



HRT对硫/菱铁矿自养反硝化系统运行性能的影响

张献旭¹, 胡晓玲², 张 俐³, 王弘宇²

(1. 武汉环投固废运营有限公司, 湖北武汉 430014; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北武汉 430072; 3. 湖北省工程咨询股份有限公司, 湖北武汉 430060)

[摘要] 构建了硫/菱铁矿组合系统进行自养反硝化脱氮的实验, 探究了水力停留时间(HRT)对系统的协同脱氮效率、氮的中间产物、出水 SO_4^{2-} 浓度、 FeCO_3 自养反硝化的脱氮贡献率及微生物群落结构变化的影响。研究结果表明, 当 HRT=12 h 时, 系统总无机氮(TIN)去除率为 95.67%, 出水 SO_4^{2-} 质量浓度为 181.26 mg/L, 并且 FeCO_3 自养反硝化脱氮对氮脱除的贡献率增加至 20.49%, 该 HRT 条件下积累的中间产物和生成的 SO_4^{2-} 最少, 是硫/菱铁矿组合系统适宜的运行条件。硫杆菌属(*Thiobacillus*)是系统中丰度最高的自养反硝化细菌, 其利用硫和 Fe(II) 作为电子供体降解 NO_3^- -N。硫/菱铁矿自养反硝化脱氮技术具有经济高效及协同脱氮的特点, 这将使其成为一种极具潜力的污水处理厂尾水深度脱氮的新方法。

[关键词] 硫/菱铁矿; 自养反硝化; 脱氮; 水力停留时间; 群落结构

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)11-0177-07

Effect of HRT on operation performance of sulfur/siderite autotrophic denitrification system

ZHANG Xianxu¹, HU Xiaoling², ZHANG Li³, WANG Hongyu²

(1. Wuhan Environment Investment Solid Waste Co., Ltd., Wuhan 430014, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Hubei Province Engineering Consulting Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: A combined sulfur/siderite system was constructed for autotrophic denitrification experiment. The effects of hydraulic retention time(HRT) on the synergistic denitrification efficiency, nitrogen intermediates, SO_4^{2-} concentration of effluent, autotrophic denitrification contribution proportion of FeCO_3 and changes of microbial community structure were explored. The results showed that when HRT was 12 h, the total inorganic nitrogen(TIN) removal rate of the system was 95.67%, the SO_4^{2-} mass concentration of effluent was 181.26 mg/L, and the proportion of FeCO_3 autotrophic denitrification increased to 20.49%. The accumulation of intermediate products and the formation of SO_4^{2-} were the least under this condition, which indicated that HRT=12 h was the suitable operating condition for the combined system. *Thiobacillus*, the most abundant autotrophic denitrifying bacteria in the system, utilized sulfur and Fe(II) as electron donors to degrade NO_3^- -N. Sulfur/siderite autotrophic denitrification technology had the characteristics of economical, efficient and synergistic denitrification, which would make it a promising new method for deep denitrification of tailwater of municipal wastewater treatment plants.

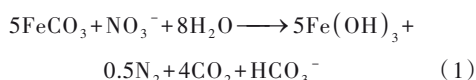
Key words: sulfur/siderite; autotrophic denitrification; denitrification; hydraulic retention time; community structure

工农业生产的发展以及化肥的大量施用导致了氮化合物在水体中的不良积累及过量排放^[1], 过量的氮排放将导致水体富营养化, 并对人类健康产生潜在危害。通常, 水体不发生富营养化的环境阈值约为 0.2 mg/L 的总氮(TN)^[2], 按我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,

TN 的最高允许排放质量浓度为 15 mg/L。因此, 满足一级 A 标准的污水处理厂排出的尾水并不能阻止水体的富营养化, 并且现在很多污水处理厂都面临出水 TN 不能稳定达标的问题。因此, 寻求进一步减少污水处理厂尾水总氮排放的低成本技术势在必行。

由元素硫驱动的自养反硝化技术是一种相对高效、经济、安全的脱氮技术^[3],适用于缺少碳源的污水处理厂尾水的进一步处理。但是,硫自养反硝化过程是产 H^+ 并消耗碱度的过程,而脱氮硫杆菌生长的最适pH为7,且硫自养反硝化需要无机碳源作为能量来源。

铁在自然界中分布广泛,主要以碳酸盐、氧化物、硫酸盐等铁矿物的形式存在^[4]。研究发现,菱铁矿(主要成分为 $FeCO_3$)能驱动硝酸盐向氮气的转化,相应的反应见式(1)^[5]。



$FeCO_3$ 自养反硝化过程会产生碱度和碳酸根,能够缓冲体系pH的变化,并且可以为系统中的自养微生物提供无机碳源, $FeCO_3$ 也可作为电子供体参与自养反硝化,此外,若将硫自养反硝化与 $FeCO_3$ 自养反硝化耦合,对于相同的进水 NO_3^- -N负荷还可以减少 SO_4^{2-} 的生成^[6]。因此,面对污水处理厂尾水提质增效的实际需求,开展硫/菱铁矿自养脱氮工艺的研究具有极大的理论意义和实际应用意义。

硫自养反硝化会导致碱度消耗,以及 SO_4^{2-} 和 NO_2^- -N的积累,通过引入菱铁矿可以缓解上述问题。但是,水力停留时间(HRT)作为硫/菱铁矿自养反硝化系统的关键参数之一^[7],其不仅会影响系统的脱氮效果,也会影响反应器的体积,更长的HRT需要更大的占地面积,将导致成本与能耗的增加。而且,HRT对系统的协同脱氮效率、氮的中间产物、 SO_4^{2-} 浓度、 $FeCO_3$ 自养反硝化的脱氮贡献率以及微生物群落丰度与结构变化的影响还没有详细的报道。基于此,本研究拟通过揭示HRT对硫/菱铁矿自养脱氮系统的影响规律,寻求减少中间产物积累和 SO_4^{2-} 生成的方法,对硫/菱铁矿自养反硝化技术的实际应用具有指导意义。

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行条件

实验装置如图1所示,采用圆柱形反应器,材质为有机玻璃,反应器内径为10 cm,高30 cm,反应器内等体积混合填充粒径为2~5 mm的硫颗粒和菱铁矿颗粒,有效填充高度为25 cm,有效填充体积为1.96 L。反应器采用上向流方式连续进水,实验

所用硫颗粒为工业用硫磺颗粒,S的质量分数为99.9%,所用菱铁矿购自贵州矿山,其主要组分为 $FeCO_3$ 。实验过程中改变反应器的HRT分别为6、12、18 h,探究反应器对污染物的去除效果、 $FeCO_3$ 自养反硝化的脱氮贡献率及系统的微生物群落变化。

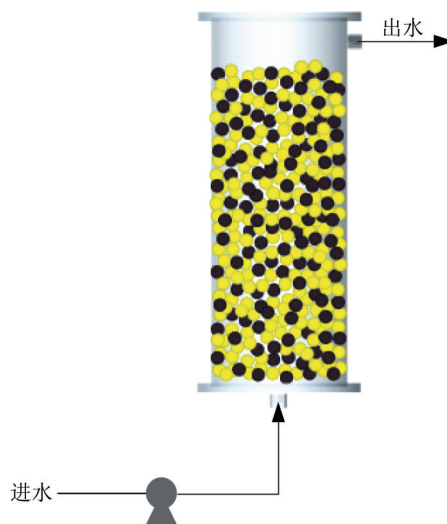


图1 反应装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of reaction device

1.2 进水水质与接种污泥

种泥取自实验室连续运行的自养反硝化反应器(该反应器的初始接种污泥质量浓度为2 040 mg/L)中的硫颗粒及菱铁矿颗粒上附着的膜状污泥。实验过程中反应器的进水为自来水配制的人工合成废水, NO_3^- -N在反应器中的质量浓度为 (36.33 ± 0.75) mg/L,废水中其他添加物质为: $NaHCO_3$ 500 mg/L, KH_2PO_4 2.7 mg/L,微量元素1 mL/L。微量元素溶液组成为: $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5 g/L, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.5 g/L, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.1 g/L, $CaCl_2$ 1.0 g/L, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 0.1 g/L, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 0.2 g/L, $Na_2MoO_4 \cdot 4H_2O$ 0.5 g/L。废水初始pH $=(7.0 \pm 0.3)$ 。

1.3 分析项目与方法

实验所采用的水质检测方法均参照国家环境保护总局《水和废水监测分析方法(第4版)》。采用紫外分光光度法测定 NO_3^- -N;采用N-(1-萘基)乙二胺分光光度法测定 NO_2^- -N;采用纳氏试剂分光光度法测定 NH_4^+ -N;采用瑞士万通离子色谱仪882 compact IC plus检测 SO_4^{2-} 浓度;采用梅特勒-托利多FE20K pH计测定pH。

为探究HRT对系统生物种群结构及多样性的

影响,在 HRT=6、12、18 h 这 3 个工况下系统运行稳定时,分别从反应器中部的硫/菱铁矿颗粒上等量剥落生物膜进行 Illumina 高通量测序,取出的生物膜样品依次编号为 D6(HRT=6 h)、D12(HRT=12 h)、D18(HRT=18 h)。

硫/菱铁矿自养反硝化系统中 FeCO_3 自养反硝化和硫自养反硝化对氮脱除的贡献率的计算方法见式(2)~式(5)^[8]。

$$X = (C_1 - C_2) / M_1 \times n_1 + C_2 / M_1 \times n_2 \quad (2)$$

$$X_s = C_3 / M_2 \times n_3 \quad (3)$$

$$N_s = X_s / X \times 100\% \quad (4)$$

$$N_F = 1 - N_s \quad (5)$$

式中: n_1 ——1 个 NO_3^- -N 被还原为 N_2 需要的电子数目,取 5;

n_2 ——1 个 NO_3^- -N 被还原为 NO_2^- -N 需要的电子数目,取 2;

n_3 ——1 个 S 被氧化为 SO_4^{2-} 可提供的电子数目,取 6;

C_1 ——进出水 NO_3^- -N 差值, g/L;

C_2 ——进出水 NO_2^- -N 差值, g/L;

C_3 ——进出水 SO_4^{2-} 质量浓度差值, g/L;

M_1 ——N 元素的摩尔质量,取 14 g/mol;

M_2 —— SO_4^{2-} 的摩尔质量,取 96 g/mol;

X ——系统中污水被处理所需要的电子浓度, mol/L;

X_s ——硫自养过程中单质硫提供的电子浓度, mol/L;

N_s ——硫自养反硝化对氮脱除的贡献率, %;

N_F —— FeCO_3 自养反硝化对氮脱除的贡献率, %。

2 结果与讨论

2.1 HRT 对系统脱氮性能的影响

HRT=6、12、18 h 时,反应器对氮素的去除效果见图 2。

由图 2 可知,当 HRT=6、12、18 h 时,在稳定运行阶段,反应器对 NO_3^- -N 均有很好的去除效果,平均去除率分别为 99.12%、99.48%、99.93%。HRT=6 h 和 12 h 时,反应器中存在 NO_2^- -N 积累,稳定运行阶段其出水平均 NO_2^- -N 分别为 3.098、0.743 mg/L; HRT=18 h 时,反应器内几乎无 NO_2^- -N 的积累。Wei WANG 等^[2]的研究表明,当 HRT 偏小(HRT=6 h 和 12 h)时,自养反硝化系统的出水中就会有 NO_2^- -

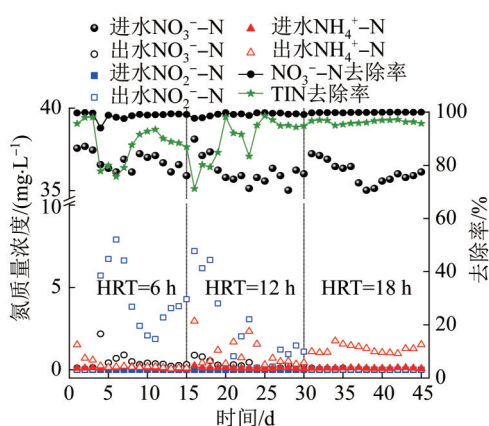


图 2 不同 HRT 条件下反应器内氮素的变化

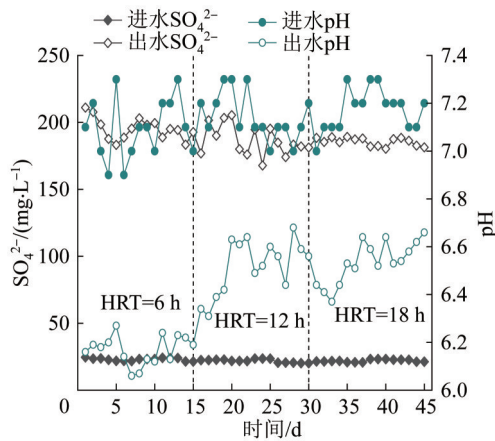
Fig. 2 Variations of nitrogen under different HRT conditions

N 的积累,与本研究结果类似。Fangmin CHEN 等^[9]的研究结果表明, S^0 对 NO_3^- -N 的亲合力显著高于对 NO_2^- -N 的亲合力,当 HRT 较低时,废水与填料没有充足的接触时间,导致 NO_3^- -N 的还原速率大于 NO_2^- -N 的还原速率, NO_3^- -N 被还原为 NO_2^- -N 后无法及时被还原为 N_2 ,因而产生了 NO_2^- -N 的积累。此外,随着 HRT 的增大, NH_4^+ -N 积累量逐渐上升,当 HRT=6、12、18 h 时,反应器在稳定运行阶段的平均出水 NH_4^+ -N 分别为 0.136、0.625、1.182 mg/L,这是因为当 HRT 增加, HRT 过长致使反应器中的部分微生物因缺少营养物质而死亡,从而释放出少量 NH_4^+ -N。由图 2 还可以看出,当 HRT=6、12、18 h 时,硫/菱铁矿自养反硝化系统对总无机氮(TIN)的平均去除率分别为 90.30%、95.67%、96.60%。综上, HRT=12 h 时系统对 TIN 的去除率达到 95% 以上,继续增大 HRT,系统对 TIN 的去除率没有明显的变化,反而会导致 NH_4^+ -N 的积累,而当 HRT=6 h 时,由于 NO_2^- -N 的积累也会使 TIN 去除率降低,因此, HRT=12 h 对于硫/菱铁矿自养反硝化系统的脱氮较为适宜。

2.2 HRT 对系统出水 SO_4^{2-} 浓度及 pH 的影响

HRT=6、12、18 h 时,系统出水 SO_4^{2-} 浓度及 pH 的变化见图 3。

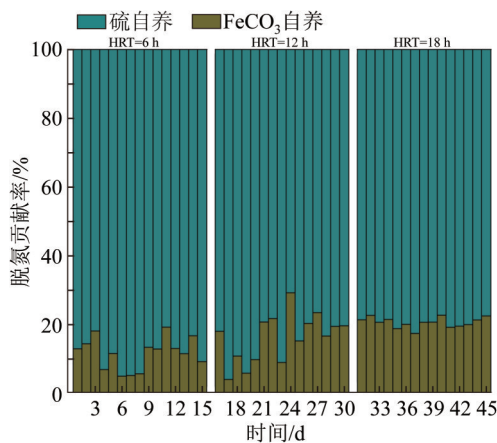
由图 3 可知, HRT 从 6 h 增加到 12 h 时,反应器出水 SO_4^{2-} 的平均质量浓度从 193.14 mg/L 降至 181.26 mg/L,而 HRT 从 12 h 增加到 18 h 时,反应器出水 SO_4^{2-} 的平均质量浓度略微上升至 184.14 mg/L;当进水 pH 稳定在 7.10 左右时, HRT 从 6 h 增加到 12 h 时反应器出水 pH 从 6.18 上升至 6.56, HRT 进一步增加到 18 h 时,系统出水 pH 相对稳定,为 6.58。推测

图3 不同HRT条件下反应器内 SO_4^{2-} 及pH的变化Fig. 3 Variations of SO_4^{2-} and pH under different HRT conditions

其原因为,当HRT从6 h增加到12 h时, FeCO_3 自养脱氮对氮脱除的贡献率增加,因此反应器出水 SO_4^{2-} 浓度减少,pH上升;而当HRT进一步增加到18 h时, FeCO_3 自养脱氮对氮脱除的贡献率基本不变,因此出水 SO_4^{2-} 浓度和pH基本不变。

2.3 HRT对系统中 FeCO_3 自养脱氮贡献率的影响

HRT=6、12、18 h时, FeCO_3 自养和硫自养脱氮对氮脱除的贡献率见图4。

图4 不同HRT条件下 FeCO_3 自养和硫自养脱氮贡献率Fig. 4 The proportions of FeCO_3 and sulfur autotrophic denitrification under different HRT conditions

由图4可知,HRT=6、12、18 h时,稳定运行阶段 FeCO_3 自养脱氮对氮脱除的贡献率分别为13.64%、20.49%、20.78%。有研究表明,硫自养反硝化产生的 H^+ 可能会促进 FeCO_3 中 Fe^{2+} 的溶出,将微生物在菱铁矿上(固相)的反应扩大至固液两相^[10],当HRT从6 h增加到12 h时,铁自养反硝化微生物有足够的停留时间利用溶出的 Fe^{2+} 将 NO_3^- -N还原,因而

FeCO_3 参与反硝化脱氮对氮脱除的贡献率增加。当HRT继续增加到18 h时, FeCO_3 自养脱氮对氮脱除的贡献率基本不变,说明进一步增加HRT对 FeCO_3 自养脱氮贡献率的提升没有帮助。 FeCO_3 自养脱氮对氮脱除贡献率的变化规律与2.2节所探讨的系统出水 SO_4^{2-} 浓度及pH的变化相一致,即当 FeCO_3 自养脱氮对氮脱除的贡献率增加时,出水 SO_4^{2-} 浓度减少,pH上升。

2.4 HRT对系统微生物群落的影响

2.4.1 微生物 α 多样性分析

样品D6、D12、D18的微生物物种丰富度及多样性指数见表1。

表1 不同HRT条件下微生物物种丰富度及多样性指数

Table 1 Species richness and diversity estimators of microbial populations under different HRT conditions

样品编号	OTU	Ace	Chao	Shannon	Simpson	Coverage
D6	192	330	287	1.48	0.503 0	0.998 1
D12	364	626	487	1.49	0.570 5	0.996 5
D18	171	351	266	0.63	0.818 7	0.997 8

由表1可知,HRT=12 h时,系统内Ace和Chao指数最大,此时系统内物种丰度最高,此外其Shannon指数最大,Simpson指数较小,说明微生物多样性也较高,这可能源于适宜的HRT使得系统中的微生物有较充足的营养物质。

样品D6、D12、D18的韦恩图见图5。

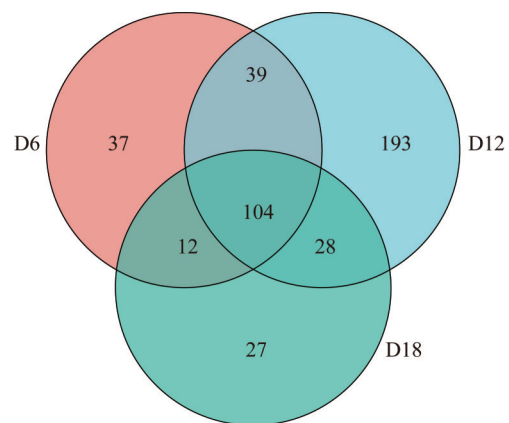


图5 韦恩图

Fig. 5 Venn diagram

由图5可知,3个样本获得的OTU总数为440,其中,共同所有的OTU数目为104,占3个样本总OTU数目的23.6%,这说明3个样本的生物多样性存在较大差异,不同HRT条件下的硫/菱铁矿自养反硝

化系统在菌群结构上发生了明显的演替和变化, HRT的改变对硫/菱铁矿自养反硝化系统的生物多样性有显著影响。

2.4.2 微生物群落结构分析

图6为样品D6、D12、D18中微生物组成的门水平分布。

由图6可知,硫/菱铁矿自养反硝化系统中最主要的菌门为变形菌门(Proteobacteria)、弯曲杆菌门(Campilobacterota)、酸杆菌门(Acidobacteriota)。随着HRT的增加,Proteobacteria的相对丰度逐渐增加,在3个样本中分别为85.87%、96.36%、98.73%;而Campilobacterota和Acidobacteriota的相对丰度随着HRT的增加逐渐降低。Proteobacteria中存在很多典型的硝酸盐还原菌和铁氧化菌^[11],系统中Proteobacteria的相对丰度远大于其他菌门,说明功能菌在系统中逐渐富集。

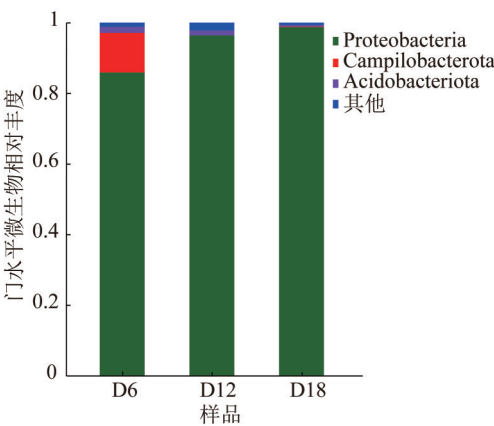


图6 微生物组成结构的门水平分布

Fig. 6 Distribution of microbial composition structure at phylum level

图7为3个样本D6、D12、D18在属分类水平下的热图。

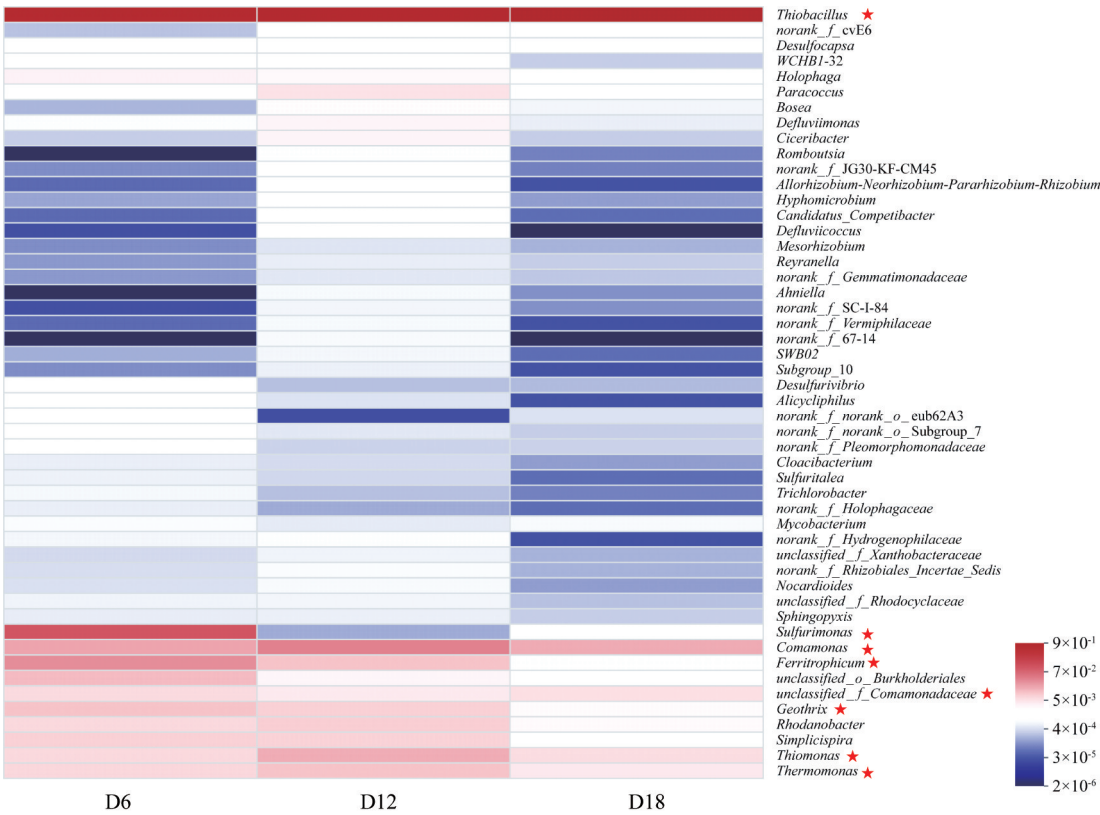


图7 微生物属水平热图

Fig. 7 Heatmap of microbial compositions at genus level

由图7可知,样品D6中的主要菌属有Thiobacillus、Sulfurimonas、Ferritrophicum、Comamonas、unclassified_o_Burkholderiales和Geothrix,各菌属相对丰度分别为74.46%、11.19%、3.12%、1.93%、1.30%、1.12%。

样品D12中的主要菌属有Thiobacillus、Comamonas、Thiomonas、Ferritrophicum、Thermomonas,各菌属相对丰度分别为82.35%、3.94%、1.62%、1.14%、1.12%。样品D18中的主要菌属有Thiobacillus、Comamonas,相

对丰度分别为93.70%、1.68%。

Thiobacillus 和 *Sulfurimonas* 属于 Proteobacteria 菌门,是典型的硫自养反硝化细菌^[1,12]。研究发现,某些种类的 *Thiobacillus* 也可以使用 Fe(Ⅱ) 作为电子供体^[13],因此可以利用硫和 Fe(Ⅱ) 的 *Thiobacillus* 可能在系统脱氮中发挥重要作用。作为硫/菱铁矿自养反硝化系统中相对丰度最大的菌属,随着 HRT 的增加, *Thiobacillus* 的相对丰度从 74.46% 逐渐增加至 93.7%,表明 HRT 的增加有利于其生长繁殖;与此相反,随着 HRT 的增加, *Sulfurimonas* 的相对丰度降低,说明 *Thiobacillus* 比 *Sulfurimonas* 更容易利用硫和 FeCO₃ 作为电子供体,相同的现象在 Ruihua LI 等^[14]对磁黄铁矿-硫-石灰石自养反硝化生物滤池的研究中也被发现。*Thiomonas* 是一种在很多硫自养反硝化系统中被检测到的自养硫化物氧化细菌^[15]。*Ferritrophicum* 也属于 Proteobacteria 菌门,是一种可以利用硝酸盐作为电子受体氧化 Fe(Ⅱ) 和硫化物的细菌^[16-17]。*Thermomonas* 是一种异养反硝化细菌,在进水没有有机物的情况下,可以利用细菌分泌和死亡后释放的有机物^[18]作为碳源,其同时也被报道是一种自养反硝化细菌,能够在缺乏有机物条件下利用无机碳源将硝酸盐还原为氮气^[19]。*Comamonas* 经常在氧化 Fe(Ⅱ) 还原硝酸盐的环境中被检测到^[20-21]。HRT=18 h 时,还存在内源反硝化细菌 *unclassified_f_Comamonadaceae*^[22],进一步证明过长的 HRT 使得系统中的微生物缺乏营养物质。综上,同时存在的自养、异养和内源脱氮细菌保证了系统高效稳定的脱氮性能,另外,系统中存在的铁还原菌 *Geothrix* 对 Fe(Ⅱ) 和 Fe(Ⅲ) 的循环也起到了重要作用^[13]。

3 结论

(1) 改变硫/菱铁矿自养反硝化组合系统的 HRT,探究 HRT 对硫/菱铁矿自养反硝化系统运行性能的影响,结果表明,在进水 NO₃⁻-N 为 36 mg/L 时,当 HRT 由 6 h 增加到 12 h,系统的 TIN 去除率从 90.30% 增加到 95.67%,FeCO₃ 自养反硝化脱氮对氮脱除的贡献率由 13.64% 增加至 20.49%,出水 SO₄²⁻ 质量浓度从 193.14 mg/L 降至 181.26 mg/L, pH 从 6.18 上升至 6.56;当 HRT 进一步增加到 18 h 时,系统

脱氮效果及 FeCO₃ 自养脱氮贡献率受到的影响较小,反而会导致 NH₄⁺-N 的积累。因此, HRT=12 h 对于硫/菱铁矿自养反硝化系统较为适宜。

(2) Proteobacteria 菌门的 *Thiobacillus* 菌属是系统中占据绝对优势的自养反硝化细菌,同时还存在 *Sulfurimonas*、*Ferritrophicum*、*Thermomonas*、*Geothrix* 等功能细菌保证了系统的脱氮性能与 Fe 的循环。

参考文献

- [1] 王娟. 基于硫铁基质自养反硝化去除水中硝酸盐氮的研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.
WANG Juan. Removal of nitrate from water by autotrophic denitrification based on sulfur and iron substrates[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [2] WANG Wei, WEI Dongyang, LI Fuchang, et al. Sulfur-siderite autotrophic denitrification system for simultaneous nitrate and phosphate removal: From feasibility to pilot experiments[J]. Water Research, 2019, 160: 52-59.
- [3] 霍珊. 基于 S-Fe 氧化的自养反硝去除水中 NO₃⁻-N 的研究[D]. 北京:北京化工大学,2016.
HUO Shan. S-Fe oxidizing autotrophic denitrification for nitrate removal from water[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [4] 朱艺双. 含铁矿物对城市河道反硝化过程的影响研究[D]. 上海:华东师范大学,2019.
ZHU Yishuang. The effect of iron-bearing minerals on denitrification in urban river[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [5] 班亚飞. 污水处理厂尾水自养反硝化深度脱氮工艺研究[D]. 郑州:郑州大学,2020.
BAN Yafei. Study on deep denitrification of tail water in sewage treatment plant by autotrophic denitrification process[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [6] 周翔. 硫铁矿物自养反硝化特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.
ZHOU Xiang. Study on the characteristics of autotrophic denitrification with sulfurous iron ore as substrate[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [7] WANG Jiaojiao, HUANG Baocheng, LI Jun, et al. Advances and challenges of sulfur-driven autotrophic denitrification (SDAD) for nitrogen removal[J]. Chinese Chemical Letters, 2020, 31(10): 2567-2574.
- [8] 邹卓成. 生物电化学氮自养和硫自养耦合脱氮工艺及其微生物种群结构研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.

- ZOU Zhuocheng. Research on the coupled bioelectrochemical hydrogen autotrophic denitrification with sulfur autotrophic denitrification technology and the microbial community structure[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [9] CHEN Fangmin, LI Xiang, GU Chenwei, et al. Selectivity control of nitrite and nitrate with the reaction of S^0 and achieved nitrite accumulation in the sulfur autotrophic denitrification process[J]. Biore-source Technology, 2018, 266: 211–219.
- [10] ZHU Tingting, CHENG Haoyi, YANG Lihui, et al. Coupled sulfur and iron(II) carbonate-driven autotrophic denitrification for significantly enhanced nitrate removal[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(3): 1545–1554.
- [11] KANAPARTHI D, POMMERENKE B, CASPER P, et al. Chemolithotrophic nitrate-dependent Fe(II)-oxidizing nature of actinobacterial subdivision lineage TM3[J]. The ISME Journal, 2013, 7(8): 1582–1594.
- [12] ZHANG Yongwei, WEI Dongyang, MORRISON L, et al. Nutrient removal through pyrrhotite autotrophic denitrification: Implications for eutrophication control[J]. Science of the Total Environment, 2019, 662: 287–296.
- [13] WEBER K A, ACHENBACH L A, COATES J D. Microorganisms pumping iron: Anaerobic microbial iron oxidation and reduction[J]. Nature Reviews Microbiology, 2006, 4(10): 752–764.
- [14] LI Ruihua, GUAN Mengsha, WANG Wei. Simultaneous arsenite and nitrate removal from simulated groundwater based on pyrrhotite autotrophic denitrification[J]. Water Research, 2021, 189: 116662.
- [15] LU Xiejuan, WAN Yanlei, ZHONG Zhenxing, et al. Integrating sulfur, iron(II), and fixed organic carbon for mixotrophic denitrification in a composite filter bed reactor for decentralized wastewater treatment: Performance and microbial community[J]. Science of the Total Environment, 2021, 795: 148825.
- [16] WEISS J V, RENTZ J A, PLAIA T, et al. Characterization of neutrophilic Fe(II)-oxidizing bacteria isolated from the rhizosphere of wetland plants and description of *Ferritrophicum radicola* gen. nov. sp. nov., and *Sideroxydans paludicola* sp. nov.[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(7/8): 559–570.
- [17] WAN Dongjin, LIU Yongde, WANG Yiyi, et al. Simultaneous bioautotrophic reduction of perchlorate and nitrate in a sulfur packed bed reactor: Kinetics and bacterial community structure[J]. Water Research, 2017, 108: 280–292.
- [18] LI Ruihua, WEI Dongyang, WANG Wei, et al. Pyrrhotite-sulfur autotrophic denitrification for deep and efficient nitrate and phosphate removal: Synergistic effects, secondary minerals and microbial community shifts[J]. Bioresource Technology, 2020, 308: 123302.
- [19] HAN Fei, ZHANG Mengru, SHANG Hongguo, et al. Microbial community succession, species interactions and metabolic pathways of sulfur-based autotrophic denitrification system in organic-limited nitrate wastewater[J]. Bioresource Technology, 2020, 315: 123826.
- [20] BLOTHE M, RODEN E E. Composition and activity of an autotrophic Fe(II)-oxidizing, nitrate-reducing enrichment culture[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, 75(21): 6937–6940.
- [21] WANG Ru, YANG Cheng, ZHANG Meng, et al. Chemoautotrophic denitrification based on ferrous iron oxidation: Reactor performance and sludge characteristics[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 313: 693–701.
- [22] ZHANG Jianhua, ZHANG Liang, MIAO Yuanyuan, et al. Enhancing sewage nitrogen removal via anammox and endogenous denitrification: Significance of anaerobic/oxic/anoxic operation mode[J]. Bioresource Technology, 2019, 289: 121665.
- [作者简介] 张献旭(1982—), 硕士。E-mail: 122661251@qq.com。通讯作者: 王弘宇, 教授, 博士。E-mail: hywang96@126.com。
- [收稿日期] 2022-08-17(修改稿)