

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.01.003

天然固态碳源糙米的释碳优化及其反硝化脱氮性能

孙盼¹, 黄福珍¹, 余洋¹, 郑平^{1,2}, 张萌^{1,2}

(1. 浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省水体污染控制与环境安全技术重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: 选取来源广泛、价格低廉的糙米作为典型固态碳源(SCS),采用响应面法 Box-Behnken Design 模型研究了温度、pH、水力条件等关键参数对其有机物(以 COD 计)释放性能的影响。结果表明,单因素和复合因素对释碳性能的影响程度排序分别为水力条件>温度>pH、温度-水力条件>pH-水力条件>温度-pH。提出了“强势/联动”优化模式,据此获得糙米的最佳释碳条件,即温度为 35 °C、pH=7、水力条件(以转速计)为 61 r/min,有机物释放性能(以单位释碳速率计)可达 19.9 mg/(g·d)。验证试验表明模型结果准确可靠。固态碳源糙米有机物供给成本最低可达到 2.3 元/kg,经济性良好。将固态碳源糙米进一步用于反硝化脱氮,总氮去除率和去除速率分别可达到 (77.6±7.4)%和 24.1 mg/(L·d),显示出较好的应用性能。该研究结果可为糙米等固态碳源在污水处理中的实际应用提供优化方案和技术参数。

关键词: 固态碳源; 糙米; 响应面法; 有机物释放性能; 释碳条件; 反硝化脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)01-0015-07

Optimization for Organic Release of Natural Solid Carbon Source Brown Rice and Its Application for Denitrification

SUN Pan¹, HUANG Fu-zhen¹, YU Yang¹, ZHENG Ping^{1,2}, ZHANG Meng^{1,2}

(1. College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Water Pollution Control and Environmental Safety Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In this study, brown rice was selected as the typical natural solid carbon source due to the merits of wide-available and economical-viable. The carbon release parameters of brown rice, including temperature, pH, and hydraulic conditions (HC), were optimized by using Box-Behnken Design model of response surface methodology. The results showed that the effects of individual and combined factors were followed as the order of HC>temperature>pH, and temperature-HC>pH-HC>temperature-pH. The optimal parameters for carbon release from brown rice were 35 °C, pH=7, and 61 r/min, and then the organic release capacity (in terms of COD release rate per unit SCS) could reach 19.9 mg/(g·d). The validation tests showed that the model was accurate and reliable. Furthermore, the economic analysis showed that the cost for organics supply could be as low as 2.3 yuan/kg, which was prior to some conventional carbon sources, e.g., acetate and glucose. The brown rice was used as the carbon source for denitrification, and the total nitrogen removal efficiency and rate were (77.6±7.4)% and 24.1 mg/(L·d),

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LZ23E080004); 国家重点研发计划项目(2022YFC3203003)

通信作者: 张萌 zhangm_environment@zju.edu.cn

showing bright application prospects. This study can offer technical support and operational parameters for the practical application of brown rice as solid carbon source in wastewater treatment.

Key words: solid carbon source; brown rice; response surface methodology; organic release performance; carbon release condition; denitrification

含氮污染物控制是污水处理的重点和难点^[1]。生物脱氮因其环境友好、可持续、高效等优点成为目前污水脱氮的主流技术^[2]。传统生物脱氮工艺稳定运行往往需要充足的碳源作为电子供体,然而我国市政污水普遍存在碳源不足的问题,因此通常需要补充外部碳源^[3]。根据存在状态,外部碳源可分为液态碳源和固态碳源,其中固态碳源因其缓释性能在可持续利用方面备受关注^[4]。此外,固态碳源具有运输安全、投加可操作性强、运行管理简单等优点,尤其适用于小规模分散式污水处理。因此,固态碳源的研究在环境领域日益广泛。

固态碳源是一类具有大分子结构的固体物质,具有长期可持续的释碳能力,根据来源可分为天然物质和人工可生物降解聚合物两类^[5],其中天然固态碳源具有储量大、易获取、成本低等优势^[6],并逐渐成为研究热点。Xu等人^[7]采用天然谷物精米作为固态碳源,其有机物(以COD计)释放能力为600 mg/g。Wang等人^[8]将废弃香蕉皮用作固态碳源,其释碳能力可达 (240.83 ± 7.50) mg/g,但碳源利用率仅为22.6%。与传统碳源(如蔗糖、葡萄糖、乙醇、甲醇等)相比,固态碳源的有机物释放性能普遍偏弱^[3,9],原因在于其有机物释放能力受到降解条件的影响较大。Xia等人^[9]指出初始pH会影响微生物对固态碳源的水解作用。Wang等人^[5]发现,提高温度会促进水解菌的酶活性,强化固态碳源水解过程。Siepmann等人^[10]指出水力条件对缓释物质的有机物溶出过程有显著影响。综上,如何优化释碳条件、增强释碳性能成为固态碳源用于污水处理亟需突破的瓶颈。

糙米是一种来源广泛、价格低廉的天然固态碳源,其主要成分为淀粉,具有较大释碳潜力^[7]。此外,糙米因其保留了糊粉层、胚芽、胚等部位,较之精米等不仅可以提高近1/3的有机物释放潜力,且可为微生物的生长代谢提供部分微量元素^[11]。响应面法是一种综合试验设计和数学建模的优化方法,可考察因素之间的交互作用,获得优化参数和

方案^[12-13]。因此,选取糙米作为典型固态碳源,采用响应面法 Box-Behnken Design(BBD)模型研究了温度、pH和水力条件(采用搅拌模拟)对有机物释放过程的影响,解析复合因素互作关系,确定最优释碳条件。在此基础上,进一步分析了糙米有机物供给的经济性能和反硝化性能等。

1 材料与方法

1.1 天然固态碳源

选取糙米作为天然固态碳源,其为细长颗粒,粒径为1.0~2.0 mm,密度为 1.435 g/cm^3 ,比表面积为 $0.284 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

1.2 固态碳源释碳条件优化设计

在污水处理过程中,固态碳源往往作为电子供体被微生物利用。因此,以典型污水生物脱氮过程的适宜条件为参考,确定影响因素优化水平基准,其中温度和pH分别为 $25 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $7 \sim 9$ ^[13-14]。水力条件因素采用不同转速搅拌进行模拟,其水平参考固态物质缓释测量法——篮法的常用转速,范围为 $50 \sim 150 \text{ r/min}$ ^[15]。

采用响应面法中 Box-Behnken Design模型优化糙米释碳条件^[16]。以温度(25 、 30 、 $35 \text{ }^\circ\text{C}$)、pH(7 、 8 、 9)、转速(50 、 100 、 150 r/min)三个因素为自变量,以水体COD浓度(Y)为响应值,选用3因素3水平进行响应面试验设计。其中BBD试验的中心点如下:温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、pH=8、转速为 100 r/min ,中心点试验重复4次。采用软件 Design-Expert 11.0设计得到17种试验方案。

1.3 固态碳源糙米有机物释放及验证

称取5 g糙米置于350 mL血清瓶中,利用NaOH溶液和稀硫酸溶液调节纯水pH至目标值,向血清瓶中加入250 mL调节pH后的溶液、0.5 mL微量元素溶液。微量元素组成参见已有报道^[7,17]。用橡胶瓶塞和铝塑盖密封血清瓶后,放入培养箱中(曼泉MQL-61HGL),调节温度和转速,恒温培养5 d后,静置取样并利用 $0.45 \mu\text{m}$ 水系滤膜过滤,收集滤液后采用《水和废水标准检验法》测定COD浓度。

利用 Design-Expert 11.0 软件确定糙米有机物释放的最佳条件,并预测在此条件下的最大有机物积累量;设置预测可信度为 95%,确定回归模型的预测区间范围。采用上述试验方法,研究固态碳源糙米实际有机物释放性能,试验设置 3 次重复。

1.4 固态碳源反硝化脱氮研究

为进一步研究糙米作为固态碳源的应用性能,通过 USB 反应器连续运行考察了糙米的反硝化脱氮效果。反应器体积为 1.0 L,其内接种 0.5 L 厌氧污泥。厌氧污泥取自杭州市某污水处理厂 A²O 工艺的厌氧池,污泥总浓度和悬浮固体浓度分别为 7.71、6.09 g/L。USB 反应器的糙米投加量为 30 g,运行温度为(30±2) °C,水力停留时间(HRT)为 4 h,回流比为 2.0,连续运行 15 d。含氮废水采用模拟市政污水,硝态氮浓度控制在 30 mg/L 左右。反应器运行期间定期采样测定 COD、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 浓度等,以评估反硝化脱氮性能。需要指出的是,碳源投加量的确定主要依据试验结果和理论计算。根据已有研究结果^[18],糙米释放的有机物以 VFAs 为主,其用于异养反硝化的 C/N 需求可设为 3.0 左右。在硝态氮浓度为 30 mg/L 条件下,根据反应 C/N 和反应器进水流量,可计算反应器运行所需有机物量,进一步根据固态碳源平均释碳性能就可确定碳源投加量。

1.5 数据处理与分析

利用 Design-Expert 11.0 软件和 SPSS 软件处理试验数据,采用多元回归方程拟合以表征糙米的有机物释放特征,通过 F 检验分析回归方程显著性,通过相关系数 R² 分析回归方程拟合度。F 值是均方和剩余均方的商值,而 p 值是 F 检验的显著性水平, R² 是多元回归方程拟合程度的评价指标,调整相关系数 R²_{Adj} 可评估误差因素对模型拟合度的影响^[12]。利用 Design-Expert 11.0 软件和 Origin 软件绘制 BBD 试验的响应面图及等高线图。

2 结果与讨论

2.1 环境条件对释碳性能影响的回归和方差分析

利用响应面法 Box-Behnken Design 模型试验考察温度、pH 和水力条件(搅拌模拟)对糙米有机物释放性能的影响,结果见表 1。当温度为 25 °C、pH 为 8、转速为 50 r/min 时,有机物累积释放量最低,仅有 733 mg/L;而当温度为 35 °C、pH 为 8、转速为 50 r/

min 时,有机物累积释放量最高,达到 1 746 mg/L。同一固态碳源在不同降解条件下的有机物释放能力差异最高可达 2.38 倍,表明环境条件对固态碳源有机物释放性能影响显著,条件优化是提高碳源利用率的有效途径。

表 1 不同环境条件下固态碳源的有机物释放性能
Tab.1 Organic release of SCS under different conditions

试验编号	X ₁ /°C	X ₂	X ₃ / (r·min ⁻¹)	累积释放量/ (mg·L ⁻¹)
1	25	7	100	1 544
2	35	7	100	1 536
3	25	9	100	1 524
4	35	9	100	1 516
5	25	8	50	733
6	35	8	50	1 746
7	25	8	150	1 280
8	35	8	150	740
9	30	7	50	860
10	30	9	50	816
11	30	7	150	1 308
12	30	9	150	1 020
13	30	8	100	1 400
14	30	8	100	1 344
15	30	8	100	1 416
16	30	8	100	1 528
17	30	8	100	1 392

采用 Box-Behnken Design 模型对试验结果进行分析,得到多元回归方程如下:

$$Y=1\,897.00-118.58X_1-294.50X_2+51.56X_3-1.55X_1X_3+3.26X_2X_3+4.75X_1^2-4.88X_2^2-0.16X_3^2 \tag{1}$$

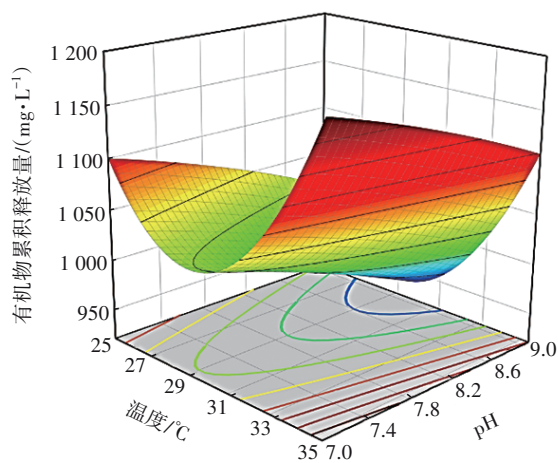
对多元回归方程进行方差分析和显著性检验,结果显示该拟合模型极显著(p<0.01),且失拟项不显著(p>0.05),模型方程回归系数 R²=0.960 2>0.95,实现高度拟合。此外,回归模型的信噪比 S/N=12.895 8>4,变异系数 C. V. =7.54%。上述结果表明,模型和多元回归方程在相应区间内具有较高置信度和精密度,可较好反映温度、pH 和水力条件与固态碳源有机物释放性能之间的关系。但需要指出的是 R²_{Adj}=0.909 0,表明误差因素对模型拟合度的干扰可能性为 9.10%。该误差可能源于固态碳源本身物理性质(如粒径、孔隙度等)和非核心环境条件(如光照)等差异。

根据回归方程和方差分析结果可知,在单因素影响中,有机物释放与温度和pH呈负相关,而与转速呈正相关,其中转速为显著影响因素($p<0.05$),表明水力条件影响显著。单因素影响的大小排序为水力条件>温度>pH。在复合因素交互影响方面,温度-pH与有机物释放无相关性,而温度-水力条件为拮抗作用,pH-水力条件为协同作用,后两者的复合作用分别为极显著($p<0.01$)和显著($p<0.05$)。由回归方程可知,复合因素影响的大小排序为温度-水力条件>pH-水力条件>温度-pH。

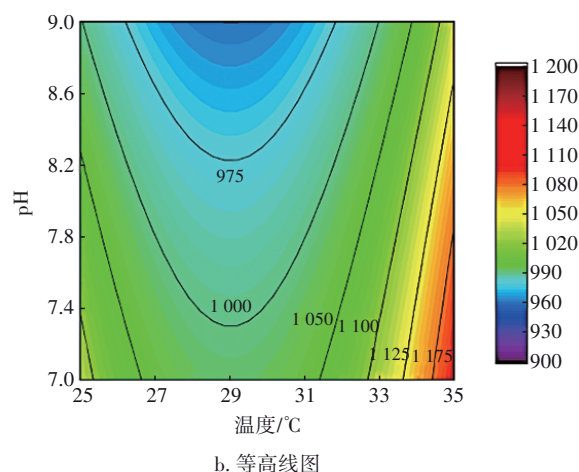
可以看出,在多元回归方程的5个显著拟合中,有4个拟合项与转速相关,表明水力条件是影响有机物释放过程的重要因素。这很可能与固态碳源的有机物释放过程相关。一般该过程包括5个环节^[10]:表面浸润;内部化学键断裂,产生小分子;小分子溶剂化;小分子通过非搅动层扩散;小分子在搅动流体的传质。根据物质溶出典型模型 Noyes-Whitney 方程,扩散是限制物质溶出速度的主要因素^[19]。因此,当糙米降解产生小分子物质后,水力条件(调整转速)可通过影响小分子的扩散作用而进一步影响糙米的释碳性能。此外,交互项温度-水力条件和二次项温度亦可显著影响有机物释放,这可能与温度可影响扩散系数有关,也可能与温度可影响淀粉酶活性有关^[20]。综上,在利用固态碳源糙米过程中,应重点考虑温度和水力条件的影响。

2.2 环境条件对释碳性能影响的响应面分析

响应面及相应等高线可直观反映各因素对固态碳源糙米释碳性能的影响。温度-pH复合因素响应面和等高线如图1所示。



a. 响应面图



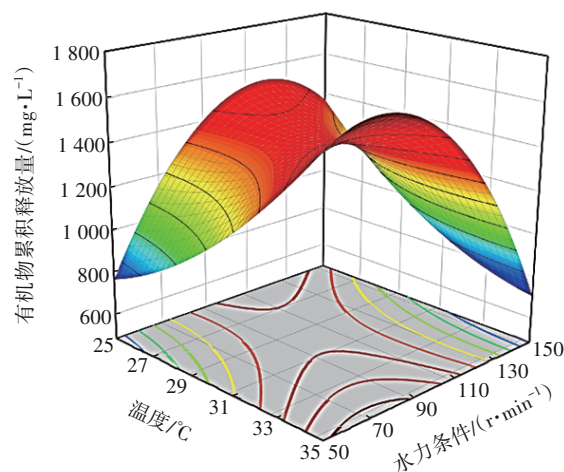
b. 等高线图

图1 温度-pH复合效应的响应面图及等高线图

Fig.1 Response surface diagrams and contour plots of combined effect of temperature-pH

由图1可知,响应面曲线呈倒置马鞍形,随温度升高,有机物释放呈现先下降后上升趋势,最强释碳性能出现在高温(约为35 °C)和低pH(约为7)时。在温度为25~33 °C、pH为7.4~9.0时等高线接近椭圆,即在此区域温度和pH交互作用强烈,对固态碳源有机物释放影响显著。

图2为温度-水力条件复合因素试验结果,可知响应面曲线呈近正置马鞍形,且等高线图呈现双曲线形,表明两因素对糙米释碳性能的影响主要为拮抗作用。在温度为33~35 °C、转速为50~90 r/min区域,两者交互作用强烈。图3中pH-水力条件复合因素结果显示,有机物释放随pH升高逐渐下降,随转速提高呈现先上升后下降趋势。在温度为32~35 °C、转速为50~108 r/min区域,两者交互作用强烈,且为协同作用。



a. 响应面图

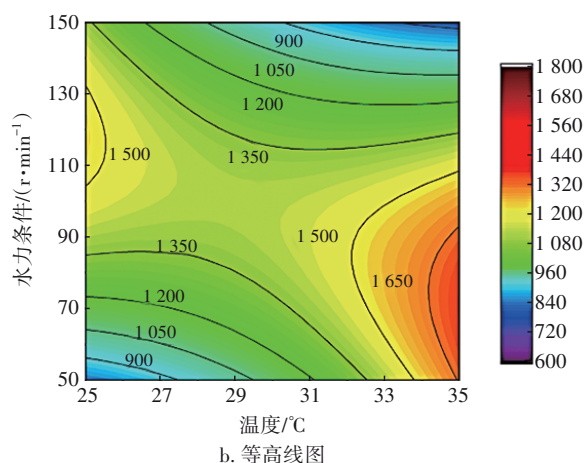


图2 温度-水力条件复合效应的响应面图及等高线图
Fig.2 Response surface diagrams and contour plots of combined effect of temperature-hydraulic conditions

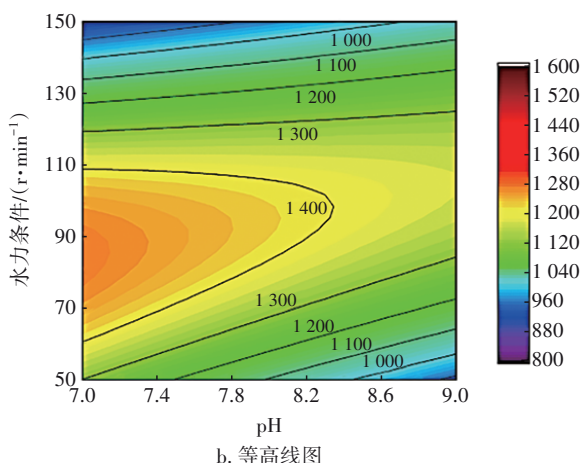
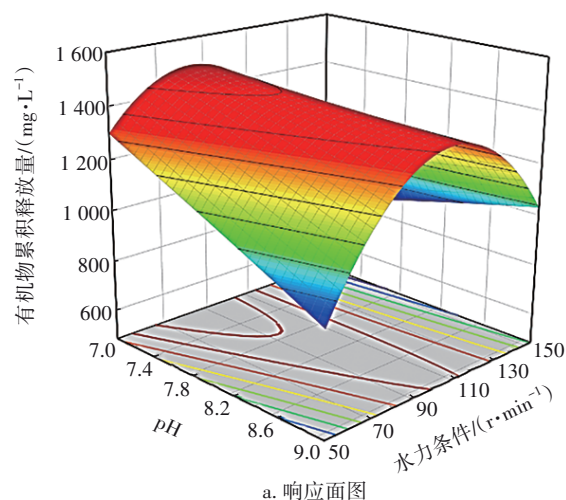


图3 pH-水力条件复合效应的响应面图及等高线图
Fig.3 Response surface diagrams and contour plots of combined effect of pH-hydraulic conditions

2.3 释碳性能条件优化验证及经济性分析

环境条件对固态碳源释碳性能的影响差异显

著,且复合效应明显。温度、pH和水力条件对固态碳源有机物积累量均有影响,可根据影响程度大小区分,重点关注影响较强的因素进行强势控制。需要指出的是,环境条件处于单因素最优水平并不意味着释碳性能也处于最优水平,即固态碳源的有机物释放性能要兼顾复合因素的联合效应进行联动控制。

基于上述“强势/联动”模式,利用 Box-Behnken Design 模型获得糙米的最优释碳条件:温度为 35 °C, pH=7, 转速为 61 r/min, 此时有机物释放量的预测值为 1 883 mg/L。在上述最优条件下进行有机物释放验证试验,实际释放积累量为 (1 989±91) mg/L, 该结果处于 Box-Behnken Design 回归模型分析置信度为 95% 的区间内 (1 555~2 210 mg/L)。表明回归模型具有可信度,可作为糙米实际应用的参考依据。

此外,经济性是固态碳源选择的关键性因素,因此,进一步对优化条件下的释碳性能及其经济性进行评估。在最优释碳条件下,在 5 d 内糙米的有机物释放速度为 397.8 mg/d, 单位释放量为 99.5 mg/g。考虑到糙米中有机物的淀粉含量及长效释放性^[21], 其有机物释放潜能可达 864.3 mg/g, 有机物供给成本最低可达 2.3 元/kg。与乙酸钠 (5.3 元/kg) 和葡萄糖 (2.6 元/kg) 等常见液态碳源相比^[11], 固态碳源糙米具有一定经济性和推广应用前景。

2.4 固态碳源的反硝化脱氮性能

为进一步研究固态碳源作为电子供体的应用可行性,采用连续运行的方式进行了反硝化脱氮研究,结果如图 4 所示。

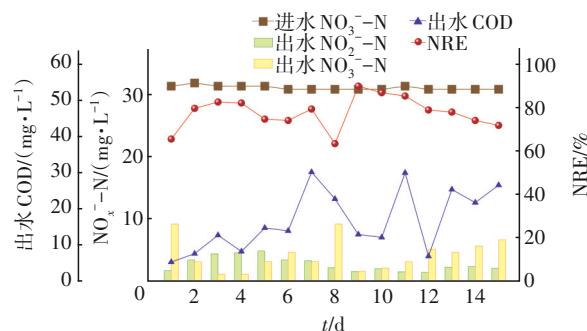


图4 固态碳源糙米反硝化脱氮性能
Fig.4 Denitrification performance of USB reactor with SCS of brown rice

当反应体系中糙米投加量为 30 g 时,出水中有有机物含量一直稳定维持较低水平,为 (16.7±8.6)

mg/L, 低于国家一级A排放标准限值。硝酸盐去除率随运行时间逐渐提高, 并在第9天后最高达到94.8%, 此时出水浓度为1.6 mg/L; 反应器对总氮的去除率为 $(77.6 \pm 7.4)\%$, 出水总氮浓度为6.9 mg/L, 低于国家一级A排放标准限值(15 mg/L)^[22]。反应器的反硝化脱氮速率可达24.1 mg/(L·d), 与已有反硝化固态碳源报道相比具有高效性^[4, 7, 23]。需要指出的是, 在反硝化过程中, 添加微生物后, 固态碳源水解为物理过程和生物过程协同作用, 糙米中的淀粉酶和微生物产生的外源水解酶对固态碳源水解有协同强化作用^[24]。

3 结论

① 采用响应面法 Box-Behnken Design 模型对糙米的有机物释放性能进行优化, Box-Behnken Design 模型拟合具有较高置信度和精密度。单因素和复合因素对释碳性能的影响程度排序分别为水力条件>温度>pH、温度-水力条件>pH-水力条件>温度-pH, 其中水力条件是影响释碳性能的强势因素。

② 环境条件对糙米释碳性能的影响差异显著, 且复合效应明显。对此, 提出“强势/联动”优化模式, 并获得了最优条件: 温度为35℃, pH为7, 水力条件(以转速计)为61 r/min, 有机物释放性能可达19.9 mg/(g·d)。验证试验表明模型具有可信度。

③ 糙米的有机物供给成本最低为2.3元/kg, 基于固态碳源糙米的反硝化工艺可实现高效脱氮, 总氮去除率和去除速率分别可达 $(77.6 \pm 7.4)\%$ 和24.1 mg/(L·d), 具有较好的经济性能和应用前景。

参考文献:

- [1] PENUÉLAS J, SARDANS J. The global nitrogen-phosphorus imbalance[J]. *Science*, 2022, 375(6578): 266-267.
- [2] ZHANG M, WANG S, JI B, *et al.* Towards mainstream deammonification of municipal wastewater: partial nitrification-anammox versus partial denitrification-anammox[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 393-401.
- [3] FU X, HOU R, YANG P, *et al.* Application of external carbon source in heterotrophic denitrification of domestic sewage: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 817: 153061.
- [4] XIONG R, YU X, YU L, *et al.* Biological denitrification using polycaprolactone-peanut shell as slow-release carbon source treating drainage of municipal WWTP [J]. *Chemosphere*, 2019, 235: 434-439.
- [5] WANG J, CHU L. Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process [J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(6): 1103-1112.
- [6] FAN H, ZHANG M, BHANDARI B, *et al.* Food waste as a carbon source in carbon quantum dots technology and their applications in food safety detection [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 95: 86-96.
- [7] XU D, YING S, WANG Y, *et al.* A novel SAD process: match of anammox and denitrification [J]. *Water Research*, 2021, 193: 116874.
- [8] WANG H, FENG C, DENG Y. Effect of potassium on nitrate removal from groundwater in agricultural waste-based heterotrophic denitrification system [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134830.
- [9] XIA L, LI X, FAN W, *et al.* Denitrification performance and microbial community of bioreactor packed with PHBV/PLA/rice hulls composite [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 150033.
- [10] SIEPMANN J, SIEPMANN F. Mathematical modeling of drug dissolution [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2013, 453(1): 12-24.
- [11] WANG H, CHEN N, FENG C, *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.
- [12] DANMALIKI G I, SALEH T A, SHAMSUDDIN A A. Response surface methodology optimization of adsorptive desulfurization on nickel/activated carbon [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313: 993-1003.
- [13] KUYPERS M M M, MARCHANT H K, KARTAL B. The microbial nitrogen-cycling network [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(5): 263-276.
- [14] 侯卫龙, 周鸿翔, 施加春, 等. 碳源、温度及水力停留时间对地下水硝酸盐的去除效果[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2014, 40(3): 314-321.
HOU Weilong, ZHOU Hongxiang, SHI Jiachun, *et al.* Effects of carbon sources, temperature and hydraulic retention time on nitrate removal for groundwater [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life*

- Science), 2014, 40(3): 314–321 (in Chinese).
- [15] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009 (in Chinese).
- [16] KARIMIFARD S, ALAVI M M R. Application of response surface methodology in physicochemical removal of dyes from wastewater: a critical review[J]. Science of the Total Environment, 2018, 640/641: 772–797.
- [17] ASTRID A V D G, PETER D B, LESLEY A R, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor [J]. Microbiology, 1996, 142(8):2187–2196.
- [18] 许玲, 杜尔登, 冯欣欣, 等. UV/H₂O₂/O₃工艺降解典型有机防晒剂[J]. 中国给水排水, 2023, 39(3): 80–87.
- XU Ling, DU Erdeng, FENG Xinxin, *et al.* Degradation of typical organic sunscreen by UV/H₂O₂/O₃ process[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(3): 80–87 (in Chinese).
- [19] FORD VERSYPT A N, PACK D W, BRAATZ R D. Mathematical modeling of drug delivery from autocatalytically degradable PLGA microspheres—a review [J]. Journal of Controlled Release, 2013, 165(1): 29–37.
- [20] 刘禹辰, 杨德光, 李梁, 等. 低温胁迫对玉米种子萌发及淀粉分解酶类活性的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(1): 64–68.
- LIU Yuchen, YANG Deguang, LI Liang, *et al.* Effect of low temperature stress on maize seed germination and starch decomposition enzyme activity [J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(1): 64–68 (in Chinese).
- [21] ZHANG F, MA C, HUANG X, *et al.* Research progress in solid carbon source-based denitrification technologies for different target water bodies [J]. Science of the Total Environment, 2021, 782: 146669.
- [22] JI B, ZHANG M, GU J, *et al.* A self-sustaining synergetic microalgal–bacterial granular sludge process towards energy-efficient and environmentally sustainable municipal wastewater treatment [J]. Water Research, 2020, 179: 115884.
- [23] JIANG J, LIANG D, HU Y. Solid slow-release carbon sources improve the simultaneous nitrification and denitrification processes in low carbon resource wastewater [J]. Bioresource Technology, 2022, 365: 128148.
- [24] SUN P, YU Y, XU D, *et al.* Organic matter release characteristics of brown rice: a promising solid carbon source with unique dual-enzyme system for wastewater treatment[J]. Science of the Total Environment, 2023, 887: 163787.

作者简介: 孙盼(1997–), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向为环境生物技术与废水生物处理。

E-mail: 22014044@zju.edu.cn

收稿日期: 2023-04-03

修回日期: 2023-05-23

(编辑: 李德强)

像保护眼睛一样保护生态环境,
像对待生命一样对待生态环境