

酿酒废水作为外加碳源在乡镇生活污水总氮去除中的工程经济性与监管合规性研究

吴雪梅

四川泸天化麦王汇兴水务有限责任公司

DOI:10.32629/eep.v9i7.3264

[摘要] 针对乡镇生活污水低碳氮比(C/N)使得生物脱氮碳源不够的问题,本研究对酿酒废水取代商用碳源(乙酸钠、葡萄糖)的可行性开展评估,研究酿酒废水有机物成分和可生化性质,测度乡镇污水碳源需求缺量,形成物化兼容性评判规章,在脱氮效能所涉及方面,判定最合适投加比率,把与传统碳源的脱氮效率加以比较,界定出水COD残留风险的阈值大小,并分析溶解氧、污泥回流比和水温对脱氮稳定性的交互作用。经济分析以全生命周期成本法进行相关分析,划定预处理、运送及存储的成本范围,展开以传统碳源作为参照的吨水处理成本敏感性比较和规模效应断点测定,于特定边界条件下,酿酒废水作为外加碳源有技术经济可行性,工程应用要把出水COD协同管控作为合规必要条件。

[关键词] 酿酒废水; 外加碳源; 乡镇生活污水; 总氮去除; 出水COD协同管控

中图分类号: X797 文献标识码: A

Engineering Economy and Regulatory Compliance of Brewery Wastewater as an External Carbon Source for Total Nitrogen Removal in Rural Domestic Sewage

Xuemei Wu

Sichuan Lutianhua Maiwang Huixing Water Co., Ltd.

[Abstract] To address the insufficiency of carbon sources for biological denitrification caused by the low carbon-to-nitrogen (C/N) ratio of rural domestic sewage, this study evaluated the feasibility of substituting commercial carbon sources (sodium acetate and glucose) with brewery wastewater. The organic composition and biodegradability of brewery wastewater were investigated, and the carbon source demand deficit of rural sewage was quantified. A physicochemical compatibility assessment protocol was established. With respect to denitrification performance, the optimal dosing ratio was determined, and the denitrification efficiency was compared with that of conventional carbon sources. The threshold of effluent chemical oxygen demand (COD) carryover risk was defined, and the interactive effects of dissolved oxygen, sludge return ratio, and water temperature on denitrification stability were analyzed. Economic analysis was conducted using the life-cycle cost method, covering the cost scopes of pretreatment, transportation, and storage. Sensitivity comparisons of unit treatment cost and break-even point analyses for economies of scale were performed against conventional carbon sources. Under specific boundary conditions, brewery wastewater as an external carbon source demonstrates technical and economic feasibility. In engineering applications, the synergistic control of effluent COD shall be considered a mandatory prerequisite for regulatory compliance.

[Key words] brewery wastewater; external carbon source; rural domestic sewage; total nitrogen removal; synergistic control of effluent COD

1 引言

我国乡镇的污水处理设施在普遍上面临进水碳源不足的突出情况,多数乡镇排出污水的C/N值是3~4,相较于生物反硝化脱氮理论碳氮比低很多,造成反硝化过程中电子供体匮乏,总氮去

除效率不能够达标^[1],一般的传统解决路径是投加乙酸钠、葡萄糖等商用碳源,但乙酸钠售价昂贵、葡萄糖易造成污泥膨胀且出水COD风险比较高,大规模应用受经济和运行稳定性这双重方面的制约^[2]。

酿酒产业于生产的过程中出现大量高浓度有机废水,其COD浓度可以升高到数万毫克升,具有良好的可生物代谢性,一旦能把酿酒废水作为替代碳源用于乡镇污水的处置,能降低污水厂碳源采购的成本压力,还可对酿酒企业的高浓度废水进行消纳,完成“以废治废”的资源化循环过程。

已有的研究大多关注城市污水处理厂或单一工艺条件下的可行性验证^[3],对于乡镇污水处理场景下酿酒废水碳源的工程经济边界以及监管合规风险,系统性研究还未开展,本研究围绕碳源可生化性、脱氮工艺响应、全链条经济成本以及出水水质达标与运行风险管控等关键问题开展系统评估,是为了给乡镇污水处理厂碳源替代方案的工程决策提供理论依据和技术参考。

2 酿酒废水碳源特性及替代可行性评估

2.1典型酿酒废水有机物成分谱系和可生化性的表征。不同工艺使酿酒废水水质存在差异。白酒酿造黄水有机物浓度极高, BOD_5/COD 、 C/N 及 C/P 均处于较高水平,浓香型白酒混合废水COD约30000~45000mg/L,窖底水COD最高可达200000 mg/L^[4]。

啤酒废水同样有机负荷较高, BOD_5/COD 一般可达0.5以上^[5],可生化性良好。酿酒废水富含易降解小分子有机物(乙醇、有机酸、糖类等),可直接为反硝化微生物利用,反硝化速率可达1.85~2.60 $mgNO_3^- - N/(gVSS \cdot h)$,优于乙酸钠对照组(1.72)^[5],但酿酒废水水质时空波动显著,不同季节和工艺的COD浓度差异可达数倍,对精准投加构成挑战,需配套水质在线监测与投加量动态管理体系^[5]。

2.2乡镇生活污水低碳氮比性质的数据化和理论碳源需求缺口量化。乡镇生活污水因收集管网不完善、居民用水习惯及雨污合流等因素,进水COD偏低而氮素相对稳定, C/N 比严重偏低。 $C/N \approx 4$ 时,无外加碳源条件下TN去除率仅约16.4%^[1]。以设计规模1000~5000 m^3/d 的典型乡镇污水厂为例,设进水TN=40 mg/L、出水TN $\leq$ 15 mg/L(一级A标准),需去除TN约25mg/L。按反硝化理论需碳量(每去除1mg $NO_3^- - N$ 约需2.86mg COD)及工程安全系数(1.5~2.0)折算,每日碳源需求折算COD当量约107~286 kg(以1000 m^3/d 计)^[2],若完全依赖商用碳源,将造成乡镇污水厂难以承受的运营成本压力。

2.3物化兼容性判断所依据的相关方面(pH缓冲能力、悬浮物影响和潜在微生物毒性抑制风险)。物化兼容性需从pH缓冲、悬浮物和微生物毒性三方面评估。酿酒废水呈弱酸性,但乡镇污水自身具有碱度缓冲能力,投加比一般低于1%~3%,pH冲击风险可控,运行中需监测缺氧段pH并及时微调。悬浮物浓度较高(SS可达数千mg/L),直接投加可能增加污泥负荷并堵塞管道,工程上需设置格栅、沉淀及过滤等预处理单元^[5],毒性测试表明,酿酒废水对活性污泥硝化速率及释磷、吸磷过程无明显抑制,残余COD对出水影响较小^[5];清洗工段废水可能含酸碱洗涤剂,碳源筛选时应予排除。

3 碳源投加脱氮效能、关键运行边界及出水水质达标风险控制

3.1开展最优投加比的优化事宜并和传统碳源(乙酸钠/葡萄糖)脱氮效率对比。酿酒废水碳源投加比优化的要点是平衡脱氮

效率与出水COD风险,投放酿酒废水后,TN平均所达到的去除率为83.0%,出水能稳定符合一级A的相关标准^[4],当反硝化系统处于容积负荷0.111 $kgCOD/(m^3 \cdot d)$ 的最佳值以及 DO 1~2 mg/L条件,脱氮效果较好^[3],低浓度过滤酒类废水所对应的碳源消耗质量比($\Delta COD/\Delta N$)为7.1,低于以乙酸钠计的10.9^[6],碳源利用的效能更良好,酿酒废水恰当投加比所对应的 C/N 是6~8,脱氮效率接近乙酸钠所达到的水平,对投加比精确控制的要求要比乙酸钠高很多——乙酸钠属于单一成分,投加量跟COD当量呈严格的线性相关;酿酒废水以多组分复杂基质的形式存在,“有效碳”比例随水质的情况波动,要建立基于实时COD与 BOD_5 实时监测的动态投加模型。

3.2反硝化动力过程并出水COD残留风险阈值识别。投加酿酒废水的核心隐患是可能造成出水COD升高,过量进行投加时,未在反硝化过程中被利用的有机物随出水排出,造成COD超标,组分可降解性对碳源利用效率起决定作用:乙醇、乙酸等易降解的成分利用速度比较快;大分子及难降解的成分在缺氧段可能没有完全转化,进入好氧段以后,倘若停留时间不足,仍会有残留风险^[5]。

要明确安全投加的最大量——在该投加量的状况下,反硝化于缺氧HRT内可把大部分可降解有机物消耗,出水COD符合排放的标准(一级A标准是 $COD \leq 50$ mg/L),于工程实施这个阶段,这个阈值要凭借小试或中试去予以确定,提议以出水 $COD \leq 40$ mg/L当作运行控制的警示线,预留一定安全量。

3.3关键的3个运行参数(溶解氧、污泥回流比和水温)对脱氮稳定性的交互作用。运行参数对酿酒废水碳源系统的脱氮稳定性具有交互影响^[3]。溶解氧(DO)为关键控制参数,缺氧区DO宜低于0.2 mg/L,否则电子供体优先被溶解氧消耗,导致碳源非有效利用;系统最佳DO为1~2 mg/L^[3]。污泥回流比影响反硝化菌数量、活性及硝酸盐回流量,回流比过低导致硝化液供应不足,过高则可能带入溶解氧破坏缺氧环境,需根据进水水质与脱氮目标动态调整。

水温对反硝化速率影响显著,冬季低温($<12^\circ C$)时反硝化菌活性减弱,碳源利用效率下降^[6]。乡镇污水厂面临冬季低温与进水水质波动的叠加效应,应建立季节性投加策略,冬季适当加大投加比例并辅以其他强化措施。

3.4工程应用中的水质达标保障与运行合规要点。基于脱氮效能及出水COD残留风险分析,酿酒废水碳源方案的工程化应用应落实以下控制策略:

(1)在线联动调控:依据进水COD与 $NO_3^- - N$ 实时监测值,构建前馈-反馈耦合投加逻辑,实现碳源投加量随水质波动自动调节,规避投加不足致TN超标或过量投加致COD升高。(2)设计冗余:出水COD按 ≤ 40 mg/L控制(一级A标准50 mg/L),预留10 mg/L缓冲;出水TN按 ≤ 12 mg/L控制(标准15 mg/L),以缓冲进水波动与季节性冲击。(3)应急切换:在线监测显示COD持续上升或TN去除率骤降时,自动切换至备用乙酸钠系统,并向属地生态环境部门报备异常。同步建立酿酒废水碳源供应中断(如酒厂季节性停产)时的外购碳源应急储备机制。

4 参照达标工况做的全链条工程经济性分析

4.1 全生命周期成本边界框定(包含酿酒废水预处理、运输还有现场保管环节)。对于酿酒废水碳源方案全生命周期成本(LCC)的核算,不能仅比较碳源采购单价,而应覆盖从废水产生到付诸投加利用全链条的成本要素^[2],具体包括:

(1)酿酒废水预处理所需成本——有格栅、沉砂、调节均质等设施建设和运行的费用;(2)运输成本——受运输的距离、运输所采用的方式(罐车或管道)及频次影响;本项目运输费用按以下规则核算:运输距离25 km以内,按37元/吨计;超出25 km的部分,按1.5元/ $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ (单面)计;(3)现场储存涉及的成本——包括储罐建设相关事宜、防渗处理等一系列工作、保温(冬季预防冻害问题)及安全防护设施;(4)投加系统的费用——有计量泵、管道、自动控制系统等;(5)运行监测成本——所包含的是水质检测、投加量更改与系统维护工作,传统商用的碳源(乙酸钠、葡萄糖)全生命周期成本相对好办,主要有采购成本、现场溶解和投加系统方面的成本及储存成本,没有涉及预处理和运输环节复杂的费用格局。

4.2 把传统商用碳源作为基准的吨水成本敏感状况比较。以吨水处理成本为衡量标准,酿酒废水碳源的经济优势主要源于碳源本身接近零成本(酿酒废水作为工业废弃物由产生方处置)。在实际工程中,酿酒废水的收集、运输及投加费用由污水处理厂承担,酒企无需支付额外处置费用^[4]。

以2000 m^3/d 规模乡镇污水厂为核算基准:乙酸钠碳源按市场价格约3000元/吨、COD当量约25万 mg/L 、日补充COD约200 kg计,吨水碳源成本约0.6~0.8元/ m^3 ;采用酿酒废水替代,吨水成本主要由运输费用构成^{[4][2]}。成本敏感性分析表明,运输距离为最敏感因素——运输距离25 km以内为37元/吨,超出25 km部分按1.5元/ $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ (单面)计;酿酒废水COD浓度波动 $\pm 30\%$ 引起吨水成本波动 $\pm 15\% \sim 20\%$;预处理设施折旧及运行费占总成本20%~35%。酿酒废水碳源方案的经济可行性高度依赖就近取材的地理条件与稳定的废水供应质量。

4.3 乡镇处理规模效应、原料收集运输半径对经济可行性的断点研究。一般来说乡镇污水处理厂规模较小(500~5000 m^3/d),该特征给酿酒废水碳源方案的经济可行性带来双重作用^[2],规模越小,单位水量分摊的固定成本(预处理设施、运输车辆、储罐等)越高,经济效益越差。

运输半径是决定酿酒废水碳源方案经济可行性的核心敏感因子。运输成本与距离呈线性正相关关系,界定经济可行断点(即酿酒废水碳源方案吨水总成本与乙酸钠方案持平时的最大允许运输距离)需综合考量路况、油价及运输方式。在基准工况(运输单价:25 km以内按37元/吨,超出部分按1.5元/ $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ 单面计)下,断点距离约为25~30 km。超出该半径后,吨水运输成本将超过乙酸钠采购与投加的成本差额,经济优势消失。因此,酿酒废水碳源方案在酒厂与污水厂地理距离较近(建议控制在25 km以内)的应用场景中适用性更强;对于运输距离过长的偏远乡镇,传统碳源仍为更现实的选项。

5 监管合规性保障体系

采用酿酒废水作为外加碳源,必须始终以满足排污许可证载明的COD、TN排放限值为刚性前提,合规是不可逾越的红线。保障体系核心为“数据留痕、应急报告、定期自检”三位一体。

(1)数据留痕与在线监测合规。依托前文所述实时监测系统,进出水水质、投加量、报警事件等数据自动存储,形成不少于5年电子台账,满足执法溯源与证后监管要求。(2)超标应急与报告制度。当出水触及内控预警值时,自动切换备用碳源并启动应急程序;一旦发生实际超标,须在时限内向生态环境部门书面报告,完整保留处置记录,作为合规佐证。(3)周期性自检与季节性适配。每季度开展合规性自检,核查在线校准、计量精度及应急设施;冬季低温期参照前文季节性策略收紧内控标准,执行情况纳入年度排污许可执行报告。

凭借上述体系,使合规管理由事后应对转变为流程可追溯,保证碳源替代方案于技术经济可行这一前提之下,达到全过程监管法定的相关要求。

6 结论

本研究从碳源特性、脱氮效能、工程经济及监管合规四个方面,系统评估了酿酒废水替代商用碳源用于乡镇污水总氮去除的可行性。结果表明:在最优投加比($\text{C}/\text{N}=6 \sim 8$)及适宜运行参数($\text{DO} 1 \sim 2 \text{ mg}/\text{L}$ 、缺氧区 $\text{DO} < 0.2 \text{ mg}/\text{L}$)下,酿酒废水碳源脱氮效率与乙酸钠相当(TN 去除率 $> 82\%$),出水可达一级A标准。经济上,当污水厂规模 $\geq 1000 \text{ m}^3/\text{d}$ 、运输距离 $\leq 25 \text{ km}$ 时,吨水碳源成本较乙酸钠降低50%~75%。监管合规须以出水COD协同管控为核心防线,依托在线监测与动态投加联控、应急切换预案及完整台账体系,实现从“事后监测”向“过程预控”的转变。工程推广应因地制宜评估运输半径与规模效应匹配性,并配套冬季低温强化运行与碳源供应中断应急储备,确保技术经济性与合规性统一。

【参考文献】

- [1]李忠元,戚天忠,秦津山,等.酒厂废水作为碳源在污水处理中的研究[J].内蒙古科技与经济,2024,(14):119-122+132.
- [2]赵颖.外加碳源强化农村生活污水处理及成本分析[J].净水技术,2024,43(12):111-118.
- [3]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.
- [4]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.
- [5]邱勇,刘雪洁,田宇心,等.酒类废水特征及其作为反硝化碳源的可行性[J].给水排水,2021,57(12):86-91.
- [6]Li J, You Z, Gu J, et al. Study on utilizing Chinese Baijiu wastewater as an alternative carbon source in full-scale municipal sewage treatment plants[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 199: 107203.

作者简介:

吴雪梅(1991--),女,汉族,四川泸县人,本科,助理工程师,研究方向:乡镇生活污水;酿酒废水;外加碳源;去除总氮;以废治废;环境隐患工程治理。