

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.07.008

# 玉米芯/PHB包覆缓释复合碳源强化生物脱氮性能

章厚林<sup>1</sup>, 罗忠武<sup>2</sup>, 周蜜<sup>1</sup>, 邹林志<sup>1</sup>, 杨智<sup>1</sup>, 李润佳<sup>1</sup>,  
徐炜谟<sup>1</sup>, 艾海男<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 中建五局第三建设有限公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 基于对碳源、骨架和交联剂的优选,采用农业废弃物玉米芯和可生物降解聚合物PHB(聚- $\beta$ -羟基丁酸)制备了一种新型缓释复合碳源 $S_1$ ,利用清水释碳试验和反硝化脱氮试验考察了 $S_1$ 的性能,并通过分析 $S_1$ 的表面形态、官能团以及浸出液三维荧光光谱揭示其强化脱氮的机理。结果显示,此碳源具有良好的物理特性,平均释碳速率为玉米芯的27.7%,释碳时间 $t_{1/2}$ 为24.53 h,具有持续的碳源缓释性能;此外, $S_1$ 能强化微生物反硝化功能,TN累积削减量和平均反硝化速率均优于空白组,脱氮性能良好。原因在于, $S_1$ 兼具玉米芯和PHB的表面形态特征,使得释碳过程持久、稳定; $S_1$ 含有大量含氧基团(如羟基),能够有效吸附污染物,且其浸出液中所含碳源的可生化性较高,有利于反硝化过程,最终强化了脱氮性能。

**关键词:** 缓释复合碳源; 玉米芯; 聚- $\beta$ -羟基丁酸(PHB); 释碳特性; 强化反硝化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)07-0051-07

## Investigation on Enhanced Denitrification Performance of a Slow-release Composite Carbon Source Embedded with Corncob/PHB

ZHANG Houlin<sup>1</sup>, LUO Zhongwu<sup>2</sup>, ZHOU Mi<sup>1</sup>, ZOU Linzhi<sup>1</sup>, YANG Zhi<sup>1</sup>,  
LI Runjia<sup>1</sup>, XU Weimo<sup>1</sup>, AI Hainan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. 3rd Construction Co. Ltd. of China Construction 5th Engineering Bureau, Changsha 410004, China)

**Abstract:** Based on the optimization of carbon sources, skeleton materials, and crosslinking agents, a novel slow-release composite carbon source, designated  $S_1$ , was developed using agricultural waste corncob and biodegradable polymer PHB (poly- $\beta$ -hydroxybutyrate). Its performance was evaluated through carbon release tests in clean water and denitrification batch experiments. The mechanism behind its enhanced denitrification was elucidated by analyzing its surface morphology, functional groups, and the three-dimensional fluorescence spectra of the  $S_1$  leachate. The results showed that  $S_1$  possessed favorable physical properties. It exhibited a sustained carbon release performance, with an average carbon release rate of 27.7% of that of corncob alone and a carbon release half-life ( $t_{1/2}$ ) of 24.53 h. Furthermore,  $S_1$  significantly enhanced the microbial denitrification function, achieving a higher cumulative TN

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978100); 重庆市研究生科研创新项目(CYS21031)

通信作者: 艾海男 E-mail: aihainan@126.com

removal and average denitrification rate compared to the blank control group, thus demonstrating excellent denitrification performance. The mechanism analysis revealed that  $S_1$  combined the surface morphological characteristics of both corncob and PHB, ensuring a sustained and stable carbon release process. Additionally, the presence of abundant oxygen-containing groups (e.g., hydroxyl) on  $S_1$  facilitated effective pollutants adsorption, while the high biodegradability of the carbon source in its leachate promoted the denitrification process, ultimately leading to enhanced nitrogen removal performance.

**Keywords:** slow-release composite carbon source; corncob; poly- $\beta$ -hydroxybutyrate (PHB); carbon release characteristics; enhanced denitrification

目前,外加液态碳源(如甲醇、乙酸等)是提高低C/N值城镇污水处理效果最为普遍的方法。然而,传统的液态碳源投加不仅需要严密复杂的过程控制来避免投加过量或不足带来的风险<sup>[1]</sup>,而且其输出不稳定,易引起反硝化菌和异养菌之间对于碳源的竞争。为此,学者们开始对固体碳源进行研究。常见的固体碳源主要有农业废弃物如玉米芯、稻草、秸秆等天然纤维素碳源,以及可生化降解性较高的PHB(聚- $\beta$ -羟基丁酸)、PBS(聚丁二酸丁二醇酯)等合成可生物降解聚合物<sup>[2]</sup>。天然纤维素碳源价格低、来源广,但其释碳速率快、释碳过程不持续;而可生物降解聚合物虽然释碳缓慢、释碳周期长,但价格昂贵,限制了其大量应用。为了实现成本和性能之间的平衡,将天然纤维素材料与可生物降解聚合物形成共混物成为潜在的选择<sup>[3-4]</sup>。但是,现有共混物尚处于实验室研究阶段,其释碳速率控制和合成碳源成本偏高等问题依然亟待解决<sup>[5]</sup>,故仍需要探究新型复合碳源的制备。

农业废弃物兼具安全性和经济性,而PHB具有良好的机械性能,也是最合适的固体基质之一。将农业废弃物和PHB类物质合成新型复合碳源,有望满足污水处理环境的特殊性,使其同时具备以下优势:①良好的物理性能;②持续的碳源缓释性能;③增强反硝化脱氮效果的能力。然而,将农业废弃物与可生物降解聚合物制作共混物的研究尚鲜有报道。鉴于此,笔者通过优选制备条件,制备了一种以玉米芯和PHB为基础碳源、以PVA(聚乙烯醇)和SA(海藻酸钠)为凝胶骨架、以含4%  $\text{CaCl}_2$ 的饱和硼酸溶液与硫酸钠溶液为交联剂的新型缓释复合碳源 $S_1$ ,研究了其物理特性、释碳特征及强化反硝化性能,并结合该碳源的表面形态、官能团特性及浸出液三维荧光光谱特征,揭示其强化反硝化脱氮的机

理,以为研发高性能碳源材料和解决低C/N值城镇污水高效处理问题提供新途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料包括凝胶骨架、碳源及交联剂。凝胶骨架选用PVA(聚乙烯醇)和SA(海藻酸钠),均为分析纯试剂;碳源选用玉米芯和PHB,玉米芯经粉碎后得到粒径约为1.00~2.36 mm的颗粒,于35℃干燥后备用,PHB可直接购买;此外,需要配制含4%  $\text{CaCl}_2$ 的饱和硼酸溶液与0.8 mol/L硫酸钠溶液这两种交联剂。

生物反硝化试验采用人工模拟污水,以 $\text{KNO}_3$ 为氮源、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 为磷源,并添加微量元素,采用 $\text{NaHCO}_3$ 调节pH至7.0左右,具体组分如下: $\text{KNO}_3$ 为1.44 g/L、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 为0.18 g/L、 $\text{NaHCO}_3$ 为0.42 g/L,微量元素为1 mL/L。

接种污泥取自重庆市某污水处理厂缺氧池,用超纯水清洗3遍以去除残留的营养物质,稀释均匀后接种到反应器。

### 1.2 试验装置

清水释碳试验采用250 mL的磨口锥形瓶,瓶口用橡胶塞密封。反硝化试验采用500 mL的磨口锥形瓶,瓶口用橡胶塞密封,上设排气管导入水中以排除氮气,且定期吹脱以维持反应器中DO为(0.4±0.1) mg/L的缺氧环境。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 缓释复合碳源的制备

通过前期试验,从凝胶骨架、碳源和交联剂三个方面进行制备条件优选,最终选择以8 g PVA和1 g SA的混合物作为凝胶骨架制成水凝胶,再将玉米芯和PHB各10.5 g作为包覆碳源加入水凝胶中,并倒入1 cm<sup>3</sup>的模具冷冻成型,成型后的碳源依次在含

4% CaCl<sub>2</sub>的饱和硼酸溶液交联24 h、在0.8 mol/L硫酸钠溶液交联2 h,将材料烘干后制得新型缓释复合碳源,命名为S<sub>1</sub>。

### 1.3.2 清水释碳试验

分别将5 g玉米芯、PHB以及S<sub>1</sub>加入锥形瓶中,每天更换250 mL新鲜超纯水并密闭,置于磁力搅拌器上搅拌,转速为150 r/min。常温下每隔一定时间取样测定浸出液的COD和UV<sub>254</sub>,并采用二级动力学方程考察固体碳源的清水释碳特性<sup>[6]</sup>。试验结束后,将剩余碳源材料取出测定其释碳后的质量,并计算各碳源的分解率。

### 1.3.3 强化生物反硝化试验

根据硝酸盐利用速率试验,碳源反硝化潜力是指在室温(20 °C)下,向反硝化细菌提供高含量底物等适宜条件,测试反应器中外加碳源的最大反硝化能力<sup>[7]</sup>。称取10.0 g缓释复合碳源S<sub>1</sub>加入锥形瓶中,加入400 mL模拟配水,维持NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度为200 mg/L,并接种100 mL淘洗后的活性污泥,测得其MLSS浓度为8.91 g/L,再将反应器置于磁力搅拌器上搅拌运行,同时以不加缓释复合碳源作为对照组S<sub>0</sub>。每天取样测定其上清液中COD、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度的变化,并计算反硝化速率,如公式(1)所示。试验结束后,测定剥落生物膜干质量,考察其挂膜性能<sup>[1]</sup>。

$$K_p = (\Delta C_{NO_3^- - N} + \Delta C_{NH_4^+ - N} + 0.168 \times \Delta C_{NO_2^- - N}) / (MLSS \times t) \quad (1)$$

式中:K<sub>p</sub>为反硝化速率,mg/(gMLSS·d);ΔC<sub>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N</sub>为硝态氮削减浓度,mg/L;ΔC<sub>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</sub>为氨氮削减浓度,mg/L;ΔC<sub>NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N</sub>为亚硝态氮削减浓度,mg/L;MLSS为悬浮固体浓度,g/L;t为反应时间,d。

### 1.3.4 材料表面形态及物质特性分析

各阶段试验结束后,将释碳前后的材料(玉米芯、PHB、S<sub>1</sub>)以及脱氮后的S<sub>1</sub>置于电子扫描显微镜(SEM)下,观察材料表面形态变化,并利用红外光谱仪分析释碳前后及脱氮后S<sub>1</sub>官能团的变化。另取清水释碳2 d后和反硝化脱氮15 d后的上清液进行三维荧光光谱分析。

## 1.4 分析项目及方法

常规指标均采用国家标准方法测定。材料的密度采用体积差法测定,孔隙率采用溶液静置法测定,吸附传质性能和力学性能参照程璐璐<sup>[8]</sup>的方法测定,吸水溶胀性能采用Bai等<sup>[9]</sup>的方法测定。材料

的表面形态采用电子扫描显微镜分析,表面物质信息采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪分析,浸出液采用三维荧光光谱仪分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 缓释复合碳源的物理性能

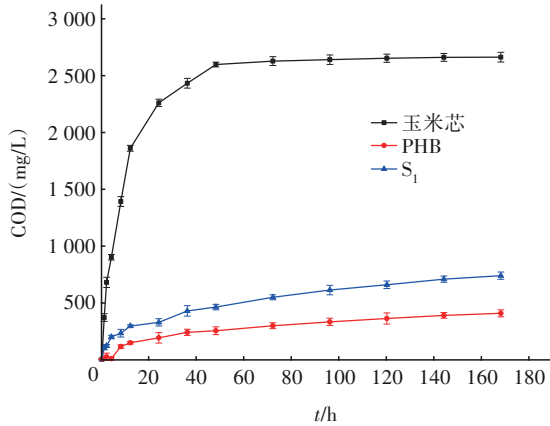
经测定,S<sub>1</sub>的干密度和饱水密度分别为(0.54±0.02)和(1.02±0.01) g/cm<sup>3</sup>,表明其便于储存运输,也能在实际污水环境中达到流化状态,可节约能耗。S<sub>1</sub>的机械稳定性为93.00%,抗压强度为140.82 N,表明其力学性能良好;其最大吸水溶胀性为88.58%,处于适中水平,可避免因溶胀过大而导致使用寿命短的问题。S<sub>1</sub>的孔隙率为30.35%,说明其内部结构紧密,有利于保持与PHB类似的缓释特性;但是其吸附传质性仍可达到85.88%,表明低孔隙率并没有显著影响亚甲基蓝克服凝胶骨架的阻力与内部碳源结合,这是由于材料表面含有大量含氧活性基团(如羟基),对亚甲基蓝可形成化学吸附<sup>[10]</sup>。总之,S<sub>1</sub>具有良好的物理性能,能够满足实际工程应用的要求。

### 2.2 清水释碳性能

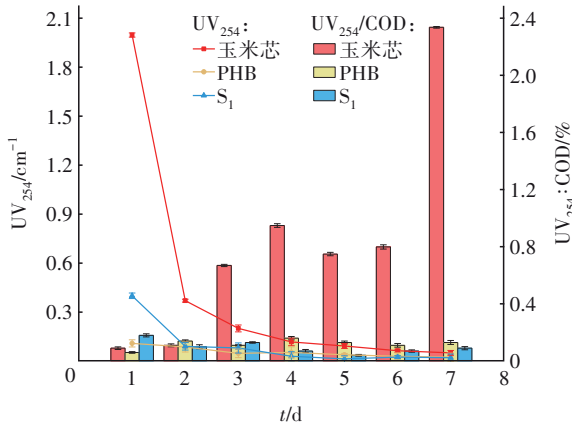
#### 2.2.1 释碳能力

由于复合碳源S<sub>1</sub>中凝胶骨架、玉米芯和PHB按3:3.5:3.5的比例合成,5 g S<sub>1</sub>中玉米芯和PHB的含量均为1.75 g,换算得到玉米芯、PHB和S<sub>1</sub>的清水释碳情况如图1(a)所示。可知,三者的COD浓度呈现出相同的变化趋势。前24 h为快速释碳阶段,24~72 h为缓慢释碳期,72 h后为稳定释碳阶段,直至实验结束(168 h)时,玉米芯、PHB和S<sub>1</sub>的累积释碳量分别为2 662.30、405.38和737.04 mg/L。另外,三者的平均释碳速率分别为19.02、2.90和5.26 mg/(g·d),其中S<sub>1</sub>的平均释碳速率仅为玉米芯的27.7%,说明其具有良好的碳源缓释性能;同时S<sub>1</sub>的释碳能力为PHB的1.81倍,有效解决了玉米芯释碳量大易造成有机污染和PHB释碳量小的问题。释碳试验结束时,S<sub>1</sub>的分解率为4.23%,介于PHB(0.47%)和玉米芯(9.92%)之间。此外,不同碳源释碳的可生化性可由UV<sub>254</sub>/COD(UV<sub>254</sub>的单位为cm<sup>-1</sup>,COD的单位为mg/L,两者的比值仅以数值计算,不代入单位)表征,其比值越低表明可生化性越好。由图1(b)可知,与玉米芯相比,S<sub>1</sub>的UV<sub>254</sub>/COD值偏低,一直保持在0.18%以内,说明S<sub>1</sub>浸出液中

的碳源能被微生物充分降解利用。



a. COD 累积释放量



b. UV<sub>254</sub> 及 UV<sub>254</sub>/COD 值的变化

图 1 不同碳源的水清释碳效果

Fig.1 Carbon release effect of different carbon sources in clear water

### 2.2.2 释碳动力学

玉米芯、PHB 和 S<sub>1</sub> 释碳过程的二级动力学拟合结果如表 1 所示。结果显示, R<sup>2</sup> 均大于 0.95, 符合二级动力学方程。其中 S<sub>1</sub> 的传质系数(K)为 4.34 mg/(h·g·L), 比玉米芯低了一个数量级, 进一步表明 S<sub>1</sub> 比玉米芯具有更小的释碳速率。原因包括两方面, 一是 S<sub>1</sub> 由玉米芯和 PHB 按 1:1 的比例合成, 其孔隙结构具有 PHB 的特点, 孔隙率较小; 二是交联剂与凝胶骨架形成了一COOCaOOC—和—OS(OH)O—等稳定络合结构, 进一步增强了复合碳源的致密性, 阻碍了内部碳源的释放, 最终使得释碳阻力进一步增大<sup>[11]</sup>。与已有的研究相比, S<sub>1</sub> 的 K 值小于闫续等<sup>[6]</sup>制备的淀粉/PVA 碳源的 K 值 [8.43 mg/(h·g·L)], 但比 Xing 等<sup>[3]</sup>制备的双层微球碳源的 K 值 [2.39 mg/(h·g·L)] 要大, 适宜的 K 值有利于碳源的稳定释放。此外, 玉米芯的释碳时间 t<sub>1/2</sub> 为 7.21 h,

相比之下, S<sub>1</sub> 与 PHB 的释碳时间更长, 复合碳源具有更优的释碳持久性能。

表 1 释碳过程动力学拟合结果

Tab.1 Kinetic fitting results of carbon release process

碳源	动力学拟合公式	R <sup>2</sup>	c <sub>m</sub> /[mg/(g·L)]	K/[mg/(h·g·L)]	t <sub>1/2</sub> /h
玉米芯	1/c=0.012 6/t+0.001 8	0.99	571.07	79.20	7.21
PHB	1/c=0.366 0/t+0.011 4	0.99	87.67	2.73	32.09
S <sub>1</sub>	1/c=0.046 1/t+0.001 8	0.96	106.48	4.34	24.53

### 2.3 强化反硝化脱氮性能

#### 2.3.1 反硝化脱氮潜力

图 2 为 S<sub>1</sub> 组和 S<sub>0</sub> 组上清液中 TN 和 COD 浓度的变化。第 1 天, S<sub>1</sub> 组的 TN 浓度削减了 52.04 mg/L, 出水 COD 浓度为 97.95 mg/L; 而 S<sub>0</sub> 组的 TN 浓度削减了 18.43 mg/L, 仅为 S<sub>1</sub> 组的 35.42%, 出水 COD 浓度为 29.58 mg/L, 表明活性污泥吸附的 COD 不能完全被去除, 这也是 S<sub>1</sub> 出水 COD 浓度偏高的原因之一。根据 Tan 等<sup>[12]</sup>的研究, 依赖于微生物细胞的同化脱氮约占 TN 去除量的 15%~20%, 异化脱氮占 TN 去除量的 80%~85%; 结合每去除 1 mg 的 TN 通常需要消耗约 6 mg 的 COD, 计算得到 S<sub>1</sub> 组第 1 天的理论反硝化碳源消耗速率为 249.79~265.40 mg/(L·d)。由清水释碳试验结果可知, 5 g 的 S<sub>1</sub> 在第 1 天的 COD 释碳速率为 227.94 mg/(L·d), 换算得到投加于反硝化反应器中 10 g S<sub>1</sub> 的理论释碳速率为 284.93 mg/(L·d)。以上结果表明, S<sub>1</sub> 组第 1 天的释碳速率与反硝化速率相匹配, 即反应器中的活性污泥能有效利用 S<sub>1</sub> 组浸出液中的 COD 进行生物脱氮, 在第 1 天便能适应反硝化过程。

此后, S<sub>1</sub> 组的 TN 削减浓度逐渐降低, 到第 9 天和第 10 天, TN 削减浓度分别降至 4.52、1.78 mg/L, 去除率分别为 9.47%、4.13%, 第 10 天去除率已小于 5%, 认为反硝化过程基本完成。此时 S<sub>1</sub> 组的反硝化持续时间已达到 10 d, TN 累积削减浓度达到 158.58 mg/L; 而对照组 S<sub>0</sub> 的反硝化仅持续了 1~2 d, 此后 TN 去除能力迅速降低, 10 d 后 TN 累积削减浓度为 56.17 mg/L。此外, 在整个过程中, S<sub>1</sub> 组的 COD 降幅仅为 34.19 mg/L, TN 去除率在前 8 d 变化

不大,表明 $S_1$ 持续的释碳性能有利于释碳速率与反硝化速率保持一致。

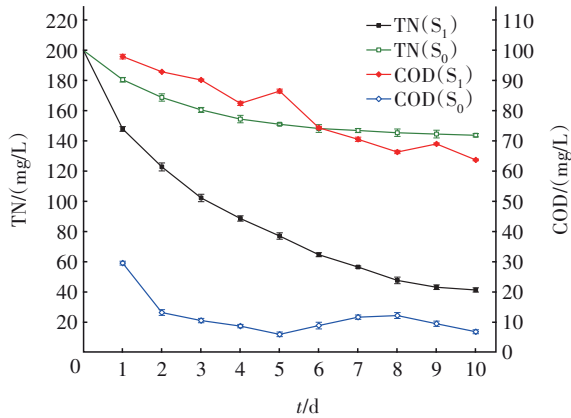


图2 反硝化过程TN及COD浓度变化

Fig.2 Change in TN and COD concentrations during denitrification

### 2.3.2 反硝化过程中氮转化关系

强化脱氮过程中氮转化关系如图3和图4所示。在第1天, $S_1$ 组和 $S_0$ 组出水 $\text{NO}_3^-$ -N浓度分别为131.98、157.78 mg/L,进一步计算可得二者的反硝化速率分别为5.84、2.19 mg/(gMLSS·d), $S_1$ 的反硝化速率为 $S_0$ 的2.67倍。此后, $S_1$ 组一直保持较高的反硝化速率,直至反应结束,最终 $\text{NO}_3^-$ -N浓度降至35.78 mg/L,10 d的平均反硝化速率为1.78 mg/(gMLSS·d);而 $S_0$ 组的 $\text{NO}_3^-$ -N浓度却始终维持在140~160 mg/L之间,平均反硝化速率为0.63 mg/(gMLSS·d)。这是由于 $S_1$ 组能够持续释放可生化性较高的碳源,故 $S_1$ 组能够一直保持较高的反硝化速率。

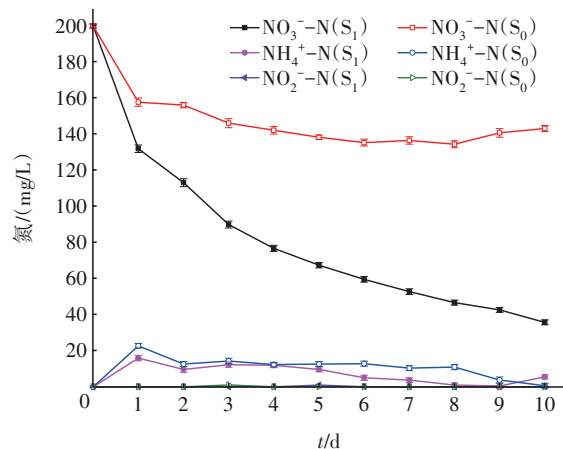


图3 反硝化过程中氮浓度的变化

Fig.3 Change in nitrogen concentration during denitrification

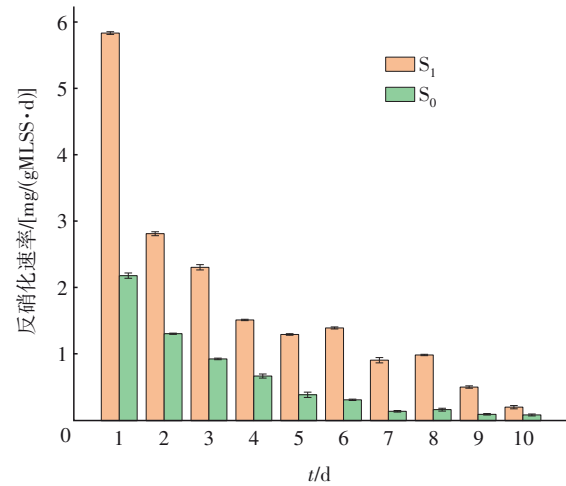


图4 反硝化速率变化

Fig.4 Change in denitrification rate

与此同时,试验过程中 $S_1$ 组和 $S_0$ 组均未出现 $\text{NO}_2^-$ -N的积累,但两者的原因却不同。 $S_1$ 由于可持续供应可生化性较高的碳源,使得反硝化过程进行得较完全;而 $S_0$ 组则是因为没有碳源供应,限制了 $\text{NO}_3^-$ -N向 $\text{NO}_2^-$ -N的转化。此外,两组反应器中仍检测到一定浓度的 $\text{NH}_4^+$ -N,可能存在大多数研究中提及的异化硝酸盐还原成铵(DNRA)现象<sup>[13-14]</sup>。

## 2.4 材料表面形态和物质特性

### 2.4.1 不同阶段的表面形态

不同碳源的表面形态变化如图5所示。可知,玉米芯表面粗糙且分布大量孔隙,PHB表面相对平整光滑、无孔隙,而 $S_1$ 表面有凹槽和少许孔隙结构出现,表明其兼具了玉米芯和PHB的结构特点,这有利于 $S_1$ 保持相对适宜的缓释性能。经过清水释碳7 d后,玉米芯表面粗糙度增加,可见碳源溶出的迹象;PHB表面也开始出现小的凸起;相比之下, $S_1$ 表面褶皱加深,孔洞比PHB有所增大,但远远不如玉米芯的粗糙程度,进一步证明了 $S_1$ 适宜的碳源缓释特性。经反硝化脱氮10 d后, $S_1$ 在表面褶皱凹陷处观察到有微生物附着,将其放大至10 000倍后,可看到球菌和杆状细菌的存在。此外, $S_1$ 上10 d的挂膜量为0.01 g/g,此值小于任彦强等<sup>[15]</sup>用4种填料在污水厂曝气池中的挂膜量(约0.02 g/g),这与碳源的释碳能力和材料表面特性有关。因此,增强复合碳源缓释性能的同时,还需要通过制孔或调整玉米芯和PHB的比例来增加孔隙率,这将有利于增强微生物在碳源表面的附着性能,进一步强化反硝化效果。

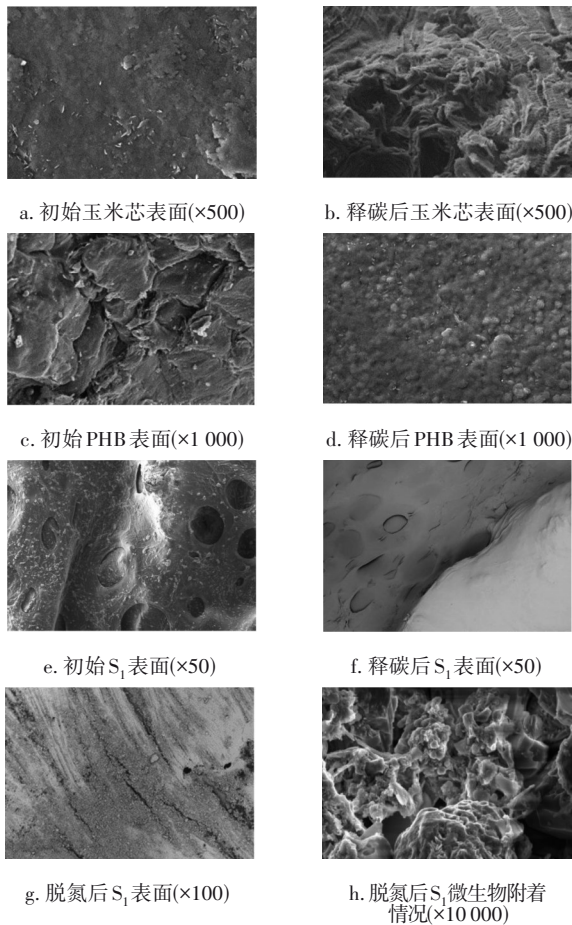


图 5 不同碳源表面的扫描电镜图像

Fig.5 SEM images of different carbon sources surface

### 2.4.2 不同阶段的物质特性

利用 FTIR 分析不同阶段  $S_1$  材料的官能团变化情况,结果如图 6 所示。 $S_1$  在 3 个阶段均呈现出一些反映特定官能团的典型谱带,如:3 442、1 713、1 117  $cm^{-1}$ 附近的吸收峰分别代表 N—H 和—OH 的伸缩振动、C=O 和 C=C 等的伸缩振动、C—O 的伸缩振动<sup>[16]</sup>。释碳前后及脱氮后的  $S_1$  均未出现新的吸收峰,表明该碳源未发生明显的化学反应,有利于维持脱氮过程的稳定。此外, $S_1$  在 3 442  $cm^{-1}$ 处具有较强的吸收峰,表明其具有较高含量的含氧基团—OH,有利于实现对污染物的吸附<sup>[10]</sup>,进而提高污染物去除效果,这与  $S_1$  吸附传质性能良好的结论一致。另取释碳和脱氮后的浸出液进行三维荧光光谱分析,结果如图 7 所示。释碳 2 d 后  $S_1$  浸出液中出现两个特征荧光峰: $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=225\text{ nm}/325\text{ nm}$  的类酪氨酸蛋白和  $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=280\text{ nm}/310\text{ nm}$  的溶解性微生物代谢产物,而脱氮 15 d 后  $S_1$  浸出液中仅出现一个荧光峰:

$\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=270\text{ nm}/295\text{ nm}$  的溶解性微生物代谢产物。类酪氨酸蛋白属于易生物降解物质,经过脱氮过程后, $S_1$  浸出液中的类酪氨酸蛋白基本被系统中微生物完全降解用于反硝化。

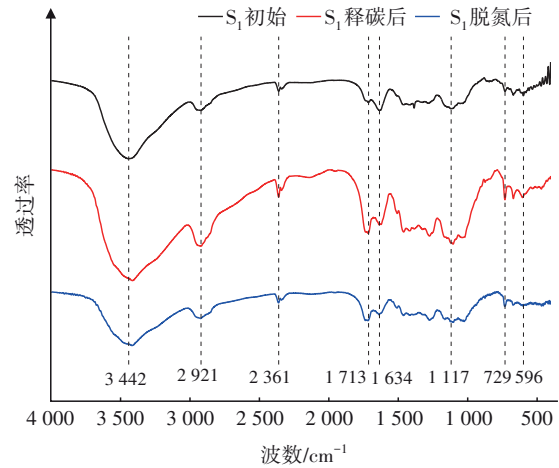


图 6 不同试验阶段  $S_1$  的 FTIR 图谱

Fig.6 FTIR spectra of  $S_1$  under different experimental stages

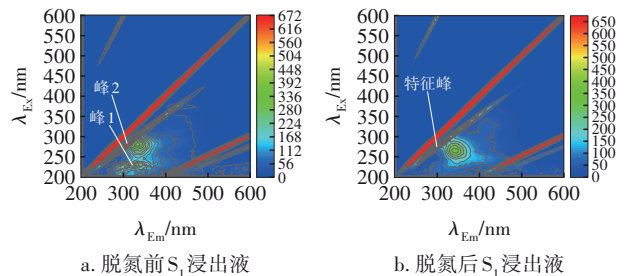


图 7 释碳和脱氮后  $S_1$  浸出液的三维荧光光谱

Fig.7 3D-EEM of  $S_1$  leachate after carbon release and denitrification

### 3 结论

① 由玉米芯和 PHB 合成的新型缓释复合碳源  $S_1$  具有良好的物理性能,便于实际运用。 $S_1$  的平均释碳速率仅为玉米芯的 27.7%,释碳时间  $t_{1/2}$  为 24.53 h,碳源释放持久稳定; $S_1$  的释碳速率与反硝化速率相匹配,10 d 的 TN 累积削减浓度和平均反硝化速率分别为 158.58 mg/L 和 1.78 mg/(gMLSS·d),强化脱氮性能良好。

②  $S_1$  兼具玉米芯和 PHB 的结构特征,缓释性能得以增强。红外光谱分析表明,该碳源在释碳和反硝化脱氮过程中未发生明显的化学反应,有利于维持反硝化过程的稳定;且其含有大量含氧基团(如羟基),可有效吸附污染物,有利于强化反硝化过程。此外,三维荧光光谱分析显示,其浸出液中

的碳源可生化性高,有利于反硝化过程反应完全。

#### 参考文献:

- [1] CHU L, WANG J. Nitrogen removal using biodegradable polymers as carbon source and biofilm carriers in a moving bed biofilm reactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 170(1): 220-225.
- [2] WANG J, CHU L. Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process [J]. Biotechnology Advances, 2016, 34(6): 1103-1112.
- [3] XING Y, ZHANG D, CAI L, et al. An innovative double-layer microsphere used as slow-release carbon source for biological denitrification [J]. Water Air and Soil Pollution, 2020, 231(11/12): 129-140.
- [4] YANG Z C, ZHOU Q, SUN H M, et al. Metagenomic analyses of microbial structure and metabolic pathway in solid-phase denitrification systems for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent: a pilot-scale study [J]. Water Research, 2021, 196: 117067.
- [5] 易成豪, 秦伟, 陈湛, 等. 聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 [J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4143-4151.
- YI C H, QIN W, CHEN Z, et al. Comparison of polycaprolactone and poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for nitrogen removal [J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 4143-4151 (in Chinese).
- [6] 闫续, 许柯, 耿金菊, 等. 两种释碳材料的制备及其性能研究 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 1984-1990.
- YAN X, XU K, GENG J J, et al. Preparation and properties of two kinds of carbon releasing material [J]. China Environmental Science, 2012, 32(11): 1984-1990 (in Chinese).
- [7] 吕顺, 吴志超, 王志伟, 等. 碱预处理稻草补充反硝化碳源特性研究 [J]. 水处理技术, 2012, 38(12): 25-29.
- LÜ S, WU Z C, WANG Z W, et al. Study on the characteristics of alkali pretreated rice straw supplementing denitrification carbon source [J]. Water Treatment Technology, 2012, 38(12): 25-29 (in Chinese).
- [8] 程璐璐. 多碳源复合载体的释碳及其强化微生物脱氮过程研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- CHENG L L. Study on Carbon Release of Multi-carbon Source Composite Carrier and Its Enhanced Microbial Nitrogen Removal Process [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019 (in Chinese).
- [9] BAI X, YE Z, LI Y, et al. Preparation and characterization of a novel macroporous immobilized micro-organism carrier [J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 49(2): 264-270.
- [10] QADA E, ALLEN S J, WALKER G M. Adsorption of basic dyes from aqueous solution onto activated carbons [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 135(3): 174-184.
- [11] ZAIN N, SUHAIMI M S, IDRIS A. Development and modification of PVA-alginate as a suitable immobilization matrix [J]. Process Biochemistry, 2011, 46(11): 2122-2129.
- [12] TAN T W, NG H Y. Influence of mixed liquor recycle ratio and dissolved oxygen on performance of pre-denitrification submerged membrane bioreactors [J]. Water Research, 2008, 42(4/5): 1122-1132.
- [13] SGOURIDIS F, HEPPELL C M, WHARTON G, et al. Denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA) in a temperate re-connected floodplain [J]. Water Research, 2011, 45(16): 4909-4922.
- [14] KRAFT B, TEGETMEYER H E, SHARMA R, et al. The environmental controls that govern the end product of bacterial nitrate respiration [J]. Science, 2014, 345(6197): 676-679.
- [15] 任彦强, 赵雪莲, 李宗慧, 等. MBBR悬浮填料低温处理生活污水对比实验研究 [J]. 河北工业科技, 2014, 31(3): 215-219.
- REN Y Q, ZHAO X L, LI Z H, et al. Comparative research on MBBR suspended carriers for the municipal sewage treatment at low temperature [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2014, 31(3): 215-219 (in Chinese).
- [16] SCA B, FMZA C, MG B, et al. Characterization of gasoline/ethanol blends by infrared and excess infrared spectroscopy [J]. Fuel, 2015, 141: 136-142.

作者简介:章厚林(1995—),男,四川宜宾人,硕士研究生,研究方向为污染控制与资源化利用。

E-mail: 1581541817@qq.com

收稿日期:2022-03-20

修回日期:2022-04-15

(编辑:刘贵春)