

桑林林, 杨佳丽, 林力涵, 等. 低碳氮比下磁粉介导微生物强化活性污泥脱氮效能[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 92-100.

Sang L L, Yang J L, Lin L H, et al. Magnetic powder-mediated microbial enhancement of denitrification performance in activated sludge under low C/N conditions[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 92-100.

低碳氮比下磁粉介导微生物强化活性污泥脱氮效能

桑林林¹, 杨佳丽¹, 林力涵², 曾超², 张天阳², 邢美燕^{2,*}, 徐斌²

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 【目的】 本文旨在探讨低碳氮比($C/N \approx 4$)条件下, 磁粉投加对活性污泥反硝化作用的强化效果, 以解决传统反硝化工艺在碳源不足情况下脱氮效率低的问题, 并揭示磁粉介导微生物代谢过程中反硝化作用的强化机制。【方法】 本文采用熟化预处理优化磁粉性能, 以增强其比表面积利用率和与微生物的结合能力。采用批式试验, 比较磁粉投加对活性污泥硝酸盐去除效能的提升作用, 并通过三维荧光光谱分析和微生物群落结构特征解析, 揭示磁粉强化污泥反硝化性能的作用机制。【结果】 磁粉的投加显著提升了活性污泥反硝化性能; 硝酸盐平均去除率为 79.1%, 是对照组的 3.44 倍; COD 去除率为 95.2%。此外, 三维荧光光谱中溶解性微生物代谢产物(Ⅳ区)的荧光区域积分占比从 63.2% 提升至 67.8%, 表明磁粉促进了微生物代谢活性的提高; 类腐植酸(Ⅴ区)荧光区域积分减弱, 说明磁粉促进了难降解有机物向易降解有机物的转化。同时, 磁粉对污泥微生物群落产生了明显的驯化效应, 放线菌门和硝化螺旋菌门的相对丰度分别提升至 3.2% 和 4.5%, 增强了反硝化相关酶系的丰度。【结论】 合理投加磁粉可有效强化活性污泥的反硝化能力, 显著提升硝酸盐去除效率, 为低 C/N 条件下污水处理工艺的优化提供了新的思路和实践依据。

关键词 低碳氮比; 磁粉; 活性污泥; 反硝化性能; 微生物群落

中图分类号: TU992; X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)09-0092-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.010

Magnetic Powder-Mediated Microbial Enhancement of Denitrification Performance in Activated Sludge under Low C/N Conditions

Sang Linlin¹, Yang Jiali¹, Lin Lihan², Zeng Chao², Zhang Tianyang², Xing Meiyang^{2,*}, Xu Bin²

(1. CCCC Shanghai Dredging Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] This paper aims to investigate the efficiency of magnetite powder on enhancing the denitrification process of activated carbon under low carbon-to-nitrogen ratio ($C/N \approx 4$), addressing the challenge of insufficient carbon sources in traditional denitrification processes. Furthermore, this paper also elucidates the mechanisms leading to the enhancement of magnetite powder-mediated denitrification. [Methods] Magnetic powder performance was optimised by maturation pretreatment to enhance its specific surface area utilization and binding ability with microorganisms in this paper. The batch test was used to compare the effect of magnetic powder on the nitrate removal efficiency of activated sludge, and the three-dimensional fluorescence spectroscopy and microbial community structure analysis were used to reveal the mechanism of magnetic powder in enhancing the denitrification performance of sludge. [Results] Addition of magnetic powder significantly enhanced the denitrification performance of activated sludge; the average removal rate of nitrate reached 79.1%, which was 3.44 times higher than that of the control group; the COD removal rate reached 95.2%. In addition, the fluorescence region of dissolved microbial metabolites (Ⅳ region) in the three-dimensional fluorescence spectra increased from 63.2% to 67.8%, indicating that the magnetic powder promoted the microbial metabolic activity; humic acid (Ⅴ region) fluorescence region of the integral weakened, indicating that the magnetic powder promoted the conversion of difficult to

[收稿日期] 2025-04-20

[基金项目] 校企合作合作项目(2023-518J)

[作者简介] 桑林林(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事水处理等工作, E-mail: sanglinlin@ccccltd.cn。

[通信作者] 邢美燕(1977—), 女, 副教授, 研究方向为污水/污泥处理理论与技术, E-mail: xingmeiyang@tongji.edu.cn。

degrade organic matter to easy to degrade organic matter. At the same time, the magnetic powder had an obvious domestication effect on the sludge microbial community, the relative abundance of Actinobacteria and Nitrospiraea were increased to 3.2% and 4.5%, respectively, and the abundance of denitrification-related enzymes was enhanced. [**Conclusion**] Appropriate addition of magnetite powder can effectively enhance the denitrification capacity of activated sludge under low C/N conditions, providing new insights and practical guidance for the optimization of nitrogen removal in wastewater treatment processes.

Keywords low C/N ratio; magnetite powder; activated sludge; denitrification performance; microflora

氮污染是全球水体退化的主要原因之一,特别是在农业、工业和城市废水排放量大的地区,水体中过量的氮负荷会导致富营养化现象的发生^[1]。这种现象不仅破坏了水生态系统的平衡,还可能引发藻类大量繁殖,导致水体溶解氧耗尽,进一步威胁水生生物的生存^[2]。氮污染的控制已成为全球水环境保护的核心任务之一,而废水中的脱氮处理则是实现这一目标的关键环节^[3]。传统上,污水处理厂(WWTP)采用活性污泥法进行生物脱氮,以其成本低、效率高的特点成为污水处理中最常用的技术^[4]。然而,在实际运行中,传统生物脱氮工艺常受到碳源不足的限制,尤其是在低碳氮比(C/N)条件下,反硝化过程效率显著降低,这直接影响了废水处理设施的整体脱氮效果^[5-6]。

反硝化作用是生物脱氮过程中的关键步骤,其通过反硝化菌将硝酸盐(NO_3^- -N)和亚硝酸盐(NO_2^- -N)还原为氮气(N_2),从而实现氮的去除。然而,反硝化过程对碳源依赖性较强,碳源不足会导致反硝化菌活性下降,进而降低脱氮效率^[7]。在传统污水处理工艺中,通常通过外加碳源(如乙酸钠、葡萄糖等)来补充C/N,但这种方式会显著增加运行成本,并可能引发二次污染问题。因此,开发一种高效、经济、环境友好的反硝化强化技术,尤其适用于低C/N条件下的应用,已成为当前研究的热点。

近年来,磁分离技术在水处理领域的应用逐渐受到关注。磁粉(Fe_3O_4)是一种低成本、可回收的材料,具有优异的物理化学性质,包括高比表面积、良好的吸附能力以及与微生物的协同作用潜力^[8]。磁粉的投加最初用于提升悬浮物的分离效率,主要应用于应对污水处理系统中的高冲击负荷问题^[9]。随着研究的深入,磁粉在污染物去除中的作用逐渐被挖掘,特别是在有机物降解和氮磷去除方面显示出显著的优势。已有研究^[10]表明,磁粉能够通过吸附作用减少水体中污染物的浓度,同时还可以作为电子供体或载体,促进微生物的代谢活性。此外,磁

粉的高比表面积有助于提高其与微生物的结合能力,从而增强微生物群落的活性和稳定性^[11]。在反硝化过程中,磁粉的作用机制主要体现在以下几个方面:首先,磁粉可通过吸附作用集中溶解性有机物和反硝化菌,从而提高反应效率;其次,磁粉的表面特性能够为微生物提供附着生长的载体,增强微生物的代谢活性;此外,磁粉在特定条件下还可以作为电子供体,通过铁还原和氧化循环($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)为反硝化菌提供额外的电子,从而促进 NO_3^- -N的还原过程^[12]。然而,尽管磁粉在水处理中的应用潜力巨大,其在低C/N条件下对活性污泥反硝化性能的影响及作用机制仍需进一步研究和探索。

本文通过磁粉预试验及其脱氮效能对比试验,旨在探讨磁粉投加对低C/N条件下活性污泥反硝化性能的强化作用。研究中采用了熟化处理技术提高磁粉的分散性和比表面积利用率,从而增强其与微生物的结合能力。试验设置了磁粉投加组和空白对照组,通过对比分析 NO_3^- -N去除效率、三维荧光光谱变化以及微生物群落的丰度和多样性,系统评估磁粉对反硝化性能的影响。本文将低C/N条件下,磁粉强化污水脱氮效能在实际工程中的应用提供科学支持,同时也为开发高效、经济的污水处理技术开辟了新的方向。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本文所采用的磁粉为磁混凝磁粉,反应器进水采用试验室人工配水,水质如表1所示。模拟废水采用自来水进行配置,并以硝酸钾为氮源、乙酸钠为碳源,化学需氧量(COD)/总氮(TN)(C/N)约为4(其中: NO_3^- -N质量浓度为50 mg/L;COD质量浓度为200 mg/L),1 L水中另外添加2 mL微量元素溶液(组分如表2所示),并将pH值调节至7.0左右。

1.2 试验设计

1.2.1 磁粉预处理试验

本文采用熟化技术进行磁粉预处理,提高磁粉

表 1 试验配水水质

Tab. 1 Distribution Water Quality in the Test

水质参数名称	设计质量浓度/(mg·L ⁻¹)	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
COD	200	205.5±0.3
TN	50	46.1±0.3
总磷(TP)	6	5.9±0.2
NO ₃ ⁻ -N	50	46.1±0.3

表 2 微量元素组分

Tab. 2 Trace Element Components

微量元素名称	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
ZnSO ₄	4.0
MnCl ₂ ·6H ₂ O	10.5
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	2.5
CuSO ₄ ·5H ₂ O	3.2
CoCl ₆ ·H ₂ O	3.5
乙二胺四乙酸(EDTA)	50.0

的分散性和反应效率。处理步骤:模拟磁粉在污水处理过程中的场景,将磁粉与水溶液混合,并进行 30 min 的机械搅拌。预处理设立 3 组对照试验:(1)未处理组别是指未经任何处理直接使用的试验用磁粉;(2)水溶液混合组别是指磁粉与纯水充分混合后,再将磁粉作用试验用磁粉;(3)熟化处理组是指将磁粉经水溶液混合,并进行 30 min 的机械搅拌处理后做试验用磁粉。

1.2.2 磁粉强化脱氮试验

本文采用平行的圆柱形玻璃反应器进行批量试验,每个反应器的工作体积为 0.5 L。共设置 2 组试验,其中:A 组,磁粉按照混合液悬浮固体浓度(MLSS):Fe₃O₄=1:1 的质量比进行投加;B 组,不投加磁粉的对照组。活性污泥取自上海市某污水处理厂,每个反应器中 MLSS 的质量浓度为 4 000 mg/L 左右,各反应器均置于恒温摇床中,温度设置为 25 ℃,转速设置为 180 r/min,连续运行。

1.3 样品采集与分析

试验中,每天从反应器中取样,每次取 3 个平行样,水样经 0.45 μm 滤膜过滤后进行下一步的检测分析。检测指标包括 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、氨氮、COD、混合液挥发性悬浮物(MLVSS)、污泥体积指数(SVI)、污泥沉降比(SV₃₀)等,测试方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。采用三维激发-发射矩阵

(EEM)及荧光区域积分(FRI)对可溶性微生物产物进行分析,本文中设定激发波长(E_x)为 200~450 nm,发射波长(E_m)为 250~600 nm,步长根据需求可设为 5 nm。最后,启动仪器进行扫描,记录不同激发和发射波长组合下的荧光强度值,扫描后的荧光光谱图利用 MATLAB 扣除瑞利散射和拉曼散射并进行拉曼归一化处理,使用 Origin 对图形进行处理分析,FRI 方法按照有机物的类型将三维荧光区域分为 5 个区域(表 3)。以上水质指标用以分析磁粉对活性污泥污染物去除效能的影响规律。当去除效果稳定后,对反应后的磁活性污泥进行沉降性能分析及污泥表征分析。污泥沉降速度通过记录污泥颗粒在 100 mL 量筒中下降一定高度液面所需的时间获取。采用激光粒度仪测定污泥的粒径分布。利用扫描电子显微镜观察磁粉的表面形貌特征,并使用 ImageJ 软件对扫描电子显微镜(SEM)图像进行分析,计算磁粉的平均粒径。

表 3 FRI 区域划分

Tab. 3 FRI Regional Divisions

区域	E_x /nm	E_m /nm	代表性荧光物质类型
I	220~250	280~330	类芳香族蛋白质荧光 I
II	220~250	330~380	类芳香族蛋白质荧光 II
III	220~250	380~480	类富里酸物质荧光
IV	250~280	290~380	类溶解性微生物代谢产物荧光
V	250~280	380~480	类腐植酸物质荧光

1.4 微生物群落分析

在反应器运行结束后,收集所有试验组的污泥样本,采用上海美吉生物医药科技有限公司对所有生物膜样品进行脱氧核糖核酸(DNA)提取、测序以及分析。测序分析结果在 Illumina 平台上进行微生物群落结构和功能基因预测和统计分析。

2 结果与讨论

2.1 试验用磁粉物化性状优化

本文首先对原始磁粉的比表面积、粒径、接触角等物理性质进行了考察。SEM 的结果显示所用的磁混凝磁粉具有不规则块状的形态(图 1)。磁粉的平均粒径为 22.2 μm,平均比表面积为 5.0 m²/g,较大的比表面积对提高污泥吸附能力和促进表面反应较为有利,磁粉的接触角为 48.2°,这一数据表明,初始的磁粉具备良好的亲水性能,有利于水分子在其表面的润湿及微生物的有效附着与生长,

并能促进生物膜的形成。此外,磁粉展现出超顺磁性特征(表 4),这对外加磁场下的快速响应和分离至关重要。优异的磁性能可以确保磁粉在实际应用中被高效控制和回收,具有在活性污泥工艺中应用的潜力。

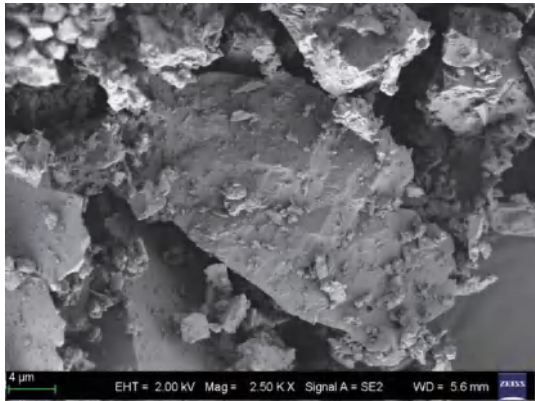


图 1 磁粉 SEM 图

Fig. 1 SEM Image of Magnetic Powder

表 4 磁粉基本信息及物理参数

Tab. 4 Basic Information and Physical Parameters of Magnetic Powder

参数名称	数值
平均粒径/ μm^*	22.2
比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	5.0
接触角	48.2°
饱和磁强度/ $(\text{emu} \cdot \text{g}^{-1})$	65.9

注:“*”表示平均粒径计算方法,在 SEM 图片中选取不同颗粒并对测算的粒径取平均值。

为了更好地优化磁粉的工艺性能,在试验前对磁粉进行熟化预处理。熟化处理通常指对磁粉表面进行修饰和改性,优化磁粉表面的电荷分布、亲水性

等,降低表面能,减少颗粒间的相互吸引力,防止磁粉发生团聚现象,提高磁粉的分散性和稳定性。熟化技术可以通过施加机械力,如高速搅拌或超声波处理等方式,直接作用于磁粉颗粒上。这些机械力能够产生强烈的物理作用,有效地打破磁粉颗粒间的物理结合力,如范德华力、静电力等,使得团聚的磁粉颗粒得以分散开来。在机械力的持续作用下,团聚体被逐渐破碎成更小的颗粒,从而恢复磁粉的原始粒径状态或接近原始粒径的状态。

对磁粉熟化预处理后,磁粉的粒径及磁粉附着的生物膜试验结果如图 2~图 3 所示。未经处理的磁粉样本,通过激光粒度仪检测,其粒径分布主要集中在 $38.1 \mu\text{m}$,可以看出此时测得的磁粉粒径与经扫描电镜测得的实际粒径(表 4)相比差距较大,说明磁粉存在较为严重的团聚现象。经水溶液混合后测得的磁粉粒径为 $22.1 \mu\text{m}$ 。而在经历了机械熟化处理后,磁粉的粒径进一步降低至 $16.96 \mu\text{m}$ 。与处理前相比,磁粉的平均粒径分别下降了 42.0% 和

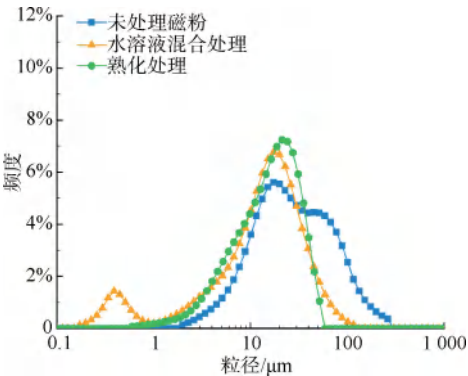


图 2 不同处理方式下磁粉粒径对比

Fig. 2 Comparison of Magnetic Powder Particle Sizes under Different Treatment Methods

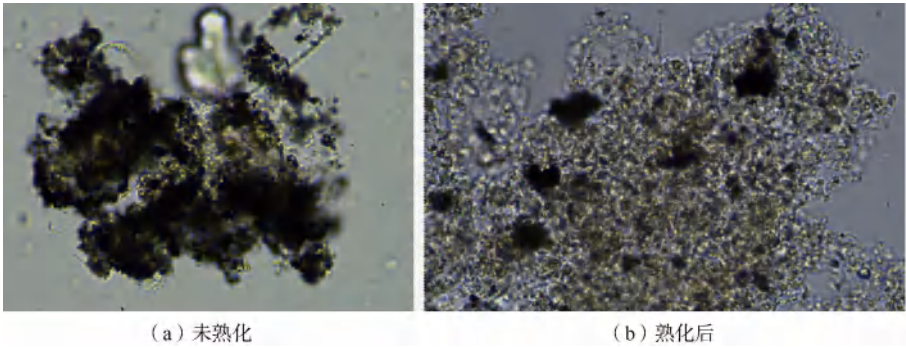


图 3 磁活性污泥镜检对比

Fig. 3 Microscopic Examination Comparison of Magnetic Activated Sludge

55.5%。这一显著变化直接反映了磁粉团聚现象的明显改善,表明磁粉熟化能有效解决磁粉应用中常见的团聚问题。

熟化不仅有效减轻了磁粉的团聚现象,使得更多的磁粉颗粒能够参与与污水中污染物的接触和反应中[图 3(b)],还改善了磁粉的分散性,确保其能够更均匀地分布于整个处理体系中,从而提高了反应效率和污染物去除能力。因此,本文后续试验过程中,在磁粉投加前,都会对其进行熟化处理,以提升污染物的去除效能。

2.2 磁活性污泥强化脱氮效能

在反应器稳定运行期间,探究了磁粉投加对反硝化过程中 NO_3^- -N 及 COD 去除性能的影响。如图 4 所

示,当反应器达到稳定运行状态后,对照组的出水 NO_3^- -N 质量浓度从进水的 46.1 mg/L 降低至 29.1 mg/L, NO_3^- -N 平均去除率为 23.0%,而试验组 A 出水中 NO_3^- -N 质量浓度降低至 5.3 mg/L, NO_3^- -N 平均去除率为 79.1%。表明添加磁粉后的 NO_3^- -N 去除率显著提升,是对照组 B 的 3.44 倍。这一结果表明,磁粉的加入对系统的反硝化性能具有显著的促进作用。在低 C/N(C/N $\approx$ 4)的条件下,由于电子供体的不足,微生物的反硝化效率通常会受到限制。然而,磁粉的加入有效地促进了微生物的聚集,有助于微生物更好地利用有限的碳源,并优化代谢过程中产生的能量和电子分配,从而实现连续生物脱氮。此外,反硝化过程中亚硝酸盐及氨氮质量浓度均低于检出限(0.01 mg/L)。

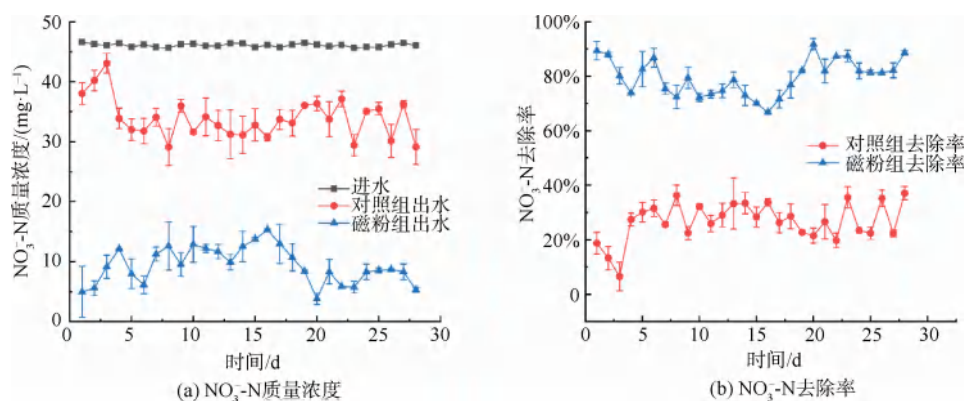


图 4 磁活性污泥强化 NO_3^- -N 去除效能对比

Fig. 4 Comparison of NO_3^- -N Removal Efficiency Enhanced by Magnetic Activated Sludge

试验组 A 对于反应器中 COD 的去除效果如图 5 所示,试验组和对照组均展现出了良好的 COD 去除性能。在试验运行的最终阶段,各反应器的出水 COD 质量浓度均被控制在了 25 mg/L 以下,达到了

江苏省《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB32/4440—2022) A 标准的排放要求。具体而言,对照组 COD 去除率为 88.0%,而试验组 A 达到了 95.2%的去除率,表明磁粉添加后的处理工艺具备较强的有

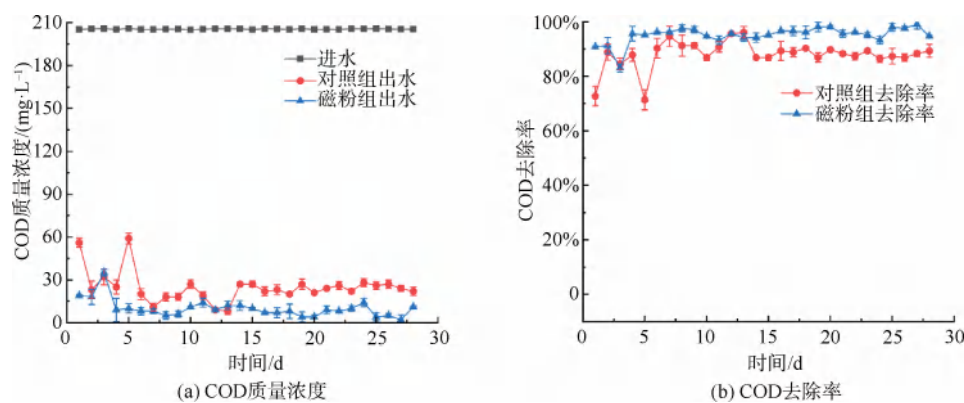


图 5 磁活性污泥 COD 去除效能对比

Fig. 5 Comparison of COD Removal Efficiency by Magnetic Activated Sludge

机物降解能力。

试验结果表明,在低 C/N 条件下异养反硝化菌仍能高效利用有限的有机碳源进行代谢,具有较强的环境适应能力与生存策略。磁粉的引入进一步增强了微生物的代谢活性,不仅促进了其与外源碳源的有效接触,还提升了其对内源碳源(如细胞内储存有机物)的利用能力。这种“外源+内源”的双重协同作用机制,有效提升了 COD 和 NO_3^- -N 的去除效能。

2.3 磁活性污泥沉降性能提升

磁粉具有较大的比表面积和表面活性,能作为絮凝核心,促进活性污泥中微生物、胶体物质和悬浮颗粒等相互聚集,形成更大、更密实的絮体。这些絮体结构更加紧凑,密度增加,从而加快了沉降速度,能显著提高活性污泥的沉降性能。因此,在强化活性污泥反硝化性能的同时,试验还测定了磁活性污泥的沉降性能 SV_{30} 和 SVI,如图 6 所示。SVI 常用于表征污泥沉降性能,SVI 值越低,则意味着污泥的沉降性能越好。磁粉的投加显著提升了对活性污泥沉降和浓缩性能。试验组 A (20%, 28.4 mg/L) 的

SV_{30} 及 SVI 值相较于对照组 B (31%, 84.7 mg/L) 实现了显著下降。SVI 值的降低,反映了污泥沉降能力的增强,即污泥在更短的时间内能够达到更紧密的堆积状态,这对于提高污泥处理效率、减少沉淀池占地面积及延长运行周期至关重要。

通过对自由沉降阶段污泥行为的线性拟合分析,可以得出试验组 A 的污泥平均沉降速度相较于对照组,实现了显著提升,达到了对照组的 3.64 倍。这一结果不仅强有力地证明了磁粉载体对污泥沉降性能的积极促进作用,还揭示了其背后的物理机制:磁粉载体作为增重剂,通过增加污泥絮体的有效密度,显著提升了污泥颗粒在重力作用下的沉降速度。这种沉降速度的加快,直接缩短了污泥处理过程中的沉降时间,从而提高了整体处理效率。

如图 6(c) 所示,加入磁粉后活性污泥中位粒径 d_{50} 从 78.5 μm 增加至 90.5 μm ,进一步证实了磁粉载体对污泥结构的影响。磁粉凭借其独特的磁性,能够被污泥微生物迅速捕获并紧密结合,从而促进了污泥颗粒间的相互聚集和粒径的增大。这种粒径的增大不仅有助于形成更稳定、更紧凑的污泥结构,

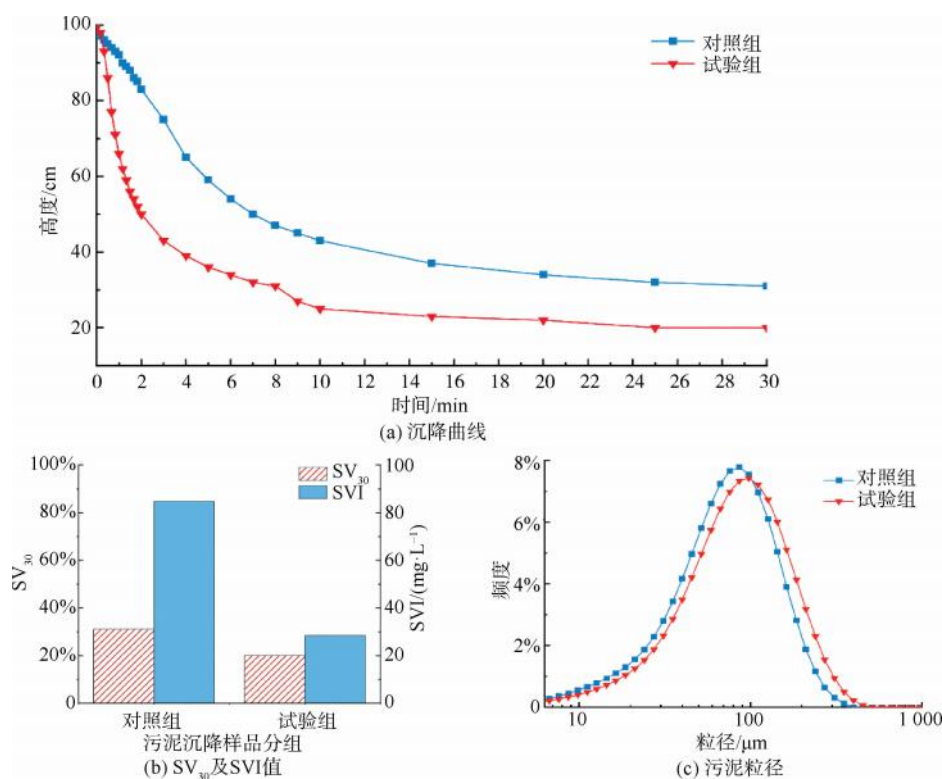


图 6 不同磁活性污泥沉降性能对比

Fig. 6 Comparison of Sedimentation Performance of Different Magnetic Activated Sludge

还显著改善了污泥的脱水性能和后续的固液分离效率。同时,较大的污泥粒径意味着比表面积减少,从而减少了与水分子结合的位点,促进了水分的快速释放,进而有利于污泥饼的高效干化。

2.4 磁粉介导微生物脱氮机制

在磁粉-微生物共存的活性污泥系统中,磁粉特殊的物理结构具有一定的导电性,能在微生物细胞与电子受体或电子供体之间形成额外的电子传导通道,可以将微生物代谢产生的电子更快速地传递给污水中的溶解氧等电子受体,加快氧化还原反应的进行,从而提高污染物的降解效率。因此,试验对

各组反应器的出水进行 EEM 分析以探讨磁粉对微生物代谢活动的影响归趋。如图 7 所示,在 IV 区 (E_x/E_m : 250~280 nm/200~380 nm) 有一个显著的荧光峰 A 浮现,该区域通常与可溶性微生物代谢副产物相关联,这些副产物是微生物活动的直接产物,对于评估生物处理过程的效能具有指示性意义。在磁粉加入后,峰 A 的强度显著增强,这一现象通过 FRI 分析得到了进一步证实。试验组 A 的 IV 区域积分占比从对照组的 63.17% 提升至 67.81%,表明高磁性磁粉的引入对微生物活性具有正向激发作用,促进了微生物代谢产物的生成与释放。

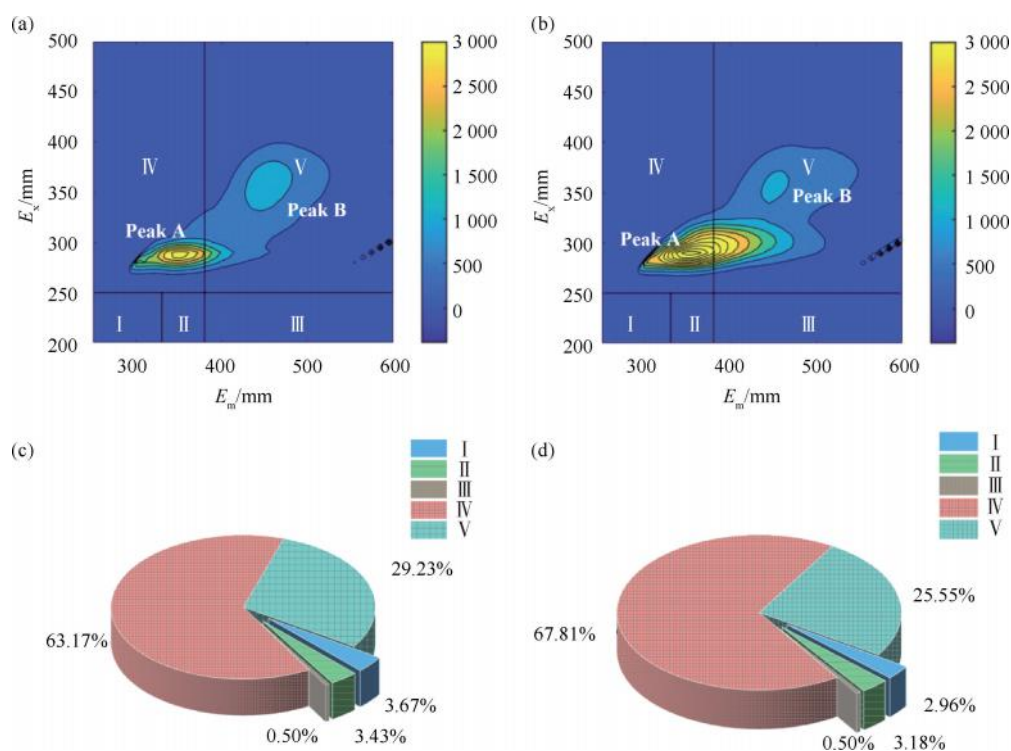


图 7 出水三维荧光光谱图

Fig. 7 3D Fluorescence Spectroscopy of Effluent

III 区 (E_x/E_m : 220~250 nm/330~450 nm) 与 V 区 (E_x/E_m : 250~400 nm/380~550 nm) 的荧光信号则分别对应黄腐酸和腐植酸类物质,这两类物质因其复杂的分子结构和高度稳定的化学性质,通常被视为难降解有机污染物的主要组成部分,对水处理工艺构成挑战。空白组中 V 区腐殖质相关的荧光峰较高,可能是由于自来水中天然存在的溶解有机物 (DOM)。这些物质在三维荧光光谱中表现出类似腐殖质的荧光特征,尽管自来水经过处理,但仍可能残留一定量的有机物。然而,经磁粉处理后,与难降

解有机物相关的峰 B 强度呈现减弱趋势,表明这些顽固组分的比例有所下降。这一变化可能归因于磁粉的催化作用,促进了难降解有机物向小分子、易降解有机物的转化^[13],这一发现与上述磁活性污泥强化处理效能的试验结果相互印证,共同揭示了磁粉在促进有机物降解、优化出水水质方面的积极作用。

磁粉的添加改变了系统的物理化学环境,对微生物群落产生筛选作用,也在一定程度上丰富了微生物群落的多样性,通过影响微生物的电子传递,调节其代谢途径,使电子更合理地分配到不同的代谢

过程中,从而提高对污染物的去除能力。为了深入探究磁粉添加对微生物群落结构的调控作用,本文全面剖析了各组微生物群落的构成及其差异性。在采集的样本中,共识别出 10 个主要的微生物门类(图 8),这些门类共同奠定了微生物群落的多样性基础,且它们的相对丰度在不同组中均保持在 84.21%~87.45% 的高水平。在未添加磁粉的对照组中,微生物群落以变形菌门、拟杆菌门、浮霉菌门和黏细菌门为主导。而磁粉的投加则改变了微生物的群落结构;随着反应器的持续稳定运行,假单胞菌门(41.2%)的相对丰度在试验组 A 中提升至 50.3%,这可能是由于磁粉为假单胞菌门微生物的生长提供了更为有利的环境。相较于对照组(14.9%),拟杆菌门的相对丰度在试验组 A 中下降了 45.6%。磁粉的投加使黏细菌门失去了其优势地位,其在试验组 A 中的相对丰度甚至低于 1%。相反,放线菌门和硝化螺旋菌在试验组 A 分别提升到 3.2% 和 4.5%。放线菌门在自然界中常作为分解者存在,而硝化螺旋菌门则富含趋磁细菌属,这些细菌含有与反硝化作用相关的酶系,其丰度的增加有助于提升反硝化速率和效率^[14-16]。由此可见,磁粉的添加不仅显著改变了微生物群落的结构,促进了生物多样性的提升,还富集了对 NO_3^- -N 及有机物具有高效去除能力的微生物。

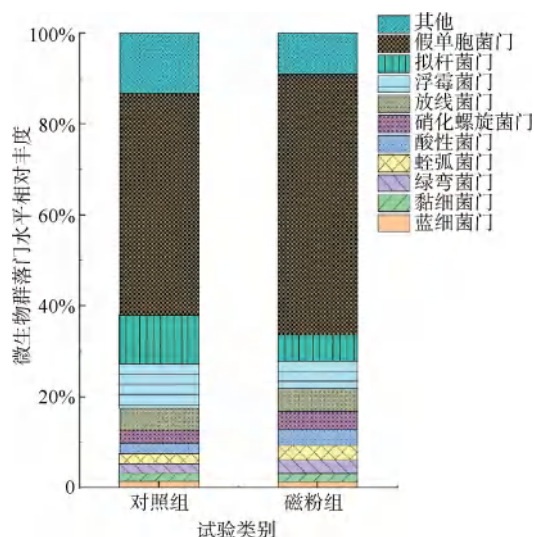


图 8 磁粉投加对微生物群落的影响

Fig. 8 Impact of Magnetic Powder Dosing on Microflora

3 结论

(1)高磁性的磁粉能够促进活性污泥形成致密

的絮体结构。通过熟化处理,提高了磁粉的分散性,磁粉的平均粒径实现了 55.5% 的下降,有效避免了磁粉的团聚现象,并提升了比表面积利用率,增强了与微生物的结合。

(2)磁粉的投加对活性污泥反硝化作用有明显的强化效果,试验组 A 的 NO_3^- -N 去除率达到未投加磁粉对照组的 3 倍,达到 79.1%。

(3)三维荧光光谱分析中峰 A 的强度显著增强,表明微生物的代谢活性增强,IV 区 FRI 从对照组的 63.2% 提升至 67.8%,表明磁粉的引入对微生物或许有正向激发作用。峰 B 强度的减弱也表明了磁粉能促进难降解有机物向小分子、易降解有机物的转化。

(4)磁粉的投加对污泥中的微生物群落产生定向驯化效应,筛选了利于增强反硝化作用的菌属,优化了微生物群落结构,放线菌门和硝化螺旋菌门的丰度得到提升,这些细菌含有与反硝化作用相关的酶系,其丰度的增加有助于提升反硝化速率和效率。

参考文献

- [1] Yu C Q, Huang X, Chen H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. Nature, 2019, 567(7749): 516–520.
- [2] Liu X C, Beusen A H W, van Grinsven H J M, et al. Impact of groundwater nitrogen legacy on water quality [J]. Nature Sustainability, 2024, 7(7): 891–900.
- [3] Zhou Y F, Zhu Y Y, Zhu J Y, et al. A comprehensive review on wastewater nitrogen removal and its recovery processes [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(4): 3429. DOI: 10.3390/ijerph20043429.
- [4] Ugwuanyi E D, Nwokediegwu Z Q S, Dada M A, et al. Review of emerging technologies for nutrient removal in wastewater treatment [J]. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2024, 21(2): 1737–1749.
- [5] Ma B, Zhang H H, Huang T L, et al. Aerobic denitrification enhanced by immobilized slow-released iron/activated carbon aquagel treatment of low C/N micropolluted water: Denitrification performance, denitrifying bacterial community co-occurrence, and implications [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(13): 5252–5263.
- [6] Xu L, Su J F, Ali A, et al. Magnetite-loaded rice husk biochar promoted the denitrification performance of *Aquabacterium* sp. XL4 under low carbon to nitrogen ratio: Optimization and mechanism [J]. Bioresource Technology, 2022, 348: 126802. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.126802.
- [7] Fu X R, Hou R 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153061.
- [8] 姚佳伟, 杨庆峰, 刘阳桥. 磁加载活性污泥法的应用进展与优化[J]. *环境工程*, 2023, 41(增刊2): 244–249.
- Yao J W, Yang Q F, Liu Y Q. Application progress and optimization of magnetically loaded activated sludge process[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(S2): 244–249.
- [9] Hu Z H, Wu K, Wang Z H, et al. Research progress of magnetic flocculation in water treatment [J]. *Magnetochemistry*, 2024, 10(8): 56. DOI: 10.3390/magnetochemistry10080056.
- [10] Zhang F Y, Chen Y, Zhao F, et al. Use of magnetic powder to effectively improve the denitrification employing the activated sludge fermentation liquid as carbon source [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 348: 119049. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119049.
- [11] Tee G T, Gok X Y, Yong W F. Adsorption of pollutants in wastewater via biosorbents, nanoparticles and magnetic biosorbents: A review[J]. *Environmental Research*, 2022, 212: 113248. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113248.
- [12] Shi T J, Sun D Z, Dang Y, et al. Enhancement of electron transfer via magnetite in nitrite-dependent anaerobic methane oxidation system [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 357: 120843. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120843.
- [13] Tian K, Shi F Y, Cao M H, et al. A review of persulfate activation by magnetic catalysts to degrade organic contaminants: Mechanisms and applications [J]. *Catalysts*, 2022, 12(9): 1058. DOI: 10.3390/catal12091058.
- [14] Wright C L, Lehtovirta-Morley L E. Nitrification and beyond: metabolic versatility of ammonia oxidising archaea [J]. *The ISME Journal*, 2023, 17(9): 1358–1368.
- [15] Daims H, Lebedeva E V, Pjevac P, et al. Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria [J]. *Nature*, 2015, 528(7583): 504–509.
- [16] Ji R J, Wan J, Liu J, et al. Linking morphology, genome, and metabolic activity of uncultured magnetotactic Nitrospirota at the single-cell level [J]. *Microbiome*, 2024, 12: 158. DOI: 10.1186/s40168-024-01837-6.

(上接第 91 页)

- [19] 吕雪儿, 李玥, 唐睿, 等. 游离亚硝酸主导的短程硝化调控策略研究进展[J]. *环境工程*, 2025, 43(12): 38–47.
- Lü X E, Li Y, Tang R, et al. Research advancements in free nitrous acid-mediated strategies for partial nitrification regulation [J]. *Environmental Engineering*, 2025, 43(12): 38–47.
- [20] 曾天续, 张永显, 严渊, 等. 羟胺对硝化菌活性及其动力学参数的影响[J]. *化工进展*, 2023, 42(6): 3272–3280.
- Zeng T X, Zhang Y X, Yan Y, et al. Effect of hydroxylamine on the activity and kinetic parameters of nitrifying bacteria [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(6): 3272–3280.
- [21] Li Y C, Dong W Y, Han Q, et al. Continuous flow partial nitrification/anammox anaerobic-oxic-anoxic (PN/A-AOA) system for advanced nitrogen removal of low carbon to nitrogen ratio wastewater at different temperature: Long-term performance and mechanism [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2026, 82: 109517. DOI:10.1016/j.jwpe.2026.109517.
- [22] Kielak A M, Barreto C C, Kowalchuk G A, et al. The ecology of *Acidobacteria*: Moving beyond genes and genomes [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 744. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00744.
- [23] Chen Y X, Yang M, Li J Y, et al. Synergistic microbial consortia drive efficient degradation of high-strength urea wastewater in single-stage partial nitrification/anammox process [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(4): 117399. DOI:10.1016/j.jece.2025.117399.
- [24] 郗家福, 林莉峰, 胡聪. 游离氨对老龄填埋污泥脱水液短程硝化的影响[J]. *净水技术*, 2024, 43(10): 106–114, 124.
- Xi J F, Lin L F, Hu C. Effect of free ammonia on shortcut nitrification of dewatering liquor from aged landfill sludge [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(10): 106–114, 124.
- [25] Garcia K A, McLee P, Schuler A J. Effects of media length on biofilms and nitrification in moving bed biofilm reactors [J]. *Biofilm*, 2022, 4: 100091. DOI: 10.1016/j.biofilm.2022.100091.
- [26] Im H, Jeong S, Kim H, et al. Mainstream application of the partial denitrification-anammox process for carbon-neutral wastewater treatment: A review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 72: 107558. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107558.