

生骏, 马子航, 林莉峰, 等. 三级 AO 工艺中的硝化液回流比对食品工业废水的处理影响[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 132-138, 157.

SHENG J, MA Z H, LIN L F, et al. Effect of nitrate reflux ratio of tertiary AO process on food industry wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 132-138, 157.

三级 AO 工艺中的硝化液回流比对食品工业废水的处理影响

生 骏¹, 马子航², 林莉峰¹, 林剑雄¹, 周 振^{2,*}

(1. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 上海电力大学环境与化学工程学院, 上海 200090)

摘要 【目的】 研究旨在系统探讨硝化液回流比对食品工业废水处理效果的影响, 聚焦于不同回流系统下三级缺氧/好氧(AO)工艺的硝化与反硝化性能差异, 并分析硝化液回流比对溶解性有机物降解规律的作用机制。【方法】 通过构建双回流系统(400%)与单回流系统(200%)的三级 AO 工艺模型, 定量比较 2 种系统对食品工业废水中氨氮和总氮(TN)去除效果的差异。结合荧光光谱和二维相关性分析, 深入探讨溶解性有机物中类富里酸和类腐殖质的降解规律与效率。【结果】 硝化液回流比的增加显著提升三级 AO 系统的硝化和反硝化能力, 双回流系统氨氮和 TN 去除率分别稳定在 97.4%±2.8% 和 91.6%±3.3%, 平均出水氨氮和 TN 质量浓度分别为(1.3±0.5) mg/L 和(5.7±1.8) mg/L, 满足排放标准要求。荧光类物质分析表明, 双回流系统内微生物活性高于单回流系统, 类富里酸和类腐殖质的降解程度显著提升。二维相关性分析显示, 尽管回流比的变化未影响溶解性有机物(DOM)的降解顺序, 但双回流系统在富里酸类物质与腐殖质的降解效率方面表现出显著优势。【结论】 双回流系统能够显著提升食品工业废水处理过程中氨氮和总氮的去除效果, 同时增强溶解性有机物中类富里酸和类腐殖质的降解效率, 为实际工程中三级 AO 工艺的优化提供了重要的理论依据和实践指导。

关键词 食品工业废水 三级缺氧/好氧(AO)工艺 脱氮 溶解性有机物(DOM) 硝化液回流比

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)02-0132-08

DOI: 10.15890.j.cnki.jsjs.2025.02.015

Effect of Nitrate Reflux Ratio of Tertiary AO Process on Food Industry Wastewater Treatment

SHENG Jun¹, MA Zihang², LIN Lifeng¹, LIN Jianxiong¹, ZHOU Zhen^{2,*}

(1. Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

2. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract [Objective] This study aims to systematically investigate the impact of nitrification liquid recirculation ratios on the treatment efficiency of food industry wastewater, focusing on the differences in nitrification and denitrification performance under various recirculation configurations in a three-stage anoxic/oxic (AO) system. Additionally, the study examines the effect of recirculation ratios on the degradation mechanisms of dissolved organic matter (DOM). [Methods] A three-stage AO process was modeled using a dual-recirculation system (400%) and a single-recirculation system (200%). The treatment performance was quantitatively compared in terms of ammonia nitrogen and total nitrogen (TN) removal efficiencies. Fluorescence spectroscopy and two-dimensional correlation analysis were employed to explore the degradation patterns and efficiencies of DOM, specifically focusing on humic-like and fulvic-like substances. [Results] Increasing the recirculation ratio significantly enhanced the nitrification and denitrification capabilities of the three-stage AO system. In dual-recirculation system, ammonia nitrogen and TN removal efficiencies were stabilized at 97.4%±2.8% and

[收稿日期] 2023-12-09

[作者简介] 生骏(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为给排水、污泥处理, E-mail: shengjun@smedi.com。

[通信作者] 周振(1981—), 男, 教授, 研究方向为污泥减量、废水处理新技术, E-mail: zhouzhen@shiep.edu.cn。

91.6%±3.3%, respectively, with average effluent ammonianitrogen and TN mass concentrations of (1.3±0.5) mg/L and (5.7±1.8) mg/L, meeting discharge standards. Fluorescence spectroscopy revealed that microbial activity was higher in dual-recirculation system compared to the single-recirculation system, with significantly improved degradation of fulvic-like and humic-like substances. Two-dimensional correlation analysis indicated that while changes in the recirculation ratio did not alter the degradation sequence of DOM, the dual-recirculation system exhibited superior degradation efficiency, with fulvic-like substances being degraded prior to humic-like substances. [Conclusion] The dual-recirculation system significantly improves the removal efficiency of ammonia nitrogen and TN in treatment of food industry wastewater while enhancing the degradation of fulvic-like and humic-like substances in DOM. These findings provide critical theoretical support and practical guidance for optimizing three-stage AO processes in engineering applications.

Keywords food industry wastewater tertiary anoxic/oxic (AO) process nitrogen removal dissolved organic matter (DOM) nitrate reflow ratio

福建省某工业园区内企业主要为屠宰与肉类加工企业,产生废水类型主要为食品工业废水。由于园区内企业自建污水处理站处理水平不高,污水未能达标排放,而附近污水处理厂原设计主要是针对生活污水,出水仅达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准。根据附近水域保护政策要求,现规划福建省某工业园区污水经集中处理后排放,出水化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮等指标执行《地表水环境质量标准》(GB 18918—2002)IV类标准,总氮(TN)≤10.0 mg/L,其余指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准(即整体出水水质执行“准IV类”标准)。相较于原有排放标准,现有标准对氨氮和 TN 的排放提出了更高的要求。

为确保该食品工业废水经处理后稳定达标,采用多级 AO 工艺强化生物系统的脱氮能力。相比于传统活性污泥工艺,多级 AO 工艺中缺氧和好氧的快速交替可以实现对进水碳源的高效利用,能够在相同水力停留时间(HRT)内获得更好的脱氮效果,这使得多级 AO 工艺在提标改造案例中常作为生物

系统的优选工艺^[1-2]。现有多级 AO 工艺多由 2~4 段缺氧/好氧池组成,更多的分段数将放大多级 AO 工艺操作的复杂性,增加运行成本,同时也会减弱对脱氮效率的提升效果^[3],本研究选用三级 AO 工艺处理该食品工业废水。影响三级 AO 工艺脱氮效果的因素较多,其中硝化液回流比是影响脱氮稳定性的关键因素之一^[4]。福建某工业园区内食品工业废水 COD_{Cr}/TN 比为 8.0~16.5,本试验过程中无外加碳源,仅通过提升硝化液回流比增强系统脱氮效果。目前硝化液回流比对三级 AO 工艺高标准脱氮性能影响的研究报道较少,本研究通过改变硝化液回流比,研究其对三级 AO 系统稳定达标的影响。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置进水水质及分析方法

试验原水取自福建省某屠宰和肉类加工工业园区的食品工业废水,选用聚合氯化铝和聚丙烯酰胺混凝以去除悬浮固体和油类,混凝上清液作为三级 AO 系统进水,进水各水质指标如表 1 所示。氨氮、TN、COD_{Cr} 等均采用国家标准方法测定^[5]。溶解氧(DO)和 pH 采用哈希 HQ30D 便携式测定仪测定。

表 1 三级 AO 系统进水水质
Tab. 1 Influent Water Quality of Tertiary AO System

| 水质指标 | 数值 | 检测方法 | 检测仪器 |
|--|-------------|-----------------|-------------------|
| pH 值 | 7.10~8.30 | 仪器测定 | HQ30D 便携式 pH 计 |
| 氨氮/(mg·L ⁻¹) | 89.3~152.8 | 纳氏试剂分光光度法 | UV-2000 紫外可见分光光度计 |
| TN/(mg·L ⁻¹) | 102.6~177.5 | 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 | UV-2000 紫外可见分光光度计 |
| COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹) | 773~1251 | 重铬酸钾法 | 滴定装置 |
| DO/(mg·L ⁻¹) | 3.55~4.08 | 仪器测定 | HQ30D 便携式溶氧仪 |

1.2 试验模拟系统

生物试验装置主要由 2 套平行的三级 AO 系统组成(图 1),2 套三级 AO 系统除硝化液回流

比不同外其余规格和操作参数均相同。每套系统处理水量为 50 L/d, HRT 为 58 h,有效容积为 116 L,污泥龄为 20 d。由隔板分为厌氧池(20

L) 和 3 组规格相同的缺氧/好氧池 (8 L/24 L), 共 7 个格室, 按照 An、A1、O1、A2、O2、A3、O3 依次表述。污水首先通入厌氧池 (An), 至厌氧池末端分为 3 段, 按照 50%:25%:25% 的比例分别流入缺氧池 1 (A1)、缺氧池 2 (A2) 和缺氧池 3 (A3), 自好氧池 3 (O3) 末端流入沉淀池。厌氧池和所有缺氧池均设有搅拌装置, 所有好氧池底部均布设空气扩散器, 通过调节空气流量计将两系统好氧区内 DO 质量浓度控制为 2~4 mg/L。

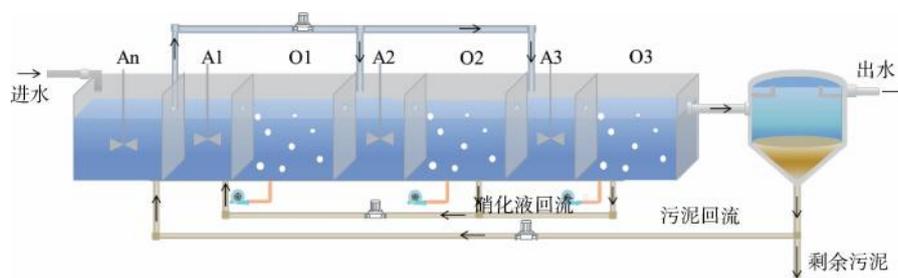


图 1 三级 AO 工艺流程

Fig. 1 Process flow of Tertiary AO

1.3 平行因子和二维相关性光谱分析

利用 Matlab 软件的 DOMFluor 工具包对所得三维荧光数据进行建模。去除数据集中的散射峰并剔除异常数据, PARAFAC 根据裂半分析确定主成分数量, 通过残差分析检验模型的有效性, 确定各荧光峰位置和强度。运用 2Dshige 软件对所得同步荧光光谱数据进行二维相关光谱分析, 从而获得样本的二维相关谱图, 并以此判断各组降解发生的先后顺序^[6]。三维荧光光谱采用岛津 RF-5301pc 荧光分光光度计测定。

2 结果和讨论

2.1 硝化液回流比对三级 AO 系统脱氮能力影响分析

为研究硝化液回流比对三级 AO 系统脱氮能力的影响, 进行了为期 71 d 的连续流试验 (图 2)。试验第 0~55 d 为调试阶段, 此阶段进水氨氮和 TN 质量浓度分别为 (65.6±13.8) mg/L 和 (78.4±15.8) mg/L, 两系统调试阶段初期出水氨氮和 TN 均维持在较高浓度。双回流系统氨氮和 TN 去除率的增加速度明显快于单回流系统。在第 23 d 双回流系统出水氨氮和 TN 质量浓度分别降至 3.5 mg/L 和 9.8 mg/L [图 2(c)], 氨氮去除率 (AOE) 迅速升至 96.4%, 此时出水 TN 已满足要求 (TN≤10 mg/L)。

两系统污泥回流均为从二沉池底部回流 100% 的混合液至厌氧池 (An) 前端, 用于补充污泥浓度。根据不同的硝化液回流方案将 2 套三级 AO 系统分为单回流系统和双回流系统, 单回流系统设计单段内回流, 由好氧池 3 (O3) 回流至缺氧池 1 (A1), 回流比 200%, 双回流系统设计两段内回流, 由好氧池 3 (O3) 回流至缺氧池 1 (A1) 和好氧池 2 (O2) 至缺氧池 1 (A1), 单段回流比均为 200%, 共计 400% 的硝化液回流比。

单回流系统则需要更长的适应期, 在整个调试期内单回流系统出水氨氮的质量浓度始终高于 2.7 mg/L, 出水 TN 在第 50 d 后才能达到排放标准要求, 且仍有较大波动, AOE 在整个调试期内始终低于 88%。在相同的操作条件下, 双回流系统表现出了对高氨氮废水更快的适应能力和更强的脱氮能力, 单回流系统对高氨氮废水适应较慢。

在系统运行的第 17~44 d, 波动的进水 pH 值 (6.4~9.0) 严重影响两系统脱氮性能, 在第 33~44 d 内, 双回流系统和单回流系统出水 TN 分别为 (16.5±3.3) mg/L 和 (17.9±2.1) mg/L, 两系统脱氮性能并未表现出显著性差异 [显著性水平 (α) = 0.05, 显著性概率 (p) = 0.90], 均未能达到出水水质要求 (TN≤10 mg/L)。第 17~44 d 内两系统出水氨氮占 TN 浓度的 61.9%~86.8%, 表明此时系统脱氮能力的主要限制因素为硝化能力。不稳定的 pH 影响了硝化菌活性, 从而引起系统脱氮效率的下降。由进水氨氮和 TN 的浓度可知, 进水中的含氮污染物主要以氨氮形式存在 (占比为 81.2%±4.9%), 在碱性条件下, 较高的氨氮浓度必然导致游离氨 (FA) 的生成, 多项研究表明 FA 会对参与生物处理过程的功能性微生物产生抑制作用, 尤其对硝化菌会产生明显的抑制效果^[7], 从而影响氨氮的去除率。通

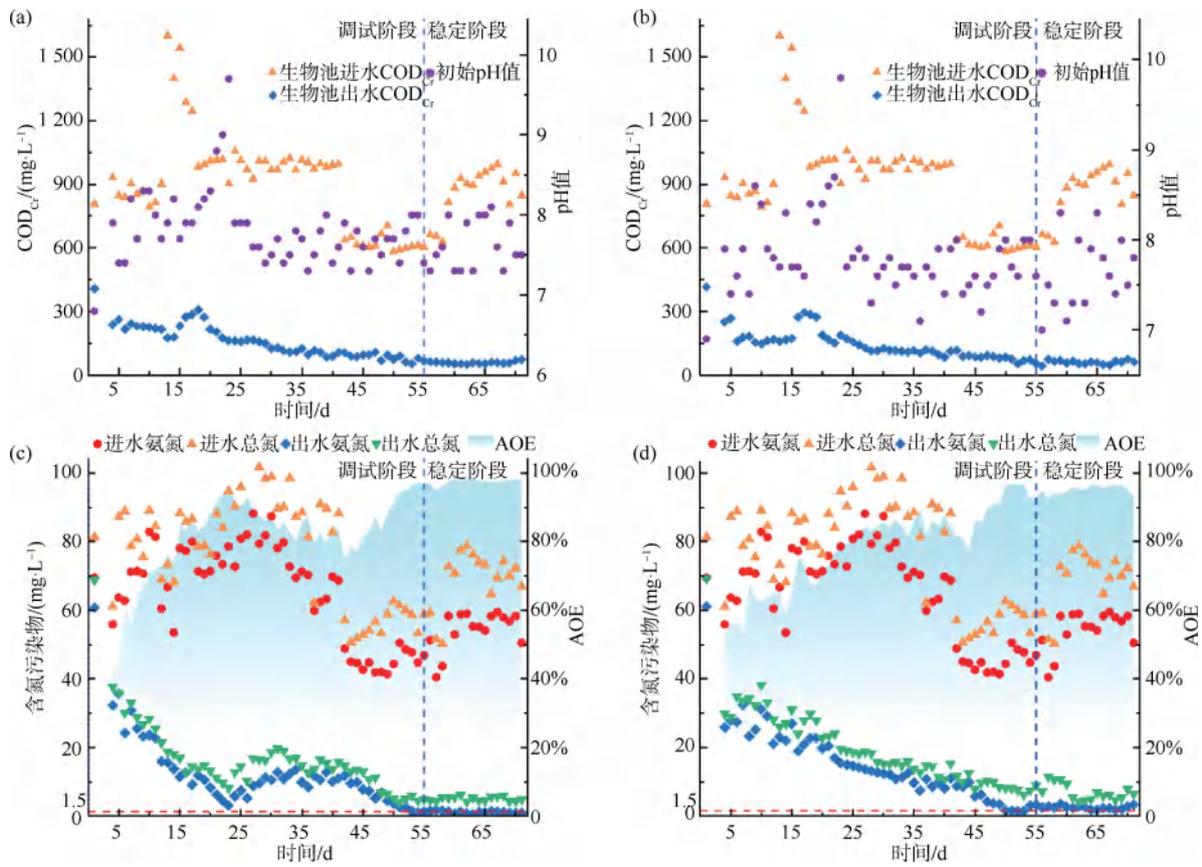


图2 (a)双回流和(b)单回流系统进出水 COD_{Cr} 和进水 pH 值变化, (c)双回流和(d)单回流系统进出水氨氮和 TN 及 AOE 变化

Fig. 2 Variations of Influent and Effluent COD_{Cr} and Influent pH Value (a) Double Reflux; (b) Single Reflux System and Variations of Influent and Effluent Ammonia Nitrogen and TN Concentration as well as AOE; (c) Double Reflux; (d) Single Reflux System

过调控系统进水 pH 在较低范围内以降低进水 FA 浓度,可以有效缓解 FA 对微生物活性的抑制作用,从而使系统内微生物更快地适应高氨氮环境。

在第 45 d 通过调控进水 pH,将两系统 An 格 pH 值控制为 7.5 ± 0.1 。双回流系统在 pH 调控策略实施后出水氨氮和 TN 浓度迅速下降,在 pH 调控后 3 d 内双回流系统脱氮性能恢复至 pH 波动前的水平,出水 TN 质量浓度 $< 10 \text{ mg/L}$ 。双回流系统 AOE 在调控 pH 后迅速恢复,且在调控策略实施 7 d 后得到进一步提升,双回流系统稳定阶段(56~71 d)出水氨氮和 TN 质量浓度分别稳定在 $(1.3 \pm 0.5) \text{ mg/L}$ 和 $(5.7 \pm 1.8) \text{ mg/L}$,均满足标准的要求。单回流系统稳定阶段出水氨氮质量浓度 $[(2.8 \pm 0.7) \text{ mg/L}]$ 为双回流系统的 2.2 倍,两系统出水氨氮浓度表现出显著性差异 ($\alpha = 0.05, p = 1.2 \times 10^{-8}$)。在稳定阶段,单回流系统出水 TN 质量浓度 $[(7.0 \pm 2.2)$

$\text{mg/L}]$ 达到出水标准,两系统出水 TN 浓度无明显差异 ($\alpha = 0.05, p = 0.06$)。相比于单回流系统,双回流系统表现出了对高氨氮废水更强的适应能力。内回流的增加有效提升了三级 AO 工艺的脱氮能力,在相同的 HRT 内提升了出水水质,达到了排放标准要求。两系统运行期间出水 COD_{Cr} 浓度均在第 45 d 左右趋于稳定,双回流系统和单回流系统出水 COD_{Cr} 质量浓度最终维持在 $(65.3 \pm 23.6) \text{ mg/L}$ 和 $(66.2 \pm 17.9) \text{ mg/L}$,经混凝沉淀深度处理后出水 COD_{Cr} 质量浓度分别可达到 $(22.1 \pm 4.8) \text{ mg/L}$ 和 $(23.1 \pm 3.2) \text{ mg/L}$,均可满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准的要求 ($\text{COD}_{\text{Cr}} \leq 30 \text{ mg/L}$)。

2.2 硝化液回流比对各单元脱氮影响研究

图 3 反映了两系统在运行稳定后,系统内每个单元格对含氮污染物的去除能力。单回流系统每日 TN 的去除能力为 4.4 g ,双回流系统每日 TN 的去

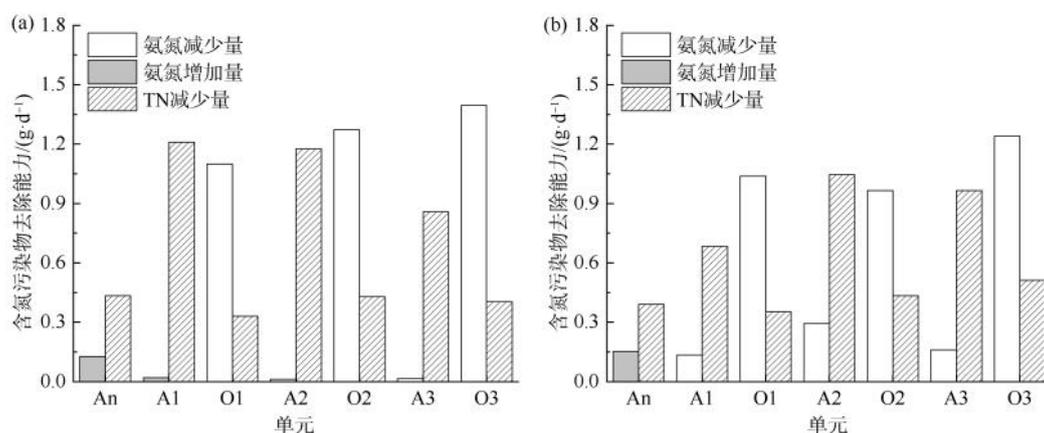


图3 (a)双回流系统和(b)单回流系统各单元氨氮和 TN 去除贡献

Fig. 3 Contributions of Ammonia Nitrogen and TN; (a) Double Reflux; and (b) Single Reflux System

除能力为 4.7 g,双回流系统的脱氮能力优于单回流系统。进水中的有机氮经 An 和 A1 格水解后转化为氨氮,水解产生的氨氮导致两系统 An 和 A1 格氨氮浓度上升^[8]。单回流系统 A2 格的 TN 去除能力最高,为 1.1 g/d,表明单回流系统 TN 的去除主要发生在 A2 格内,双回流系统 TN 的去除主要发生在 A1 和 A2 格,分别为 1.1 g/d 和 1.2 g/d,对 TN 去除的贡献占 48.9%。将 TN 去除控制在 A1 和 A2 格有利于维持双回流系统的脱氮能力,且能保证双回流系统长期稳定的低 TN 浓度出水。两系统好氧区均存在 TN 降低的现象,这可能来自于两系统好氧池内存在的同步硝化反硝化过程。两系统 O1 格氨氮浓度较高,对微生物活性产生了一定的抑制作用^[9],随着氨氮浓度沿水流方向逐渐降低,微生物活性得以恢复,使得两系统 O1 格氨氮去除能力低于 O2 和 O3 格。对两系统好氧池的脱氮能力进行对比,可以发现单回流系统好氧区总体氨氮去除能力为 3.6 g/d,而双回流系统好氧区总体氨氮去除能力为 4.0 g/d,表

明增加一段回流后,三级 AO 系统的硝化能力同样得到提升。硝化液回流比的增大为缺氧池提供了更为充足的底物,在强化反硝化的同时提升了有机物消耗速率^[10],这降低了有机物对硝化菌生长的影响,从而增强了后续好氧池的硝化作用。

2.3 溶解性有机物迁移转化规律分析

2.3.1 不同硝化液回流比条件下溶解性有机物组分划分

利用 Matlab 对生物系统内的沿程三维荧光数据进行平行因子分析,共鉴别出 3 种荧光组分(图 4),包括类富里酸(组分 1),类蛋白质(组分 2)和类腐植酸(组分 3)。组分 1 的荧光峰位于 350 nm/420 nm,在可见光区类富里酸(310 ~ 360 nm/370 ~ 480 nm)的范围内,为可见光区类富里酸^[11];当发射波长为 350 nm 时,组分 2 在激发波长为 270 ~ 330 nm 处有 2 个荧光峰,为类蛋白质荧光团中的类色氨酸基团。类色氨酸通常由人类活动产生,常见于污水处理系统中,能够以游离形式或与蛋

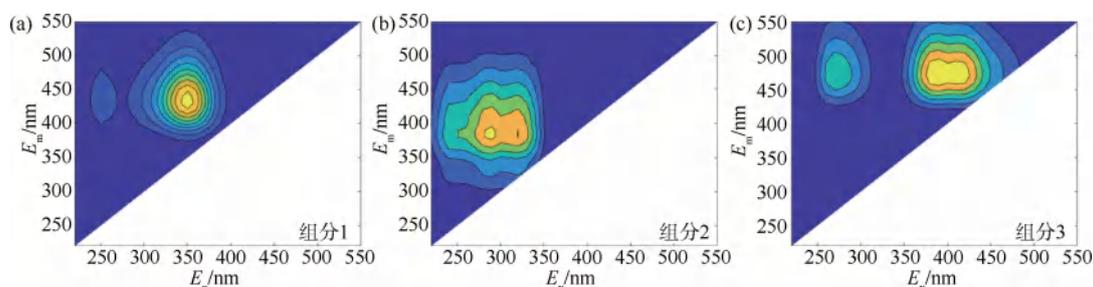


图4 基于 PARAFAC 分析的 3 类荧光组分划分

Fig. 4 Three Types of Fluorescent Components Based on PARAFAC Analysis

白质结合的形式存在于多种水环境中,同时也可通过微生物的降解活动产生,通常用来表征微生物的活动强度^[12];组分3的荧光峰位于380~430 nm/450~500 nm,与类腐殖质相似,为类腐植酸^[13]。

2.3.2 不同硝化液回流比条件下荧光组分迁移转化规律分析

图5分别表示不同硝化液回流比下3种荧光组分在三级AO系统内的迁移转化规律。在单回流系统中,组分1和组分3,即富里酸物质和腐植酸物质的

浓度在生物反应过程中出现明显下降,尤其是腐植酸物质浓度下降最为明显,表明富里酸物质和腐殖质物质在生物系统内发生了降解。而组分2,即类色氨酸物质的浓度明显上升;在双回流系统中,组分1、2、3的浓度变化趋势与此类似。但从浓度变化情况来看,双回流系统内组分1和组分3的浓度下降程度明显高于单回流系统,双回流系统组分2的上升趋势也显著增高,表明双回流系统中微生物产物色氨酸浓度增加,双回流系统内微生物有更高的活性。

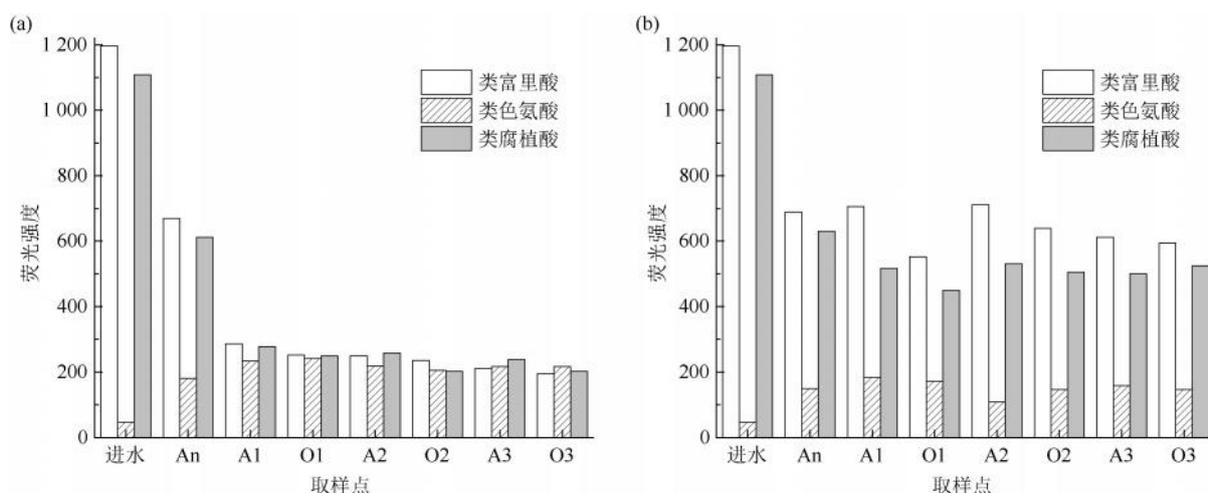


图5 (a)双回流系统;和(b)单回流系统荧光组分迁移转化规律

Fig. 5 Migration and Transformation of Fluorescent Components in (a) Double Reflux; and (b) Single Reflux System

2.3.3 不同硝化液回流比条件下二维相关光谱分析

利用二维相关光谱(2D-COS)进行分析,2D-COS能够将外部扰动(如浓度、时间、pH等)产生的动态光谱扩展到两个维度,进而判断不同组分在反应过程中所发生的变化情况及其反应的先后顺序^[14]。单回流系统同步二维相关光谱[图6(a)和图6(c)]在350 nm处存在一个明显的正值峰,该波长对应类富里酸,表明DOM中的类富里酸组分在各单元间的浓度变化最大^[15]。异步二维相关光谱[图6(b)和图6(d)]峰值呈对角线分布,在对角线下方存在负值峰。根据Noda法则^[16],荧光光谱峰变化顺序为组分1(类富里酸)>组分3(类腐殖质)。该结果表明,在生物反应过程之中,富里酸类物质先于腐殖质类物质发生降解反应。双回流同步和异步二维相关性谱图与单回流系统相似,内回流比的增大并没有改变各组分在三级AO

系统中的迁移转化规律,也没有影响各组分降解的先后顺序。

3 结论

(1)硝化液回流比的增加有效提升了三级AO的脱氮能力和对食品工业废水的适应能力。双回流系统最终出水氨氮和TN去除率高达97.5%和92.7%,均可满足排放标准的要求。

(2)双回流系统将TN主要由A1和A2格承担(占比为48.9%),有利于维持双回流系统的脱氮能力,且能保证双回流系统出水长期稳定达标。增加一段硝化液回流同样可以增强系统的硝化能力。

(3)相比于单回流系统,双回流系统内微生物活性更强。二维相关性分析进一步表明,回流比的改变并不影响溶解性有机物的降解顺序,富里酸类物质先于腐殖质发生降解,双回流系统内富里酸和腐殖质的降解效率更高。

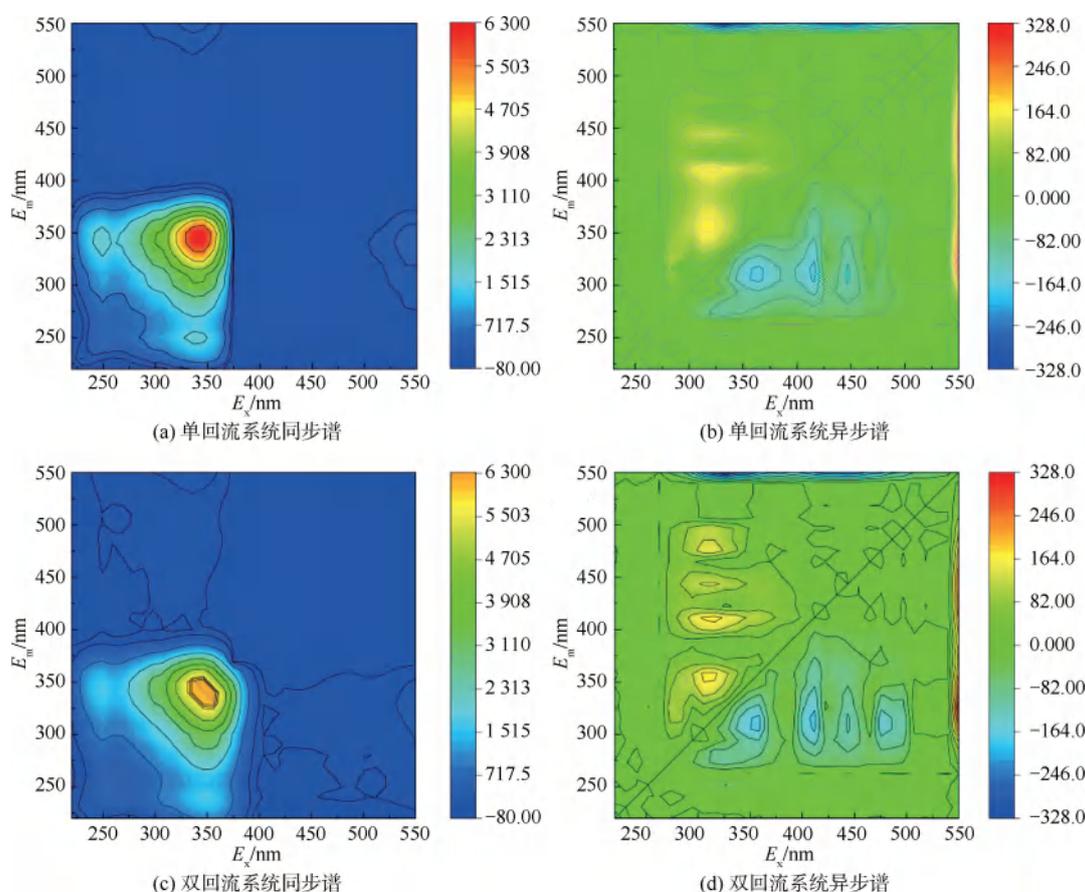


图 6 不同回流比条件下的二维相关光谱

Fig. 6 Two-Dimensional Correlation Spectra under Different Reflux Ratios

参考文献

- [1] 鲍任兵, 徐健, 杜敬, 等. 低温低 C/N 下改良 Bardenpho 工艺与多级 AO 工艺的比较[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 80-87.
- BAO R B, XU J, DU J, et al. Comparison of modified bardenpho and multi level AO processes under low C/N influent at low temperature[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12): 80-87.
- [2] 段凯波. 改良型多级 AO 脱氮工艺在提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 77-83.
- DUAN K B. Application of denitrification for modified multi-stage AO process in upgrading and reconstruction[J], Water Purification Technology. 2023, 42(5): 77-83.
- [3] HOU Z, ZHOU X, DONG W, et al. Insight into correlation of advanced nitrogen removal with extracellular polymeric substances characterization in a step-feed three-stage integrated anoxic/oxic biofilter system[J]. Science of the Total Environment. 2022, 806: 151418. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151418.
- [4] 赵俊娜. 低负荷运行时内回流比对 A²O 工艺脱氮的影响[J]. 中国给水排水, 2022, 38(5): 81-83.

- ZHAO J N. Effect of internal reflux ratio on nitrogen removal in A²O process under low load operation [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(5), 81-83.
- [5] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Editorial Board of *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*, State Environmental Protection Administration. *Methods for water and wastewater monitoring and analysis*[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Sciences Press, 2002.
- [6] 李崇蔚, 于会彬, 杨芳, 等. 应用 SFS 与 FTIR 二维相关光谱研究水体中 DOM 组成结构及空间分异特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(7): 2005-2010.
- LI C W, YU H B, YANG F, et al. Applying SFS, FTIR and 2D-COS to analyze structural compositions of DOM in aquatic System, and reveal their special variation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(7): 2005-2010.
- [7] WANG Q, DUAN H, WEI W, et al. Achieving stable mainstream nitrogen removal via the nitrite pathway by sludge treatment using free ammonia [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(17): 9800-9807.

(下转第 157 页)

- [16] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 83-92.
YE C L, XU Z X, LEI X H, et al. Influences of sponge reconstruction of Jin'an River drainage district in Fuzhou City on urban flooding/waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 83-92.
- [17] 符韵, 胡爱兵. 珠三角河网地区海绵城市建设路径探讨——以中山市为例[J]. 净水技术, 2021, 40(s1): 356-362.
FU Y, HU A B. Discussion on construction path of sponge city in Pearl River Delta—Taking Zhongshan City as an example [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(s1): 356-362.
- [18] 车伍, 张鹏, 赵杨. 我国排水防涝及海绵城市建设中若干问题分析[J]. 建设科技, 2015(1): 22-28.
CHE W, ZHANG K, ZHAO Y. Analysis of some problems in the construction of drainage and waterlogging prevention and sponge city in China [J]. Construction Science and Technology, 2015 (1): 22-28.
- [19] 张亮, 汤钟, 俞露. 新型城镇化背景下城市内涝防治规划的编制思考[J]. 给水排水, 2021, 47(6): 43-49.
ZHANG L, TANG Z, YU L. Thoughts on the compilation of urban waterlogging prevention and control planning under high-quality development [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(6): 43-49.
- [20] 赵丰昌, 章林伟, 高伟. 海绵城市理念下城市内涝防治体系构建的探讨[J]. 给水排水, 2021, 47(8): 37-44.
ZHAO F C, ZHANG L W, GAO W. Discussion on the construction of urban waterlogging control system under the concept of sponge city [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 37-44.
- [21] 刘兴坡, 夏澄非, 柴耀智, 等. 基于 MIKE FLOOD 的巢湖市主城区现状排水能力与内涝风险评估[J]. 净水技术, 2020, 39(4): 59-66.
LIU X P, XIA C F, CHAI Y Z, et al. Evaluation of current drainage capacity and waterlogging risk for Chaohu City based on MIKE FLOOD [J]. Water Purification Technology, 2020, 39 (4): 59-66.

(上接第 138 页)

- [8] 鲍任兵, 高廷杨, 官玲, 等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14-20.
BAO R B, GAO T Y, GONG L, et al. Review of process optimization of biological denitrification and phosphorus removal in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 14-20.
- [9] 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 等. 低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4826-4833.
LI D, LIU M H, ZHANG R M, et al. Removal efficiency and mechanism of ammonia nitrogen in a low temperature groundwater purification process [J]. Environmental Science, 2021, 42 (10): 4826-4833.
- [10] 姚亮, 张强, 李鹏. 多级 AO+MBR 工艺在污水处理厂高排放标准提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 164-173.
YAO L, ZHANG Q, LI P. Application of multistage AO+MBR processes in upgrading and reconstruction of stricter discharge standard of WWTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 164-173.
- [11] BIANCO A, MINELLA M, DE L E, et al. Photochemical generation of photoactive compounds with fulvic-like and humic-like fluorescence in aqueous solution [J]. Chemosphere, 2014, 111: 529-536. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.04.035.
- [12] 雷呈, 黄琪, 刘丽贞, 等. 猪场废水处理系统 DOM 吸收和荧光光谱的变化[J]. 水处理技术, 2019, 45(10): 46-51.
LEI C, HUANG Q, LIU L Z, et al. The change of adsorption and fluorescence spectra of DOM during the swine wastewater treatment systems [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45 (10): 46-51.
- [13] WANG Z, CAO J, MENG F. Interactions between protein-like and humic-like components in dissolved organic matter revealed by fluorescence quenching [J]. Water Research, 2015, 68: 404-413. DOI: 10.1016/j.watres.2014.10.024.
- [14] CHEN W, HABIBUL N, LIU X Y, et al. FTIR and synchronous fluorescence heterospectral two-dimensional correlation analyses on the binding characteristics of copper onto dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49 (4): 2052-2058.
- [15] 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 等. 基于光谱特征的 pH 对溶解态有机质与铜相互作用的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(5): 1628-1635.
HU B, WANG P F, ZHANG N N, et al. Effect of pH on interaction between dissolved organic matter and copper: Based on spectral features [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(5): 1628-1635.
- [16] NODA I. Recent developments in two-dimensional (2D) correlation spectroscopy [J]. Chinese Chemical Letters, 2015, 26(2): 167-172.