

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.11.013

污泥基水热炭强化颗粒污泥运行效能及作用机制

马 涛, 闫娟枝, 王军丽

(太原学院 材料与化学工程系, 山西 太原 030032)

摘 要: 为阐明污泥基水热炭对除磷颗粒污泥的强化机制,以剩余污泥制备水热炭,构建序批式反应器,在0~2.0 g/L投加梯度下连续运行100 d,系统考察其对污泥性状、微生物群落及脱氮除磷性能的影响。结果表明,水热炭具备多孔结构(比表面积为68.5 m²/g,总孔容为0.18 cm³/g)与丰富的表面官能团(羟基、羧基等)。当水热炭投加量为1.0 g/L时强化效果最佳,污泥密实度与颗粒化程度显著提升,功能性微生物群落丰富度最高,优势菌门为Proteobacteria(42.6%)与Bacteroidetes(21.5%),聚磷菌(*Candidatus Accumulibacter*, 7.5%)与硝化菌(*Nitrospira*, 4.9%)明显富集, *ppk1* 基因丰度提高2.3倍,关键酶活性达到峰值,总磷、氨氮与COD去除率分别达到96.8%、98.5%和94.6%。而过量投加(2.0 g/L)水热炭会引发污泥颗粒中空化,导致功能菌与基因丰度下降,处理效能降低。水热炭通过微生物调控与物质转化协同机制优化污泥性能,强化颗粒化过程,该研究可为污水深度脱氮除磷与污泥资源化提供理论依据与技术途径。

关键词: 颗粒污泥; 水热炭; 脱氮除磷; 功能基因; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0089-08

Operational Efficiency and Mechanism of Granular Sludge Enhanced by Sludge-based Hydrochar

MA Tao, YAN Juanzhi, WANG Junli

(Department of Materials and Chemical Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China)

Abstract: To elucidate the enhancement mechanism of sludge-based hydrochar on phosphorus-removing granular sludge, this study prepared hydrochar from waste activated sludge and constructed sequencing batch reactors operated for 100 days with hydrochar addition gradients of 0–2.0 g/L. The effects on sludge characteristics, microbial community, and nitrogen and phosphorus removal performance were systematically investigated. Results showed that the hydrochar possessed a porous structure (specific surface area 68.5 m²/g, total pore volume 0.18 cm³/g) and abundant surface functional groups (e. g., hydroxyl and carboxyl). The optimal effect was observed at 1.0 g/L of hydrochar dosage, which significantly improved sludge compactness and granulation degree, and resulted in the highest richness of functional microbial communities. Proteobacteria (42.6%) and Bacteroidetes (21.5%) were the dominant phyla, with significant enrichment of phosphate-accumulating organisms (*Candidatus Accumulibacter*, 7.5%) and nitrifying bacteria (*Nitrospira*, 4.9%). The abundance of the *ppk1* gene increased by 2.3 times, and key enzyme activities reached their peak. In this group, the removal efficiencies of total phosphorus,

基金项目: 山西省教育厅教学改革创新项目(J20231431)

ammonia nitrogen, and COD reached 96.8%, 98.5%, and 94.6%, respectively. However, excessive addition of hydrochar (2.0 g/L) induced hollowing of granules, leading to a decline in functional microbe abundance and treatment performance. Hydrochar optimizes sludge properties and enhances granulation through a synergistic mechanism involving microbial regulation and substance transformation, providing theoretical and technical support for advanced nitrogen and phosphorus removal in wastewater and sludge resource recovery.

Keywords: granular sludge; hydrochar; nitrogen and phosphorus removal; functional gene; microbial community

颗粒污泥是一种依赖微生物在胞外聚合物(EPS)作用下形成的致密生物团聚体,具有沉降性能好、生物密度高和抗冲击负荷能力强等优势,在污水处理中应用广泛^[1]。然而,其在实际应用中仍存在启动周期长、低温下结构松散与除磷效果下降、高负荷下易解体等问题^[2]。因此,开发新型强化材料以促进除磷颗粒污泥快速形成并增强其结构稳定性,已成为当前研究的重要方向。

污泥作为污水处理厂的主要副产物,用其制备水热炭兼具“以废治废”与资源循环利用优势^[3]。水热炭因独特的多孔结构、较大的比表面积及丰富的表面官能团,在吸附、催化、能源等领域已展现应用潜力,例如可吸附水体中的重金属与有机物,或作为电极材料用于能量存储^[4]。Shi等^[5]研究报道水热炭在提高甲烷生产速率和产量方面均高于生物炭,且水热炭诱导与电子传递相关的代谢物上调。在污水处理方面,一种以Ni-Mg-Al层状双氧化物催化的水热炭可强化脱氮被证实^[6]。水热炭可通过提供微生物附着界面、官能团络合除磷、调节微环境及缓释碳源以促进EPS分泌等多重方式,协同强化颗粒污泥结构与效能。但截至目前,其在颗粒污泥快速培养中的应用潜力仍未被充分认知,关键机制有待揭示。为此,本研究旨在通过系统解析污泥基水热炭对颗粒污泥形成、结构及去除营养盐性能的影响规律,深入探究其调控微生物群落、酶活与功能基因的作用方式,最终揭示微生物调控与物质转化协同强化的内在机制,为缩短启动周期、提升系统稳定性并推动污泥资源化利用提供关键技术支撑,兼具重要的环境效益与工程价值。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用剩余污泥取自某市政污水处理厂二沉

池,污泥取回后在实验室静置24 h,去掉上清液后基本特性如下:含水率为82.5%,pH为6.8,TP含量为3.2 g/kg,挥发性固体(VS)含量为3.8 g/L,总固体(TS)含量为5.2 g/L。污泥采集后置于4℃冰箱保存,使用前经100目筛网过滤以去除杂质。

水热炭以污水处理厂剩余污泥为原料,采用水热合成法制备,具体步骤参考文献^[7]并略有调整:首先将新鲜剩余污泥在4 000 r/min下离心10 min,获得含水率约80%的浓缩污泥;取100 mL浓缩污泥置于200 mL聚四氟乙烯内衬高压反应釜中,密封后转入烘箱,以5℃/min升温至200℃,保温反应2 h;反应结束后自然冷却至室温,产物经去离子水重复洗涤、离心6~8次,直至上清液pH稳定在6.5~7.0;所得固体经冷冻干燥(-50℃,10 Pa,48 h)至恒质量,研磨后过80目筛,筛下物密封保存于干燥器中备用。

实验用水为模拟城市污水,参照目标污水处理厂进水水质配制,具体配方如下:葡萄糖为150 mg/L,乙酸钠为70 mg/L, KH_2PO_4 为37.3 mg/L, NH_4Cl 为152.7 mg/L,尿素为34 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为20 mg/L, CaCl_2 为10 mg/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为0.5 mg/L,微量元素溶液为1 mL/L。实验用水经缓冲溶剂调节pH至7.0±0.2,主要水质特性如下:COD为(230±15) mg/L,TP为(8.5±0.3) mg/L, NH_4^+-N 为(40±2) mg/L, TN为(56±3) mg/L。

1.2 实验方法

实验设置4组相同的序批式反应器(SBR),有效容积均为5 L。各反应器接种1.5 L剩余污泥(MLSS约为3 000 mg/L),并补充实验用水至标定容积。运行周期为8 h,包括:进水(5 min)、厌氧搅拌(120 min,150 r/min)、曝气反应(180 min,控制DO在2.0 mg/L左右)、沉淀(30 min)、排水(5 min)、闲置

(140 min)。

水热炭投加量设4个梯度:0(对照组,R0)、0.5(R1)、1.0(R2)、2.0(R3) g/L,该浓度梯度依据预实验结果及生物炭对微生物群落影响的有效浓度范围确定^[6],每组设置3台相同规格的平行序批式反应器,所有平行反应器同步执行相同运行程序。因反应器每日排泥及水热炭吸附损耗可能导致其浓度下降,故每日在进水阶段按各梯度设定浓度补充水热炭,确保全实验周期内反应器中水热炭浓度稳定。反应器的污泥龄(SRT)控制为20 d,每日通过排泥口排出0.25 L混合液;水力停留时间(HRT)为8 h,整个反应系统连续运行100 d,其间每日监测混合液特性及出水水质。

1.3 分析方法

水热炭特性表征:比表面积及孔径分布采用全自动比表面分析仪测定,以 N_2 为吸附质,在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行吸附-脱附实验,通过BET模型计算比表面积、BJH法分析孔径分布;表面官能团采用傅里叶变换红外光谱仪表征,扫描范围为 $400\sim4\,000\text{ cm}^{-1}$,分辨率为 4 cm^{-1} ;微观形貌通过扫描电子显微镜(SEM)观察,加速电压为10 kV。

COD采用重铬酸钾法测定;TP采用钼锑抗分光光度法测定; NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法测定;TSS和VSS采用重量法测定($105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干2 h, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灼烧2 h);颗粒污泥粒径分布采用激光粒度仪测定;污泥沉降性能采用污泥体积指数(SVI)表征;EPS采用热提取法($80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴30 min)提取,其中多糖含量采用蒽酮比色法测定,蛋白质含量采用Lowry法测定;微生物群落结构采用高通量测序技术进行分析,提取污泥DNA后对16S rRNA基因V4-V5区进行扩增测序,使用QIIME软件进行数据分析。

采用实时荧光定量PCR(qPCR)分析聚磷菌(PAOs)的*ppk1*基因和聚糖菌(GAOs)的16S rRNA基因丰度。引物序列参照文献,*ppk1*基因采用引物*ppk1*-F(GCGGATCCGAYCCNGARACNGA)和*ppk1*-R(GCGTCGACTCRTCACRTGNCC),退火温度为 $58\text{ }^{\circ}\text{C}$;GAOs的16S rRNA基因采用引物GAOs-F(CAGCAGCCGCGGTAATAC)和GAOs-R(CCGTCAATTCMTTTRAGTTT),退火温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。反应体系为 $20\text{ }\mu\text{L}$,含SYBR Green Master Mix($2\times$) $10\text{ }\mu\text{L}$ 、引物各 $0.8\text{ }\mu\text{L}$ 、模板DNA $2\text{ }\mu\text{L}$ 。qPCR程序: $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预变性3 min; 40 个循环($95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变性15 s,退火

30 s , $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 延伸30 s)。最后进行溶解曲线分析。所有引物由生工生物工程(上海)股份有限公司合成。

采用多种方法测定颗粒污泥系统中的关键酶活性。磷酸酶活性以磷酸苯二钠为底物, $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 反应30 min后于 400 nm 下测定;氨单加氧酶活性通过靛酚蓝法在 625 nm 下检测;硝酸还原酶活性基于磺胺-萘基乙二胺法在 540 nm 下测定;胞外蛋白酶活性采用福林酚法于 660 nm 下检测;聚磷激酶活性通过高效液相色谱仪测定三磷酸腺苷消耗,色谱条件:C18柱,流动相为 0.05 mol/L 磷酸二氢钾(pH 为6.8),流速为 1.0 mL/min ,检测波长为 254 nm 。

2 结果与讨论

2.1 水热炭的理化特性表征

污泥水热炭的BET比表面积为 $68.5\text{ m}^2/\text{g}$,孔径分布以介孔为主($2\sim50\text{ nm}$),平均孔径为 12.3 nm ,总孔容为 $0.18\text{ cm}^3/\text{g}$,表明其具有较丰富的孔隙结构,可为微生物附着提供充足的位点。SEM观察结果显示[见图1(a)],水热炭表面呈现不规则多孔结构,存在大量蜂窝状凹陷与通道,验证了其较大比表面积的结构基础。FTIR光谱分析显示[见图1(b)],水热炭在 $3\,420\text{ cm}^{-1}$ 处的强吸收峰对应羟基($-\text{OH}$)的伸缩振动, $1\,630\text{ cm}^{-1}$ 处为羧基($-\text{COOH}$)中 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰, $1\,020\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰归属于 $\text{C}-\text{O}$ 键(如醚键、醇羟基)的伸缩振动。上述特征峰表明,水热炭表面富含羟基、羧基等含氧官能团,这些官能团可通过络合作用与磷发生化学结合,为磷的吸附提供活性位点,显著增强对磷的固持能力,从而在除磷颗粒污泥体系中通过界面作用促进磷的富集与转化,为强化除磷效能奠定物质基础^[8]。

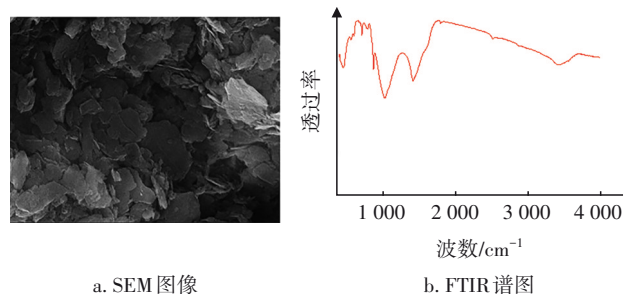


图1 水热炭的形貌特性及主要理化特性

Fig.1 Morphological characteristics and main physical and chemical characteristics of hydrochar

2.2 水热炭对颗粒污泥形成的影响

水热炭对颗粒污泥特性的影响如图2所示。投

加水热炭对TSS与有机质占比均会产生显著影响。随着反应的进行,各反应器的TSS均呈上升趋势,至第90天时,投加组的TSS(5.85~6.17 g/L)均高于对照组R0(5.61 g/L),表明水热炭作为微生物附着载体,有助于促进颗粒污泥形成并增强污泥持留能力。对于有机质占比,R1和R2组在30~90 d期间维持在75.6%~79.6%,显著高于R0组(61.2%~63.6%)和R3组(64.6%~64.8%),说明适量投加水热炭可优化微环境,促进高活性菌群富集与有机质代谢,而过量投加(2.0 g/L)水热炭可能因物理屏蔽或竞争吸附而抑制微生物代谢,进而导致有机质占比下降^[9]。同时,水热炭可显著改善污泥沉降性能。R2与R3组的SVI值明显低于R0组,这归因于水热炭的多孔结构可促进污泥颗粒密实化,减少松散絮体,从而提升污泥沉降效率。其中,R2组的效果最优,持续较低的SVI为功能微生物的富集与系统除磷效能的提升奠定了物理基础。

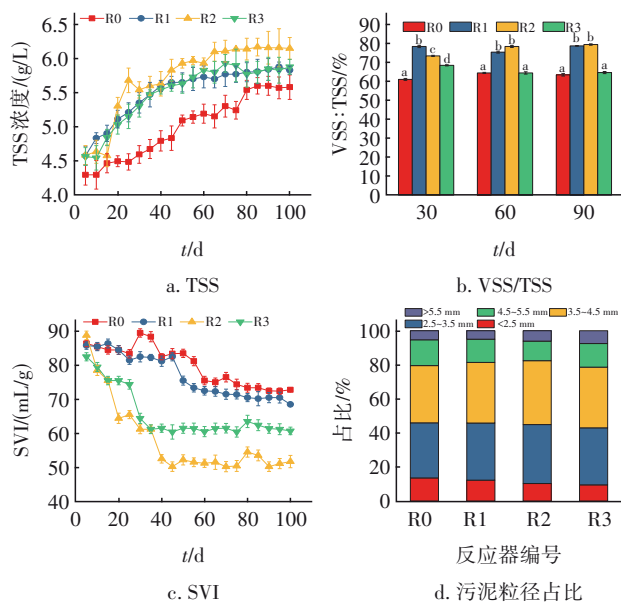


图2 水热炭对颗粒污泥特性的影响

Fig.2 Effect of hydrochar on characteristics of granular sludge

另外,水热炭的投加可显著改变污泥粒径分布。与R0组相比,R1~R3组中粒径<2.5 mm的小颗粒占比降低(R3组为9.5%,R0组为13.6%),而3.5~5.5 mm的中等粒径污泥颗粒比例升高(R2组中3.5~4.5 mm粒径污泥占比达到37.5%,R0组为33.6%),同时粒径>5.5 mm的大颗粒在R2组(6.1%)与R3组(7.5%)中也高于R0组(5.3%)。水

热炭作为生物载体促进了微生物聚集与小颗粒团聚,从而改善了整体粒径结构。其中,R2组的粒径分布最优,粒径为3.5~4.5 mm的颗粒污泥占比最高,说明适量投加水热炭有助于形成结构更稳定的颗粒污泥。粒径结构的优化进一步提升了污泥的沉降性能,并为聚磷菌等功能微生物提供了更稳定的微环境,有利于其代谢活动与磷富集过程,这与系统除磷效能的提升密切相关。

2.3 水热炭对颗粒污泥运行效能的影响

水热炭对系统去除COD的影响如图3所示。在颗粒污泥快速成长期(21~60 d),R2组的污泥颗粒结构趋于致密,EPS分泌促进胞外酶活性,出水COD降至12.65 mg/L(去除率为94.5%),显著优于R0组(出水COD为35.65 mg/L,去除率为84.5%)。而R3组因传质限制,性能略有下降。至稳定期(70~100 d),R2组出水COD维持在12.42~17.25 mg/L(去除率为93.6%~94.6%),抗冲击负荷能力增强,R3组则因污泥颗粒中空化而使得处理效能波动。水热炭通过介孔吸附、官能团促进菌胶团聚集等途径,优化微生物群落结构,增强代谢活性,并结合致密颗粒结构的吸附-循环机制提升系统稳定性。在不同的水热炭投加梯度中,R2组(1.0 g/L)的物理-生物协同效应最佳,R3组(2.0 g/L)则因传质受阻而限制了性能提升。

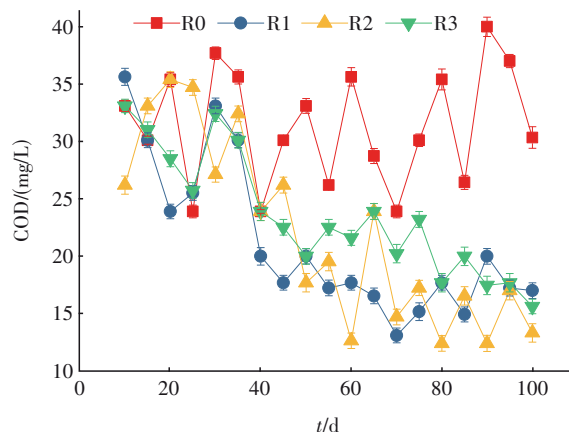


图3 水热炭对颗粒污泥系统出水COD的影响

Fig.3 Effect of hydrochar on effluent COD in granular sludge system

水热炭对 NH_4^+-N 去除效果的影响如图4所示。水热炭的投加显著提升了系统的脱氮性能,其中R2组的表现最为突出。R2组的 NH_4^+-N 去除率在整个运行阶段均保持在较高水平,至第90天达到

98.5%,明显优于对照组(93.5%)。对于TN,R2在稳定期(第90天)去除率为73.5%,亦为各组最高。水热炭的多孔结构为硝化与反硝化菌群提供了良好的附着界面,其介孔特征有助于形成溶解氧梯度,促进微氧区的反硝化过程;其表面所含的羟基、羧基等官能团可在运行初期吸附部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,而污泥颗粒结构的密实化进一步强化了微生物代谢,共同推动 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化与TN的去除。

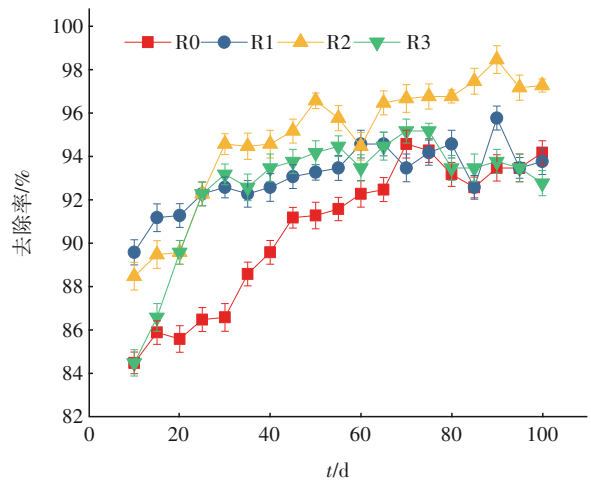


图4 水热炭对颗粒污泥系统去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响

Fig.4 Effect of hydrochar on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency in granular sludge system

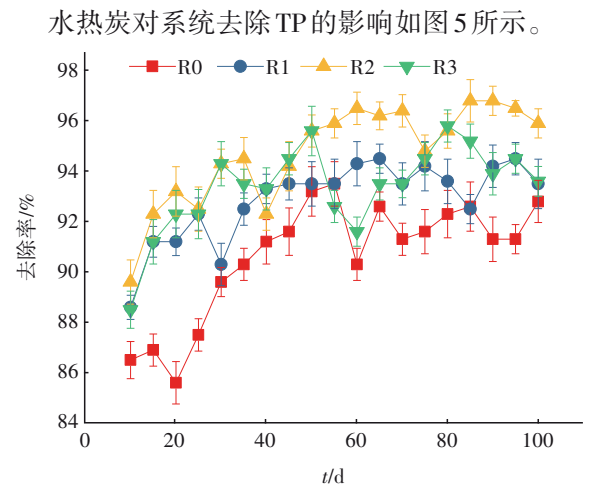


图5 水热炭对颗粒污泥系统去除TP的影响

Fig.5 Effect of hydrochar on TP removal efficiency in granular sludge system

投加水热炭可显著提升系统的TP去除效率,其中R2组在各阶段均表现最优,第90天TP去除率达到96.8%,明显优于对照组R0(91.3%)。水热炭表面的羟基和羧基在运行初期通过络合与静电作用

有效吸附磷酸盐;其多孔结构也为聚磷菌(PAOs)提供了良好的附着载体,qPCR结果显示R2中 $ppk1$ 基因丰度提升了2.3倍,颗粒结构密实化进一步增强了PAOs的代谢活性与磷蓄积能力^[10]。在不同的水热炭投加梯度中,R2组实现了物理吸附与生物除磷的最佳协同,R1组因强化不足而效果略低,R3组则因颗粒中空限制了传质并降低了PAOs活性,导致除磷效能下降。

2.4 水热炭对微生物群落结构的影响

水热炭对颗粒污泥中微生物多样性的影响见表1。R2组的Shannon、Chao1和ACE指数均为最高,Simpson指数接近1,表明其微生物群落的丰富度、均匀度及稳定性最优。这得益于水热炭的多孔结构与表面官能团所提供的多元微生境,有助于聚磷菌和硝化菌等功能菌群的定植与富集。相比之下,R0组因絮体松散且受GAOs干扰,多样性较低;R3组则因颗粒中空引发局部厌氧,抑制好氧菌生长,导致多样性略有下降。1.0 g/L的水热炭通过优化微生境,使微生物多样性达到最佳状态,从而支撑颗粒污泥系统实现高效脱氮除磷。

表1 水热炭对颗粒污泥中微生物多样性的影响

Tab.1 Effect of hydrochar on microbial diversity in granular sludge system

项目	Shannon	Chao1	Simpson	ACE	Coverage
R0	4.23	1 234	0.91	1 256	0.981
R1	4.56	1 321	0.93	1 342	0.980
R2	4.89	1 456	0.95	1 489	0.990
R3	4.41	1 289	0.92	1 311	0.980

水热炭对颗粒污泥系统中微生物群落结构的影响如图6所示。门水平上,R2组中Proteobacteria(42.6%)与Bacteroidetes(21.5%)等功能菌门的相对丰度明显高于其他组。作为优势菌门,Proteobacteria在R2组占比最高,聚磷菌*Candidatus Accumulibacter*属于该菌门,其与硝化菌(*Nitrospira*,属于Nitrospirae门)协同作用,共同推动磷的吸附与氮的转化,直接关联R2组TP去除率96.8%与氨氮去除率98.5%的优异表现。Bacteroidetes的高丰度促进了有机物降解,支撑了COD的高效去除(94.6%),并与Proteobacteria形成代谢协同。同时,R2组中Actinobacteria(11.3%)与Chloroflexi(10.2%)的富集进一步强化了系统功能:前者参与胞外磷酸酶等水解酶分泌,加速磷的转化;后者有助于维持颗粒内部微氧环

境,促进反硝化过程,提升TN去除效率。与R0组相比,R2组中Firmicutes占比下降(降至3.5%),且典型聚糖菌 *Competibacter* 丰度减少,有效缓解了GAOs对碳源的竞争,进一步强化了PAOs的优势,*ppkI* 基因的丰度随之提升2.3倍,系统除磷能力得到增强。R3组则因污泥颗粒中空结构,导致Proteobacteria(36.8%)与Nitrospirae(4.1%)丰度下降,处理效能有所降低^[11]。1.0 g/L的水热炭通过优化门级菌群结构,构建了以“聚磷-脱氮-有机物降解”为核心的多功能协同体系,实现了系统性强化,为颗粒污泥系统的高效稳定运行提供了关键的微生物学依据。

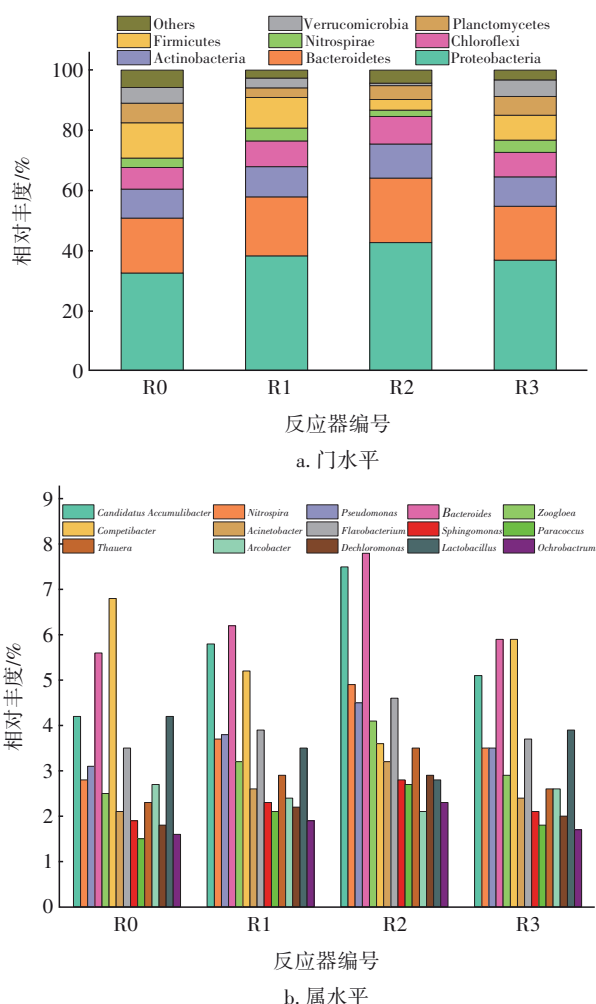


图6 水热炭对颗粒污泥微生物群落结构的影响

Fig.6 Effect of hydrochar on microbial community structure of granular sludge

在稳定运行期,属水平微生物分析显示,R2组中多种功能菌属的丰度明显更高。其中,聚磷菌 *Candidatus Accumulibacter*(7.5%)的相对丰度最高,与其较高的TP去除率直接相关;硝化菌 *Nitrospira*

(4.9%)的富集有效支撑了98.5%的氨氮去除率;而 *Pseudomonas*、*Thauera* 等具有氮与COD降解功能的菌属丰度同步上升,共同促成了总氮(73.5%)与COD(94.6%)的高效去除。此外,R2组中聚糖菌 *Competibacter* 的相对丰度最低(3.6%),降低了其与聚磷菌的碳源竞争,进一步强化了生物除磷效果,该结果也与 *ppkI* 基因丰度提升2.3倍的数据相吻合。对比发现,R0组的功能菌属相对丰度普遍偏低(例如 *Candidatus Accumulibacter* 仅为4.2%),而且 *Competibacter* 占比偏高(6.8%),导致其处理效能最差;R3组因颗粒结构空化,功能菌属丰度下降,处理效能略逊于R2组;R1组则在菌群结构与处理效能上均处于中间水平。

2.5 关键酶活性的变化

水热炭对颗粒污泥系统中关键酶活性的影响见表2。R2组的所有测定酶活性均表现最优,其中,磷酸酶与聚磷激酶的活性较高,与 *Candidatus Accumulibacter* 的富集共同促进磷代谢,使得TP去除率达到96.8%;氨单加氧酶活性与 *Nitrospira* 的丰度正相关,推动氨氮高效氧化(去除率达到98.5%);硝酸还原酶强化反硝化过程,助力TN去除(去除率达73.5%);而胞外蛋白酶活性提升则与 *Bacteroidetes* 等COD降解菌协同,使COD去除率达到94.6%。从系统结构看,R2组污泥颗粒密实,为酶促反应提供了稳定微环境,减少酶流失^[12];而对照组污泥絮体松散,酶活性普遍最低;R3组则因污泥颗粒中空导致传质受限,酶活性低于R2组。

表2 水热炭对颗粒污泥系统内关键酶活性的影响

Tab.2 Effect of hydrochar on key enzyme activities in granular sludge system U/gTSS

项目	磷酸酶	氨单加氧酶	硝酸还原酶	胞外蛋白酶	聚磷激酶
R0	12.6±0.1	8.2±0.3	15.3±0.3	22.5±1.3	9.8±0.3
R1	16.8±0.2	10.5±0.5	18.7±0.8	27.3±2.1	13.2±0.5
R2	20.8±0.5	14.3±0.7	23.5±1.2	34.2±2.6	18.5±0.8
R3	15.7±0.3	9.8±0.4	17.6±1.3	25.9±3.1	12.1±0.6

2.6 水热炭对功能基因的影响

水热炭对颗粒污泥体系内功能基因相对丰度的影响如图7所示。R2组的 *ppkI* (3.5%)、*amoA* (3.2%)等关键基因丰度显著高于其他组,且与微生物群落结构呈现协同性。*ppkI* 和 *ppx* 基因丰度较高,与 *Candidatus Accumulibacter* 的富集一致,直接增

强聚磷合成与分解能力,强化TP去除效果;*amoA*和*hao*基因对应*Nitrospira*的高丰度,强化氨氧化过程,与氨单加氧酶活性协同提升氨氮去除率;反硝化基因*narG*、*nirS*等在R2组中富集,与*Thauera*等反硝化菌丰度匹配,助力TN的高效去除。此外,*epsA*基因的高表达促进胞外多糖合成,与R2组较大的污泥粒径一致,有利于颗粒稳定性。对比来看,R0组的基因丰度最低,与功能微生物匮乏、效能最差相呼应;R3组因污泥颗粒中空导致基因丰度下降,效能略逊。综上,1.0 g/L的水热炭通过富集功能基因,强化微生物代谢潜力,与群落结构优化共同支撑系统高处理效能,验证了“基因-微生物-效能”的协同机制。

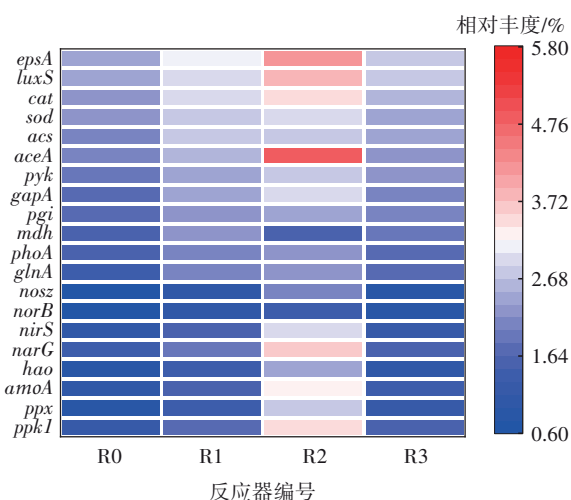


图7 水热炭对颗粒污泥系统内关键功能基因的影响

Fig.7 Effect of hydrochar on abundance of key functional genes in granular sludge system

2.7 实践意义与展望

本研究揭示了水热炭通过“材料-微生物群落-功能基因-代谢酶”多层面联动调控污水脱氮除磷效能的机制,突破了单一关注污染物去除的传统思路。实验条件下,水热炭的最优投加量为1.0 g/L,其通过富集 Proteobacteria 门功能菌(如 *Candidatus Accumulibacter*)、*Nitrospira*,提升 *ppkI*、*amoA* 等关键基因丰度及磷酸酶和氨单加氧酶活性,协同优化污泥粒径,使TP、氨氮、COD去除率分别达到96.8%、98.5%、94.6%,为实际污水处理厂高效稳定运行提供了可量化的调控参数。水热炭通过定向调控微生物功能群及代谢潜力,构建了高效协同的处理系统^[13]。后续研究可进一步探索该机制在不同水质(如工业废水)中的适配性,结合宏转录组解析基因

表达动态,为开发低成本、高性能的污水处理材料与工艺提供更系统的理论支撑^[14]。

本研究在100 d的运行周期内,水热炭未出现明显降解或失效。在稳定期R2组的TP去除率稳定在90%以上,至实验末期水热炭仍具有较高的比表面积,FTIR光谱中羟基、羧基特征峰强度无显著衰减,得益于其在200℃水热制备条件下形成的高热稳定性与致密碳骨架,在厌氧-好氧交替环境中降解缓慢,功能活性持续。水热炭主要以两种形式存留:大部分保持独立多孔结构,均匀分散于颗粒污泥内部作为微生物附着“核心载体”;少量被微生物EPS包裹形成稳定复合结构,未团聚结块,仍可通过界面作用参与磷吸附和微生物调控。对剩余污泥处置而言,水热炭可作为导电材料强化系统电子传递效率,加速产甲烷菌等功能菌代谢以提升厌氧消化效能,同时促进污泥减量化,为剩余污泥资源化与减量化耦合提供新路径,后续研究将进一步考察生物炭的降解等性能,完善技术应用支撑。

从经济可行性看,本研究中水热炭的制备具有显著成本优势:原料为污水处理厂剩余污泥,节省了外购原料的费用;工艺采用中温水热合成(200℃),较生物炭高温热解(500~800℃)能耗大幅降低。此外,水热炭的应用可减少污水处理系统的药剂投加量,同时提升剩余污泥的热值与脱水性能,降低后续处置成本,形成“以废治废-效能提升-成本节约”的良性循环,为规模化工程应用提供了经济可行性基础。

3 结论

① 优化制备的污泥基水热炭在投加量为1.0 g/L时强化效果最优,可以显著提升颗粒污泥系统的脱氮除磷效能,使TP、氨氮、COD去除率分别达到96.8%、98.5%、94.6%,同时加速颗粒污泥形成,提升污泥粒径及结构稳定性。

② 水热炭通过调控微生物群落结构与功能基因表达强化系统处理性能,显著富集 Proteobacteria 门功能菌(如 *Candidatus Accumulibacter*)、*Nitrospira*,提升 *ppkI*、*amoA* 等关键基因丰度及磷酸酶和氨单加氧酶活性,强化了微生物代谢活性。

③ 当水热炭投加量较高时(2.0 g/L),高浓度的水热炭因过量吸附微生物胞外聚合物、破坏颗粒核壳结构而导致颗粒污泥中空解体,反而抑制功能

菌群定植与代谢,使功能基因丰度下降,系统处理效能低于投加量为1.0 g/L组。

④ 本研究揭示了水热炭的多维度联动机制,为颗粒污泥快速培养与污水处理系统稳定运行提供了可量化参数,可推动污泥资源化与污水深度处理的耦合应用。

参考文献:

- [1] RAN X, ZHOU M, WANG T, et al. Multidisciplinary characterization of nitrogen-removal granular sludge: a review of advances and technologies [J]. *Water Research*, 2022, 214: 118214.
- [2] XUE Y, MA H, LI Y Y. Anammox-based granulation cycle for sustainable granular sludge biotechnology from mechanisms to strategies: a critical review [J]. *Water Research*, 2023, 228: 119353.
- [3] LIU H, BASAR I A, NZIHOU A, et al. Hydrochar derived from municipal sludge through hydrothermal processing: a critical review on its formation, characterization, and valorization [J]. *Water Research*, 2021, 199: 117186.
- [4] XU S, WANG C, DUAN Y, et al. Impact of pyrochar and hydrochar derived from digestate on the co-digestion of sewage sludge and swine manure [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123730.
- [5] SHI Z, USMAN M, HE J, et al. Combined microbial transcript and metabolic analysis reveals the different roles of hydrochar and biochar in promoting anaerobic digestion of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2021, 205: 117679.
- [6] ZHANG B, WANG J, XU Z, et al. Sewage sludge valorisation by hydrothermal carbonization: a new method to enhance nitrogen removal in hydrochar catalyzed with Ni-Mg-Al layered double oxides [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 386: 135880.
- [7] FENG H, CUI J, XU Z, et al. Sewage sludge treatment via hydrothermal carbonization combined with supercritical water gasification: fuel production and pollution degradation [J]. *Renewable Energy*, 2023, 210: 822-831.
- [8] 李军, 魏鑫, 邓永春, 等. 污泥生物炭对低C/N废水好氧颗粒污泥长期运行稳定性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(4): 2032-2043.
- LI J, WEI X, DENG Y C, et al. Effects of sludge biochar on long-term operational stability of aerobic granular sludge in low C/N wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(4): 2032-2043 (in Chinese).
- [9] WANG C, WEI W, ZHANG Y T, et al. Evaluating the role of biochar in mitigating the inhibition of polyethylene nanoplastics on anaerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2022, 221: 118855.
- [10] XIE J, CAO Q, AN T, et al. Small biochar addition enhanced anammox granular sludge system for practical wastewater treatment: performance and microbial community [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 363: 127749.
- [11] YAN L, LIU Y, ZHANG Y, et al. ZnCl₂ modified biochar derived from aerobic granular sludge for developed microporosity and enhanced adsorption to tetracycline [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122381.
- [12] LV L, YIN B, ZHANG D, et al. Synchronous reinforcement azo dyes decolorization and anaerobic granular sludge stability by Fe, N co-modified biochar: enhancement based on extracellular electron transfer [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 480: 135836.
- [13] ZHU D, WANG Z, LIU K, et al. Multi-cycle anaerobic digestion of hydrothermal liquefaction aqueous phase: role of carbon and iron based conductive materials in inhibitory compounds degradation, microbial structure shaping, and interspecies electron transfer regulation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 140019.
- [14] WANG R, FENG Y, LI D, et al. Towards the sustainable production of biomass-derived materials with smart functionality: a tutorial review [J]. *Green Chemistry*, 2024, 26(16): 9075-9103.

作者简介: 马涛(1985—), 男, 山西怀仁人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为污水处理及污泥资源化技术。

E-mail: mototaozi@126.com

收稿日期: 2025-09-16

修回日期: 2025-10-17

(编辑: 刘贵春)