

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.002

火化烟气吸收液的硫自养反硝化深度脱氮研究

刘 崇¹, 许炜怡², 李玉光¹, 沈 斐³, 王 硕^{2,4}, 李 激^{2,4}

(1. 民政部环境监测中心站 民政部一零一研究所, 北京 100070; 2. 江南大学环境与土木工程学院 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江苏无锡环境监测中心 仪器分析实验室, 江苏 无锡 214121; 4. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009)

摘 要: 基于硫自养反硝化工艺研究了火化烟气吸收液的深度脱氮过程与调控技术。通过逐级提高硝态氮负荷的方式可以在30 d内使硝态氮去除率提高至89.0%, 石灰石可以有效替代碳酸氢钠为反应系统提供碱度, 使自养反硝化菌群稳定发挥脱氮能力。相比于硫酸盐, 亚硝态氮表现出更为明显的自养反硝化功能菌群毒性抑制效果, 但是在功能菌群适应进水水质后, 系统的硝态氮去除率均高于93.2%。定期反冲洗可以防止硫磺填料板结现象的发生, 从而使系统维持较好的硝态氮去除效果。*Thiobacillus* sp. 和 *Sulfrimonas* sp. 是系统中的优势菌群, 相对丰度占总自养脱氮功能菌群的70.5%以上, 但是 *Sulfuricurvum* sp. 的相对丰度则明显降低, 主要原因在于其不能还原亚硝态氮。

关键词: 火化烟气; 深度脱氮; 自养反硝化; 硫酸盐; 微生物菌群结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0007-06

Deep Denitrification of Cremation Flue Gas Absorption Wastewater Based on Sulfur Autotrophic Denitrification

LIU Chong¹, XU Wei-yi², LI Yu-guang¹, SHEN Fei³, WANG Shuo^{2,4}, LI Ji^{2,4}

(1. 101 Institute of the Ministry of Civil Affairs, Environmental Monitoring Center Station of the Ministry of Civil Affairs, Beijing 100070, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Laboratory of Instrumental Analysis, Jiangsu Wuxi Environmental Monitoring Center, Wuxi 214121, China; 4. Jiangsu University Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China)

Abstract: Based on the sulfur autotrophic denitrification process, the deep denitrification process and control technology of cremation flue gas absorption wastewater were studied. It was found that nitrate removal could be increased to 89.0% within 30 days by gradually increasing the nitrate loading. Limestone could effectively substitute NaHCO_3 to provide alkalinity, and thus the autotrophic denitrifying

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(118011000000160004); 中央级科学事业单位科研机构改善科研条件项目(118011000000210005); 江苏省政策引导类计划(国际科技合作/港澳台科技合作)专项资金资助项目(BZ2021030); 无锡市科技创新创业资金资助项目(M20211003); 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心预研课题(XTCXSZ2020-2)

通信作者: 王硕 E-mail: shuowang@jiangnan.edu.cn

bacteria could perform stable nitrogen removal capacity. Compared with sulfate, nitrite showed obvious toxic inhibition effect on the autotrophic denitrifying bacteria. However, the removal efficiency of nitrate was higher than 93.2% when the functional flora adapted to the influent quality. Regular backwashing could prevent the occurrence of sulfur packing hardening, therefore, the system could maintain good nitrate removal performance. *Thiobacillus* sp. and *Sulfrimonas* sp. were the dominant species, and the relative abundance accounted for more than 70.5%, but the relative abundance of *Sulfuricurvum* sp. was significantly lower, mainly because *Sulfuricurvum* sp. could not reduce the nitrite.

Key words: cremation flue gas; deep denitrification; autotrophic denitrification; sulfate; microbial community structure

遗体火化烟气通常含有氮氧化物和硫氧化物等污染物,一般采用吸附和化学催化氧化等方法予以去除^[1],其主要原因在于处理效果较好,对场地的要求较低。采用催化氧化技术的运行成本虽然较高,但采用生物处理技术存在的技术限制导致吸附法和催化氧化技术仍然被广泛应用。伴随着“碳达峰、碳中和”政策的实施,一系列低碳、零碳甚至负碳技术被重新进行研发攻关,为火化烟气吸收液处理的革新带来转机。

火化烟气吸收液含有较高浓度的亚硝态氮、硝态氮和硫酸根离子等,采用碱性药剂进行吸收后会呈现出高硝态氮的特征。针对高浓度硝态氮的去除,一般采取投加碳源的异养反硝化方式^[2],虽然可以有效降低出水硝态氮浓度,但是碳源的投加会增加碳排放、提高处理成本,同时碳源投加不当会导致出水COD超标,因此,异养反硝化技术无法满足高浓度硝态氮去除的要求^[3]。自养反硝化技术具有无需碳源投加的特点,自养脱氮微生物以单质硫或硫离子为底物实现硝态氮的还原,不仅可以有效减少工艺的碳排放,降低运行成本^[4-6],同时还避免了出水水质超标的风险,使其成为处理高浓度硝态氮废水的工艺之一。

笔者以硫自养反硝化工艺为出发点,通过研究硝态氮负荷的变化,同时结合碱度补充、反冲洗调控等方式,确定高浓度硝态氮深度去除的工艺条件。同时,结合实际废水中存在的高浓度亚硝态氮及硫酸盐,进行工艺调控与稳定运行参数的筛选,旨在为火化烟气吸收液深度脱氮工艺的规模化应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行

试验装置采用2台圆柱形有机玻璃反应器,高

为100 cm,内径为12 cm,有效容积约10 L(见图1)。反应器底部设置有反冲洗口和布水板,且于25、50、75和90 cm处设置取样口。布水板上覆4~5 cm厚的碎石(直径为0.5~1 cm),碎石上分别铺设60 cm厚的工业级硫磺颗粒(设为反应器R1)和60 cm高的硫磺填料(取自课题组运行的中试反应装置,设为反应器R2)。反应器采用连续流运行,进水方式为下进上出,出水口位于75 cm处。进水流量为20 L/d,水力停留时间为14 h,反冲洗流量为20 L/min。

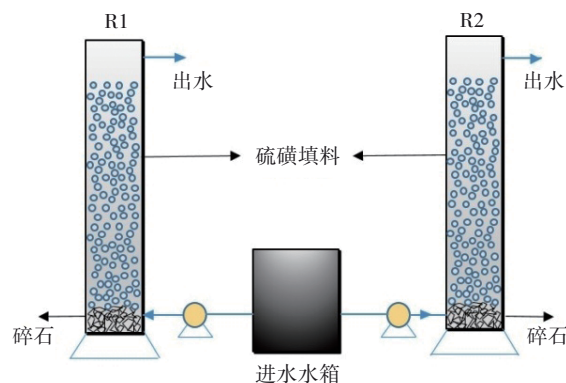


图1 反应系统示意

Fig.1 Schematic diagram of reactor

反应器运行分为4个阶段:阶段Ⅰ(1~30 d),进水硝态氮浓度设定为200 mg/L,不进行碱度调节;阶段Ⅱ(31~60 d),进水硝态氮浓度设定为200 mg/L,进行碱度调节;阶段Ⅲ(61~90 d),添加50 mg/L硫酸盐以模拟硫氧化物被碱液吸收后反应系统对硝态氮的去除效果;阶段Ⅳ(91~135 d),添加50 mg/L硫酸盐和100 mg/L亚硝酸盐,同时降低进水硝态氮浓度至100 mg/L,模拟当氮氧化物未被碱液完全吸收后反应系统对硝态氮的去除效果。在阶段Ⅲ和阶段Ⅳ,依据R1和R2的运行效果,定期对反应器进行反冲洗以防止硫磺填料板结。

1.2 进水浓度和接种污泥

依据某殡仪场的实测数据,发现氮氧化物平均产生量为 110.2 g/具,硫氧化物平均产生量为 26.5 g/具,碱液药剂吸收充分及氧化剂反应完全的情况下,火化烟气吸收液中硝态氮浓度为 196.8 mg/L,硫酸根浓度为 55.3 mg/L。试验采用人工配水,磷源通过磷酸二氢钾提供,碱度通过投加碳酸氢钠和石灰石进行调节,微量元素液参考文献[6]进行配制。

R1 中污泥取自无锡市某污水处理厂 CAST 工艺,接种体积为 4 L,接种污泥 MLSS 为 4 500 mg/L。R2 中接种硫磺填料,其中的自养反硝化菌群具有良好的总氮去除效果,脱氮负荷约 1 000 mg/(L·d),硝态氮去除率约为 95.0%,TN 去除率约为 90.1%。

1.3 分析项目与方法

NO_2^- -N、 NO_3^- -N 及 SO_4^{2-} 指标均参照标准方法进行测定^[7],pH 和溶解氧采用 WTW Oxi/pH-3310 溶解氧仪进行测定。为考察深度脱氮工艺中功能微生物的演替规律并确定优势菌群,定期选取 R1 和 R2 内位于硫磺填料中部的生物膜,采用土壤 DNA 提取试剂盒进行 DNA 提取,DNA 经 PCR 扩增和产物纯化后,通过 Illumina MiSeq 测序,测序文库由上海晶能生物有限公司建立完成。

2 结果与讨论

2.1 深度脱氮反应器的启动

当将 200 mg/L 硝态氮直接加入 R1 时,由于硝态氮浓度过高,导致出水硝态氮在 170~180 mg/L。因此调整进水硝态氮浓度为 60 mg/L,采用每 3 d 提高 20 mg/L 硝态氮的方式,逐步将进水硝态氮浓度提升至 200 mg/L。由于 R2 中硫磺填料取自中试装置,因此填料中的自养反硝化菌群对高浓度硝态氮具有一定去除效果。R1 和 R2 出水亚硝态氮和硝态氮浓度的变化如图 2 所示。R1 运行至第 7 天,其中的污泥已经具备了良好的反硝化能力,出水硝态氮浓度仅为 9.6 mg/L,表明自养反硝化工艺在短时间内即可发挥稳定的硝态氮去除效果。随着进水硝态氮浓度逐步提高,虽然观察到亚硝酸盐同步升高的现象,但是无明显亚硝酸盐积累发生。待 R1 运行至第 30 天时,出水亚硝态氮浓度为 23.3 mg/L,硝态氮浓度为 22.1 mg/L,表明 R1 中已形成稳定的自养反硝化功能菌群,具有较好的硝态氮去除能力。在整个第 I 阶段,R2 运行效果一直较为稳定,至第 3 天出

水硝态氮浓度即降至 12.5 mg/L 以下,去除率高达 93.8%,且未发生亚硝态氮积累现象。

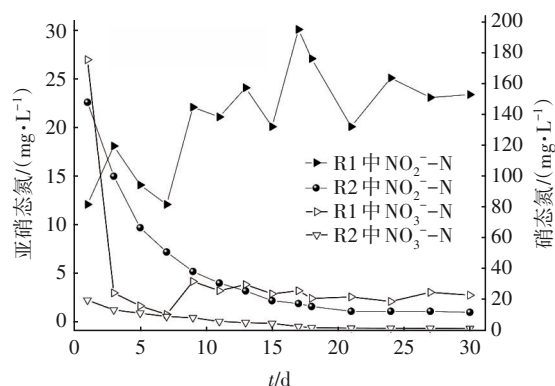


图2 启动过程中出水含氮污染物浓度的变化

Fig.2 Changes of nitrogen pollutants concentration in effluent during startup

2.2 碱度调节对深度脱氮的影响

虽然 R1 和 R2 中均形成了稳定的自养反硝化功能菌群,但是硝态氮的去除效果始终未能达到预期。已有研究表明碱度是影响自养反硝化效果的重要因素^[8],而在阶段 I 并未对 R1 和 R2 的碱度进行补充,因此在阶段 II 对碱度进行调节,结果如图 3 所示。通过补充碳酸氢钠,R1 和 R2 中已经没有亚硝态氮积累和硝酸盐存留,且无水质波动现象发生,两组反应器运行至第 39 天,对硝态氮的去除率均达到 100%。如果延长 HRT 或提升自养反硝化菌群浓度,将均有助于去除更高浓度的硝态氮。

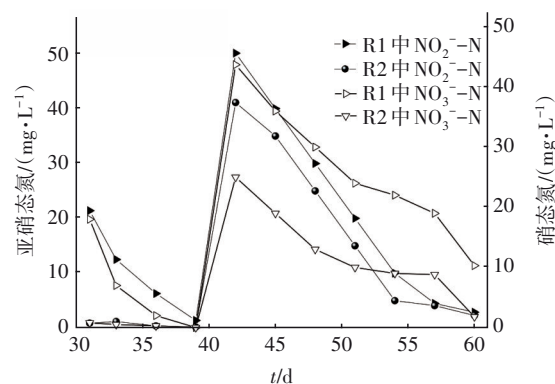


图3 碱度调节对出水含氮污染物浓度的影响

Fig.3 Effect of alkalinity adjustment on nitrogen pollutants concentration in effluent

由于碳酸氢钠的价格高于石灰石,且选用碳酸钠代替碳酸氢钠时,会导致反应器内 pH 升高^[5],因此研究了石灰石作为替代碱度对高浓度硝态氮去除效果的影响,考察以石灰石替代碳酸氢钠进行碱

度调节的可行性。将石灰石与硫磺填料按照2:3的比例混合,并将出水口设置在距反应器底部90 cm处,由于石灰石属于缓释碱度,因此其在替换碳酸氢钠后,两反应器并没有立即表现出较高的反硝化能力,R1出水亚硝态氮和硝态氮分别升高至50.1、43.7 mg/L,R2升高至41.1、25.0 mg/L,出水pH分别为7.1和7.4。当反应器运行至第57天,R1和R2的出水硝态氮浓度分别降低至19.0和8.8 mg/L,亚硝态氮浓度均低于5.0 mg/L。运行至第Ⅱ阶段结束时(第60天),R1和R2的出水硝态氮浓度分别为10.3和1.8 mg/L,均无亚硝态氮积累且出水pH稳定在6.6~6.8之间。以上结果表明,当采用石灰石替代碳酸氢钠进行碱度调节时,不仅能促进自养反硝化菌群继续发挥脱氮能力,而且可以稳定系统pH在自养反硝化菌群的最适pH区间^[4]。适宜的pH区间同时还可以保证石灰石具有相对较高的溶解度,不会因为固液界面的传质限制^[9]而造成碱度供应不足现象的发生。此外,石灰石的价格较碳酸氢钠低,可以有效降低规模化工艺的运行成本。

2.3 硫酸盐对深度脱氮的影响

硫氧化物是火化烟气的主要成分,其被碱液吸收后的终产物为硫酸盐,因此在阶段Ⅲ研究了硫酸盐对火化烟气吸收液深度脱氮的影响,结果见图4。当有硫酸盐存在时,R1中自养反硝化菌群的脱氮能力受到抑制,出水硝态氮浓度由10.3 mg/L上升至33.5 mg/L,亚硝态氮浓度由2.6 mg/L上升至12.9 mg/L,相对较高浓度的硫酸盐延缓了硝态氮的还原。通过延长HRT至16 h,使R1中自养反硝化菌群活性得到恢复。当反应器运行至第78天时,R1出水无亚硝态氮检出,且出水硝态氮浓度仅为9.0 mg/L。随着HRT恢复至14 h,R1中出水硝态氮仍低于10 mg/L,表现出良好的反硝化效果。然而R2中自养反硝化菌群未受到硫酸盐存在的影响,在第Ⅲ阶段的前2 d,出水亚硝态氮和硝态氮浓度分别升高至5.7和4.9 mg/L,但未发生亚硝态氮积累的现象,之后R2的出水硝态氮便降至3.0 mg/L以下。主要原因一方面在于R2中的硫磺填料取自某污水处理厂的硫自养反硝化中试装置,其进水中含有一定浓度的硫酸盐^[10],硫磺填料中的自养反硝化菌群适应了硫酸盐存在的环境;另一方面,在碱度充足的条件下,R2中pH始终维持在6.6~6.8之间,而R1中pH则在61~75 d时发生明显波动,虽然其pH始终

都维持在6.0以上,符合自养反硝化菌群发挥硝态氮还原能力的区间,但pH的波动影响了功能菌群的活性,导致在此阶段R1出水硝态氮浓度远高于R2。

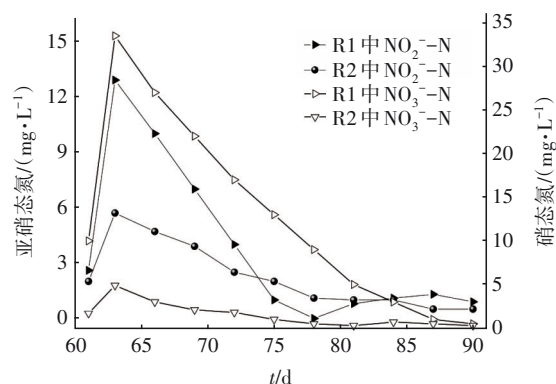


图4 硫酸盐对出水含氮污染物浓度的影响

Fig.4 Effect of sulfate on nitrogen pollutants concentration in effluent

2.4 亚硝态氮对深度脱氮的影响

在阶段Ⅳ考察了亚硝态氮和硫酸盐同时存在时火化烟气吸收液深度脱氮工艺的效果,结果如图5所示。与硫酸盐的加入不同,亚硝态氮的加入明显抑制了R1和R2中自养反硝化功能菌群的活性。当反应器运行至第95天时,R1和R2出水硝态氮浓度均高于20 mg/L,且发现了亚硝态氮去除能力不足的现象。通过延长HRT至21 h并持续5 d后,两组反应系统的出水硝态氮浓度才降至5.0 mg/L以下,但是对亚硝态氮的还原能力仍然较差,表明亚硝态氮的毒性使污泥微生物活性在短时间内难以得到恢复。待R1和R2运行至第108天时,两组反应器均观察到有填料板结现象发生,其原因可能是亚硝态氮的毒性^[11]使部分污泥细胞凋亡破碎且没有及时被排出系统,从而导致硫磺填料发生黏结。在第110天,R1和R2出水平均硝态氮浓度分别为17.6和12.9 mg/L。通过反冲洗的方式对硫磺填料进行冲散导淤,破碎的微生物残体和老化生物膜被反冲出系统,在反应器运行至第115天时,R1和R2出水硝态氮浓度重新降至5.0 mg/L以下,且亚硝态氮浓度也同步降低。此后,将HRT逐步缩短至14 h并通过定期反冲洗防止因硫磺填料板结而引起短流现象的发生^[6],同时防止生物膜老化。在反应器运行至第129天时,R1和R2出水硝态氮浓度分别低于4.5和3.1 mg/L,出水亚硝态氮浓度分别低于11.3

和 7.2 mg/L。上述结果表明,虽然亚硝态氮的存在对自养反硝化功能菌群产生了毒性抑制,但是此类抑制是可逆的,一旦功能菌群适应进水水质,便可逐步恢复良好的反硝化效果。此外,在高浓度亚硝态氮的胁迫下,自养反硝化功能菌群分泌了更多的胞外聚合物以适应环境的变化,而胞外聚合物中包含了细胞色素 C 等电化学活性物质,这类物质可以作为电子传递介质促进电子转移^[12],从而强化了自养反硝化功能菌群对亚硝态氮和硝态氮的还原能力。

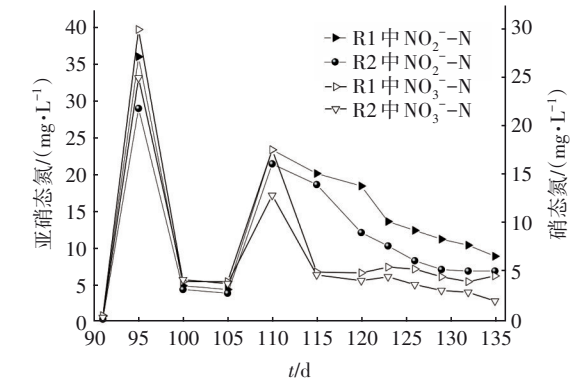


图5 亚硝态氮对出水含氮污染物浓度的影响
Fig.5 Effect of nitrite nitrogen on nitrogen pollutants concentration in effluent

2.5 微生物群落结构解析

表 1 显示了 R1 和 R2 在各阶段稳定运行后,自养反硝化功能菌群的属水平群落结构及相对丰度。在阶段 I ~ III, R1 和 R2 中主要自养脱氮功能菌群的丰度均逐渐增加并占据绝对优势。在阶段 IV, 自养脱氮功能菌群的丰度略有下降,可能与亚硝态氮的毒性抑制有关,但出水硝态氮和亚硝态氮浓度无明显变化。*Thiobacillus* sp. 和 *Sulfrimonas* sp. 随着系统的运行成为优势菌群,其相对丰度占总自养脱氮功能菌群的 70.5% 以上。*Thiobacillus* sp. 具有氧化硫或硫化物及同步脱氮功能^[4], *Sulfrimonas* sp. 则通过氧化硫获得能量,进而将硝态氮还原为氮气^[6]。*Sulfuricella* sp.、*Sulfuricurvum* sp. 和 *Sulfuritalea* sp. 也是 R1 和 R2 中的主要功能菌群,三者均可以硫化物、单质硫和硫代硫酸盐作为电子供体,硝酸盐作为电子受体,从而实现自养反硝化功能^[6,13]。在阶段 I ~ IV, *Sulfuricella* sp. 和 *Sulfuritalea* sp. 的相对丰度基本均逐渐增加,但 *Sulfuricurvum* sp. 的相对丰度在阶段 IV 则明显降低,主要原因在于 *Sulfuricurvum* sp.

仅可利用硝态氮作为电子受体,而不能还原亚硝态氮^[13],因此 *Sulfuricurvum* sp. 在 R1 和 R2 中的相对丰度由 10.4%、9.5% 分别降低至 2.1%、2.5%。经过四阶段 135 d 的运行, R1 和 R2 中自养反硝化功能菌群在硫磺填料中得到有效富集,共同促进了不同运行条件下亚硝态氮和硝态氮的稳定去除。

表 1 自养反硝化功能菌群结构
Tab.1 Microbial structure of autotrophic denitrification functional species %

菌群	R1				R2			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
<i>Thiobacillus</i> sp.	18.9	23.5	24.1	28.9	30.5	33.1	33.5	35.5
<i>Sulfrimonas</i> sp.	15.7	17.7	17.2	19.4	15.9	20.7	19.6	18.9
<i>Sulfuricella</i> sp.	5.8	8.7	9.5	8.5	3.6	5.6	8.3	10.6
<i>Sulfuricurvum</i> sp.	7.8	9.8	10.4	2.1	8.2	8.8	9.5	2.5
<i>Sulfuritalea</i> sp.	3.6	7.4	7.5	9.3	5.5	13.4	10.8	9.7
Total	51.8	67.1	68.7	68.2	63.7	81.6	81.7	77.2

3 结论

- ① 已富集自养反硝化功能菌群的硫磺填料可以快速适应高硝态氮负荷,通过逐级提高硝态氮负荷的方式可以在 30 d 内使硝态氮和总氮去除率分别提高至 89.0% 和 77.3%。采用石灰石替代碳酸氢钠进行碱度调节时,可以保证自养反硝化菌群继续发挥脱氮能力并有效降低运行成本。
- ② 硫酸盐的存在不会影响自养反硝化功能菌群的脱氮效果,但是亚硝态氮的存在则明显抑制了自养反硝化功能菌群的活性,但此类抑制是可逆的,一旦功能菌群适应进水水质,便可逐步恢复良好的反硝化效果。通过定期反冲洗的方式可以有效缓解硫磺填料板结的现象,有助于系统对含氮类污染物维持较好的去除效果。
- ③ *Thiobacillus* sp. 和 *Sulfrimonas* sp. 是系统的优势菌群,相对丰度占总自养脱氮功能菌群的 70.5% 以上。*Sulfuricella* sp.、*Sulfuricurvum* sp. 和 *Sulfuritalea* sp. 是 R1 和 R2 中的主要功能菌群,但是 *Sulfuricurvum* sp. 的相对丰度在阶段 IV 明显降低,其主要原因在于它不能还原亚硝态氮。R1 和 R2 中自养反硝化功能菌群在硫磺填料中得到有效富集,共同促进了不同运行条件下亚硝态氮和硝态氮的稳

定去除。

参考文献:

- [1] LI J, CAO X, LU S, *et al.* Catalytic oxidation of PCDD/F on a $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ catalyst: effect of chlorinated benzenes and chlorinated phenols [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 342:220-230.
- [2] 韩恺忻, 邹小林, 宋棚嘉, 等. 秸秆碳源对高硝氮含量水体脱氮效果实验研究 [J]. *水处理技术*, 2019, 45(2): 105-109.
HAN Kaixin, ZOU Xiaolin, SONG Pengjia, *et al.* Study on the denitrification effect of high nitrate nitrogen content water by straw as carbon source [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45 (2) : 105-109 (in Chinese).
- [3] 彭志英, 李冰冰, 王燕, 等. 生物燃料副产物作为生物脱氮除磷碳源的研究 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(19): 7-13.
PENG Zhiying, LI Bingbing, WANG Yan, *et al.* Biological nitrogen and phosphorus removal using biofuel by-product as carbon source [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(19): 7-13 (in Chinese).
- [4] 任争鸣, 常佳丽, 刘雪洁, 等. 硫铁耦合系统深度脱氮除磷中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(13): 94-98.
REN Zhengming, CHANG Jiali, LIU Xuejie, *et al.* Advanced removal of nitrogen and phosphorus in combined pilot system of sulfur and iron [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33 (13) : 94-98 (in Chinese).
- [5] 任争鸣, 刘雪洁, 苏晓磊, 等. 硫自养反硝化深度脱氮中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(19): 31-35.
REN Zhengming, LIU Xuejie, SU Xiaolei, *et al.* Sulfur-based autotrophic denitrification process for advanced nitrogen removal [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(19): 31-35 (in Chinese).
- [6] 任争鸣, 王东, 王燕, 等. 硫自养反硝化处理高硝态氮废水的运行特性研究 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(15): 66-70.
REN Zhengming, WANG Dong, WANG Yan, *et al.* Characteristics of sulfur-based autotrophic denitrification process for high nitrate concentration wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(15): 66-70 (in Chinese).
- [7] APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [M]. 20th ed. Washington: APHA, 1998.
- [8] SAHINKAYA E, DURSUN N. Use of elemental sulfur and thiosulfate as electron sources for water denitrification [J]. *Bioprocess Biosystem Engineering*, 2015, 342: 220-230.
- [9] TANG B, XIANG Q F, WANG J, *et al.* Kinetics of limestone decomposition in hot metal [J]. *Metallurgical Research Technology*, 2018, 115(6): 611.
- [10] WANG S, YANG Y K, CHEN X G, *et al.* Effects of bamboo powder and rice husk powder conditioners on sludge dewatering and filtrate quality [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124: 288-296.
- [11] GLASS C, SILVERSTEIN J A, OH J. Inhibition of denitrification in activated sludge by nitrite [J]. *Water Environment Research*, 1997, 69(6): 1086-1093.
- [12] XIAO Y, ZHANG E, ZHANG J, *et al.* Extracellular polymeric substances are transient media for microbial extracellular electron transfer [J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): 1700623.
- [13] KODAMA Y. *Sulfuricurvum kujiense* gen. nov. sp. nov. a facultatively anaerobic, chemolithoautotrophic, sulfur-oxidizing bacterium isolated from an underground crude-oil storage cavity [J]. *International Journal of Systematic & Evolutionary Microbiology*, 2004, 54(6): 2297-2300.

作者简介:刘崇(1984-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,助理研究员,研究方向为火化烟气处理技术与应用、殡仪场所空气净化及污水处理技术。

E-mail:liuchong_101s@163.com

收稿日期:2022-01-24

修回日期:2022-03-21

(编辑:李德强)