基于低碳运行的污水处理厂工艺优化路径研究

徐毅

四川泸天化麦王汇兴水务有限责任公司，中国·四川 泸州 646100

摘要：在“双碳”目标的拉动之下，污水处理行业有迫切开展低碳转型的需求，本文把研究污水处理厂工艺优化路径作为方向，对典型工艺单元能耗分布以及碳排放特征做系统研究，寻出了现有运行模式的低碳问题；基于精准做好曝气控制、使碳源投加与脱氮除磷实现低碳平衡、联合调整污泥回流比和水力停留时间这三方面，提出多目标协同优化策略；并且对各类主流工艺开展能效比较，评估了厌氧消化以及短程硝化 / 厌氧氨氧化等新兴工艺嵌入能带来的效益。精准曝气能使单位水量电耗的降低程度超过 16%、碳排放强度的降低程度超过 23%；AAO（0.439 kg CO_2/m^3）和氧化沟（0.396 kg CO_2/m^3）的碳排放强度比不上 MSBR 工艺（0.363 kg CO_2/m^3）；厌氧消化可使碳减排率达到 42% 及以上，本文提出囊括精准控制、参数协同、工艺重构这三个层级的低碳运行优化框架，给污水处理厂低碳转型提供技术方面的参考。

关键词：污水处理厂；低碳运行；碳排放核算；工艺优化；碳减排

Study on Process Optimization Paths of Wastewater Treatment Plants Based on Low-Carbon Operation

Xu Yi

Sichuan Lutianhua Maiwang Huixing Water Co., Ltd., China Sichuan Luzhou 646100

Abstract: Driven by the "dual-carbon" goals, the wastewater treatment industry urgently needs to carry out low-carbon transformation. This paper focuses on researching process optimization paths for wastewater treatment plants, systematically studying typical process unit energy consumption distribution and carbon emission characteristics, and identifying low-carbon issues in the current operation modes. Based on three aspects—precisely controlling aeration, balancing carbon source addition with nitrogen and phosphorus removal for low-carbon operation, and jointly adjusting sludge return ratio and hydraulic retention time—a multi-objective coordinated optimization strategy is proposed. Additionally, energy efficiency comparisons of various mainstream processes were conducted, evaluating the benefits brought by embedding emerging processes like anaerobic digestion and shortcut nitrification/anammox. Precise aeration can reduce electricity consumption per unit of water by more than 16% and carbon emission intensity by over 23%. The carbon emission intensity of AAO (0.439 kg CO_2/m^3) and oxidation ditch (0.396 kg CO_2/m^3) is not as favorable as the MSBR process (0.363 kg CO_2/m^3). Anaerobic digestion can achieve a carbon reduction rate of 42% or more. This paper proposes a low-carbon operation optimization framework encompassing three levels: precise control, parameter coordination, and process reconstruction, providing a technical reference for the low-carbon transformation of wastewater treatment plants.

Keywords: Wastewater treatment plant; Low-carbon operation; Carbon accounting; Process optimization; Carbon reduction

0 引言

城镇污水处理厂在去除水污染物的期间，消耗电能和化学药剂，其所消耗的电量占全社会用电量 1% 至 2%，基于“双碳”战略目标，污水处理行业要降低运行能耗以及碳排放强度，如何于达到出水水质标准的情形之中，降低污水处理进程的能耗和碳排放，成为行业所面临的技术难题，本文从能耗特征探究、碳排放核查、工艺参数协同提纯及低碳工艺比勘四个层面，钻研污水处理厂低碳运行的技术路径与执行手段。

1 以低碳运行视角作考量核算污水处理厂能耗特征及碳排放

1.1 典型工艺单元能耗分布与碳源解析

污水处理厂能耗多数集中在由曝气系统、进出水泵站、污泥处理设备所组成的三个单元，陈红芳等[1] 所做的

多座污水处理厂核算数据显示，在污水处理厂总能耗当中，曝气系统能耗占 50% - 70%，传统的那种微孔曝气装置氧转移效率为 12% 至 18%，鼓风机要长时间运作以符合生物池需氧量，风机能耗于全厂电耗中的占比是 55% - 65%，张翔宇等[4] 基于 11 座城镇中小规模污水厂核算所得的数据表明，生物处理单元碳排放对全厂总碳排放的占比是 58.7%。

污水提升泵、回流泵还有搅拌设备也是重要的能耗源头，传统活性污泥工艺所涉及的水力停留时间为 8~12 小时，池体所包含的容积大，回流泵跟搅拌器不断运行，从碳排放构成的相关情况看，间接碳排放于中小规模污水厂总碳排放中的占比是 69.5%，电耗所产生的碳排放占 43.1%[1]。在 AAO - MBR 工艺碳排放这一方面，电力消耗在其中约占 60%；于传统 AAO 工艺当中，微生物代谢造成的直接碳排放（N_2O）也占有一定比例，碳排放强度对于吨水电耗的相关系数（R^2）是 0.94，与吨水药耗所呈现的相关系数（R^2）为 0.91[1]，意味着电耗和药耗是左右碳排放水平的主要因子。

1.2 碳排放核算的边界、方法还有关键影响因子

污水处理厂碳排放核算所采用的方法有排放因子法、实测法、物料平衡法、全生命周期分析法和模型法，排放因子法所需的参数不多、计算流程很明确，在工程实践当中应用范围最广，核算边界从污水处理厂本身逐渐扩大到管网系统、污水处理工作以及污泥处理处置的全过程。

碳排放受主要影响的因素有处理工艺类型、进水水质指标（COD、TN、TP、碳氮比）、运行参数（溶解氧浓度、污泥回流比、水力停留时间）及设备能效等级，李书钺等[3] 对重庆某污水处理厂所做核算结果表明，进水 COD 浓度以及碳氮比对 N_2O 和 CH_4 等直接碳排放有明显影响，进水 TN、BOD_5 与 TP 的浓度对跟电耗、物耗相关的间接碳排放影响十分显著，每除去 1 mg/L 含量的氮，碳排放强度差不多增添 0.014 kg CO_2 每立方米[1]。

1.3 现有工艺运行模式的低碳短板识别

融合能耗分布和碳排放的特征，当前工艺运行模式有三方面低碳不足：

曝气能耗有较大的多余部分，传统曝气系统供气量根据设计峰值负荷来予以设定，鼓风机频率设为固定，或者仅做大概程度的调节，不能及时对进水水质与水量的昼夜、季节波动予以响应，低负荷时候曝气系统还是保持较高功率工作，无效曝气时长占的比例超过 35%，造成电能方面的损耗。

碳源利用的效率不高，我国污水处理厂进水当中碳氮比大多是 4.5~6.0，碳源不足以同时使生物除磷和反硝化脱氮需求达标，好氧区过量曝气致使内回流混合液当中溶解氧浓度高，溶解氧进入缺氧区之后将有机碳源进行消耗，造成了反硝化速率的降低，运营方必须投加乙酸钠、甲醇等外部补充碳源保障脱氮效果，低碳氮比进水的 AAO 污水处理厂研究表明，对运行参数进行调整可缓解碳源不足给脱氮效率造成的抑制。

污泥生产的量比较多，传统活性污泥法的微生物产率系数是比较高的，单位处理水量的污泥产量对比改良型低碳工艺高出约 40%，污泥调理药剂投加、脱水设备运行、污泥转运和最终处置等环节的费用加起来，占污水厂全年运维成本的 32% - 38%。

2 工艺参数多目标协同优化策略

2.1 曝气系统精确指挥与溶解氧动态优解

曝气系统精准控制可采用的基本方法是通过在线传感器监测进水流量、COD、氨氮等指标，融合生物池 DO 浓度与出水水质方面的数据，动态变更风机供气的量，使供氧速度和微生物耗氧速度一致化。

达成曝气节能关键操作参数是对 DO 浓度设定值的优化，鲍任兵等[2] 借助对比试验数据表明，把前置好氧区的 DO 设定到 1.0~1.5 mg/L，后置好氧区 DO 设定到 2.0~2.5 mg/L，原水内碳源利用率有了 20.95% 的提高，反硝化脱氮效率有 5%~14% 的提升，曝气能耗有 2%~6% 的降低。刘萌萌等[5] 于某 10 万 m^3/d 污水处理厂安装了依据进水负荷监测、鼓风机变频调节和曝气阀门开度的三级串联控制智能曝气系统，运行之后的结果是，生物池 DO 浓度均值从 2.16 mg/L 降至 1.56 mg/L，单位水量所消耗的电量下降 16.55%，全厂碳排放强度产生 23.45% 的下降情况。

就控制逻辑的设计而言，能采用基于进水氨氮负荷做前馈、出水氨氮浓度做反馈的双回路控制结构，通过 PID 控制或预测控制算法调节鼓风机导叶的开度以及变频器频率，精准曝气系统开启启用后，DO 浓度的标准差下降，DO 稳定度（D_5）可以达到的范围是 94%~99%[5]。

2.2 碳源投加跟脱氮除磷成果的低碳平衡

碳源投加优化要在不降低脱氮除磷效果的基础上，尽最大可能减少外碳源投加量，控制方向有优化进水碳源的分配以及精确调控外碳源投加量。

在碳源分配相关方面，可通过对进水点作分散布置，把原水碳源优先给到反硝化阶段，鲍任兵等[2] 对五段 Bardenpho 工艺以及多级 AO 工艺运行数据做分析，两种

工艺采用分段进水以及碳源梯级使用，使总体碳排放强度分别下降到 0.229 kg CO_2/m^3 和 0.211 kg CO_2/m^3。

在应对碳源投加量控制相关方面，通过把硝酸盐氮在线分析仪装在缺氧段入口，依据硝酸盐氮浓度信号对碳源投加泵频率加以调节，该措施把缺氧区的 DO 从 0.56 mg/L 降低到 0.36 mg/L，外加碳源投加量有着 23% 的减少[3]。要是内回流比由 200% 增至 300% 时，回流混合液带入到缺氧区的溶解氧量增大，厌氧池以外碳源投加量自 948 kg/d 增加到 1185 kg/d；反硝化除磷脱氮率也升至 59.4%，于实际操作中要按照进水硝酸盐氮浓度动态调节内回流比设定值，以防外碳源过度消耗。

2.3 污泥回流比跟水力停留时间的联合改善机制

污泥回流比和污泥龄的确定给生物池污泥浓度和微生物总量带来影响，两者要一同确定，张翔宇等[4] 对氧化沟工艺所做监测数据表明，把污泥回流比规定为 50%、污泥龄控制在 20 天的时候，系统有着较高的脱氮效率。

生物池有效容积和进水流量对水力停留时间起决定作用，传统活性污泥工艺有着 8~12 小时的水力停留时间，池体有着较大的容积，推流器以及回流泵能耗较大，在出水水质达要求的基础上缩短水力停留时间，可以降低设备运作功率以及电耗。

联合调节的操作方法为：根据进水流量以及 COD 负荷的波动，调节污泥回流比大小，维持生物池内污泥浓度在设定范围；当进水的负荷降低的时候，降低回流比以降低回流泵运行的台数或者频率；当进水碳氮的比例数值较低，让回流比增大来增多生物池内生物量，伸延污泥龄来强化反硝化进程发生。

3 得益于低碳驱动的工艺路线比选和组合再形成

3.1 主流低碳工艺的能效对比

不同处理工艺所产生的单位处理水量碳排放强度有区别，陈红芳等[1] 核算 8 座污水处理厂碳排放数据然后进行排序，碳排放强度以从低到高的次序是：氧化沟系统、AAO 系统、AAO+MBR 系统、BAF 系统，张翔宇等[4] 根据 11 座城镇中小规模污水厂的数据进一步做量化：MSBR 工艺所产生的碳排放强度为（0.363 ± 0.007）kg/m^3，AAO 工艺得到的结果是（0.439 ± 0.099）kg/m^3，氧化沟工艺的数值是（0.396 ± 0.025）kg/m^3，鲍任兵等[2] 核算得到的结果显示，AAO 基污水处理厂平均每立方米污水碳排放是 0.47 kg CO_2eq，AAO − MBR 相关的污水厂为 0.79 kg CO_2eq/m^3。

从单位能耗相关方面，张翔宇等[4] 统计的相关数据显示，AAO 工艺单位能耗的加权平均量是（0.294 ± 0.201）kWh/m^3，氧化沟工艺所具有的能耗是（0.292 ± 0.192）kWh/m^3，生物处理单元碳排放于中小规模污水厂总碳排放中的占比是 58.7%，AAO 工艺生物处理单元所产生的碳排放占全厂总排放的 51.5%，MSBR 工艺所占比例是 53.9%，氧化沟工艺在其中占 73.1%[4]。

MSBR 和氧化沟工艺所产生的碳排放强度较低，但具体工艺选型要把进水水质指标、设计处理规模、用地面积、出水水质标准加以综合来确定，当面临出水总氮和总磷标准较严的场景，AAO+MBR 工艺碳排放强度较常规工艺而言更高，但该工艺出水水质稳定、占地的面积小这一技术特征在用地有限的项目中有应用价值。

3.2 厌氧消化跟沼气回收利用工艺所带来的嵌入效益

污泥厌氧消化的基本流程为：污泥经浓缩、预热之后送入厌氧消化罐，处在 35 到 38℃中温环境之下停留 20 到 30 天，有机物发生转化成了沼气（CH_4 体积分数约 60%~65%，CO_2 大约占 35% 至 40% 的比例），沼气在脱硫净化以后被送入燃气发电机或锅炉，产生的电力、热能回供到污水处理厂。

陈红芳等[1] 选取有着 20×10^4 m^3/d 处理规模的污水厂作为核算对象，在开展污泥厌氧消化、沼气发电、锅炉供热和消化沼渣土地利用实践后，全厂达成的碳减排比例是 42.28%，能源中和率上扬到 37.72%，厌氧消化工艺经回收沼气中的化学能而替代外购电力和化石燃料，同时减少了污泥外运进行填埋或焚烧这一过程里的碳排放。

3.3 对短程硝化 / 厌氧氨氧化等新兴工艺适用性作出评估

短程硝化 / 厌氧氨氧化（PN/A）工艺基本原理是对氨氮氧化实现在亚硝酸盐阶段的控制（短程硝化），之后由厌氧氨氧化菌把亚硝酸盐作为电子受体，直接氧化氨氮为氮气，同传统硝化 − 反硝化工艺作比较，PN/A 工艺省掉了使亚硝酸盐继续氧化成硝酸盐的步骤和后续反硝化对碳源的需求。

鲍任兵等[2] 对 PN/A 工艺跟传统工艺的能耗数据进行对比研究，PN/A 工艺曝气能耗较传统硝化 − 反硝化工艺降低的幅度为 20%~60%，且没有投加外碳源的需求，化学除磷用到的药剂用量相应减低。

PN/A 工艺工程化应用被下面技术条件所抑制：当冬季来临城市污水水温在 15℃以下，亚硝酸盐氧化菌活性被

抑制的作用效果减弱，亚硝酸盐积累的比率下滑；城市污水内氨氮浓度是比较低的数值（30~60 mg/L），厌氧氨氧化菌的生长速度比较慢，系统启动的整个周期较长；要是进水 COD 浓度比较高时，异养菌于与厌氧氨氧化菌的底物竞争里占得优势，目前情况下，PN/A 工艺比较适用于高氨氮工业废水的处理方面，以及南方地区大中型城市污水处理厂的提标改造，在寒冷地区、低碳氮比城市污水处理的应用要开展进一步研究。

4 结论与展望

本文从能耗特征审视、碳排放核算、工艺参数协同选良及低碳工艺化选四个层面，开展了对污水处理厂低碳运行技术优化路径的研究，主要的结论如下：

（1）曝气系统在全厂能耗所占的比例是 50%~70%，是能耗占比呈最高的单元，凭借装设在线监测仪表以及变频控制装置，使 DO 浓度处在合理的范围，单位水量电耗会有 16% 以上的下降，碳排放强度能有 23% 以上的降幅。

（2）碳源投加量跟脱氮除磷效率是相关的，凭借多点进水以及基于硝酸盐氮浓度的碳源投加闭环控制举措，外碳源单耗可以降低 32% 及以上。

（3）六种常用工艺的碳排放强度以从低到高顺序依次是：MSBR（所呈现的碳排放强度为 0.363 kg CO_2/m^3）、氧化沟（所呈现的碳排放强度为 0.396 kg CO_2/m^3）、AAO（所呈现的碳排放强度为 0.439 kg CO_2/m^3）、AAO－MBR（所呈现的碳排放强度为 0.79 kg CO_2/m^3）。

（4）污泥厌氧消化跟沼气热电联产的组合可让全厂碳排放削减 42% 以上，与传统工艺作比较，PN/A 工艺曝气能耗降低 20%~60%，但它可适用的条件被水温和氨氮浓度约束。

工程应用建议：新建污水处理厂于设计时要把碳排放强度作为工艺比选的内容；已建污水处理厂开展低碳化改造，应将曝气系统自动化升级作为优先事项，一并添设碳源投加闭环控制的回路；处理规模为 10×10^4 m^3/d 以上、污泥有机质含量比较高的污水厂，能建设厌氧消化及沼气利用的设施。

参考文献：

[1] 陈红芳，贺珊珊，马民等. 污水厂碳排放影响因素及碳中和潜力分析[J]. 净水技术，2025,44(4):98-107+158.

[2] 鲍任兵，邹磊，熊琳等. 高效低碳污水生物脱氮工艺与碳排放分析[J]. 净水技术，2025,44(11):98-107.

[3] 李书钺，邓艾欣，马念等. 重庆某污水处理厂碳排放核算及减碳路径探究[J]. 净水技术，2025,44(6):116-124.

[4] 张翔宇，范业弘，朱晗彬等. 城镇中小规模污水处理厂碳排放分析及碳削减对策[J]. 环境科学，2025,46(1):107-117.

[5] 刘萌萌，刘雪洁，田宇心等. 基于辅助模块的污水处理厂智能曝气控制系统节能降碳效果研究[J]. 给水排水，2025,61(4):42-49.

作者简介：徐毅（1983.06-），男，汉族，重庆大足人，本科，环境工程，助理工程师，论文研究方向（具体关键词）：环境工程污水处理。