

以硫-铁为基质的自养反硝化深度脱氮性能研究

刘艳芳¹, 刘晓帅¹, 尹思婕¹, 高 玮², 张妙雨¹, 吕建伟³, 李再兴¹

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018; 3. 河北华药环境保护研究所有限公司, 河北石家庄 052160)

[摘要] 通过静态批次实验, 探讨了硫自养反硝化、铁自养反硝化和硫铁协同脱氮系统的脱氮性能。实验结果表明, 单质硫自养反硝化过程中 pH 由 8.46 降至 5.46, 反应前期 NO_2^- -N 发生积累, 最高达 7.14 mg/L。TN 和 NO_3^- -N 随反硝化的进行呈不断降低趋势。反应 5 d 时 TN 去除率可达 100%。零价铁粉的加入可以有效起到缓冲 pH 的作用。在硫铁协同脱氮系统中, 硫铁体积比为 2:1、1:1 时, 反应体系的 pH 可维持在 6.54~7.12 之间。硫铁体积比为 2:1 时脱氮效果最佳, 反应 72 h 时 TN 去除率可达 98.5%, NO_3^- -N 去除率可达 100%。在铁自养反硝化过程中, pH 呈缓慢升高后逐渐稳定的趋势, 由 8.46 增至 10.02。与硫自养反硝化系统和硫铁协同脱氮系统相比, 铁自养反硝化系统的脱氮性能最差, 反应 9 d 时 TN 和 NO_3^- -N 的去除率分别为 40.52%、48.96%, 且在该体系中 NH_4^+ -N 有所积累。硫铁协同脱氮系统中以硫自养反硝化为主, 当硫铁体积比分别为 1:1、2:1、1:2 时, 硫自养反硝化对 NO_3^- -N 去除量所占比例分别为 96%、95%、88%。

[关键词] 硫自养反硝化; 铁自养反硝化; 协同; 脱氮

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)08-0136-06

Study on deep denitrification of autotrophic denitrification with sulfur-iron base substrate

LIU Yanfang¹, LIU Xiaoshuai¹, YIN Sijie¹, GAO Wei², ZHANG Miaoyu¹, LÜ Jianwei³, LI Zaixing¹

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 3. Hebei Huayao Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 052160, China)

Abstract: The nitrogen removal performance of sulfur autotrophic denitrification, iron autotrophic denitrification and sulfur-iron synergistic denitrification systems were investigated by static batch experiments. The experimental results showed that pH decreased from 8.46 to 5.46 during sulfur autotrophic denitrification, and NO_2^- -N accumulated up to 7.14 mg/L in the early stage of the reaction. TN and NO_3^- -N showed a decreasing trend with denitrification. The TN removal rate was up to 100% after 5 days of reaction. The addition of zero-valent iron powder can effectively play a role in buffering pH. In the sulfur-iron synergistic denitrification system, pH of the system could be maintained between 6.54 and 7.12 when the sulfur iron volume ratio was 2:1 and 1:1. The best denitrification effect was achieved when the sulfur iron volume ratio was 2:1, and the TN removal rate could reach 98.5% and NO_3^- -N removal rate could reach 100% after 72 hours of reaction. In the process of iron autotrophic denitrification, the pH showed a trend of slow increase and then gradual stabilization, from 8.46 to 10.02. Compared with the sulfur autotrophic denitrification system and the sulfur-iron synergistic denitrification system, the iron autotrophic denitrification system had the worst denitrification performance, and the removal rates of TN and NO_3^- -N were 40.52% and 48.96%, respectively, after 9 days of reaction. NH_4^+ -N was accumulated in the reaction system. The sulfur autotrophic denitrification was dominant in the sulfur-iron synergistic denitrification system, and the proportions of NO_3^- -N removal by sulfur autotrophic denitrification were 96%, 95%,

[基金项目] 河北省重点研发计划项目(19273601D)

and 88% when the sulfur iron volume ratios were 1:1, 2:1, and 1:2, respectively.

Key words: sulfur autotrophic denitrification; iron autotrophic denitrification; synergism; denitrification

硫自养反硝化是一种高效生物脱氮工艺,反应过程无需消耗有机碳,具有运行费用及污泥产率较低的优势^[1],但存在本身产酸及产硫酸盐(SO_4^{2-})的缺陷^[2]。为控制水体酸化,L. H. LIU等^[3]向硫自养反硝化系统中添加石灰石,在废水碱度不足时可起到缓冲作用,防止pH过度降低。Yaxian XU等^[4]添加碱性固体鸡蛋壳缓冲反应体系的pH,使出水pH呈中性状态。添加碱性固体材料虽然能解决硫自养反硝化系统pH降低的问题,但 SO_4^{2-} 大量积累仍对水质安全造成威胁,且添加石灰石易增加反硝化系统出水的硬度。寻找合适的缓冲材料及减少硫自养反硝化 SO_4^{2-} 的积累成为众多学者的关注焦点。

零价铁(Fe^0)是一种化学性质活泼的金属,易得、廉价。水中的硝酸盐(NO_3^-)可与 Fe^0 发生反应,是析氢产碱的过程^[5-6],对硫自养反硝化产酸能起到缓冲作用。根据反应条件不同,其还原产物有所区别,主要为 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 N_2 等,可降低水中的 NO_3^- 浓度^[7]。较多研究者认为 NO_3^- 与 Fe^0 发生反应的主要产物为 NH_4^+ 。也有研究认为在 Fe^0 体系中加入自养微生物会发生铁基自养反硝化反应^[8],极大程度地减少 Fe^0 与 NO_3^- 的化学反应,使 NO_3^- 主要转换为 N_2 ,减少 NH_4^+ 的生成。但当水溶液pH为中性或偏碱性时, Fe^0 表面极易形成铁的氧化层(如 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3),阻碍 Fe^0 与水溶液之间的电子传递,不利于反应体系的长期运行^[9]。笔者分别探讨了硫磺和零价铁为电子供体的自养反硝化脱氮性能,分析硫磺与零价铁不同配比下的脱氮效果,寻找适宜脱氮的硫铁体积比,为硫铁自养反硝化脱氮提供一定数据参考。

1 实验部分

1.1 实验材料与方法

实验所用污泥取自污水处理厂厌氧池,清洗2~3次,静置沉淀去除上清液,添加液体培养基^[10]进行驯化培养,为期40 d。硫磺粉、零价铁粉研磨均匀后过0.150 mm(100目)筛。模拟废水由一定量的 KNO_3 (NO_3^- -N质量浓度为50 mg/L)、 KH_2PO_4 及 NaHCO_3 配制而成。

实验使用反应器为500 mL厌氧瓶,瓶口塞有丁基橡胶塞加铝盖密封。每个厌氧瓶添加10 mL驯化

菌泥、400 mL模拟废水,氮吹10 min至缺氧状态。共设硫自养反硝化脱氮(SAD)、铁自养反硝化脱氮(IAD)、硫铁协同脱氮(S-Fe)3个系统,其中SAD系统添加30 mL硫磺粉,IAD系统添加30 mL零价铁粉,S-Fe系统添加不同比例的硫磺粉和零价铁粉,比例如表1所示,电子供体均过量。

表1 不同实验组的硫铁配比

Table 1 The ratio of sulfur to iron in different experimental groups

项目	S-Fe系统		
硫磺粉/mL	15	20	10
零价铁粉/mL	15	10	20
硫铁体积比	1:1	2:1	1:2

将厌氧瓶置于恒温振荡培养箱,调节温度为30℃,转速120 r/min。为防止取样过程中氧气混入,实验过程中用一次性无菌注射器穿透丁基橡胶塞取出5 mL模拟废水,测定 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 SO_4^{2-} 、TFe、 Fe^{2+} 、pH。

1.2 分析方法

分析方法参考《水和废水分析检测方法(第4版)》。 NO_3^- -N测定采用紫外分光光度法; NO_2^- -N测定采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NH_4^+ -N测定采用纳氏试剂分光光度法;TFe及 Fe^{2+} 测定采用吡啶分光光度法; SO_4^{2-} 测定采用铬酸钡光度法;pH测定采用玻璃电极法。

2 结果与分析

2.1 SAD系统的脱氮效果

SAD系统中各参数随时间的变化情况见图1。

由于进水未引入有机氮,因此将总氮(TN)视为总无机氮(NH_4^+ -N、 NO_2^- -N和 NO_3^- -N的总和)^[11]。SAD系统全程未检测到 NH_4^+ -N积累(一直在检出限下),因此该系统中TN为 NO_2^- -N和 NO_3^- -N之和。如图1所示,TN和 NO_3^- -N随反硝化的进行呈不断降低趋势,整体相差不明显,反应5 d时TN去除率可达100%; NO_2^- -N先升高后降至零,反应接近1 d时积累量达到峰值(7.14 mg/L),降至零说明 NO_2^- -N最终完全转换为 N_2 。

硫自养反硝化的副产物 SO_4^{2-} 随反硝化的进行不断积累,最终逐渐趋于平稳,反应结束后其积累量可达

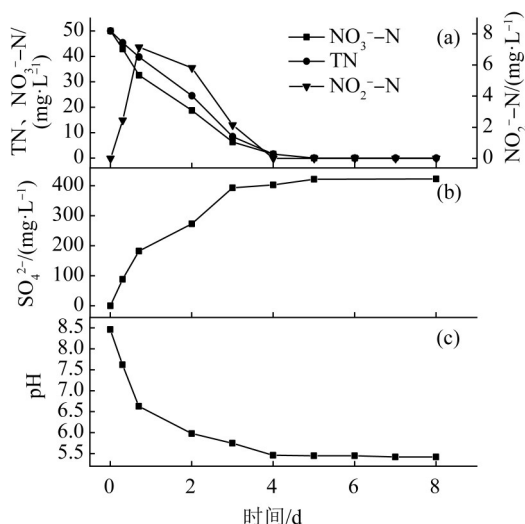
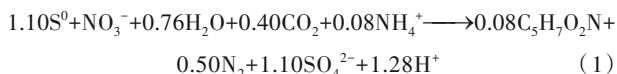


图1 SAD系统中各参数随时间的变化曲线

Fig. 1 Change curve of various parameters with time under SAD system

422.5 mg/L。由式(1)^[12]可计算出硫磺为电子供体时,硫自养反硝化理论 SO_4^{2-} 产量为1.70 mg/mg(以单位质量 NO_3^- 计)。假设进水 NO_3^- -N为50 mg/L,均被硫自养反硝化消耗, SO_4^{2-} 的理论生成量为376.5 mg/L。而SAD系统中 SO_4^{2-} 的产量较理论生成量偏高,原因可能是硫磺与瓶内残留的微量氧气发生氧化作用。



反应过程中SAD系统pH从8.46降至5.46,验证了单质硫自养反硝化是不断产生 H^+ 的过程。

pH是影响微生物生长存活的重要因素。作为生物驱动的脱氮工艺,自养反硝化的脱氮效率受pH的影响较大。牛建敏等^[13]研究表明,硫自养反硝化菌适宜的pH为6.5~8.0。pH较低时,反硝化菌内部电解质平衡会受到影响,使生物反硝化过程受到抑制,前期 NO_2^- -N的积累是由pH降低引起。张晓晨等^[14]调节硫自养反硝化反应器进水pH,进水pH为5时 NO_2^- -N积累要高于进水pH为6~7时。

2.2 IAD系统的脱氮效果

图2为IAD系统中各参数的变化情况。

由图2可以看出,TN和 NO_3^- -N随反应的进行不断降低,反应9 d时TN和 NO_3^- -N的去除率分别为40.52%、48.96%,TN去除率随时间的增加逐渐放缓; NO_2^- -N呈先升高后缓慢降低的趋势,在第3天

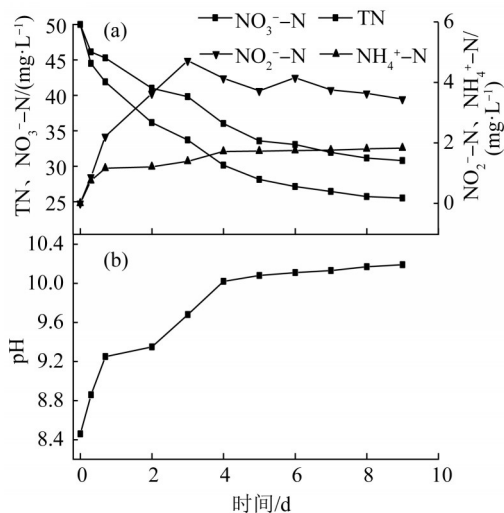


图2 IAD系统中各参数随时间的变化曲线

Fig. 2 Change curve of various parameters with time under the IAD system

达到峰值(4.72 mg/L),反应9 d时仍有3.45 mg/L的积累。 NH_4^+ -N随反应的进行呈不断升高的趋势,之后趋于平稳,反应9 d时积累量为1.83 mg/L。除零价铁与 NO_3^- 发生反应产生 NH_4^+ ,还可能是碱性条件下三价铁产物对污泥的吸附包裹更严密^[15],使得污泥活性下降,反硝化菌死亡,引起 NH_4^+ -N升高。

与SAD系统相比,IAD系统的脱氮效率低。原因可能在于:(1)零价铁作电子供体时利用率不如硫磺,反应过程中硫磺相对质软较轻,部分漂浮于溶液上,可与微生物更好地接触^[16],利用率高,这也是IAD系统 NO_2^- -N积累的因素。(2)IAD系统的pH较高,反应过程中维持在8.46~10.02。而燕倩^[17]研究认为零价铁自养反硝化的最适pH为6.0。张宁博等^[15]的研究表明碱性条件下铁的氢氧化物会影响微生物活性,pH从6.5升至8.0,反硝化速率由1.35 mg/(L·h)降为0.47 mg/(L·h)。IAD系统pH升高是由于零价铁在弱碱性水中可作为还原剂,产生 OH^- 。

2.3 S-Fe系统的脱氮效果

图3为S-Fe系统中各氮素随时间的变化情况。

由图3(a)可见,硫铁体积比为2:1时TN的去除效果最佳,反应3 d TN去除率为98.5%,硫铁体积比为1:2时效果最差;与SAD系统相比,硫铁体积比为2:1、1:1时对TN的去除具有优势。

对比图1(a)及图3(b),硫铁体积比为2:1、1:1

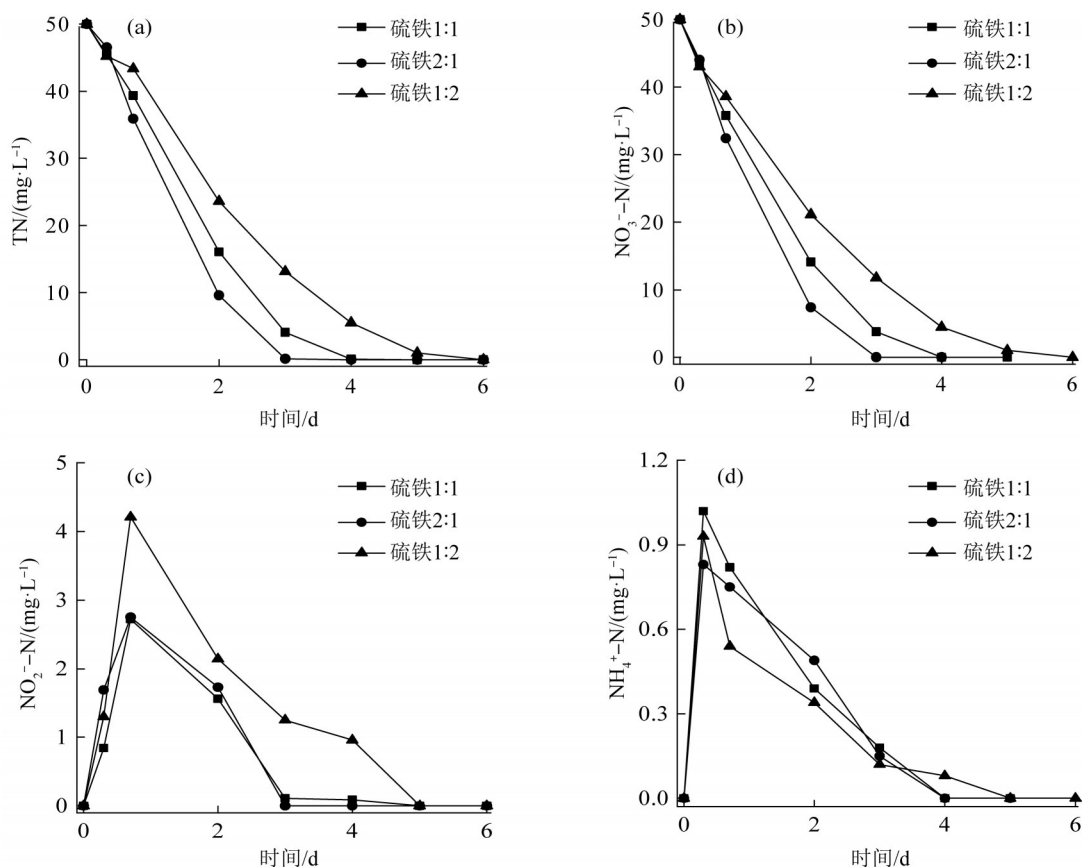


图3 S-Fe系统中各氮素随时间的变化曲线

Fig. 3 Change curve of various nitrogen content with time in S-Fe system

时,NO₃⁻-N初始去除速率与SAD系统的相差不大,反应2 d时S-Fe系统对NO₃⁻-N的去除速率均有所提高,分别提高22.66%、13.42%。在S-Fe系统中加入零价铁粉可起到缓冲pH作用,使脱氮阶段pH维持在6.54~7.12(见图4),为反硝化菌提供适宜的pH环境,形成硫-铁协同反硝化体系。硫铁体积比为1:2时NO₃⁻-N去除效果不及SAD系统,原因为硫磺比例低,减少了与微生物的有效接触面积;pH升高也是影响NO₃⁻-N去除率的因素。

图3(c)中,硫铁体积比为1:1、2:1、1:2时,NO₂⁻-N积累量在接近1 d时达到峰值,分别为2.72、2.75、4.21 mg/L,均呈先升高后降低的趋势,直到降为零。硫铁协同脱氮系统中NH₄⁺-N呈先升高后降低的趋势,与IAD系统存在差异,原因可能在于NH₄⁺-N为硫自养反硝化所需营养物质而被消耗掉,与K. BAALSRUUD等^[18]的结论类似。

S-Fe系统中SO₄²⁻的产量变化如图5所示。

由图5可见不同硫铁体积比下SO₄²⁻均呈先升高

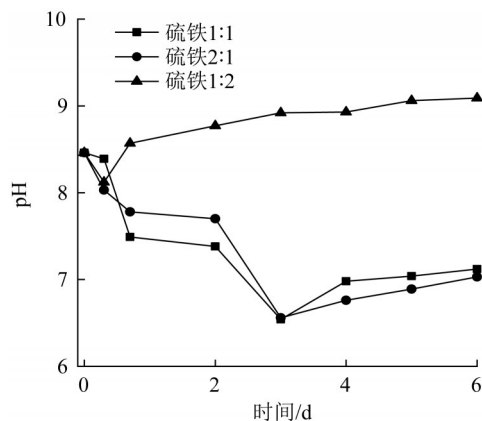


图4 S-Fe系统中pH变化曲线

Fig. 4 Change curve of pH with time in S-Fe system

后平稳的趋势。当硫铁体积比为1:1、2:1、1:2时系统中的SO₄²⁻分别为360.76、356.44、331.46 mg/L,与SAD系统(422.5 mg/L)相比有所降低。Lili ZHANG等^[19]研究认为铁生化脱氮为硫自养反硝化分担部分NO₃⁻-N,是硫铁协同系统中SO₄²⁻产量减少的原因。

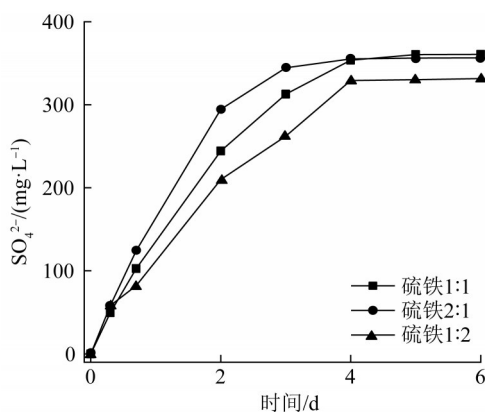
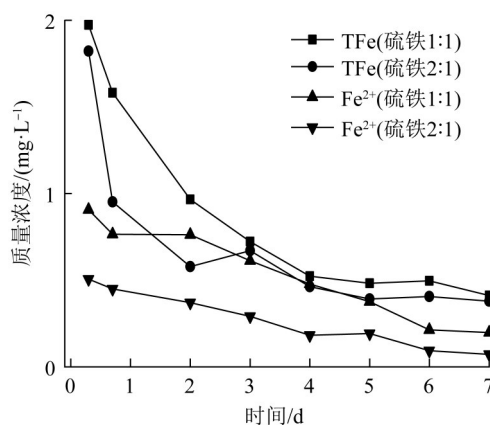
图5 S-Fe系统中SO₄²⁻随时间变化曲线Fig. 5 Change curve of SO₄²⁻ mass concentration with time in S-Fe system

图6为S-Fe系统中Fe²⁺、TFe随时间的变化曲线。

图6 S-Fe系统中Fe²⁺、TFe随时间的变化Fig. 6 Change curves of Fe²⁺ and TFe mass concentrations with time in S-Fe system

为避免取样后Fe²⁺被空气氧化,取样后首先测量Fe²⁺和TFE。由图6可见,反应7h硫铁体积比为1:1、2:1的S-Fe系统中TFE分别为1.974、1.823 mg/L,Fe²⁺质量浓度分别为0.907、0.507 mg/L。分析认为,铁离子可与水中OH⁻生成沉淀堆积在零价铁表面,减少内部零价铁与水的接触^[9],从而降低铁离子的释放,因此Fe²⁺和TFE呈降低趋势。

硫铁体积比为1:2的S-Fe系统和IAD系统中未检测出Fe²⁺、TFE,可能是由于这2个系统pH在8.5~10.2,铁离子几乎完全沉淀。

2.4 S-Fe系统中NO₃⁻-N去除情况

考察了S-Fe系统中铁粉和硫磺对NO₃⁻-N去除量的比例,见表2。

表2 S-Fe系统中铁粉和硫磺的NO₃⁻-N去除量占比Table 2 Proportion of NO₃⁻-N removal of iron and sulfur in S-Fe system

硫铁比	1:1		2:1		1:2	
	铁粉	硫磺	铁粉	硫磺	铁粉	硫磺
NO ₃ ⁻ -N去除量占比/%	4	96	5	95	12	88

与SAD系统相比,S-Fe系统添加了具有强还原性的零价铁^[20],可消耗水中残留的溶解氧,显著降低水中的氧化还原电位。因此,S-Fe系统中因硫磺氧化产生的SO₄²⁻忽略不计。李莹莹^[21]以SO₄²⁻生成量推算硫自养反硝化去除NO₃⁻-N在自养-异养协同脱氮中所占的比例,占比最高可达83.7%。本研究将S-Fe系统中SO₄²⁻实际生成量记为与理论生成量一致,根据SO₄²⁻生成量计算硫自养反硝化去除的NO₃⁻-N在NO₃⁻-N去除总量中所占比例,剩余部分即通过铁生化反应去除。

由表2可见,硫铁体积比为1:1、2:1、1:2时,硫自养反硝化对NO₃⁻-N的去除量占NO₃⁻-N去除总量的比例分别为96%、95%、88%,因此认为硫铁混合系统中仍以硫自养反硝化为主。

3 结论

(1)加入零价铁粉对硫自养反硝化pH可起到缓冲作用。铁自养反硝化的脱氮效果不佳,反应9d时TN和NO₃⁻-N的去除率分别为40.52%、48.96%。

(2)硫铁体积比是影响脱氮效率的重要因素,硫铁体积比为2:1时TN去除效果最佳,反应3d TN去除率为98.5%。

(3)实验发现硫铁混合系统以硫自养反硝化为主,硫铁体积比为1:1、2:1、1:2时,硫自养反硝化对NO₃⁻-N去除量所占比例分别为96%、95%、88%;铁粉的加入可减少硫自养反硝化时SO₄²⁻的积累。

参考文献

- [1] 李文超,石寒松,王琦,等.硫自养反硝化技术在污水处理中应用研究进展[J].水处理技术,2017,43(8):1-6.
LI Wenchao, SHI Hansong, WANG Qi, et al. Application progress of sulfur-autotrophic denitrification technology in wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(8): 1-6.
- [2] 邓旭亮,王爱杰,荣丽丽,等.硫自养反硝化技术研究现状与发展趋势[J].工业水处理,2008,28(3):13-16.
DENG Xuliang, WANG Aijie, RONG Lili, et al. Present state of the sulfur-autotrophic denitrification technique and its developing trend[J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(3): 13-16.

- [3] LIU L H, KOENIG A. Use of limestone for pH control in autotrophic denitrification: Batch experiments[J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37(8): 885-893.
- [4] XU Yaxian, CHEN Nan, FENG Chuanping, et al. Sulfur-based autotrophic denitrification with eggshell for nitrate-contaminated synthetic groundwater treatment[J]. *Environmental Technology*, 2016, 37(24): 3094-3103.
- [5] 赵爽, 汪晓军, 杨永愿. 化学法处理低浓度硝酸盐氮废水的试验研究[J]. *工业水处理*, 2018, 38(1): 79-82.
ZHAO Shuang, WANG Xiaojun, YANG Yongyuan. Experimental research on the chemical treatment of wastewater containing low content of nitrate nitrogen by zero-valent iron and sodium hypochlorite[J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(1): 79-82.
- [6] DENG Shihai, LI Desheng, YANG Xue, et al. Novel characteristics on micro-electrolysis mediated Fe(0)-oxidizing autotrophic denitrification with aeration: Efficiency, iron-compounds transformation, N_2O and NO_2^- accumulation, and microbial characteristics[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 387: 123409.
- [7] 范潇梦, 关小红, 马军. 零价铁还原水中硝酸盐的机理及影响因素[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(14): 5-9.
FAN Xiaomeng, GUAN Xiaohong, MA Jun. Mechanisms and affecting factors of nitrate reduction by zero-valent iron[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(14): 5-9.
- [8] ZHANG Meng, ZHANGZHU Gucheng, WEN Shuxian, et al. Chemolithotrophic denitrification by nitrate-dependent anaerobic iron oxidizing (NAIO) process: Insights into the evaluation of seeding sludge[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 345: 345-352.
- [9] 张文静, 黄勇, 毕贞, 等. ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3201-3207.
ZHANG Wenjing, HUANG Yong, BI Zhen, et al. Stability of ZVI-dependent autotrophic denitrification by ANAMMOX bacteria[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3201-3207.
- [10] BELLER H R. Anaerobic, nitrate-dependent oxidation of U(IV) oxide minerals by the chemolithoautotrophic bacterium *Thiobacillus denitrificans*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(4): 2170-2174.
- [11] XU Xiaochen, ZHANG Rao, JIANG Hongbin, et al. Sulphur-based autotrophic denitrification of wastewater obtained following graphite production: Long-term performance, microbial communities involved, and functional gene analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 306: 123117.
- [12] 李璟. 生物沸石反应器去除水中硝酸盐的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
LI Jing. Research on the removal of nitrate in water by biological zeolite reactor[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [13] 牛建敏, 李睿华. 理化因素对脱氮硫杆菌自养反硝化的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(1): 76-81.
- NIU Jianmin, LI Ruihua. Effects of the physicochemical factors on autotrophic denitrification by *thiobacillus denitrificans*[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(1): 76-81.
- [14] 张晨晓, 郭延凯, 杜海峰, 等. 硫自养反硝化反应器脱氮特性研究[J]. *河北科技大学学报*, 2016, 37(1): 96-101.
ZHANG Chenxiao, GUO Yankai, DU Haifeng, et al. Denitrification characteristics of a sulfur autotrophic denitrification reactor[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2016, 37(1): 96-101.
- [15] 张宁博, 李祥, 黄勇. pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5208-5214.
ZHANG Ningbo, LI Xiang, HUANG Yong. Effect of pH value on autotrophic denitrification process of zero valent iron substrate[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5208-5214.
- [16] 刘凡. 硫铁矿自养反硝化性能及条件优化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
LIU Fan. Study on performance and optimizing conditions for pyrite-based autotrophic denitrification[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [17] 燕倩. Fe^0/Fe^{2+} 自养反硝化脱氮效果及氮的归趋研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2020.
YAN Qian. Study on denitrification removal efficiency and nitrogen fate of Fe^0/Fe^{2+} autotrophic denitrification[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2020.
- [18] BAALSRUD K, BAALSRUD K S. Studies on *thiobacillus denitrificans*[J]. *Archiv Fur Mikrobiologie*, 1954, 20(1): 34-62.
- [19] ZHANG Lili, SONG Yunda, ZUO Yu, et al. Integrated sulfur- and iron-based autotrophic denitrification process and microbial profiling in an anoxic fluidized-bed membrane bioreactor[J]. *Chemosphere*, 2019, 221: 375-382.
- [20] 杨燕, 朱静平. 添加零价铁的反硝化系统中发生的主要反应[J]. *工业水处理*, 2021, 41(3): 77-82.
YANG Yan, ZHU Jingping. Main reactions in denitrification system with zero valent iron addition[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(3): 77-82.
- [21] 李莹莹. 硫自养反硝化生物滤池脱氮效能与微生物群落特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
LI Yingying. Research on denitrification efficiency and microbial community characteristics of sulfur autotrophic denitrification bio-filter[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[作者简介] 刘艳芳(1984—), 副教授, 博士。E-mail: lyftry@126.com。通讯作者: 李再兴, 教授, 博士。E-mail: li_zaixing@163.com。

[收稿日期] 2022-07-17(修改稿)