

基于无机颗粒基质的好氧颗粒污泥快速培养研究

——以牡蛎壳和硅藻土为例

严彩凤¹, 罗婷婷¹, 张 敏², 李甜甜¹, 严丽丽^{1*}, 梁 意¹, 叶沐晗¹

¹上海工程技术大学化学化工学院, 上海

²上海甘度环境工程有限公司, 上海

收稿日期: 2025年12月23日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月26日

摘要

本文以序批式活性污泥法反应器为实验装置, 开发了一种以硅藻土、牡蛎壳作为无机颗粒基质的好氧颗粒污泥(aerobic granular sludge, AGS)快速培养工艺, 并考察了其对污染物的去除效能。通过优化基质粒径等参数, 成功实现了AGS的高效形成与长期稳定运行。结果表明, 添加牡蛎壳的AGS在化学需氧量(COD)与总磷(TP)去除方面表现突出, COD最高去除率达95.87%, TP去除率稳定维持在60%以上。形貌观察表明, 成熟的AGS呈现椭球形结构, 表面呈多孔形态, 有利于微生物附着及物质传递。本研究为AGS技术在市政污水、工业废水及中小城镇污水处理中的工程应用提供了技术参考。

关键词

好氧颗粒污泥, 硅藻土, 牡蛎壳, 化学需氧量

Research on the Rapid Cultivation of Aerobic Granular Sludge Based on Inorganic Particle Matrices

—Taking Oyster Shells and Diatomite as Examples

Caifeng Yan¹, Tingting Luo¹, Min Zhang², Tiantian Li¹, Lili Yan^{1*}, Yi Liang¹, Muhan Ye¹

¹School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

²Shanghai Gandu Environmental Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: December 23, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 26, 2026

*通讯作者。

文章引用: 严彩凤, 罗婷婷, 张敏, 李甜甜, 严丽丽, 梁意, 叶沐晗. 基于无机颗粒基质的好氧颗粒污泥快速培养研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(1): 62-69. DOI: [10.12677/aep.2026.161008](https://doi.org/10.12677/aep.2026.161008)

Abstract

This study employed a sequential batch reactor (SBR) as the experimental apparatus to develop a rapid cultivation process for aerobic granular sludge (AGS) using diatomaceous earth and oyster shells as inorganic granular substrates, while evaluating its pollutant removal efficiency. Through optimization of parameters such as substrate particle size, the process successfully achieved efficient AGS formation and long-term stable operation. Results indicate that AGS supplemented with oyster shells demonstrates outstanding removal of chemical oxygen demand (COD) and total phosphorus (TP), achieving a maximum COD removal rate of 95.87% and maintaining stable TP removal above 60%. Morphological observations reveal mature AGS exhibits helical or ellipsoidal structures with porous surfaces, facilitating microbial attachment and mass transfer. This study provides technical references for the engineering application of AGS technology in municipal sewage, industrial wastewater, and small-to-medium town wastewater treatment.

Keywords

Aerobic Granular Sludge, Diatomite, Oyster Shells, Chemical Oxygen Demand

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

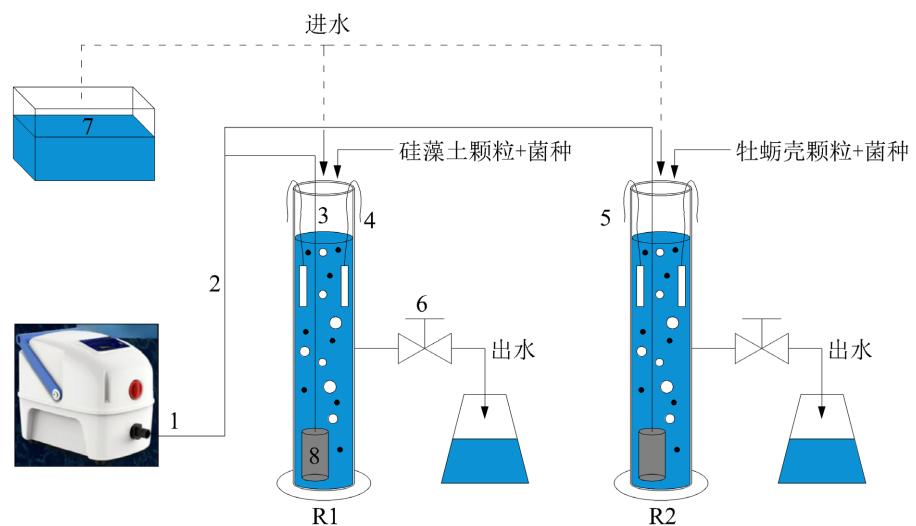
作为一种新型污水处理技术，好氧颗粒污泥(aerobic granular sludge, AGS)除具有优异的沉降性能、较高的微生物浓度[1]和良好的抗冲击负荷能力外，其独特的结构特征也为脱氮除磷微生物提供了适宜的生长环境，并且在运行过程中能简化工艺流程，减小占地面积，提高经济效益[2][3]。本试验使用序批式间歇活性污泥法(SBR)，是污水处理过程中一种非常有效的工艺手段[4][5]。然而，AGS 的形成是一个复杂的过程，受颗粒粒径、底质类型、营养物质等多种因素的影响，导致污泥颗粒化周期长，所需的反应器高径比较大，难以在实际生产场地开展中试研究，这极大地限制了该技术的工业化应用[3]。本文以 SBR 为实验装置，研究快速造粒的方法，以及 AGS 去除化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)的效果，并提出好氧颗粒污泥技术在市政污水、工业废水等领域的发展趋势[6]。

2. 实验部分

2.1. 材料与装置

硅藻土、牡蛎壳购自山西太原，菌种购自上海甘度环境工程有限公司；无水葡萄糖购自于上海凌峰化学试剂有限公司，氯化铵、亚硝酸钠购自上海泰坦科技股份有限公司，磷酸二氢钾、氢氧化钠购自于国际集团化学试剂有限公司，均为分析纯；COD 测试盒、TN 测试盒和 TP 测试盒购自北京泰克赛维科技有限公司；实验配制溶液所用纯水均来自 Millipore 品牌的 Direct-Q3UV 型号/超纯水一体机。

试验所用反应器为高硼硅玻璃圆形量筒，高度为 454 mm，内直径为 61 mm，管直径为 66 mm，有效容积为 1 L，换水率为 90%。曝气设备为塞尔 SC-36 力霸增氧器，以气泡石作为微孔曝气器，曝气头置于反应器底部。试验装置示意图如图 1 所示。



1——曝气设备；2——导气管；3——反应装置；4——溶解氧计；5——pH计；6——阀门；7——进水箱；8——曝气头。

Figure 1. Schematic diagram of the experimental apparatus
图 1. 试验装置示意图

2.2. 培养基质预处理

选择硅藻土和牡蛎壳作为好氧颗粒污泥的培养基质。将两种材料分别进行研磨，并通过 50~300 目的筛网进行分级筛选，收集不同粒径的颗粒样品。将筛选后的 6g 无机颗粒物分别投入含有 1L 自来水的高硼硅玻璃量筒中，使用曝气器进行曝气，观察并记录颗粒的悬浮状态，硅藻土和牡蛎壳悬浮效果最佳的粒径范围分别是 250~300 目、200~250 目。如图 2 所示。

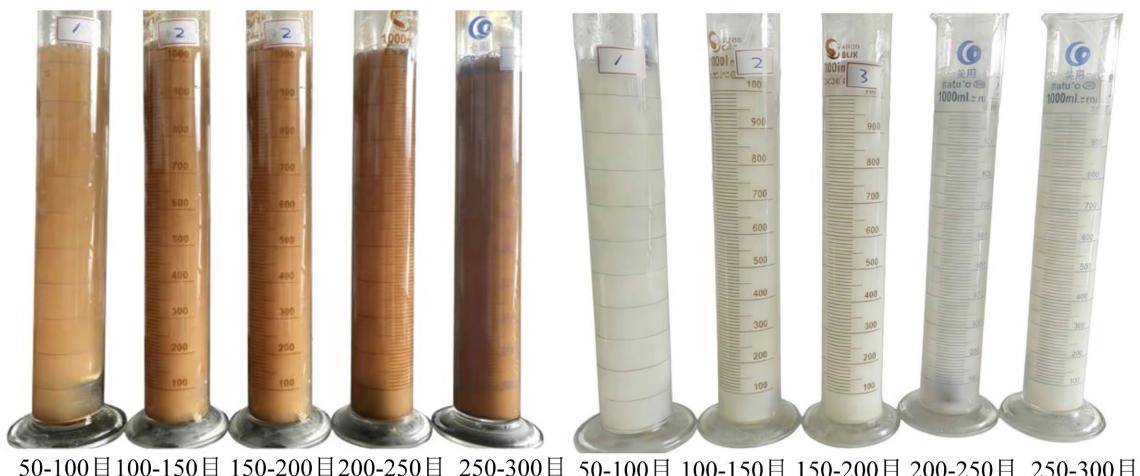


Figure 2. Selection of particle size for diatomite (left) and oyster shells (right)
图 2. 硅藻土 (左)和牡蛎壳 (右)颗粒粒径选择

2.3. 反应阶段

SBR 反应包括进水、曝气、沉淀、排水过程，运行周期为 24 h，其中进水为 1 min，曝气为 1386~1416 min，沉淀为 20~50 min，出水为 3 min。夏季 26℃ 进行，冬季 20℃ 进行，维持 pH 值在 8 左右，并定期

使用光学显微镜观察污泥中微生物的生长状况，记录微生物的形态和数量变化。培养初期进水采用人工配制的模拟废水，以动态连续实验室小试为主，采用模拟生活自配污水，即以葡萄糖为碳源，氯化铵为氮源，磷酸二氢钾为磷源，添加菌种。在污泥驯化阶段以 COD:N:P = 350:50:1 的原则进行配水。在稳定运行阶段，COD 比值逐步提高到 500, 1000, N 比值逐步提高到 120, 150。根据培养情况，取水样，待分析 COD, TN 和 TP，评估污泥对污染物的处理能力。

2.4. 分析检测

COD 测定采用美国环保署(USEPA)消解比色法；TN 测定采用过硫酸盐氧化法；TP 测定采用 USEPA PhosVer 3 消解 - 抗坏血酸法；污泥沉降比(SV)和污泥体积指数(SVI)按 GB/T 23486-2009 标准方法测定；混合液悬浮固体浓度(MLSS)和混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)按 GB/T 11901-1989 标准方法测定。

2.5. 污泥特性分析

停止曝气，使用吸虹法去除系统上清液，将颗粒污泥转移至聚丙烯广口瓶，0~4℃避光冷藏。分析污泥的折光率、吸光度、粒度分布，以及利用光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)观察污泥的微观结构和形态[7]-[9]。污泥粒度通过由 Spectris plc 制造的 Nano-Zs90 Malverne 激光粒度分析仪测得。

3. 结果与讨论

3.1. 活性污泥的形态结构

图 3 是硅藻土 AGS 和牡蛎壳 AGS 培养过程中的外观形态变化。第 0~3 d 时，反应器内硅藻土 AGS 为棕色，牡蛎壳 AGS 为乳白色，以细小棕色颗粒污泥为主，仅有少量污泥开始聚集成不规则棕色絮状小颗粒，同时伴随污泥解体现象；随着运行至第 25 d，颗粒数量逐渐增多，硅藻土 AGS 颜色由深棕色向浅褐色过渡，牡蛎壳 AGS 由浅黄色向浅褐色过渡并观察到白色絮状团附着于小颗粒表面；当运行至第 60 d，颗粒完整度显著提高，形态趋于饱满光滑，颜色进一步加深为棕褐色，颗粒呈近似球形或椭球形，表面光滑、结构致密，最终形成颜色均一、形态规则且活性良好的成熟好氧颗粒污泥。

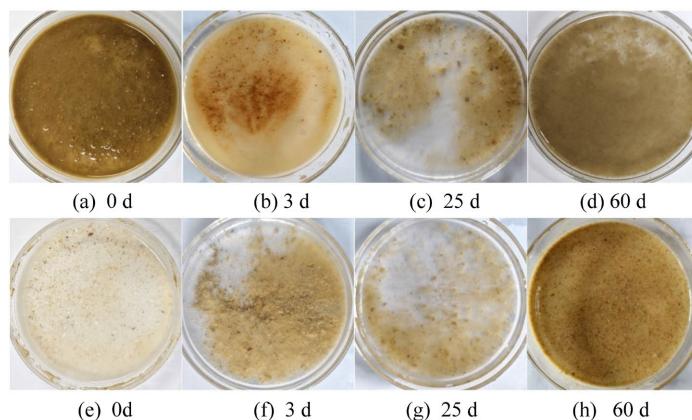


Figure 3. Morphological changes during the cultivation process of diatomite AGS (a)~(d) and oyster shell AGS (e)~(h)

图 3. 硅藻土 AGS (a)~(d) 和牡蛎壳 AGS (e)~(h) 培养过程中的外观形态变化

图 4 是硅藻土 AGS 的生长过程。在培养过程中，发现光学显微镜中硅藻土 AGS 颜色由初始的小颗粒逐渐变为大颗粒。Day 3 和 Day 10 时，AGS 逐渐团聚。Day 18 时，AGS 形状更加饱满，颗粒结构更加紧密，实现颗粒化进程。

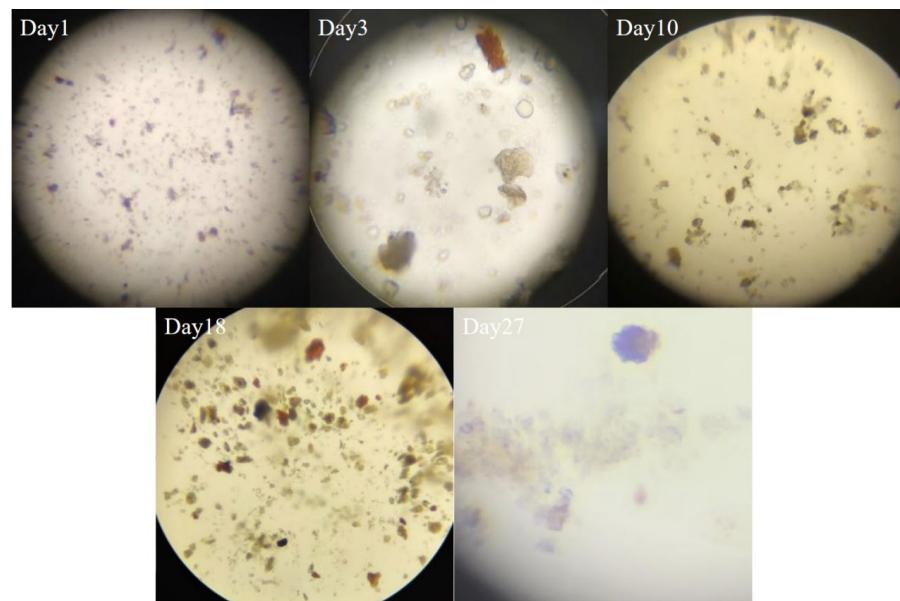


Figure 4. Growth process of diatomite AGS
图 4. 硅藻土 AGS 的生长过程

图 5 是牡蛎壳 AGS 的生长过程。在培养过程中,发现光学显微镜中牡蛎壳 AGS 颜色由初始的小颗粒逐渐变为大颗粒。Day 3 时,AGS 形状饱满。Adva 等人报道较高的曝气强度会促进小颗粒间的聚集,但同时也会引起丝状菌过度生长[10],然而丝状菌的大量增殖可以为 AGS 的形成提供骨架。图 4 Day 10 的硅藻土污泥颗粒分散,说明丝状菌膨胀明显。而图 5 Day 10 和 Day 18 牡蛎壳颗粒紧凑,丝状菌膨胀现象减轻。牡蛎壳污泥粒度为 $3.19 \mu\text{m}$, 牡蛎壳污泥粒度为 $18.33 \mu\text{m}$, 与形貌结构趋势相同。

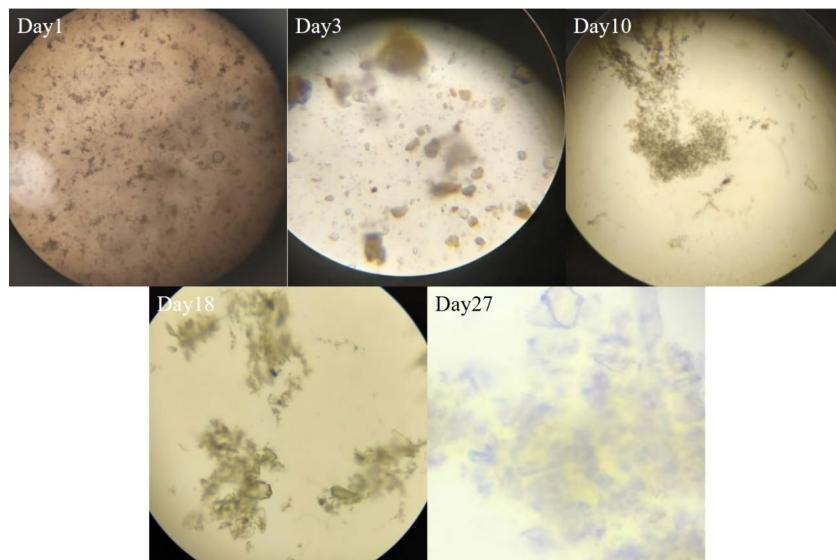


Figure 5. Growth process of oyster shell AGS
图 5. 牡蛎壳 AGS 的生长过程

图 6 为硅藻土污泥及牡蛎壳污泥的 SEM 图片。如图所示,好氧颗粒污泥呈椭球型,轮廓清晰,表面相对光滑略有粗糙感[11],具有较密实的结构,表面有明显的孔洞或孔隙,有助于提升颗粒污泥的表面积,

使好氧颗粒污泥具有更加丰富的微生物相。这些孔洞或孔隙还能为微生物固着生长提供固着点，使得微生物与污水充分接触，有利于水中污染物的去除。另一方面这些孔隙是营养物质和气体传递的通道，也是颗粒污泥内部微生物排放代谢产物的通道[12]。

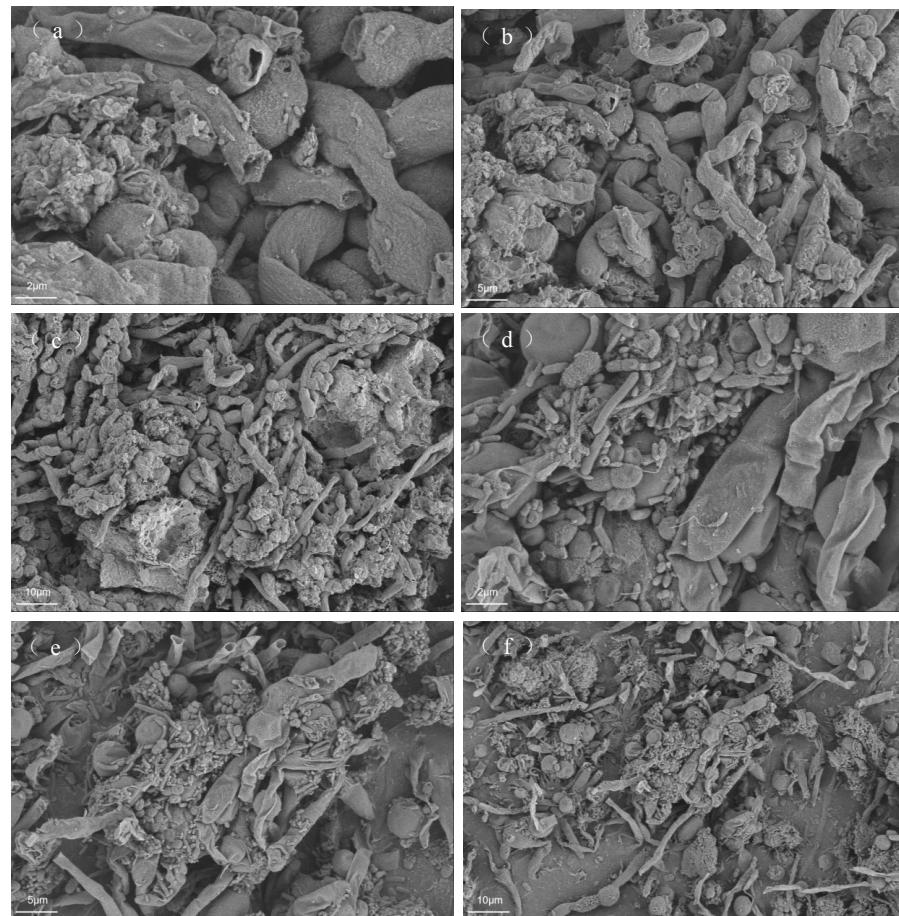


Figure 6. (a)~(c) SEM images of diatomite AGS; (d)~(f) SEM images of oystershell AGS
图 6. (a)~(c) 硅藻土 AGS 的 SEM 图像；(d)~(f) 牡蛎壳 AGS 的 SEM 图像

3.2. 沉降性能

培养初期开始第 25 天，SV30/SV5 比值中硅藻土污泥为 0.816，牡蛎壳污泥为 0.612，污泥沉降速率快且稳定；硅藻土污泥和牡蛎壳污泥的 MLSS 分别为 3860 mg/L 和 4500 mg/L，表明污泥中微生物和有机物的总量较高；硅藻土污泥 SVI 为 20.73 mL/g，牡蛎壳污泥为 13.33 mL/g。两者均远低于膨胀阈值，沉降迅速，颗粒结构致密。

3.3. 污染物的去除效果

图 7 是硅藻土 AGS 和牡蛎壳 AGS 的去除效果。硅藻土 AGS 实验中(图 7(a))，初始第 22~27 天，COD 为 300 mg/L，COD 去除率去除效果较好。第 41 天，COD 从 300 mg/L 提升到 500 mg/L，为适应中浓度 COD，硅藻土 AGS 的 COD 去除率仅为 42.31%，后期第 42~44 天去除效果逐渐提升。第 46 天，COD 从 500 mg/L 提升到 1000 mg/L，硅藻土 AGS 适应高浓度 COD，去除效果有所波动。

牡蛎壳 AGS 实验(图 7(b))，试验第 35 天时，COD 从 500 mg/L 提升到 1000 mg/L 时，牡蛎壳 AGS 初

期适应高浓度 COD, COD 去除率仅为 1.81%, 近乎为零。然而, 在驯化阶段, 微生物迅速繁殖并大量消耗 COD。随后, COD 去除率显著提升: 第 37 天达到 65.27%, 第 39 天升至 75.54%, 第 43 天增至 89.95%, 至第 46 天高达 95.87%。结果表明牡蛎壳 AGS 对 COD 的去除效果极为显著, 培养效果良好。第 24 天, 牡蛎壳 AGS 还处于驯化培养阶段, 去除 TN 的能力较弱, 仅为 16.25% (图 7(c)), 后期去除效果渐渐升高。表明牡蛎壳 AGS 对 TN 有一定的去除效果。图 7(d)为牡蛎壳 AGS 对 TP 的去除效果, 利用控制变量的方法, 调节进水浓度。在初期 TP 去除率较低, 在后期调整曝气强度, 随后, TP 去除率显著提升, 第 58 天后去除率稳定在 60%以上, 牡蛎壳 AGS 对 TP 的去除效果显著, 培养效果良好。牡蛎壳 AGS 所含的 CaCO_3 微量溶蚀, 对反应器内 pH 形成自限型缓冲, pH 稳定在 7~8, 有利于对污染物的去除。

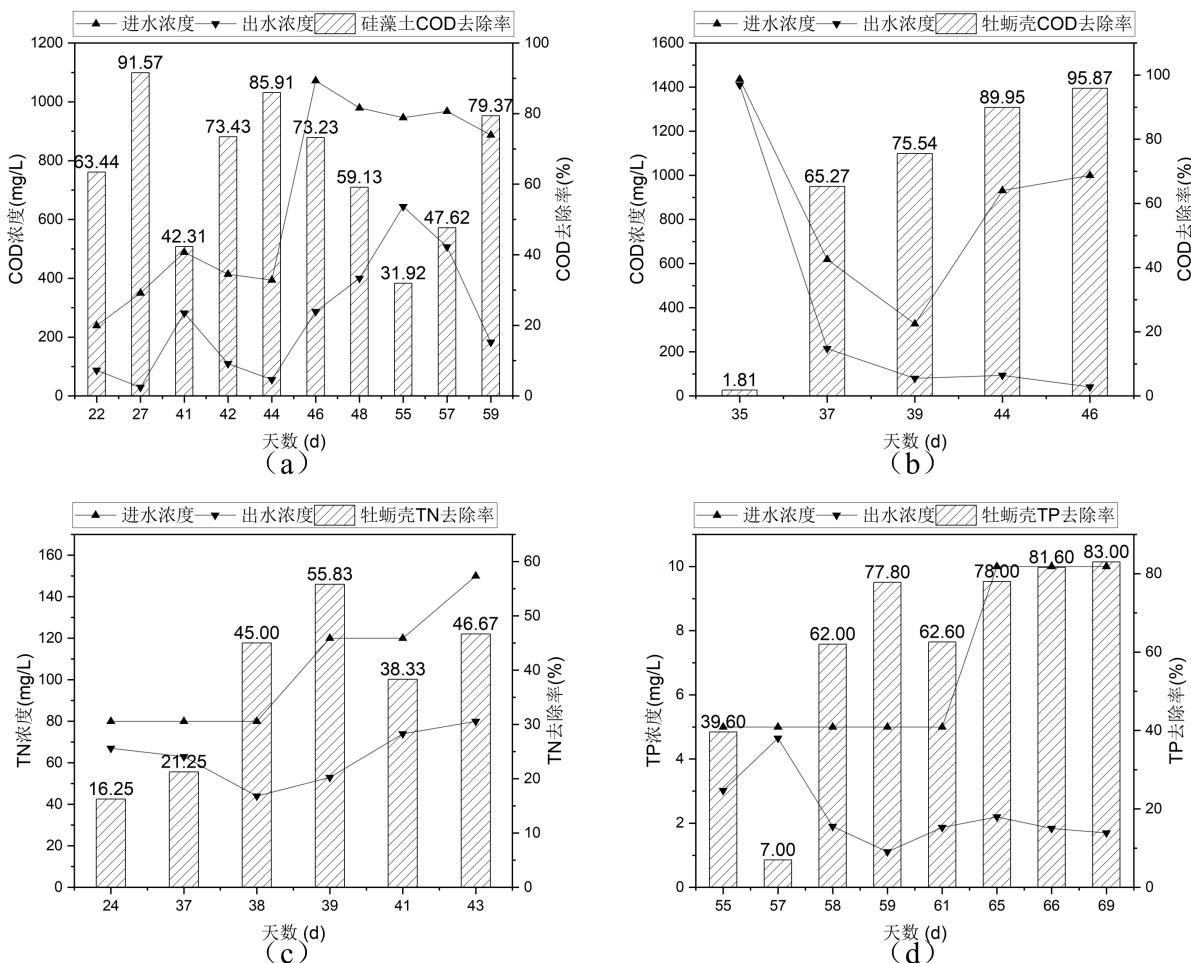


Figure 7. Removal effect of diatomite sludge on COD (a); Removal effect of oyster shells sludge on COD (b); TN (c) and TP (d)

3.4. 应用潜能

3.4.1. 市政污水处理

AGS 技术可以应用于市政污水处理厂, 通过快速培养和稳定运行, 显著提高处理效率, 减少反应器的占地面积, 降低运行成本。该技术能够有效去除污水中的 COD、TN 和 TP, 确保出水水质达到国家排放标准。本文中以牡蛎壳为基质的 AGS 在第 46 天时 COD 去除率高达 95.87%, 表明其在处理市政污水时具有显著优势。

3.4.2. 工业废水处理

在工业废水处理中，AGS 技术可以针对不同类型的废水(如食品加工废水、制药废水、化工废水等)进行定制化培养，提高对特定污染物的去除效果。通过优化培养条件，AGS 能够快速适应高浓度、高毒性废水，显著提高处理效率，降低处理成本。本文中，牡蛎壳 AGS 在 TP 去除方面表现出色，第 58 天后 TP 去除率稳定在 62%以上，显示出其在工业废水处理中的潜力。

3.4.3. 中小城镇污水处理

对于中小城镇和农村地区，AGS 技术可以结合 SBR 工艺，实现高效、经济的污水处理。该技术操作简单，运行稳定，适合在资源有限的地区推广使用，能够有效解决中小城镇和农村地区的污水处理问题。本文中，AGS 在不同粒径的无机颗粒物(如硅藻土和牡蛎壳)培养下均能成功实现颗粒化进程，表明其在中小城镇污水处理中的适用性。

4. 结论

本文开发了快速培养 AGS 的方法，使用硅藻土和牡蛎壳作为无机颗粒物，结合 SBR 反应装置，实现了 AGS 的高效形成和稳定运行。研究发现成熟 AGS 具有椭球型结构，表面光滑且有明显孔隙，有利于微生物固着生长和污染物去除。200~250 目的牡蛎壳 AGS 具有良好的悬浮状态和颗粒化效果，显著的 COD、TN 和 TP 去除效果，研究结果为市政污水、工业废水和中小城镇污水处理提供了新的思路。

基金项目

大学生创新训练计划项目(cx2404010)。

参考文献

- [1] 肖飞, 杨紫海, 王世民, 等. 优化双搅拌策略修复耐盐好氧颗粒污泥脱氮除磷及结构稳定性研究[J]. 水处理技术, 2025, 51(4): 92-98, 112.
- [2] 李浩, 袁林江. 好氧 SBR 反应器中污泥颗粒化过程的成核研究[J]. 中国给水排水, 2008(13): 42-45.
- [3] 赵风丽. 好氧颗粒污泥的快速培养和中试研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [4] 包志炜. 村镇低浓度生活污水对 SBR 工艺的影响研究[J]. 广东化工, 2022, 49(24): 190-192, 198.
- [5] 黄铿杰. 浅谈福建省高速公路服务区污水处理工艺应用现状与对策[J]. 福建交通科技, 2022(11): 120-123.
- [6] 洪小红, 张尧超, 刘湘伟, 等. 好氧颗粒污泥颗粒化到稳定性的研究进展[J]. 广东化工, 2022, 49(24): 279-282.
- [7] 张安龙, 汪琴, 侯银萍, 等. 高钙废水颗粒污泥中古菌菌群结构变化的分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 3956-3965.
- [8] Huang, X., Dong, W., Wang, H., Feng, Y., Sun, F. and Zhou, T. (2020) Sludge Alkaline Fermentation Enhanced Anaerobic-Multistage Anaerobic/Oxic (A-MAO) Process to Treat Low C/N Municipal Wastewater: Nutrients Removal and Microbial Metabolic Characteristics. *Bioresource Technology*, **302**, Article ID: 122583. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122583>
- [9] Wang, D., Wang, G., Yang, F. and Liu, C. (2018) Treatment of Municipal Sewage with Low Carbon-to-Nitrogen Ratio via a Novel Integrated Process. *Chemical Engineering Journal*, **341**, 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.011>
- [10] 王硕, 于水利, 徐巧, 等. 好氧颗粒污泥特性、应用及形成机理研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(4): 732-742.
- [11] 余诚, 王凯军, 张凯渊, 等. 连续流好氧颗粒污泥技术处理低浓度市政污水的中试研究[J]. 环境工程学报, 2023, 17(3): 713-721.
- [12] Adav, S.S., Lee, D., Show, K. and Tay, J. (2008) Aerobic Granular Sludge: Recent Advances. *Biotechnology Advances*, **26**, 411-423. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.05.002>