

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.002

# 生物燃料副产物作为生物脱氮除磷碳源的研究

彭志英<sup>1</sup>, 李冰冰<sup>1,2</sup>, 王燕<sup>1,3</sup>, 单威<sup>1</sup>, 郑凯凯<sup>1,3</sup>, 高志扬<sup>4</sup>,  
唐晓博<sup>4</sup>, 李激<sup>1,5,6,7</sup>

(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 安徽农业大学 生命科学学院, 安徽 合肥 230036; 3. 无锡普汇环保科技有限公司, 江苏 无锡 214028; 4. 无锡市高新水务有限公司, 江苏 无锡 214028; 5. 江苏省高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009; 6. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 7. 江苏省生物质能与减碳技术工程实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 为给污水处理厂生物脱氮除磷提供新的碳源选择和实现废弃物资源化利用,以工业乙酸钠为对照,研究了以生物燃料生产过程中的副产物(BBP)为碳源的生物脱氮除磷效果。BBP反应器运行19 d后,出水TN、TP浓度与乙酸钠反应器的接近。BBP反应器对TN的去除率可达61.7%,TP去除率约为80%,出水COD维持在50 mg/L以下,出水水质可达到GB 18918—2002的一级A排放标准。BBP中不易被微生物直接利用的有机物占比达42%,乙酸钠中为15%。以BPP对活性污泥进行驯化后,其反硝化潜力从0升至10.63 mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(gVSS·h),脱氮能力提高,与乙酸钠初期反硝化潜力11.09 mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(gVSS·h)相近。

**关键词:** 碳源; 脱氮除磷; 生物燃料副产物; 反硝化潜力

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0007-07

## Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Using Biofuel By-product as Carbon Source

PENG Zhi-ying<sup>1</sup>, LI Bing-bing<sup>1,2</sup>, WANG Yan<sup>1,3</sup>, SHAN Wei<sup>1</sup>, ZHENG Kai-kai<sup>1,3</sup>,  
GAO Zhi-yang<sup>4</sup>, TANG Xiao-bo<sup>4</sup>, LI Ji<sup>1,5,6,7</sup>

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;  
2. School of Life Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. Wuxi Puhui Environmental Protection Technology Co. Ltd., Wuxi 214028, China; 4. Wuxi Gaoxin Water Co. Ltd., Wuxi 214028, China; 5. Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material in Universities of Jiangsu Province, Suzhou 215009, China; 6. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China; 7. Jiangsu Engineering Laboratory of Biomass Energy and Carbon Reduction Technology, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** In order to provide a new choice of carbon source for wastewater treatment plant and realize the utilization of waste resources, using industrial sodium acetate as a control, the biological nitrogen and phosphorus removal of the by-product (BBP) from the biofuels production process was

studied. After 19 days of operation in the BBP reactor, the effluent TN and TP concentrations were close to those in the sodium acetate reactor. The removal rate of TN and TP in BBP reactor could reach 61.7% and 80% respectively, the effluent COD concentration was maintained below 50 mg/L, and the effluent quality could meet the first level A discharge standard of GB 18918 – 2002. In BBP, the proportion of organic matter which was not easy to be directly used by microorganisms was 42%, and that in sodium acetate was 15%. After the domestication of activated sludge using BBP as the carbon source, the denitrification potential increased from 0 to 10.63  $\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ , which was close to initial denitrification potential of sodium acetate of 11.09  $\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ .

**Key words:** carbon source; nitrogen and phosphorus removal; biofuel by-product; denitrification potential

生物脱氮除磷是最为经济有效的氮、磷污染物去除途径,在反硝化和厌氧释磷阶段,需要碳源为之提供电子供体<sup>[1]</sup>,因此,碳源是此过程的重要影响因素。不少学者研究了各种有机物作为碳源的脱氮除磷效果,如淀粉、葡萄糖、甲醇、乙醇、乙酸、乙酸钠等。淀粉和葡萄糖不易被脱氮除磷菌直接利用,脱氮除磷效果较差,已逐渐被淘汰<sup>[2]</sup>。甲醇、乙醇属易燃易爆的危险液体,亦被限制使用。因此能供污水处理厂选择的碳源种类不多,目前常用的有乙酸钠和乙酸,它们可以被微生物快速降解利用,参与到脱氮除磷过程。但乙酸钠在低温条件下容易结晶,结晶后 COD 当量折损,碳源投加成本增加;并且乙酸钠容易导致某些丝状菌大量生长<sup>[3]</sup>,从而引发污泥膨胀和生物泡沫问题<sup>[4-6]</sup>。长期投加乙酸,会造成水栉霉等丝状真菌疯长,堵塞构筑物等问题<sup>[7]</sup>。

越来越多的研究发现很多废弃物的衍生物可以用作脱氮除磷的碳源,比如餐厨垃圾发酵液<sup>[8]</sup>、农业废弃物<sup>[9-10]</sup>、垃圾渗滤液<sup>[11]</sup>等,虽然取得一定的效果,但是应用仍有局限性。餐厨垃圾发酵液产物的 SCOD 当量约为 50 000  $\text{mg/L}$ <sup>[12]</sup>,作为外加碳源时投加量较大。农业废弃物如秸秆、花生壳等多为固体碳源,需要进行预处理获得浸出液,微生物在脱氮除磷过程中难以直接利用。垃圾渗滤液中含有重金属等有毒物质<sup>[13]</sup>,无法直接作为碳源使用。

另一方面,由于能源危机,可再生能源——生物燃料受到广泛关注。以农业废弃物<sup>[14-15]</sup>为原材料制取生物燃料逐渐成为研究热点。生物柴油是主要的生物燃料之一,在其制备过程中有大量的粗甘油产生<sup>[16]</sup>。过剩的粗甘油限制了可再生能源行业的发展。甘油可广泛应用于日化、医药等行业,但粗甘油提纯成本高昂,因此粗甘油的利用是能源行业发

展的关键问题。有研究表明,甘油可以作为脱氮除磷的碳源<sup>[17-18]</sup>,且具有较好的脱氮除磷潜力。

笔者以生物燃料生产过程中产生的副产物(BBP,主要成分为甘油)为研究对象,以工业乙酸钠为对照,探究 BBP 的脱氮除磷效果,以期为污水处理厂提供新的碳源选择,同时为农业废弃物的处理和能源发展提供新的参考方向。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

试验装置采用 SBR 反应器(见图 1),主体为 10 L,有效工作体积为 8 L,每周期进水 3 L。温度为室温(22 ~ 26  $^{\circ}\text{C}$ ),污泥龄(SRT)维持在 15 d,水力停留时间(HRT)为 10.67 h,活性污泥浓度为 2 500 ~ 3 000  $\text{mg/L}$ 。SBR 的工作周期为 6 h,包括进水、搅拌、曝气、沉淀、排水等 5 个工序,时间依次为 0.5、1、3、1、0.5 h。曝气阶段控制 DO 在 4.0  $\text{mg/L}$ ,厌氧阶段 DO 为 0。投加工业乙酸钠的反应器为对照组,投加 BBP 碳源的反应器为试验组,控制两组反应器进水 COD 浓度为 200 ~ 250  $\text{mg/L}$ 。

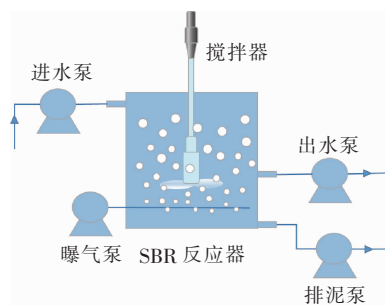


图 1 SBR 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR device

### 1.2 试验水质及接种污泥来源

试验用水取自无锡市某污水处理厂曝气沉砂池

出水, COD 为 100 ~ 180 mg/L,  $\text{NH}_3 - \text{N}$  为 25 ~ 30 mg/L,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度基本为 0, TN 为 28 ~ 42 mg/L,  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  为 0.3 ~ 2.0 mg/L, TP 为 0.5 ~ 2.5 mg/L。活性污泥取自该污水处理厂 A<sup>2</sup>O 工艺的曝气池中段, 浓度为 (5 500 ± 500) mg/L。

### 1.3 分析项目与方法

每 3 d 取样检测进出水水质, 包括  $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、TP 和 COD, 均采用国家标准方法测定。碳源成分分析包括 TN、TP、COD 和 BOD<sub>5</sub>, 采用 GC-MS 进行分析。

### 1.4 反硝化潜力测试

首先从两组反应器中各取 1 L 活性污泥, 静置倒去上清液后加入自来水混匀, 再静置, 倒去上清液。将活性污泥清洗 2 ~ 3 次后, 放入磁力搅拌子, 并将两组烧杯分别置于磁力搅拌器上。使用便携式溶解氧仪监测烧杯中的 DO 浓度变化, 待烧杯中的 DO 降为 0 后, 分别往两组烧杯中加入 0.15 g  $\text{KNO}_3$ , 使初始  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度为 20 mg/L, 再分别加入 COD 当量为 200 mg/L 的无水乙酸钠和 BBP, 立即搅拌均匀后取样作为 0 min 的样品, 此后每间隔一定时间取一次样品, 并记录取样时间。然后以时间为横坐标,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度为纵坐标绘制速率曲线。最后根据曲线斜率 and 对应的污泥浓度计算两个反应器中活性污泥的反硝化潜力。

### 1.5 缓慢生物降解 COD

缓慢生物降解 COD 参考金鹏康等人<sup>[19]</sup>的测试方法。取 3 L 以生活污水为主要进水的污水处理厂活性污泥, 静置沉淀后倒去上清液, 加入自来水至 3 L, 静置, 倒掉上清液, 重复 2 ~ 3 次, 消除本底 COD 的影响。将清洗后的活性污泥分成 3 份, 分别编号为 0<sup>#</sup>、1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>, 接着对活性污泥混合液进行曝气, 维持 DO 浓度在 2 mg/L 以上。然后投加碳源, 0<sup>#</sup> 为空白对照, 不加碳源; 1<sup>#</sup> 加工业乙酸钠; 2<sup>#</sup> 加 BBP 碳源。碳源投加量以使 COD 浓度达到 100 mg/L 为准。连续曝气 4 h, 每隔 0.5 h 或 1 h 取样, 样品经 0.45 μm 滤膜过滤后测试 COD 浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳源常规指标分析

首先分析了 BBP 和工业乙酸钠两种碳源中 N、P、COD 及 BOD<sub>5</sub> 含量, 结果如表 1 所示。BBP 的 COD 当量远高于工业乙酸钠, 但其 BOD<sub>5</sub> 仅为 50 ×

10<sup>4</sup> mg/L, BOD<sub>5</sub>/COD 不到 0.5, 而工业乙酸钠的 BOD<sub>5</sub>/COD 可达 0.75。由于 BBP 来源于植物, 其 TP 含量远高于工业乙酸钠。由于 BBP 的 COD 当量非常高, 其本身所含的 TN 和 TP 含量对其作为碳源进行脱氮除磷的影响甚微, 不影响其作为碳源使用。另外, BBP 和工业乙酸钠中挥发性脂肪酸 (VFAs) 的含量分别为 857.6 mg/L 和 15.71 × 10<sup>4</sup> mg/L, 表明 BBP 中用于脱氮除磷菌的可快速降解有机物含量非常低。BBP 的 pH 值较低, 呈弱酸性, 稀释后酸性有所减弱, 在应用时需使用  $\text{NaHCO}_3$  调节 pH 值。

表 1 碳源基本指标分析

Tab. 1 Basic index of carbon source

检测指标	BBP	工业乙酸钠
COD/(mg · L <sup>-1</sup> )	106 × 10 <sup>4</sup>	20 × 10 <sup>4</sup>
BOD <sub>5</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	50 × 10 <sup>4</sup>	15 × 10 <sup>4</sup>
BOD <sub>5</sub> /COD	0.47	0.75
TN/(mg · L <sup>-1</sup> )	890	886
$\text{NH}_3 - \text{N}$ /(mg · L <sup>-1</sup> )	159	112
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ /(mg · L <sup>-1</sup> )	82	203
TP/(mg · L <sup>-1</sup> )	112	5
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ /(mg · L <sup>-1</sup> )	77	3
pH 值	5.68	7.95
VFAs	乙酸/(mg · L <sup>-1</sup> )	179.8
	丙酸/(mg · L <sup>-1</sup> )	677.8
		15.71 × 10 <sup>4</sup>
		—

### 2.2 碳源有机成分分析

碳源成分的 GC-MS 分析结果见表 2 (相对含量 < 1.0% 的物质未列出), BBP 中主要有机成分为甘油, 占比达 40% 以上, 此外还含有部分长链烷烃、醛类和苯酚类物质等。在前人的研究中, 已经证明了甘油可以作为活性污泥脱氮除磷的碳源, 且获得了较好的污染物去除效果和丰富的微生物多样性<sup>[20]</sup>。说明 BBP 具有作为有效碳源的潜能。

表 2 BBP 主要有机成分

Tab. 2 Main organic components in BBP %

有机物	分子式	相对含量	可能性
甘油	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	40.22	95.3
甲基十七烷	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$	14.06	71.9
二甲醇缩甲醛	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$	6.10	78.4
油酸	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$	1.87	77.2
4-乙基-2-甲氧基苯酚	$\text{C}_9\text{H}_{10}\text{O}_2$	1.02	93.8

### 2.3 污染物去除效果

#### 2.3.1 氮的去除

两组反应器在对氮的去除效果上存在明显差异

(见图2)。进水 TN 约为 35 mg/L,  $\text{NH}_3\text{-N}$  约为 30 mg/L,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  基本为 0。以工业乙酸钠为碳源的反应器运行 7 d 后, TN 的去除达到较稳定的状态, 出水中的 TN 主要为  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ , TN 约为 10 mg/L, 去除率最高可达 75.0% 以上。以 BBP 为碳源的反应器运行 7 d 后,  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除效果较好, 出水浓度基本为 0; 但  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度和 TN 浓度较高, 在第 16 天以前, 出水 TN 浓度高于 15 mg/L, 最大值超过 20 mg/L。但在之后, 出水 TN 浓度逐渐降至 11 mg/L, TN 去除率逐渐上升至 61.7%, 反硝化脱氮效果增强。说明活性污泥经过驯化后, 可以 BBP 为碳源进行反硝化脱氮。

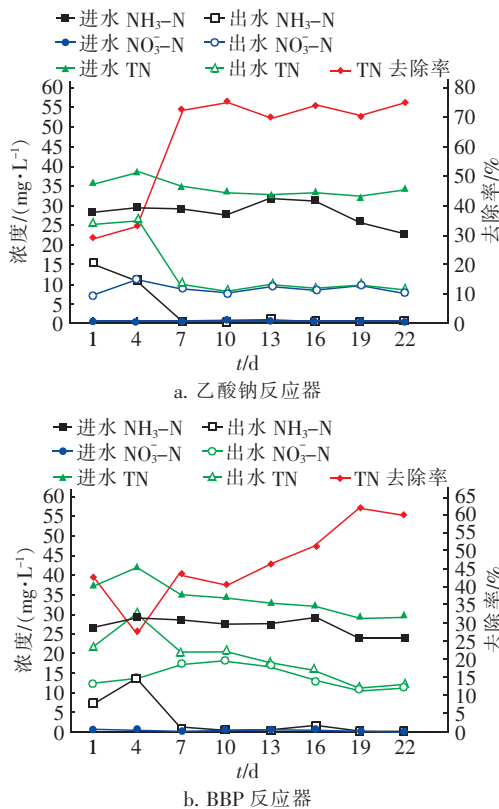


图2 两组 SBR 反应器对氮污染物的去除效果

Fig. 2 Removal effect of nitrogen pollutants by two SBR reactors

### 2.3.2 磷的去除

图3为两组 SBR 反应器进出水中的磷浓度变化情况。进水 TP 成分主要为  $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ , 有少量有机磷; 出水  $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$  浓度与 TP 基本一致。根据图3 (a) 可知, 乙酸钠反应器运行前期, 进水中 TP 浓度低于 1.0 mg/L, 乙酸钠为易生物利用碳源, 在微生物的同化作用和生物除磷作用下, TP 的去除率较高

(92.0%)。后期随着进水磷浓度的增加, 进水中的易降解碳源(包括外加的乙酸钠)不能为反硝化细菌和除磷菌提供足够电子供体, 因此 TP 的去除率有所下降, 但始终维持在 80.0% 以上。出水 TP 低于 0.5 mg/L, 出水水质达到一级 A 标准。

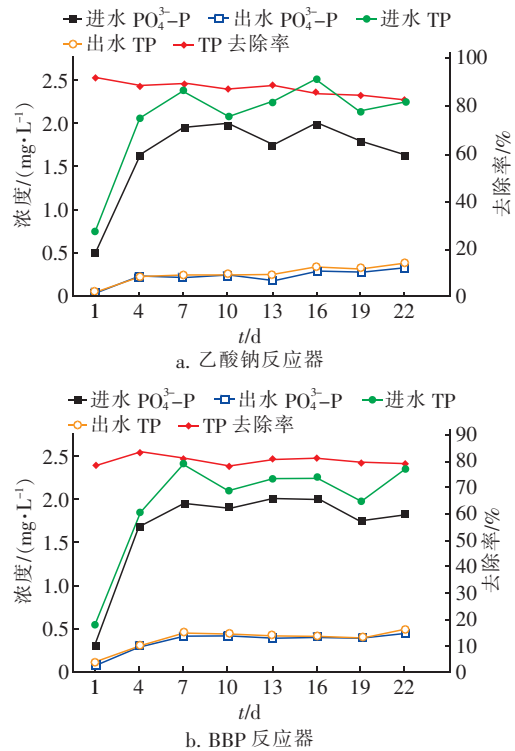


图3 两组 SBR 反应器的除磷效果对比

Fig. 3 Removal effect of phosphorus by two SBR reactors

BBP 反应器运行前期进水磷浓度与乙酸钠反应器的相似, 磷的去除主要依靠微生物的同化作用和除磷菌的好氧吸磷作用来实现。前期 BBP 反应器的 TP 去除率(78.2%) 低于乙酸钠反应器, 但在后期出水 TP 浓度仍可以达到一级 A 排放标准, 平均去除率为 80.0%。说明 BBP 可以作为生物除磷的外加碳源。

### 2.3.3 COD 的去除

两组 SBR 反应器对 COD 的去除效果见图 4。乙酸钠反应器进水 COD 平均浓度为 204 mg/L, 出水 COD 平均浓度为 34 mg/L。在运行至第 7 天时出水 COD 为 53 mg/L, 在第 10 天后, 出水 COD 浓度低于 30 mg/L, 出水水质优于一级 A 标准。BBP 反应器进水 COD 平均浓度为 206 mg/L, 出水 COD 平均浓度为 46 mg/L。在第 13 天和第 16 天出水 COD 分别为 53、70 mg/L, 在其余时间均低于 50 mg/L, 出水水质基本可以达到一级 A 标准, 表明微生物可以



分解利用 BBP。

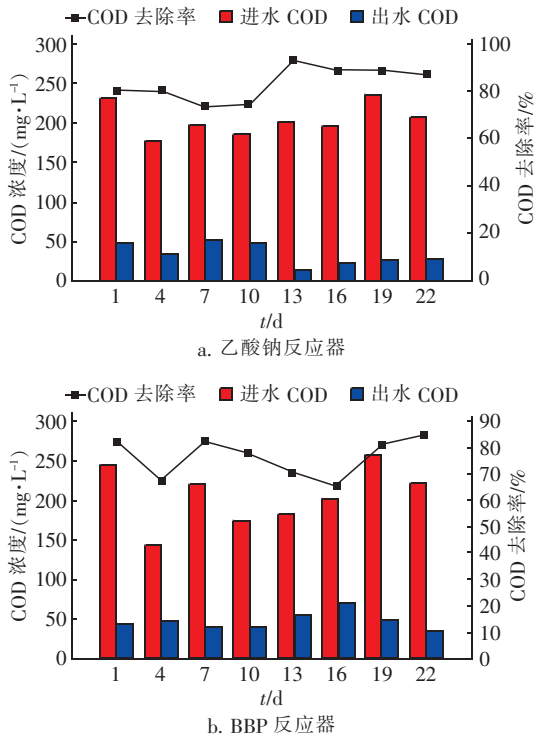


图 4 两组 SBR 反应器对 COD 的去除效果

Fig. 4 Removal effect of COD by two SBR reactors

2.4 缓慢生物降解COD

一般地,碳源中容易被微生物降解的有机物在好氧条件下降解得更彻底。由于 BBR 反应器出水的 COD 浓度较乙酸钠反应器高,为探究原因,设计曝气试验测试好氧条件下的 COD 降解率来评估碳源中易生物降解的 COD,结果见表 3(3 种条件下的本底 COD 分别为 25、17、13 mg/L)。工业乙酸钠曝气超过 1 h 后,COD 从 117 mg/L 降至 50 mg/L 以下;曝气 2 h 后维持在 20~30 mg/L 之间,高于空白对照,且不再降低。说明工业乙酸钠易被微生物降解,其中也含有少量不易被微生物直接利用的有机物,通过计算,这部分有机物的占比为 15%。而 BBP 曝气 4 h 后,COD 才从 101 mg/L 降至 46 mg/L,其中缓慢生物降解的 COD 占比为 42%。表明 BBP 中部分有机物需经微生物降解后才能被利用。

表 3 COD 曝气试验分析

Tab. 3 Analysis of COD aeration test

项 目	曝气时间/h					
	0	0.5	1	2	3	4
空白/(mg·L <sup>-1</sup> )	25	30	14	12	12	18
工业乙酸钠/(mg·L <sup>-1</sup> )	117	82	56	21	25	27
BBP/(mg·L <sup>-1</sup> )	101	99	84	93	56	46

2.5 不同驯化阶段的反硝化潜力

图 5(a)为两组反应器分别在运行前、第 13 天和第 25 天的反硝化潜力(因为第二阶段的反硝化潜力较低,故未给出线性公式)。当分别以工业乙酸钠和 BBP 作为外加碳源时,原始活性污泥的反硝化潜力存在明显差异:以工业乙酸钠为碳源时,反硝化潜力为 11.09 mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(gVSS·h);以 BBP 为碳源时,反硝化潜力基本为 0。随着运行时间的延长,以 BBP 为碳源的活性污泥反硝化潜力逐渐升高,运行至第 13 天和第 25 天时,反硝化潜力分别为 2.40、10.63 mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(gVSS·h),高于一般污水处理厂活性污泥的反硝化潜力水平,但较以乙酸钠为碳源的活性污泥反硝化潜力 [10.59、17.16 mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(gVSS·h)] 低。

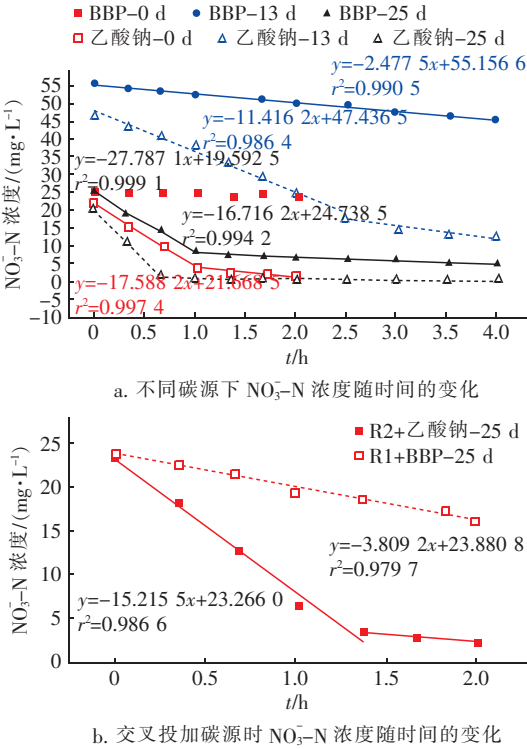


图 5 两组反应器在不同运行阶段分别外加两种碳源的反硝化潜力

Fig. 5 Denitrification potentials of reactors added with two carbon sources at different operating stages

两组反应器运行至第 25 天时,乙酸钠反应器中的活性污泥 (MLVSS 为 1 546 mg/L) 以 BBP 为碳源,BBP 反应器中活性污泥 (MLVSS 为 1 611 mg/L) 以工业乙酸钠为碳源进行交叉试验,所测得的反硝化潜力如图 5(b) 所示。乙酸钠反应器中的活性污泥以 BBP 为碳源的反硝化潜力为 2.46 mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/

( $\text{gVSS} \cdot \text{h}$ ), BBP 反应器中的活性污泥以工业乙酸钠为碳源的反硝化潜力前 80 min 和后 40 min 分别为 9.44、1.23  $\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。碳源交叉试验结果进一步说明 BBP 需要对活性污泥进行驯化才能被微生物所利用。在付昆明等人<sup>[21]</sup>的研究中,不同有机碳源对活性污泥的驯化时间不同,乙酸钠的驯化时间较短,其他有机物的驯化时间较长。

综上所述,BBP 有望成为生物脱氮除磷的一种备选碳源,后续需进一步优化运行条件以提高碳源的利用率,且 BBP 对活性污泥中微生物群落的驯化过程值得关注。

### 3 结论

① BBP 作为生物燃料生产中的一种副产物,其主要成分为甘油,占比约为 40%。COD 当量为  $106 \times 10^4 \text{ mg/L}$ ,  $\text{BOD}_5/\text{COD}$  为 0.47,缓慢生物降解 COD 占比约为 42%,基本不含可被微生物直接利用的 VFAs。

② 采用 BBP 对活性污泥进行驯化培养后,出水 TN 可降至 11  $\text{mg/L}$ ,与工业乙酸钠的出水 TN 浓度(10  $\text{mg/L}$ )接近,TN 去除率提高至 61.7%;出水 TP 浓度低于 0.5  $\text{mg/L}$ ,略高于工业乙酸钠出水,TP 去除率约为 80%;出水 COD 浓度低于 50  $\text{mg/L}$ 。以 BBP 为外加碳源时,出水水质基本可以达到一级 A 排放标准。

③ 采用 BBP 对活性污泥进行驯化后,反硝化潜力升高至 10.63  $\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ,与乙酸钠反应器初期反硝化潜力相近[11.09  $\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ]。碳源交叉试验中,乙酸钠反应器反硝化潜力为 2.46  $\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ,BBP 反应器反硝化潜力为 9.44  $\text{mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。说明活性污泥需要经过驯化后才能利用 BBP。

### 参考文献:

- [1] 龚本洲,周炯,刘石虎,等. C/N 值对短时曝气 SBR 高标准脱氮除磷效能的影响[J]. 中国给水排水, 2020,36(15):13-17.  
GONG Benzhou,ZHOU Jiong,LIU Shihu, *et al.* Effect of C/N ratio on high-standard nitrogen and phosphorus removal efficiency of SBR with short-time aeration[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(15): 13-17 (in Chinese).
- [2] GUERRERO J, GUIASOLA A, BAEZA J A. The nature of the carbon source rules the competition between PAO and denitrifiers in systems for simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal[J]. Water Research, 2011,45:4793-4802.
- [3] 王慕华. 不同碳源对丝状菌种群结构的影响研究[D]. 保定:河北大学,2016.  
WANG Muhua. Study on the Influence of Different Carbon on the Community of Filamentous Bacteria[D]. Baoding: Hebei University, 2016 (in Chinese).
- [4] 贺雪濛. 乙酸钠为单一碳源条件下的膨胀污泥性能及调控研究[D]. 南京:南京大学,2018.  
HE Xueming. Performance and Control of Bulking Sludge Using Sodium Acetate as the Single Carbon Source [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018 (in Chinese).
- [5] 方雷. 乌鲁木齐某污水处理厂生物泡沫的成因及控制对策[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2019.  
FANG Lei. Causes and Control Measures of Biological Foam in Sewage Treatment Plant in Urumqi [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019 (in Chinese).
- [6] 李探微,彭永臻,陈志根,等. 活性污泥法的生物泡沫形成和控制[J]. 中国给水排水, 2001,17(4):73-76.  
LI Tanwei, PENG Yongzhen, CHEN Zhigen, *et al.* Bio-foam formation and control in activated sludge process [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(4): 73-76 (in Chinese).
- [7] 唐灵铃,高俊贤,李激,等. 太湖流域某污水处理厂反硝化滤池堵塞成因与对策[C]//环境工程编辑部. 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会论文集. 北京:环境工程编辑部,2019:228-232.  
TANG Lingling, GAO Junxian, LI Ji, *et al.* Causes and countermeasures of denitrifying filter blockage in a wastewater treatment plant in Taihu Lake Basin [C]// Environmental Engineering Editorial Office. 2019 Science and Technology Annual Meeting of Chinese Society for Environmental Science. Beijing: Environmental Engineering Editorial Office, 2019: 228-232 (in Chinese).
- [8] TANG J, WANG X, HU Y, *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.
- [9] 韩恺忻,邹小林,宋珊嘉,等. 秸秆碳源对高硝氮含量水体脱氮效果实验研究[J]. 水处理技术, 2019,45

- (2):105-109.
- HAN Kaixin, ZOU Xiaolin, SONG Pengjia, *et al.* Study on the denitrification effect of high nitrate nitrogen content water by straw as carbon source[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45 (2): 105 - 109 (in Chinese).
- [10] 赵文莉,郝瑞霞,李斌,等. 预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35 (3):987-994.
- ZHAO Wenli, HAO Ruixia, LI Bin, *et al.* Effects of pretreatment methods on corn cob as carbon source for denitrification [J]. *Environmental Science*, 2014, 35 (3):987-994 (in Chinese).
- [11] TORA J A, BAEZA J A, CARRERA J, *et al.* Denitrification of a high-strength nitrite wastewater in a sequencing batch reactor using different organic carbon sources[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 172: 994-998.
- [12] TANG J, PU Y, WANG X, *et al.* Effect of additional food waste slurry generated by mesophilic acidogenic fermentation on nutrient removal and sludge properties during wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294:122218.
- [13] 陈朱蕾,唐素琴,谢文刚,等. 不同填埋时间、不同季节的垃圾渗滤液生物毒性[J]. *环境科学*, 2010, 31 (2):541-546.
- CHEN Zhulei, TANG Suqin, XIE Wengang, *et al.* Toxicity of leachate of different landfill ages and different seasons [J]. *Environmental Science*, 2010, 31 (2): 541-546 (in Chinese).
- [14] 陈亮,任永成,杜风光,等. 玉米秸秆水解液燃料乙醇发酵条件优化[J]. *太阳能学报*, 2020, 41 (7):33-39.
- CHEN Liang, REN Yongcheng, DU Fengguang, *et al.* Optimization of fuel ethanol fermentation condition with corn straw hydrolysate as raw material [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41 (7): 33 - 39 (in Chinese).
- [15] GE S B, YEK P N Y, CHENG Y W, *et al.* Progress in microwave pyrolysis conversion of agricultural waste to value-added biofuels: a batch to continuous approach [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135:110148.
- [16] 柴宝华,王怡,王文怀,等. 紫外诱变酵母菌利用餐饮废水油脂制取生物柴油[J]. *中国给水排水*, 2019, 35 (21):113-117.
- CHAI Baohua, WANG Yi, WANG Wenhui, *et al.* Biodiesel production by UV mutagenesis yeast feeding catering wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(21):113-117 (in Chinese).
- [17] 夏雪,李继,吕小梅,等. 甘油作为反硝化除磷碳源的运行效能与菌群结构研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(8):118-122.
- XIA Xue, LI Ji, LÜ Xiaomei, *et al.* Operation performance and bacterial community structure of denitrifying phosphorus removal with glycerol as carbon source[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(8):118-122 (in Chinese).
- [18] CARNEIRO R B, FORESTI E. Nutrient biological removal in an up-flow sludge bed reactor under intermittent aeration using glycerol as the sole carbon source[J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2017, 34(4):961-969.
- [19] 金鹏康,刘柯君,王先宝. 慢速可生物降解有机物的转化特性及利用[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5):2168-2174.
- JIN Pengkang, LIU Kejun, WANG Xianbao. Conversion and utilization of slowly biodegradable organic matter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(5):2168-2174 (in Chinese).
- [20] FRISONN, DI FABIO S, CAVINATO C, *et al.* Best available carbon sources to enhance the via-nitrite biological nutrients removal from supernatants of anaerobic co-digestion [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 215/216:15-22.
- [21] 付昆明,杨宗玥,刘凡奇,等. 碳源种类对农村污水反硝化过程脱氮效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(9):2331-2338.
- FU Kunming, YANG Zongyue, LIU Fanqi, *et al.* Effect of carbon sources on nitrogen removal in denitrification process of rural wastewater [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14 (9): 2331 - 2338 (in Chinese).

作者简介:彭志英(1995-),女,云南昭通人,硕士研究生,从事污水脱氮除磷研究。

E-mail: pengzhiying0208@163.com

收稿日期:2021-01-09

修回日期:2021-02-17

(编辑:李德强)