

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.002

硫歧化驱动硫自养反硝化脱氮生产性试验与评估

袁敏忠^{1,2}, 孙竞翔^{1,2}, 徐是龙^{1,2}, 袁维芳^{1,2}, 韩俊杰³, 江峰³

(1. 广东省环保研究总院有限公司, 广东 广州 510062; 2. 广东省污水深度处理提质增效工程技术研究中心, 广东 广州 510062; 3. 中山大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 511400)

摘要: 针对城镇污水深度脱氮异养反硝化存在碳源依赖、运行成本高、碳排放量大等问题, 研发硫基生物复合填料, 并搭建500~900 m³/d一体化装备, 在清远市龙塘污水处理厂开展117 d生产性试验。系统稳定运行期硝态氮平均去除率达到81.98%~93.46%, 平均脱氮负荷为0.41 kg/(m³·d), 为传统硫自养工艺的1.40~1.68倍, 出水总氮稳定低于5 mg/L; 填料具备优异碱度缓冲能力, 无酸化板结问题, 且形成硫歧化-硫氧化耦合功能菌群。该工艺处理成本为0.156元/m³, 较异养反硝化降低31%, 无需外加碳源且实现近零排放。该技术为城镇污水低碳深度脱氮提供了可行的方案。

关键词: 硫自养反硝化; 硫歧化; 深度脱氮; 多硫化物介导; 生物复合填料

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0009-06

Sulfur Disproportionation-driven Sulfur Autotrophic Denitrification: Productive Test and Performance Evaluation

Yuan Minzhong^{1,2}, Sun Jingxiang^{1,2}, Xu Shilong^{1,2}, Yuan Weifang^{1,2}, Han Junjie³, Jiang Feng³

(1. Guangdong Environmental Protection Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510062, China; 2. Guangdong Engineering Research Center for Advanced Sewage Treatment and Quality Improvement, Guangzhou 510062, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 511400, China)

Abstract: To address the issues of carbon source dependence, high operational cost and intensive carbon emissions associated with heterotrophic denitrification for advanced denitrification of municipal wastewater, this study independently developed sulfur-based biological composite fillers and constructed an integrated facility with a treatment capacity of 500–900 m³/d. A 117-day field trial was conducted at Longtang Wastewater Treatment Plant in Qingyuan City. The results demonstrated that during the stable operation stage, the average nitrate nitrogen removal efficiency of the system reached 81.98%–93.46%, with an average nitrogen removal load of 0.41 kg/(m³·d), which was 1.40–1.68 times that of the conventional sulfur-driven autotrophic denitrification process. The effluent total nitrogen concentration was stably below 5 mg/L. The filler presented excellent alkalinity buffering capacity, with no acidification or compaction observed, and a sulfur disproportionation–sulfur oxidation coupled functional microbial community was established. The unit water treatment cost of this process was merely 0.156 yuan/m³, 31%

基金项目: 广州市重点研发计划项目(SL2022B03J00279)

通信作者: 孙竞翔 E-mail: Jason-sjx@foxmail.com

lower than that of heterotrophic denitrification. Moreover, the process required no external carbon source and realized near-zero carbon emissions. This technology offers a feasible engineering solution for low-carbon advanced denitrification of municipal wastewater.

Keywords: sulfur autotrophic denitrification; sulfur disproportionation; advanced denitrification; polysulfide mediation; biological composite filler

广东省作为珠江流域核心区域,海域与河网密布,城镇与农村生活污水排放密集,污水中总氮排放量居高不下,珠江口近岸海域夏季频繁出现重度富营养化,无机氮超标问题突出^[1-2]。为严控氮素污染,广州市相继出台《广州市珠江口邻近海域综合治理攻坚战实施方案》等政策文件,将出水总氮浓度 $>6\text{ mg/L}$ 的污水厂列为重点管控对象,要求通过工艺升级实现深度脱氮,推动污水总氮排放浓度持续削减,这对污水处理厂的脱氮技术提出了更高要求。

当前城镇污水深度脱氮仍以异养反硝化工艺为主,该工艺需投加乙酸钠等有机碳源,存在碳源穿透风险高、污泥产量大、运行成本高、伴随 CO_2 温室气体排放等固有缺陷^[3],与国家“双碳”战略下污水处理低碳化、绿色化的发展方向相悖。自养反硝化技术无需有机碳源,以无机电子供体驱动硝酸盐还原,具有污泥产率低、二次污染小、低碳环保等优势,成为深度脱氮领域的研究热点。其中硫自养反硝化(SAD)技术以还原性硫为电子供体,原料易得、工艺适配性强,最具工程化应用潜力^[4]。

然而,传统硫自养反硝化技术存在明显瓶颈:单质硫溶解度低、生物可利用性差,导致脱氮速率慢、脱氮负荷低;纯硫磺填料易燃、抗水力冲击能力弱,长期运行易损耗板结;反应过程快速消耗碱度,易造成出水酸化等问题。近年来,硫自养反硝化技术通过硫歧化反应将单质硫转化为生物可利用性更强的硫化物与多硫化物,大幅提升电子传递效率与脱氮速率^[5]。实验室小试已证实其脱氮负荷是传统硫自养工艺的1.78~2.92倍,突破了传统工艺的性能上限。但该技术仍存在诸多工程化难题:硫基复合填料规模化生产工艺不成熟,填物理化性能与微生物适配性有待优化;技术多停留在实验室与小型中试阶段,在实际城镇污水处理厂的长期生产性运行性能、微生物群落演替规律、硫污染风险及运行经济性尚未得到系统验证;硫歧化菌与硫氧化菌的协同代谢机制在真实污水场景下的响应特征仍

不明确,制约了技术的规模化推广。

基于此,以硫自养反硝化技术为核心,研发硫基生物复合填料并建立规模化生产工艺,搭建处理规模为 $500\sim 900\text{ m}^3/\text{d}$ 的硫自养脱氮一体化装备,在广东某市开展为期4个月左右的生产性试验。系统探究不同空床接触时间下工艺的脱氮性能、pH与碱度缓冲能力、硫代谢产物变化规律,结合高通量测序解析硫歧化菌与硫氧化菌的群落结构与空间分布特征,核算工艺运行成本并评估其工程应用潜力。本研究旨在破解硫自养反硝化技术工程化应用的关键难题,为污水低碳深度脱氮提供高效、经济、稳定的技术方案,同时为珠江流域及同类地区污水处理厂升级改造提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

试验在广东某污水处理厂开展,进水为该厂二级处理单元出水。自主研发的硫自养脱氮一体化装备长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $2.5\text{ m}\times 2.0\text{ m}\times 5.3\text{ m}$,滤池内部填充自主研发的硫自养反硝化功能填料,填料层厚度为 2.35 m ,装填容积为 11.75 m^3 ;底部卵石承托层厚度为 0.3 m ,填充量约为 1.5 m^3 。滤池采用气水联合反冲洗,其中曝气量为 $40\sim 60\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,水力冲洗强度为 $15\sim 20\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,反冲洗用水为装置处理后出水,反洗周期为4 d。整套系统由进水集水构筑物、反硝化生物滤池、反冲洗储水罐构成,配备PLC智能自控系统,搭载pH与溶解氧(DO)在线监测组件,同时配套碱度自动投加调控模块。

填料的主要原料为硫磺,辅料包括混凝土、石膏和碳酸氢钠等,其中混凝土主要用于提供碱度,石膏用作黏合剂,碳酸氢钠用于造孔^[6]。采用混合造粒-低温烘干-高温烘干进行制备,赋予填料一定的强度。填料粒径为 $3\sim 5\text{ mm}$,含硫量为70%,孔隙率为20.97%,比表面积为 $0.75\text{ m}^2/\text{g}$,表观密度为 2.12 g/cm^3 ,堆积密度为 1.20 g/cm^3 ,抗压强度为 72 N 。试验所用硫歧化富集菌液由污水处理厂厌氧污

泥驯化制备得到:以取自污水处理厂的厌氧污泥作为初始接种污泥,向体系中添加硫磺与营养液开展定向富集驯化,驯化周期为20~30 d,待硫化物稳定产率达到10~20 mg/L时,判定驯化完成。

1.2 试验启动与运行

装置启动前投加12 t定制填料,同步投加硫歧化菌液500 L。启动阶段采用浸泡7 d的方式以促进功能微生物附着定殖。反硝化生物滤池采用下进上出流态,池体由下至上依次为进水布水区、承托层、硫基生物复合填料层、出水区。运行期间采用气冲-气水联合冲洗-水冲组合方式反冲洗,周期为4 d,避免填料板结与短流。

1.3 运行参数与进水水质

试验共进行117 d,按空床接触时间(EBCT)划分为3个阶段,具体工况如表1所示(因周末放假未做监测,故实际监测时间为82 d)。进水COD为3.2~27.2 mg/L, NH_4^+-N 为0~8.12 mg/L, TN为7.03~17.67 mg/L, NO_2^--N 为0~0.2 mg/L, NO_3^--N 为3.1~15.6 mg/L, SO_4^{2-} 为95.2~296.2 mg/L, pH为6.5~7.0,温度为16.2~23.6 °C, DO为3.0~5.2 mg/L,碱度为28.8~128.9 mg/L。

表1 运行工况

Tab.1 Operating conditions

运行阶段		EBCT/min	运行时长/d
系统调试期	I	75	2
	II	56	4
	III	37	6
稳定运行期	IV	32	15
	V	27	40
极限脱氮期	VI	23	7
	VII	20	33
	VIII	18	10

1.4 水质项目分析方法

现场采用哈希HQ2100便携式多参数水质检测仪测定pH、温度、DO、ORP。每日上午、下午各采集1次水样,混合均匀后经0.22 μm聚醚砜滤膜过滤,用于实验室组分分析。其中, NO_3^--N 和 NO_2^--N 采用紫外分光光度法测定; SO_4^{2-} 采用离子色谱测定;总硫化物采用亚甲基蓝分光光度法测定;多硫化物采用紫外-可见分光光度法测定。

1.5 微生物分析方法

取稳定运行阶段填料,切割为表层与1.0 mm厚度切面样品,经固定、脱水、喷金处理后,采用扫描

电镜(SEM)观察填料孔隙结构与微生物定殖形态。

采集填料内层与外层微生物样品,冷冻保存后送至测序公司,采用十六烷基三甲基溴化铵法提取基因组DNA。以细菌16S rRNA基因V3-V4区为目标片段,采用引物338F/806R进行PCR扩增。扩增产物纯化后,基于Illumina NovaSeq测序平台完成高通量测序,对序列进行聚类、物种注释与丰度分析,解析硫歧化菌(SDB)、硫氧化菌(SOB)群落结构。

1.6 硫代谢产物分析

停止进水24 h后,于填料20、70、140、235 cm高度取样口采集水样,测定总硫化物浓度,分析硫代谢产物空间分布特征。基于稳定运行期 NO_3^--N 去除量与 SO_4^{2-} 增量,核算填料硫消耗量与S/N。

2 结果与分析

2.1 运行效果分析

2.1.1 脱氮效能演变特征

以EBCT为核心调控参数,将117 d运行周期划分为系统调试期、稳定运行期与极限脱氮期,系统脱氮效能随水力负荷提升呈现规律性演变(见图1)。在系统调试期,反应器快速完成生物膜定殖,硝态氮去除率由31.05%提升至96.45%,出水硝态氮浓度稳定低于0.50 mg/L,表明硫歧化菌与硫氧化菌可快速适应实际污水水质并形成功能菌群。

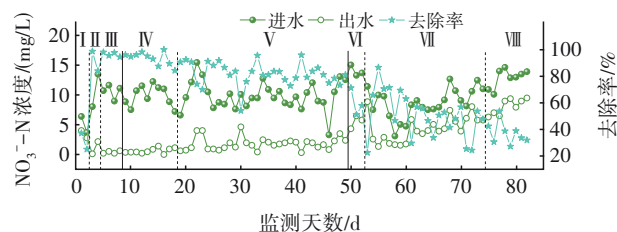


图1 进出水硝态氮浓度和去除率变化

Fig.1 Variations of influent and effluent nitrate nitrogen concentration and removal efficiency

稳定运行期EBCT为32~27 min,进水硝态氮平均浓度为10.06 mg/L,EBCT=32 min时硝态氮平均去除率达93.46%,出水平均浓度为0.62 mg/L;EBCT缩短至27 min时,去除率降至81.98%,出水平均浓度为1.91 mg/L,仍具有良好的脱氮效果。此阶段平均脱氮负荷达0.41 kg/(m³·d),最高为0.60 kg/(m³·d),是传统硫自养工艺的1.40~1.68倍。

在极限脱氮期,水力负荷持续提升导致生物膜受水流剪切作用而流失,硝态氮去除率逐步降至37.13%,脱氮负荷呈先升后降趋势。试验全程出水

亚硝态氮浓度均低于0.63 mg/L,无明显中间产物积累,总氮去除率在稳定运行期维持在68.15%以上,出水总氮低于5 mg/L,满足城镇污水深度脱氮要求。

2.1.2 主要水质指标变化情况

试验期间出水pH、碱度、 SO_4^{2-} 、COD等指标的变化见图2。进出水pH与碱度变化反映了填料优异的缓冲性能。进水pH为6.53~6.95,稳定运行期出水pH维持在5.97~6.56,填料内置碱性组分可持续释放碱度,中和SAD产酸,避免系统酸化。进水碱度为28.78~128.88 mg/L(以 CaCO_3 计),出水碱度未出现急剧下降,保障功能微生物代谢活性稳定。

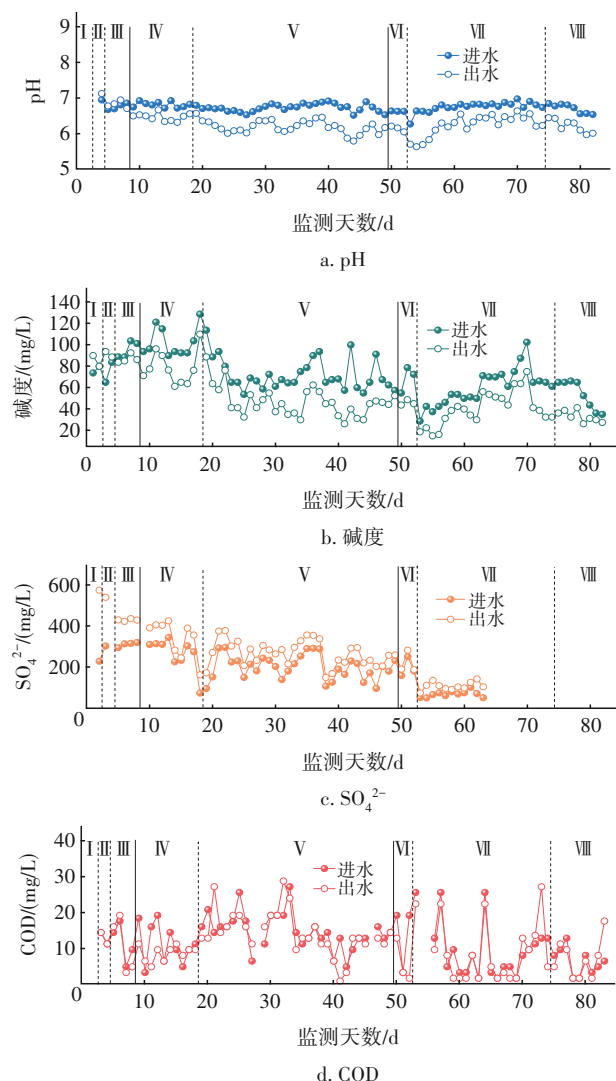


图2 进出水理化指标变化情况

Fig.2 Variations of physical and chemical indicators of influent and effluent

出水硫酸根浓度与脱氮效率呈显著正相关,稳定运行期进水硫酸根平均浓度为215.21 mg/L,出水

平均浓度为284.87 mg/L,增幅为32.1%。硫酸根的增加归因于硫自养反硝化与微量溶解氧化学氧化,产物浓度满足污水排放标准。反应器出水DO稳定低于0.50 mg/L,ORP降至-324.9 ~ -243.6 mV,形成适宜自养反硝化的缺氧还原环境,为硫歧化反应与脱氮过程提供基础条件。

试验期间进出水COD浓度分别为3.20~27.20 mg/L和0.80~27.20 mg/L,整体与进水浓度变化趋势一致且降幅较小,表明系统对有机碳源的利用效率仍维持在较低水平。该现象进一步验证了硫自养脱氮一体化装备的脱氮过程以无机碳源驱动的硫自养脱氮为主导机制。

2.1.3 反冲洗对脱氮效能的影响

采用气-水联合反冲洗可有效维持系统长效稳定运行。反冲洗前硝态氮去除量为8.83 mg/L,反冲洗30、60、90、120、180、240 min后硝态氮去除量分别为9.76、9.24、9.35、9.14、9.24、9.87 mg/L,脱氮效能有所提高。一方面,反冲洗剥离填料表层老化生物膜,新生功能菌群代谢活性更高,电子供体利用效率提升;另一方面,反冲洗恢复了填料孔隙结构,消除板结与短流问题,强化污水与生物膜的传质效率。因此,4 d的反冲洗周期可兼顾脱氮效能与运行稳定性。

2.2 高效脱氮机理分析

2.2.1 微生物群落结构与功能分区

填料表层与内部均具有丰富的孔隙结构(见图3),表明该材料具备良好的空间贯通性,为微生物在填料内部的深层定殖提供了有利的结构基础。

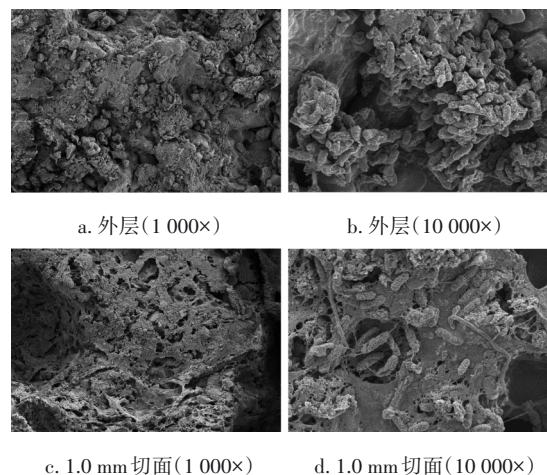


图3 自制填料表面特征

Fig.3 Surface characteristics of filter media

此外,在填料表层及 1.0 mm 切面处均观察到密集附着的杆状微生物群落,与硫自养脱氮功能菌的杆状形态高度吻合,推测该填料内外层可能形成了以硫氧化菌为主的功能菌群落。

为了进一步了解填料中微生物的群落分布和丰度情况,对其进行 16S rRNA 高通量测序,结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,填料中的优势菌属为硫杆菌属(*Thiobacillus*),内层为 17.16%,外层为 22.32%)、铁氧化菌属(*Ferritrophicum*),内层为 17.70%,外层为 17.63%)与硫单胞菌属(*Sulfurimonas*),内层为 6.71%,外层为 7.12%),为核心脱氮功能菌群。此外,硫歧化菌(SDB)呈现明显空间富集特征,内层 *Desulfocapsa* 与 *Sulfurovum* 相对丰度分别达 8.81%、5.49%,远高于外层的 0.46%、0.68%。从图 4(b)可知,填料内外层的总硫氧化菌(SOB)相对丰度分别为 51.15% 和 57.38%,证明了 SOB 的有效定殖。填料内层缺氧环境更适宜硫歧化菌生长,通过歧化反应将单质硫转化为硫化物,为表层硫氧化菌提供高生物利用性电子供体,形成自我维持的硫循环-反硝化耦合体系。这种独特的空间生态位分化为不同功能菌群提供了最适的生存环境,确保了硫代谢途径的连续性和高效性。自制填料所展现出的良好环境适应性与功能普适性,再次证明了其具有良好的工程应用前景。

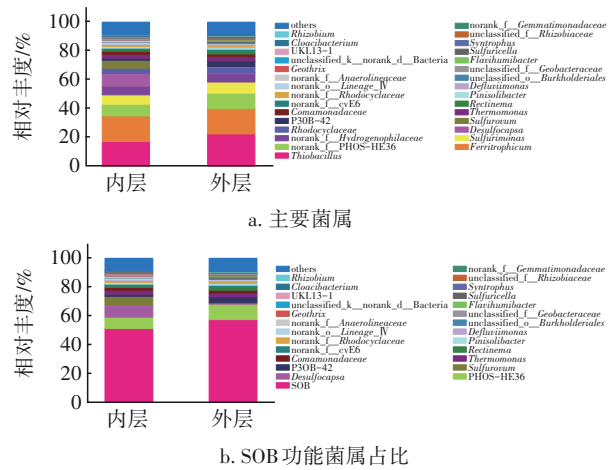


图 4 菌群相对丰度

Fig.4 Relative abundance of microbial communities

2.2.2 硫歧化-硫氧化耦合代谢机制

硫歧化反应是突破传统硫自养脱氮瓶颈的核心。填料内层硫歧化菌将难利用单质硫转化为溶解性硫化物,硫化物与单质硫进一步生成多硫化

物,作为高效电子传递介质,大幅提升电子传递速率。停水 24 h 后,分别从填料侧壁出水口与填料顶部采集水样进行分析,结果显示,在第一次试验中,20、70、140、235 cm 滤层高度处的总硫化物浓度分别为 418、421、513、78 mg/L,第二次试验的为 477、446、335、77 mg/L,第三次试验的为 467、488、358、75 mg/L。在不同高度均检测到高浓度的硫化物,证实系统可持续生成电子供体支撑反硝化。由于装置底部溶解氧较低,硫歧化菌生成大量硫化物。随着硫化物向上迁移,硫氧化菌发生两类氧化反应:一是以硝态氮为电子受体的硫自养反硝化,硫化物被氧化为硫酸根支撑脱氮;二是出水端微量溶解氧介导的氧化,进一步消耗还原态硫化物^[5,7]。与传统硫自养工艺相比,该技术无需添加碳源,依靠硫循环实现自催化脱氮,在短 EBCT 条件下仍维持高脱氮负荷,适配城镇污水厂高效深度脱氮需求。

2.3 运行成本与低碳效益分析

根据稳定运行期数据对运行成本进行核算,结果见表 2。本工艺硫消耗比为 2.69~2.80,水处理成本为 0.156 元/m³,较传统异养反硝化工艺(0.225 元/m³)降低 31%。成本降低主要归因于两方面:一是无需投加乙酸钠等有机碳源,大幅削减药剂费用;二是自养工艺污泥产率低,反冲洗频率仅为异养工艺的 1/5,降低运维能耗与人力成本。

表 2 运行成本和碳排放测算

Tab.2 Operation cost calculation

指标	硫自养反硝化	异养反硝化
硝态氮去除浓度/(mg/L)	8	8
进水 DO/(mg/L)	3	3
处理水量/(m ³ /d)	10 000	10 000
填料或碳源消耗量/(mg/mg)	2.75	4.0
硝态氮消耗填料或碳源总量/(mg/L)	22	32
DO 消耗填料或碳源量/(mg/L)	4.5	3
填料或碳源总消耗/(mg/L)	26.5	35
填料或碳源单价/(元/t)	5 500	5 000
填料/碳源总消耗成本/(元/m ³)	0.146	0.175
反冲洗成本/(元/m ³)	0.01	0.05
总成本/(元/m ³)	0.156	0.225
直接碳排放/(kgCO ₂ _{eq} /m ³)	0.003 2	0.033 4
间接碳排放/(kgCO ₂ _{eq} /m ³)	0.016 6	0.059 9
固碳量/(kgCO ₂ _{eq} /m ³)	-0.002 5	0
总碳排放/(kgCO ₂ _{eq} /m ³)	0.017 3	0.093 3

此外,该工艺在低碳减排层面同样具备显著优势。一方面,乙酸钠异养反硝化工艺的直接碳排放包括投加乙酸钠直接转化为 CO_2 释放,以及处理硝态氮过程中的 N_2O 排放。间接排放包括乙酸钠的生产和运输过程,以及带来的额外剩余污泥处理处置。另一方面,硫自养反硝化工艺的直接碳排放由于自养 N_2O 还原酶活性较低,因此排放量仅为乙酸钠异养反硝化的 $1/5\sim 1/4$ 。间接排放包括填料制备和设备用电。此外硫自养菌在反硝化过程中会捕集一定量的 CO_2 ,具有一定的固碳效果,有利于温室气体减排。经核算,传统异养反硝化工艺的总碳排放量为 $0.0933\text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3$,而硫自养反硝化的总碳排放量仅为 $0.0173\text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3$,约为异养反硝化的 $1/5$,实现近零排放,契合我国“双碳”战略发展要求。同时,系统出水不存在有机碳源穿透隐患,硫酸根等副产物浓度均满足相关排放标准,二次污染风险显著低于异养反硝化工艺,整体实现了经济效益与环境效益的协同统一。

3 结论

① 利用自主研发的硫基生物复合填料搭建 $500\sim 900\text{ m}^3/\text{d}$ 硫自养驱动自养脱氮一体化装备,在某污水处理厂完成二级出水深度脱氮试验。系统稳定运行期(EBCT为 $32\sim 27\text{ min}$)硝态氮平均去除率达 $81.98\%\sim 93.46\%$,平均脱氮负荷达到 $0.41\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,为传统硫自养工艺的 $1.40\sim 1.68$ 倍,出水总氮稳定低于 5 mg/L ,可满足城镇污水深度脱氮要求。

② 自研填料具备优异碱度缓冲与孔隙结构, 4 d 的反冲洗周期可保障系统长效稳定,填料内外层形成硫歧化菌与硫酸化菌空间生态位分化,构建高效自维持硫循环-反硝化耦合体系,大幅提升了电子传递与脱氮效率。

③ 该工艺水处理成本仅为 $0.156\text{ 元}/\text{m}^3$,较传统异养反硝化降低 31% ,且无需投加有机碳源、实现过程近零排放,低碳与经济效益突出。同时,它突破了传统硫自养反硝化脱氮负荷低、易酸化板结的工程瓶颈,为城镇污水低碳深度脱氮提供了关键技术支撑与实践依据。

参考文献:

[1] 蒋严波,江晓铭,蔚阳,等. 硫铁矿自养反硝化工艺

在生活污水处理中的研究进展[J]. 中国给水排水, 2024,40(14):29-35.

Jiang Yanbo, Jiang Xiaoming, Wei Yang, et al. Research progress of pyrite autotrophic denitrification process in domestic sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2024,40(14):29-35(in Chinese).

[2] Choudhary M, Muduli M, Ray S. A comprehensive review on nitrate pollution and its remediation: conventional and recent approaches [J]. Sustainable Water Resources Management, 2022,8(4):113.

[3] 黄鹏,杨家奇,金泽豪,等. 高碳工业废水作为外加碳源促进污水厂减污降碳[J]. 中国给水排水, 2025,41(3):7-13.

Huang Peng, Yang Jiaqi, Jin Zehao, et al. Promoting pollution reduction and carbon mitigation in wastewater treatment plants by using high C/N industrial wastewater as external carbon source [J]. China Water & Wastewater, 2025,41(3):7-13(in Chinese).

[4] Yuan Q, Gao J, Liu P, et al. Autotrophic denitrification based on sulfur-iron minerals: advanced wastewater treatment technology with simultaneous nitrogen and phosphorus removal [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024,31(5):6766-6781.

[5] Qiu Y Y, Gong X, Zhang L, et al. Achieving a novel polysulfide-involved sulfur-based autotrophic denitrification process for high-rate nitrogen removal in elemental sulfur-packed bed reactors[J]. ACS ES&T Engineering, 2022,2(8):1504-1513.

[6] 袁敏忠,江峰,芦玉强,等. 硫基复合填料及其制备方法:ZL202510418485.4[P]. 2025-05-09.

Yuan Minzhong, Jiang Feng, Lu Yuqiang, et al. Sulfur-based composite filler and its preparation method: ZL202510418485.4[P]. 2025-05-09(in Chinese).

[7] Qiu Y Y, Zhang L, Xia J, et al. Making waves: Biological elemental sulfur disproportionation makes elemental sulfur-based biotechnologies more practically attractive for water/wastewater treatment [J]. Water Research, 2025,290:125050.

作者简介:袁敏忠(1968—),男,湖南邵阳人,硕士,高级工程师,主要从事水处理技术研究。

E-mail:13609085691@139.com

收稿日期:2026-05-15

修回日期:2026-06-08

(编辑:李德强)