

姜津铭, 王怡然, 冯俊峰, 等. 酱香型白酒废水典型处理工艺全流程分析[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 72-80, 91.

Lou J M, Wang Y R, Feng J F, et al. Full-process analysis on typical wastewater treatment process of jiangxiangxing baijiu industry [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 72-80, 91.

酱香型白酒废水典型处理工艺全流程分析

姜津铭¹, 王怡然², 冯俊峰³, 龙久圣², 韩义琴², 黄青¹, 曹效鑫^{1,2,*}

(1. 海南大学环境科学与工程学院, 海南海口 570228; 2. 贵州筑信水务环境产业有限公司, 贵州贵阳 550081; 3. 贵州茅台酒股份有限公司, 贵州遵义 564501)

摘要 【目的】针对酱香型白酒废水水质水量波动较大、进水水质成分复杂、处理难度大的特点,以贵州省某酱香型白酒废水处理工程为例,探讨了废水处理工艺、主要设计参数和运行效果等,并在此基础上,分析总结化学需氧量(COD)、氨氮、总氮(TN)、总磷(TP)及悬浮物(SS)等污染物特性及去除效果,以期对酱香型白酒废水处理工程建设及优化运行提供技术支撑。

【方法】本文针对酱香型白酒废水处理实际工程,开展工艺全流程采样分析,详细研究不同取酒轮次的废水水质特征,采用标准试验筛和三维荧光光谱分析酱香型白酒废水中的总悬浮固体(TSS)以及溶解性有机物(DOM)变化特征,探讨了沿程污染物去除率。提出了运行工艺精细化控制策略,并对预处理、上流式厌氧污泥床(UASB)、深度处理等工艺单元提出优化建议。

【结果】本工程中的废水水质随取酒轮次增加呈现逐渐升高后降低的规律性变化,在第6轮次各污染物浓度达到最大值,废水中2~5 mm与0.3~2.0 mm的杂质为TSS的主要组成,废水中DOM以腐植酸类物质、微生物溶解性代谢产物及富里酸类物质为主。该组合处理工艺对COD、氨氮、TN、TP、SS的去除率均在95%以上,生化处理段出水DOM总荧光强度降低47.26%。

【结论】该组合工艺具有较好去除效果,但转鼓格栅、UASB及深度处理单元可进一步优化,以获得更稳定的出水水质。

关键词 酱香型白酒废水 上流式厌氧污泥床(UASB) 改良AAO池 处理效能

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)05-0072-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.010

Full-Process Analysis on Typical Wastewater Treatment Process of Jiangxiangxing Baijiu Industry

Lou Jinming¹, Wang Yiran², Feng Junfeng³, Long Jiusheng², Han Yiqin², Huang Qing¹, Cao Xiaoxin^{1,2,*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. Guizhou Zhuxin Water Environment Industries Co., Ltd., Guiyang 550081, China;

3. Kweichow Moutai Co., Ltd., Zunyi 564501, China)

Abstract [Objective] In view of the large fluctuation of wastewater quality and quantity, complex wastewater quality components and difficult treatment of jiangxiangxing baijiu, a wastewater treatment project of a jiangxiangxing baijiu industry in Guizhou is taken as an example. The wastewater treatment process, main design parameters and operation effects are discussed. A refined control strategy for operation processes is proposed. On this basis, the characteristics and removal effects of pollutants such as chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and suspended solid (SS) are analyzed and summarized, providing technical support for the construction and optimized operation of jiangxiangxing baijiu industry. [Methods] This paper focused on the actual project of jiangxiangxing baijiu wastewater, carried out sampling and analysis of the entire process, and studied in detail the water quality characteristics of wastewater from different brewing cycles. Standard test sieves and three-dimensional fluorescence spectroscopy were used to analyze the changes in total suspended solids (TSS) and dissolved organic matter (DOM) in jiangxiangxing baijiu wastewater. The efficiency of pollutant removal along the process was discussed. A refined control strategy for

[收稿日期] 2025-04-15

[基金项目] 海南省重点研发项目(ZDYF2022SHFZ322)

[作者简介] 姜津铭(2005—),男,研究方向为污水处理技术,E-mail:3326324974@qq.com。

[通信作者] 曹效鑫(1983—),男,正高级工程师,主要从事污水处理资源化研发产业化工作,E-mail:75945865@qq.com。

operation processes was proposed, and optimization suggestions were proposed for pretreatment, upflow anaerobic sludge bed (UASB), and deep treatment process units. [Results] The wastewater quality concentration of the wastewater gradually increased with the increase of brewing rounds. In the sixth round of brewing, the concentration of each pollutant reached its maximum. The TSS of baijiu wastewater was dominated by impurities with particle size of 2–5 mm and 0.3–2.0 mm, and the DOM of baijiu wastewater was dominated by humic acids, microbial soluble metabolites, and fulvic acids. The combined process removed more than 95% of COD, ammonia nitrogen, TN, TP, SS and the total fluorescence intensity of the effluent DOM from the biochemical processing section was reduced by 47.26%. [Conclusion] The combined process has a good removal effect. However, the drum screen, UASB and deep treatment unit can be further optimized to achieve a more stable effluent.

Keywords jiangxiangxing baijiu wastewater upflow anaerobic sludge bed (UASB) improved AAO tank treatment efficiency

白酒在我国传统文化中占有独特地位,也是重要的轻工产业^[1],然而白酒生产过程中伴随着大量废水的产生。白酒废水若不得到妥善处理,会对生态环境造成严重破坏,甚至导致当地独特的微生物环境发生改变,对白酒行业造成损害^[2-3]。贵州地区赤水河流域是世界酱香型白酒的核心产区,酱香型白酒生产包括2次投料和7次取酒环节,整个流程持续时间约为1年。酱香型白酒废水浓度高、色度深、成分复杂,用单一的工艺来处理,其出水水质无法满足达标排放要求,因此通常将各种处理工艺单元进行组合,形成联用处理工艺^[4-5]。

目前,酱香型白酒废水处理工程主要采用“预处理+厌氧处理+主体生化处理+深度处理”的组合工艺,已有的酱香型白酒废水处理相关研究多集中在单一工艺去除能力分析或工程实例介绍^[6-8],而对酱香型白酒废水不同轮次水质变化规律、各工艺段去除效能的研究较少,一定程度上制约了酱香型白酒废水处理工艺的针对性设计和优化运行。

基于此,本文以某典型酱香型白酒废水处理实际工程为对象,在介绍该工程概况、实际运行效果等的基础上,开展工艺全流程采样,对高轮次酱香型白

酒废水水质变化进行分析,采用三维荧光光谱分析酱香型白酒废水溶解性有机物(DOM)变化特征,并对主要工艺段污染物去除率进行分析,提出建议,以期对酱香型白酒废水处理工程建设及优化运行提供技术支撑。

1 工程概况

该工程位于贵州省赤水河流域,主要用于处理生产厂区的生产废水(锅底水、窖底水、清洗水等)及生活污水,设计处理规模为3 000 m³/d,其中生产废水为2 500 m³/d,生活污水为500 m³/d。工程于2013年建成投入使用,出水水质执行《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)表4一级排放标准。

随着国家政策法规、流域保护要求的提高以及厂区排水状况的变化,该工程于2020年进行提标改造,新增上流式厌氧污泥床(UASB)反应器、纤维转盘滤池、溶气气浮机,改造了好氧池、风机房等设施,现厂区出水水质执行《发酵酒精和白酒工业水污染物排放标准》(GB 27631—2011)表3直接排放标准,处理尾水排放入河。该工程设计进出水水质如表1所示。

表1 设计进、出水水质
Tab. 1 Design Influent and Effluent Quality

项目	化学需氧量(COD)/ (mg·L ⁻¹)	五日生化需氧量(BOD ₅)/ (mg·L ⁻¹)	悬浮物(SS)/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	总氮(TN)/ (mg·L ⁻¹)	总磷(TP)/ (mg·L ⁻¹)	pH值	色度(倍)
设计进水水质	≤8 000	≤3 500	≤3 000	≤150	≤300	≤60	5~8	≤250
设计出水水质	≤50	≤20	≤20	≤5	≤15	≤0.5	6.0~9.0	≤20

2 污水处理工艺

2.1 原水水质分析

与一般工业废水不同,酱香型白酒废水由于酿造工艺特点,历经多次蒸煮和发酵,水量水质波动大^[9]。在下沙环节水质处于低谷期,进入取酒环节

后,污染物浓度逐渐增加,呈现典型周期性变化。

各轮次酱香型白酒废水水质指标平均浓度如表2所示。酱香型白酒废水水质呈酸性,pH值约为5.0。根据历史监测数据及本次水质监测时发现,第1~3轮次取酒环节废水水质处于较低水平,进水

COD 平均质量浓度低于 2 000 mg/L, TN 平均质量浓度低于 50 mg/L, TP 平均质量浓度低于 10 mg/L。

表 2 酱香型白酒废水水质平均浓度

Tab. 2 Average Concentration of Jiangxiangxing Baijiu Wastewater Quality

轮次	pH 值	COD/(mg · L ⁻¹)	氨氮/(mg · L ⁻¹)	TN/(mg · L ⁻¹)	TP/(mg · L ⁻¹)	SS/(mg · L ⁻¹)
第 1 轮次	5.56	1 453	11.0	17	6.07	87
第 2 轮次	5.18	1 917	15.9	29	7.44	121
第 3 轮次	5.67	2 593	37.1	56	12.70	161
第 4 轮次	5.42	3 632	56.9	109	29.50	383
第 5 轮次	5.40	5 967	87.7	173	56.70	485
第 6 轮次	5.01	7 783	148.0	295	96.70	761
第 7 轮次	5.00	3 992	77.5	153	82.30	390

第 4~6 轮次污染物浓度进入高峰期, COD、氨氮、TN、TP 及 SS 指标浓度随酿酒轮次增加, 在第 6 轮次各项指标进水浓度达到最大值, 其中 COD 质量浓度为 7 783 mg/L, 氨氮质量浓度为 148.0 mg/L, TN 质量浓度为 295 mg/L, TP 质量浓度为 96.70 mg/L, SS 质量浓度为 761 mg/L。因此, 第 4~7 轮次期间, 酱香型白酒废水处理工程运营压力较大, 也是出水稳定达标的阶段, 因此本文中主要分析第 4~7 轮次污染物的去除情况。

此外, 酱香型白酒废水中含有大量 SS, 其主要来源于粮食破碎、润湿粮食、清洗及摊晾过程

中的清洗水^[10]。酱香型白酒废水总悬浮固体 (TSS) 不同粒径区间分布如图 1 所示, 5.0 mm 筛网的筛上物主要为较大颗粒的高粱籽, 2.0 mm 筛网的筛上物主要为较小颗粒高粱籽及高粱壳, 而 0.2、0.3 mm 筛网的筛上物主要为粮食破碎后较小的颗粒、酒糟及其他纤维类物质等。根据第 4~7 轮次的 TSS 粒径分布分析, 酱香型白酒废水中 2.0~5.0 mm 与 0.3~2.0 mm (不含 2.0 mm) 的杂质为 TSS 的主要组成, 其平均占比分别为 48.95% 与 33.25%。随着酿酒轮次增加, TSS 粒径有减少的趋势。

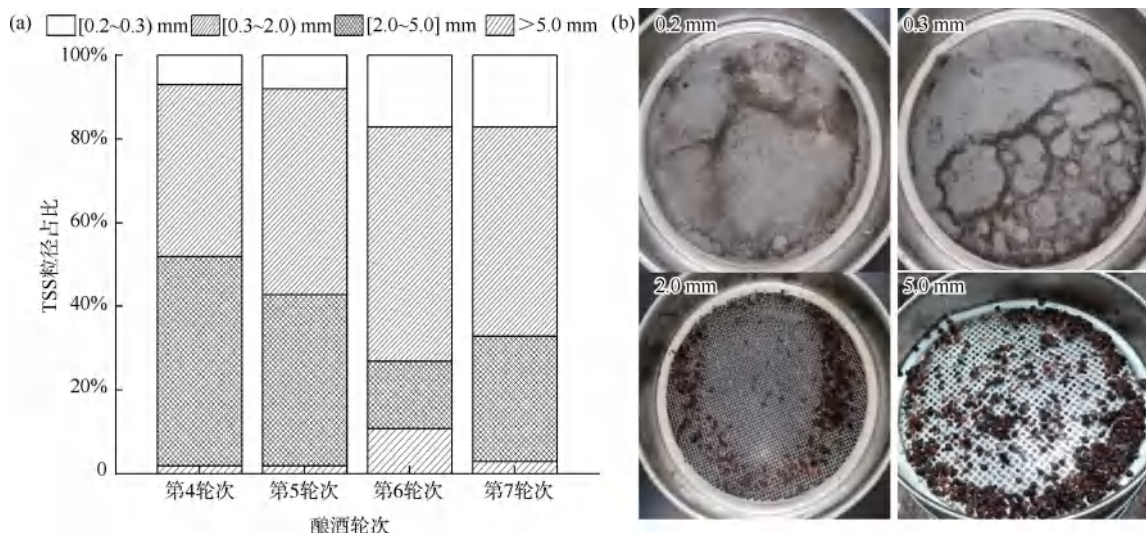


图 1 酱香型白酒废水 TSS 不同粒径区间质量分布

Fig. 1 Mass Distribution of Jiangxiangxing Baijiu Wastewater TSS in Different Particle Sizes Ranges

2.2 工艺流程

该工程的工艺流程为“预处理+水解酸化池+UASB 反应器+改良厌氧-缺氧-好氧 (AAO) 工艺+纤维转盘滤池+一体化净水器”的组合工艺。工艺流程如图 2 所示。

预处理段设置转鼓格栅、旋转微滤机、溶气气浮机等多级工段, 用于去除污水中 SS、部分 COD 及 TP, 减轻后续处理系统负荷。随后废水进入水解酸化池及 UASB 反应器, 利用厌氧菌降解大部分有机物, 同时为避免 UASB 反应器因水质水量波动造成

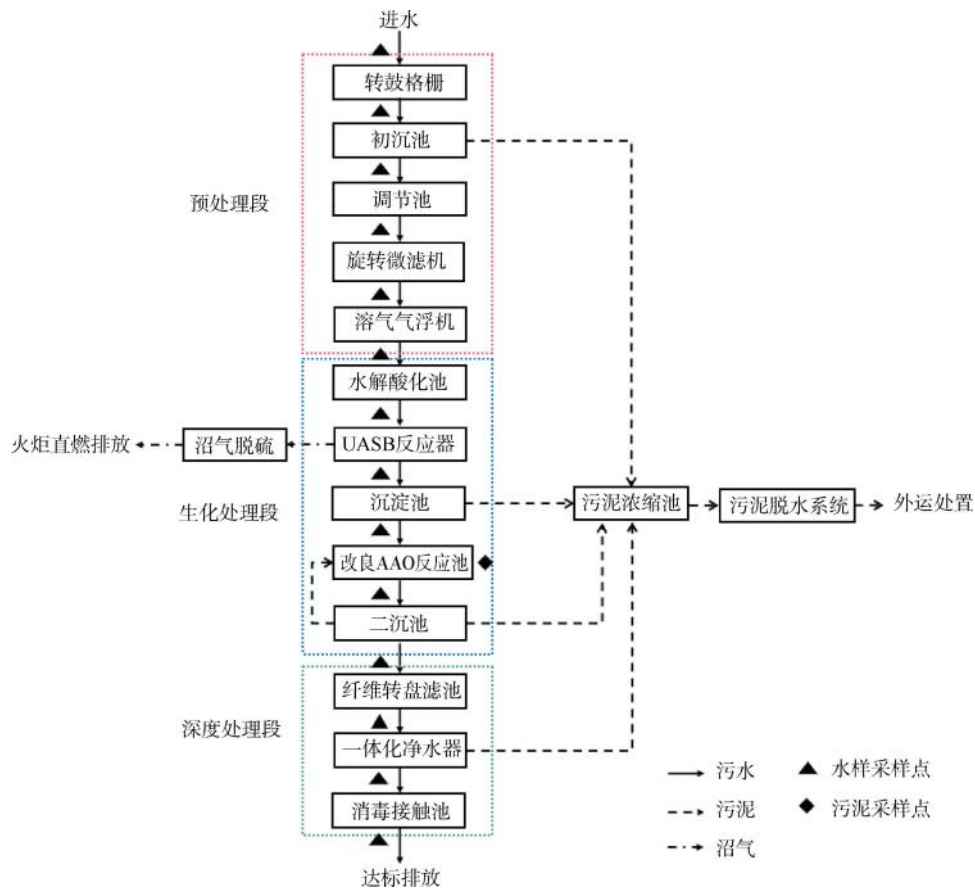


图2 酱香型白酒废水处理工艺流程

Fig. 2 Process Flow for Jiangxiangxing Baijiu Wastewater Treatment

跑泥,UASB 反应器后设置沉淀池。沉淀池出水进入改良 AAO 池,完成对 COD、氨氮、TN、TP 等主要污染物的降解。生化池出水进入纤维转盘滤池、一体化净水器,进一步去除 TP、SS 及色度,最终达标排放。

3 主要工艺参数

设置转鼓格栅 1 台,转鼓直径为 1 100 mm,栅条间隙为 0.5 mm;旋转微滤机 2 台,栅缝为竖条形,进水方式采用内进水,栅条间隙为 0.3 mm,网筒直径为 1 200 mm;溶气气浮机 2 台,由气浮箱体、链式刮泥系统、溶气泵、浮渣收集和排出系统等组成,单台处理能力为 70 ~ 80 m³/h,设计停留时间为 15 min,溶气水回流量为 25 ~ 28 m³/h,溶气水回流比为 30% ~ 40%,阳离子聚丙烯酰胺(PAM)投加质量浓度为 50 mg/L, Na₂CO₃ 投加质量浓度为 100 mg/L。

UASB 反应器为钢混结构,共 1 座 2 组,包括进

水和配水系统、反应器的池体和三相分离器,设计停留时间为 55.6 h,设计容积负荷为 6 kg COD/(m³ · d),配套设置沼气一体式内燃火炬,产生的沼气通过沼气过滤器、安全水封罐和沼气脱硫罐后,在沼气火炬处燃烧排放。

改良 AAO 池采用厌氧-1#缺氧-1#好氧-2#缺氧-2#好氧的 5 段工艺,共 4 组,单组容积为 6 740.76 m³,各段池容比为 1 : 1 : 2 : 1 : 1,采用并联运行方式。进水方式采用单组单独进水,出水采用栅型稳流板的方式。设计停留时间为 53.9 h,设计容积负荷为 1.0 kg BOD₅/(m³ · d),污泥质量浓度控制在 3 500 mg/L。

纤维转盘滤池 1 套,设计停留时间为 2.7 h,过滤转盘数量为 2 ~ 20 个,每个过滤转盘由 6 分片扇形组成,以纤维毛滤布为过滤介质,形成有效过滤深度为 3 ~ 5 mm、孔径为 10 μm 的过滤层。盘片外径为 2 200 mm,有效过滤直径为 2 000 mm,过滤面积

为 $6 \text{ m}^2/\text{单盘}$, 过滤速度为 $8 \sim 11 \text{ m}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 。当滤布附着污泥增加, 阻力变大, 水位上升到一定液位, 将自动启动反冲洗装置。

一体化净水器 2 台, 分为混凝反应、气浮分离及过滤 3 个功能区。混凝反应区投加 PAM、聚合氯化铝(PAC)、次氯酸钠, 气浮分离采用微气泡气浮, 过滤区介质为石英砂。混凝沉淀区停留时间为 19 min, 气浮区停留时间为 36 min, 分离负荷为 $4.1 \text{ m}^3/\text{h}$, 滤速为 $7.8 \text{ m}/\text{h}$ 。

4 工程运行效果分析

4.1 总体处理效果

监测结果显示, 各酿酒轮次出水水质平均浓度如表 3 所示, 各项指标浓度均达到《发酵酒精和白酒工业水污染物排放标准》(GB 27631—2011) 表 3 直接排放标准。在进水浓度最高的第 6 轮次, COD、氨氮、TN、TP 的去除率分别为 99.47%、98.92%、95.53%、99.86%, 表明该工艺对酱香型白酒废水的整体处理效果较好。

表 3 酱香型白酒废水出水指标平均浓度
Tab. 3 Average Concentration of Effluent Indices in Jiangxiangxing Baijiu Wastewater

轮次	pH 值	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
第 1 轮次	7.20	13.0	0.56	2.35	0.07
第 2 轮次	7.19	15.6	0.48	1.19	0.04
第 3 轮次	7.40	26.8	0.63	3.29	0.05
第 4 轮次	7.50	42.5	0.71	8.89	0.23
第 5 轮次	7.63	46.5	1.43	9.96	0.13
第 6 轮次	7.55	41.5	1.60	13.20	0.14
第 7 轮次	7.53	34.0	1.14	6.68	0.05

4.2 污染物沿程去除效果分析

污染物沿程去除效果可为处理工艺的运行状态及调控提供依据。根据工艺功能区的划分, 分别在进水、预处理段(溶气气浮机)、厌氧处理段(UASB 反应器、沉淀器)、生物处理段(改良 AAO 池、二沉池)以及深度处理段(一体化净水器)进行沿程取样检测, 具体结果如图 3 所示。

“UASB+沉淀器”工艺段的 COD 整体去除率维持在 80%~97%, 最高去除率为 96.71%, 保障了后端生化系统的稳定运行。但现场监测结果显示, UASB 出水 SS 浓度波动较大, 在水量水质较低的第 4 轮次, UASB 反应器出水 SS 质量浓度基本维持在

200 mg/L 以下。进入第 5 轮次后, UASB 反应器出现跑泥现象, 出水 SS 质量浓度逐渐升高, 最高达 4 700 mg/L。调研发现, UASB 反应器出现跑泥现象的原因主要有以下几点: ①反应器布水结构为小口径支管布水, 进水布水管存在堵塞的情况, 导致反应器内布水不均; ②反应器内污泥为絮状污泥, 污泥的沉降性能较差, 与原设计的颗粒污泥不符; ③上部三相分离器的效果较差。为避免高 SS 带泥水直接进入后续生化系统, UASB 后设置沉淀器、气浮等后端 SS 去除环节, 仅是对 UASB 反应器跑泥现象的一种工程保障措施, 应进一步研究适应酱香型白酒废水水质水量波动条件下的 UASB 反应器调控策略及优化运行参数, 从根本上解决 UASB 反应器运行问题。

改良 AAO 池进行了剩余大部分有机物的降解, 经过微生物脱氮除磷及其生长代谢后, 出水 COD 质量浓度多维持在 50~80 mg/L, 平均去除率为 85.59%, TP 平均去除率为 68.14%, 其可去除大部分 COD、TP, 但出水 COD、TP 浓度仍均未达到排放标准, 需要在深度处理环节进一步去除。出水氨氮质量浓度可稳定在 1~3 mg/L, 平均去除率为 95.62%; 出水 TN 质量浓度可稳定在 10 mg/L 以下, 平均去除率为 90.80%。改良 AAO 池是 TN、氨氮污染物的主要处理单元, 且出水指标可直接到达排放标准。

纤维转盘+一体化净水器对 TP 去除效率较好, 出水质量浓度多在 0.05~0.30 mg/L, TP 平均去除率为 78.07%。但纤维转盘+一体化净水器对 COD 去除率较低, COD 平均去除率仅为 20.86%。

4.3 DOM 去除效果

DOM 是蛋白质、腐殖质和芳香族有机化合物的复杂混合物, 可作为重金属、持久性有机污染物的载体, 对这些物质在水体中的迁移、转化起着重要作用^[11-12], 三维荧光光谱可反映 DOM 的类别、性质及来源等信息^[13]。由图 4(a)可知, 原水中含有 3 类荧光峰, 分别是腐植酸类峰 T1 ($\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 290 \text{ nm}/350 \text{ nm}$)、溶解性微生物有机物峰 T2 ($\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 340 \text{ nm}/420 \text{ nm}$) 和富里酸类峰 T3 ($\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 240 \text{ nm}/435 \text{ nm}$)^[14-15], 荧光强度分别为 1 429.87、1 194.72 和 952.68。

酱香型白酒废水中腐植酸类物质(V 区域)是主要的 DOM, 相对含量占比为 62.14%, 其化学结构比较复杂, 主要由相对稳定、分子量大的芳香性有机

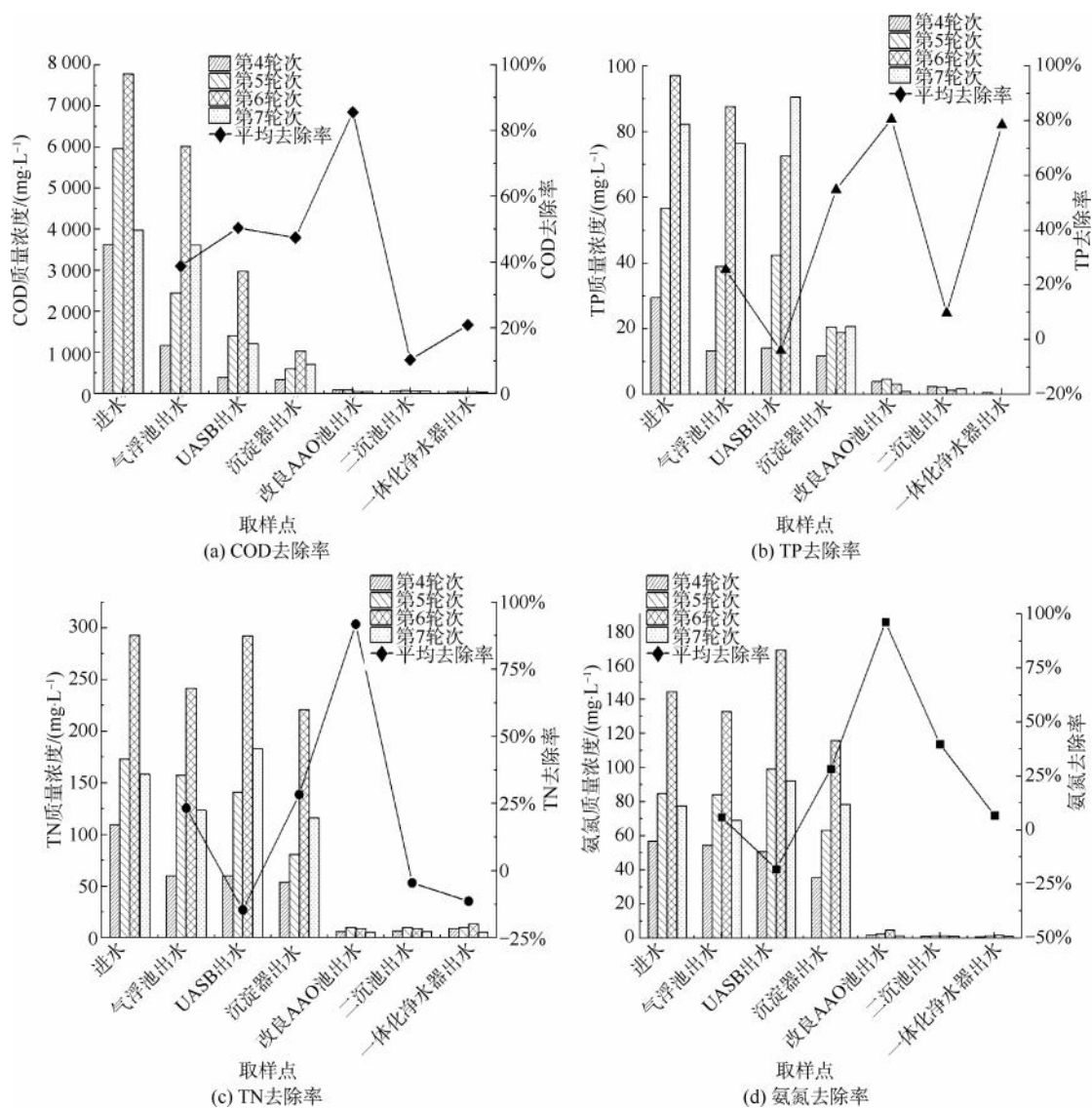


图3 污染物沿程去除分析

Fig. 3 Contaminants Removal Analysis along Whole Wastewater Treatment Process

物组成,不易被微生物利用或降解^[16]。溶解性微生物代谢产物(Ⅳ区域)和富里酸类物质(Ⅲ区域)次之,相对含量占比分别为18.20%和14.13%。预处理段出水三维荧光光谱图如图4(b)所示,与原水相比,腐植酸类峰T1与溶解性微生物有机物峰T2的荧光强度减弱,同时富里酸类峰T3消失,富里酸类物质(Ⅲ区域)相对含量占比由进水的14.13%降低至10.61%,说明酱香型白酒废水有机污染负荷得到一定程度降低。

生化处理段出水三维荧光如图4(c)所示。生化处理段出水中溶解性微生物有机物峰T2消失,与原水相比,总荧光强度降低47.26%,说明厌氧-

生化处理段对酱香型白酒废水中DOM具有较好的去除效果。但仍存在以腐植酸类物质为主的难降解物质进入深度处理段,虽然现阶段总出水可以满足达标需求,但由于深度处理段为“纤维转盘滤池+一体化净水器(气浮+滤池)”,为难降解有机物去除功能,为更好地满足工艺稳定性以及应对后续更高的水质提标需求,可在深度处理段增加高级氧化或其他针对性工艺段,进一步提高生化出水中难降解有机物的去除率^[17]。

研究^[18-19]表明,在酿酒过程中,使用的主要原料有高粱,高粱表皮中富含单宁,高粱单宁是由五倍子酸、间苯二酚、间苯三酚以及其他酚衍生物组成的

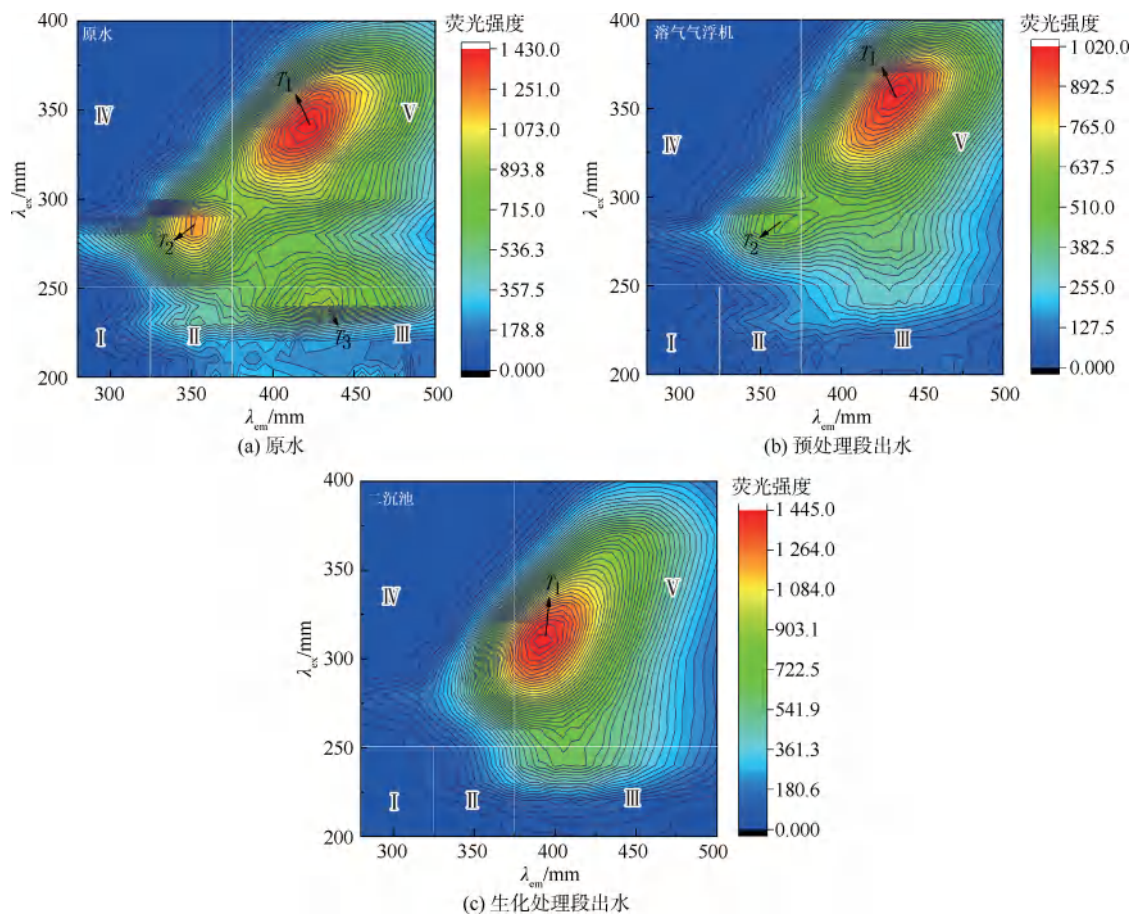


图4 酱香型白酒废水三维荧光光谱

Fig. 4 3D Fluorescence Spectra of Jiangxiangxing Baijiu Wastewater

复杂混合物。高粱经发酵、蒸馏后产生的酿酒废水中主要有机物包括糖类、醇类、维生素和单宁等。经过厌氧、好氧生物处理后,糖类、醇类等易生物降解物质基本被去除,单宁类物质在活性污泥法等生化处理工艺中去除率较低,在生化出水有机物中的比例很高,导致出水具有一定的色度。而酱香型白酒由于酿造工艺特点,对酒糟进行多次酿造,尤其在第4~7轮次污染物浓度进入高峰期,在第6轮次各项指标进水浓度达到最大值,经厌氧、好氧生物处理后,COD和色度可能依旧很高。研究^[19-21]表明,导致酿酒废水处理过程中腐植酸类DOM升高的一个重要因素可能是高粱单宁的释放,相关转化过程受到氧化条件、微生物活动及水质特性等多种因素的复杂影响。单宁分子在氧化条件(如曝气)下,通过酶或非生物催化,发生聚合反应,形成更大、更复杂的类腐殖质分子;臭氧催化氧化可进一步使单宁、类腐植酸等转化为可生物降解有机物,如醛类、醇类及

小分子有机酸类物质。此外,生物作用能明显改变有机物的特性使其在相对分子质量、分子结构、聚合度等方面发生显著变化。经处理后DOM的共轭不饱和双键或芳香性有机碳相对含量增多,聚合度、腐殖化程度增加,相对分子质量有增大趋势。以上过程均可使小分子单宁转化为高分子量、高芳香度的类腐植酸,导致DOM中此类组分占比升高。

上述结论对优化酱香型白酒废水处理工艺具有一定的指导意义,在预处理或生物处理单元,通过调控曝气工艺参数或引入高效降解菌株,有可能引导单宁向易于去除的腐殖质方向转化;此外,对生化出水进行深度处理(如高级氧化、活性炭吸附)等,可进一步提升酱香型白酒废水处理系统效率和稳定性。

5 运行工艺精细化控制策略

酱香型白酒废水的高效处理是实现白酒行业绿色发展的关键环节,针对酱香型白酒废水水质水量波动较大、进水水质成分复杂、处理难度大的特点,

以及如何结合轮次水质规律,文章提出一套运行精细化工艺控制策略或动态调控模型,进一步指导工程实践,具有重要的意义。基于酱酒“7个轮

次”酿造的生产规律,废水水质呈现明显的阶段性特征。有效的处理策略是建立动态的、精细化的工艺控制模型,其核心思路如图5所示。

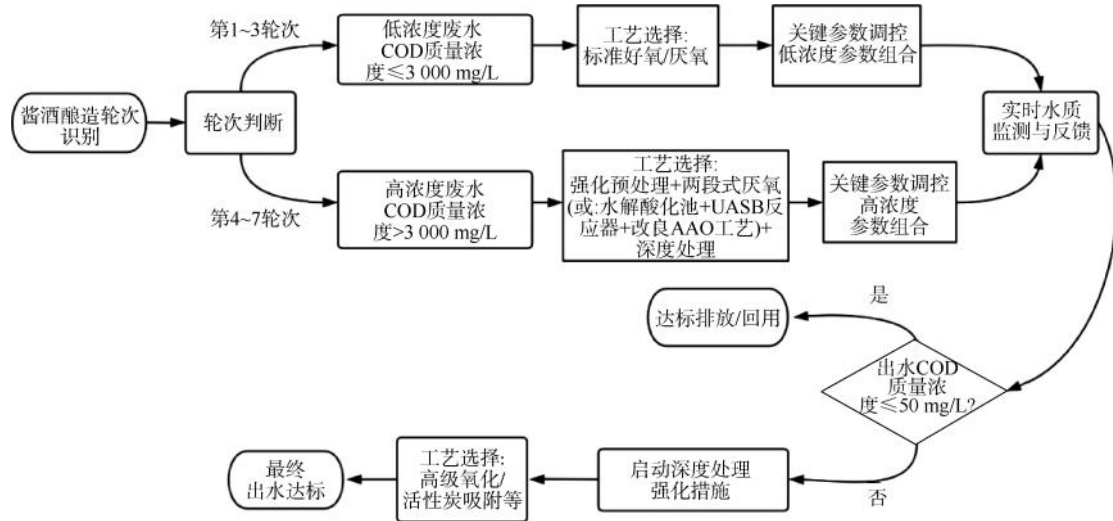


图5 精细化控制策略流程

Fig. 5 Flow of Refined Control Optimization Strategy

图5展示了从识别酿造轮次开始,到最终实现达标排放的动态调控过程主要是依据进水COD浓度来决定后续工艺路线和参数的选择。

第1~3轮次(下沙、造沙阶段):产生的废水浓度较低,COD质量浓度通常在3000 mg/L以下。

第4~7轮次(取酒阶段):开始产生极高浓度的窖底水,其COD质量浓度峰值可超过8000 mg/L,混合后的综合废水浓度也显著升高。

工艺参数调整策略:针对不同浓度的来水,需采用差异化的工艺路线和参数调控,核心目标是维持生化系统的稳定性和整个工艺处理效率。

针对高浓度废水(第4~7轮次):如上述流程所示,需采用“强化预处理+两段式厌氧(或:水解酸化池+UASB反应器+改良AAO工艺)+深度处理”的组合工艺,并针对核心单元,通过优化设备参数,如格栅粗细、运行方式、水力停留时间、pH及药剂投加量来应对高负荷冲击。

通过建立这种基于轮次水质规律的动态调控模型,酱香型白酒废水处理可以从一种被动、粗放式的治理,转变为主动、精细化的资源化与治理相结合的过程。

6 运行成本

酱香型白酒废水由于受酿酒工艺特点的影响,

进水水质水量波动较大,因此其运行成本也存在一定波动;该工程案例自运行以来,出水水质保持稳定,直接运行成本主要包括电费、药剂费、人工费等。其中电费约占成本的25%,为3~4元/t,主要耗能设备包括鼓风机、水泵、搅拌器等。药剂费约占成本的60%,为7~9元/t,主要药剂包含除磷剂、絮凝剂、碳源、碱液等。人工费约占成本的15%,为1.5~2.0元/t,主要为20~25名运管人员工资。总核算处理成本为11.5~15.0元/t。

7 结论

酱香型酒废水水质随酿酒轮次增加,呈逐渐升高后降低的规律性变化。第6轮次各污染物浓度达到最高,COD、TP、TN、氨氮、SS质量浓度分别为7783、96.70、295、148.0、761 mg/L。原水中2~5 mm与0.3~2.0 mm的杂质为TSS的主要组成,DOM主要为腐植酸类物质、溶解性微生物代谢产物和富里酸类物质,其占比分别为62.14%、18.20%及14.13%。

“预处理+UASB+改良AAO池+深度处理”的组合工艺去除效果较好,对COD、氨氮、TN、TP的去除率分别为99.47%、98.92%、95.53%、99.86%,各项指标出水浓度均达到《发酵酒精和白酒工业水污染物排放标准》(GB 27631—2011)表3直接排放标准。

虽现状处理工艺能满足达标需求,但仍存在转鼓格栅 SS 去除率极低、UASB 反应器跑泥、深度处理段无难降解有机物去除环节弱等问题。针对上述问题,对酱香型白酒废水处理工艺设计提出如下优化建议:加强预处理段对 SS 的去除,减小后续构筑物负荷;改进厌氧处理系统,减少跑泥现象;深度处理段可考虑增设高级氧化、活性炭吸附等,进一步去除废水中难降解有机污染物。

参考文献

- [1] Liu H L, Sun B G. Effect of fermentation processing on the flavor of Baijiu[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(22): 5425-5432.
- [2] Dai Y J, Tian Z Q, Meng W N, et al. Microbial diversity and physicochemical characteristics of the Maotai-flavored liquor fermentation process[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2020, 20(7): 4097-4109.
- [3] Ratna S, Rastogi S, Kumar R. Current trends for distillery wastewater management and its emerging applications for sustainable environment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 290: 112544. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112544.
- [4] 祁佳. 酱香型白酒废水 COD 组分表征及治理工艺优化[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2022.
- Qi Q. Characterization of COD components in Maotai-flavor liquor wastewater and optimization of treatment process [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2022.
- [5] 刘莉, 苏建, 张富勇, 等. 膜技术处理酿酒废水及资源回收的研究进展[J]. *酿酒科技*, 2022(4): 90-95, 100.
- Liu L, Su J, Zhang F Y, et al. Research progress in membrane technology for liquor-making wastewater treatment and resource recovery[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2022(4): 90-95, 100.
- [6] 黄生林, 陈小光, 马春燕, 等. 我国白酒废水处理工艺探讨[J]. *中国酿造*, 2023, 42(3): 28-33.
- Huang S L, Chen X G, Ma C Y, et al. Discussion on the treatment technology of Baijiu wastewater in China[J]. *China Brewing*, 2023, 42(3): 28-33.
- [7] 钟星, 曹建平, 杜兵, 等. 某酱香型白酒生产废水处理工程设计实例[J]. *给水排水*, 2022, 48(4): 61-67.
- Zhong X, Cao J P, Du B, et al. Engineering design example of wastewater treatment in Maotai-flavor Liquor Production [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(4): 61-67.
- [8] 王曦, 朱羽廷, 梁郡. 贵州大规模集中处理酱香型白酒废水处理厂设计及运行[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(18): 61-66.
- Wang X, Zhu Y T, Liang J. Design and operation of the large-scale centralized sauce-flavor liquor brewing wastewater treatment plant in Guizhou [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(18): 61-66.
- [9] 陈用泷, 方伟, 李思阳, 等. 响应面法优化零价铁活化过硫酸盐处理酱香型白酒废水[J]. *工业水处理*, 2024, 44(1): 119-125.
- Chen Y S, Fang W, Li S Y, et al. Optimization of zero-valent iron activated persulfate treatment of liquor wastewater by response surface method[J]. *Industrial Water Treatment*, 2024, 44(1): 119-125.
- [10] Chowdhary P, Raj A, Bharagava R N. Environmental pollution and health hazards from distillery wastewater and treatment approaches to combat the environmental threats: A review[J]. *Chemosphere*, 2018, 194: 229 - 246. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.11.163.
- [11] 薛柯妮, 佟娟, 何友文, 等. 工业园区污水厂处理过程中溶解性有机物的三维荧光特征分析[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(11): 3618-3628.
- Xue K N, Tong J, He Y W, et al. Characteristics of dissolved organic matter by three-dimensional fluorescence analysis during wastewater treatment process in industrial parks [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(11): 3618-3628.
- [12] 何席伟, 高洁, 张徐祥, 等. 焦化废水生化处理过程中溶解性有机物及毒性变化规律[J]. *环境监控与预警*, 2022, 14(2): 15-24, 31.
- He X W, Gao J, Zhang X X, et al. Changes of dissolved organic matter and toxicity of coking wastewater during biochemical treatment [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2022, 14(2): 15-24, 31.
- [13] 余羿琼, 周翠红, 冯书耕, 等. 外源性物质对消化沼液中 DOM 光谱特征的影响[J]. *环境工程学报*, 2025, 19(2): 364-372.
- Yu Y Q, Zhou C H, Feng S G, et al. Effects of exogenous substances on the spectral characteristics of DOM in digested biogas slurry[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2025, 19(2): 364-372.
- [14] 梁月清, 刘会来, 崔康平, 等. 基于三维荧光光谱-平行因子分析法的工业园区污水溶解性有机物溯源与归趋[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(4): 1238-1247.
- Liang Y Q, Liu H L, Cui K P, et al. Tracing and regression of dissolved organic matter in wastewater from the industrial park based on 3D-fluorescence spectrum-parallel factor analysis [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(4): 1238-1247.
- [15] 钟雄, 艾佳, 李彦澄, 等. 基于 MBBR 技术的白酒窖底废水与低 C/N 生活污水协同处理系统的构建及功能微生物分析[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(3): 1008-1018.
- Zhong X, Ai J, Li Y C, et al. Construction of a MBBR-based

(下转第 91 页)

- lithium chloride solution applied β -FeOOH as adsorbent [J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2025(1): 6-10, 65.
- [37] Boussouga Y A, Joseph J, Stryhanyuk H, et al. Adsorption of uranium (VI) complexes with polymer-based spherical activated carbon[J]. Water Research, 2024, 249: 120825. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120825.
- [38] 王玉罡, 张卫民, 陈家鸿, 等. 钙铁基磷酸盐复合材料(CFP(CC))对U(VI)的吸附性能[J]. 材料导报, 2022, 36(14): 112-119.
Wang Y G, Zhang W M, Chen J H, et al. Adsorption performance of Ca/Fe-phosphate composites (CFP(CC)) on U(VI)[J]. Materials Review, 2022, 36(14): 112-119.
- [39] 郭美希, 薄雪, 李新程, 等. EDTA 改性沸石吸附氨氮特性及对稻田土壤微环境的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报, 1-14 [2026-04-03]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0533>.
Guo M, Bo X, Li X, et al. Characteristics of ammonia nitrogen adsorption by EDTA-modified zeolite and its effect on the microenvironment of paddy soil[J]. Journal of Jilin Agricultural University; 1-14. [2026-04-03]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0533>.
- [40] Wang H B, Gui H, Yang W R, et al. Ammonia nitrogen removal from aqueous solution using functionalized zeolite columns[J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(4/5/6): 753-758. DOI: 10.1080/19443994.2013.827316.
- [41] 黄添浩, 王趁义, 徐耀阳, 等. 改性绿沸石的制备及其吸附氨氮的性能研究[J]. 非金属矿, 2019, 42(2): 20-23.
Huang T H, Wang C Y, Xu Y Y, et al. Study on modification of green zeolite and its adsorption of ammonia nitrogen[J]. Non-Metallic Mines, 2019, 42(2): 20-23.
- [42] 陶永江. PRB 组合填料处理酸性老窑水的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
Tao Y J. Experimental study on the treatment of acid mine drainage by PRB combined filtration percolation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
-
- (上接第 80 页)
- synergic treatment system for Baijiu pits bottom wastewater and low C/N domestic sewage and analysis on its functional microbes [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(3): 1008-1018.
- [16] Shi Y F, Shen N L, Li Y W, et al. Characteristics of DOM in sewage treatment of 14 AAO processes[J]. Environmental Science, 2020, 742: 140654. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140654.
- [17] 于鹏, 秦立国. 高级氧化技术在难降解有机废水处理中的应用研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(3): 123-125.
Yu P, Qin L G. Research progress on the application of advanced oxidation processes in the treatment of refractory organic wastewater[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2025, 43(3): 123-125.
- [18] 崔迎, 赵伟伟, 褚文玮. 臭氧+生物滤池组合工艺深度处理酿酒废水应用研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(11): 100-102, 110.
Cui Y, Zhao W W, Chu W W. Combined process of ozonation-biofilter for advanced treatment of distilled spirit wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(11): 100-102, 110.
- [19] 李圣斐. 微气泡臭氧非均相催化氧化工艺深度处理复糟酱香型白酒废水[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
Li S F. Advanced treatment of compound glutinous sauce-flavor liquor wastewater by microbubble ozone heterogeneous catalytic oxidation process[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [20] Zhang Y C, Zhang H Q, Dong X W, et al. Effects of oxidizing environment on digestate humification and identification of substances governing the dissolved organic matter (DOM) transformation process[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2022, 16(8): 99.
- [21] 任武昂, 金鹏康, 石彦丽. 污水处理工艺过程中有机物特性研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(11): 43-47.
Ren W A, Jin P K, Shi Y L. A study on the characteristics of organic matter in the process of wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(11): 43-47.