

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.003

硫自养反硝化滤池冬季低温脱氮中试

梁 硕^{1,2}, 贡丹丹¹, 王艳芝¹, 付 民^{3,4}, 谢瑞瑞¹,
古丽米热·阿山¹, 王飞宇¹, 李思敏^{4,5}

(1. 北京沃尔德斯水务科技有限公司, 北京 102308; 2. 天津大学 管理与经济学部, 天津 300072; 3. 邯郸市市政排水有限责任公司, 河北 邯郸 056002; 4. 邯郸市水利用技术重点实验室, 河北 邯郸 056038; 5. 河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北 邯郸 056038)

摘 要: 硫自养反硝化(SAD)滤池作为异养反硝化(HD)滤池的替代工艺,在深度脱氮处理中备受关注。然而,SAD滤池现缺乏详实工程数据积累,导致工程设计参数缺乏和运行管理经验不足。在邯郸西污水处理厂开展了处理能力为1 000 m³/d的SAD滤池中试研究,考察了在最不利水温(15.1 ℃)及不同进水负荷下的脱氮效果,旨在评估SAD滤池对污水处理厂二级出水的脱氮性能。结果显示,SAD滤池出水NO₃⁻-N浓度降至5 mg/L,总氮去除率达到80.7%,显示出优异的脱氮效果,且抗冲击能力较强。SAD滤池中优势菌种为 *Sulfurimonas* 和 *Thiobacillus*,与HD滤池中优势菌种存在显著差异。经济性分析表明,SAD滤池相比HD滤池节省37.9%的药剂费用。总之,SAD滤池在不增加占地的情况下,提供了一个高效、经济的污水深度脱氮解决方案。

关键词: 硫自养反硝化; 异养反硝化; 反硝化深床滤池; 污水处理厂二级出水; 低温; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0014-08

Advanced Nitrogen Removal of Sulfur Autotrophic Denitrification Filter under Low Temperature in Winter: A Pilot-scale Study

LIANG Shuo^{1,2}, YUN Dan-dan¹, WANG Yan-zhi¹, FU Min^{3,4}, XIE Rui-rui¹,
ASHAN Gulimire¹, WANG Fei-yu¹, LI Si-min^{4,5}

(1. Beijing World's Water Technology Co. Ltd., Beijing 102308, China; 2. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Handan Municipal Wastewater Treatment Co. Ltd., Handan 056002, China; 4. Handan Key Laboratory of Urban Water Utilization Technology, Handan 056038, China; 5. Hebei Technology Innovation Center of Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Sulfur autotrophic denitrification (SAD) filters have attracted significant attention as an advanced nitrogen removal alternative to heterotrophic denitrification (HD) filters. However, the limited engineering data for SAD filters has led to a shortage of design parameters and insufficient operation and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52070065)

通信作者: 李思敏 E-mail: chyeli@126.com

management experience. A SAD filter with a capacity of 1 000 m³/d was constructed at the Handan West Wastewater Treatment Plant. The nitrogen removal performance was evaluated under varying influent loads at a challenging temperature of 15.1 °C to assess the effectiveness of SAD for advanced nitrogen removal from secondary effluent. The results showed that the concentration of NO₃⁻-N in the effluent of SAD filter decreased to 5 mg/L, and the total nitrogen removal rate reached 80.7%. The SAD filter also demonstrated strong resistance to shocks. Microbial community analysis revealed that *Sulfurimonas* and *Thiobacillus* were the dominant species in the SAD filter, distinctly different from the microbial profile in the HD filter. Economically, the SAD filter reduced reagent costs by approximately 37.9% compared to the HD filter. Overall, the SAD filter offers an efficient, cost-effective solution for advanced nitrogen removal without requiring additional land area.

Key words: sulfur autotrophic denitrification; heterotrophic denitrification; denitrification deep bed filter; secondary effluent from wastewater treatment plant; low temperature; microbial community

随着农业面源污染、污(废)水排放及其他人类活动的加剧,氮素污染成为地表水体水质面临的主要问题之一,也严重影响了全球供水战略^[1-2]。尤其是水体中硝酸盐浓度的升高,不仅会引发水体富营养化、导致藻类过度繁殖,破坏生态栖息地,还会对人类健康带来潜在风险^[3]。因此,各国逐步加大对水污染控制的力度,制定了更为严格的污水排放标准^[4-5]。然而,当前污水处理厂二级出水在深度脱氮方面仍然面临巨大挑战。传统的异养反硝化(HD)工艺对外加有机碳源的依赖使处理成本大幅增加,还可能导致出水COD超标和温室气体排放量增加^[6-8],并产生大量的剩余污泥,增加了污泥处理和处置的难度和费用^[9]。为满足日益严格的脱氮要求,污水处理厂亟需寻找更加经济、环保的替代方案。

硫自养反硝化(SAD)技术利用自养微生物通过无机碳和硫作为碳源和电子供体,实现NO₃⁻-N的转化^[10]。由于S⁰在自然界中广泛存在,其经济可行性优于其他还原硫化物^[11-12]。SAD技术已被证实具有良好的硝酸盐去除能力^[13-14],成为了异养反硝化的替代方案,也被越来越多地应用于废水的低碳脱氮以实现碳中和的目标^[15-16]。然而,当前SAD案例有限,导致SAD滤池工程设计参数不够完善,实际运行经验不足^[16],这阻碍了其大规模的推广应用。

为了应对污水处理厂二级出水中氮浓度难以达标的难题,依托邯郸西污水处理厂,构建了一套处理能力为1 000 m³/d的SAD滤池中试系统,在低温条件下,对不同进水负荷时的脱氮性能进行了系

统评估,重点考察了其对NO₃⁻-N、TN等主要污染物的去除效果,并与该厂HD滤池的运行效果进行了对比,以期对未来污水厂深度脱氮工程的设计、调试运行提供理论依据,并为污水处理厂实现减污降碳协同增效提供可行的技术路径。

1 材料与方法

1.1 污水处理厂概况

邯郸西污水处理厂处理能力为18×10⁴ m³/d,主体工艺为“多级AO+高效气浮+深床反硝化滤池”,其中HD滤池实际运行水量为5×10⁴ m³/d。设计进水COD、BOD₅、SS、NH₃-N、TN、TP浓度分别为500、280、400、45、65、8 mg/L,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。由于现状排水体制等原因,该厂进水C/N无法满足同步脱氮除磷的需求,导致HD滤池的碳源消耗成本高,出水COD有超标的风险。因此在邯郸西污水处理厂开展中试,测试不投加碳源情况下SAD滤池的脱氮效果。

1.2 中试装置及运行

中试SAD滤池(见图1)所用滤料由硫磺、天然纳米矿物活性组分及功能性添加组分熔融复合而成,其既是脱氮电子供体,又是脱氮微生物的载体。硫自养反硝化滤料的有效粒径为2~6 mm,含硫量为75%,酸溶物含量为10%,表观密度为1.95 g/cm³,堆积密度为1.28 g/cm³,堆积空隙率为48%,颗粒湿强度为31.6 N。中试装置为一体化设备,滤池水流方向为降流式,处理规模为1 000 m³/d,设计硝态氮容

积负荷为 $0.4\sim 1.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,设备尺寸为 $W\times L\times H=3\text{ m}\times 8\text{ m}\times 3\text{ m}$,滤料填充高度为 1.83 m ,滤池为3格并联运行,单格过滤面积为 3 m^2 。滤池进水采用堰板配水,底部布水布气系统采用S型滤砖,滤料承托层采用厚约 20 mm 高密度聚乙烯承托板。滤料总体积为 16.5 m^3 ,滤速为 $3.70\sim 4.63\text{ m/h}$,强制滤速为 $5.55\sim 6.95\text{ m/h}$,水头损失 $\leq 1.5\text{ m}$ 。

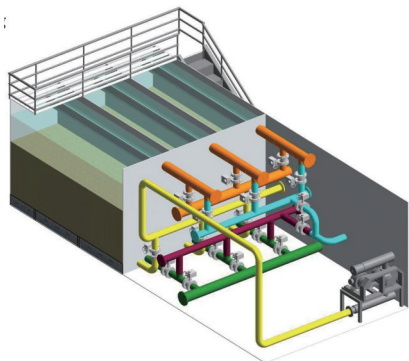


图1 一体化硫自养反硝化滤池中试装置示意

Fig.1 Integrated pilot plant of sulfur autotrophic denitrification filter

SAD滤池进水为二沉池出水,TN为 $10\sim 18\text{ mg/L}$, NO_3^--N 为 $9\sim 17\text{ mg/L}$, $\text{COD}<50\text{ mg/L}$,TP为 $0.16\sim 0.26\text{ mg/L}$,pH为 $6.5\sim 7.3$,冬季水温为 $15.1\sim 16\text{ }^\circ\text{C}$ 。通过水泵将污水送至滤池进水管并由配水堰板均匀配水,污水自上至下经过滤料层后出水,通过调整进出水阀门开度来调节进水量和滤池过滤水位。连续运行一段时间后需要进行反冲洗以去除截留的悬浮物及老化生物膜,同时运行中通过反冲洗驱除氮气来消除滤层气堵。滤池采用气水联合反冲洗方式,水冲洗强度为 $15\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,气冲洗强度为 $60\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,先气洗 5 min ,再气水联合冲洗 20 min ,最后水洗 5 min 。采用水反冲洗方式驱除滤层内滞留的氮气,每次持续 2 min 。

SAD滤池从污泥接种到微生物培养及稳定运行历时 59 d ,分为污泥接种及激活期(阶段I)、低负荷培养期(阶段II)、设计负荷运行期(阶段III)、极限负荷运行期(阶段IV)及变负荷运行期(阶段V)5个阶段,具体技术参数如表1所示。其中阶段I采用该污水处理厂脱水后的污泥进行接种,每格SAD滤池加入含水率为 80% 的污泥 185 kg ,换水两次,每天曝气搅拌 5 min 使污泥分布均匀。在阶段II,SAD滤池进水流量在 5 d 内逐步由 $18\text{ m}^3/\text{h}$ 提高至 $33\text{ m}^3/\text{h}$ 。阶段V为了探究滤池的抗冲击负荷能力,流量

由 $42\text{ m}^3/\text{h}$ 依次提升到 55.44 、 $60\text{ m}^3/\text{h}$,运行 3 d 后再降到 $42\text{ m}^3/\text{h}$ 。

表1 各阶段技术参数

Tab.1 Technical parameters of each operation phase

| 阶段 | 时间/d | 流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) | 空床接触 时间/min | 反洗周 期/d | 驱氮间 隔/h |
|-----|-------|---|----------------|------------|------------|
| I | 1~3 | 0 | 0 | 无 | 无 |
| II | 4~8 | 18~25 | 55 | 5 | 8 |
| | | 26~33 | 30 | 5 | 6 |
| III | 9~13 | 33 | 30 | 5 | 6 |
| IV | 14~30 | 42 | 24 | 3 | 5 |
| V | 31 | 55.44 | 18 | 1 | 2 |
| | 32~33 | 60 | 17 | 1 | 2 |
| | 34~59 | 42 | 24 | 3 | 5 |

1.3 水质分析方法

进出水pH、DO、ORP、TDS、水温:哈希便携式水质测定仪,TN:过硫酸盐消解-紫外分光光度法, NO_3^--N :哈希铬变酸法, NO_2^--N :哈希重氮化法,TP:过硫酸盐消解-钼酸铵分光光度法,COD:重铬酸钾氧化法, SO_4^{2-} :离子色谱法。

1.4 滤料表面微生物形貌及群落分析

分别采集接种污泥、HD滤池和运行 30 d 后SAD滤池滤料样品,以分析微生物群落结构。所有样品均进行高通量测序,并对运行 30 d 后的污泥进行扫描电镜(SEM)分析。具体操作包括:从滤池中中间滤料层取样,进行聚合酶链反应(PCR)扩增、DNA提取和高通量测序;PCR扩增针对微生物16S rRNA基因高变区的V3-V4进行,使用通用引物338F(5'-ACTCCTACGGGCAGCA-3',正向引物)和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3',反向引物)。获得的序列被聚为操作分类单元(OTU),相似性为 97% 。利用Illumina MiSeq平台和MiSeq Reagent Kit v3(600个循环)进行 $2\times 300\text{ bp}$ 的双端测序,以确保最佳测序质量($200\sim 450\text{ bp}$)。使用QIIME平台识别有效序列,并排除模糊碱基N、错配碱基数超过1以及连续相同碱基数超过8的序列。通过QIIME软件调用USEARCH去除嵌合体序列,并根据 97% 的序列相似性阈值进行OTU分类。细菌的16S rRNA基因通过Greengenes数据库分析,真菌的ITS序列通过UNITE数据库分析。

2 结果与讨论

2.1 NO_3^--N 和 NO_2^--N 去除效果分析

各阶段滤池进出水 NO_3^--N 和 NO_2^--N 浓度的变

化见图2。在阶段Ⅰ,SAD滤池对 NO_3^- -N无去除效果;经阶段Ⅱ的低负荷培养后,SAD滤池对 NO_3^- -N的去除量逐渐增大,平均出水为5.16 mg/L,平均去除率为62.2%;在阶段Ⅲ, NO_3^- -N平均去除量为12.3 mg/L,去除率能稳定维持在90%以上;在阶段Ⅳ, NO_3^- -N平均去除量为10.6 mg/L,由于进水负荷提高,空床接触时间(EBCT)降低,导致以最大负荷运行时滤池出水 NO_3^- -N浓度基本维持在3.5 mg/L,去除率在75.5%左右。

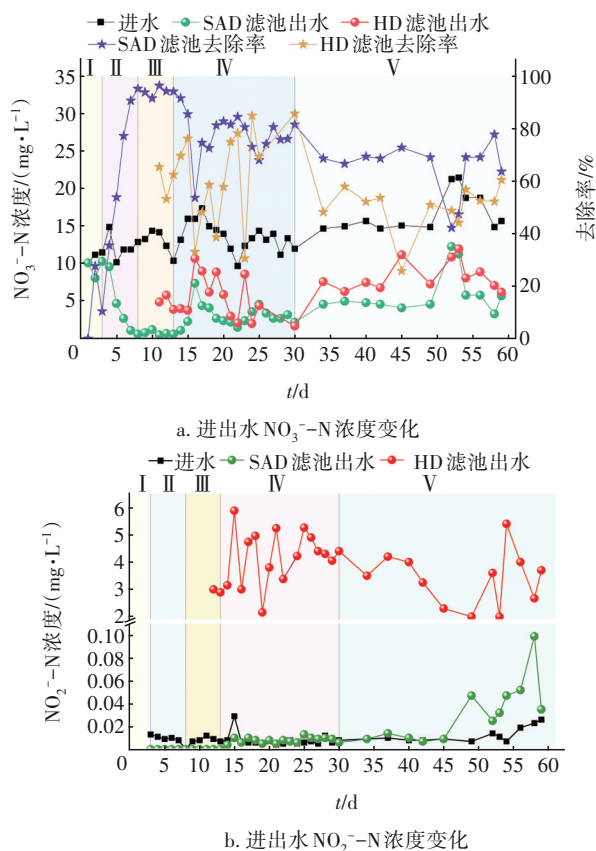


图2 滤池进出水的 NO_3^- -N和 NO_2^- -N浓度变化

Fig.2 Variation of NO_3^- -N and NO_2^- -N concentrations in influent and effluent of the biofilter

在阶段Ⅴ当进水 NO_3^- -N<15 mg/L时,SAD滤池出水 NO_3^- -N浓度稳定在5 mg/L以下,在进水 NO_3^- -N浓度相对稳定的情况下,即使水量随时变化出水 NO_3^- -N浓度仍较稳定,说明滤池抗冲击负荷能力较强,能够承受变化系数为1.43的流量变化。但当进水流量为55.44 m³/h(EBCT为18 min),进水 NO_3^- -N浓度为20.8 mg/L时,出水 NO_3^- -N浓度为10.4 mg/L,滤池出水总氮超过10 mg/L,当前条件为滤池的最大承受极限,极限脱氮负荷为0.840 kg/(m³·d)。较长的EBCT(30 min)时出水水质较好,缩短EBCT

(18 min)导致去除率降低。因此,综合考虑去除效果和建设投资建议滤池的EBCT以20~30 min为宜。

该污水处理厂的HD滤池已运行稳定,因此待SAD滤池微生物培养稳定后,在相同进水条件下将两者的运行效果进行了对比。污水处理厂二沉池出水 NO_3^- -N、TN分别在9~17、10~18 mg/L之间,以对 NO_3^- -N的去除效果作为评判滤池功能的直接指标。由图2可知,SAD滤池对 NO_3^- -N的去除效果略高于HD滤池,SAD滤池出水 NO_2^- -N浓度与进水相差不大,平均出水浓度为0.013 mg/L,而HD滤池出水 NO_2^- -N平均值为4.1 mg/L,明显高于进水。可见,在进水水质相同时,SAD滤池比HD滤池脱氮效果更好,当然影响HD滤池脱氮效果的最关键原因是系统内 NO_2^- -N的积累,推测积累的原因可能是低温环境下,异养微生物对有机碳的利用和 NO_2^- -N的还原能力都会减弱,从而导致 NO_2^- -N积累。

2.2 总氮去除效果分析

各阶段滤池进出水的TN浓度见图3。SAD系统的启动时间较短,表明市政污水处理厂的污泥中含有自养脱氮菌群,并且这些菌群易于培养(笔者曾在宁夏青铜峡污水厂进行硫自养中试,发现特制菌剂的接种效果不如市政污水厂的活性污泥)。随着SAD滤池从低负荷逐步增加至变负荷,TN去除效果逐渐稳定,出水TN浓度基本维持在5 mg/L以下。SAD滤池对TN的平均去除量为10.4 mg/L,去除率为80.7%,脱氮负荷为0.632 kg/(m³·d)。稳定运行后,SAD滤池出水TN浓度完全符合一级A排放标准。

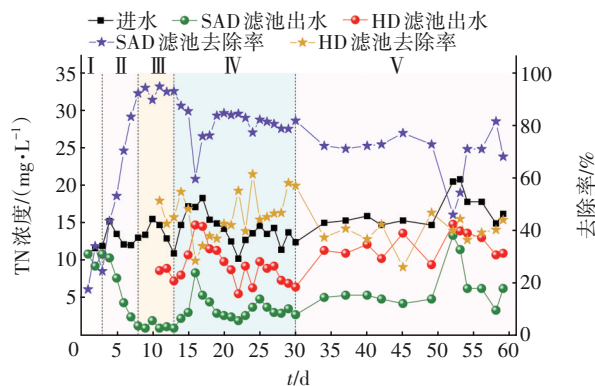


图3 滤池进出水TN浓度变化

Fig.3 Variation of total nitrogen concentrations in influent and effluent of the biofilter

相比之下,HD滤池对TN的平均去除量为4.6 mg/L,去除率为34%,脱氮负荷为0.370 kg/(m³·d)。

可见,SAD滤池对 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、TN的去除效果和稳定性明显优于HD滤池。值得注意的是,HD滤池 NO_2^- -N积累可能也与碳源不足有关,若碳源充足,其处理效果或许可以接近SAD系统。

2.3 其他指标的变化

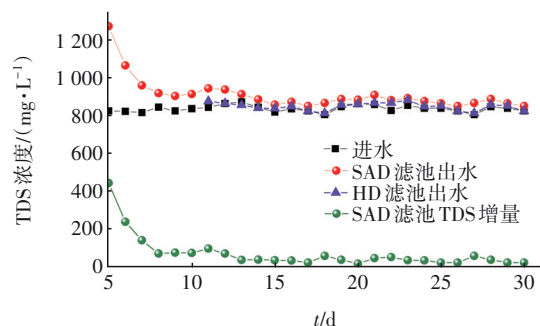
pH是影响反硝化的一个重要因素,自养反硝化过程中产生的 H^+ 会导致系统pH降低,从而影响脱氮速率。试验中采用的添加碱度的复合硫磺材料对pH的降低有一定的缓冲效果,在无外加碱度的条件下,自养反硝化使系统的pH由7.0~7.8降至6.8左右(稳定运行期间),且此时的pH仍可保证硫自养反硝化细菌的正常生长。而异养反硝化产生碱度,使出水pH较进水略有升高。

SAD通常在厌氧条件下进行,在进水平均DO为3 mg/L的条件下,各滤池出水均低于1 mg/L。出水DO浓度的降低,说明DO作为电子受体参与了 NO_3^- -N竞争,高DO可能会影响SAD系统的脱氮效果,也有文献证实进水中高浓度的DO会影响SAD系统的脱氮效率^[17]。

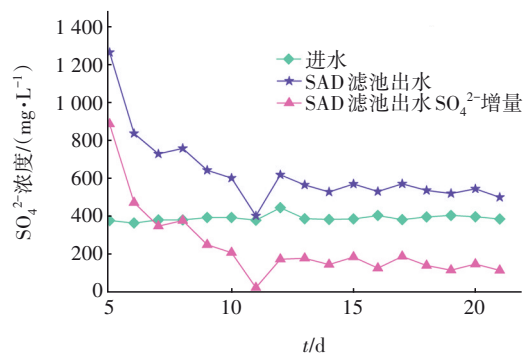
ORP是影响无氧代谢途径的重要指标。测定显示,SAD滤池进水的ORP平均值为141.62 mV,出水降至12.69 mV,最低达到-17 mV。而HD滤池出水的ORP平均值为132.8 mV,说明SAD滤池中污泥的反硝化代谢活性更强,SAD滤池中发生了 NO_3^- -N还原为 N_2 的过程,使出水ORP值降低。而HD滤池中虽然发生了 NO_3^- -N的还原,但也出现了高浓度 NO_2^- -N的积累,说明高ORP可能抑制亚硝酸盐还原酶,从而导致HD滤池中更多的 NO_2^- -N积累。当然,HD滤池 NO_2^- -N积累也可能与低温环境下碳源利用率不高有关。降低ORP可以创造更好的还原环境,这将更有利于 NO_3^- -N和 NO_2^- -N的还原。

考虑到滤料对SAD滤池出水水质的影响,监测了滤料主要释放离子(SO_4^{2-})和进出水TDS的变化,结果如图4所示。运行初期SAD滤池的 SO_4^{2-} 和TDS浓度明显增加,这可能是由于多孔材料表面存在氧化现象,使得 SO_4^{2-} 大量释放进而导致TDS浓度升高。随着反应器的不断运行,SAD滤池内的滤料逐渐被消耗,出水 SO_4^{2-} 和TDS浓度逐渐稳定且略高于进水。HD滤池因投加乙酸钠其出水TDS较进水也有所增大,只是增幅小于SAD滤池。监测发现,去除10 mg/L的氮可使TDS平均增加约39.5 mg/L,若新建或存量项目对TDS增量比较敏感,则需要慎重

考虑SAD工艺。



a. 进出水TDS浓度



b. 进出水 SO_4^{2-} 浓度

图4 进出水TDS和 SO_4^{2-} 浓度的变化

Fig.4 Variation of TDS and SO_4^{2-} concentrations in influent and effluent

2.4 SEM表征与微生物种群多样性分析

接种污泥、HD和SAD滤池生物膜的SEM照片如图5所示。

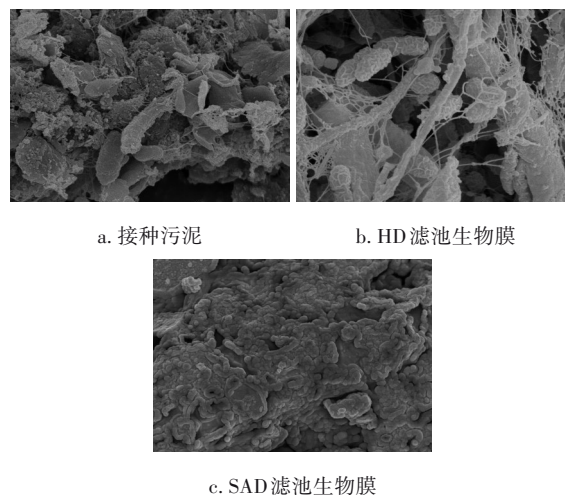


图5 污泥及生物膜样品的SEM照片

Fig.5 SEM images of sludge and biofilm samples

接种污泥的主要优势菌属为*Methylobacter*,其细胞呈圆柱形或杆状,通常单独存在,或以链状、簇状排列。HD滤池生物膜的优势菌属为*Acinetobacter*,

其细胞呈球状或短杆状,直径约为 $0.9\sim 1.5\ \mu\text{m}$,细胞通常是以单个或短链状分布。SAD 滤池生物膜的主要功能菌属为 *Sulfurimonas* 和 *Thiobacillus*, *Sulfurimonas* 呈弯曲或螺旋状,尺寸约为 $(1\sim 3)\ \mu\text{m}\times 0.5\ \mu\text{m}$,细胞表面光滑,通常成对分布;*Thiobacillus* 菌种则呈单生、成对或断链形态,大小为 $(0.5\sim 0.8)\ \mu\text{m}\times (1.0\sim 4.0)\ \mu\text{m}$ ^[18]。在放大 10 000 倍下发现滤料表面细菌形态与短状杆菌类似,表明 SAD 滤料能作为硫自养反硝化菌种的载体及电子供体。同时,添加的纳米矿物质在滤料表面附着了大量颗粒物质,粒径小于 100 nm,增大了比表面积,从而提高了微生物数量和活性。

不同样品在属水平上的微生物群落结构分布见图 6。SAD 滤池的微生物群落与 HD 滤池存在显著差异。SAD 滤池的主要优势菌群为 *Sulfurimonas* (44.95%)、*Thiobacillus* (7%)、*Pseudarthrobacter* (7%)、*Sulfuricurvum* (5%) 和 *Simplicispira* (4.03%)。*Sulfurimonas* 作为一种自养微生物,能利用硫作为电子供体进行反硝化^[19],这在冬季低温条件下尤为有效,因为 *Sulfurimonas* 在较宽的温度和酸碱度范围内均表现出较好的适应性。*Thiobacillus* 也参与硫自养反硝化^[20-21],但在低温下生长速度较慢,因此在 SAD 滤池中的相对丰度低于 *Sulfurimonas*。*Sulfuricurvum* 同样能够利用硫化物进行硫自养反硝化。以前的文献也证实这 3 种细菌在自养反硝化过程中起着至关重要的作用^[7, 22]。*Pseudarthrobacter* 菌属具有降解多环芳烃、脂肪酸和蛋白质等有机物的能力,可将亚硝酸盐氮还原为氮气,通常在异养反硝化系统中出现,可见滤池内自养和异养反硝化同时存在,但是以自养反硝化为主。由于 SAD 滤料中添加了部分硫铁矿,使得 SAD 滤池内 *Ferritrophicum* 也得到富集,它利用单质 S 或 Fe^{2+} 进行反硝化作用^[23]。与之相比,HD 滤池中的优势菌群为 *Acinetobacter* (30.3%)、*Paludibacter* (2.66%)、*Brachymonas* (1.99%) 和 *Defluviimonas* (0.24%),以异养反硝化菌(*Acinetobacter*、*Brachymonas*、*Trichococcus* 和 *Defluviimonas*) 为主,它们能够在低温环境中生长并参与反硝化过程。由对 TN 的去除效果可知,这两种滤池都具有足够的脱氮能力,但是 HD 滤池的优势微生物群落与 SAD 滤池完全不同,说明优势微生物群落与滤池的营养状况密切相关,而且不同的电子供体导致微生物群落的不同演化方向。

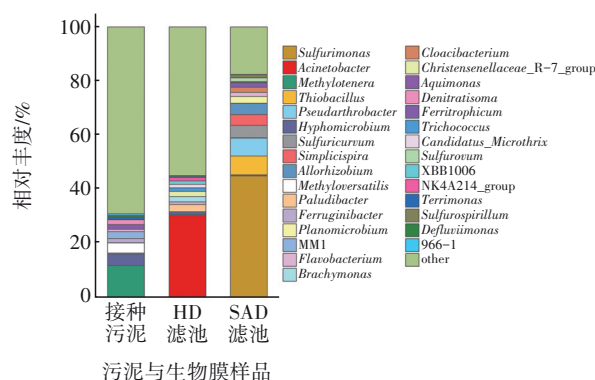
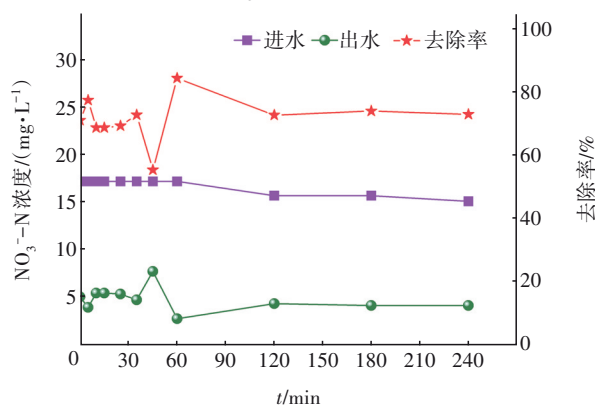


图 6 属水平上微生物的相对丰度分布

Fig.6 Relative abundance of microorganisms at the genus level

2.5 反冲洗对脱氮效果的影响

在运行过程中,对悬浮物的截留和老化生物膜脱落易造成滤池堵塞,因此必须定期进行反冲洗以提高脱氮效率。对于 SAD 滤池,进水中的 SS、脱落的生物膜和反硝化产生的氮气都是造成滤池堵塞的主要诱因^[24]。但反冲洗会导致生物膜脱落,可能影响脱氮效果。为探究反冲洗对生物膜脱氮的影响,设定反冲洗周期为 5 d,监测了反冲洗后滤池运行 4 h 内的进出水 NO_3^- -N 浓度,结果如图 7 所示。

图 7 反冲洗后进出水 NO_3^- -N 浓度的变化Fig.7 Variation of NO_3^- -N concentrations in influent and effluent after backwashing

滤池运行温度为 $15\ ^\circ\text{C}$,进水流量为 $42\ \text{m}^3/\text{h}$,EBCT 为 24 min。反冲洗后 60 min 内滤池出水 NO_3^- -N 浓度产生波动,反冲洗前 NO_3^- -N 去除率为 70.9%,反冲洗后去除率最低为 55.2%,基本稳定在 68.6%~77.3% 之间,说明反冲洗对总氮去除效果有短期影响,120 min 后影响基本消除,且去除率增加,分析原因可能是滤池截留的悬浮物被排出,老化的生物膜得到更新,增加了微生物的活性和反应速

率。有研究表明,反冲洗可有效恢复滤池过水通透性,提高脱氮效率,且每周一次彻底的反冲洗可以深度清洁截留的SS和脱落的生物膜^[16]。可见,对滤池进行反冲洗基本不影响SAD滤池的脱氮性能。

2.6 运行费用分析

药剂费是污水厂运营成本的重要组成部分,表2为两滤池运行费用对比。其中,总氮去除目标为10 mg/L;滤料消耗与总氮去除量之比取3.0(按最不利考虑,实测值为2.7);复合碳源投加比为6.5,处理水量按照 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 计。可知,SAD滤池相比目标污水厂HD滤池节省运行费用约37.9%。

表2 SAD滤池与HD滤池运行费用对比分析

Tab.2 Comparative analysis of operating costs between SAD filter and HD filter

| 项目 | SAD滤池 | HD滤池 |
|---|--------|--------|
| 消耗类别 | 自养脱氮滤料 | 复合碳源 |
| 投加比例 | 3.0 | 6.5 |
| 投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 30 | 260 |
| 消耗品单价/(元 $\cdot \text{t}^{-1}$) | 7 000 | 1 300 |
| 药剂费/(元 $\cdot \text{m}^{-3}$) | 0.210 | 0.338 |
| 年运行费用/万元 | 383.25 | 616.85 |

3 结论

① SAD滤池对TN的平均去除量为10.4 mg/L,平均去除率为80.7%。在进水水质相同的条件下,相比于HD滤池,SAD滤池对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除效果更为显著,且显示出较强的抗冲击能力和优异的脱氮效果。

② SAD滤池中的优势菌种主要包括硫自养细菌 *Sulfurimonas* 和 *Thiobacillus* 等,而HD滤池中更多为异养反硝化细菌。这种微生物群落差异反映了滤池营养状况和电子供体的不同,SAD滤池中的硫自养细菌在低温环境中仍能保持较高的活性。

③ 相比于HD滤池,SAD滤池可节省运行费用约37.9%,每年可给邯郸西污水处理厂二期工程节省药剂成本约233.60万元。SAD滤池适用于碳源消耗量较大的污水厂的总氮提标。

参考文献:

[1] ROQUES C, AQUILINA L, BOISSON A, *et al.* Autotrophic denitrification supported by biotite dissolution in crystalline aquifers: (2) transient mixing and denitrification dynamic during long-term pumping

[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 491–503.

[2] KISKIRA K, PAPIRIO S, VAN HULLEBUSCH E D, *et al.* Fe(II)-mediated autotrophic denitrification: a new bioprocess for iron bioprecipitation/biorecovery and simultaneous treatment of nitrate-containing wastewaters [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 631–648.

[3] ASHOK V, HAIT S. Remediation of nitrate-contaminated water by solid-phase denitrification process—a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(11): 8075–8093.

[4] 王丽花,周振. 国内外城镇污水处理厂排放标准发展现状与修订思考[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(12): 28–34.

WANG Lihua, ZHOU Zhen. Current status and revision thoughts of discharge standards for municipal wastewater treatment plants [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(12): 28–34 (in Chinese).

[5] 李宛谊. 自养反硝化深度脱氮工艺研究现状与改进探究 [J]. *中国设备工程*, 2022 (3): 237–239.

LI Wanyi. Research status and improvement exploration of autotrophic denitrification deep denitrification process [J]. *China Plant Engineering*, 2022 (3): 237–239 (in Chinese).

[6] SHAO L, WANG D, CHEN G, *et al.* Advance in the sulfur-based electron donor autotrophic denitrification for nitrate nitrogen removal from wastewater [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2023, 40 (1): 7.

[7] LIANG B, KANG F, YAO S, *et al.* Exploration and verification of the feasibility of the sulfur-based autotrophic denitrification integrated biomass-based heterotrophic denitrification systems for wastewater treatment: from feasibility to application [J]. *Chemosphere*, 2022, 287: 131998.

[8] 薛罡,何月玲,王晓暖,等. 印染废水的硫自养反硝化深度脱氮中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2022, 38 (13): 15–21.

XUE Gang, HE Yueling, WANG Xiaonuan, *et al.* Pilot study of sulfur-driven autotrophic denitrification for advanced nitrogen removal in secondary effluent of dyeing wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(13): 15–21 (in Chinese).

[9] HU Y, WU G, LI R, *et al.* Iron sulphides mediated autotrophic denitrification: an emerging bioprocess for

- nitrate pollution mitigation and sustainable wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2020, 179: 115914.
- [10] YANG J, QIN Y, LIU X, *et al.* Effects of different electron donors on nitrogen removal performance and microbial community of denitrification system [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107915.
- [11] DI CAPUA F, PIROZZI F, LENS P N L, *et al.* Electron donors for autotrophic denitrification [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 362: 922–937.
- [12] ZENG C, SU Q, PENG L, *et al.* Elemental sulfur-driven autotrophic denitrification for advanced nitrogen removal from mature landfill leachate after PN/A pretreatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 410: 128256.
- [13] WANG H C, LIU Y, YANG Y M, *et al.* Element sulfur-based autotrophic denitrification constructed wetland as an efficient approach for nitrogen removal from low C/N wastewater [J]. *Water Research*, 2022, 226: 119258.
- [14] ZHANG X N, ZHU L, LI Z R, *et al.* Thiosulfate as external electron donor accelerating denitrification at low temperature condition in S^0 -based autotrophic denitrification biofilter [J]. *Environmental Research*, 2022, 210: 113009.
- [15] 刘宝峰, 郭宇平. 硫自养反硝化技术用于市政污水深度处理[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(22): 91–95.
LIU Baofeng, GUO Yuping. Application of sulfur autotrophic denitrification technology in advanced treatment of municipal sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(22): 91–95 (in Chinese).
- [16] SUN Y L, LI Z R, ZHANG X N, *et al.* Design and operation insights concerning a pilot-scale S^0 -driven autotrophic denitrification packed-bed process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 470: 144396.
- [17] WANG L, LIU J, LI Y, *et al.* Elemental sulfur-driven autotrophic denitrification process for effective removal of nitrate in mariculture wastewater: performance, kinetics and microbial community [J]. *Chemosphere*, 2023, 337: 139354.
- [18] 马潇然, 郑照明, 卞伟, 等. 硫自养反硝化系统运行效能和微生物群落结构研究 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(10): 4335–4341.
MA Xiaoran, ZHENG Zhaoming, BIAN Wei, *et al.* Study on the operational efficiency and microbial community structure of sulfur autotrophic denitrification systems [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(10): 4335–4341 (in Chinese).
- [19] ZHANG L, ZHANG C, HU C, *et al.* Sulfur-based mixotrophic denitrification corresponding to different electron donors and microbial profiling in anoxic fluidized-bed membrane bioreactors [J]. *Water Research*, 2015, 85: 422–431.
- [20] 刘斌, 何杰, 李学艳, 等. 黄铁矿生物滤池氮磷同步深度处理特性及微生物群落结构 [J]. *环境工程*, 2022, 40(3): 32–37.
LIU Bin, HE Jie, LI Xueyan, *et al.* Characteristics of simultaneous deep treatment of nitrogen and phosphorus in pyrite bioreactors and microbial community structure [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(3): 32–37 (in Chinese).
- [21] 耿雅雯. 新型硫自养反硝化反应器深度脱氮应用研究 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021: 44–45.
GENG Yawen. Research on the Application of a New Type of Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor for Deep Nitrogen Removal [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2021: 44–45 (in Chinese).
- [22] WANG J, WEI Z P, CHU Y X, *et al.* Eutrophication levels increase sulfur biotransformation and emissions from sediments of Lake Taihu [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 887: 164054.
- [23] 钱志敏, 孙移鹿, 张雪宁, 等. 硫基功能材料在污水深度脱氮中的应用——研究进展与发展趋势 [J]. *能源环境保护*, 2023, 37(2): 1–15.
QIAN Zhimin, SUN Yilu, ZHANG Xuening, *et al.* Application of sulfur-based functional materials in deep nitrogen removal from wastewater—research progress and development trends [J]. *Energy and Environmental Protection*, 2023, 37(2): 1–15 (in Chinese).
- [24] CHRISTIANSON L E, LEPINE C, SHARRER K L, *et al.* Denitrifying bioreactor clogging potential during wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2016, 105: 147–156.

作者简介: 梁硕(1990–), 男, 河北廊坊人, 硕士, 高级工程师, 从事城镇污水处理设施设计与研究工作。

E-mail: 815008931@qq.com

收稿日期: 2024-08-09

修回日期: 2024-08-29

(编辑: 李德强)