

基于深度处理工艺的污水厂污水处理与提质增效研究

文 / 左 朋 中国水利水电第十四工程局有限公司
 吴新龙 中国水利水电第十四工程局有限公司
 马海容 中国水利水电第十四工程局有限公司
 冯 信 中国水利水电第十四工程局有限公司

摘要：城镇污水排放标准日益严格，常规二级生物处理难以满足高标准水质要求，深度处理工艺成为污水厂提质增效的关键技术路径。本研究系统分析了物理、化学、生物三类深度处理工艺的作用机理与技术特征，探讨了工艺选择、参数优化、效果评估等应用关键环节，提出了强化协同处理、降低能耗成本、增强系统稳定性的综合策略，以期为污水厂升级改造提供技术支撑。

关键词： 深度处理工艺；污水处理厂；提质增效；工艺组合；运行优化

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.120

引言

水环境质量改善对污水处理行业提出更高要求，许多污水厂面临出水标准升级的现实压力。传统活性污泥法等二级处理技术在去除有机物、氮磷等方面存在效能瓶颈，难以将出水水质稳定控制在一级A标准甚至地表水准IV类标准。深度处理工艺作为常规处理的延伸与强化，能够针对性去除残余污染物，提升出水品质。本文聚焦深度处理工艺的技术原理与实践应用，探索污水厂提质增效的有效路径，为行业技术进步提供参考依据。

一、污水厂污水处理现状与问题分析

国内多数污水厂采用“预处理—生化处理—二沉池”的常规工艺流程，依靠微生物代谢降解污染物^[1]。老旧污水厂设计标准偏低，设备老化严重，实际处理负荷超出设计容量，处理效果波动较大，同时进水水质复杂多变，工业废水混入、管网雨污混流加剧处理难度，常规工艺应对的能力相对有限。

此外，深度处理设施配置不足制约了出水水质提升。许多污水厂缺乏针对性深度处理单元，出水仅达一级B标准，无法满足受纳水体环境容量要求。新兴污染物如抗生素、内分泌干扰物、微塑料在常规处理中去除率低，对生态环境构成一定的潜在威胁，因此污水厂需引入高效深度处理技术解决水质达标难题。

二、深度处理工艺类型与特点

（一）物理深度处理工艺

物理深度处理利用过滤、吸附、膜分离等物理作用去除污染物。纤维滤池采用纤维束滤料，孔隙率高、过滤精度可调，有效截留细小悬浮颗粒，出水SS可降至5mg/L以下。膜过滤技术包括微滤、超滤、纳滤、反渗透，根据膜孔径实现不同分离程度，超滤膜去除细菌、病毒及大分子有机物，纳滤膜截留二价离子、小分子有机物效果较好。物理处理操作简便，不产生二次污染，但滤料或膜组件易堵塞，再生成本较高，对溶解性污染物去除有限，需定期反冲洗或更换材料。

（二）化学深度处理工艺

化学深度处理利用化学反应改变污染物形态或分解污染物分子。化学沉淀法投加石灰、铁盐、铝盐等药剂，与重金属离子、磷酸盐形成难溶沉淀物，沉降分离后实现去除，对磷去除率可达90%以上。高级氧化技术基于强氧化性自由基生成与反应，芬顿氧化利用Fe²⁺催化H₂O₂分解产生羟基自由基，快速氧化难降解有机物，对色度、COD削减效果显著^[2]。臭氧氧化借助臭氧分子及其分解产生的自由基破坏有机物分子结构，提高生物可降解性，同时具有杀菌消毒作用。

（三）生物深度处理工艺

生物深度处理通过优化微生物生长环境与代谢条件强化污染物去除能力。生物膜法采用固定填料为微生物提供附着载体，形成稳定生物膜层，相比悬浮生长系统污泥龄长、抗冲击能力强、占地面积小，曝气生物滤池、移动床生物膜反应器在深度脱氮除磷方面表现优异。人工湿地模拟自然湿地生态系统，植物根系、填料基质、微生物协同作用，吸收、吸附、降解多种污染物，同时具有景观美化与生态修复功能。

三、深度处理工艺在污水厂的应用研究

（一）工艺选择与组合优化

深度处理工艺选型需综合考虑进水水质特征、出水标准要求、场地条件、投资预算等多方面因素。高浓度有机废水宜优先选用高级氧化技术或生物膜法强化降解，氮磷超标水体适合采用化学沉淀或生物脱氮除磷工艺，在悬浮物偏高情况下过滤技术效果显著。不同污染物的理化性质差异决定了单一工艺难以全面满足处理需求，需要根据各工艺的作用机制与适用范围，科学匹配处理单元^[3]。沿海地区污水厂常采用“混凝沉淀+过滤+消毒”组合工艺，北方寒冷地区倾向于“高效沉淀+臭氧接触+活性炭吸附”的技术路线，南方湿润地区可结合人工湿地实现生态化处理。

多种工艺组合能够发挥协同增效作用，弥补单一技术的不足。“混凝+过滤+膜分离”组合工艺中，混凝

预处理降低后续膜通量衰减速率，过滤进一步保护膜组件，膜分离实现高标准水质净化，整体系统稳定性与经济性得到优化。“臭氧氧化+曝气生物滤池”组合利用臭氧提高有机物可生化性，生物滤池深度降解氧化产物，减少臭氧投加量与化学污泥产生量。“化学沉淀+活性

炭吸附”组合先去除大部分磷酸盐与悬浮物，延长活性炭使用寿命，活性炭吸附残余有机物与色度，确保出水水质稳定达标。工艺组合需要统筹考虑各单元的衔接匹配，避免前后工艺相互干扰或重复处理，实现全流程最优配置。

表 1 不同深度处理工艺组合方案对比

组合方案	主要去除对象	出水水质	占地面积	运行成本	适用场景
混凝+过滤+消毒	SS、TP、部分 COD	一级 A 标准	较小	中等	常规提标改造
臭氧氧化+曝气生物滤池	难降解有机物、色度	准地表Ⅳ类	中等	较高	高标准出水要求
膜生物反应器+纳滤	全部污染物	地表Ⅲ类	小	高	水质回用项目
化学沉淀+活性炭吸附	TP、COD、微量污染物	一级 A 标准	中等	中等	磷超标水体治理
人工湿地+稳定塘	氮磷、有机物	一级 B 标准	大	低	小城镇污水处理

(二) 运行参数优化

各深度处理工艺存在最佳运行条件区间，参数偏离适宜范围将导致处理效率下降或能耗增加。混凝沉淀工艺中，pH 值直接影响混凝剂的水解形态与絮凝效果，铝盐混凝最佳 pH 范围为 6.5-7.5，铁盐适用 pH 范围更宽，为 5.0-9.0，投加量需根据进水浊度、碱度动态调整，过量投加增加药剂成本与污泥产量，不足则导致出水水质恶化。芬顿氧化反应最适 pH 为 3.0 左右，H₂O₂ 与 Fe²⁺ 摩尔比通常控制在 3:1-10:1，反应温度升高加快氧化速率但增加能耗，停留时间过短反应不完全，过长则经济性下降^[4]。臭氧投加量与接触时间需匹配污染物浓度，一般臭氧投加量为 5~20mg/L，接触时间 10~30 分钟，投加过量造成资源浪费，不足则难以达到预期效果。

生物膜法工艺的温度、溶解氧、水力停留时间、污泥负荷等参数协同影响处理效果。曝气生物滤池适宜温度为 15-30℃，溶解氧维持在 2~4mg/L，水力停留时间 1~3 小时，滤速控制在 5~10m/h，参数优化能够提高氨氮去除率并降低能耗。活性炭吸附受空床接触时间、碳层厚度、滤速影响，空床接触时间一般为 15~30 分钟，碳层厚度 1.5~2.5 米，滤速 8~12m/h，过快的滤速缩短吸附时间，降低去除效率。参数优化需结合实际工程开展中试试验或数值模拟，建立参数与效果的定量关系，制定精细化运行策略，平衡处理效果与经济成本。

(三) 处理效果评估

深度处理工艺对常规污染物指标具有显著改善作用，经过合理设计与运行的深度处理系统能够将出水 COD 降至 30mg/L 以下，氨氮降至 1.5mg/L 以下，总磷降至 0.3mg/L 以下，达到一级 A 标准甚至更高要求。某污水厂采用“高效沉淀+滤布滤池+紫外消毒”深度处理工艺，出水 COD、氨氮、总磷分别降至 25mg/L、0.8mg/L、0.2mg/L。不同工艺对各类污染物的去除能力存在差异，膜技术

对悬浮物、细菌、病毒截留效果最佳，高级氧化对难降解有机物、色度去除优势明显，生物处理对氮磷削减能力突出。

新兴污染物的去除成为深度处理工艺评估的重要维度。抗生素、激素类物质、药物及个人护理品等微量有机污染物在常规处理中难以有效去除，部分物质具有生物累积性与内分泌干扰效应。臭氧氧化对抗生素去除率可达 70%~90%，羟基自由基攻击抗生素分子活性基团，破坏其化学结构。微塑料在深度处理单元中的去除主要依靠物理截留，膜过滤技术对粒径大于膜孔径的微塑料截留率接近 100%，但对纳米级微塑料去除效果有限。

四、基于深度处理工艺的提质增效策略

(一) 提升处理效率策略

深度处理各工艺单元并非孤立运行，前序处理效果直接影响后续单元的负荷与效能，强化单元间的协同作用能够提升整体处理效率。混凝沉淀去除大部分悬浮物与胶体后，降低过滤单元的截污负荷，延长反冲洗周期，减少滤料损耗。臭氧氧化破坏难降解有机物的分子结构，提高生物可降解性，为后续生物滤池创造有利条件，缩短生物降解时间，提高单位体积处理能力。生物处理出水经过深度氧化或吸附，进一步削减残余有机物与氨氮，确保出水水质稳定达标，避免前序处理波动对最终水质的影响。

新型材料与技术的应用为污染物去除率提升提供新途径。纳米材料因比表面积大、表面活性高，在吸附、催化氧化方面展现出优异性能，纳米零价铁对重金属、氯代有机物具有强还原能力，纳米 TiO₂ 光催化降解有机污染物效率高。改性活性炭通过酸碱处理、金属负载、表面官能团调控，增强对特定污染物的选择性吸附，提高吸附容量与再生性能。新型膜材料如陶瓷膜、复合膜，抗污染能力强，化学稳定性好，使用寿命长，降低膜更换频率与运维成本。

(二) 降低运行成本策略

能源消耗是深度处理运行成本的主要构成部分，节能降耗直接提升经济效益。污水处理过程产生的沼气、污泥等副产物蕴含能量，沼气发电回收利用厌氧消化产生的甲烷，每立方米沼气发电量约 1.8-2.0kWh，部分满足污水厂自身电力需求，降低外购电量。污泥焚烧产生的热能用于污泥干化，减少燃料消耗，实现能量自给。余热回收利用二沉池、生化池等构筑物热量，冬季预热进水，提高低温条件下的生物活性，夏季冷却出水，降低水体热污染。精准曝气控制根据溶解氧实时监测数据，动态调节曝气量，避免过度曝气造成的能源浪费，溶解氧控制在 1.5 ~ 2.5mg/L 范围内既能满足微生物需氧要求，又能显著降低曝气能耗。变频调速技术应用于水泵、风机等动力设备，根据流量、压力需求自动调节转速，相比恒速运行节能 20% ~ 40%。

药剂费用在化学深度处理中占比较高，优化投加量与投加方式能够有效控制成本。在线监测与自动加药系统根据进水水质、处理负荷实时调整混凝剂、氧化剂、pH 调节剂投加量，避免经验投加导致的浪费或不足，投加精度提高至 ±5% 以内。分段投加、多点投加策略使药剂与污染物充分接触反应，提高利用效率，混凝剂分段投加相比一次性投加总量可减少 10% ~ 15%。低成本替代药剂的开发应用降低采购费用，聚合氯化铝铁替代聚合氯化铝，絮凝效果相当但价格降低约 20%，过氧化钙缓释氧化剂替代双氧水，持续释放活性氧，减少投加频次。药剂储存与投加设施的防腐、防泄漏措施减少损耗与环境风险，定期校准计量泵确保投加准确性。污泥减量技术减少污泥产生量与处置费用，污泥深度脱水将含水率降至 60% 以下，减少运输与填埋成本，污泥厌氧消化降解有机质，减量 30% ~ 50%，同时产生沼气实现资源化利用。

(三) 增强抗冲击负荷能力策略

污水厂进水水质水量波动频繁，暴雨季节管网溢流导致水量激增，工业废水偷排引起水质突变，节假日生活污水排放规律改变，深度处理系统需要具备应对冲击负荷的能力。应急处理机制包括预警监测、应急响应、恢复调整三个环节，在线监测设备实时跟踪进水 COD、氨氮、pH、重金属等关键指标，超出预设阈值立即触发报警，启动应急预案。应急预案针对不同冲击类型制定处置措施，水量冲击时开启超越管路分流，避免系统过载，水质冲击时投加应急药剂快速絮凝沉淀，或启动备用处理单元分散负荷。恢复调整阶段逐步恢复正常运行参数，评估冲击对微生物活性、填料性能的影响，必要时补充菌种或更换材料。应急处理机制的建立需要配套物资储备、人员培训、演练考核，确保突发情况下快速响应，将影响降至最低。

智能控制系统整合水质监测、工艺控制、设备运行数据，实现了深度处理过程的自动化与智能化管理。数据采集与监控系统 (SCADA) 集中显示各构筑物、设备的运行状态，操作人员远程监控，及时发现异常，减少巡检频次。可编程逻辑控制器 (PLC) 按照预设程序自动控制阀门开关、泵机启停、药剂投加，提高操作精准度与一致性。专家系统基于历史运行数据与工艺机理模型，分析当前运行状态，给出优化建议或自动调整参数，溶解氧浓度偏低时自动增大曝气量，出水总磷超标时增加混凝剂投加量。人工智能算法如神经网络、模糊控制应用于复杂工况的预测与决策，预测未来 24 小时进水水质变化趋势，提前调整工艺参数，提高系统稳定性。智能控制能够有效降低人工操作强度，减少人为失误，提高运行管理水平，是深度处理系统提质增效的重要技术手段。

结语

深度处理工艺是污水厂实现出水水质提升的核心技术保障，物理、化学、生物等多元技术路线为不同水质特征与处理需求提供了灵活选择空间。未来深度处理技术将向高效化、低碳化、智能化方向发展，新兴污染物控制、微量污染物去除、水质安全保障等领域仍需深入研究。污水厂应结合自身特点，因地制宜选择适宜的深度处理技术方案，持续提升水污染治理水平，为水环境质量改善与水资源可持续利用作出更大贡献。

参考文献

[1] 尚兴宝, 颜调云, 王小红. 某低碳氮比污水处理厂 MBBR 氧化沟 + 深度处理工程案例 [J]. 水处理技术, 2024, 50(8): 145-148.
 [2] 张丽, 贾彦武, 崔宁, 等. 复合软性滤料在污水处理厂深度脱氮中的应用 [J]. 给水排水, 2023(S1): 654-658.
 [3] 陈然. 马尾新城污水处理厂深度处理工艺研究 [J]. 福建建设科技, 2023(1): 135-138.
 [4] 安昱宁, 朱四富, 刘静, et al. 基于深度学习的污水处理厂出水总磷预测方法 [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(10).

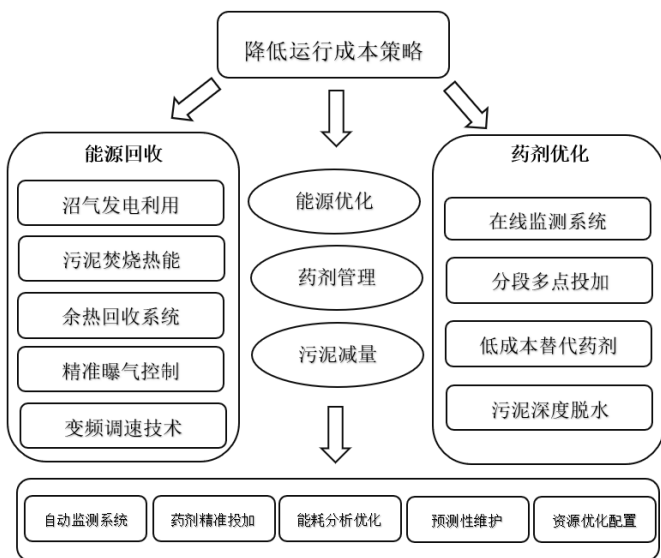


图 1 降低运行成本策略思路