

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.012

# 乳酸钠和乙酸钠作为碳源对生物脱氮的影响

张佳颖<sup>1</sup>, 刘心怡<sup>1</sup>, 周俊才<sup>1</sup>, 孟雯<sup>1</sup>, 李晓玲<sup>1,2</sup>, 高明<sup>3</sup>,  
汪群慧<sup>3</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 住建部给排水重点实验  
室, 陕西 西安 710054; 3. 北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 基于SBR反应器,通过与传统碳源乙酸钠进行对比,探究人工配水条件下以乳酸钠作为碳源的脱氮效果以及生物可利用性等差异。结果表明,在进水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为32 mg/L的条件下,当COD为200 mg/L时,乙酸钠的脱氮效果优于乳酸钠;当COD为300 mg/L时,乳酸钠和乙酸钠两种体系的总氮去除率相当,且均达到最高值,分别为85.73%和83.04%;当COD为400 mg/L时,乙酸钠对硝化过程的抑制作用明显,进而使得体系的总氮去除率较低,仅为56.51%,而乳酸钠体系的脱氮效果良好。运行过程中两种体系均出现了污泥膨胀现象,且乳酸钠体系膨胀更明显,同时随着COD浓度的增加,膨胀现象加剧并伴有污泥结块现象。两种体系中的微生物种类及占比相似,表明乳酸钠与乙酸钠作为碳源的脱氮效果良好,有相似的生物可利用性。在乳酸钠体系中,*Ferruginibacter*占比比较高,说明乳酸钠作为外加碳源时污泥容易产生结块膨胀现象。

**关键词:** 乳酸钠; 乙酸钠; 碳源; 生物脱氮; COD; 污泥膨胀

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0083-06

## Effect of Sodium Lactate and Sodium Acetate as Carbon Sources on Biological Nitrogen Removal

ZHANG Jia-ying<sup>1</sup>, LIU Xin-yi<sup>1</sup>, ZHOU Jun-cai<sup>1</sup>, MENG Wen<sup>1</sup>, LI Xiao-ling<sup>1,2</sup>,  
GAO Ming<sup>3</sup>, WANG Qun-hui<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Key Laboratory of Water Supply and Drainage <Ministry of Housing and Urban-Rural Development>, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This study compared the differences of nitrogen removal performance and bioavailability between sodium lactate and traditional carbon source sodium acetate in a SBR for the treatment of simulated wastewater. When the influent  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and COD were 32 mg/L and 200 mg/L respectively, the nitrogen removal performance of sodium acetate was better than that of sodium lactate. When the COD was 300 mg/L, the total nitrogen removal rates of both systems were comparable and reached the highest values of 85.73% and 83.04% respectively. When the COD was 400 mg/L, sodium acetate obviously inhibited the nitrification process, resulting in the total nitrogen removal rate of the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1906302); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102282104)  
通信作者: 李晓玲 E-mail: lixiaoling20030327@126.com

system as lower as 56.51%. Conversely, good denitrification performance of the sodium lactate system was obtained. Sludge bulking was observed in both systems during the operation, and the phenomenon was more pronounced in the sodium lactate system. With the increase of COD, the sludge bulking was aggravated and accompanied by sludge agglomeration. The microbial species and their relative abundance were comparable in the two systems, indicating that sodium lactate and sodium acetate as carbon sources had similar bioavailability and good nitrogen removal performances. In the sodium lactate system, *Ferruginibacter* accounted for a relatively high abundance, indicating that sludge agglomeration and bulking were prone to occur when sodium lactate was employed as the additional carbon sources.

**Key words:** sodium lactate; sodium acetate; carbon source; biological nitrogen removal; COD; sludge bulking

目前市政污水普遍存在碳源不足等问题,严重影响了污水厂脱氮除磷的效果,需要额外投加碳源以提高反硝化效果<sup>[1-2]</sup>。污水处理厂常用的外加碳源包括乙酸、乙酸钠、甲酸等<sup>[3]</sup>,大量投加工业碳源增加了污水处理厂的运行费用,因而使用垃圾渗滤液<sup>[4]</sup>、污泥热水解滤液<sup>[5]</sup>、剩余污泥发酵液<sup>[6]</sup>和餐厨垃圾发酵液<sup>[7-8]</sup>等有机废水作为外加碳源受到了广泛的关注。

餐厨垃圾发酵处理作为一种资源化处置方式,对环境保护有着极其重要的意义。餐厨垃圾发酵液中含有多种挥发性脂肪酸<sup>[8]</sup>,具有有机物含量高、可生化性好、价格低廉等特点<sup>[9]</sup>,目前已有实现餐厨垃圾定向发酵为乳酸的相关工艺<sup>[10]</sup>。国内外已有较多学者利用餐厨垃圾发酵的混合碳源进行污水脱氮<sup>[11-12]</sup>,发现以乳酸为主的发酵液具有较快的反硝化速率,但缺少乳酸作为碳源对脱氮过程影响的深入研究。

笔者以乳酸钠作为单一外加碳源,进行硝化和反硝化脱氮分析,通过与乙酸钠进行对比,探究碳源种类对生物脱氮过程及微生物种群结构的影响,旨在为餐厨垃圾定向发酵产生的乳酸在实际污水处理中的应用提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

接种污泥取自西安第四污水处理厂,污泥脱氮效果及沉降性能良好。实验进水为人工配制的模拟废水,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  为 50 mg/L、 $\text{NaHCO}_3$  为 100 mg/L、 $\text{CaCl}_2$  为 60 mg/L,同时进水中还加入了 1 mL/L 的微量元素<sup>[13]</sup>(0.9 mg/L 的  $\text{FeCl}_3$ 、0.15 mg/L 的  $\text{H}_3\text{BO}_3$ 、0.18 mg/L 的  $\text{KI}$ 、0.03 mg/L 的  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、0.06 mg/L

的  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.12 mg/L 的  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.15 mg/L 的  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.06 mg/L 的  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、10 mg/L 的 EDTA)。

向反应体系中投加  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,将  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度控制在  $(32 \pm 3.36)$  mg/L,分别采用乳酸钠和乙酸钠作为碳源。乳酸钠为透明或淡黄色糖浆状液体,乙酸钠为白色粉末状固体。通过改变两者的投加量探索不同 C/N 及不同碳源种类对脱氮效果的影响。进水负荷见表 1。

表 1 两种碳源的进水负荷

Tab.1 Inlet load of different carbon sources

项 目	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	C/N
乳酸钠	A1	200	32
	A2	300	32
	A3	400	32
乙酸钠	B1	200	32
	B2	300	32
	B3	400	32

### 1.2 实验装置及运行方式

选用两个完全相同的圆柱形有机玻璃反应器,内径为 25 cm,高度为 40 cm,有效容积为 8 L。采用 SBR 工艺,每个周期进水 4 L,进出水比例为 1:1;运行周期为 7 h;均采用 A-O-A 模式运行,其中厌氧 60 min、好氧 120 min、缺氧 180 min、静沉 60 min。反应器内 MLSS 为 4 000 mg/L,MLVSS 为 2 812 mg/L,污泥体积指数(SVI)为 85 mL/g,进水 pH 为 6.8~7.2,好氧阶段曝气量保持在 0.8 L/min,DO 在 5.2 mg/L 左右。每隔一段时间取样 10 mL,在 5 000 r/min 的转速下离心 5 min,用滤纸对样品进行过滤,放入温度为 4 °C 的冰箱中保存待用。

### 1.3 分析项目与方法

$\text{NH}_4^+-\text{N}$  采用纳氏试剂分光光度法测定;  $\text{NO}_3^--\text{N}$  采用紫外分光光度法测定;  $\text{NO}_2^--\text{N}$  采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定; COD 采用 COD 快速测定仪测定; DO 浓度和 pH 采用 WTWmulti 3630 IDS 水质电导率仪测定。

### 1.4 生物群落分析方法

取不同实验条件下稳定阶段收集的 10 mL 污泥样品用于微生物分析。使用 E. Z. N. ATM Mag-Bind Soil DNA Kit 试剂盒提取 DNA, 对 16S rRNA 基因的 V3-V4 进行 PCR 扩增, 选择 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 作为引物。程序为: 95 °C 预变性 5 min; 94 °C 变性 1 min; 50 °C 退火 1.5 min; 72 °C 延伸 1.5 min; 共 35 个循环, 最终 72 °C 延伸 8 min。PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测。高通量测序委托生物工程检测公司通过 MiSeq 测序平台完成。

### 1.5 比硝化速率和比反硝化速率的计算方法

根据硝化和反硝化实验中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_x^--\text{N}$  的变化规律, 可以计算出比硝化速率和比反硝化速率, 分别见式(1)、(2)。

$$V_N = \frac{d\text{NH}_4^+-\text{N}}{\text{MLVSS} \cdot dt_N} \quad (1)$$

$$V_{DN} = \frac{d\text{NO}_x^--\text{N}}{\text{MLVSS} \cdot dt_{DN}} \quad (2)$$

式中:  $V_N$  为比硝化速率,  $\text{mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ;  $t_N$  为硝化时间(本实验中特指快速硝化阶段  $d\text{NH}_4^+-\text{N} > 0.3 \text{ mg/L}$ ),  $h$ ;  $V_{DN}$  为比反硝化速率,  $\text{mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ;  $t_{DN}$  为反硝化时间(本实验中特指快速反硝化阶段  $d\text{NO}_x^--\text{N} > 0.6 \text{ mg/L}$ ),  $h$ ; MLVSS 为污泥浓度,  $\text{g/L}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同碳源处理效果

不同碳源的脱氮效果如图 1 所示。可知, A1 体系下, 平均出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  在 15.67 mg/L 左右, 可能是因为缺少碳源, 导致脱氮效果较差, 并且运行后期污泥出现微弱的膨胀现象, SVI 为 188.41 mL/g。A2 体系下, 稳定时期出水  $\text{NO}_2^--\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  均在 5.35 mg/L 以下, 此时 SVI 为 190.48 mL/g, 污泥膨胀明显。A3 体系下, 出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  升高, SVI 升至 244.18 mL/g, 污泥膨胀现象加剧, 说明在以乳酸钠为碳源的条件

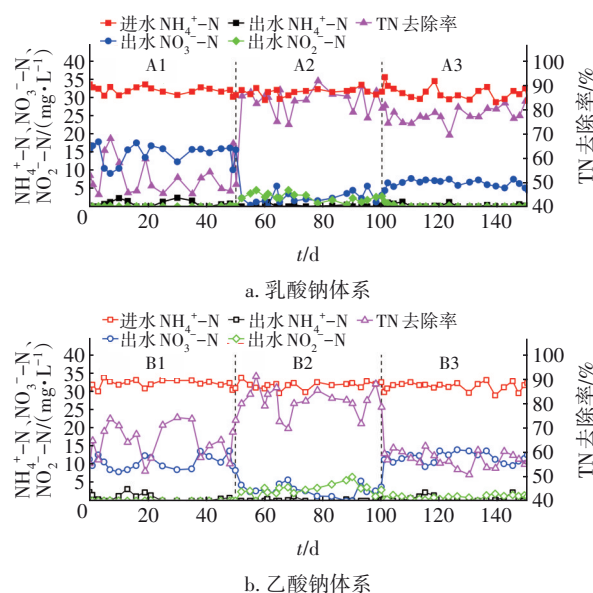


图 1 不同碳源条件下体系的脱氮效果

Fig.1 Nitrogen removal efficiency under different carbon sources

B1 体系下, 出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度较高, 说明此时碳源同样不能满足微生物反硝化的需求, SVI 为 165.71 mL/g, 出现污泥膨胀现象。B2 体系下, 与相同条件下的乳酸钠体系相比, 出水  $\text{NO}_2^--\text{N}$  呈现逐渐增加的趋势, 最高达到 6.23 mg/L, 但污泥膨胀有所缓解, SVI 为 144.58 mL/g。B3 体系下, 污泥膨胀现象再次加剧, 严重影响脱氮效果, 出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  升高至 9.3 mg/L 以上, SVI 为 220.34 mL/g。

乳酸钠和乙酸钠作为碳源时对 COD 的去除效果良好, 不同有机物负荷下的 COD 去除率没有明显差别。在 150 d 的运行时间内, 两反应器均出现了不同程度的污泥膨胀现象, 由于乳酸钠为糖浆状液体, 长时间运行后污泥表面的吸附性增强, 膨胀现象更为明显, 并伴有污泥成条贴壁现象; 而乙酸钠反应器中并无此现象, 但污泥絮体松散。总体来说, 乳酸钠体系运行更加稳定, 相同条件下出水  $\text{NO}_2^--\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  均低于乙酸钠体系, 脱氮效果更好。

### 2.2 不同碳源对硝化和反硝化过程的影响

不同碳源的脱氮效果见表 2。可以看出, 当 COD 为 200 mg/L 时, 不会对硝化菌造成明显的影响, 两种碳源的比硝化速率均很高, A1 体系为 7.47  $\text{mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ , B1 体系为 7.17  $\text{mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。由于碳源不足, 缺氧阶段缺少电子供体, 反硝化过程受阻, 两体系中  $\text{NO}_2^--\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  降解在缺氧阶段的



最后1 h进入慢速反硝化阶段,A1体系的总氮去除率为51.44%,B1体系为64.45%,两体系脱氮效果均不理想。

表2 不同碳源的脱氮效果

Tab.2 Nitrogen removal efficiency under different carbon sources

项目	比硝化速率/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{VSS}\cdot\text{h}^{-1}$ )	比反硝化速率/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{VSS}\cdot\text{h}^{-1}$ )	总氮去 除率/%	COD去 除率/%
A1	7.47	1.56	51.44	71.86
A2	5.06	2.03	85.73	66.73
A3	6.78	2.10	78.75	74.97
B1	7.17	2.30	64.45	75.32
B2	5.23	1.94	83.04	71.36
B3	5.62	0.97	56.51	74.77

为了强化脱氮效果,将COD提高到300 mg/L。好氧阶段结束时,B2体系的 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 高达9.79 mg/L,这与Zheng等人<sup>[14]</sup>发现以乙酸钠作为碳源会出现大量的亚硝酸盐积累的结论一致。乳酸钠体系污泥黏度升高使其表面吸附能力增强,厌氧阶段吸附了较多的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 。在此COD条件下,总氮去除率差别不大,A2为85.73%,B2为83.04%;A2的COD去除率为66.73%,B2为71.36%,此时两体系COD浓度适宜,脱氮效果良好。

将进水COD浓度进一步提高到400 mg/L。B3体系下硝化过程受限,导致出水仍有4.47 mg/L的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 残留,而A3体系中硝化效果维持较好状态。乳酸钠和乙酸钠作为碳源时,系统长时间运行后,两体系的反硝化过程均不彻底,出水仍有 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 残留。A3在300 min后进入慢速反硝化阶段,总氮去除率达78.75%,而B3体系反硝化速率明显较低,总氮去除率仅为56.51%。两体系COD去除率均约为74.80%,但反硝化效果差别明显。说明在高负荷COD浓度下,乳酸钠对硝化过程和反硝化过程均未产生明显抑制,具有更好的生物可利用性。

当COD浓度在300、400 mg/L时,乳酸钠在反硝化速率方面展现了明显的优势,说明作为小分子碳源,乳酸钠比乙酸钠更容易被反硝化菌利用,能够快速降解硝态氮。不同体系中pH的变化如图2所示。可知,好氧阶段结束后,乳酸钠体系的pH更低,印证了乳酸钠体系硝化效果优于乙酸钠体系。缺氧阶段,乳酸钠的pH上升速度更快,表明相较于乙酸钠,乳酸钠更易被反硝化菌利用,且总氮去除

率展现出明显优势。

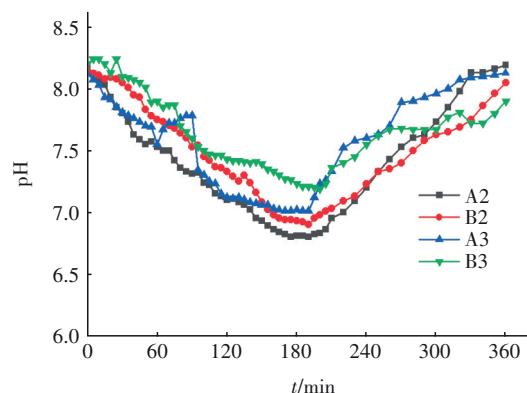


图2 不同体系中pH的变化

Fig.2 Variation of pH in different systems

### 2.3 微生物分析

属水平下微生物群落相对丰度情况见图3。各体系内优势菌纲有 *Gammaproteobacteria*、*Bacteroidia*、*Anaerolineae* 和 *Alphaproteobacteri*。属水平下,不同条件时微生物种群主要有:具有硝化功能的 *norank\_f\_AKYNH767* 和 *norank\_f\_Caldilineaceae*<sup>[15]</sup>,具有异养反硝化功能的 *Candidatus\_Competibacter* 和 *norank\_f\_Saprospiraceae*,及分泌EPS的 *Ferruginibacter* 等。

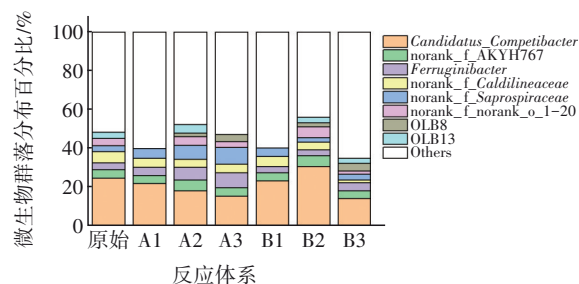


图3 属水平下微生物群落相对丰度情况

Fig.3 Relative abundance of genus in all samples

*norank\_f\_AKYNH767* 具有硝化 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和去除有机物等功能<sup>[16]</sup>,该菌在硝化过程更加完全的A2和A3体系中占比更高,且当COD为300 mg/L时在两种体系内的占比均达到峰值,印证了此COD浓度下两种体系脱氮效果最好。*norank\_f\_Caldilineaceae*在硝化过程不充分的乙酸钠体系中占比较低,这可能是乙酸钠易造成 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 积累的原因。各体系污泥中占绝对优势的菌为 *Candidatus\_Competibacter*,这是一种只能利用简单碳源的反硝化菌,有反硝化脱氮、代谢糖原、降解聚羟基脂肪酸酯和挥发性脂肪酸、积累内碳源等功能<sup>[17-18]</sup>,在A1~B3体系中,其占比分别为21.67%、17.96%、15.17%、23.15%、

30.56%、13.94%。该菌在乙酸钠体系中的占比与脱氮效果呈正相关,相较于B3体系,在A3体系中的占比更高并成为反硝化的优势菌种,说明乳酸钠是一种比乙酸钠更易被生物利用的小分子反硝化碳源。*Candidatus\_Competibacter*也是有利于污泥沉降的微生物菌属<sup>[19]</sup>,当COD浓度为200和300 mg/L时,该菌在沉降性能偏差的乳酸钠体系中的占比低于乙酸钠体系。*norank\_f\_Saprospiraceae*为缺氧环境中生存的硝化反硝化菌<sup>[20]</sup>,该菌在比反硝化速率更高的乳酸钠体系中占比更高。有研究表明,*Ferruginibacter*广泛存在于活性污泥中,有降解有机物的功能,是一种分泌EPS的絮凝菌<sup>[21-22]</sup>,在乳酸钠体系中该菌占比更高,证明了以乳酸钠为碳源时更容易造成污泥膨胀,并且膨胀情况与COD浓度成正比。

### 3 结论

① 在COD为300 mg/L条件下,以乳酸钠和乙酸钠分别作为碳源时对总氮的去除率差别不大;当COD为400 mg/L时,乳酸钠对硝化过程影响较小,是更易被反硝化菌利用的碳源,在总氮去除率方面较乙酸钠有明显的优势,而乙酸钠作为碳源更容易造成 $\text{NO}_2^-$ -N积累。

② 长期运行情况下,乳酸钠和乙酸钠体系中的污泥均会出现不同程度的膨胀现象。乳酸钠的物理性质导致污泥絮体松散,污泥膨胀与COD浓度成正比,随着运行时间的延长污泥结块现象加剧。

③ 乳酸钠体系与乙酸钠体系的微生物种群具有很高的相似性,其中*Candidatus\_Competibacter*和*norank\_f\_AKYNH767*两种菌占比较高,它们有代谢糖原、降解 $\text{NH}_4^+$ -N和有机物的功能,说明乳酸钠作为小分子碳源与乙酸钠有相似的生物可利用性。而可分泌大量胞外聚合物的*Ferruginibacter*在乳酸钠体系中占比更高,这可能是污泥膨胀加剧的主要原因。

### 参考文献:

- [1] HAN X M, ZHOU Z, MEI X J, *et al.* Influence of fermentation liquid from waste activated sludge on anoxic/oxic-membrane bioreactor performance: nitrogen removal, membrane fouling and microbial community [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250: 699-707.
- [2] 张静,陈洪斌. 低碳源污水的脱氮除磷技术研究进展[J]. *水处理技术*, 2014, 40(1): 1-6, 15.
- [3] ZHANG Jing, CHEN Hongbin. Review on nitrogen and phosphorus removal technology for low C/N municipal wastewater treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, 40(1): 1-6, 15 (in Chinese).
- [4] 朱子晗,周涛,赵由才,等. 兼氧条件下厨余垃圾发酵液作碳源的反硝化性能[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(5): 2268-2274.
- [5] ZHU Zihan, ZHOU Tao, ZHAO Youcai, *et al.* The use of kitchen waste fermentation liquid as carbon source for denitrification based on facultative treatment system [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(5): 2268-2274 (in Chinese).
- [6] BRENNAN R B, CLIFFORD E, DEVROEDT C, *et al.* Treatment of landfill leachate in municipal wastewater treatment plants and impacts on effluent ammonium concentrations [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 188: 64-72.
- [7] WU Y Q, SONG K, JIANG Y H, *et al.* Effect of thermal hydrolysis sludge supernatant as carbon source for biological denitrification with pilot-scale two-stage anoxic-oxic process and nitrogen balance model establishment [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2018, 139: 132-138.
- [8] SUN H H, WU Q, YU P, *et al.* Denitrification using excess activated sludge as carbon source: performance and the microbial community dynamics [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 624-632.
- [9] 李梦露,蒋建国,张昊巍. 餐厨垃圾水解酸化液作碳源的脱氮效果研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(4): 917-923.
- [10] LI Menglu, JIANG Jianguo, ZHANG Haowei. Effect of kitchen waste hydrolysis products on domestic wastewater denitrification [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(4): 917-923 (in Chinese).
- [11] KIM H, KIM J, SHIN S G, *et al.* Continuous fermentation of food waste leachate for the production of volatile fatty acids and potential as a denitrification carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 207: 440-445.
- [12] TANG J L, WANG X C, HU Y S, *et al.* Applying fermentation liquid of food waste as carbon source to a pilot-scale anoxic/oxic-membrane bioreactor for enhancing nitrogen removal: microbial communities and membrane fouling behaviour [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 236: 164-173.

- [10] 汪群慧, 王铭涵, 马晓宇, 等. 餐厨垃圾乳酸发酵技术的研究进展 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3176-3188.  
WANG Qunhui, WANG Nuohan, MA Xiaoyu, *et al.* Research advances for lactic acid fermentation of food waste [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3176-3188 (in Chinese).
- [11] TANG J L, WANG X C, HU Y S, *et al.* Nitrogen removal enhancement using lactic acid fermentation products from food waste as external carbon sources: performance and microbial communities [J]. Bioresource Technology, 2018, 256: 259-268.
- [12] 王琬, 冯萃敏, 赵福祥, 等. 餐厨垃圾污泥共发酵强化低 C/N A<sup>2</sup>O 脱氮除磷 [J]. 水处理技术, 2021, 47(8): 100-104.  
WANG Wan, FENG Cuimin, ZHAO Fuxiang, *et al.* Study on enhancement of nitrogen and phosphorus removal of A<sup>2</sup>O with low C/N by co-fermentation of kitchen waste and sludge [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(8): 100-104 (in Chinese).
- [13] 何秋来. 厌氧/好氧/缺氧同步硝化反硝化除磷颗粒污泥系统构建及强化策略研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.  
HE Qiulai. Start-up and Enhancement of Simultaneous Nitrification, Denitrification and Phosphorus Removal System Based on Aerobic Granular Sludge in the Anaerobic/Oxic/Anoxic Mode [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019 (in Chinese).
- [14] ZHENG X W, ZHANG S Y, HUANG D Y, *et al.* A pilot-scale deep bed denitrification filter for secondary effluent treatment using sodium acetate as external carbon [J]. Water Environment Research, 2019, 91(6): 491-499.
- [15] ZHANG B, YU Q W, YAN G Q, *et al.* Seasonal bacterial community succession in four typical wastewater treatment plants: correlations between core microbes and process performance [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-11.
- [16] 宗永臣. 青藏高原环境下 A<sup>2</sup>O 工艺微生物特征及脱氮除磷机理研究 [D]. 拉萨: 西藏大学, 2021.  
ZONG Yongchen. Microbial Characteristics and Denitrification and Dephosphorization Mechanisms of A<sup>2</sup>O Process in Tibetan Plateau Environment [D]. Lhasa: Tibet University, 2021 (in Chinese).
- [17] SIMON J M, MADS A, EVA K A, *et al.* 'Candidatus Competibacter'-lineage genomes retrieved from metagenomes reveal functional metabolic diversity [J]. The ISME Journal, 2014, 8(3): 613-624.
- [18] DU S M, YU D S, ZHAO J, *et al.* Achieving deep-level nutrient removal via combined denitrifying phosphorus removal and simultaneous partial nitrification-endogenous denitrification process in a single-sludge sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2019, 289: 121690.
- [19] 高春娣, 张娜, 韩徽, 等. 低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 [J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3373-3383.  
GAO Chundi, ZHANG Na, HAN Hui, *et al.* Microbial diversity of filamentous sludge bulking at low temperature [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3373-3383 (in Chinese).
- [20] SONG J Y, ZHANG W, GAO J F, *et al.* A pilot-scale study on the treatment of landfill leachate by a composite biological system under low dissolved oxygen conditions: performance and microbial community [J]. Bioresource Technology, 2020, 296: 122344.
- [21] 李松亚. 微生物群落与群体感应对活性污泥系统运行协同关系研究 [D]. 天津: 天津大学, 2020.  
LI Songya. Research on Cooperative Relationship between Microbial Community and Quorum Sensing on Performance of Activated Sludge [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020 (in Chinese).
- [22] CHEN H, LI A, CUI C W, *et al.* AHL-mediated quorum sensing regulates the variations of microbial community and sludge properties of aerobic granular sludge under low organic loading [J]. Environment International, 2019, 130: 104946.

作者简介: 张佳颖(1997-), 女, 甘肃酒泉人, 硕士研究生, 主要研究方向为污水脱氮及污泥资源化。

E-mail: 1137140413@qq.com

收稿日期: 2022-01-10

修回日期: 2022-02-16

(编辑: 任莹莹)