

基于水质改善目标的恩施污水处理厂扩容升级技术路径

周宏波

湖北沃驰建筑工程有限公司 湖北 恩施 445000

【摘要】：本次针对当地3座主力污水处理厂存在的处理能力不足、出水水质不稳定及污泥处置不规范等问题，以“流域水质达标”为核心目标，构建“工艺升级适配化、扩容增效模块化、污泥处置资源化、厂网协同智能化”四位一体技术路径。通过恩施市第一污水处理厂、第二污水处理厂等工程实践，采用“AAO+MBR”“A/O+深度处理”等差异化工艺，配套模块化扩容、智能监测调度及污泥协同焚烧技术，实现处理能力提升，清江干流断面水质稳定保持Ⅲ类。研究成果为山区生态敏感区污水处理厂扩容升级提供了技术范式，对同类工程具有重要借鉴价值。

【关键词】：水质改善；污水处理厂；扩容升级；技术路径；厂网协同；恩施地区

DOI:10.12417/2811-0536.26.01.044

1 引言

恩施州市政基础设施更新三年行动将污水处理厂扩容升级列为核心工程，总投资12.8亿元，重点解决3座主力厂负荷不足与水质达标问题。恩施州作为清江发源地，其污水处理厂出水直接汇入清江干流，对长江上游水质调控具有关键作用，扩容升级不仅是设施能力提升需求，更是生态安全保障必然。针对恩施山区生态敏感、水质波动大、用地受限等特点，构建差异化技术路径，解决传统扩容“一刀切”工艺适配性差、投资浪费等问题。工程实施后，清江干流氨氮、总磷浓度分别下降42%、38%，为同类山区污水处理厂升级提供可复制的“恩施方案”。突破“重扩容轻提质”“重工艺轻协同”传统思维，建立“水质目标-工艺适配-扩容模式-协同调控”一体化技术体系，丰富生态敏感区污水处理设施升级的技术理论，为“厂-网-河”协同治理提供理论支撑。

2 恩施污水处理厂现状与水质改善目标解析

(1) 设施现状诊断。①处理能力与负荷失衡：3座主力厂设计总规模15万m³/d，2022年实际处理量19万m³/d，其中恩施市第一厂（设计3万m³/d）最高日处理量达4.2万m³/d，超负荷运行导致曝气不足，出水氨氮超标；利川市污水处理厂（设计5万m³/d）因管网覆盖不足，日均处理量仅2.8万m³/d，低负荷导致污泥沉降性能下降（SVI=180）。②工艺技术瓶颈：山区生活污水以洗涤、餐饮废水为主，可生化性差，传统A/O工艺反硝化碳源匮乏，总氮去除率仅55%；汛期雨水混入导致进水COD骤降至50-80mg/L，生化系统崩溃风险高，2022年汛期3座厂共出现15次出水超标；仅1座厂配套简易过滤设施，无脱氮除磷强化单元，总磷出水浓度均值0.45mg/L，超一级A标准（0.5mg/L）临界值。③污泥与能耗问题：污泥处

置采用“浓缩+板框压滤”简易工艺，含水率85%-88%，需外运填埋，年处置成本超1200万元；曝气系统为定频设备，单位处理能耗0.68kWh/m³，较行业先进水平高20%。主干管缺失导致支线输送能力不足，顶管改造滞后引发雨污混流，漏损率23%导致进水“稀释效应”，形成“处理厂吃不饱与水质不达标并存”困境。

(2) 水质改善核心目标：处理厂出水稳定达GB18918-2002一级A标准：COD≤50mg/L、BOD₅≤10mg/L、氨氮≤5（8）mg/L、总氮≤15mg/L、总磷≤0.5mg/L。清江干流断面水质稳定保持Ⅲ类，氨氮≤1.0mg/L、总磷≤0.2mg/L，需控制处理厂出水对流域的贡献负荷：氨氮≤1.5mg/L、总磷≤0.3mg/L（较一级A标准加严40%、40%）。3座主力厂总规模提升至25万m³/d，负荷率控制在75%-90%；进水COD≥250mg/L，单位处理能耗降至0.55kWh/m³以下；污泥处置含水率≤60%，资源化利用率≥80%。

3 基于水质改善的扩容升级技术路径构建

以“流域水质达标”为核心，结合恩施山区特点，构建“工艺升级适配化、扩容增效模块化、污泥处置资源化、厂网协同智能化”四位一体技术路径，实现“提质、扩容、节能、减污”协同。

(1) 工艺升级适配化路径：根据3座厂进水水质、负荷特征及用地条件，采用“差异化工艺+关键参数优化”模式，确保出水水质稳定达标。①高负荷厂强化抗冲击与深度处理：针对恩施市第一厂超负荷运行、进水波动大，采用“预处理强化+AAO+MBR+消毒”工艺，核心升级点。新增转鼓格栅（栅距3mm）+旋流沉砂池+调节池容积5000m³，停留时间4h，去除大颗粒杂质并缓冲水质波动；将传统A/O改为AAO，增设内回流泵，厌氧区停留时间延长至2h，缺氧区

DO 控制在 0.2-0.5mg/L，解决碳氮比失衡问题；MBR 深度处理选用 PVDF 中空纤维膜，替代传统二沉池，截留率 $\geq 99\%$ ，确保总磷、悬浮物达标；在 MBR 出水端投加聚合氯化铝（PAC），投加量 30-50mg/L，辅助除磷。②中低负荷厂优化生化与节能降耗：针对恩施市第二厂负荷率 60%、碳源不足，采用“A/O+缺氧反硝化滤池+臭氧氧化”工艺，核心升级点。扩大缺氧区容积，投加缓释碳源，总氮去除率提升至 75%；新增缺氧反硝化滤池（滤速 8m/h）+臭氧氧化（臭氧投加量 15mg/L），强化脱氮与消毒，出水氨氮 $\leq 1.0\text{mg/L}$ ；将定频曝气改为微孔曝气+变频风机，根据 DO 实时调节风量，能耗降低 18%。③乡镇小型厂简化高效与运维便捷：针对利川市乡镇厂规模 $\leq 1\text{万 m}^3/\text{d}$ 、运维能力弱，采用“一体化 MBR 设备”，单套处理规模 5000 m^3/d ，占地仅 80 m^2 ，集成预处理、生化、深度处理功能，运维人员仅需 1-2 人，适配乡镇需求。

（2）扩容增效模块化路径：恩施市区土地紧张，传统“征地扩建”模式成本高、周期长，采用“模块化+空间优化”扩容，缩短工期 40%，节约用地 30%。①核心模块设计：生化模块采用钢结构预制 AAO 模块，单模块处理规模 1 万 m^3/d ，尺寸 15m \times 8m \times 4.5m，工厂预制后现场吊装，安装周期仅 15 天；MBR 模块集成膜组件、曝气、反洗系统，单模块处理规模 5000 m^3/d ，可叠加布置（2-3 层），适应垂直空间利用；辅助模块预处理、消毒等模块标准化设计，根据扩容需求组合拼接，实现“按需扩容”。②空间优化策略：在现有厂区空地搭建钢结构平台，将 MBR 模块置于平台上层，生化模块置于下层，节约平面用地；将调节池与事故池合建，采用地下式布置，减少地表占用；同步升级厂区进水管网，将原有 1.2m 钢管更换为 1.5m 钢管，提升进水输送能力，匹配扩容后负荷。③施工组织优化：采用“边运行边施工”模式，分 3 个阶段实施，第一阶段改造预处理系统（不影响主体运行）；第二阶段吊装模块化生化单元单模块吊装仅需 8 小时，避开高峰运行时段；第三阶段调试深度处理系统，确保施工期间处理能力不低于原规模的 90%。

（3）污泥处置资源化路径：针对污泥含水率高、处置成本高问题，构建“浓缩-深度脱水-协同焚烧”技术链，实现污泥减量化与资源化。①污泥减量化处理：将传统重力浓缩改为离心浓缩，污泥含水率从 99.2%降至 96%，体积缩减 75%；采用“板框压滤+药剂调理”工艺，投加聚合氯化铝+生石灰，含水率从 96%降至 55%-60%，污泥体积再缩减 70%；在脱水车间增设太阳能干化棚，利用恩施充足光照进一步降

低含水率至 50%以下。②资源化利用路径：与恩施市垃圾焚烧发电厂合作，将脱水后污泥（热值约 1200kJ/kg）按 10%比例与生活垃圾混合焚烧，年处理污泥 1.2 万吨，替代 20%燃煤，降低焚烧厂能耗；焚烧灰渣（约 2000 吨/年）经检测达标后，用于制砖或路基填料，资源化利用率 100%；在 AAO 工艺厌氧区增设沼气收集装置，年回收沼气 12 万 m^3 ，用于厂区锅炉加热或发电，年节约能耗成本 35 万元。

（4）厂网协同智能化路径：进水水质波动是恩施处理厂达标关键瓶颈，通过“预处理强化+智能监测+联动调度”实现厂网协同，提升进水稳定性。①管网预处理强化：在主干管与支管交汇节点增设机械格栅（栅距 5mm）+截流井，拦截管网输送过程中的杂质，降低厂区预处理负荷；采用 CCTV 检测技术排查并修复老旧管网 12.3km，漏损率从 23%降至 8%，提升进水浓度；在管网末端建设应急调蓄池（容积 8000 m^3 ），当进水 COD $\leq 150\text{mg/L}$ 时，储存低浓度污水，待高浓度污水汇入后混合输送，确保进水 COD $\geq 250\text{mg/L}$ 。②智能监测与调度系统：投资 800 万元搭建“恩施市污水处理智能调度平台”，实现“管网-厂区-出水”全流程监测调控。在管网 18 个关键节点安装流量计、液位计，厂区进水口、生化池、出水口安装 COD、氨氮、DO 等在线监测仪（数据采集频率 1 次/分钟）；分析层采用机器学习算法建立“进水水质-工艺参数”预测模型，提前 2 小时预判水质波动，自动优化曝气风量、回流比等参数；控制层实现泵组、阀门、曝气系统远程控制，当进水 COD 骤升时，自动提升调节池搅拌强度并降低进水流量；当进水浓度过低时，自动开启调蓄池高浓度污水混合阀。③应急联动机制：建立“水质预警-工艺调整-应急处置”三级联动机制。一级预警自动降低进水流量 30%，启动应急碳源投加；二级预警切换至应急处理模式，启用备用反应池，采用“稀释+强化曝气”工艺；三级预警联动管网调度中心，关闭高污染负荷支线阀门，将污水导入应急调蓄池。

4 工程案例

（1）项目概况：恩施市第一污水处理厂位于清江上游，服务人口 25 万人，原设计规模 3 万 m^3/d ，采用传统 A/O 工艺，2022 年实际处理量 3.8-4.2 万 m^3/d ，超负荷运行导致出水氨氮、总磷汛期超标率 15%，是清江流域水质改善关键节点。升级目标：规模提升至 5 万 m^3/d ，出水稳定达一级 A 标准（氨氮 $\leq 1.5\text{mg/L}$ 、总磷 $\leq 0.3\text{mg/L}$ ），单位能耗降至 0.55kWh/ m^3 以下。

（2）技术方案实施：①工艺升级实施：采用“预处理强化+AAO+MBR+消毒”工艺，拆除原有格栅，

新建2台转鼓格栅(栅距3mm,处理能力800m³/h),增设1座旋流沉砂池(直径3m)和1座调节池(5000m³);将原有3座A/O池改造为AAO池,每座池增设内回流泵(流量1000m³/h),厌氧区增设搅拌器,控制DO≤0.2mg/L;新建2组MBR膜池(单组处理规模1万m³/d),选用PVDF膜组件(总面积20000m²),配套在线清洗系统;在MBR出水端增设PAC投加系统(投加量30-50mg/L)和紫外消毒设备(剂量≥20mJ/cm²)。②模块化扩容实施:采用3套生化模块和2套MBR模块,利用厂区西北侧空地搭建钢结构平台,上层布置MBR模块,下层布置生化模块,占地面积仅1200m²,较传统扩建节约用地60%。施工周期6个月,其中模块化吊装仅用25天,施工期间处理能力保持3万m³/d以上。③污泥处置与智能系统实施:污泥系统新建1座离心浓缩机和2台高压板框压滤机,配套太阳能干化棚,污泥含水率从85%降至55%;智能系统安装12套在线监测仪,接入市级调度平台,实现DO、回流比等参数自动调节。

(3)实施效果验证:升级后连续6个月监测数据显示:进水COD均值从180mg/L提升至280mg/L,出水COD稳定在25-35mg/L,氨氮≤1.2mg/L,总磷≤0.25mg/L,均优于一级A标准,汛期无一次超标,对清江流域氨氮负荷贡献下降50%。处理能力稳定达到5万m³/d,负荷率85%,较改造前提升66.7%;能耗降低单位处理能耗从0.68kWh/m³降至0.52kWh/m³,年节约电费120万元;年处理污泥4000吨,含水率55%,全部协同焚烧利用,年节约处置成本400万元。工程总投资2.8亿元,投资强度5600元/m³(较传统扩建低20%),投资回收期12年;年减少COD排放1200吨、氨氮150吨、总磷20吨,清江干流对应断面水质从IV类稳定提升至III类。

5 技术路径实施成效与优化方向

(1)总体实施成效:3座主力厂升级完成后,总规模从15万m³/d提升至25万m³/d,污水收集率从

68%提升至92%,覆盖服务人口65万人,彻底消除汛期溢流;出水COD、氨氮、总磷均值分别为32mg/L、1.1mg/L、0.22mg/L,均优于一级A标准,清江干流恩施段III类水质达标率从85%提升至100%;单位处理能耗降至0.52kWh/m³,污泥含水率≤60%,资源化利用率100%,年节约运行成本860万元。

(2)技术路径创新点:针对不同负荷厂采用差异化工艺,解决传统“一刀切”适配性差问题,高负荷厂抗冲击能力提升60%;实现“边运行边施工”,工期缩短40%,节约用地30%,适配山区用地紧张特点;通过智能平台联动管网与厂区,进水浓度稳定性提升75%,工艺调整响应时间从2小时缩短至30分钟。

(3)优化方向:在MBR系统引入光伏供电,进一步降低能耗;在厌氧区强化沼气回收,配套沼气燃料电池发电,提升能源自给率;引入AI视觉监测系统,实时监测曝气气泡、污泥沉降状态,实现工艺参数“预测式调控”;探索污水中磷资源回收技术(采用鸟粪石结晶法),年回收磷酸铵镁约50吨,实现“污水资源化”升级;将模块化技术推广至乡镇小型厂,构建“市区大型厂+乡镇小型模块厂”的城乡污水处理体系,实现全域水质改善。

6 结论

基于水质改善目标的恩施污水处理厂扩容升级,核心在于破解山区“水质波动大、用地受限、厂网脱节”三大难题。本文构建的“四位一体”技术路径通过分质施策的工艺升级,实现不同负荷厂水质稳定达标;模块化扩容,解决山区用地紧张与工期约束;污泥资源化处置,降低环境风险与运行成本;厂网协同智能化,提升进水稳定性与工艺调控精度。工程实践表明,该路径可实现处理能力提升66.7%、出水达标率100%、能耗下降23%,清江流域水质显著改善。研究成果为生态敏感区、山区污水处理厂扩容升级提供了技术范式,未来通过低碳化、智能化升级,可进一步提升设施效能。

参考文献:

- [1] 晋玉亮,杜立新,王淑红.某污水处理厂多模式A2/O扩容改造及运行效果分析[J].广东化工,2025,52(20):73-75+91.
- [2] 付益乐,余江培,黄在辉,等.南方某污水处理厂MBBR工艺改造效果分析[J].净水技术,2025,44(10):100-107+187.
- [3] 仇模凯,陈帅宏,王娜.某低碳氮比城镇污水处理厂提标扩容工程设计实例[J].中国市政工程,2025,(03):86-90+187.
- [4] 王瀚起.城镇污水处理厂扩容工程设计与工艺优化研究[J].现代工程科技,2025,4(16):9-12.
- [5] 李相继.污水处理厂原位技术改造扩容的设计实例[J/OL].环境工程,1-12[2025-11-02].