

固化微生物技术在城市生活污水处理中的应用研究

孙后杰

滁州炎旭环保科技有限公司, 中国·安徽 滁州 239000

摘要: 目的: 针对城市生活污水处理中传统活性污泥法普遍存在的水力与有机负荷冲击下微生物代谢活性易受制衡、低温期硝化菌群丰度锐减导致氨氮氧化速率呈指数级衰减的问题, 提出并验证了一种基于固化微生物技术的强化处理路径。方法: 从城市污水处理厂二沉池回流污泥中定向富集硝化菌、反硝化菌及聚磷菌, 并按 5:3:2 的比例进行混合; 以聚乙烯醇 (PVA) 与海藻酸钠 (SA) 为复固化载体, 采用包埋法进行富集, 制备出粒径 3~4 mm、孔隙率可控的微生物颗粒, 处理实际城市生活污水。结果: 在城市生活污水的常规进水条件下, 连续运行 55 天, 观察固化微生物技术在城市生活污水处理中的应用效果。扫描电镜显示固化颗粒内部形成了良好的好氧-缺氧微区结构, 55 天平均去除率为 91.2%, 总磷平均去除率为 83.6%。结论: 固化微生物技术显著提升了城市生活污水的脱氮除磷效率, 减少了污泥处置成本, 为城市污水处理厂的提标改造及分散式处理提供了实用技术路径。

关键词: 污水处理; 生活污水; 固化微生物技术; 脱氮除磷; 城市环境保护; 城市污水

Research on the Application of Immobilized Microbial Technology in Urban Domestic Wastewater Treatment

Sun Houjie

Chuzhou Yanxu Environmental Protection Technology Co., Ltd., China Anhui Chuzhou 239000

Abstract: Objective: In response to the common issues in conventional activated sludge treatment of urban domestic sewage, such as microbial metabolic activity being easily restrained under hydraulic and organic load shocks, and the abundance of nitrifying bacteria sharply decreasing in low-temperature periods causing exponential decay in ammonia nitrogen oxidation rates, this study proposes and validates an enhanced treatment approach based on immobilized microbial technology. Method: Nitrifying bacteria, denitrifying bacteria, and polyphosphate-accumulating organisms were selectively enriched from the return sludge of the secondary sedimentation tank of an urban wastewater treatment plant and mixed in a 5:3:2 ratio; polyvinyl alcohol (PVA) and sodium alginate (SA) were used as a composite immobilization carrier, employing an embedding method for enrichment to prepare microbial granules with a diameter of 3~4 mm and controllable porosity, which were then applied to treat actual urban domestic sewage. Result: Under typical influent conditions of urban domestic sewage, the application of immobilized microbial technology was continuously operated for 55 days. Scanning electron microscopy showed that the immobilized granules formed a well-developed aerobic-anoxic microzone structure. The average removal rate over 55 days was 91.2% for COD and 83.6% for total phosphorus. Conclusion: Immobilized microbial technology significantly improves nitrogen and phosphorus removal efficiency in urban domestic sewage, reduces sludge disposal costs, and provides a practical technical pathway for upgrading urban wastewater treatment plants and decentralized treatment.

Keywords: Wastewater treatment; Domestic sewage; Immobilized microbial technology; Nitrogen and phosphorus removal; Urban environmental protection; Urban sewage

0 引言

随着城市化进程的加速, 城市生活污水的排放量急剧增加, 成分也日益复杂, 对水环境造成了巨大压力。据统计, 我国城市生活污水年排放量已超过 500 亿吨, 且呈逐年递增趋势^[1]。因此, 有效处理城市生活污水, 不仅关系到城市生态环境的保护, 也是实现水资源可持续利用的

重要环节, 开发高效、低耗、适应性强的污水处理技术已成为行业迫切需求。城市生活污水处理面临着诸多技术需求与瓶颈^[2]。一方面, 针对城市生活污水中常见的污染物, 往往需要处理技术具备有机物、氮、磷等污染物的高效去除能力, 以满足日益严格的排放标准。另一方面, 还要求其具备良好的稳定性、抗冲击负荷能力以及较低的运行

成本。

现有的城市生活污水处理技术中，活性污泥法存在污泥产量大、易发生污泥膨胀、对水质水量变化敏感等问题。而生物膜法虽在一定程度上克服了这些缺点，但仍面临填料堵塞、更换频繁等挑战。因此，开发新型污水处理技术势在必行^[3]。固化微生物技术作为一种新兴的生物处理技术，为城市生活污水处理提供了新的思路。该技术通过物理或化学手段将游离的微生物固定在特定载体上，例如吸附法、包埋法、交联法、自固定化法等，形成具有高活性、高浓度的生物催化剂，将游离微生物固定于特定载体，形成高密度、高活性且可重复利用的生物体系，从而提高污染物的去除效率^[4]。

基于此，采用聚乙烯醇（PVA）和海藻酸钠（SA）作为固化载体，以深入研究固化微生物技术在城市生活污水处理中的应用，以突破现有技术瓶颈，提高污水处理效率和经济性。期望为城市生活污水处理提供一种高效、稳定且经济的新技术，推动固化微生物技术在污水处理领域的广泛应用。

1 材料与方法

1.1 实验材料与设备

固化微生物技术在城市生活污水处理中应用的实验材料与仪器设备选用情况如表 1、2 所示^[5]。

表1 固化微生物技术化学试剂

材料类别	材料名称	纯度
载体材料	聚乙烯醇（PVA）	醇解度≥99%
	海藻酸钠（SA）	粘度≥2000 mPa·s
交联剂	氯化钙（CaCl ₂ ）	分析纯
	硫酸钠（Na ₂ SO ₄ ）	分析纯
营养基质	硝酸钾（KNO ₃ ）	分析纯
	蛋白胨、牛肉膏	生化试剂

表2 实验仪器与设备

设备名称	规格
聚氨酯海绵	20×20×20 mm
透析袋	截留分子量14 kDa
无菌注射器	50 mL
离心管	1.5 mL
滤膜（水系）	0.45 μm
生化培养箱	控温±0.5℃, 0~60℃
恒温摇床	转速0~250 rpm
高速冷冻离心机	转速≥10000 rpm
电子显微镜	放大倍数40~1000x
电子分析天平	精度0.0001 g

利用上述材料与设备，深入探讨固化微生物技术在城市生活污水处理中的应用效果。

1.2 实验方法

1.2.1 城市生活污水预处理与回收标准设计

考虑到城市生活污水中存在大块固体废弃物，采用栅格拦截的方法进行预处理，如图 1 所示。

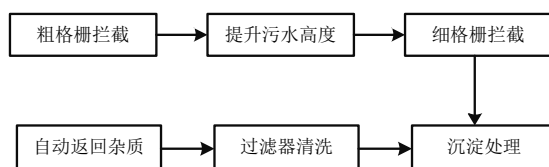


图1 城市生活污水预处理

按照如图 1 所示的流程完成预处理后，实现城市生活污水的泥沙分离，并清洗杂质，作为待处理的城市生活污水样品。污水处理作业现场为半开放的污水处理池，池内水体呈黑色；池内及池边分布着蓝色与白色的管道，池边可见木质 / 混凝土材质的支撑结构，部分棕色物体附着于池体边缘，整体呈现管道系统介入水体处理、现场设施实际运行的典型状态，体现了污水处理过程中设施的布局与作业场景。污水预处理现场如图 2 所示。



图2 污水预处理现场

在水质监测点位的设置上，除氨氮和总磷仅采集总进水和二沉池出水两个点位外，其余指标均涵盖总进水、初沉池进水、初沉池出水和二沉池出水四个点位^[6]。试验设计时将进水点设在初沉池末端，设计进水水质主要指标为中国循环经济协会标准，出水排放标准为：悬浮固体（SS）≤ 30 mg/L，pH 值控制在 6~9 之间，BOD₅ ≤ 30 mg/L，COD ≤ 60 mg/L。

1.2.2 固化微生物菌种来源与富集培养

本实验所用的原始菌源取自某城市污水处理厂，该污水处理厂主要处理城市生活污水的二沉池回流污泥，在 4℃条件下，密封冷藏运输至实验室。

经孔径 0.45 μm 水系滤膜初步过滤去除大颗粒杂质，静沉 30 min 后弃去上清液，浓缩污泥用于后续功能菌富集。500 mL 锥形瓶中进行硝化菌富集，以硝酸钾（KNO₃）为氮源，添加蛋白胨 0.1 g/L、牛肉膏 0.05 g/L 作为生长因子，并补充微量 NaHCO₃ 维持 pH^[7]。在 7.5 初始 pH 值

下, 进行固化微生物的富集培养。

设计培养基配方, 如表 3 所示。

表3 固化微生物富集培养配方

材料	配方
KNO ₃	0.22 g/L
蛋白胨	0.2 g/L
牛肉膏	0.1 g/L
乙酸钠	0.3 g/L
硝酸钾	0.2 g/L
聚乙烯醇	0.1 g/L
海藻酸钠	0.02 g/L
氯化钙	0.05 g/L

在锥形瓶瓶口加硅胶塞并插入氮气管, 通氮气 2 min 排除氧气, 维持缺氧状态。接种浓缩污泥 15 mL 后, 将锥形瓶置于恒温摇床, 转速 100 rpm, 温度 30 ± 0.5℃, 不曝气。每 2 天取样测定硝酸盐浓度。当硝酸盐去除率大于 95% 时补加 KNO₃。

通过手动切换厌氧 / 好氧条件进行交替培养。在厌氧阶段, 利用氮气吹扫, 恒温摇床转速 80 rpm, 避光, 维持 1.5 h。在好氧阶段, 去除瓶盖, 提高摇床转速至 180 rpm, 利用摇床曝气, 维持 2.5 h。每周期末换水 50%。

富集结束后, 分别收集各菌液进行浓缩。采用高速冷冻离心机离心, 弃上清, 收集菌泥。用无菌生理盐水洗涤两次后, 将菌泥重悬于少量生理盐水中, 并转移至透析袋中, 置于 4℃ 生理盐水中透析浓缩过夜, 进一步提高菌液浓度。最终使用无菌注射器分装保存, 24 h 内用于固化。

1.2.3 固化微生物技术的应用

将富集并浓缩后的硝化菌、反硝化菌和聚磷菌菌液按比例混合, 混合比例为 5:3:2。混合后的菌液置于 4℃ 冰箱中暂存, 并在 2 小时内用于包埋液配制, 以保持菌体活性。

采用聚乙烯醇和海藻酸钠作为复合载体基质, 依次加入 1 L 去离子水中, 使用恒温磁力搅拌器加热至 90℃ 并持续搅拌, 直至所有固体完全溶解形成透明粘稠溶液。待温度自然冷却至 30℃ 后, 取富集混合液 400 mL, 按照菌泥比 1:2 加入包埋液中, 同时用玻璃棒沿同一方向轻轻搅拌, 避免产生气泡, 直至形成均匀的乳白色包埋悬浊液, 制备出粒径 3~4 mm、孔隙率可控的微生物颗粒^[6]。整个过程在室温 (25℃) 下操作, 时间控制在 15 分钟内, 以防温度升高损伤微生物。为增强颗粒的机械强度和长期运行稳定性, 采用硫酸钠溶液进行后处理, 去除颗粒表面残留的硼酸和氯化钙, 得到活化完成的固化颗粒。

在此基础上, 利用收集的城市生活污水构建沉淀池, 进行固化微生物技术的应用测试。

2 城市生活污水处理结果分析与讨论

2.1 城市生活污水处理效果微观分析

在应用固化微生物技术的情况下, 采用扫描电子显微镜观察城市生活污水处理后所得到固化颗粒的微观形貌, 结果如图 3 所示。

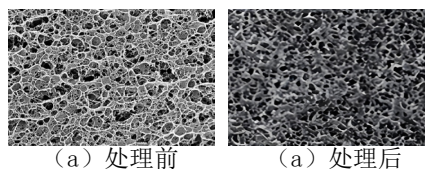


图3 处理后的污水微观图像

如图 3 所示, 颗粒表面可见不规则褶皱和大量微孔, 这些孔隙为基质传递和微生物附着提供了通道。固化颗粒断面显示内部为三维网络状结构, 聚乙烯醇 (PVA) 和海藻酸钠 (SA) 固化载体骨架相互交联, 孔径在 10~100 μm 之间, 孔隙率约为 62%。

对比处理前后的微观形貌图像可以看出固化颗粒的孔隙大幅度减小, 说明污水中的污染物成功附着在了固化颗粒上, 在颗粒表面形成密度较高的微菌落。结合 EDS 能谱分析结果可知, 固化颗粒内部钙元素分布均匀, 表明交联稳定, 且磷元素主要在表层和中层富集, 与聚磷菌的分布一致。

2.2 有机物去除效果

利用固化微生物技术对城市生活污水样品进行为期 55 天的去除处理, 并检测各个时间段的去污效果。其中, 固化微生物技术的有机物去除结果如图 4 所示。

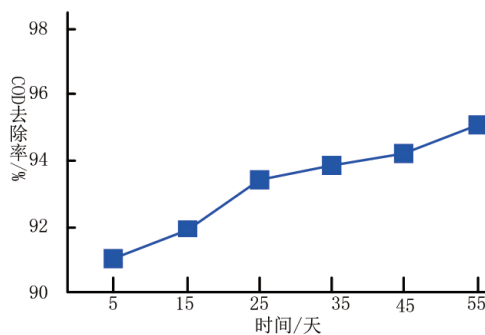


图4 COD去除率随时间变化曲线

如图 4 所示, 在 55 天连续运行期间内, 在启动后第 5 天 COD 去除率即达到 90% 以上, 第 15 天后稳定在 92%+2%, 55 天运行期间平均去除率为 91.2%。这一结果说明, 聚乙烯醇 (PVA) 和海藻酸钠 (SA) 固化载体为微生物提供了物理保护, 颗粒内部的好氧 / 缺氧微区形成了温度缓冲效应, 对于城市生活污水中的有机污染物有着良好的去除率。

2.3 除磷性能

固化微生物技术的磷化物去除结果如图5所示。

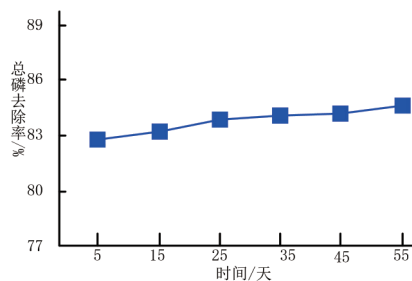


图5 总磷去除率随时间变化曲线

如图5所示,在本次测试中,固化微生物技术对于城市生活污水中磷化物的处理基本呈现为稳定的去除效果变化趋势,实验组总磷平均去除率为83.6%,整体去除率较高。分析可知,这一除磷效果主要归功于固化颗粒中富集的聚磷菌,由于流化床反应器通过间歇曝气,实现了厌氧/好氧的周期性切换,使得每个周期内PAOs在厌氧阶段释放磷并储存内碳源,在厌氧/好氧交替环境下的高效吸磷。

3 结语

本研究面向城市环境保护工作的现实需求,进行了固化微生物技术在城市生活污水处理中的应用研究分析。采用聚乙烯醇和海藻酸钠作为复合载体,通过包埋法制备的固化微生物颗粒,在城市生活污水处理中连续运行55天后,对COD的平均去除率达91.2%,对总磷的平均去除率达83.6%。该技术不仅显著提升了有机物的去除效率和除磷性能,而且运行稳定、抗冲击负荷能力强,同时减少了剩余污泥产量,降低了后续处置成本。因此,固化微生物技术为城市污水处理厂的提标改造以及分散式生活污水处理

理提供了一种高效、稳定且经济可行的技术方案。

参考文献:

- [1] 柳嘉豪,林文彬,卓祖磊等.微生物诱导碳酸钙沉淀技术固化海相淤泥试验[J].福建理工大学学报,2025,23(01):33-39.
- [2] 彭成,李超,欧阳以.正丁基硫代磷酰三胺对微生物固化砂土力学特性影响研究[J].南华大学学报(自然科学版),2024,38(05):68-77.
- [3] 顾天奇,许欣,王哲等.不同钙源对微生物诱导碳酸盐沉淀固化氟化物尾渣效果的研究[J].有色金属(中英文),2025,15(12):2327-2336.
- [4] 谷庆,狄军贞.复合营养液在微生物诱导固化与修复含硫铅锌尾矿中的应用研究[J].硅酸盐通报,2025,44(05):1742-1754.
- [5] 刘超凡,杜强,曲立强等.基于显微镜观测的不同钙源下微生物固化砂强度提升机理的宏观研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2025,46(02):63-71.
- [6] 雷光会,王瑞,王少丹等.尿素预水解策略对微生物-活性氧化镁联合固化软黏土的影响[J].应用基础与工程科学学报,2024,32(05):1349-1359.
- [7] 黄春福,邢星.聚偏氟乙烯膜在城市生活污水处理中的应用研究[J].化工生产与技术,2023,29(06):26-29+41+9.
- [8] 赖国旺,储昭瑞,赫俊国.不同孔径膜格栅对城市污水中污染物的截留效能及截留物发酵性能分析[J].净水技术,2023,42(06):97-102+111.

作者简介:孙后杰(1984.01-),男,汉族,安徽萧县人,本科,中级工程师,研究方向:环境保护工程。