

Research and Progress of Pyrite-Based Autotrophic Denitrification

Peilin Zhong, Xianlin Zeng, Jing Hou, Chuanyi Zhang*

School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Email: chuanyizhang@163.com, 874460154@qq.com

Received: Sep. 26th, 2018; accepted: Oct. 13th, 2018; published: Oct. 20th, 2018

Abstract

Nitrogen is one of the major contaminants in sewage, to which biological denitrification is an effective and economic solution. Compared to classic denitrification, the sulfur-based autotrophic denitrification consumes less energy and carbon source with less sludge production. Thus, this essay will illustrate its theory and the main parameters, showing the impact factors of the pyrite-based autotrophic denitrification process. Moreover, three different reactors are analyzed for their differences of denitrification performance and operation, which leads to a new research direction of this advanced water treatment.

Keywords

Nitrogen Pollution, Pyrite-Based Autotrophic Denitrification, Advanced Water Treatment, Research Direction

硫铁矿自养脱氮技术研究进展

钟佩琳, 曾宪霖, 侯 静, 张传义*

中国矿业大学, 环境与测绘学院, 江苏 徐州

Email: chuanyizhang@163.com, 874460154@qq.com

收稿日期: 2018年9月26日; 录用日期: 2018年10月13日; 发布日期: 2018年10月20日

摘 要

氮是污水排放中控制的主要污染物之一。生物脱氮是控制氮排放的有效且经济的方法。和传统生物脱氮

*通讯作者。

相比, 硫自养脱氮技术具有节约碳源、污泥产量少、运行能耗小的突出特点。本文阐述了硫铁矿自养脱氮技术的原理和优势, 综合评述了自养脱氮过程中的关键参数和影响因子, 比较分析了几种不同自养脱氮反应器的运行特性和效能差异, 指明了今后硫铁矿自养脱氮技术在污水深度处理中的研究重点和发展方向。

关键词

氮污染, 硫铁矿自养脱氮, 污水深度处理, 发展方向

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 随着人类活动的增加, 氮污染成为最突出的水质问题[1]。如农业生产中大量使用的氮肥引起的面源排放, 畜牧业中动物粪便排放的有机氮[2], 大气中氮沉降[3], 污水管网渗漏, 生活污水排放等诸多原因[4], 这些都会导致地下水系统中氮污染。Gu 等人[5]发现在 2010 年我国水质评估 182 个主要城市中, 57%检测井地下水中硝酸盐未达清洁地下水标准(<20 mgN/L, MEP, 1993)。此外, 我国城市污水二级出水普遍存在着氮、磷等超标排放问题[6], 这导致我国地下水污染问题日益突出, 如表 1 所示, 我国华北地区硝酸盐浓度超标较为普遍[7]。

“三氮”污染物对人体以及环境带来严重的危害。随着汇入自然水体的硝酸盐浓度升高, 会引发水体富营养化、有毒赤潮等环境问题, 长期饮用高 NO_3^- 浓度的地下水会增加人体患癌的机率(Law *et al.*, 1999)。世界卫生组织(WHO, 2018)和美国环保署(USEPA, 2016)规定 NO_3^- 的最高限值均为 10 mgN/L [8]; 我国地下水环境质量标准(GB/T 14848-2017) II 类水浓度限值为 20 mg/L (NO_3^- -N), 而我国生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)已经将硝酸盐氮最高允许浓度降至 10 mg/L。

如何有效去除水体中 NO_3^- -N 是污水处理领域关注的焦点之一。目前, 常用的脱氮方法有生物法、离子交换法、反渗透法以及电渗析法等。和生物法相比, 物化技术也具有较高的脱氮效率, 但其仍存在耗能大、操作复杂以及转移后形成的高氮浓缩液难处理等需要解决的技术难题。

生物法脱氮是最为经济有效的一种脱氮方法, 其主要利用反硝化菌在缺氧状态下, 把水中 NO_3^- 和 NO_2^- 转化为 N_2 , 从而降低水中 NO_x^- 浓度, 目前污水中碳源缺乏是限制脱氮效率的主要因素。与传统的

Table 1. The rate of nitrate concentration out of the WHO drinking water limits in ground-water among the northern China

表 1. 华北地区地下水硝酸盐浓度超标率(超 WHO 饮用水标准, 2018)

地下水水质监测地区	监测点数量	硝酸盐浓度超标率
河南省	335	31.4%
山东省	537	14.20%
北京南部及河北省	516	18%
北京市	11 (区)	19.36%
天津市	10 (区)	20%

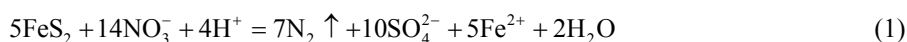
生物脱氮不同, 硫自养反硝化是一种以低价态硫代替碳源作为电子供体, 通过自养反硝化菌实现反硝化脱氮的一种新型脱氮技术, 其具有节约碳源消耗、污泥产量低等优点, 引起了国内外学者的高度关注[9][10][11]。现已开发的硫脱氮系统有硫化氢[12], 单质硫[13], 硫代硫酸钠[14]和硫/碳酸钙[15]复合体系系统等, 以上系统运行过程中存在系统 pH 不稳定、水力停留时间长和除磷能力较差等不足。而硫铁矿自养脱氮系统具有高脱氮率、运行 pH 稳定、同步脱氮除磷效果以及出水副产物(硫酸盐)产生量较其他硫自养反硝化系统低等优点[16], 具有可观的研究前景, 可替代单质硫作为更优质的电子供体进行脱氮除磷。

本文阐述了硫铁矿自养反硝化工艺去除硫酸盐的原理、综合评述了自养脱氮的主要影响因素和主要反应器类型的研究进展, 展望了硫铁矿自养反硝化工艺今后的研究重点和研究方向。

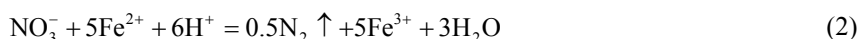
2. 硫铁矿脱氮除磷机理

硫铁矿(FeS_x)是一种天然矿石, 来源广价格低, 较单质硫作为电子供体, 具有良好的自养反硝化脱氮能力及 pH 自我调节能力。在无外加碳源条件下, 硫铁矿中低价态的硫元素以及反应生成的二价铁离子作为电子供体, 水中的硝酸盐作为电子受体。

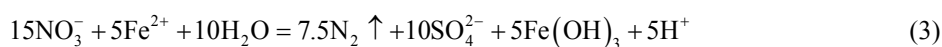
硫铁矿氧化脱氧如式(1)所示。



反应产生的 Fe^{2+} 被氧化则如式(2)



因此由硫铁矿氧化发生的脱氮总反应如式(3)



铁是硫铁矿主要组成元素之一。通过硫铁矿(FeS_x)氧化过程中产生的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 及 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等与水中 PO_4^{3-} 形成铁磷复合物, 利用矿石吸附、离子沉淀和微生物同化作用, 可在更为广泛的 pH 条件下强化磷的去除[17]。

硫铁矿除磷反应如式(4) (5)



硫铁矿溶于水后, 析出的 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 一方面与磷酸根形成难溶性盐, 使得溶解性有机磷由水中析出而沉淀分离, 达到强而有效的除磷效果[18], 另一方面通过溶解和吸水发生强烈的水解, 生成多种含铁的羟基络合物, 并有效地降低或消除水体中胶体的 ζ 电位[19], 使得胶体凝聚发生络合、吸附等作用间接去除水中的磷酸盐。

3. 硫铁矿自养脱氮影响因素研究进展

硫铁矿自养反硝化处理城市二级出水具有无需外加碳源、污泥产量少、无出水二次污染等优点, 目前国内外的研究集中在硫铁矿自养反硝化技术应用于连续反应器脱氮效果影响因素的研究[20], 如水力停留时间(HRT)、硫氮比(S/N)、载体类型、温度、pH 等。

3.1. HRT

水力停留时间是硫铁矿进行自养反硝化的一个重要参数。袁玉玲[21]通过实验研究不同的 HRT 对 NO_3^- -N、TN、 PO_4^{3-} -P 的去除效率的影响, 认为随着 HRT 的增加, NO_3^- -N、TN 的去除效率也逐渐增加,

这主要因为停留时间长,反硝化进行的彻底,转化为氮气,同时 HRT 变长,磷的去除率也逐渐增高。当 HRT 达到 4 h 时,磷的去除率可以达到 100%。刘凡[22]设计的实验其进水氨氮浓度为 52 mg/L,反应器停留时间为 10 h,其脱氮效率在 55%左右,将 HRT 延长至 24 h 后,其脱氮效率提高到 80%。吴芳磊[23]进行的实验进水硝酸盐浓度为 12.5 mg/L,其停留时间设计为 0.25 h、0.5 h、1.0 h 三个时间,通过实验发现当 HRT 为 1.0 h 及 0.5 h 时其脱氮效率可以达到 99%,即停留时间为 1 h 时,污水得到了充分的反应。研究表明城市污水二级出水处理水力停留时间最好在 8 h~10 h 左右。

3.2. S/N

硫自养反硝化过程中,S/N 比会对硫自养反硝化产生重要的影响。Di 等[24]通过实验发现,在各个 S/N 比中,当比例为 5.1 时脱氮效率高于比例为 3.5 及 1.8 时,即比例增大有利于硫自养反硝化。赵晴等[25]同样进行了不同 S/N 比对硫自养反硝化的研究。研究结果表明:在硫化物自养脱氮过程中,提高初始 S/N 比有效缓解了不同氮还原酶之间的电子竞争,不仅明显提高了 N_2O 与 NO_3^- 的降解速度,而且能避免 NO_2^- 、FNA 以及 N_2O 的积累。即当初始 S/N 由 3.0 提高到 5.0 时, NO_3^- 的降解速度由原来的 2.1 提高到 7.0,增大了 3.3 倍。

3.3. 载体类型

硫自养反硝化是一个不断消耗碱度的过程,其碱的消耗比例大约是 2.9~4.6 [26] [27],因此能补充碱度的载体的种类就很重要。刘凡[22]设计的实验采用了三种不同的载体组合方式,分别是:硫铁矿 + 麦饭石、硫铁矿 + 白云石、硫铁矿 + 石英砂。通过对比,其三种形式具有不同的脱氮效果。结果表明:麦饭石对硝酸盐氮以及总氮的去除均有提高效果,白云石可以降低出水中硫酸盐,是理想的载体材料。蒲骄阳[28]设计了硫铁矿 + 沸石(1:1)、硫铁矿 + 麦饭石(1:1)以及硫铁矿 + 沸石 + 麦饭石(1:0.5:0.5)为载体进行不同载体脱氮效果研究,结果表明:添加麦饭石的两个反应柱脱氮效果明显高于只有沸石的反应器,其原因是麦饭石可以为微生物提供一定的微量元素,有助于微生物的生长。根据二者的研究可以得出结论:硫铁矿+麦饭石+白云石是理想的填料组合方式。

3.4. 温度

微生物的正常生长繁殖依赖于适宜的温度。一个适宜的温度有利于提高气体传质速率以及改善污泥沉降性能。有文献说明,大部分硫自养菌属于嗜中温菌,最适生长温度在 30℃~35℃,最适反硝化温度范围为 25℃~30℃ [29]。杜海峰[30]通过设置反应器进水硝酸氮为 50 mg/L,其水力停留时间(HRT)为 4.3 h,同时设置 20℃、30℃、35℃、40℃这四个温度梯度来探究温度对硫自养反硝化的效率影响。实验结果表明:当温度为 30℃时,其脱氮效率达到 95.2%,为 4 个温度梯度中效率最高的;当温度为 35℃时,氮去除率仅次于 30℃;温度为 20℃及 40℃时脱氮效率较低,但也可以保持 80%的去除率。袁玉玲[21]实验研究表明,硫铁矿系统脱氮除磷效果在一定范围内与温度成正比。当温度为 30℃时,氮的去除率达到 96%。蒲骄阳[28]设计了硫铁矿+沸石+麦饭石反硝化柱进行其脱氮除磷的研究,其研究发现,当反应器放置在 20℃的环境下,其脱氮效果明显下降,当重新放置在 30℃下时,其脱氮效果逐渐增强。综上所述,硫铁矿自养反硝化的最佳温度为 30℃。

4. 硫铁矿自养反硝化反应器类型研究

硫铁矿自养反硝化反应器既可以作为实验研究的工具,也是将硫铁矿自养反硝化反应应用于实际的载体,不同的反应器类型对反应器的脱氮效果产生的影响不同。王晖[31] (2011)等对比了以生物活性炭为载体的反应器和升流式厌氧污泥反应器(UASB)的脱氮效果,发现生物活性炭反应器的脱氮效果更好。

Capua [32] (2015)等对比了 4 种不同的化能脱氮生物膜反应器。他们指出目前最为常用的 4 种反应器分别为 packed bed reactor (PBR)、fluidized bed reactor (FBR)、membrane biofilm (MBfR)、biofilm electrode reactor (BER)。其中后两种应用于氢自养反硝化反应。可见, 常用的硫自养反硝化的反应器类型有三种。

4.1. 厌氧污泥反应器(UASB)

厌氧污泥反应器是以硫自养反硝化菌为优势菌种的升流式厌氧污泥床反应器 UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Bed/Blanket)。反应装置由进水装置、蠕动泵、升流式反应器、出水装置和排气装置 5 个部分组成。反应器顶部的排气装置为三相分离器, 反应器的中部可设若干个取样口, 用于污泥的取样和参数的监测, 反应器的底部设有排泥口。该类反应器在污泥培养成功后, 需要向污泥层中加入硫铁矿固体, 以提供硫源。原水从反应器下端进入, 流经整个滤床后从反应器上端流出, 出水以容器收集, 由反应器底部的一个高浓度、高活性的硫自养反硝化菌污泥床处理污水中的大部分有机污染物。

该类反应器制作简单方便, 不需要外加填料。但是, 厌氧污泥床的生物量相对较少, 系统受水力停留时间的影响较大, 去除硝态氮的效率会随着水力停留时间的增加而增加, 而去除总氮的效率却很不稳定。在前期, 该类反应器容易出现 NO_3^- -N 积累的现象[33]。此外, 硫铁矿和污泥颗粒之间接触面积较少, 不能为微生物提供足够的硫基质, 阻碍了反硝化反应, 导致脱氮效率低下。故该类反应器的实际应用价值不大。

4.2. 填充床反应器(Packed Bed Reactor)

大部分的研究者实验用的反应器类型为填充床硫自养反硝化反应器, 学者们可以根据硫原料的成分和尺寸, 选择不同的填料, 使反应器创造出最佳效果。该类反应器多是高瘦的柱式反应器, 材质通常为有机玻璃, 内填充带有硫源的填料。中间设有取样口, 用于测量各项指标, 如 pH、DO 等。原水从反应器的下端流入, 经过整个滤床后从反应器上端流出, 出水以容器收集, 顶部设计气体收集口。配套的设备还有进水箱, 用于模拟进水水质; 蠕动泵, 用于调整水力停留时间。

填充床反应器容易操作, 并且成本较低, 污水中氮含量的升高会造成反应器所需要的水力停留时间大幅提高[34]。在填料-硫铁矿系统中, 填料作为载体能够为硫自养反硝化菌提供良好稳定的生长环境, 而附着在其上的硫铁矿则可以提供浓度较高的基质; 此外, 附着于填料上的硫自养反硝化菌通过对基质的降解延长了填料的使用寿命。两者的协同关系克服了反应器运行不稳定的限制, 显著提高了系统对 NO_3^- -N 的去除效率与处理能力。这为该类反应器的实际应用提供了理论基础。

在填料带来优势的同时, 填料也导致了反应器容易发生堵塞的问题。老化脱落的生物膜和进水中的 SS 都可以影响反应器的运行, 进而影响处理效率, 故该类反应器需要定期的反冲洗。此外, 如果进水中含有过高的氮, 为保证处理效率, 反应器需要较大的容积已提供足够的水力停留时间, 且反硝化产生过多的氮气也会影响反应器的运行。这是因为过饱和的氮气在水中形成气泡, 环绕在填料周围, 降低了填料的孔隙率, 且在生物膜表面累积的氮气也会阻碍生物膜与外界的物质传递[35]。因此, 该类反应器适用于处理低氮, 低 SS, 缺少碳源的废水, 可以广泛地利用于城市生活污水氮磷的深度净化。

4.3. 流化床反应器(Fluidized Bed Reactor)

流化床式反应器的构造, 外形和填充床反应器类似, 在设备上比填充床反应器多出来了一个回流泵, 用于实现处理水回流。废水在反应器底部和处理完的出水混合后, 一起进入反应器, 处理水回流带来的高流速使填料处于流化态。在反应器出水前的位置上设置回流孔与回流泵相连, 使一部分的处理水回流。反应器顶部设计氮气排放口, 柱体上具有多个取样口, 以便检查运行状态。

与前两种反应器相比,流化床式反应器具有更好的脱氮效果[32],其通过回流实现的高流速也带来了一系列的优势,如:1)减少了堵塞的可能性;2)使污水与填料之间接触更加充分;3)处于流化态的填料和高流速减少了氮气在水中的累积;4)减少了水力停留时间并增加了污泥负荷。而且,因为水力停留时间较短,流化床反应器的体积比较小,加上其不需要反冲洗的优势,可以保证连续运行,故流化床反应器的实际运用价值比填充床要高很多。Papirio 等人(2014)利用处理水回流可以均化水质的特点,成功地将流化床硫自养反硝化反应器应用于处理低 pH、高重金属污染的矿业废水[36] [37]。

虽然高流速解决了填料带来的问题,但是高流速的冲刷和反硝化反应产生的氮气会造成生物膜的破坏,这是该类反应器的一个致命缺点。Capua [32]等人(2015)认为,带有固体硫源的齿状活性炭不仅具有巨大的表面积,而且为细菌的生长提供了较高浓度的基质,利用其作为载体或许可以解决高流速引起的生物量流失的问题。然而,在袁莹[34]等人(2012)的实验中,利用活性炭作为填料的反应器在低水力停留时间的状态下仍然产生了污泥上浮的现象。由于尚未解决高流速对填料生物膜的破坏这一问题,目前该反应器目前运用还比较少见。

5. 展望

在《水污染防治行动计划》(水十条)实施的大背景下,全国重点区域及重点流域均对污水处理提出了更高的要求,污水处理厂提标增效成为业内关注的热点。北京、天津等地区制定并执行了更为严格的地方标准,其中一些主要指标接近或达到地表水三类/四类水体标准。城市污水即将面临再一次的提标改造任务。而硫自养反硝化是一种可以同时深度脱氮除磷的污水深度净化技术,受到国内学者的高度关注。填充床反应器因为其稳定的运行效果,受到了国内大多数学者的青睐。大部分的研究都是在填充床反应器的基础上,探究硫自养反硝化的影响因素及反应条件,使反应器创造出最佳效果。流化床反应器型的硫铁矿自养脱氮技术在污水深度处理中也具有较高的实用价值。目前,急需解决的技术难题是如何克服流化床反应器内高流速冲刷造成生物膜破坏。一种可以使生物膜更加牢固地附着的新颖填料或许是一个解决该问题的方向。

参考文献

- [1] 唐克旺, 吴玉成, 侯杰. 中国地下水资源质量评价(II)——地下水水质现状和污染分析[J]. 水资源保护, 2006(3): 1-4 + 8.
- [2] Wakida, F.T. and Lerner, D.N. (2005) Non-Agricultural Sources of Groundwater Nitrate: A Review and Case Study. *Water Research*, **39**, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.026>
- [3] 顾峰雪, 黄玫, 张远东, 等. 1961~2010 年中国区域氮沉降时空格局模拟研究[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3591-3600.
- [4] 杜新强, 方敏, 冶雪艳. 地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展[J]. 环境科学, 2018(11): 1-15.
- [5] Gu, B.J., Ge, Y., Chang, S.X., et al. (2013) Nitrate in Groundwater of China: Sources and Driving Forces. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, **23**, 1112-1121. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.05.004>
- [6] Wang, D.B., Wang, Y.L., Liu, Y.W., et al. (2017) Is Denitrifying Anaerobic Methane Oxidation-Centered Technologies a Solution for the Sustainable Operation of Wastewater Treatment Plants? *Bioresource Technology*, **234**, 456-465.
- [7] 王仕琴, 郑文波, 孔晓乐. 关于华北农区浅层地下水硝酸盐污染的几点认识[J]. 中国生态农业学报, 2018, 1-7.
- [8] Batchelor, B. and Lawrence, A.W. (1978) A Kinetic Model for Autotrophic Denitrification Using Elemental Sulfur. *Water Research*, **12**, 1075-1084. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(78\)90053-2](https://doi.org/10.1016/0043-1354(78)90053-2)
- [9] Sierraalvarez, R., Beristaincardoso, R., Salazar, M., et al. (2007) Chemolithotrophic Denitrification with Elemental Sulfur for Groundwater Treatment. *Water Research*, **41**, 1253. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.039>
- [10] Li, R., Niu, J., Zhan, X., et al. (2013) Simultaneous Removal of Nitrogen and Phosphorus from Wastewater by Means of FeS-Based Autotrophic Denitrification. *Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, **67**, 2761.

- [11] Deng, L.W., Chen, H.J., Chen, Z., *et al.* (2009) Process of Simultaneous Hydrogen Sulfide Removal from Biogas and Nitrogen Removal from Swine Wastewater. *Bioresource Technology*, **100**, 5600-5608. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.012>
- [12] Yang, W., Lu, H., Khanal, S.K., *et al.* (2016) Granulation of Sulfur-Oxidizing Bacteria for Autotrophic Denitrification. *Water Research*, **104**, 507-519. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.049>
- [13] Mora, M., Guisasola, A., Gamisans, X., *et al.* (2014) Examining Thiosulfate-Driven Autotrophic Denitrification through Respirometry. *Chemosphere*, **113**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.083>
- [14] Li, R., Yuan, Y., Zhan, X., *et al.* (2014) Phosphorus Removal in a Sulfur-Limestone Autotrophic Denitrification (SLAD) Biofilter. *Environmental Science & Pollution Research*, **21**, 972-978. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1966-5>
- [15] Pu, J.Y., Feng, C.P., Liu, Y., *et al.* (2014) Pyrite-Based Autotrophic Denitrification for Remediation of Nitrate Contaminated Groundwater. *Bioresource Technology*, **173**, 117-123.
- [16] Zhang, W.T., Peng, Y.Z., Ren, N.Q., *et al.* (2013) Improvement of Nutrient Removal by Optimizing the Volume Ratio of Anoxic to Aerobic Zone in AAO-BAF System. *Chemosphere*, **93**, 2859-2863. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.08.047>
- [17] 季斌, 秦慧, 陈威, 等. 铁盐应用于污水协同除磷研究进展[J]. 水处理技术, 2018, 44(2): 11-14.
- [18] 邢伟, 黄文敏, 李敦海, 等. 铁盐除磷技术机理及铁盐混凝剂的研究进展[J]. 给水排水, 2006, 32(2): 88-91.
- [19] 李文超, 石寒松, 王琦, 周骏. 硫自养反硝化技术在污废水处理中应用研究进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(8): 1-6.
- [20] 王旦梅, 周琪. 废水中硝酸盐的硫自养反硝化工艺处理研究与进展[J]. 净水技术, 2017, 36(3): 32-37.
- [21] 袁玉玲. 以天然黄铁矿和硫磺为硫源的自养反硝化特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2011.
- [22] 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, 2018.
- [23] 吴芳磊. 基于硫自养反硝化的深度除磷脱氮研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [24] Di Capua, F., Ahoranta, S.H., Papirio, S., *et al.* (2016) Impacts of Sulfur Source and Temperature on Sulfur-Driven Denitrification by Pure and Mixed Cultures of Thiobacillus. *Process Biochemistry*, **51**, 1576-1584. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.06.010>
- [25] 赵晴, 杨伟明, 邱林清, 张鑫, 孟了, 吕慧. S/N 质量比对硫化物自养反硝化过程 N₂O 还原与积累的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3264-3270.
- [26] Fajardo, C., Mosquera-Corral, A., Campos, J.L., *et al.* (2012) Autotrophic Denitrification with Sulphide in a Sequencing Batch Reactor. *Journal of Environmental Management*, **24**, 552-556. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.018>
- [27] Koeing, A. and Liu, L.H. (1996) Autotrophic Denitrification of Landfill Leachate Using Elemental Sulphur. *Water Science and Technology*, **34**, 469-476. <https://doi.org/10.2166/wst.1996.0584>
- [28] 蒲骄阳. 硫铁矿自养反硝化去除地下水中硝酸盐的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [29] 姚鹏程, 袁怡, 龙震宇, 谈家彬. 单质硫自养反硝化研究现状及展望[J]. 现代化工, 2018, 38(6): 28-32.
- [30] 杜海峰. 硫自养反硝化处理模拟地下水硝酸盐研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2014.
- [31] 王晖, 周伟丽, 欧阳丽华, 张振家. 硫自养反硝化结合生物活性炭处理硝酸盐废水[J]. 中国给水排水, 2011, 27(9): 29-32.
- [32] Di Capua, F., Papirio, S., Lens, P.N.L. and Esposito, G. (2015) Chemolithotrophic Denitrification in Biofilm Reactors. *Chemical Engineering Journal*, **280**, 643-657. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.131>
- [33] 佟爽. 基于自养反硝化工艺处理低有机碳水中硝酸盐技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [34] 袁莹, 周伟丽, 王晖. 不同载体条件下的硫自养反硝化脱氮实验[J]. 净水技术, 2012, 31(6): 54-58.
- [35] Kim, H., Lee, L. and Bae, J. (2004) Performance of a Sulphur-Utilizing Fluidized Bed Reactor for Post-Denitrification. *Process Biochemistry*, **39**, 1591-1597. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.07.004>
- [36] Papirio, S., Ylinen, A., Zou, G., Peltola, M., Esposito, G. and Puhakka, J. (2014) Fluidized-Bed Denitrification for Mine Waters. Part I: Low pH and Temperature Operation. *Biodegradation*, **25**, 425-435. <https://doi.org/10.1007/s10532-013-9671-0>
- [37] Papirio, S., Ylinen, A., Zou, G., Peltola, M., Esposito, G. and Puhakka, J. (2014) Fluidized-Bed Denitrification for Mine Waters. Part II: Effects of Ni and Co. *Biodegradation*, **25**, 417-423.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5485，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org