

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.14.006

# 硫铁矿自养反硝化工艺在生活污水处理中的研究进展

蒋严波<sup>1,2,3</sup>, 江晓铭<sup>2,3</sup>, 蔚阳<sup>1</sup>, 冯星灿<sup>2,3</sup>, 唐爽<sup>2,3</sup>,  
冉琪<sup>2,3</sup>, 管运涛<sup>1</sup>

(1. 清华大学深圳国际研究生院 广东省城市水循环与水环境安全保障工程技术研究中心, 广东 深圳 518055; 2. 广西北投环保水务集团有限公司 广西壮族自治区智慧水务工程研究中心, 广西 南宁 530022; 3. 广西北投环保水务集团有限公司 南宁市城乡供水排水工程研究中心, 广西 南宁 530022)

**摘要:** 硝酸盐污染已成为最重要的水质问题之一,低碳氮比废水在深度脱氮方面面临碳源不足的问题,自养反硝化无需有机碳源,以低成本、污泥产量少的优势受到广泛关注和研究。综述了近几年来硫铁矿自养反硝化工艺在去除废水中硝酸盐方面的研究,介绍了其自养反硝化时的微生物特点,并阐述了该工艺及其协同其他工艺的研究进展,阐明其潜力与局限性,以期为基于硫铁矿自养反硝化处理废水的进一步研究与应用提供理论依据。

**关键词:** 硫铁矿; 自养反硝化; 生活污水处理; 协同工艺

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)14-0029-07

## Research Progress of Pyrite Autotrophic Denitrification Process in Domestic Sewage Treatment

JIANG Yan-bo<sup>1,2,3</sup>, JIANG Xiao-ming<sup>2,3</sup>, WEI Yang<sup>1</sup>, FENG Xing-can<sup>2,3</sup>,  
TANG Shuang<sup>2,3</sup>, RAN Qi<sup>2,3</sup>, GUAN Yun-tao<sup>1</sup>

(1. Guangdong Provincial Engineering Research Center for Urban Water Recycling and Environmental Safety, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Guangxi Engineering Research Center for Smart Water, Guangxi Beitou Environmental Protection & Water Group Co. Ltd., Nanning 530022, China; 3. Nanning Engineering Research Center for Urban and Rural Water & Wastewater, Guangxi Beitou Environmental Protection & Water Group Co. Ltd., Nanning 530022, China)

**Abstract:** Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) poses a significant threat to water quality, emerging as a crucial pollution concern. Additionally, low C/N ratio wastewater faces challenges due to a shortage of carbon source. Autotrophic denitrification has garnered attention and research interest for its advantages, including no need for external carbon source, low cost and low sludge yield. In this review, we provide an overview of recent research progress in pyrite autotrophic denitrification processes and technologies for the systematic removal of  $\text{NO}_3^-$ -containing wastewater system. The microbial characteristics in pyrite autotrophic denitrification are analyzed. In addition, the research progresses of the pyrite autotrophic

基金项目: 广西壮族自治区重点研发计划项目(桂科 AB22035081)

通信作者: 管运涛 E-mail: guanyt@tsinghua.edu.cn

denitrification technology are summarized, including multiple cooperative processes, potential and limitations. Ultimately, this review aims to offer novel insights and a theoretical foundation for achieving efficient wastewater treatment.

**Key words:** pyrite; autotrophic denitrification; domestic sewage treatment; collaborative process

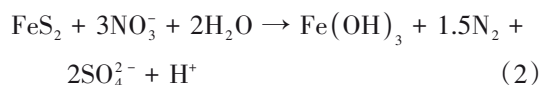
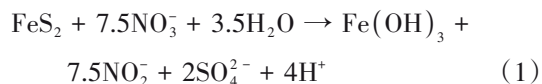
相较于传统异养反硝化工艺,自养反硝化工艺因不需外加有机碳源、产泥量少等优点而受到广泛关注<sup>[1]</sup>。硫铁矿分布广泛,其主要成分是FeS<sub>2</sub>,是理想且廉价的自养反硝化电子供体。因此,对硫铁矿自养反硝化工艺的研究现状进行了综述,包括硫铁矿自养反硝化的原理和微生物群落特点、在水处理中的应用,以及与多种机制的协同作用等,同时对该工艺发展进行展望,为其进一步研究与推广应用提供参考。

## 1 硫铁矿自养反硝化工艺

### 1.1 硫铁矿自养反硝化原理分析

硫铁矿自养反硝化是指硫自养反硝化菌和铁自养反硝化菌分别将硫铁矿中还原性的硫和铁作为电子供体和能源,通过对还原态硫和铁氧化获得能量,同时以硝酸盐或亚硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>或NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)为末端电子受体,通过自养微生物分泌的酶进行电子转移,利用无机碳(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>-</sup>等)合成细胞,将其还原为氮气,从而实现自养反硝化对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的去除<sup>[2-3]</sup>。另外,在硫铁矿自养反硝化过程中,生成的Fe<sup>3+</sup>能够与污水中的PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P发生反应生成FePO<sub>4</sub>等沉淀,从而实现同步脱氮除磷<sup>[4]</sup>。

硫铁矿自养反硝化脱氮原理如下:



### 1.2 硫铁矿自养反硝化微生物群落

自养反硝化工艺的脱氮效果最终取决于微生物的种类和活性,通过对微生物群落结构和多样性的分析,可从微生物代谢机制的层面解释反硝化效果<sup>[5]</sup>。自养微生物种类因电子供体不同而有所差异,以硫化物为电子供体、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N为电子受体进行反硝化的自养反硝化微生物被称为反硝化脱硫菌(NR-SOB),其主要菌属为硫杆菌属(*Thiobacillus*)和硫单胞菌属(*Sulfurimonas*)<sup>[6]</sup>。目前,*Thiobacillus*

*denitrificans*是研究最为清楚的反硝化脱硫菌,它是一种严格的专性无机化能自养微生物,分布较广<sup>[7]</sup>,*Thiobacillus*中*Thiobacillus ferrooxidans*(氧化亚铁硫杆菌)具有氧化Fe<sup>2+</sup>、还原NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的特性,是铁自养反硝化中常见的一种菌属<sup>[8]</sup>。*Thiobacillus*自养反硝化经历了一系列的连续反应过程:NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N经过硝酸盐还原酶作用生成NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,然后在亚硝酸盐还原酶作用下生成NO,再经氧化还原酶作用生成N<sub>2</sub>O,最后经过氧化亚氮还原酶作用被还原为N<sub>2</sub>。因此,这是一类在污水同步脱硫反硝化处理工艺中的主要功能微生物<sup>[9]</sup>。

对于硫铁矿,Bosch等<sup>[10]</sup>已经通过实验证明硫杆菌属和硫单胞菌属均能以硫铁矿为电子供体去除污水中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N。还有研究者对硫铁矿含水层中的微生物进行了分析,发现其中存在*Thiobacillus denitrificans*,且含水层发生了生物脱氮作用,生物群落分析显示脱氮硫杆菌为主要功能菌,脱氮反应后脱氮硫杆菌的相对丰度上升,且硫铁矿的存在至关重要。随着对具有自养反硝化功能细菌和群落结构认识的加深,获得和培养高效脱氮除硫菌等优势菌种对硫铁矿自养反硝化工艺具有重要的意义。

## 2 硫铁矿自养反硝化工艺研究与应用

### 2.1 硫铁矿自养反硝化工艺研究

目前,以还原性的金属硫化物硫铁矿为电子供体的硫自养反硝化作用的探讨仅仅处于起步阶段,近年来的研究结果见表1。Torrentó等<sup>[11]</sup>在实验室内进行了批次实验和渗流实验,结果表明,在反硝化脱氮过程中硫铁矿起到了电子供体的作用,在适当的条件下,以硫铁矿为底物去除NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的效率可以达到100%。但该工艺存在自养反硝化菌生长速度慢导致启动时间较长、硫酸盐副产物产量高的弊端<sup>[12-13]</sup>。而NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N还原速率与硫铁矿粒度、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度和pH有关,随着硫铁矿粒度的减小,反硝化程度和反硝化速率增大。Pu等<sup>[14]</sup>试验结果表明,经过10%的HCl浸泡处理30 min后,与无HCl预处理系

统相比,硫铁矿比表面积增大且 $\text{NO}_3^-$ -N还原速率更快。Tong等<sup>[15]</sup>研究了硫铁矿自养反硝化体系中预处理、粒度、加入量和生物量因素的影响,通过响应面分析得到颗粒硫铁矿反硝化的最佳条件:硫铁矿投加量为125 g/L,生物量浓度(VSS)为1 250 mg/L,颗粒硫铁矿的尺寸为0.82~1.02 mm。

表1 硫铁矿自养反硝化工艺研究

Tab.1 Study on autotrophic denitrification of pyrite

反应器运行时间/d	材料	进水 $\text{NO}_3^-$ -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水 $\text{NO}_3^-$ -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	水力停留时间/h	粒度/mm	脱氮效率/%
160	硫铁矿	30.38	5.58	69.6	0.03~0.05	81.0
6	硫铁矿	55	0.05		0.15~0.25	99.0
12	硫铁矿	100	0.01		0.82~1.02	>99.0
210	硫铁矿/硫/牡蛎壳	50	0.59	6	1~3	99.2
85	硫铁矿/白云石	30	10.51		5~10	>66.4
74	硫铁矿/硫磺	40	10.55	2.5	2~5	72.2

硫铁矿还可以通过搭配其他材料组成混合营养反硝化系统进行脱氮处理。李芳芳等<sup>[16]</sup>采用硫铁矿/白云石组合形式进行了流动实验,在12~14℃的低温条件下停止进水,饥饿30 d后再恢复进水,最终出水 $\text{NO}_3^-$ -N从26.56 mg/L降至10.51 mg/L,证实了该组合材料在低温条件下也能保持良好的脱氮效果。周娅等<sup>[17]</sup>构建了硫磺/硫铁矿反应器,在进水TN约为40 mg/L时,TN去除率为72.2%,证明该系统脱氮性能优于单独以硫铁矿为硫源的自养反硝化系统。

## 2.2 硫铁矿自养反硝化工艺的应用

硫铁矿近年来受到很多关注,并开始用于污水处理。很多研究中,硫铁矿都是以颗粒状加入滤池,在系统中作为反硝化滤池的滤料、微生物载体的同时作为电子供体直接参与反应。目前,硫铁矿自养反硝化在污水处理中的应用情况<sup>[18-25]</sup>见表2。

李田<sup>[18]</sup>在以硫铁矿作为介质的生物滤池处理实际污水的过程中,发现总氮最高去除率为78.5%,并且在最高总氮进水浓度为58 mg/L条件下,出水总氮浓度仍能维持在10 mg/L左右。Kong等<sup>[3]</sup>在好氧/缺氧生物滤池中对硫铁矿驱动的自养

反硝化脱氮性能进行了研究,发现TN去除率和 $\text{NO}_3^-$ -N去除率分别为70.4%和80.7%。苏晓磊<sup>[20]</sup>将硫-硫铁矿填充床用于实际城市污水深度脱氮除磷,第一级纯硫填充层用来生物硫氧化脱氧,硫铁矿床在缺氧条件下进行硫自养反硝化和 $\text{PO}_4^{3-}$ -P的沉淀反应,使出水水质符合北京一级A标准。除此之外,硫铁矿自养反硝化也开始应用于生物滞留系统和人工湿地,Chen等<sup>[21]</sup>建立了以硫铁矿为基质的生物滞留系统处理低碳雨水,运行期间对 $\text{NH}_4^+$ -N、TN和TP的平均去除率均在80.0%以上,且在进水无碳源或低碳源的情况下增强了生物滞留系统的反硝化作用。

表2 硫铁矿自养反硝化在污水处理中的应用

Tab.2 Application of Fe-S autotrophic denitrification in wastewater treatment

污水种类	处理工艺	进水TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	TN去除率/%	进水 $\text{NO}_3^-$ -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	$\text{NO}_3^-$ -N去除率/%	TP去除率/%	水力停留时间/h
城市生活污水	生物滤池	58	78.5				6
	循环填充生物过滤器			15	>90.0	>70.0	8~11
	好氧/缺氧生物滤池	59.25	70.4	55.79	80.7	82.6	0.25
	填充床滤池	7~12	>57.1	7~12	>57.1	>33.3	0.6~1.8
雨水	生物滞留系统	15.50±0.80	89.3±3.0	9.30	88.1	81.6±3.0	72
	生物滞留系统(4 h强降雨)	5	(95.3±1.4)~(98.0±0.2)	3	(8.6±6.5)~(17.7±7.0)	69.7~88.2	较短
农村生活污水	人工湿地	第一年	10.00±4.90				72
		第二年	19.60±5.10	69.4±21.4		87.7±14.2	
		第三年	8.90±1.40				
	人工湿地(C/N=1.5)	58.51±3.67	>95.0	58.23±3.74	99.2±1.1	1.8±0.4	72
	人工湿地(平均温度6.7℃)			33.90±1.60	61.1±7.3	74.7±4.7	24

当前,硫铁矿自养反硝化工艺应用的研究主要还是在实验室条件下进行的小规模水处理层面,在污水处理领域欠缺实践经验,并且该工艺单独使用具有一定的局限性,技术和工艺还不够成熟,应用于实际的污水处理中还需要进一步的研究。



### 3 硫铁矿自养反硝化与多种机制的协同

自养反硝化单独脱氮存在微生物培养时间长,脱氮效率慢等问题,因此常与其他工艺协同应用。目前,硫铁矿自养反硝化常与厌氧氨氧化(Anammox)、同步硝化反硝化(SND)和异养反硝化作用协同脱氮<sup>[26-30]</sup>(见表3),并且有着较好的脱氮效果,协同脱氮领域也逐渐成为研究热门。

表3 硫铁矿自养反硝化与多种机制的协同及应用

Tab.3 Synergy and application of pyrite autotrophic denitrification and multiple mechanisms

协同工艺	优点	难点	材料	应用	进水 $\text{NO}_3^-/\text{N}$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{NO}_3^-/\text{N}$ 去除率/%
硫铁矿自养反硝化与厌氧氨氧化耦合	反应器启动快;污泥产量少;氮硫转化快	固体电子提供效率低;硫铁矿对微生物具有潜在毒性	硫铁矿	生物滤池	30	90.0
同步硝化-硫铁矿自养反硝化协同	节约反应时间;减少碱度的投加;节约工艺所需空间	溶解氧难以控制;亚硝化阶段保持条件困难	硫铁矿	流化床反应器	150	91.0
			硫铁矿/硫	曝气生物滤池	30	>94.1
			煅烧硫铁矿/硫	曝气生物滤池	30	>94.0
异养反硝化-硫铁矿自养反硝化协同	脱氮速率较快;副产物少;有利于硫循环	需要投加外部碳源;硫酸盐产量高;易导致 $\text{NO}_2^-/\text{N}$ 积累	$\text{FeS}_2$ /有机碳		20	>90.0
			硫铁矿/PHBV		25	96.0
			硫铁矿/玉米芯	生物滞留系统	$3.72\pm 0.71$	$87.0\pm 12.0$

#### 3.1 硫铁矿自养反硝化与厌氧氨氧化协同及应用

厌氧氨氧化是厌氧氨氧化菌在厌氧条件下,以 $\text{NH}_4^+/\text{N}$ 作为电子供体, $\text{NO}_2^-/\text{N}$ 作为电子受体,通过两者间的电子传递生成 $\text{N}_2$ 的生化过程。该工艺在脱氮处理中具有相当广阔的应用前景,但控制条件较复杂,因此厌氧氨氧化常与其他工艺协同作用。自养反硝化菌( $X_{\text{AD}}$ )和Anammox菌( $X_{\text{AN}}$ )代谢途径的互补性和增殖速率的一致性,使其耦合可以实现稳定的共存关系。除了单质硫自养反硝化能耦合厌氧氨氧化外,铁质自养反硝化也能与厌氧氨氧化耦合脱氮。Bi等<sup>[31]</sup>对厌氧氨氧化与铁自养反硝化耦合的研究表明,厌氧氨氧化菌对其中含有 $\text{NO}_3^-/\text{N}$ 和

铁的小生境显示出高度的适应性,在60 d的运行中, $\text{NO}_3^-/\text{N}$ 去除率和TN去除率最高分别达到88.43%和80.77%。近些年来,研究人员认为硫铁矿同时包含了铁元素和硫元素,而且硫铁矿自养反硝化的中间产物就有厌氧氨氧化菌所需要的 $\text{NO}_2^-/\text{N}$ ,因此硫铁矿自养反硝化与厌氧氨氧化耦合实现脱氮就有了理论可能性(见图1)。Wang等<sup>[26]</sup>通过硫铁矿驱动自养反硝化生物滤池的实验发现,在水力停留时间(HRT)为6 h时,对 $\text{NH}_4^+/\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^-/\text{N}$ 的去除率均在90.0%以上, $\text{NH}_4^+/\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^-/\text{N}$ 的去除量分别为52.8和59.4  $\text{mgN}/(\text{L}\cdot\text{d})$ ,而且反应器内的微生物群落结构显示功能性自养反硝化菌、硝化菌和厌氧氨氧化菌富集明显。

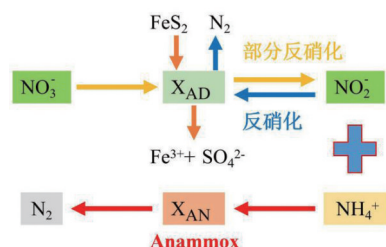


图1 硫铁矿自养反硝化联合厌氧氨氧化协同脱氮

Fig.1 Synergistic denitrification of pyrite autotrophic denitrification combined with Anammox

#### 3.2 同步硝化-硫铁矿自养反硝化协同及应用

同步硝化反硝化是硝化与反硝化反应在好氧间与缺氧间的低氧区同时发生,能节约空间和反应时间,可通过控制如溶解氧等反应条件来实现。Carboni等<sup>[27]</sup>发现,在以硫铁矿为驱动的流化床反应器中通入1.5  $\text{mg/L}$ 的溶解氧,有利于同时去除 $\text{NH}_4^+/\text{N}$ 和以硫铁矿为电子供体的 $\text{NO}_3^-/\text{N}$ ,最高除氮量达到139.5  $\text{mgN}/(\text{L}\cdot\text{d})$ 。Li等<sup>[28]</sup>在采用硫磺和硫铁矿作为填料的曝气生物滤池中发现,当溶解氧为1.2~1.5  $\text{mg/L}$ 时,在进水 $\text{NO}_3^-/\text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+/\text{N}$ 分别为30、8  $\text{mg/L}$ 的条件下,出水 $\text{NO}_3^-/\text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+/\text{N}$ 分别低于0.47和0.65  $\text{mg/L}$ ,实验结果证明在填充硫铁矿的曝气生物滤池中发生同时硝化反硝化具有可行性。Li等<sup>[29]</sup>采用煅烧硫铁矿的新型曝气生物滤池处理二级出水,实验表明出水总氮从40.21  $\text{mg/L}$ 降至1.22  $\text{mg/L}$ ;此外,对16S rRNA基因的高通量测序检测发现,反应器中同时富集了硝化菌和自养反硝化菌,验证了同时硝化和自养反硝化同步脱氮的可能。虽然同步硝化-自养反硝化可以缩短反应时间

和节约空间,但是反应体系存在工艺复杂特别是溶解氧浓度控制难度大的问题。

### 3.3 异养反硝化-硫铁矿自养反硝化协同及应用

研究<sup>[32]</sup>发现,向自养反硝化系统添加有机物促进了 $\text{NO}_3^-$ -N的去除,且降低了产酸量和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的生成量。以硫铁化合物为基质的自养反硝化耦合异养反硝化,可实现多种污染物的同步高效脱除<sup>[33]</sup>(见图2)。Zhao等<sup>[34]</sup>以硫铁矿与有机碳为电子供体,构建了一种混合异养细菌和亚铁自养细菌的反硝化系统,用于处理低C/N比废水。实验发现,在C/N比为0.5和进水 $\text{NO}_3^-$ -N为20 mg/L的情况下,系统运行48 h内出水TN为0.38 mg/L,明显低于单独的异养系统(14.08 mg/L)和亚铁自养系统(12.00 mg/L)。Zhou等<sup>[12]</sup>引入聚3-羟基丁酸-羟基戊酸(PHBV)与硫铁矿组合成混合营养系统,实验结果表明,在自然好氧条件下的硫铁矿-PHBV体系中,其反硝化率最高为0.65 mg $\text{NO}_3^-$ -N/(L·h),硫酸盐产量<5 mg/L,且对氮和磷的去除率分别为96.0%和25.0%。Weng等<sup>[30]</sup>在生物滞留系统中选择玉米芯-硫铁矿介质对雨水径流中的溶解性营养污染物进行有效控制,结果表明,玉米硫铁矿层状生物滞留系统能保持较低的出水COD浓度,具有较高的稳定性和对溶解性营养物质的去除率,对 $\text{NH}_4^+$ -N、TN和 $\text{PO}_4^{3-}$ -P的平均去除率分别为83.6%、70.5%和76.3%,异养反硝化和自养反硝化在该设备中重合,创造了一个更丰富和稳定的微生物群落结构。

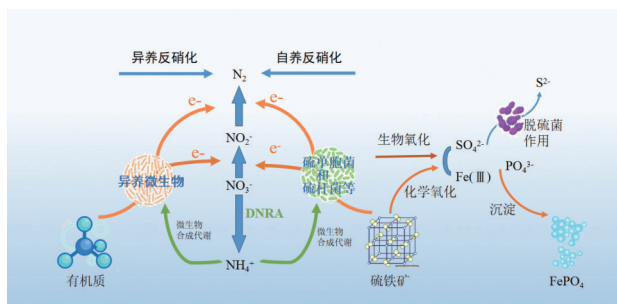


图2 异养反硝化与硫铁矿自养反硝化联合作用

Fig.2 Heterotrophic denitrification combined with pyrite autotrophic denitrification

## 4 结语

硫铁矿作为一种新兴材料,同时兼备硫自养反硝化菌和铁自养反硝化菌两重自养反硝化反应,不需要外加碳源,具有一定的优势,但是目前对硫铁矿自养反硝化工艺的研究仍然较为有限,应用于实

际的污水处理工艺中有优势但是也存在局限性,应对未来日益复杂的水体处理,从节能降耗的方向出发,其脱氮处理工艺将以多种机制协同作用为主,从更好的低耗高效且无需外加有机碳源的角度看,以硫化物为基质的自养反硝化耦合厌氧氨氧化工艺将成为利用硫自养反硝化的主流脱氮工艺,这不但能同步脱氮除硫,而且能回收资源和碳源利用,在污水处理新概念领域具有更好的发展前景。未来的硫铁矿自养反硝化工艺仍需进一步研究,具体如下:

① 在机理机制方面,应明确工艺中碳源量、电子供体量与微生物群落演替关系,可通过高通量测序等技术明确优势菌种的变化,构建核心微生物菌落结构,使功能微生物更好地发挥处理效用。如何提高碳源利用率,改善电子供体有效性仍是未来研究重点。

② 探究硫铁矿自养反硝化工艺与多种机制的耦合原理仍是难题,需分析各个脱氮过程的关系并对其影响因素进行精准调控,明确最佳反应条件,寻求最低运行成本、最佳脱氮效果的耦合工艺。

③ 当前更多的研究还是在实验室条件下进行的,需要通过系统集成优化等方式,开发基于硫铁矿自养反硝化的高效污水处理工艺,为我国污水处理领域的碳减排提供更多更优的路径选择,这对整个污水处理行业实现碳减排具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] QIN Y J, WU C L, CHEN B Q, *et al.* Short term performance and microbial community of a sulfide-based denitrification and Anammox coupling system at different N/S ratios [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122130.
- [2] HU Y S, WU G X, LI R H, *et al.* Iron sulphides mediated autotrophic denitrification: an emerging bioprocess for nitrate pollution mitigation and sustainable wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2020, 179: 115914.
- [3] KONG Z, LI L, FENG C P, *et al.* Comparative investigation on integrated vertical-flow biofilters applying sulfur-based and pyrite-based autotrophic denitrification for domestic wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 125-135.
- [4] YANG Y, CHEN T H, MORRISON L, *et al.*

- Nanostructured pyrrhotite supports autotrophic denitrification for simultaneous nitrogen and phosphorus removal from secondary effluents [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 328: 511–518.
- [5] QIAN J, WEI L, WU Y G, *et al.* A comparative study on denitrifying sludge granulation with different electron donors: sulfide, thiosulfate and organics [J]. Chemosphere, 2017, 186: 322–330.
- [6] NICA D, DAVIS J L, KIRBY L, *et al.* Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2000, 46 (1): 61–68.
- [7] WOO Y C, LEE J J, KIM H S. Removal of nitrogen from municipal wastewater by denitrification using a sulfur-based carrier: a pilot-scale study [J]. Chemosphere, 2022, 296: 133969.
- [8] 王超远. 氧化亚铁硫杆菌在工业中的应用 [J]. 煤炭工艺, 2020, 39(3): 143–145.  
WANG Chaoyuan. Application of *Thiobacillus ferrooxidans* in industry [J]. Coal Technology, 2020, 39 (3): 143–145 (in Chinese).
- [9] VO T K Q, KANG S, AN S A, *et al.* Exploring critical factors influencing on autotrophic denitrification by elemental sulfur-based carriers in upflow packed-bed bioreactors [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 40: 101866.
- [10] BOSCH J, LEE K Y, JORDAN G, *et al.* Anaerobic, nitrate-dependent oxidation of pyrite nanoparticles by *Thiobacillus denitrificans* [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(4): 2095–2101.
- [11] TORRENTÓ C, CAMA J, URMENETA J, *et al.* Denitrification of groundwater with pyrite and *Thiobacillus denitrificans* [J]. Chemical Geology, 2010, 278(1/2): 80–91.
- [12] ZHOU Q, JIA L X, WU W L, *et al.* Introducing PHBV and controlling the pyrite sizes achieved the pyrite-based mixotrophic denitrification under natural aerobic conditions: low sulfate production and functional microbe interaction [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 366: 132986.
- [13] CHEN X Y, YANG L, CHEN F, *et al.* High efficient bio-denitrification of nitrate contaminated water with low ammonium and sulfate production by a sulfur/pyrite-based bioreactor [J]. Bioresource Technology, 2022, 346: 126669.
- [14] PU J Y, FENG C P, LIU Y, *et al.* Pyrite-based autotrophic denitrification for remediation of nitrate contaminated groundwater [J]. Bioresource Technology, 2014, 173: 117–123.
- [15] TONG S, RODRIGUEZ-GONZALEZ L C, PAYNE K A, *et al.* Effect of pyrite pretreatment, particle size, dose, and biomass concentration on particulate pyrite autotrophic denitrification of nitrified domestic wastewater [J]. Environmental Engineering Science, 2018, 35(8): 875–886.
- [16] 李芳芳, 施春红, 李海波, 等. 饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 [J]. 环境科学, 2017, 38 (3): 1109–1115.  
LI Fangfang, SHI Chunhong, LI Haibo, *et al.* Impact of starvation conditions on biological community structure in sulfur autotrophic denitrification reactor [J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 1109–1115 (in Chinese).
- [17] 周娅, 买文宁, 梁家伟, 等. 硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能 [J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1885–1891.  
ZHOU Ya, MAI Wenning, LIANG Jiawei, *et al.* Nitrogen removal performance of a sulfur/pyrite autotrophic denitrification system [J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1885–1891 (in Chinese).
- [18] 李田. 硫铁矿为电子供体的硫自养反硝化滤床深度脱氮研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 34–44.  
LI Tian. Research on Deep Denitrification of Sulfur-autotrophic Denitrification Filter Bed with Pyrite as Electron Donor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 34–44 (in Chinese).
- [19] DI CAPUA F, MASCOLO M C, PIROZZI F, *et al.* Simultaneous denitrification, phosphorus recovery and low sulfate production in a recirculated pyrite-packed biofilter (RPPB) [J]. Chemosphere, 2020, 255: 126977.
- [20] 苏晓磊. 硫—硫铁矿填充床用于城市污水深度脱氮除磷的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015: 39–58.  
SU Xiaolei. Study on the Application of Sulfur–Sulfur Iron Packed Bed in the Removal of Nitrogen and Phosphorus from Sewage [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015: 39–58 (in Chinese).
- [21] CHEN Y F, SHAO Z Y, KONG Z, *et al.* Study of pyrite based autotrophic denitrification system for low-carbon source stormwater treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 37: 101414.

- [22] KONG Z, SONG Y Q, SHAO Z Y, *et al.* Biochar-pyrite bi-layer bioretention system for dissolved nutrient treatment and by-product generation control under various stormwater conditions [J]. *Water Research*, 2021, 206: 117737.
- [23] GE Z B, WEI D Y, ZHANG J, *et al.* Natural pyrite to enhance simultaneous long-term nitrogen and phosphorus removal in constructed wetland: three years of pilot study [J]. *Water Research*, 2019, 148: 153–161.
- [24] JIANG S J, XU J L, WANG H X, *et al.* Study of the effect of pyrite and alkali-modified rice husk substrates on enhancing nitrogen and phosphorus removals in constructed wetlands [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 54234–54249.
- [25] SI Z H, SONG X S, WANG Y H, *et al.* Natural pyrite improves nitrate removal in constructed wetlands and makes wetland a sink for phosphorus in cold climates [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124304.
- [26] WANG Y F, WU G X, ZHENG X N, *et al.* Synergistic ammonia and nitrate removal in a novel pyrite-driven autotrophic denitrification biofilter [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 355: 127223.
- [27] CARBONI M F, ARRIAGA S, LENS P N L. Simultaneous nitrification and autotrophic denitrification in fluidized bed reactor using pyrite and elemental sulfur as electron donor [J]. *Water Science and Engineering*, 2023, 16(2): 143–153.
- [28] LI Y F, GUO J B, LI H B, *et al.* Effect of dissolved oxygen on simultaneous removal of ammonia, nitrate and phosphorus via biological aerated filter with sulfur and pyrite as composite fillers [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 296: 122340.
- [29] LI H B, LI Y F, GUO J B, *et al.* Effect of calcinated pyrite on simultaneous ammonia, nitrate and phosphorus removal in the BAF system and the  $\text{Fe}^{2+}$  regulatory mechanisms: electron transfer and biofilm properties [J]. *Environmental Research*, 2021, 194: 110708.
- [30] WENG Z S, MA H Y, MA J C, *et al.* Corn-cob-pyrite bioretention system for enhanced dissolved nutrient treatment: carbon source release and mixotrophic denitrification [J]. *Chemosphere*, 2022, 306: 135534.
- [31] BI Z, ZHANG W J, SONG G, *et al.* Iron-dependent nitrate reduction by Anammox consortia in continuous-flow reactors: a novel prospective scheme for autotrophic nitrogen removal [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 582–588.
- [32] OH S E, YOO Y B, YOUNG J C, *et al.* Effect of organics on sulfur-utilizing autotrophic denitrification under mixotrophic conditions [J]. *Journal of Biotechnology*, 2001, 92(1): 1–8.
- [33] 王鑫瑜. 硫铁尾矿自养反硝化系统构建及市政污水氮磷污染物去除能效研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.
- WANG Xinyu. Construction of Autotrophic Denitrification System for Pyrite Tailings and Study on the Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus Pollutants from Municipal Wastewater [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2021 (in Chinese).
- [34] ZHAO L F, XUE L Y, WANG L, *et al.* Simultaneous heterotrophic and  $\text{FeS}_2$ -based ferrous autotrophic denitrification process for low-C/N ratio wastewater treatment: nitrate removal performance and microbial community analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154682.

**作者简介:**蒋严波(1982–),男,湖南隆回人,博士研究生,高级工程师,广西壮族自治区智慧水务工程研究中心主任、南宁市城乡供水排水工程研究中心主任、广西科技评审专家、广西第七批“十百千”知识产权领军人才、广西专利技术调查官,主要研究方向为水处理与控制技术。

**收稿日期:**2022-08-09

**修回日期:**2022-08-21

(编辑:丁彩娟)