5-1%)、绿色债券、PPP模式(特许经营20-30年)等支持。

4.4 监管考核与信息共享协同

智慧化监管是技术落地的保障,构建“源-网-厂-河”一体化监测网络——源头(取水口流量计、重点排污单位在线监测COD/氨氮/pH)、管网(关键节点流量、液位)、污水厂(进出水水质、运行参数)、受纳水体(水质自动站)。集成SCADA系统(数据采集与监视控制)、GIS系

统(地理信息)、水力模型(EPANET、SWMM等),实现水量平衡分析、水质预警、优化调度。将再生水回用率、单位GDP水耗、污染物排放强度、污水厂能源自给率等纳入政府绩效考核,权重不低于5%。水利、环保、住建、城管等部门通过统一数据中台共享取水、排水、处理、回用数据,支撑综合执法与应急调度。某市实施智慧水务后,管网漏损率从15%降至9%,污水厂进水浓度提升20%,再生水回用量增加40%。

结束语

水资源节约利用与污水处理协同发展,核心是水量与水质、取水与排水、处理与回用的系统性技术耦合。本文从物质守恒、工艺耦合、能量梯级利用等工程角度,梳理了MBR-RO双膜法再生回用、源头清洁生产、污水厂能源化资源化、区域水循环集成等关键技术路径,提出了标准衔接、设施优化、市场机制、智慧监管等配套管理措施。下一步需在典型工业园区、城市新区开展协同技术集成示范,验证不同技术组合的经济性与适用性,形成可复制推广的工程技术模式。

参考文献

- [1]杨涛.冠县水资源节约利用的经验与成效[J].山东水利,2025(12):48-50.
- [2]景文洲,朱晓春,于翠,等.海河流域水资源节约利用法律制度研究[J].海河水利,2025(3):9-13.
- [3]朱青松,栾杉.东营市践行“四水四定”促进水资源节约利用对策[J].山东水利,2025(4):45-48.
- [4]陶相婉,龚道孝,莫耀,等.污水处理协同降碳的思考与绿色低碳发展展望[J].给水排水,2025,51(9):27-34.