

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.

JIA X Q, SHEN J, DONG W P, et al. Engineering case of making use of yellow water from liquor brewing as a substitute for carbon source in WWTPs [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 87-94.

白酒酿造黄水替代污水厂碳源工程案例

贾新强^{1,*}, 沈 军¹, 董文平², 张文克¹

(1. 山东省环科院环境工程有限公司, 山东济南 250199; 2. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东青岛 266033)

摘 要 【目的】在出水氮、磷指标不断提高的背景下, 碳源不足已成为城市污水厂面临的难题之一, 同时, 传统外加碳源如乙酸钠、甲醇等存在污泥产量大、投加成本高、生物毒性等问题, 基于白酒酿造废水黄水具有高化学需氧量(COD)浓度和可生化性高的特点, 探究其作为替代碳源的可行性。【方法】此研究选取济南市某白酒酿造企业的黄水作为研究对象, 在采用厌氧-缺氧-好氧活性污泥法+膜生物反应器(AAO+MBR)工艺、设计规模为 2.5 万 m³/d 的济南市某城市污水处理厂开展应用研究, 通过对比黄水投加前后的污染物去除率及污泥特性, 评估其替代效能。【结果】黄水投加后, 污水厂 COD 平均去除率达到 96.5%, 与日常运行的 95.9% 相近; 氨氮的平均去除率为 99.1%, 较日常运行的 99.0% 略有提升; TN 平均去除率为 83.0%, 虽较日常运行的 86.9% 有所下降, 但出水指标仍符合标准; TP 平均去除率为 98.2%, 与日常运行的 98.3% 基本持平。【结论】白酒酿造黄水有机物浓度高, 生化需氧量与化学需氧量比(BOD₅/COD)、碳氮比(C/N)、碳磷比(C/P)高, 替代传统复合碳源时能稳定维持污水厂硝化、反硝化效能、污泥浓度及出水水质。通过碳源替代与酒厂废水协同处理, 可实现每年酒厂与污水处理厂碳减排 1 641.38 t, 实现经济效益为 159.81 万元, 是可行的碳源替代方案。

关键词 白酒酿造黄水 碳源替代 处理效能 碳减排 经济效益

中图分类号: TU992 文献标志码: B 文章编号: 1009-0177(2025)09-0087-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.011

Engineering Case of Making Use of Yellow Water from Liquor Brewing as a Substitute for Carbon Source in WWTPs

JIA Xinqiang^{1,*}, SHEN Jun¹, DONG Wenping², ZHANG Wenke¹

(1. Shandong Huankeyuan Environmental Engineering Co., Ltd., Jinan 250199, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract [Objective] Under the background of increasingly strict requirements for effluent nitrogen and phosphorus indicators, the shortage of carbon sources has emerged as one of the formidable challenges confronting urban wastewater treatment plants (WWTPs). Meanwhile, conventional externally added carbon sources, such as sodium acetate and methanol, are plagued by problems including high sludge production, high dosing costs, and biological toxicity. Based on the characteristics of high COD concentration and high biodegradability of yellow water from Baijiu brewing wastewater, the feasibility of yellow water as an alternative carbon source is explored. [Methods] This study centers on the yellow water sourced from a Baijiu-brewing enterprise in Jinan. An applied research project is conducted at a specific urban WWTP in Jinan. This WWTP employs the anaerobic-anoxic-aerobic (AAO) + membrane bioreactor (MBR) process and had a designed treatment capacity of 25 000 m³ per day. By comparing the pollutant removal efficiency and sludge characteristics before and after adding yellow water, the substitution efficiency is evaluated. [Results] Average COD removal rate of the WWTP reached 96.5% after adding yellow water, which is closed to 95.9% in daily operation. The average ammonia nitrogen removal rate is 99.1%, registering a slight increase compared to the 99.0% during regular operation. The average TN removal rate is 83.0%, showing a decrease compared to the 86.9% under normal operation. Nevertheless, the effluent still complies with the standards. The average TP removal rate is 98.2%, which is basically on par with the daily average of 98.3%.

[收稿日期] 2025-05-08

[基金项目] 山东省重点研发计划重大科技创新工程(2022CXGC021001)

[通信作者] 贾新强(1981—), 男, 主要从事给水 and 排水工程设计研究工作, E-mail: jiaxinqiang8@163.com。

[**Conclusion**] The yellow water from Baijiu brewing is characterized by a high concentration of organic matter, along with favorable B/C, C/N, and C/P ratios. When used to replace traditional composite carbon sources, it can maintain the stability of nitrification and denitrification processes, sludge concentration in WWTPs, ensuring a stable effluent quality. Through the synergistic treatment of carbon source substitution and distillery wastewater, an annual carbon emission reduction of 1 641.38 t can be realized for both the distillery and the WWTP, accompanied by an annual economic benefit of 1.598 1 million yuan, thus validating it as a practical carbon source substitution scheme.

Keywords yellow water from liquor brewing carbon-source substitution treatment efficiency carbon emission reduction economic benefit

我国污水处理厂出水多执行一级 A 或更高的排放标准,污水厂以生物脱氮为主体的脱氮工艺,反硝化阶段对碳源有较高的需求。随着大量企业在城市排水系统前端自建污水站,中水处理设施投入运行,进入城市污水厂污水的 COD 浓度在逐渐降低,国内大部分城市污水处理厂均面临进水有机质浓度偏低、碳氮比(C/N)不能满足脱氮需求,须向缺氧池或反硝化滤池内大量投加碳源来保证出水 TN 达标排放的问题,碳源不足已成为城市污水厂面临的难题之一^[1-2]。

外加碳源可分为固体外加碳源^[3-4]、液体外加碳源^[5-8]和气体外加碳源^[9-13]3 种。目前,污水处理厂的外加碳源主要以乙酸钠、甲醇、葡萄糖、乙醇等简单的有机物为主^[14-17]。但外加碳源也存在生物毒性,污泥产量大,易引起污泥膨胀,投加控制工序复杂^[18-19],微生物适应周期长,投加成本高,选择与投加不当,造成水厂出水超标等问题^[20]。部分污水处理厂尝试使用米芯、玉米秸秆、美人蕉秆、稻壳、核桃壳、夏威夷果壳等生物质碳源替代商业碳源,但也存在预处理复杂、碳源浓度偏低、失效碳源分离复杂等问题^[21]。

根据我国统计局数据,2023 年全国规模以上企业白酒产量为 4.492×10^9 L,白酒酿造过程会产生一系列废水,包括黄水、浓盐废水、洗瓶废水、清洗废水等。其中,黄水来自白酒酿造的发酵车间,主要由酸、醛、醇、酯、糖类物质,含氮化合物、少量色素及单宁等有机物组成,pH 值为 3.0~3.5,COD 质量浓度为 60 000~250 000 mg/L,BOD₅ 质量浓度为 40 000~180 000 mg/L。黄水可生化性高,具备成为污水厂补充碳源的良好潜质。

此研究以济南市某白酒企业生产线中的黄水为替代碳源,在济南市某城市污水处理厂开展了黄水替代传统碳源的应用研究,探寻黄水对污水处理厂

COD、BOD₅、氨氮、TN、TP 等主要指标的影响规律,分析其对硝化速率、反硝化速率的影响,探讨黄水直接进入污水处理厂作为替代碳源的可行性与效益,为污水处理厂的碳源替代提供理论依据与案例参考。

1 试验方法与设备

试验的黄水取自济南市某白酒酿造企业,试验期间黄水水质指标如表 1 所示。本次试验工作在济南市某城市污水处理厂开展,该水厂设计规模为 2.5 万 m³/d,主要处理管段分为东、西 2 组,单组处理能力为 1.25 万 m³/d;生化工艺为厌氧-缺氧-好氧活性污泥法(AAO)+膜生物反应器(MBR)工艺,处理污水为生活污水,出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。污水厂处理工艺流程如图 1 所示,试验过程水质指标检测采用国标方法。

表 1 试验期间黄水水质指标
Tab. 1 Water Quality Indices of Yellow Water during the Experiment Period

采样日期	COD/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	碳氮比 (C/N)	碳磷比 (C/P)
7 月 22 日	241 000	4 719	1 675	51.07	143.88
7 月 25 日	241 000	4 669	1 663	51.62	144.92
7 月 28 日	111 000	2 569	825	43.21	134.55
7 月 31 日	187 000	1 025	350	182.44	534.29
8 月 4 日	159 000	3 338	981	47.63	162.08
8 月 9 日	81 900	1 594	600	51.38	136.50
8 月 12 日	68 100	1 156	393	58.91	173.28
8 月 14 日	88 100	1 312	409	67.15	215.40
8 月 18 日	98 200	1 038	343	94.61	286.30
9 月 21 日	243 000	2 706	969	89.80	250.77
10 月 3 日	213 000	1 475	586	144.41	363.48
10 月 7 日	242 000	2 548	743	94.98	325.71
10 月 10 日	107 000	2 450	681	43.67	157.12
10 月 19 日	248 000	2 884	859	86.00	288.71

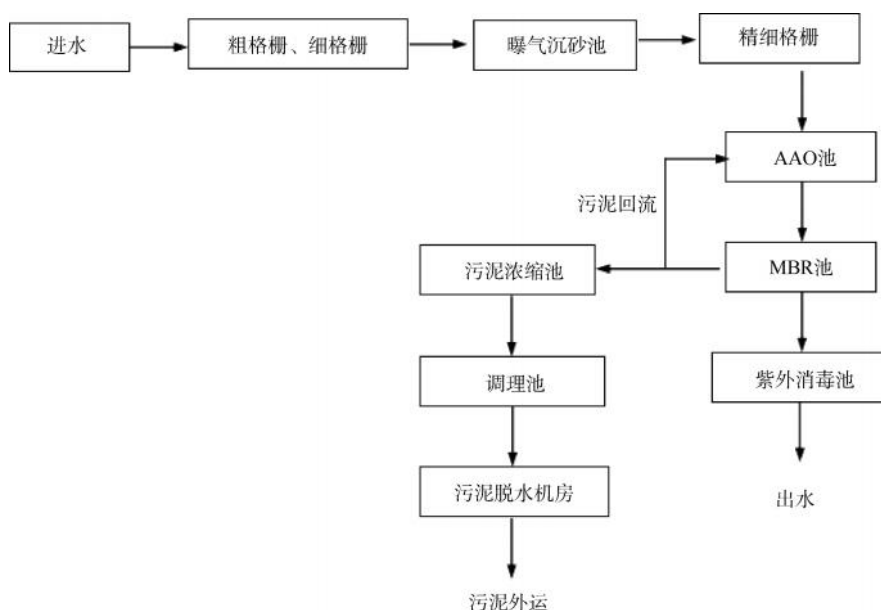


图1 污水处理厂工艺流程

Fig.1 Process Flow of WWTTP

2 结果分析

试验过程分为2个阶段,第一阶段试验27 d,7月22日开始投加黄水,8月18日结束。10月3日开始第二阶段的试验,试验数据采集共9 d(10月4日—10月12日)。污水厂日常投加复合碳源计算COD当量为300 000~600 000 mg/L, BOD_5 当量为185 000~370 000 mg/L。根据企业复合碳源投加量以黄水COD当量计算,投加量为5.0~16.0 m³/d,经初步计算,黄水投加提高了污水处理厂COD浓度16.43%、 BOD_5 浓度28.29%,TN浓度1.17%,TP浓度5.57%。污水厂设计规模为25 000 m³/d,进水水质pH值为7左右,以每天投加最小量5 m³黄水计,投加黄水后pH值为6.8左右,不影响污水pH,与实际检测一致。投加位置在缺氧池首端,试验期间每天取样,对水样COD、 BOD_5 、氨氮、TN、 NO_3^- -N、TP进行了分析,结果如下所示。

2.1 COD去除效果

污水处理厂日常运行阶段COD平均进水质量浓度为338 mg/L,平均出水质量浓度为14 mg/L,平均去除率为95.9%(图2)。黄水投加试验阶段污水处理厂COD平均进水质量浓度为342 mg/L,平均出水质量浓度为12 mg/L,平均去除率达到96.5%(图3)。投加复合碳源阶段,出水COD的浓度相对更加稳定,投加黄水阶段,出水COD浓度相对更低,

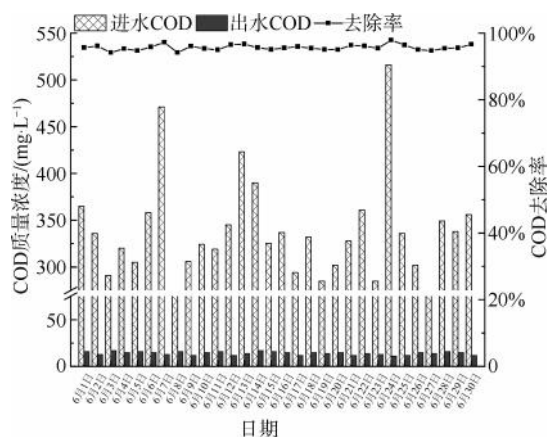


图2 日常运行COD去除效果

Fig.2 COD Removal Effect during Daily Operation

但水质略有波动。对比可知,黄水作为替代碳源投加后,污水处理厂的COD去除率能够维持高去除率状态,出水能够达到排放标准。这说明黄水的可生化性较高,污水厂生化处理单元的优势菌群能够较好地适应碳源的变化。

2.2 氨氮去除效果

污水处理厂日常运行阶段氨氮平均进水质量浓度为49.7 mg/L,出水质量浓度为0.5 mg/L,平均去除率为99.0%(图4)。黄水投加试验阶段污水处理厂氨氮平均进水质量浓度为46.8 mg/L,平均出水质量浓度为0.4 mg/L,平均去除率为99.1%(图5)。受到试验月份的影响,黄水投加试验阶段的进

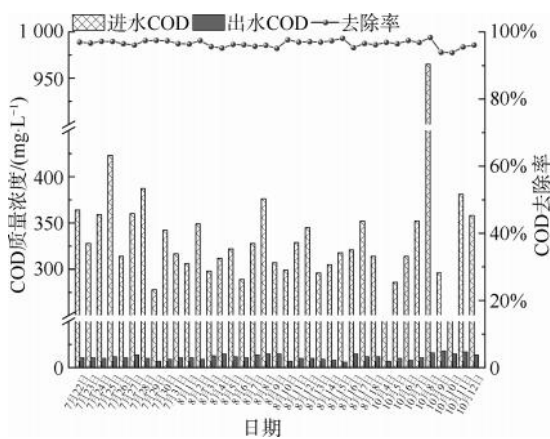


图3 黄水投加阶段 COD 去除效果

Fig. 3 COD Removal Effect during Yellow Water Dosing Stage

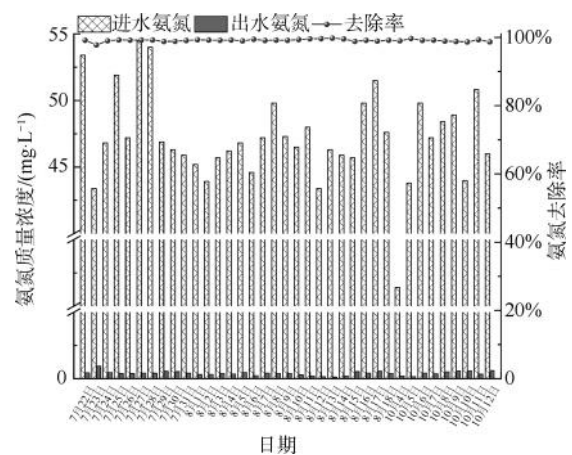


图5 黄水投加阶段氨氮去除效果

Fig. 5 Ammonia Nitrogen Removal Effect during Yellow Water Dosing Stage

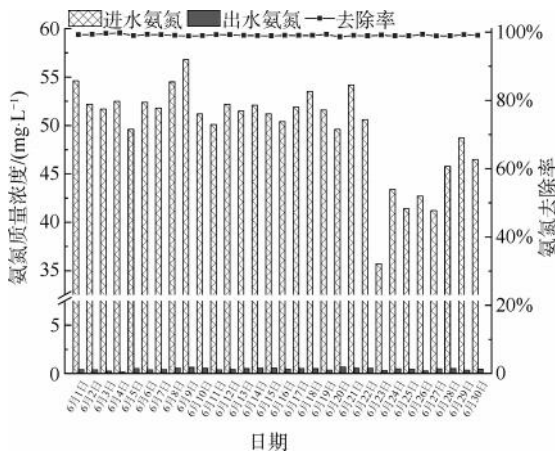


图4 日常运行阶段氨氮去除效果

Fig. 4 Ammonia Nitrogen Removal Effect during Daily Operation Stage

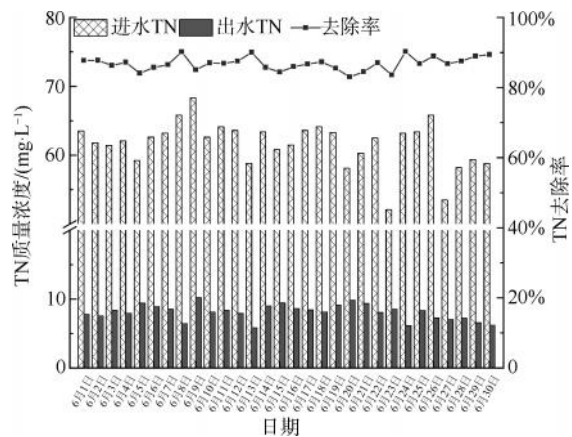


图6 日常运行阶段 TN 去除效果

Fig. 6 TN Removal Effect during Daily Operation Stage

水氨氮浓度要略低于日常运行阶段的浓度,这也可能是其氨氮去除率更低的原因之一。总体上看,氨氮出水浓度远低于出水标准,处理效果良好,黄水作为替代碳源未对污水处理厂的氨氮去除产生抑制,黄水组分不会对氨氧化菌产生毒害作用。

2.3 TN 去除效果

如图6所示,污水处理厂日常运行阶段 TN 平均进水质量浓度为 61.6 mg/L,平均出水质量浓度为 8.1 mg/L,平均去除率为 86.9%。试验阶段污水处理厂 TN 平均进水质量浓度为 59.5 mg/L,平均出水质量浓度为 10.1 mg/L,平均去除率达到 83.0%,TN 去除率略有下降(图7),这可能是反硝化菌对黄水的碳源利用效率有所下降造成的,但出水仍然低于出水标准,说明黄水作为替代碳源能够满足污水处理厂 TN 去除需求。

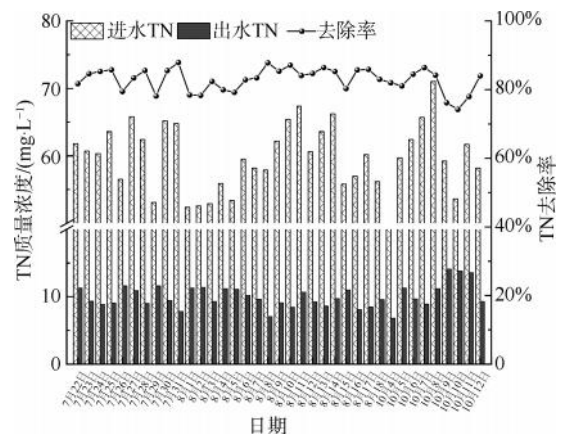


图7 黄水投加阶段 TN 去除效果

Fig. 7 TN Removal Effect during Yellow Water Dosing Stage

2.4 TP 去除效果

污水处理厂 TP 平均进水质量浓度为 5.8 mg/L, 平均出水质量浓度为 0.1 mg/L, 平均去除率为 98.3% (图 8)。试验阶段时污水处理厂 TP 平均进水质量浓度为 5.7 mg/L, 平均出水质量浓度为 0.1 mg/L, 平均去除率为 98.2% (图 9), 对比发现试验阶段 TP 去除率略微下降, 这可能是黄水成分的差异, 使得生物同化作用受到影响的原因, 但差别很小, 黄水作为替代碳源对污水处理厂 TP 去除过程不会产生较大的负面影响。

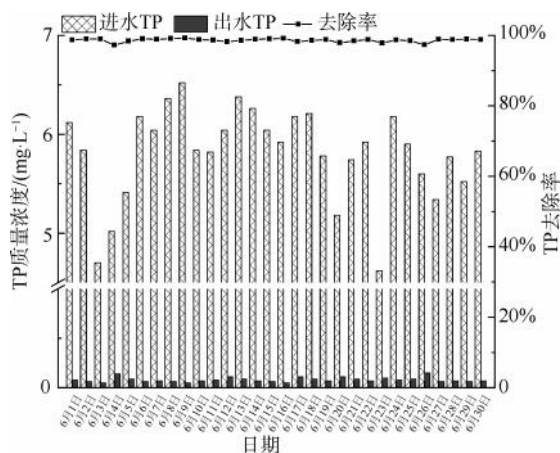


图 8 日常运行阶段 TP 去除效果

Fig. 8 TP Removal Effect during Daily Operation Stage

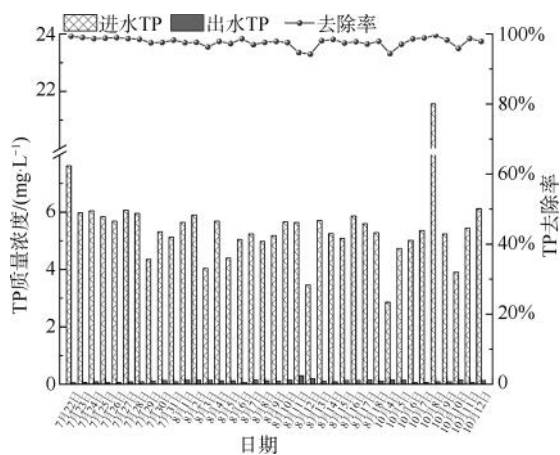


图 9 黄水投加阶段 TP 去除效果

Fig. 9 TP Removal Effect during Yellow Water Dosing Phase

2.5 生化反应速率分析

如图 10 所示, 水厂日常运行阶段反硝化速率最大值为 0.071 mg/(L·d), 平均值为 0.050 mg/(L·d), 硝化速率最大值为 0.009 mg/(L·d), 平均值为 0.007 mg/(L·d)。试验期间水厂反硝化速率最大

值为 0.078 mg/(L·d), 平均值为 0.053 mg/(L·d), 硝化速率最大值为 0.011 mg/(L·d), 平均值为 0.008 mg/(L·d) (图 11)。采用黄水作为碳源时段的硝化、反硝化反应速率均略高于复合碳源投加阶段。这可能是黄水成分中包含乳酸、乙酸、己酸、丁酸、醇、酯等物质, 更复杂的成分使得异养菌的降解效率有所降低, 与硝化菌的氧气竞争力变弱, 从而促进了硝化作用, 而硝酸盐的积累浓度提升又进一步推动了反硝化的进程。

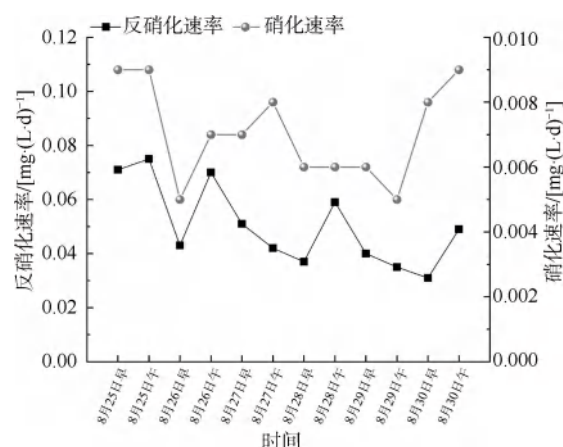


图 10 日常运行阶段生化反应速率

Fig. 10 Biochemical Reaction Rate during Daily Operation Phase

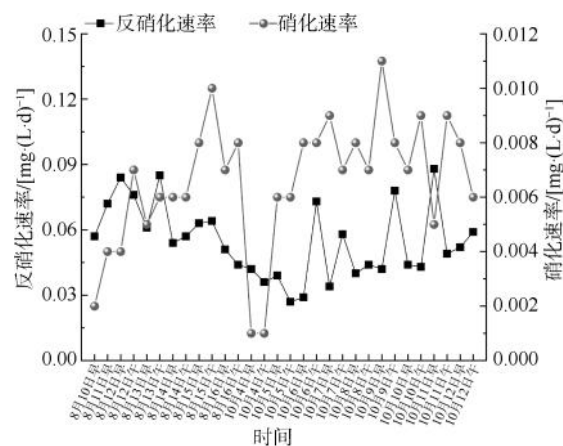


图 11 黄水投加阶段生化反应速率

Fig. 11 Biochemical Reaction Rate during Yellow Water Dosing Phase

2.6 污泥浓度变化分析

水厂日常运行阶段缺氧池污泥浓度 (MLSS) 平均质量浓度为 10 600 mg/L, 挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS)/MLSS 平均值为 0.50 (图 12)。试验期间缺氧池平均污泥质量浓度为 10 800 mg/L, MLVSS/

MLSS 平均值为 0.32,有所下降(图 13)。经向水厂相关管理人员了解,在 7 月—9 月 MLVSS/MLSS 会低于其他月份,主要是受夏季降雨、气温及来水组成变化影响,MLVSS/MLSS 为 0.30~0.35。试验期间缺氧池 MLVSS/MLSS 平均值为 0.32,处于正常范围。此外,采用黄水作为碳源时段,污泥浓度反而有所上升,这表明黄水的投加对生化系统污泥浓度的影响较小,可能利于污泥的生长。

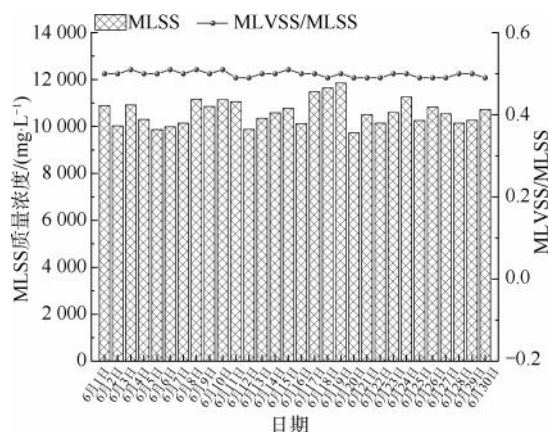


图 12 日常运行阶段缺氧池污泥浓度及 MLVSS 与 MLSS 比值变化

Fig. 12 Variations of Sludge Concentration and Ratio of MLVSS/MLSS during Daily Operation Phase

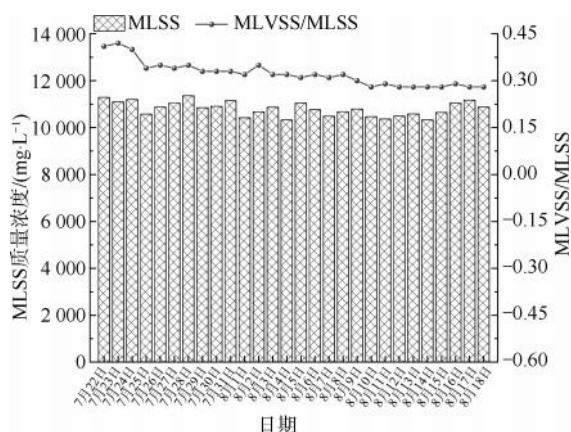


图 13 黄水投加阶段缺氧池污泥浓度及 MLVSS 与 MLSS 比值变化

Fig. 13 Variations of Sludge Concentration and Ratio of MLVSS/MLSS during Yellow Water Dosing Stage

3 效益分析

本项目实施酿酒废水协同治理方案,酿造黄水给污水处理厂作为碳源,其他废水与污水处理厂达成排放协议,酒厂污水处理站仅保留前端预处理池。

协同治理方案实现了酒厂与污水处理厂双方碳减排与经济效益的共赢。

(1) 碳减排效益分析

酒厂污水处理站仅保留部分预处理设施,原水处理需要的外加碳源(葡萄糖)、除磷剂和相关电气设备可不再发生。基于排放因子法,参照《IPCC2006 年国家温室气体清单指南》(2019 修订版)、《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)》和《污水处理厂(站)低碳运行评价标准》(征求意见稿)。酒厂减少污水处理减少消耗除磷药剂产生碳排放量以聚合氯化铁 2.71 t CO₂ eq/t 计算,每年碳减排 8.13 t,节约电力消耗产生碳排放量以华北电网排放因子(0.884 3)计算,每年碳减排 483.15 t。

污水处理厂减少复合碳源投加产生碳排放量,以每年 1 500 t 黄水替代复合碳源(甲醇等)750 t 计算,可实现碳减排 1 155 t,黄水运输以重型柴油货车拉运 18 t/次,总里程共 4 200 km 计算,每年产生碳排放 5.90 t。

综上,实施白酒酿造黄水替代污水厂碳源与酒厂废水协同治理方案,可实现年碳减排 1 641.38 t。

(2) 经济效益分析

白酒酿造黄水替代污水厂碳源与酒厂废水协同治理方案的实施,每年酒厂可节约除磷药剂费用为 0.9 万元,电费为 52.01 万元,污泥处置费为 20 万元,运维费用为 8.4 万元,折旧费为 6 万元,检测费为 6 万元,人工费为 40 万元;污水处理厂节约复合碳源费用为 67.5 万元,增加黄水运输费用为 39.0 万元,项目总体每年可实现经济效益为 159.81 万元。

4 工程应用风险分析

4.1 拉运黄水过程风险分析

黄水成分比较复杂,含有多种醇类物质。在汽运装卸、运输中可能由于碰撞、振动、挤压等,或操作不当、重装重卸、容器多次回收利用,垫圈失落没有拧紧等,均易造成物品泄漏,甚至引起火灾、爆炸或污染环境等事故。所以拉运黄水的运输方须依据当地交通规定,具备相应的专项资质,同时使用符合标准的专用车辆。此外,在运输前,需向当地相关部门进行报备,同时检查酒精容器的密封性,严禁装载酒精的容器倾斜、倾倒。

4.2 黄水储存风险分析

黄水 pH 值为 3.0~3.5,同时含有乙醇等危险性物质,具有强酸性、易燃性的特点,在储存过程中存在一定的风险。因此,应严格遵照国家相关规定,实行集中管理,严格使用制度。例如:应采取储存于阴凉、通风的库房;远离火种、热源;保持容器密封等措施。

5 结论

(1)黄水替代污水厂传统复合碳源生产性试验结果表明,污水厂的硝化、反硝化效能良好,氨氮与 TN 去除率未受到较大影响,出水能够达到污水处理厂出水标准要求。

(2)黄水替代污水厂传统复合碳源期间,在维持硝化、反硝化效能稳定的前提下,黄水投加对污水厂 COD、TN、TP 的去除效果及污泥浓度未产生负面影响,出水水质稳定。

(3)白酒酿造黄水,具有有机物浓度高, BOD_5/COD 、 C/N 、 C/P 高的特点,可以实现工业废水资源化利用,具备成为污水厂外加碳源优良替代品潜质。

(4)白酒酿造黄水替代污水厂碳源与酒厂废水协同治理方案的实施,能够实现酒厂与污水处理厂双方碳减排与经济效益的共赢,在实现双方碳排放量有效降低的同时,也具备良好的经济效益。

(5)黄水成分复杂,工程应用中需严格遵照国家和地方规定,对运输与储存实施合规管控。

参考文献

- [1] 李英特,刘世婷,陈洪斌. 污水生物脱氮外加碳源的开发与应用[J]. 净水技术, 2024, 43(4): 16-27.
- LI Y T, LIU S T, CHEN H B. Development and application of external carbon sources for biological denitrification in wastewater [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4): 16-27.
- [2] 张源野,王爽. 生物脱氮除磷外加碳源技术探讨[J]. 吉林建筑大学学报, 2017, 34(1): 53-55.
- ZHANG Y Y, WANG S. The progress of carbon source for biological nitrogen and phosphorus removal [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2017, 34(1): 53-55.
- [3] 李斌,郝瑞霞. 固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 206-212.
- LI B, HAO R X. Selection of solid cellulose-like wastes as denitrification carbon source filters [J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 206-212.
- [4] 安琪,吴雪君,吴冰,等. 不同碳源和氮源对金针菇降解木质纤维素酶活性的影响[J]. 菌物学报, 2015, 34(4): 761-771.
- AN Q, WU X J, WU B, et al. Effects of carbon and nitrogen sources on lignocellulose decomposition enzyme activities in *Flammulina velutipes* [J]. Mycosystema, 2015, 34(4): 761-771.
- [5] SIKORA F J, TONG Z, BEHREND S L, et al. Ammonium removal in constructed wetlands with recirculating subsurface flow: Removal rates and mechanisms [J]. Water Science & Technology, 1995, 32(3): 193-202.
- [6] 马勇,彭永臻,王淑莹. 不同外碳源对污泥反硝化特性的影响[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(6): 820-824.
- MA Y, PENG Y Z, WANG S Y. Sludge denitrification characteristics with different external carbon source [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(6): 820-824.
- [7] 付昆明,曹相生,孟雪征,等. 污水反硝化过程中亚硝酸盐的积累规律[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1660-1664.
- FU K M, CAO X S, MENG X Z, et al. Characteristics of nitrite accumulation during wastewater denitrification [J]. Environmental Science, 2011, 32(6): 1660-1664.
- [8] 李建,潘康成. 不同碳源对反硝化细菌生长的影响[J]. 中国兽药杂志, 2012, 46(6): 11-13.
- LI J, PAN K C. Effect on the growth of denitrifying bacteria from different carbon sources [J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2012, 46(6): 11-13.
- [9] HASHIMOTO S, FURUKAWA K, SHIOYAMA M. Autotrophic denitrification using elemental sulphur [J]. Journal of Fermentation Technology, 1987, 65(6): 683-692.
- [10] WAKI M, YOKOYAMA H, OGINO A, et al. Nitrogen removal from purified swine wastewater using biogas by semi-partitioned reactor [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(13): 5335-5340.
- [11] BOETIUS A, RAVENSCHLAG K, SCHUBERT C J, et al. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane [J]. Nature, 2000, 407: 623-626. DOI: 10.1038/35036572.
- [12] MODIN O, FUKUSHI K, YAMAMOTO K. Denitrification with methane as external carbon source [J]. Water Research, 2007, 41(12): 2726-2738.
- [13] 王晓丽,于建国. 微生物法转化甲烷合成甲醇的研究[J]. 天然气化工, 2008, 4(2): 1-5.
- WANG X L, YU J G. Bioconversion of methane to methanol: Optimum fermentation conditions of strain *Methylobacter*. QJ16 [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2008, 4(2): 1-5.
- [14] ALKALAY D, GUERRERO L, LEMA J M, et al. Review: Anaerobic treatment of municipal sanitary landfill leachates: The problem of refractory and toxic components [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1998, 14(3): 309-320.
- [15] 高景峰,彭永臻,王淑莹,等. 不同碳源及投量对 SBR 法反硝化速率的影响[J]. 给水排水, 2001, 27(5): 55-58.

- GAO J F, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Effects of carbon sources and dosages on the denitrification rate in SBR process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2001, 27(5): 55–58.
- [16] RODRIGUEZ L, VILLASENOR J, FERNNDEZ F J. Use of agro-food wastewater for the optimisation of the denitrification process [J]. *Water Science and Technology*, 2007, 55(10): 63–70.
- [17] 蔡碧婧. 反硝化脱氮补充碳源选择与研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
- CAI B J. Study on choose and optimize of extra carbon source for denitrification [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [18] 张智, 陈杰云, 李勇, 等. 处理低碳源污水的倒置 AAO 工艺强化脱氮技术研究 [J]. *中国给水排水*, 2009, 25(13): 7–12.
- ZHANG Z, CHEN J Y, LI Y, et al. Nitrogen removal from low-carbon wastewater by reversed AAO process [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(13): 7–12.
- [19] FERNNDEZ-NAVA Y, MARANON E, SOONS J, et al. Denitrification of high nitrate concentration wastewater using alternative carbon sources [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1/2/3): 682–688. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.140.
- [20] 高欣东, 冯婧微, 李春华, 等. 水处理过程中外加碳源类型及其影响因素研究进展 [J]. *现代化工*, 2020, 40(s1): 26–32.
- GAO X D, FENG J W, LI C H, et al. Research progress on types of external carbon sources in water treatment process and their influencing factors [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(s1): 26–32.
- [21] 徐楠, 宋广宇, 孙治富, 等. 啤酒废水作为生物质碳源减污降碳实践 [J]. *中外酒业*, 2022(13): 1–4.
- XU N, SONG G Y, SUN Z F, et al. Practice of brewery wastewater as biomass carbon source reducing pollution and carbon emissions [J]. *Global Alcinfo*, 2022(13): 1–4.

(上接第 49 页)

- treatment [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 498: 116–124. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.09.063.
- [30] 钱灏, 张平允, 叶辉, 等. 陶瓷膜应用于饮用水处理市场的分析及展望 [J]. *给水排水*, 2023, 49(1): 142–149.
- QIAN H, ZHANG P Y, YE H, et al. The market analysis and progress of ceramic membrane application for drinking water treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(1): 142–149.
- [31] 谢义忠, 段宇浩, 冯绮澜, 等. 超滤与混凝沉淀单元短流程适配的中试研究 [J]. *工业水处理*, 2015, 35(5): 19–22.
- XIE Y Z, DUAN Y H, FENG Q L, et al. Pilot study on the shortened process by ultrafiltration adapting to conventional coagulation/sedimentation for drinking water treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2015, 35(5): 19–22.
- [32] 陈艳芬, 姬志勇, 贺威, 等. 投加 CO₂ 调节原水 pH 控制铝含量的试验 [J]. *净水技术*, 2023, 42(s1): 80–85.
- CHEN Y F, JI Z Y, HE W, et al. Experiment of adding CO₂ to adjust pH of raw water to control aluminum content [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(s1): 80–85.
- [33] 武珉辉, 刘爽, 钱灏, 等. 上向流活性炭-超滤组合工艺中臭氧投加的中试优化 [J]. *环境工程*, 2021, 39(10): 72–77.
- WU M H, LIU S, QIAN H, et al. Pilot-scale optimization of ozone dosage in up flow activated carbon-ultrafiltration combined process [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(10): 72–77.
- [34] 唐和礼, 张冰, 毛鑫, 等. 人工智能在膜污染研究中的应用进展 [J]. *给水排水*, 2021, 47(7): 134–145.
- TANG H L, ZHANG B, MAO X, et al. Advance in applications of artificial intelligence in the research of membrane fouling [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(7): 134–145.
- [35] CHEW C M, AROUA M K, HUSSAIN M A. A practical hybrid modelling approach for the prediction of potential fouling parameters in ultrafiltration membrane water treatment plant [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2017, 45: 145–155. DOI: 10.1016/j.jiec.2016.09.017.
- [36] NIU C, LI X, DAI R, et al. Artificial intelligence-incorporated membrane fouling prediction for membrane-based processes in the past 20 years: A critical review [J]. *Water Research*, 2022, 216: 118299. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118299.