

基于碳氮比调控的酿酒废水作为外加碳源强化乡镇生活污水生物脱氮研究

张培宏

四川泸天化麦王汇兴水务有限责任公司

DOI:10.32629/eep.v9i7.3256

[摘要] 乡镇生活污水碳氮比(C/N)普遍偏低,导致生物脱氮过程因碳源不足而效率低下,传统外加商品碳源成本高昂。本研究以酿酒废水为替代碳源,基于C/N动态调控策略,系统考察其强化生物脱氮的可行性与调控方法。通过对比不同投加点位的处理效果,建立基于进水水质波动的C/N实时调控方法,分析碳源投加对污泥产率及除磷药耗的综合影响,并提出季节性断供风险应对策略。结果表明,酿酒废水COD浓度高达30000~45000 mg/L, $BOD_5/COD > 0.55$,可生化性优良;格栅渠后端投加较缺氧池前端投加具有更强的抗冲击负荷能力,出水总氮可稳定控制在4.75 mg/L左右;投加后除磷药耗下降40%以上,但污泥产率增加约15%~25%。通过建立“酿酒废水为主、商品碳源为辅”的柔性切换机制可有效应对季节性断供。本研究为酿酒产业集中区域乡镇污水处理厂的低成本脱氮提标提供了理论依据与技术参考。

[关键词] 酿酒废水; 外加碳源; 碳氮比调控; 生物脱氮; 乡镇生活污水

中图分类号: X797 文献标识码: A

Enhanced Biological Nitrogen Removal from Rural Domestic Wastewater Using Brewery Wastewater as an External Carbon Source Based on C/N Ratio Regulation

Peihong Zhang

Sichuan Lutianhua Maiwang Huixing Water Co., Ltd.

[Abstract] The carbon-to-nitrogen (C/N) ratio of rural domestic wastewater is generally low, resulting in inefficient biological nitrogen removal due to insufficient carbon supply, while conventional external commercial carbon sources are costly. In this study, brewery wastewater was employed as an alternative carbon source, and the feasibility and regulatory approach for enhancing biological nitrogen removal were systematically investigated based on a C/N dynamic regulation strategy. By comparing the treatment performance at different dosing points, a real-time C/N regulation method was established according to fluctuations in influent water quality. The combined effects of carbon source dosing on sludge yield and phosphorus removal chemical consumption were analyzed, and a strategy to cope with seasonal supply disruption risks was proposed. The results showed that the COD concentration of brewery wastewater reached 30,000–45,000 mg/L, with a BOD_5/COD ratio greater than 0.55, indicating excellent biodegradability. Dosing at the rear end of the grit channel exhibited stronger shock-load resistance than dosing at the front end of the anoxic tank, and the effluent total nitrogen could be stably controlled at approximately 4.75 mg/L. After dosing, phosphorus removal chemical consumption decreased by over 40%, while sludge yield increased by about 15%–25%. A flexible switching mechanism prioritizing brewery wastewater supplemented by commercial carbon sources was established to effectively mitigate seasonal supply interruptions. This study provides a theoretical basis and technical reference for low-cost nitrogen removal upgrading of rural wastewater treatment plants in regions with concentrated brewery industries.

[Key words] brewery wastewater; external carbon source; C/N ratio regulation; biological nitrogen removal; rural domestic wastewater

引言

我国乡镇生活污水普遍存在碳氮比(C/N)偏低的问题。受居民用水习惯、排水管网收集率低及雨污分流不完善等因素影响,乡镇污水处理厂进水C/N值通常仅为3~4,远低于生物脱氮所需的理论值(一般认为C/N≥5方可保证较充分的反硝化)。反硝化过程中电子供体严重不足,直接导致出水总氮难以稳定达标,这已成为制约乡镇污水处理厂提标改造的关键瓶颈。

工程实践中,为弥补碳源不足,常投加乙酸钠、葡萄糖、甲醇等商品碳源。其中乙酸钠反硝化速率快、利用效率高,但价格昂贵;葡萄糖成本相对较低,但易导致异养菌过度增殖、污泥产率升高^[1]。总体而言,商品碳源的采购成本占污水厂直接运行成本的相当比例,加重了厂站的经济负担。近年来,利用工业有机废水作为替代碳源的研究逐渐增多。酿酒废水(包括白酒、啤酒等酿造过程产生的废水)有机物浓度高,COD可达数万毫克每升,且可生化性好,具备作为外加碳源的天然条件^[2]。将酿酒废水投加至生活污水处理系统,既可补充反硝化所需碳源,又可实现酿酒废水的协同处置,符合“以废治废”的循环经济理念。

然而,酿酒废水作为外加碳源在实际应用中仍面临若干技术问题:不同批次废水浓度差异大、投加量难以精准控制;投加点位选择对处理效果和系统稳定性影响显著;进水水质波动下C/N如何动态调控尚缺乏系统研究;碳源投加对污泥产率、除磷效果及运行成本的综合影响有待深入评估。本研究围绕上述问题,以碳氮比调控为主线,系统开展酿酒废水强化乡镇生活污水生物脱氮的中试研究,旨在为酿酒废水替代传统碳源的技术推广提供科学依据与运行指导。

1 材料与方法

1.1 试验污水与酿酒废水水质特征

试验污水取自某乡镇污水处理厂进水,该厂采用A²/O-MBR工艺,设计处理规模3500 m³/d。试验期间进水水质为:COD 120~180 mg/L, BOD₅ 60~100 mg/L, 总氮40~60 mg/L, 总磷3~6 mg/L, C/N(COD/TN)约为3~4,属典型低碳氮比污水。

酿酒废水取自本地酿酒企业,本研究所用为未经稀释的高浓度酿造废水,主要来源于发酵、蒸馏及清洗工序。水质特征为:COD 30000~45000 mg/L, BOD₅ 18000~28000 mg/L, BOD₅/COD比值0.55~0.65,可生化性优良。pH值4.5~6.5, SS 2000~5000 mg/L,不同批次浓度波动较大,需在储存池中充分均质后投加。

1.2 中试工艺与碳源投加方案

试验设置空白对照时段(不投加酿酒废水,仅依靠原水碳源运行)以评估碳源投加的净增益效果。同时设置两个投加点位进行对比:(1)缺氧池1段前端(水下2.5 m处);(2)格栅渠后端(与原水混合后进入后续处理单元)。

酿酒废水日投加量依据进水TN、COD及目标C/N动态计算:

$$V_d = Q \times \frac{(TN_{inf} \times R_{CN} - COD_{inf} \times 0.6)}{C_{waste} \times 0.6}$$

式中: V_d 为日投加量(m³/d); Q 为日处理水量(m³/d); TN_{inf} 为进水总氮浓度(mg/L); R_{CN} 为目标C/N; COD_{inf} 为进水COD(mg/L); C_{waste} 为酿酒废水 COD(mg/L); 0.6为根据本试验进水及酿酒废水COD/BOD₅实测均值所取的经验折算系数。缺氧池前端投加控制C/N=5:1~7:1,格栅渠后端控制C/N=5:1~10:1(经前期小试确定)。

1.3 检测项目与数据核算方法

水样采集与检测参照《水和废水监测分析方法》(第4版)^[3]执行,测定COD、BOD₅、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP等指标。同步记录PAC投加量、污泥产量、曝气电耗等运行参数。TN去除率=(进水TN-出水TN)/进水TN×100%。

2 酿酒废水碳源特性与脱氮效能对比

2.1 酿酒废水有机组分特征与可生化性评价

酿酒废水有机物浓度高,主要含有残留糖类、醇类、有机酸、酯类及蛋白质等。其BOD₅/COD稳定在0.55以上,远高于一般工业废水(通常<0.3),表明有机物以易生物降解成分为主。这一特性使其作为反硝化碳源时,有机碳可被反硝化菌快速利用,为反硝化过程提供充足的电子供体。唐欣等^[4]研究表明,以酿酒废水为碳源构建的生物脱氮系统在最佳运行条件下(容积负荷0.111 kgCOD/(m³·d)、溶解氧1~2 mg/L)可实现对低碳氮比生活污水的高效脱氮,反硝化速率可达1.85~2.60 mgNO₃⁻-N/(gVSS·h)。

此外,酿酒废水的碳氮比极高(COD/TN通常大于200),作为外加碳源时主要补充的是碳组分,而不会显著增加系统的氮负荷。这一特点使其区别于食品加工废水、造纸废水等其他类型的工业有机废水^[2],在作为碳源应用时具有先天优势——投加后系统总氮负荷的增加量可忽略不计,脱氮效果提升完全来自反硝化过程的碳源补充。

2.2 不同投加点位脱氮效果对比

缺氧池前端投加:酿酒废水直接投加至缺氧池前端,反硝化菌可优先利用外加碳源。试验期间出水TN可控制在8~10 mg/L, TN去除率可达71.5%~91.8%(其中91.8%为最佳工况下的上限值,稳定运行期间典型去除率约83%)。缺氧段硝酸盐氮沿程下降明显,反硝化反应充分。生物除磷效率大于80%,PAC投加量较空白时段下降约43%。然而,该点位对进水水质水量波动较敏感,进水COD骤降或水量骤增时若投加量未及时调整,易造成碳源不足(脱氮不彻底)或过量(出水COD升高)。

格栅渠后端投加:酿酒废水在格栅渠后端与原水充分混合后进入系统,碳源分布更均匀。该模式下出水TN平均为4.75 mg/L,最低可达2.09 mg/L,稳定性显著优于缺氧池前端投加。膜产水TP约0.38 mg/L,满足排放标准。格栅渠投加模式管控难度更低,对进水波动的缓冲能力更强,更适配乡镇污水处理厂运维实际。但该点位会造成进水在线监测取样点COD浓度抬升,需调整取样位置或对监测数据进行合理修正。

综合对比,格栅渠后端投加在系统稳定性和出水水质方面均优于缺氧池前端投加。熊子康等^[1]综述外加碳源研究进展时亦指出,碳源投加点位选择需综合考虑系统水力停留时间分配

和微生物竞争关系, 预处理段投加通常更利于碳源的均匀分布与利用。

3 碳氮比动态调控策略与运行响应特征

3.1 进水水质波动下的碳氮比调控对策

乡镇生活污水受降雨、居民生活规律等因素影响, 进水水质水量波动频繁。本试验期间, 进水COD日间波动范围为120~180 mg/L, 极端降雨条件下可低至60 mg/L或高至250 mg/L; 进水TN波动范围为40~60 mg/L。雨季初期雨水携带大量地面冲刷污染物, COD和TN均可能骤升; 而持续降雨则对进水产生稀释效应, COD大幅下降。这种波动对基于C/N调控的碳源投加系统提出了较高要求。

本研究建立了基于实时进水水质的C/N动态调控方法: (1) 在线监测进水COD和TN浓度, 每2小时更新一次数据; (2) 根据实测值动态计算当日酿酒废水投加量; (3) 设置C/N调控上下限(缺氧池模式5:1~7:1, 格栅渠模式5:1~10:1), 避免过度投加或投加不足。实际运行中, 当进水COD由均值150 mg/L降至100 mg/L时(降幅33%), 按公式计算需将酿酒废水投加量提高约50%方可维持相同目标C/N; 反之, 当进水COD升至200 mg/L时, 投加量可降低约40%。

雨季运行策略: 初期雨水阶段进水有机物浓度较高, 应适当降低酿酒废水投加量(建议降低正常投加量的30%~50%), 防止有机负荷冲击导致好氧池溶解氧下降; 降雨中后期, 雨水稀释效应使进水COD降低, 需提高投加量以维持目标C/N。值得注意的是, 本试验条件下雨季生物除磷效率可能降至40%左右, 此时需辅以化学除磷, 待水质恢复稳定后(约4 d)生物除磷效果可逐步复原。

低温运行策略: 本试验条件下, 当水温低于12℃时, 硝化菌和反硝化菌活性均受到明显抑制, 硝化速率和反硝化速率均下降约40%~50%^[2]。此时若继续投加酿酒废水, 有机物可能因反硝化速率降低而得不到充分利用, 导致系统中有机物积累、出水COD升高。建议暂停投加或大幅降低投加量(降至正常投加量的20%~30%), 同时强化曝气(增加曝气量20%~30%)、适当加大排泥(缩短污泥龄2~3 d), 以维持系统微生物活性和适宜的污泥浓度。

3.2 碳源投加对污泥产率及除磷药耗的影响

外加碳源投加带来系统有机负荷增加, 进而影响污泥产率和除磷药耗。酿酒废水投加后系统总COD升高, 异养微生物增殖加快, 剩余污泥产量增加。贾新强等^[5]在白酒酿造黄水替代碳源的工程案例中亦观测到类似现象。本试验实测数据显示, 碳源投加后污泥产率较空白时段增加约15%~25%, 污泥处置费用相应上升。

除磷药耗方面, 碳源投加呈现两面性: 一方面, 充足碳源促进了厌氧释磷和好氧吸磷, 生物除磷效率提高, PAC化学除磷药耗可下降40%以上; 另一方面, 碳源投加过量或系统运行不稳定时, 出水COD升高可能干扰化学除磷, 反而增加药耗。从综合运行成本来看, 除磷药剂节约收益通常高于污泥处置增量成本, 本试

验条件下PAC用量下降带来的年节约费用显著高于新增污泥处置费用。

3.3 季节性碳源断供风险与柔性切换机制

白酒酿造具有明显季节性, 每年7~9月高温季节多数酒厂停产检修, 酿酒废水产生量大幅减少甚至中断。碳源断供期间若无替代方案, 系统脱氮效果将迅速下降, 出水总氮面临超标风险^[5]。

针对这一问题, 本研究提出“酿酒废水为主、商品碳源为辅”的柔性切换机制: (1) 酿酒生产旺季以酿酒废水为主碳源; (2) 建立应急储存池, 停产前储备一定量酿酒废水以延长供应周期; (3) 碳源完全断供期间切换至商品碳源(乙酸钠或葡萄糖), 按最低需求量投加保障出水达标; (4) 酒厂恢复生产后逐步增加酿酒废水比例, 实现平稳过渡。切换时机建议在存量降至3天用量时启动预案, 切换过程中加密出水监测频次, 根据实测数据及时调整投加量。

4 结论

本研究通过现场中试系统考察了酿酒废水作为外加碳源强化乡镇生活污水生物脱氮的效能与调控策略。酿酒废水COD浓度高达30000~45000 mg/L且可生化性优良($BOD_5/COD > 0.55$), 是替代传统商品碳源的可行选择。投加点位对系统性能影响显著, 格栅渠后端投加较缺氧池前端投加具有更强的抗冲击负荷能力, 出水总氮可稳定控制在4.75 mg/L左右, 更适配乡镇污水处理厂运行条件。基于实时进水水质的C/N动态调控是保障系统稳定运行的关键, 缺氧池投加宜控制C/N=5:1~7:1, 格栅渠投加宜控制C/N=5:1~10:1, 雨季和低温工况需分别采取差异化调控策略(雨季调整投加量防负荷冲击, 低温<12℃时暂停或减量投加)。碳源投加会带来污泥产率增加约15%~25%和季节性断供风险, 但可使除磷药耗下降40%以上, 综合经济效益显著。通过建立“酿酒废水为主、商品碳源为辅”的柔性碳源切换机制, 可有效应对酒厂停产期的碳源断供问题, 保障系统全年稳定运行。

参考文献

- [1]熊子康,郑怀礼,尚娟芳,等.污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(2):168-181.
- [2]黄鹏,杨家奇,金泽豪,等.高碳工业废水作为外加碳源促进污水厂减污降碳[J].中国给水排水,2025,41(3):7-13.
- [3]国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第4版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [4]唐欣,李彦澄,钟雄,等.基于酿酒废水碳源的脱氮效能及微生物作用机理[J].中国给水排水,2024,40(9):56-62.
- [5]贾新强,沈军,董文平,等.白酒酿造黄水替代污水厂碳源工程案例[J].净水技术,2025,44(9):87-94.

作者简介:

张培宏(1990--),男,汉族,四川泸县人,大专,助理工程师,研究方向: 乡镇生活污水; 酿酒废水; 碳源; 总氮; 以废治废; 碳氮比。