



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202309039

中图分类号 X522

文献标识码 A

钱盘生, 方佳丽, 冯梓恒, 等. 新型生物质碳源的制备及其污水脱氮除磷效果[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 3108-3114. [QIAN Pansheng, FANG Jiali, FENG Ziheng, et al. Preparation of a new biomass carbon source and its application in wastewater denitrification and phosphorus removal[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 3108-3114.]

## 新型生物质碳源的制备及其污水脱氮除磷效果

钱盘生<sup>1</sup>, 方佳丽<sup>2</sup>, 冯梓恒<sup>2</sup>, 王秉政<sup>2,✉</sup>

1. 江苏金山环保科技有限公司, 宜兴 214212; 2. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122

**摘要** 为给城镇污水处理厂生物脱氮除磷提供一种新的碳源选择和开辟蓝藻资源化利用新途径, 以工业碳源乙酸钠为对照, 探究了从蓝藻中提取的高碳低氮磷有机物为核心的新型生物质碳源脱氮除磷效果, 并分析了添加 2 组碳源后的微生物群落特征。结果表明, 与乙酸钠碳源相比, 新型生物质碳源对 COD 的去除效果保持稳定, 平均去除率高达 91.7%; 新型生物质在碳源投入反应器初期时, 反硝化潜力及释磷潜力较低导致  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除率较低; 随着反应器运行至后期, 反硝化潜力和释磷潜力稳步提升,  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率逐渐上升, 最终可达 90% 以上, 对系统中的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 的去除效果良好, 且反应器中微生物丰度较高。本研究制备的新型生物质碳源具有生产原料绿色、安全、无毒和环保的特点, 其生产方法精简高效, 适用于大规模工业化应用, 且脱氮除磷效果好, 具有非常广泛的应用前景及推广价值。

**关键词** 蓝藻; 生物质碳源; 脱氮除磷; 活性污泥

污水处理厂大多数存在因碳源供应不足而导致的处理效果差的问题。因此, 有效解决城市污水处理厂碳源不足的问题, 是提高污水脱氮除磷效率从而实现达标排放的有效途径之一<sup>[1-5]</sup>。目前, 实际污水处理工艺工程中普遍使用的是传统的单一或复合碳源, 或者是以工业废水、污泥及餐厨废弃物水解液、垃圾渗滤液为主的生物质碳源<sup>[6-7]</sup>。传统碳源存在安全性差(甲醇)、价格过高(乙酸、葡萄糖)<sup>[3]</sup>、成分较为复杂(杂酸杂醇复配)等问题, 并且处理过程中可能含有毒物质造成二次污染, 显著提高污水处理成本<sup>[8]</sup>; 而一些国际上使用的生物质碳源, 其优势在生产原料为农产品, 绿色无污染, 化学需氧量(COD)当量高, 但引入国内价格较高<sup>[9]</sup>。因此, 亟需价格低廉、绿色环保、脱氮效果好的生物质碳源<sup>[6]</sup>。

为此, 研究团队前期持续专注于生物质碳源的研发、应用和升级<sup>[10]</sup>。根据目前新型碳源的研究情况, 团队先后尝试从浒苔、木材蒸馏液以及红薯粉丝制作过程中产生的滤液中提取有机酸和多糖组分。然而, 通过对浒苔、木材蒸馏液以及红薯粉丝进行发酵后提取分离有机酸过程的药耗、速率、易获取性能以及投入污水试验的反硝化效果都不尽理想。蓝藻因其含有大量有机质如多糖、蛋白及核酸等, 具有厌氧发酵生产有机酸作为城市污水厂脱氮除磷的外加碳源的潜质而被重点关注<sup>[11]</sup>。蓝藻发酵产有机酸作为外加碳源的纯度和处理效率易受预处理难破壁的多层刚性细胞壁结构和发酵液中较高的氮、磷等影响, 蓝藻发酵液直接加入会增加污水处理系统的氮磷负荷, 致使系统崩溃, 从而制约其规模化应用<sup>[11-12]</sup>。因此, 从蓝藻破壁到如何分离提取发酵液中高碳低氮磷主要成分技术一直是研究热点<sup>[13]</sup>。有研究探索了鸟粪石+磷酸钙沉淀法组合工艺回收蓝藻厌氧发酵液中的氮、磷, 纯化后的蓝藻发酵液作为外源碳源进行污水的反硝化脱氮利用<sup>[14]</sup>。该工艺局限于投入的镁盐、铵盐用量大, 处理成本高, 难以实现工业化; 并且, 当废水中镁磷摩尔比增大, 易生成碱式碳酸镁沉淀, 使鸟粪石纯度降低, 不再具有肥料缓释特性<sup>[15]</sup>。

收稿日期: 2023-09-11; 录用日期: 2023-09-23

基金项目: 江苏省重点研发计划资助项目(BE2021627)

第一作者: 钱盘生(1967—), 男, 博士, 1185905137@qq.com; ✉通信作者: 王秉政(1989—), 男, 博士, 副教授, b.wang@jiangnan.edu.cn

本研究提出一种条件温和、耗能低、适合大规模工业化应用的蓝藻高碳低氮磷有机物组分的提取分离技术，并以该技术提取出的高碳低氮磷有机物为核心，以花生、玉米等农产品的衍生物为主要原料，配比成新型生物质碳源为研究对象，初步探究新型生物质作为碳源对污水中氮、磷的去除效果，以期为成本低廉、高效脱氮除磷、适合我国污水水质的新型生物质碳源制备和实际应用工程中提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 新型生物质碳源的制备

1) 蓝藻中高碳低氮磷有机物提取分离。蓝藻取自太湖湖边的藻水分离站，打捞上岸的新鲜蓝藻均匀混合后进行提取分离试验(图1)。分别利用提取溶剂1(NaOH溶液)、提取溶剂2(含有次氯酸钠或过氧化氢的NaOH溶液)和提取溶剂3(含有氯化钠的NaOH溶液)在室温下对鲜藻进行离心分离，最后将上清液混合得到高碳低氮磷有机物。其中，预脱水处理后的蓝藻样品中含水量在87%~90%，碳氮比为4.9<sup>[16]</sup>。

2) 供试原料。本研究以蓝藻中提取的高碳低氮磷有机物为核心，结合花生、玉米等农产品衍生物为主要原料，混合制成安全无毒、绿色低碳的新型生物质碳源，命名为“京山碳(JSCS)”，其成分配比已出具MSDS化学品安全技术报告，见表1。根据不同配比<sup>[17-18]</sup>，制成不同COD当量的碳源规格，其基本规格性质见表2。

### 1.2 试验方法

1) 试验装置反应器搭建。为探究新型生物质碳源对污水脱氮除磷的效果，本研究在实验室搭建反应器，如图2所示，选用2个完全相同的圆柱形有机玻璃反应器，有效容积为4L。其中一组设置为对照组，选用乙酸钠，其为小分子有机酸，反硝化速率远高于其它单一碳源<sup>[6]</sup>，COD当量为200 g·L<sup>-1</sup>。另设置一组为试验组，选用“JSCS-D”，即COD当量为200 g·L<sup>-1</sup>的新型生物质碳源。

2) 试验装置反应器运行条件。进水为人工配水，选取乙酸钠或新型生物质碳源为碳源，氯化铵为氮源，磷酸氢二钾为磷源。分为2组反应器：a组(乙酸钠碳源)和b组(新型生物质碳源)，待污泥驯化至第15d时分别投入等量碳源，共运行40d，水力停留时间为6h，运行模式为进水15min、厌氧2h、好氧3h、沉淀30min、出水5min、闲置10min。

### 1.3 分析测定指标

1) 水质指标。进出水水质包括COD、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P，均按照《水和废水检测分析方法》<sup>[20]</sup>测定。污泥中微生物的识别和鉴定采用日立Su8020型扫描电镜观测。

2) 计算方法。反硝化潜力和释磷潜力分别通过NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和时间坐标曲线斜率、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P和时间坐标曲线斜率和实验污泥浓度计算<sup>[21]</sup>。

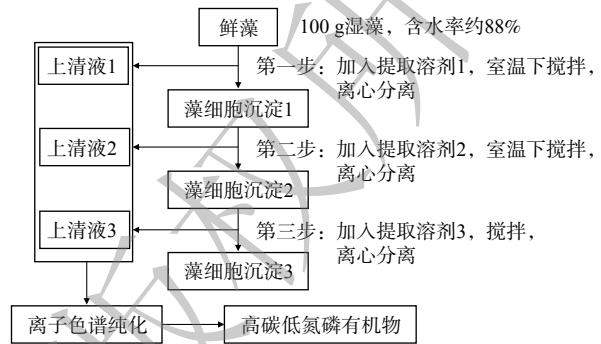


图1 蓝藻中高碳低氮磷有机物的提取分离方法

Fig. 1 Schematic diagram of the extraction method for separating high-carbon, low-nitrogen, and low-phosphorus organic matter from cyanobacteria

表1 新型生物质碳源组成信息<sup>[19]</sup>

Table 1 Information on components and compositions of the novel biomass carbon source

组分	质量分数/%	CAS No.
生物质甘油	55~65	56-81-5
藻蛋白	18~20	20298-86-6
水	15~18	7732-18-5
柠檬酸	5~8	77-92-9

表2 “京山碳”产品基本规格性质

Table 2 Basic properties of the product “JingshanTan”

编号	COD/(g·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> /COD	密度(20℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	pH	溶解性
JSCS-A	1150	0.8	1.08	6~7	100%
JSCS-B	600	0.8	1.08	6~7	100%
JSCS-C	400	0.8	1.06	6~7	100%
JSCS-D	200	0.8	1.05	6~7	100%

## 2 结果与讨论

### 2.1 新型生物质碳源和乙酸钠的水质处理效果分析

1) COD 去除性能。添加乙酸钠和新型生物质作为碳源反应器 COD 的去除性能如图 3 所示。添加乙酸钠碳源的反应器进水 COD 为  $424 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，在运行至第 11 d 时出水 COD 为  $44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，在第 15 d 时投入乙酸钠碳源后直到运行至出水 COD 为  $26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，优于国家一级 A 排放水质标准<sup>[22]</sup> (COD:  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。虽然第 31 d 时出水 COD 为  $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，是由于进水 COD 连续升高(图 3(a))，有机物浓度过高，白色泡沫增多，导致出水在线 COD 检测仪表数值升高<sup>[23]</sup>。添加新型生物质碳源的反应器进水 COD 为  $355 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，由于系统中微生物对新型生物质碳源未完全适应导致出水 COD 偏高；COD 在反应器运行初期在运行至第 11 d 时出水平均 COD 明显下降为  $47.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，在第 15 d 时投入新型生物质碳源后直到运行至第 40 d 稳定出水 COD 为  $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，同样优于国家一级 A 排放水质标准<sup>[22]</sup> (COD:  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。乙酸钠和新型生物质碳源反应器对 COD 的平均去除率均高达 91.7%。因此，新型生物质碳源与乙酸钠碳源对 COD 去除效果相当，可以作为污水处理厂潜在的碳源替代品。

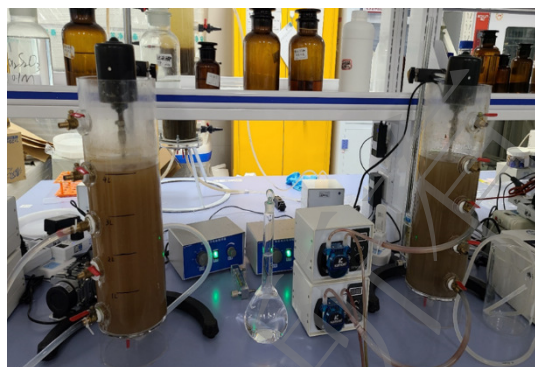


图2 试验装置反应器

Fig. 2 Reactors of experimental apparatus

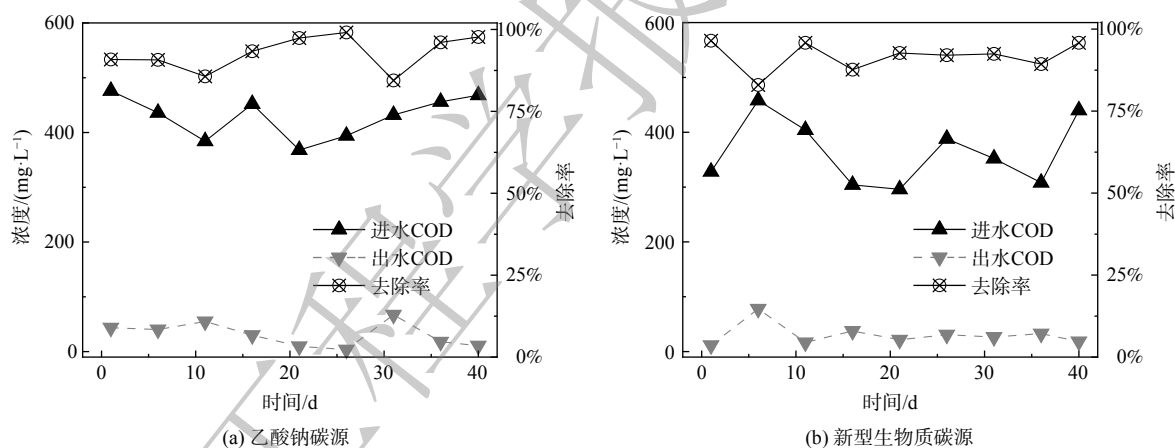


图3 乙酸钠和新型生物质碳源对 COD 去除性能的影响

Fig. 3 Effects of sodium acetate and the novel biomass carbon source on COD removal performance

2) 脱氮性能。添加乙酸钠和新型生物质作为碳源反应器的脱氮性能结果见图 4。添加乙酸钠碳源的反应器进水 TN 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的平均浓度分别为  $50$  和  $35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，进水  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均浓度基本为 0。在运行至第 40 d 后，出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  平均浓度基本为 0， $\text{NO}_3\text{-N}$  平均浓度  $20.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (0~15 d) 和  $11.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (15~40 d)。上述数据表明，反应器运行至第 15 d 出水  $\text{NO}_3\text{-N}$  较高是由于系统碳源不足，不能满足微生物反硝化的需要量，故导致脱氮效果差<sup>[24-25]</sup>；在第 15 d 向反应器投加乙酸钠碳源运行至第 33 d 时，出水  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度呈先快速下降至平稳运行趋势，说明乙酸钠碳源为微生物反硝化细菌提供电子，提高反硝化速率；接着运行至第 40 d 时，随着进水 TN 连续升高，乙酸钠碳源消耗，系统逐渐回到碳源不足的状态，导致系统出水 TN 和  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度连续升高，TN 去除率也连续下降。 $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率全过程稳定，基本接近 99%，出水 TN 平均浓度为  $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这表明出水中 TN 主要为  $\text{NO}_3\text{-N}$ ，平均去除率为 69%，接近国家一级 A 水质排放标准<sup>[22]</sup> (TN< $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

添加新型生物质碳源的反应器进水 TN 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的平均浓度分别为  $41$  和  $38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，进水  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均浓度基本为 0。在运行至第 40 d 后，出水  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均浓度  $20.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (0~15 d)、 $5.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (15~35 d)

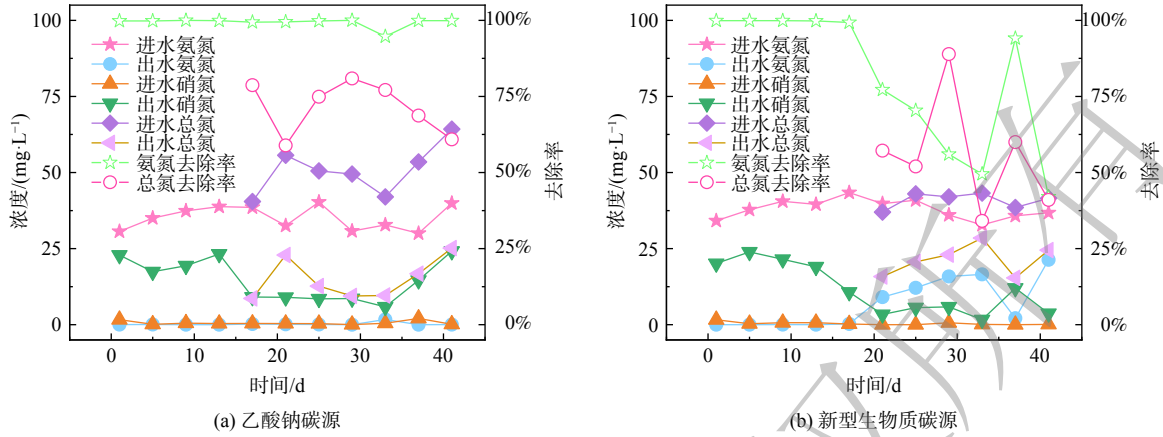


图 4 乙酸钠和新型生物质碳源对脱氮性能的影响

Fig. 4 Effects of sodium acetate and the novel biomass carbon source on the nitrogen removal performance

和  $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (35~40 d)；出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  平均浓度为  $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (0~15 d)、 $10.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (15~35 d) 和  $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (35~40 d)。上述数据表明，反应器在运行至第 15 d 内同样存在系统碳源不足，不能满足微生物反硝化需要量，导致脱氮效果差的状态；在第 15 d 向反应器投加新型碳源运行至第 35 d 时，出水  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度呈平稳下降趋势，而  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TN 均呈连续升高趋势，这表明新型生物质碳源投加后，由于有机物浓度升高限制反硝化细菌的活性，短时间内不能直接利用碳源进行还原反应<sup>[26]</sup>，导致系统中  $\text{NH}_3\text{-N}$  升高 (图 4(b))，进一步对氨氧化细菌和硝化细菌产生抑制，硝化反应受到限制<sup>[27]</sup>。使系统内  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TN 浓度逐步升高，出水 TN 最高时浓度为  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在反应器运行到第 40 d 时，反硝化细菌对新型生物质碳源逐渐适应后，活性增强，促进反硝化反应进行，短暂出现出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  降到 0，出水 TN 降到  $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，优于国家排放水质一级 A 水质标准<sup>[22]</sup> ( $\text{TN} < 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的情况。加入新型生物质碳源后， $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率平均为 70.8% (15~35 d) 和 73.5% (35~38 d)，最高时为 94%；TN 去除率平均为 59% (15~35 d) 和 50% (35~40 d)。综上所述，新型生物质碳源投加初期对反应器中  $\text{NH}_3\text{-N}$  及 TN 的去除率较不稳定，但系统中反硝化菌逐渐适应后  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率可达到 90% 以上。

3) 除磷性能。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<sup>[21]</sup>。添加乙酸钠和新型生物质作为碳源反应器的除磷性能结果见图 5。添加乙酸钠碳源的反应器进水 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的平均浓度分别为  $3.6$  和  $2.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。出水 TP 平均浓度为平均浓度  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (0~15 d) 和  $0.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (15~30 d)；出水  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均浓度  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (0~15 d) 和  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (15~30 d)。TP 平均去除率为 69% (0~15 d)、89% (15~25 d) 和 64% (25~30 d)； $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均去除率为 93% (0~15 d)、99% (15~25 d) 和 64% (25~30 d)。这

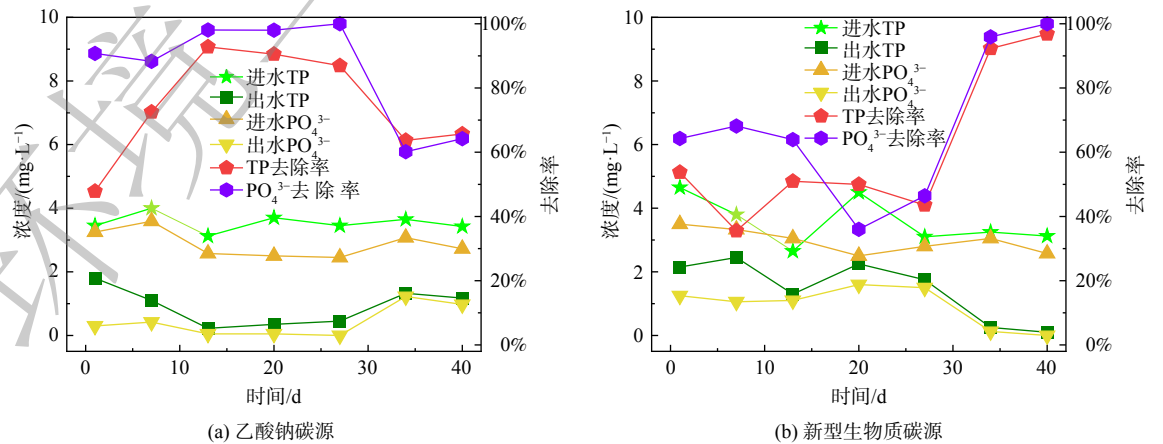


图 5 乙酸钠和新型生物质碳源对除磷性能的影响

Fig. 5 Effects of sodium acetate and the novel biomass carbon source on the phosphorus removal performance

表明, 乙酸钠作为易生物利用碳源<sup>[6]</sup>, 在微生物的同化作用和生物除磷作用下, TP 去除率在反应器运行第 15~25 d 时达到最高为 91%。反应器运行到后期, 随着碳源消耗不能为反硝化细菌和除磷菌提供足够电子供体, TP 的去除率有所下降, 出水 TP 最低为  $0.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 仍满足国家一级 B 排放水质标准<sup>[22]</sup> ( $\text{TP}<1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

添加新型生物质碳源的反应器进水 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的平均浓度分别为  $3.6$  和  $2.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。出水 TP 平均浓度为  $1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (0~15 d)、 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (15~25 d) 和  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (25~30 d); 出水  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均浓度为  $1.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (0~15 d)、 $1.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (15~25 d) 和  $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (25~30 d)。TP 平均去除率为 46% (0~15 d)、52% (15~25 d) 和 95% (25~30 d);  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均去除率为 66% (0~15 d)、44% (15~25 d) 和 97% (25~30 d)。虽然新型生物质碳源投入反应器运行至第 25 d 时, TP 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率都低于乙酸钠碳源, 但运行至后期 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率均达到 95% 以上, 出水 TP 为  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 满足国家一级 A 排放水质标准<sup>[22]</sup> ( $\text{TP}<0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 除磷效果显著优于乙酸钠碳源。

## 2.2 活性污泥性能分析

图 6(a) 为添加乙酸钠和新型生物质碳源反应器分别在运行前、第 15 d、第 30 d 和第 40 d 的反硝化潜力。以乙酸钠作为外加碳源时, 活性污泥的反硝化潜力较高且呈逐步升高趋势, 最高达到  $23 \text{ mg NO}_3^- \text{-N}\cdot(\text{g VSS}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ 。而以新型生物质碳源投加初期, 有机物浓度升高限制了反硝化细菌的活性 (见结果与

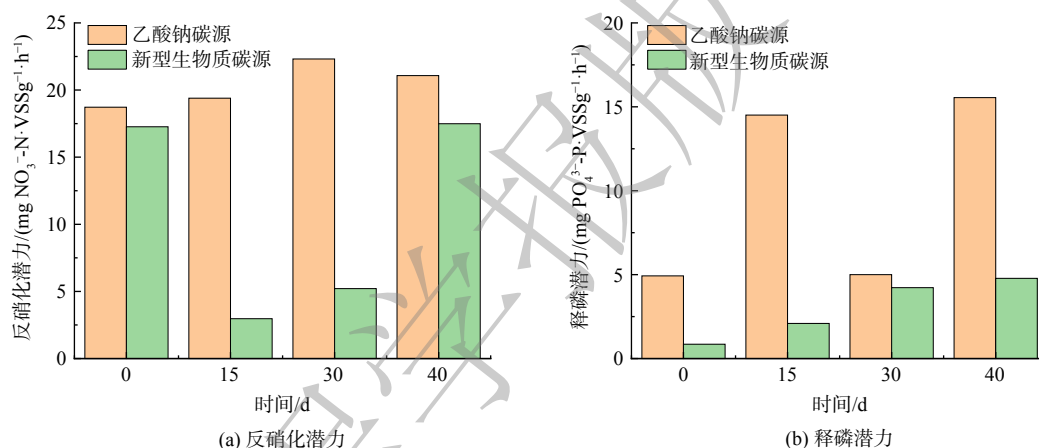


图 6 乙酸钠和新型生物质碳源对反硝化潜力和释磷潜力的影响

Fig. 6 Effects of sodium acetate and the novel biomass carbon source on the potentials of denitrification and releasing phosphorus

讨论 2.1 的 2) 部分), 导致反硝化潜力达到最低为  $2.3 \text{ mg NO}_3^- \text{-N}\cdot(\text{g VSS}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , 但随着反硝化细菌对新型生物质碳源的适应和利用, 反硝化潜力稳步升高。

图 6(b) 为添加乙酸钠和新型生物质碳源反应器分别在运行前、第 15 d、第 30 d 和第 40 d 的释磷潜力。以乙酸钠为外加碳源时, 活性污泥的释磷潜力不稳定, 呈先升再降后升趋势, 这可能是由于刚加入乙酸钠碳源时, 反硝化细菌与聚磷菌对碳源的争夺以及  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的影响<sup>[21]</sup>, 在第 30 d 时, 反硝化潜力占主要过程, 导致释磷潜力降低。以新型生物质为碳源时, 总体上释磷潜力呈稳步提高趋势。

## 2.3 活性污泥镜检分析

脱氮除磷是以微生物为主的反应过程, 研究微生物群落结构变化可以反映污水处理系统运行工况和出水效果<sup>[28]</sup>。如图 7 所示, 本研究观察了向

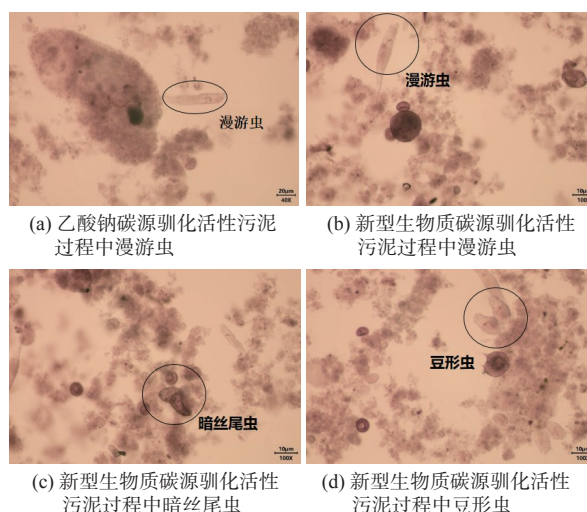


图 7 乙酸钠碳源和新型生物质碳源反应器运行至第 35 d 的微生物镜检图

Fig. 7 Microscopy of microbes in reactors feeding with sodium acetate and the novel biomass carbon source on day 35

反应器投入乙酸钠和新型生物质碳源驯化活性污泥过程中原生或后生物的生长情况。

反硝化后增加的微生物多样性有助于保持反应体系的稳定性<sup>[29]</sup>。在驯化活性污泥的第35 d, 可以看到a组和b组反应器中都有一定的丝状菌生长。其中, a组反应器出现了漫游虫, b组反应器中出现了漫游虫、暗丝尾虫和豆形虫。尾虫和豆形虫的出现指示着反应器活性污泥系统处于低溶解氧和高负荷状态下, 漫游虫的出现指示反应器活性污泥系统处于由恶化到正常的恢复期间<sup>[30]</sup>。这表明, 向反应器投入乙酸钠和新型生物质碳源后对污水处理系统有一定的冲击力, 但随着微生物对外加碳源的同化作用和反应过程的进行, 系统稳定性逐步运行正常。因此, 投加新型生物质碳源的活性污泥反应器中微生物含量丰富, 反应器性能逐渐稳定。

### 3 结论

1) 乙酸钠和新型生物质碳源投入到反应器后, 对COD的去除保持稳定, 平均去除率均高达91.7%, 表明新型生物质碳源对COD的去除具有良好的效果。

2) 乙酸钠投加后反应器系统虽脱氮速度快, 但时效较短。新型生物质碳源投加后中后期污泥反硝化潜力和释磷潜力指标均稳步提升, 出水TP为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 优于国家一级A排放水质标准。

3) 与投入乙酸钠碳源的反应器中活性污泥微生物镜检图结果相比, 投加新型生物质碳源后, 活性污泥中微生物种类逐渐丰富, 污泥结构得到强化, 反应器性能逐渐稳定。

4) 本研究得到的新型生物质碳源生产原料绿色、安全、无毒和环保, 生产方法精简高效、适合大规模工业化应用, 且脱氮除磷效果好, 具有非常广泛的应用前景及推广价值。

### 参考文献

- [1] 廖宏翔, 肖安琪. 城镇污水处理厂外加碳源分析和可降耗措施探究[J]. *四川化工*, 2023, 26(2): 49-51.
- [2] 李怀波, 郑凯凯, 王燕, 等. 基于全流程分析的低碳氮比进水污水处理厂运行调控[J]. *环境工程*, 2021, 39(3): 97-102.
- [3] 王燕, 李激, 支尧, 等. 新型生物质碳源强化脱氮效果及微生物菌群分析[J]. *环境工程*, 2022, 40(9): 63-68.
- [4] CHENG H Z, MA S, LIAO K W, et al. Effect of external carbon source type on effluent dissolved organic nitrogen characteristics in postdenitrifying moving bed biofilm reactors: Chemical molecular and microbial insights[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 466: 143338.
- [5] 胡小宇. 外加碳源在脱氮除磷中的应用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- [6] 熊子康, 郑怀礼, 尚娟芳, 等. 污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展[J]. *土木与环境工程学报*, 2021, 43(2): 168-181.
- [7] 陶正凯, 管凛, 荆肇乾, 等. 强化湿地反硝化的生物质碳源研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(12): 2867-2971.
- [8] 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: 26-32.
- [9] 李晶晶, 谭力, 方杨, 等. 高硝氮酒厂废水生物反硝化体系的构建及细菌群落特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(4): 1039-1046.
- [10] 傅涛, 李伟, 肖琼. 从“结合”到“深度融合”促进产学研合作勇攀高峰-北京大学环境产研中心[J]. *中国科技创业*, 2022(4): 24-27.
- [11] 李子阳. 蓝藻厌氧发酵产酸及发酵液作为反硝化外加碳源研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [12] 余甜甜, 王率率, 张杰, 等. 高压均质对蓝藻有机质释放与厌氧发酵产酸的促进效果[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 155-162.
- [13] 殷鹏, 张建华, 孔繁臻. 太湖蓝藻无害化处置资源化利用现状分析与对策研究[J]. *江苏水利*, 2019(9): 23-25.
- [14] 李子阳, 陆东亮, 华天子, 等. 蓝藻发酵液中氮磷回收及其作为反硝化碳源研究[J]. *环境化学*, 2020, 39(12): 3562-3573.
- [15] 王松, 谢洪勇. 鸟粪石结晶法回收高浓度酸性含磷废水中磷的研究[J]. *江苏农业期刊*, 2020, 48(4): 282-285.
- [16] 赵美萍, 钱盘生, 师明赫, 等. 一种蓝藻中高碳低氮磷有机物组分的提取分离方法[P]. 申请号: 202310065338.4 2023-01-16.
- [17] 钱盘生. 一种利用蓝藻生物复合碳源及其制备方法: CN113461152A[P]. 2021-10-01.
- [18] 钱盘生. 一种利用蓝藻制备生物复合碳源及其制备工艺: CN116621320A[P]. 2023-08-22.
- [19] 上海量远检测技术有限公司. MSDS化学品安全技术说明书[R]. 上海, 2022.
- [20] 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.
- [21] 彭志英. 农废复合碳源的脱氮除磷效果和微生物群落研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 城镇污水处理厂污染物排放标准: 中华人民共和国国家标准: GB 18918-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] 周可遥. 新型复合碳源的制备及其强化农村生活污水反硝化效果的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [24] 张佳颖, 刘心怡, 周俊才, 等. 乳酸钠和乙酸钠作为碳源对生物脱氮的影响[J]. *中国给水排水*, 2023: 1-9.
- [25] 申响政. 复合碳源与乙酸钠碳源反硝化情况研究性对比试验[J]. *山东化工*, 2021, 50(24): 249-251.
- [26] 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.
- [27] 李春向. 市政污水处理厂出水氨氮超标问题及处理[J]. *资源节约与环保*, 2021(4): 101-102.
- [28] 常静. 污水处理中活性污泥微型动物运动行为研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.

[29] WANG H S, CHEN N, FENG C P, et al. Insights into heterotrophic denitrification diversity in wastewater treatment systems: Progress and future prospects based on different carbon sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146521.

[30] 黄超, 漆新华, 曹文平, 等. 指示性生物监测和分析在水质净化过程中的特性与作用[J]. *环境科技*, 2019, 32(5): 67-70.

(责任编辑: 金曙光)

## Preparation of a new biomass carbon source and its application in wastewater denitrification and phosphorus removal

QIAN Pansheng<sup>1</sup>, FANG Jiali<sup>2</sup>, FENG Ziheng<sup>2</sup>, WANG Bingzheng<sup>2\*</sup>

1. Jiangsu Jinshan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Yixing 214212, China; 2. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

\*Corresponding author, E-mail: b.wang@jiangnan.edu.cn

**Abstract** This study aimed to provide a novel carbon source alternative for improving biological denitrification and phosphorus removal efficiency in urban wastewater treatment plants, while also to explore new approaches for utilizing cyanobacteria resources. Specifically, we examined the denitrification and phosphorus removal performance of a novel biomass carbon source synthesized by combining high-carbon, low-nitrogen, and low-phosphorus organic matter extracted from cyanobacteria along with sodium acetate, an industrial carbon source, as a control group. In addition, this study analyzed the microbial community characteristics subsequent to the implementation of both carbon source groups. The results showed that compared to sodium acetate, the novel biomass carbon source effectively removed chemical oxygen demand, with a consistent removal efficiency of 91.7%. However, during the initial phase when the novel biomass carbon source was just added, the denitrification and phosphorus release potentials were relatively low, resulting in moderate removal rates for ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ). As the reactor run to the later stage, both denitrification and phosphorus release potentials steadily increased, leading to more than 90% removal of  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN, TP, and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ . Moreover, abundant protozoa and metazoa were observed in the reactor. In conclusion, this novel biomass carbon source prepared in this study were safe, non-toxic, and environmentally friendly. Its production method was simple and efficient. It is suitable for large-scale industrial applications for the good nitrogen and phosphorus removal effects. This novel biomass carbon source has a very broad application prospect and promotion value.

**Keywords** Cyanobacteria; biomass carbon source; nitrogen and phosphorus removal; activated sludge