

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.11.001

铁氨氧化污泥的驯化及其同步脱氮除磷效果

董佳晨¹, 胡兰兰¹, 陆茵², 孙利利², 李继云³, 徐康宁¹

(1. 北京林业大学环境科学与工程学院 北京市水体污染源控制技术重点实验室, 北京 100083; 2. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 铁氨氧化是一种铁依赖型厌氧氨氧化技术,同时铁也是一种常规的除磷材料,有望基于铁氨氧化开发一种厌氧同步脱氮除磷的新技术。基于此,开展了铁氨氧化污泥的驯化及其同步脱氮除磷效果研究。与厌氧污泥相比,厌氧氨氧化污泥更适合作为接种污泥,以厌氧氨氧化污泥接种,在连续流反应器中成功实现低碳氮比污水的同步脱氮除磷。在稳定运行阶段,氨氮去除率在40%~60%之间,且去除的氨氮中72%转化为 N_2 ;磷去除率约为40%。亚铁生成和氨氮的氧化证实了铁氨氧化作用,同时生成的亚铁促进了蓝铁矿的形成。这表明除了铁盐除磷外,蓝铁矿结晶也是除磷的重要途径。

关键词: 铁氨氧化; 脱氮除磷; 蓝铁矿; 低碳氮比

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)11-0001-07

Acclimation of Feammox Sludge and Its Simultaneous Removal of Nitrogen and Phosphorus

DONG Jia-chen¹, HU Lan-lan¹, LU Yin², SUN Li-li², LI Ji-yun³, XU Kang-ning¹

(1. Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Guohuan Tsinghua Environmental Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100084, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Feammox, an iron-dependent anaerobic ammonium oxidation (Anammox), might be developed as a novel anaerobic technology for simultaneous removal of nitrogen and phosphorus because ferric salts are commonly used chemicals for phosphate removal. Based on this hypothesis, the acclimation of Feammox sludge and its simultaneous removal of nitrogen and phosphorus were investigated. Compared with anaerobic digestion sludge, Anammox sludge was more suitable being used as the inoculated sludge. Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from low C/N ratio wastewater was successfully achieved in a continuous flow reactor inoculated with Anammox sludge. In the stable operation stage, the removal rate of ammonium was approximately 40%~60%, of which 72% of the removed ammonium was converted to N_2 , and the removal rate of phosphate was about 40%. The formation of ferrous and the oxidation of ammonium indicated the existence of Feammox. Ferrous formed

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52270022)

通信作者: 徐康宁 E-mail: xukangning@bjfu.edu.cn

in Feammox induced the crystallization of vivianite, which indicated that vivianite crystallization was also a pathway for phosphate removal in addition to phosphate removal via ferric salts.

Key words: Feammox; nitrogen and phosphorus removal; vivianite; low C/N ratio

厌氧铁氨氧化(Feammox)是一种在稻田、湖泊、湿地、海洋沉积物等自然生态系统中新发现的铁和氮地球化学循环中的一个途径^[1],在厌氧环境下,以Fe(Ⅲ)为电子受体实现氨氮的氧化,产物可以是 N_2 、 NO_2^- 、 NO_3^- ^[2]。因此,铁氨氧化有望成为一种新型的厌氧氨氧化污水处理技术^[3]。根据理论反应式,Feammox实现氨氮氧化时铁的消耗量较大,但反应器内存在的Fe(Ⅱ)/Fe(Ⅲ)循环可以使得Fe(Ⅲ)投加量仅为理论值的5.8%^[4]。Li等^[5]认为铁氨氧化可以耦合硝酸盐依赖型亚铁氧化(NDFO),更有利于实现总氮的去除。Le等^[6]认为较高的有机物浓度会抑制铁氨氧化,而在低碳氮比情况下则可以实现氨氮和COD的同步有效去除,这一现象引发了研究者对铁氨氧化处理低碳氮比污水的关注。目前主要是通过厌氧消化污泥^[6]和厌氧氨氧化(Anammox)污泥^[7]驯化培养铁氨氧化污泥,以厌氧消化污泥驯化的铁氨氧化通常用于高有机物浓度下的氨氧化,而Anammox污泥驯化则更常用于低碳氮比污水的氨氧化,但有关两种污泥驯化方式在脱氮上的差异仍缺乏了解,不利于对后续工艺脱氮效果的研究。

铁氨氧化使用的铁盐是传统的混凝除磷药剂,同时反应过程中会生成亚铁,也为通过蓝铁矿结晶的形式去除污水中的磷酸盐提供了一个新的潜在途径。蓝铁矿结晶是在污水处理以及厌氧消化过程中常见的一种现象,铁盐经过异化铁还原过程形成亚铁,过饱和后,亚铁与磷酸盐形成蓝铁矿结晶从而实现除磷^[8]。因此,铁氨氧化有望在获得氨氧化的同时实现同步除磷,可基于此开发一种无需人工曝气、在同一个反应器内实现同步脱氮除磷的工艺。因此,本研究首先在序批式试验中考察了接种污泥类型对铁氨氧化脱氮效果的影响,选择最适宜的污泥驯化方式;在连续流反应器中成功驯化铁氨氧化污泥后,研究了同步脱氮除磷效果以及微生物群落结构的演替,并对除磷过程进行了分析。

1 材料与方法

1.1 接种污泥和铁源

分别选用厌氧污泥和Anammox污泥作为接种

污泥。厌氧污泥取自实验室的厌氧污泥反应器的排泥,总悬浮颗粒物(TSS)浓度约为9 000 mg/L;Anammox污泥取自稳定运行的厌氧氨氧化中试设备,TSS浓度约为18 000 mg/L。分析纯 Fe_2O_3 粉末和制备的 $Fe(OH)_3$ 用作Fe(Ⅲ)的来源。 $Fe(OH)_3$ 制备方法如下:取一定量 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$,于去离子水中溶解,逐滴加入1 mol/L氢氧化钠溶液调节pH至6.5~7.5,重复离心3次,得到红褐色胶状 $Fe(OH)_3$ 。

1.2 试验方法

1.2.1 两种污泥驯化对比试验

厌氧污泥作为接种污泥时,将脱氧去离子水以体积比为5:1加入到接种污泥中,在25℃的黑暗环境静置1 d,离心去上清液,除去本底 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$,重复3次。然后,将去除上清液后的污泥作为接种污泥。采用有效容积为250 mL的厌氧瓶进行铁氨氧化序批式试验,并设置处理组 and 对照组,处理组加入 Fe_2O_3 ,Fe(Ⅲ)浓度为25 mmol/L,对照组不添加铁源。每个反应器接种40 mL厌氧污泥和210 mL模拟配水(TSS约为600 mg/L),并进行 N_2/CO_2 (80%/20%)曝气脱氧。厌氧瓶采用丁腈塞及铝盖密封,冲洗顶空30 min以除去上部的氧气,然后用锡纸包裹,放置在32℃的摇床(120 r/min)中。每组试验设置3个平行样。模拟配水成分: NH_4^+-N (来自 NH_4Cl)为170 mg/L(厌氧污泥)或100 mg/L(Anammox污泥), $NaHCO_3$ 、 KH_2PO_4 、 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 、 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 分别为500、27、136、200 mg/L,微量元素、维生素均为1 mL/L。

Anammox污泥作为接种污泥时,同厌氧污泥处理组和对照组的设置一致,每个反应器内接种20 mL Anammox污泥和230 mL模拟配水。

1.2.2 连续流运行试验

以200 mL洗净后的Anammox污泥作为接种污泥,采用连续流反应器开展试验。试验装置与团队先前论文中一致^[4],有效容积为0.76 L,出水处设置U型管,反应器加盖密封以防止气体进入,反应器外部用锡纸包裹以减少光照。反应器启动时投加5 mmol/L的 Fe_2O_3 ,之后在第83天和第160天分别补充

投加 5 mmol/L $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。由 BT100-2J 蠕动泵控制进水,水力停留时间为 2 d。

该反应器进水为稀释 40 倍的尿液废水,以此来模拟低碳氮比污水。其中,氨氮浓度为 110~120 mg/L,总氮浓度为 110~120 mg/L,磷酸盐浓度为 6~8 mg/L,COD 浓度为 60~80 mg/L,pH 约为 9,使用稀盐酸调降至 6.9~7.5。

1.3 分析方法

在序批式试验中,在充分摇匀的状态下用注射器从各小瓶取样,用于 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、TN 及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的测定。所有样品于离心机(TDL-40B)中以 4 000 r/min 的速度离心 10 min,再用 0.45 μm 的滤头(TGMF60)过滤。测定 $\text{Fe}(\text{II})$ 时,吸取 1 mL 悬液置于装有 5 mL 盐酸溶液(0.6 mol/L)的样品管中,盖上盖子并摇匀,在摇床(THZ-98C)上于室温下振荡浸提 16 h。其中, NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定, NO_2^--N 采用重氮化法测定, NO_3^--N 采用镉还原法测定,TN 采用过硫酸盐氧化分光光度法测定, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 采用抗坏血酸法测定,亚铁和总铁采用 Ferrozine 法测定,pH 采用雷磁 pH 计测定,总悬浮颗粒物(TSS)采用重量法测定。

对反应器运行了 0、130、190 d 的污泥进行取样,于离心机中 4 000 r/min 离心 10 min,倾去上清液,在冷冻干燥机(FD-1A-50)中于 -55°C 下进行干燥。之后使用 JSM-6700F 场发射扫描电镜(SEM)和岛津 XRD-7000 X 射线衍射仪进行检测分析。

对原始 Anammox 污泥、驯化污泥样品提取 DNA。样本的细菌丰度和群落通过聚合酶链反应和高通量测序进行测定。聚合酶链反应扩增通用引物为 515F 和 907R,用 2% 琼脂糖凝胶电泳对扩增后的产物进行检测;使用 Illumina MiSeq 平台对纯化的聚合酶链反应产物进行测序分析。

2 结果与讨论

2.1 铁氨氧化污泥的驯化

以厌氧污泥驯化的铁氨氧化序批式试验结果如图 1 所示。对照组和处理组的氨氮浓度均有下降,相比之下,处理组氨氮下降更为明显,经过 40 d 的驯化,氨氮浓度由最初的 165 mg/L 降低至 61 mg/L,同时有亚铁生成,这通常被视为铁氨氧化的两个典型特征^[1],在该过程中亚硝态氮和硝态氮的生成量分别为 36、84 mg/L,这表明以厌氧污泥驯化的铁

氨氧化产物以硝态氮和亚硝态氮为主。对照组未添加铁源,但仍然存在氨氮浓度的下降和亚铁的检出,因此对照组可能同样存在铁氨氧化过程,产物也是以硝态氮和亚硝态氮为主。从结果来看,处理组的氨氮氧化能力更强,且 $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度始终高于对照组,这表明投加铁源后处理组的铁氨氧化活性更强。

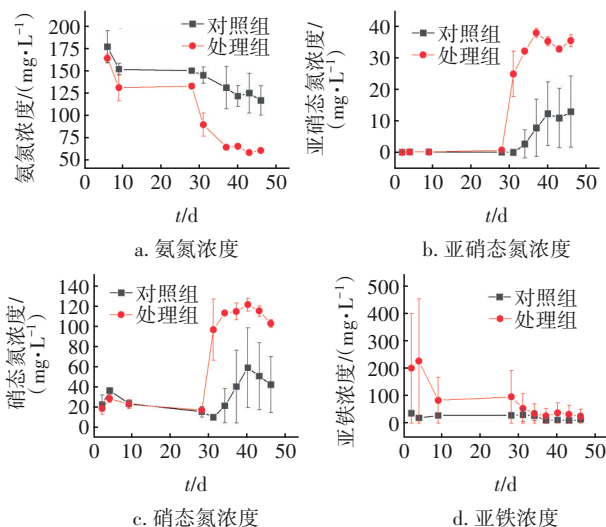


图1 以厌氧污泥驯化的铁氨氧化处理效果

Fig.1 Effect of Feammox treatment with anaerobic sludge acclimation

以 Anammox 污泥接种的序批式试验结果见图 2。在前 6 d 对照组和处理组的氨氮浓度都略有升高,这表明菌种适应过程中存在菌体自溶,因此导致氨氮浓度上升。对照组氨氮浓度在 6 d 后虽然略有变化,但是趋势并不明显,亚铁浓度则略有下降,一直维持在 40 mg/L 以下;相比之下,处理组的氨氮浓度在约 6 d 后则开始显著下降,同时,体系中 $\text{Fe}(\text{II})$ 和硝态氮浓度随反应的进行而增加,亚硝态氮浓度则都在 0.4 mg/L 以下。因为中性 pH 下亚铁极易氧化^[9],而处理组能检测到较高浓度的亚铁,说明该体系处于缺氧状态。在缺氧条件下微生物以 $\text{Fe}(\text{III})$ 作为电子受体, $\text{Fe}(\text{III})$ 被还原为 $\text{Fe}(\text{II})$,属于典型的异化铁还原过程^[9],而同时氨氮浓度下降,硝态氮和亚硝态氮浓度上升,则意味着氨的氧化,缺氧条件下异化铁还原和氨氧化是铁氨氧化的两个典型特征,因此,缺氧条件下氨氮浓度下降和 $\text{Fe}(\text{II})$ 的生成表明发生了铁氨氧化。反应后期出现了 $\text{Fe}(\text{II})$ 和硝态氮浓度持续下降的现象,可能是发生了硝酸盐依赖型亚铁氧化(NDFO)反应,硝态

氮被还原,并伴随亚铁的氧化^[10]。就整体而言,处理组氨氮氧化产物有硝态氮、亚硝态氮,去除的氨氮中分别有33%和1%被转化硝态氮和亚硝态氮。亚硝态氮浓度较低有两种可能,一是铁氨氧化不生成亚硝态氮,另一个是生成的亚硝态氮很快通过Anammox过程去除。但是无论怎样,这都有利于脱氮效率的提升,通过物料平衡可知,最终去除的氨氮中约有66%转化为了 N_2 。因此,通过Anammox污泥驯化的铁氨氧化中氨氮主要以 N_2 形式被去除,更适合致力于脱氮处理的铁氨氧化污泥驯化。

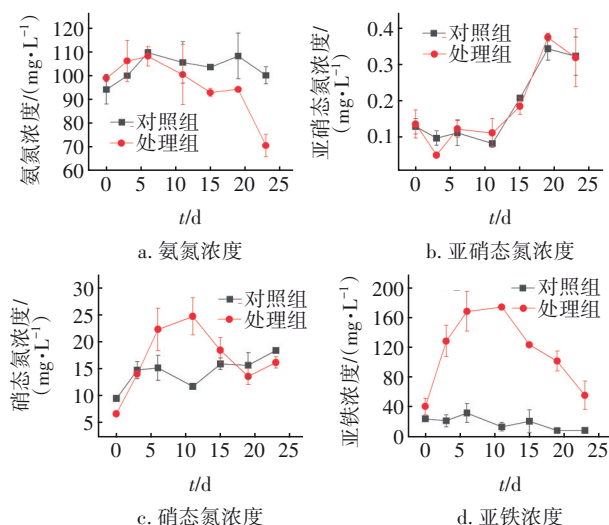


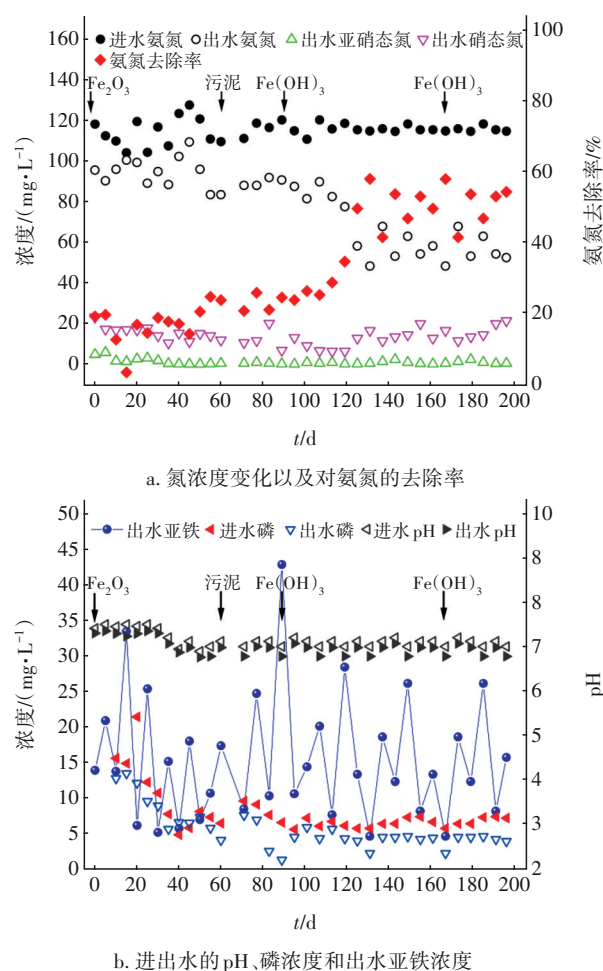
图2 以Anammox污泥驯化的铁氨氧化处理效果

Fig.2 Effect of Feammox treatment with Anammox sludge acclimation

2.2 连续流铁氨氧化反应器的脱氮除磷效果

以Anammox污泥驯化的连续流铁氨氧化反应器对低碳氮比污水的处理效果见图3,反应器运行初期,出水氨氮浓度相比进水仅略有下降。从前述序批式试验结果可知驯化早期菌体自溶会使得氨氮浓度略有升高,但是考虑到在760 mL有效容积中接种了200 mL洗净后的Anammox污泥,因此,这也使得进水中的氨氮被稀释,从而导致出水氨氮浓度比进水略低。之后,随着铁氨氧化功能菌的驯化,氨氮被氧化,出水氨氮浓度持续下降。60 d后,出水氨氮浓度由110 mg/L降低至84 mg/L,去除率提升至23.8%。在第90天向反应器中加入 $Fe(OH)_3$,发现更换铁源后,氨氮的去除率有了明显的上升。 Fe_2O_3 结晶度大,微生物较难利用,而比表面积大的铁羟基氧化物更容易被微生物利用^[11],于是提升了铁氨氧化的氨氧化效率。稳定运行阶段(125~196 d),氨

氮去除率在40%~60%之间,最高可去除66 mg/L的氨氮,出水硝态氮浓度在12~22 mg/L之间,亚硝态氮平均浓度为1 mg/L。计算可知,去除的氨氮中约有72%转化为 N_2 ,与序批式试验结果一致。但是,与课题组前期铁氨氧化脱氮结果^[4]相比,本研究中氨氮去除率降低了约20%,相比于文献中的配水,稀释后的尿液废水含有一定浓度的有机物(COD约为60~80 mg/L),其会与氨氮竞争铁源,从而可能抑制铁氨氧化的氨氧化效率^[12]。出水COD约为10~20 mg/L,去除率约为79%,可见铁氨氧化反应器适用于低碳氮比污水的处理。



b. 进出水的pH、磷浓度和出水亚铁浓度

图3 Feammox连续流反应器的处理效果

Fig.3 Treatment effect of continuous flow Feammox reactor

在稳定运行阶段,进水磷浓度为6.5 mg/L,去除率在40%左右,去除磷的平均值约为2.6 mg/L。 $Fe(OH)_3$ 表面有大量活性吸附位点,是除磷的优良吸附剂^[13], $Fe(OH)_3$ 吸附可能是一个除磷的途径。

对铁氨氧化反应器中的污泥进行了分析,结果表明,污泥中存在晶体类物质,菱形片状晶体互相交叉聚集在一起(见图4),与文献中报道的蓝铁矿晶体形貌相似^[14]。进一步分析发现,产物的XRD衍射峰部分与 Fe_2O_3 标准卡片的衍射峰相符合,说明污泥中存在 Fe_2O_3 ,这是第一次投加铁源的缘故。同时,XRD衍射峰与蓝铁矿的标准卡片峰位置一致,说明存在蓝铁矿晶体,即反应器中有蓝铁矿晶体生成。这表明,铁氨氧化形成的亚铁可以与磷酸盐结合形成蓝铁矿结晶,从而成为另一个除磷途径。

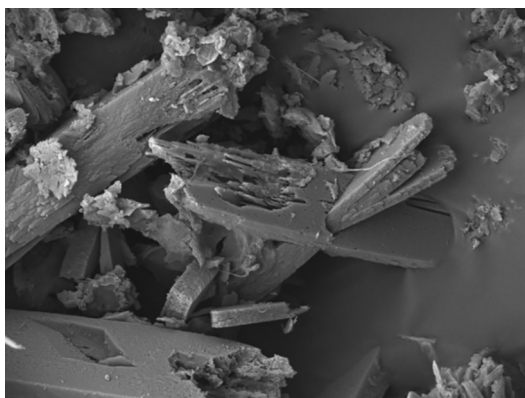


图4 铁氨氧化反应器中污泥的SEM照片

Fig.4 SEM images of solid products in the Feammox reactor

稀释尿液进水pH在6.9~7.5之间,出水pH为6.8~7.4,略有降低,主要是因为铁氨氧化过程会消耗碱度,使得pH略有下降。反应器出水 $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度为4.6~42.8 mg/L,这说明 $\text{Fe}(\text{III})$ 被还原为 $\text{Fe}(\text{II})$,氨氧化和铁还原同时发生,间接证明了铁氨氧化过程的存在。以上结果表明,通过铁氨氧化可以实现氮和磷的同步去除,但是目前脱氮除磷效率仍然不高,有待进一步研究优化。

2.3 微生物群落演化

在门水平上,与接种污泥相比,反应器中污泥的微生物种类更加多样化,优势菌仍然为变形菌门(*Proteobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、拟杆菌门(*Bacteroidota*)和浮霉菌门(*Planctomycetota*),但是经过驯化后绿弯菌门和酸杆菌门(*Acidobacteriota*)两种微生物丰度明显增加(见图5)。有研究表明,*Proteobacteria*、*Acidobacteriota*、*Bacteroidota*等存在具有铁氨氧化功能的微生物^[15],其中,*Acidobacteriota*与厌氧氨氧化和铁还原直接相关^[16],驯化前后(0、130、190 d)的丰度分别为0.96%、3.77%、4.23%,丰

度显著增加,说明铁氨氧化的驯化过程是成功的。

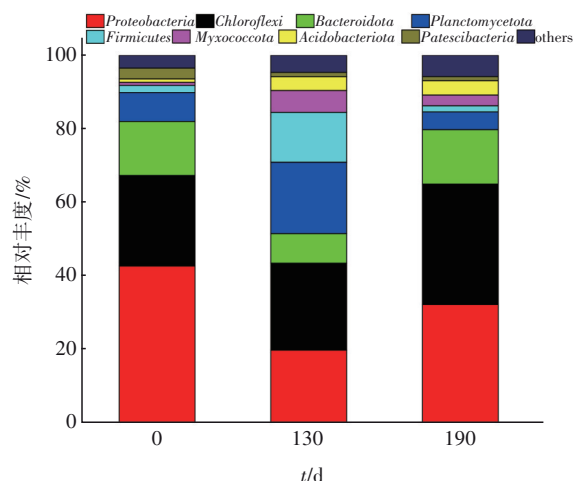


图5 铁氨氧化反应器中微生物在门水平的相对丰度变化

Fig.5 Variation of relative abundances of bacteria at phylum level in the Feammox reactor

在属水平上,经过驯化后微生物群落结构也发生了较大的变化,如图6所示。

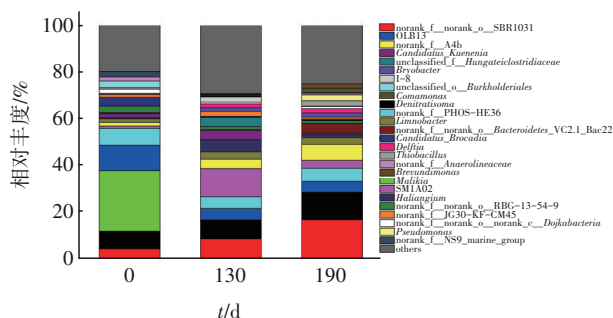


图6 铁氨氧化反应器中微生物在属水平的相对丰度变化

Fig.6 Variation of relative abundances of bacteria at genus level in the Feammox reactor

接种污泥中,处于优势的微生物主要有 *norank_f_norank_o_SBR1031*、*Denitratisoma*、*Malikia*、*OLB13*、*norank_f_PHOS-HE36*,而驯化后的优势菌为 *norank_f_norank_o_SBR1031*、*Denitratisoma*、*OLB13*、*norank_f_PHOS-HE36*、*SM1A02*。驯化后 *Malikia*^[17]这种反硝化菌的数量大大减少,相对丰度由25.59%降低至0,表明因为反应器中有机物浓度较低,反硝化被抑制。*Candidatus_Brocadia*和*Candidatus_Kuenenia*都是参与厌氧氨氧化的重要微生物^[18],它们的相对丰度由初始的3.70%和1.62%降低至0.50%和0.65%,亚硝酸盐是厌氧氨氧化菌最重要的电子受体^[19],在本研究中,由于缺少亚硝酸盐,导致 *Anammox* 菌丰度降低。*Pseudomonas*和

Geobacter 都是对铁氨氧化过程起重要作用的铁还原菌^[20],在处理过程中实现了这两种铁还原菌等功能微生物的富集。驯化后,*Geobacter* 丰度达到0.099%,*Pseudomonas* 的丰度由初始的0逐渐升高到2.47%。*Thiobacillus* 是一种铁氧化细菌,有助于NDFO过程进行硝酸盐的还原^[21],相对丰度由0.04%上升到2.38%,间接证明了反应器中存在NDFO过程。

2.4 新技术的应用前景

铁氨氧化是一种新发现的铁和氮地球化学循环路径,近年来在污水处理中的脱氮效果也为一些研究所证实,本研究发现 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 是一种比 Fe_2O_3 更有效促进铁氨氧化的铁源,可以提升铁氨氧化的效率,但是仍然需要进一步更深层次的分析,哪些微生物起作用、氨氮的氧化途径以及电子传递途径等作用机制仍然不清晰,这都会限制氨氧化效率的进一步提升。铁氨氧化除了实现氨氮的氧化,同时也包含着铁的异化还原过程,本研究在反应器中检测到了蓝铁矿的生成,证实了最初的假设,可以为开发新型的厌氧同步脱氮除磷技术提供理论基础。

该技术无需曝气为氨氧化提供氧气,甚至不需要缺氧反硝化,也不需要生物除磷中的厌氧释磷和好氧吸磷的复杂过程,可以在同一个反应器中实现同步脱氮除磷,因此,与传统的污水生物脱氮除磷工艺相比,它具有典型的低碳排放优势。但是,该新型脱氮除磷技术的脱氮效率和除磷效率并不高,从已有研究来看,铁氨氧化可以针对100 mg/L的进水氨氮实现90%以上的氨氧化效率,一方面,可能是进水含有的有机物抑制了铁氨氧化效果,另一方面也可能是蓝铁矿结晶的生成占用了部分铁,导致NDFO过程受限,进而削弱了铁氨氧化效果。鉴于有机物的潜在负面影响,该技术可能更适用于低碳氮比污水的脱氮除磷处理,比如农村污水、厌氧消化液等。在将来可以针对铁氨氧化的作用机制以及影响因素开展更多研究以实现同步脱氮除磷效果的优化,促进新技术的成熟与应用。

3 结论

① 经厌氧污泥驯化后,铁氨氧化产物主要是硝态氮和亚硝态氮,而Anammox污泥驯化后的铁氨氧化产物主要是 N_2 ,因此,Anammox污泥更适合作为铁氨氧化的接种污泥。

② 铁氨氧化连续流反应器可以实现对低碳氮比污水中氮和磷的同步去除。在稳定运行阶段,氨氮去除率在40%~60%之间,去除的氨氮中约72%转化为 N_2 ,磷的去除率约为40%。

③ 反应器中Anammox菌群丰度下降,铁还原菌逐渐富集,*Pseudomonas* 的丰度最高可达到2.47%,同时,参与NDFO过程的*Thiobacillus* 菌属相对丰度由0.04%上升到2.38%,这表明反应器中铁氨氧化、Anammox和NDFO过程可以共同作用于脱氮。

④ 反应器中检测到蓝铁矿晶体的生成,表明铁氨氧化形成的亚铁可以与磷酸盐发生蓝铁矿结晶反应,从而促进除磷。

⑤ 铁氨氧化技术不仅可以同步脱氮除磷,而且不需要供氧,因此具有低碳排放优势,尤其适用于低碳氮比污水的脱氮除磷处理,可以与污水中碳源利用技术结合构建更可持续的污水处理技术体系。

参考文献:

- [1] YANG W H, WEBER K A, SILVER W L. Nitrogen loss from soil through anaerobic ammonium oxidation coupled to iron reduction [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(8): 538-541.
- [2] CLÉMENT J, SHRESTHA J, EHRENFELD J G, *et al.* Ammonium oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron under anaerobic conditions in wetland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12): 2323-2328.
- [3] YANG Y, ZHAO Z, ZHANG Y. Anaerobic ammonium removal pathway driven by the $\text{Fe}(\text{II})/\text{Fe}(\text{III})$ cycle through intermittent aeration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(11): 7615-7623.
- [4] HU L, CHENG X, QI G, *et al.* Achieving ammonium removal through anammox-derived Feammox with low demand of $\text{Fe}(\text{III})$ [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 918634.
- [5] LI X, YUAN Y, HUANG Y, *et al.* A novel method of simultaneous NH_4^+ and NO_3^- removal using Fe cycling as a catalyst: Feammox coupled with NAFO [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 153-157.
- [6] LE C P, NGUYEN H T, NGUYEN T D, *et al.* Ammonium and organic carbon co-removal under feammox-coupled-with-heterotrophy condition as an

- efficient approach for nitrogen treatment [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 784.
- [7] RODRÍGUEZ C, CISTERNAS J, SERRANO J, *et al.* Nitrogen removal by an anaerobic iron-dependent ammonium oxidation (Feammox) enrichment: potential for wastewater treatment [J]. Water, 2021, 13(23): 3462.
- [8] ZHANG J, CHEN Z, LIU Y, *et al.* Phosphorus recovery from wastewater and sewage sludge as vivianite [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 370: 133439.
- [9] MORGAN B, LAHAV O. The effect of pH on the kinetics of spontaneous Fe(II) oxidation by O₂ in aqueous solution—basic principles and a simple heuristic description[J]. Chemosphere, 2007, 68(11): 2080–2084.
- [10] YANG Y, XIAO C, LU J, *et al.* Fe(III)/Fe(II) forwarding a new anammox-like process to remove high-concentration ammonium using nitrate as terminal electron acceptor [J]. Water Research, 2020, 172: 115528.
- [11] 王亚娥,冯娟娟,李杰,等. 不同Fe(III)对活性污泥异化铁还原耦合脱氮的影响及机理初探[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 377–384.
- WANG Ya'e, FENG Juanjuan, LI Jie, *et al.* A preliminary investigation of the effects and mechanisms of different Fe(III) on the coupled denitrification of activated sludge by heterogeneous iron reduction [J]. Journal of Environmental Science, 2014, 34(2): 377–384 (in Chinese).
- [12] YANG Y, ZHANG Y, LI Y, *et al.* Nitrogen removal during anaerobic digestion of wasted activated sludge under supplementing Fe(III) compounds[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 332: 711–716.
- [13] SMITH S, TAKACS I, MURTHY S, *et al.* Phosphate complexation model and its implications for chemical phosphorus removal[J]. Water Environment Research, 2008, 80(5): 428–438.
- [14] TIAN J, CHENG X, DENG S, *et al.* Inducing in situ crystallization of vivianite in a UCT-MBR system for enhanced removal and possible recovery of phosphorus from sewage[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(15): 9045–9053.
- [15] PENG Q, SHAABAN M, WU Y, *et al.* The diversity of iron reducing bacteria communities in subtropical paddy soils of China [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 101: 20–27.
- [16] 丁帮璟,徐梦珊,李丹丹,等. 不同菜地土壤的铁氨氧化脱氮过程探究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3506–3511.
- DING Bangjing, XU Mengshan, LI Dandan, *et al.* Investigation of oxidative denitrification process of ferric ammonia in different vegetable soils [J]. China Environmental Science, 2020, 40(8): 3506–3511 (in Chinese).
- [17] KUTVONEN H, RAJALA P, CARPÉN L, *et al.* Nitrate and ammonia as nitrogen sources for deep subsurface microorganisms [J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6: 1079.
- [18] MA B, WANG S, CAO S, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances[J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 981–990.
- [19] LI X, HUANG Y, LIU H, *et al.* Simultaneous Fe(III) reduction and ammonia oxidation process in Anammox sludge [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 64: 42–50.
- [20] DING B, LI Z, QIN Y. Nitrogen loss from anaerobic ammonium oxidation coupled to iron(III) reduction in a riparian zone[J]. Environmental Pollution, 2017, 231: 379–386.
- [21] KANAPARTHI D, CONRAD R. Role of humic substances in promoting autotrophic growth in nitrate-dependent iron-oxidizing bacteria [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2015, 38(3): 184–188.

作者简介:董佳晨(1999–),女,浙江宁波人,硕士研究生,主要从事污水资源化处理技术研究。

E-mail:18811255737@163.com

收稿日期:2023-11-15

修回日期:2024-01-21

(编辑:李德强)