

邱晨, 潘凯玲, 魏钰轩, 等. 中低温条件下城市污水短程硝化控制方法研究[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(11): 170-177. Qiu Chen, Pan Kailing, Wei Yuxuan, et al. Study on short-cut nitrification control method of municipal wastewater at medium and low temperature[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(11): 170-177.

中低温条件下城市污水短程硝化控制方法研究

邱晨, 潘凯玲, 魏钰轩, 郑志强,
韩家乐, 毕学军*

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要:短程硝化对污水处理厂的节能增效有着重要意义,而低温条件下如何实现短程硝化的启动仍是亟待研究的难题。该文以实际生活污水为研究对象,开展了中低温(8~16℃)条件下短程硝化启动方法的研究。研究表明,在8~16℃条件下,投加50 mg/L Fe_2O_3 纳米颗粒可在10 d内使反应器出水 NO_2^- -N 积累率达到75%以上,而投加145 mg/g MLSS的 $FeCl_3$ 可使 NO_2^- -N 积累率达到100%。分子生物学分析表明,含铁物质的投加导致反应器内活性污泥微生物群落结构发生变化,并形成以 *Nitrosomonas* 为优势氨氧化细菌(AOB)、*Nitrospira* 为优势亚硝酸盐氧化菌(NO)的微生物群落结构,与对照试验组相比,试验组中NOB的相对丰度平均下降68.48%。中低温条件下短程硝化形成源于含铁物质对NOB的选择抑制,PLS-PM分析结果进一步阐述了含铁物质对 NO_2^- -N 积累的调控途径。由此可形成以含铁物质投加为手段的中低温条件下城市污水短程硝化控制方法。

关键词:含铁物质; SBR; 中低温; 短程硝化

中图分类号:X703;TU992.3 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.0774.24.338 文章编号:1003-6504(2024)11-0170-08

Study on Short-cut Nitrification Control Method of Municipal Wastewater at Medium and Low Temperature

QIU Chen, PAN Kailing, WEI Yuxuan, ZHENG Zhiqiang,
HAN Jiale, BI Xuejun*

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Short-cut nitrification can save energy and increase efficiency of wastewater treatment plants, but achieving short-cut nitrification at medium and low temperature is still the bottleneck of the application of this process. In this paper, the start-up of short-cut nitrification at 8~16℃ was investigated with addition of four iron-based materials (Fe_2O_3 nanoparticles (NPs), Fe_3O_4 NPs, magnetite NPs and $FeCl_3$) using actual municipal sewage as influent. The results showed that the addition of 50 mg/L Fe_2O_3 NPs can achieve nitrite accumulation ratio (NAR) of more than 75% within ten days, while NAR reached as high as 100% with addition of 145 mg/g MLSS $FeCl_3$. The results of high-throughput sequencing showed that iron-based materials affected microbial community structure of activated sludge in the reactors. *Nitrosomonas* was the dominant ammonia-oxidizing bacteria (AOB) and *Nitrospira* was the dominant nitrite-oxidizing bacteria (NOB). Compared with the control group, the relative abundance of NOB in the experimental groups decreased by an average of 68.48%. The addition of iron-based materials caused selective inhibition of NOB, which resulted in the successful achievement of short-cut nitrification at medium and low temperature. PLS-PM analysis further verified the regulatory pathway of NO_2^- -N accumulation by iron-based materials. A short-cut nitrification control method for municipal wastewater at medium and low temperature by adding iron-based materials was established.

Key words: iron-based materials; SBR; medium and low temperature; short-cut nitrification

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2024-05-22; 修回 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52370042); 国家自然科学基金青年项目(52200062); 山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE237); 青岛理工大学开放基金项目(QUTSEME201935)

作者简介: 邱晨(1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水处理与资源化, (电子信箱) 228151615@qq.com; *通讯作者, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事水污染控制工程技术教学、研究与开发工作, (电子信箱) xuejunb@126.com。

氮素污染是引起水体富营养化的重要原因之一^[1,2]。新型脱氮工艺以厌氧氨氧化为代表,在污水生物脱氮领域备受瞩目^[3,4]。与传统硝化反硝化工艺相比,厌氧氨氧化在节省曝气能耗、有机碳源利用和减少剩余污泥量方面具有显著优势^[5]。稳定获取 NO_2^- -N来源是厌氧氨氧化技术应用中的关键问题,而短程硝化则是主要提供 NO_2^- -N的途径之一。通过控制短程硝化以实现 NO_2^- -N积累的关键在于抑制亚硝酸盐氧化菌(nitrite-oxidizing bacteria, NOB)的活性,使硝化反应中的氨氮氧化速率大于亚硝态氮氧化速率^[6]。有研究表明,当温度低于 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)的最大生长速率低于NOB^[7]。当温度升高至 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, AOB的最大生长速率开始高于NOB,且两者间生长速率的差距随温度升高而持续增大。较高的运行温度明显有利于短程硝化的实现,但季节性的温度变化不可避免地会对实际污水处理过程中的短程硝化的启动和稳定维持造成冲击。因此在低温条件下,如何快速实现短程硝化系统的启动及稳定运行,成为了亟待解决的关键技术问题。

铁元素在微生物的生长和代谢过程中均起到了关键作用。目前已有研究表明铁可以影响污泥微生物群落结构和调整功能微生物活性^[8]。Hu等^[9]发现投加 35 mg/L FeCl_3 对回流污泥进行旁侧处理,可使污泥分解、细胞裂解和抑制NOB,使系统的亚硝态氮积累率达到80%以上。目前已有多种含铁物质应用于污水生物处理,但含铁物质(如 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、磁铁矿和 FeCl_3)对短程硝化的影响仍需进一步探究。

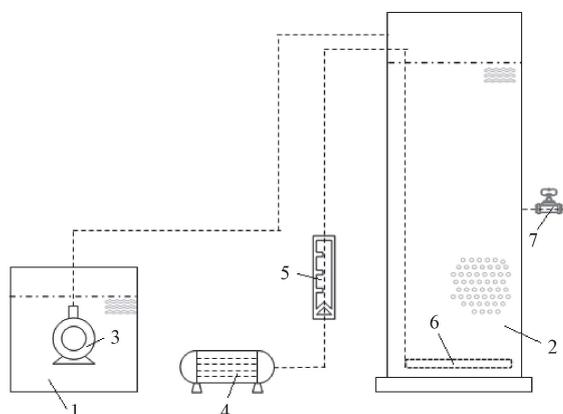
1.2 试验组设置

共设置 5 个反应器,分别为对照(R0)、 Fe_2O_3

1 材料与方 法

1.1 试验装置与运行参数

本试验所采用的序批式反应器(sequencing batch reactor, SBR)有效容积 6 L (高 500 mm ,外径 150 mm ,壁厚 5 mm),反应器设置如图1。以某污水处理厂MBR回流活性污泥为接种污泥,各反应器污泥浓度设置为 $(2\ 900\pm 200)\text{ mg/L}$,溶解氧浓度为 $6.02\sim 7.77\text{ mg/L}$,运行期间不主动排泥。SBR反应器周期时间为 6 h ,每天运行4个周期。根据全周期的水质检测结果,以 NH_4^+ -N浓度降解至 5 mg/L 为节点设置反应器曝气时长。运行周期设置为进水 2 min ,曝气 210 min ,沉淀 10 min ,排水 3 min ,其余时间为静置时间。实验期间温度为 $8\sim 16\text{ }^\circ\text{C}$ 。反应器进水采用污水处理厂初沉池出水,进水条件见表1。



注: 1为生活污水原水箱, 2为SBR反应器。底部安装曝气装置(微孔曝气管6), 通过曝气泵4压缩空气, 通过流量计5控制气体流量, 利用微孔曝气软管释放空气。由微型潜污泵(进水泵3)进水, 电动球阀(排水阀7)出水, 并由时控开关自动控制。

图1 实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

表 1 反应器进水污染物成分

Table 1 Components of influent contaminants in the reactor

污染物	COD	NH_4^+ -N	NO_2^- -N	NO_3^- -N
浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	228.65 ± 113.55	68.87 ± 13.14	0.07 ± 0.07	1.04 ± 1.04

1.2 试验组设置

共设置 5 个反应器,分别为对照(R0)、 Fe_2O_3

(R1)、 Fe_3O_4 (R2)、磁铁矿(R3)和 FeCl_3 (R4),具体实验组设置如表2所示。

表 2 试验各组设置

Table 2 Setting of experimental groups

组名	R0	R1	R2	R3	R4
有效物质	-	$\text{Fe}_2\text{O}_3\geq 99\%$	$\text{Fe}_3\text{O}_4\geq 99\%$	$\text{Fe}\geq 68.9\%$	$\text{FeCl}_3\geq 99.5\%$
规格	-	20 nm	20 nm	20 nm	溶液
投加频次	-	$10\text{ d}\cdot\text{次}^{-1}$	$10\text{ d}\cdot\text{次}^{-1}$	$10\text{ d}\cdot\text{次}^{-1}$	$6\text{ h}\cdot\text{次}^{-1}$
投加浓度	-	$50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	实验开始时投加 $145\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{ MLSS}$; 之后每 6 h 补加 8.15 mg

1.3 检测与分析方法

水样经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后,依照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[10]进行测定分析,其中常规分析项目有COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N。 NH_4^+ -N去除率ARE和 NO_2^- -N积累率NAR计算公式如下:

$$\text{ARE} = (\text{A}_0 - \text{A}_1) / \text{A}_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{NAR} = \text{C}_1 / (\text{C}_1 + \text{C}_2) \times 100\% \quad (2)$$

式中, A_0 为反应器进水 NH_4^+ -N浓度; A_1 为反应器出水 NH_4^+ -N浓度; C_1 为反应器出水 NO_2^- -N浓度; C_2 为反应器出水 NO_3^- -N浓度。

对种泥及5个反应器第15天、30天的污泥样本进行取样。利用高通量测序技术对系统内微生物群落结构进行分析,使用引物338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')对细菌16S rRNA基因V3~V4可变区进行扩增,于Illumina MiSeq PE300测序平台(Illumina, USA)进行测序。

2 结果与讨论

2.1 不同含铁物质对短程硝化启动的影响

2.1.1 短程硝化启动及运行情况

实验期间进出水COD及氮素浓度变化如图2所示。在实验运行期间,5个反应器均表现出了良好的COD去除性能(图2(a)),反应器出水COD浓度无明显差异,均在50 mg/L以下。反应器出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为0~4.99 mg/L,5个反应器的平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为98.99%、98.85%、97.91%、98.38%和97.16%。

5个反应器均出现了不同程度的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累,且R1~R4反应器的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率显著高于R0反应器($p \leq 0.0033$)。R0反应器的出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在整个运行期间虽有波动但整体呈缓慢上升趋势(图2(b)), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率在运行的第1天达到13.06%,之后逐步下降,在第5天反应器出水中未检测出 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。在第5~30天,该反应器的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率在14.92%(第11天)~56.88%(第30天)之间波动。R0中存在一定的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累可能是因为本研究在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降解完成时即刻停止曝气,导致氨氧

化产生的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 无法及时转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[11]。投加含铁物质的实验组相比R0有着更高的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率。R1反应器出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在前11d呈持续上升趋势,第11天反应器出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为43.317 mg/L, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率为80.27%。之后R1反应器的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率稳定维持在73.06%~82.24%之间,平均 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率为78.22%,平均反应器出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的浓度为38.43 mg/L(图2(c))。在第13~30天期间,R4反应器的平均 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率为91.37%(图2(f)),高于R2和R3反应器的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率(分别为83.30%和77.58%)。

上述结果表明含铁物质的投加可显著提升反应器出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率。已有研究表明,铁氧化物进入水中,会发生解离,生成金属离子,如 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ^[12]。水中的 Fe^{2+} 在好氧条件下容易转化为 Fe^{3+} ,同样地, FeCl_3 溶于水产生 Fe^{3+} 。 Fe^{3+} 与水进一步反应生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀的过程中($\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + 3\text{H}^+$),产生的 H^+ 容易造成水体酸化,导致pH降低。已有研究表明,NOB作为酸性敏感菌,在此过程中易被抑制^[13],而相比之下AOB的酸性耐受性更高^[14,15]。在酸性环境中,AOB的氨氧化活性高于NOB的亚硝酸盐氧化活性,导致反应器出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累。有研究表明, Fe^{3+} 进入水体中会降低水体pH,产生酸性条件导致 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累,使游离亚硝酸(FNA)含量升高,最终通过FNA的抑制作用使得AOB成为优势菌群^[16],这进一步印证了含铁物质通过 Fe^{3+} 酸化水体环境致使NOB活性下降,进而导致 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的积累。Zheng等^[16]的研究表明,相比

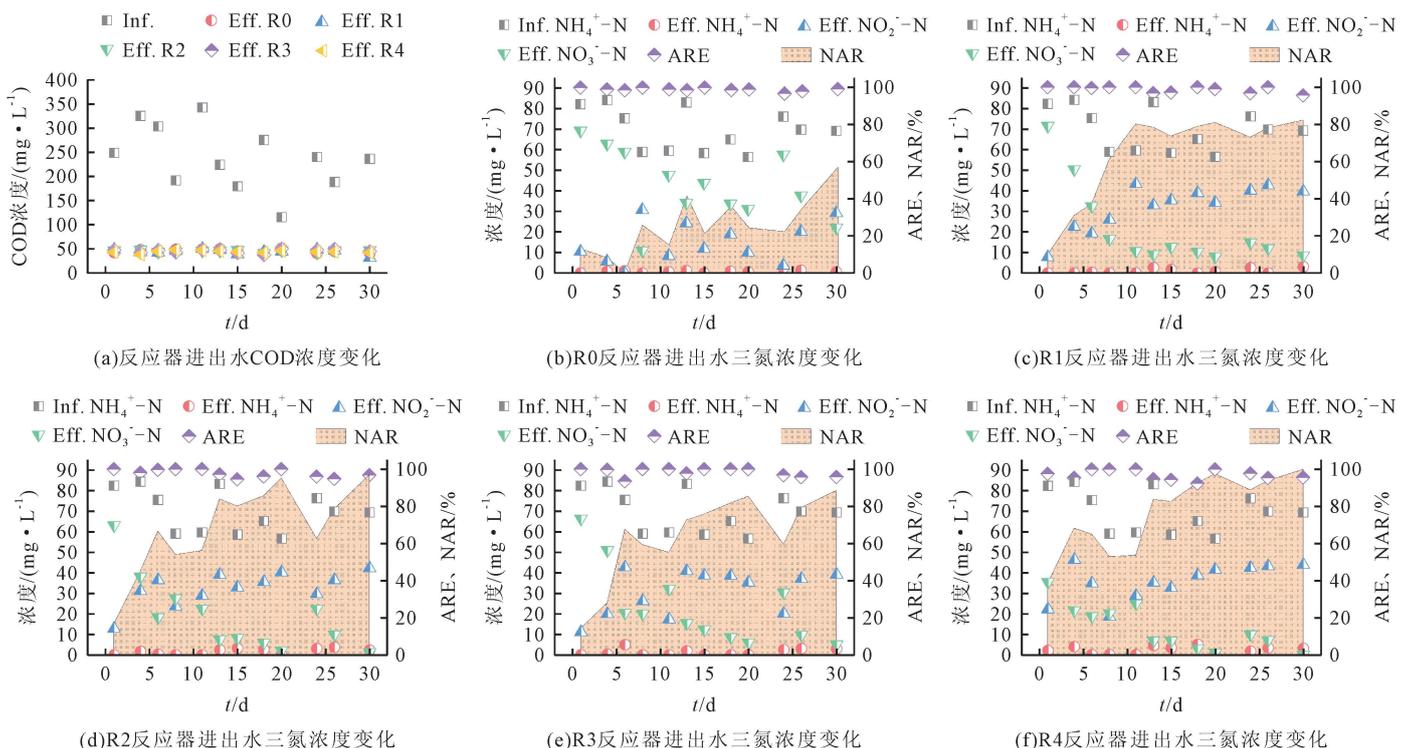


图2 SBR运行期间的污染物去除性能

Fig.2 Contaminant removal performance during operation

于AOB, 10^{-6} 水平的FNA更加抑制NOB的活性,从而影响 NO_2^- -N氧化速率,导致 NO_2^- -N积累率的升高。

2.1.2 周期内污染物降解情况

为进一步探究各反应器的污染物去除能力,选择实验最终周期进行了COD及氮素浓度变化分析,结果如图3所示。反应器进水中COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N的浓度依次为236.01、69.32、0、1.76 mg/L。5个反应器均表现出了相似的COD降解速率,出水COD浓度均低于50 mg/L。各反应器出水 NH_4^+ -N浓度没有明显差异。5个反应器 NO_2^- -N与 NO_3^- -N转化规律

各不相同。在R0反应器中,随着 NH_4^+ -N降解, NO_2^- -N与 NO_3^- -N同步生成, NO_2^- -N浓度始终高于 NO_3^- -N,最终反应器出水 NO_2^- -N积累率为56.88%。而在R1~R4反应器中, NH_4^+ -N大多转化为 NO_2^- -N。在这过程中,仅在R1、R2和R3反应器中检测到低浓度的 NO_3^- -N生成(分别为8.57、1.32和5.05 mg/L),在R4反应器的出水中均未检出 NO_3^- -N。R1、R2、R3、R4的最终 NO_2^- -N积累率分别为85.24%、96.97%、88.54%和100.00%,表明含铁物质的投加可以显著提高反应器中的 NO_2^- -N积累率,产生稳定的短程硝化效果。

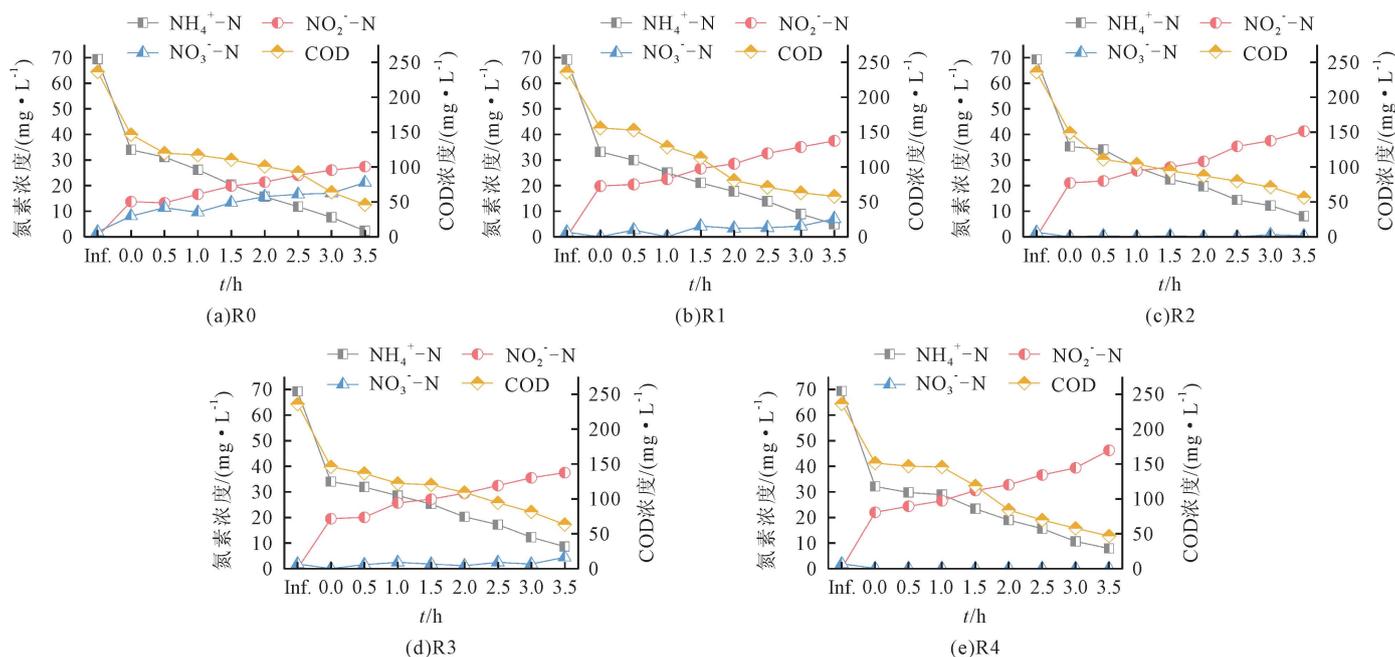


图3 SBR运行典型周期(第30天)水质变化
Fig.3 Water quality changes during typical SBR cycle (day 30)

2.2 微生物群落结构

2.2.1 微生物群落结构变化

本研究对试验种泥(Seed)及各反应器第15天、第30天的污泥样本进行了微生物群落结构分析。5个反应器共有OTUs数为823, 占总OTUs(1 625)的50.65%。

R0、R1、R2、R3及R4独有的OTUs数分别为33、24、25、12和23(图4(a))。变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)、拟杆菌门(Bacteroidota)、厚壁菌门(Firmicutes)、绿弯菌门(Chloroflexi)及瓣骨细菌门(Patescibacteria)构成了微生物群落的主体,这6种

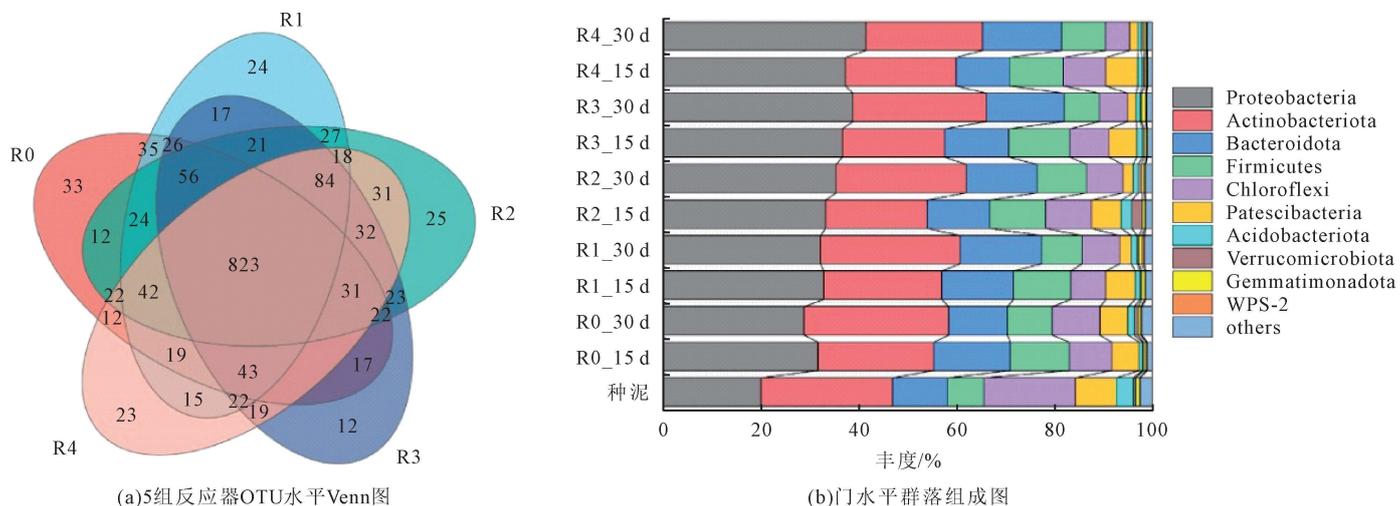


图4 微生物群落差异分析
Fig.4 Differential analysis of microbial communities

门的相对丰度之和在各样本中均超过90%(图4(b)),其中变形菌门的相对丰度在各样本中平均占比高达33.6%。在R1~R4反应器中,放线菌门及拟杆菌门在第30天样本中的相对丰度均高于第15天,厚壁菌门的相对丰度在各反应器中均呈先增加后减少的趋势,绿弯菌门及鬃骨细菌门的相对丰度随实验的进行持续下降。

2.2.2 组间差异及功能微生物分析

为探究不同含铁物质投加后活性污泥微生物群落结构的影响,对试验组(R1、R2、R3、R4)与对照组(R0)在属水平的微生物群落结构差异进行分析,结果如图5所示。R1&R0、R2&R0、R3&R0及R4&R0差异菌属数依次为10、11、16和13。与R0的菌落组成

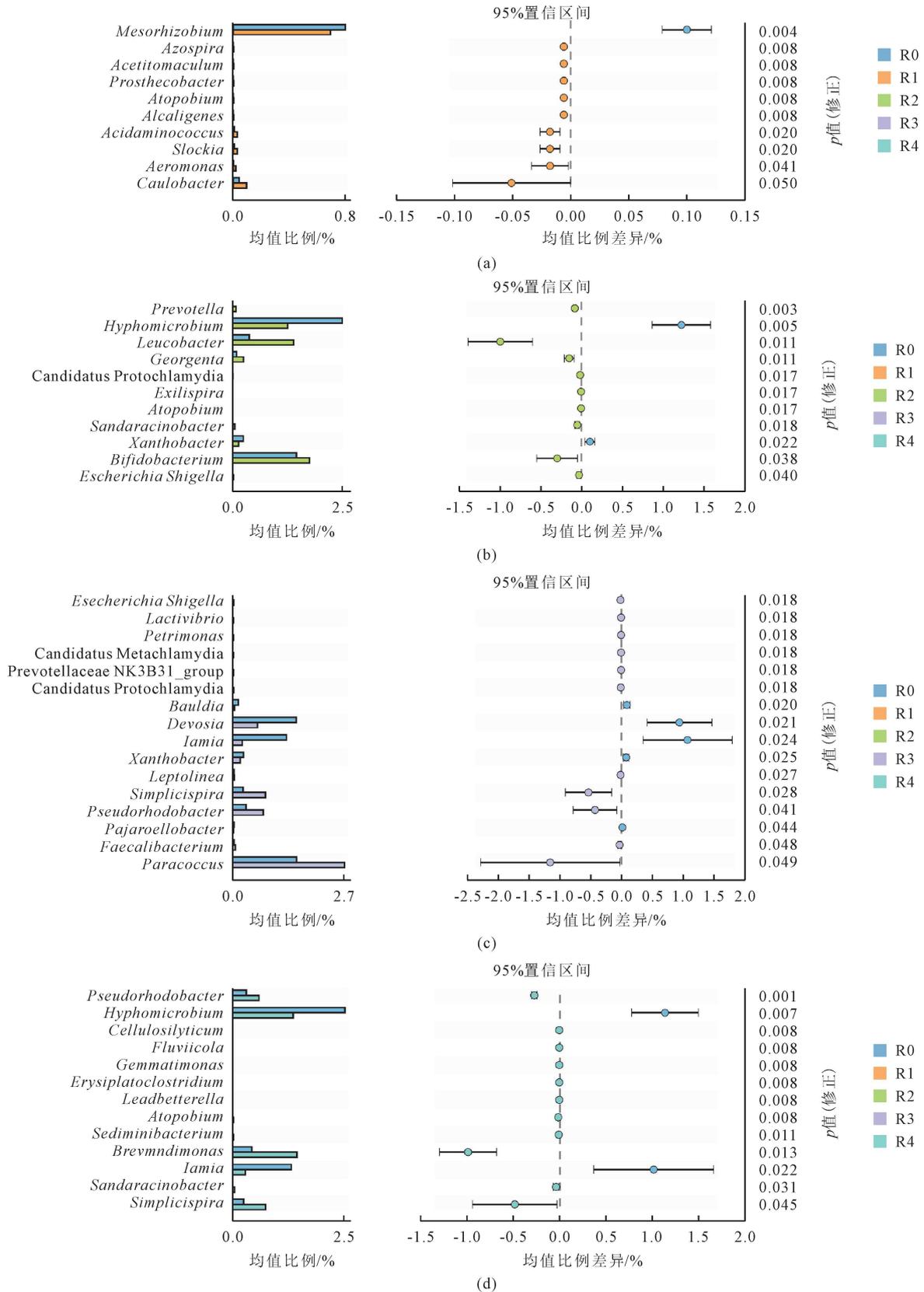


图5 试验组(R1、R2、R3、R4)分别与对照组R0的属水平组间差异分析
Fig.5 Analysis of the difference between the experimental group (R1, R2, R3, R4) and the control group (R0)

相比,分别有 8、5、7 和 7 个菌属在 R1、R2、R3 和 R4 中富集。Candidatus Protochlamydia 和 Escherichia Shigella 在 R0 中未检出,在 R1~R4 均有检出,且在 R2 和 R3 中富集。陈胜男等^[17]研究发现,Escherichia Shigella 作为一种异养硝化微生物^[18],在投加铁碳填料后成为优势菌种,推测 Escherichia Shigella 可能在含铁环境中易被富集。Pseudorhodobacter 作为一种新型的非光合 α 变形菌属,常存在于以铁氧化物为主要成分的赭石中,菌群生长繁殖情况与环境中的铁氧化物紧密相关^[19]。Alcaligenes 仅在 R1 中被检测出,其被证实具有产铁载体的功能^[20]。Sandaracinobacter^[21]在 R0 中未检测出,且在 R1~R4 中均有富集,其中在 R4 中的富集最为显著。R2 富集了 Exilispira,在其他反应器中未检测出。分析表明,不同含铁物质的投加导致了群落结构的差异,可能源于微生物对含铁环境适应能力不同。

为进一步探究含铁物质对系统功能菌群的影响,在属水平上对各样本中的硝化功能菌群和铁氧化还原功能菌群进行分析,结果如图 6 所示。本研究仅发现了一种 AOB——Nitrosomonas。与接种污泥样本相比,5 个反应器第 30 天样本中 Nitrosomonas 的占比均有所提高,且各反应器间 Nitrosomonas 的相对丰度没有明显差异,此结果与各反应器的出水结果相一致。Nitrospira 与 Nitrolancea 是本实验中检出的 NOB 属,其中 Nitrospira 是本实验中主要的 NOB 属。与种泥相比,Nitrospira 的相对丰度在 5 个反应器第 30 天样品中均出现了明显下降,R0 中 Nitrospira 的相对丰度下降了 36.36%,表明低温不利于 NOB 的生长^[9]。在第 30 天样品的检测结果中,R1~R4 中 Nitrospira 的相对丰度与 R0 相比,分别下降了 30.25%、84.87%、49.58% 和 87.39%,表明含铁物质的投加进一步抑制了 NOB 的生长。Nitrolancea 仅在 R2、R4 中检出,且相对丰度较低(相对丰度均为 0.003 94%)。有研究表明 Nitrolancea 是一种中度嗜热菌,最适生长温度是

35~37 °C^[22]。本研究的实际运行温度为 8~16 °C,低于 Nitrolancea 的最适生长温度。以上结果表明,投加 Fe₂O₃、Fe₃O₄、磁铁矿和 FeCl₃ 可有效抑制 NOB,实现对短程硝化的控制^[11-15]。

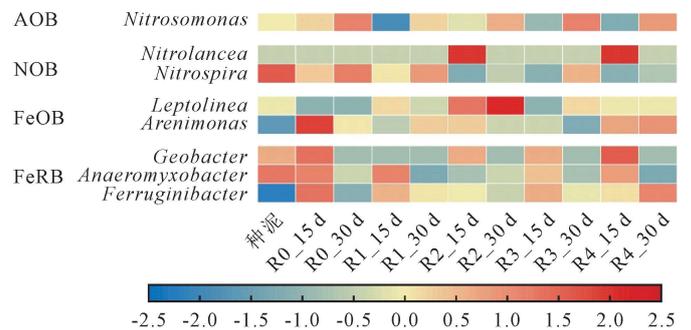
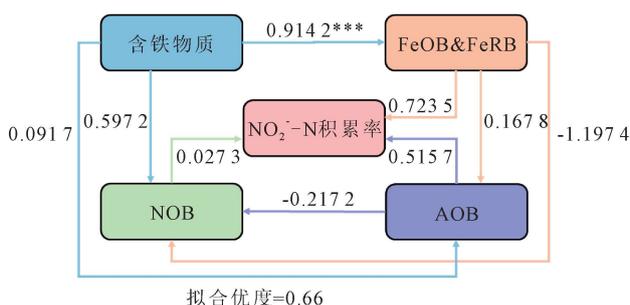


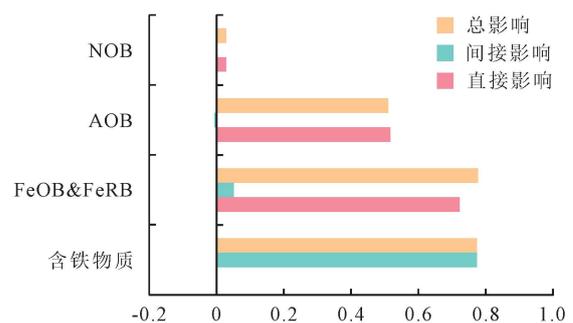
图 6 硝化功能菌群及铁氧化还原功能菌群属水平热图
Fig.6 Generic level heat maps of AOB, NOB, FeOB and FeRB

根据已有关于铁氧化还原菌的研究报道^[23-25],在样本中检测出的铁氧化菌(Fe-oxidizing bacteria, FeOB)有 Leptolinea 和 Arenimonas,铁还原菌(Fe-reducing bacteria, FeRB)有 Geobacter、Anaeromyxobacter 和 Ferruginibacter。FeOB 在各反应器中均有检出,R1、R2 和 R4 反应器第 30 天样本中 FeOB 的相对丰度为 0.126%、0.177% 和 0.154%,均高于 R0(相对丰度 0.11%)。FeRB 在各样本中的平均相对丰度为 FeOB 的 50 倍以上。与 R0 反应器第 30 天样本相比,FeRB 在 R1~R4 的第 30 天样本中的相对丰度值分别提高了 51.03%、27.46%、41.68% 和 118.23%。在各反应器样本中,Ferruginibacter 占总 FeRB 的比例高达 98.90%~99.89%,是 R1~R4 中占比最高的 FeRB。唐思敏^[26]发现 Ferruginibacter 在 Fe³⁺ 浓度较高的环境中易被富集。Geobacter 仅在种泥和 5 个反应器的第 15 天中存在,在第 30 天的各反应器中均未检出。随着试验的进行,Anaeromyxobacter 在各反应器中的相对丰度持续降低。

偏最小二乘法路径模型(PLS-PM)分析进一步揭示了含铁物质对 NO₂⁻-N 积累的影响(图 7)。PLS-PM 分析结果表明,含铁物质对 FeOB&FeRB 具



(a) PLS-PM 显示含铁物质及功能菌群(包括 FeOB&FeRB、AOB 和 NOB)对 NO₂⁻-N 积累率的直接和间接影响



(b) PLS-PM 中不同因素的标准化效应

图 7 含铁物质对短程硝化形成的影响

Fig.7 Effect of iron-based materials on the formation of short-cut nitrification

有显著的正向影响(影响指数 $\lambda = 0.9142$, $p < 0.001$), 而 FeOB&FeRB 对 NOB 具有明显的负向影响, 其 λ 为 -1.1974 (图7(a)), 2种关系的共同影响下使得含铁物质对 NOB 的间接影响达到 -1.1480 。这表明含铁物质的投加显著促进了 FeOB&FeRB 的菌群生长, 而优势生长的 FeOB&FeRB 与系统中的 NOB 存在潜在的拮抗作用, 进而促进了系统 NO_2^- -N 的积累。在标准化总效应中(图7(b)), FeOB&FeRB 对系统 NO_2^- -N 积累率的直接影响、间接影响及总影响分别为 0.7235 、 0.0528 和 0.7763 , 而含铁物质对 NO_2^- -N 积累率的间接影响达到了 0.7728 , 进一步说明含铁物质通过影响系统功能微生物群落结构进而实现短程硝化。

3 结论

低温条件下, 含铁物质的投加可以提高活性污泥的 NO_2^- -N 积累率, 加快短程硝化的形成。投加 50 mg/L 的 Fe_2O_3 纳米颗粒短程硝化形成最快, 5% FeCl₃的投加可以使反应器出水 NO_2^- -N 积累率高达 100% , 实现 NH_4^+ -N 全部转化为 NO_2^- -N。高通量测序结果表明, 含铁物质的投加未对 AOB 造成显著影响, 但抑制了系统中 NOB, 导致 NO_2^- -N 积累率的提高。含铁物质的投加导致了包含 FeOB 和 FeRB 在内的功能菌属差异, 改变了活性污泥微生物的群落结构。PLS-PM 分析表明, 含铁物质通过影响系统功能微生物群落结构进而实现短程硝化。

[参考文献]

- [1] Rabalais N N, Turner R E, Scavia D. Beyond science into policy: gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River[J]. *BioScience*, 2002,52(2):129.
- [2] Cloern J E. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001,210:223-253.
- [3] 刘冬英, 邱艳玲, 袁宪正, 等. 厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定[J]. *环境科学*, 2012,33(9):3208-3213.
Liu Dongying, Qiu Yanling, Yuan Xianzheng, et al. Enrichment and identification of anaerobic ammonium oxidation bacteria[J]. *Environmental Science*, 2012,33(9):3208-3213.
- [4] 徐少阳, 蒋进元, 周岳溪, 等. 三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究[J]. *环境科学*, 2012,33(9):3172-3176.
Xu Shaoyang, Jiang Jinyuan, Zhou Yuexi, et al. Denitrification on secondary effluent of acrylic fiber wastewater by tri-stage biofilm advanced reactor[J]. *Environmental Science*, 2012,33(9):3172-3176.
- [5] Cao Y S, van Loosdrecht M C M, Daigger G T. Mainstream partial nitritation-anammox in municipal wastewater treatment: status, bottlenecks, and further studies[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017,101(4):1365-1383.
- [6] Wang J P, Li L Z, Liu Y D, et al. A review of partial nitrification in biological nitrogen removal processes: from development to application[J]. *Biodegradation*, 2021,32(3):229-249.
- [7] Ren X M, Guo L, Chen Y, et al. Effect of magnet powder (Fe_3O_4) on aerobic granular sludge (AGS) formation and microbial community structure characteristics[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018,6(8):9707-9715.
- [8] Liang X Y, Gao B Y, Ni S Q. Effects of magnetic nanoparticles on aerobic granulation process[J]. *Bioresource Technology*, 2017,227:44-49.
- [9] Hu Z T, Duan H R, Wang Z Y, et al. Centralized iron-dosing into returned sludge brings multifaceted benefits to wastewater management[J]. *Water Research*, 2021, 203: 117536.
- [10] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 郭建华, 彭永臻, 黄惠馨, 等. 好氧曝气时间实时控制实现短程硝化[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2009(12):1997-2000.
Guo Jianhua, Peng Yongzhen, Huang Huixing, et al. Real-time control of aerobic aeration time to realize short-cut nitrification[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition*, 2009(12):1997-2000.
- [12] Zhang X J, Wei D H, Zhang H, et al. Comprehensive analysis of the impacts of iron-based nanoparticles and ions on Anammox process[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2022,180:108371.
- [13] Hankinson T R, Schmidt E L. An acidophilic and a neutrophilic *Nitrobacter* strain isolated from the numerically predominant nitrite-oxidizing population of an acid forest soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988,54(6): 1536-1540.
- [14] Fumasoli A, Bürgmann H, Weissbrodt D G, et al. Growth of *Nitrosococcus*-related ammonia oxidizing bacteria coincides with extremely low pH values in wastewater with high ammonia content[J]. *Environmental Science and Technology*, 2017,51(12):6857-6866.
- [15] Wang Z Y, Ni G F, Maulani N, et al. Stoichiometric and kinetic characterization of an acid-tolerant ammonia oxidizer 'Candidatus Nitrosoglobus' [J]. *Water Research*, 2021,196: 117026.
- [16] Zheng M, Wang Z Y, Meng J, et al. Inactivation kinetics of nitrite-oxidizing bacteria by free nitrous acid[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,752:141876.
- [17] 陈胜男, 廖子聪, 胡勇有. 铁碳内电解耦合蕹菜(*Ipomoea aquatica*)对黑臭污水脱氮效果的研究[J]. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2019,51(5):38-48.

- Chen Shengnan, Liao Zicong, Hu Yongyou. Effects of nitrogen removal in black and odorous water using iron-carbon interior electrolysis combined with *Ipomoea aquatica*[J]. Journal of South China Normal University: Natural Science Edition, 2019,51(5):38-48.
- [18] 孔强. 富营养化水体生态修复中高效微生物的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2010.
- Kong Qiang. Study on Efficient Microorganisms in Ecological Restoration of Eutrophic Water Bodies[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2010.
- [19] Lalinská-Voleková B, Majerová H, Kautmanová I, et al. Hydrous ferric oxides (HFO's) precipitated from contaminated waters at several abandoned Sb deposits-interdisciplinary assessment[J]. Science of the Total Environment, 2022,821:153248.
- [20] 黄伟红. *Pseudomonas mosselii* E1 和 *P. pseudoalcaligenes* B50 铁载体合成相关基因的克隆及功能初步分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
- Huang Weihong. Cloning and Functional Analysis of Genes Involved in Siderophores Biosynthesis in *Pseudomonas mosselii* E1 and *P. Pseudoalcaligenes* B50[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2007.
- [21] Yurkov V, Stackebrandt E, Buss O, et al. Reorganization of the genus *Erythromicrobium*: description of '*Erythromicrobium sibiricum*' as *Sandaracinobacter sibiricus* gen. nov., sp. nov., and of '*Erythromicrobium ursincola*' as *Erythromonas ursincola* gen. nov., sp. nov.[J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1997,47(4):1172-1178.
- [22] Spieck E, Sass K, Keuter S, et al. Defining culture conditions for the hidden nitrite-oxidizing bacterium *Nitrolancea* [J]. Frontiers in Microbiology, 2020,11:1522.
- [23] Emerson D, Scott J J, Benes J, et al. Microbial iron oxidation in the Arctic tundra and its implications for biogeochemical cycling[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2015,81(23):8066-8075.
- [24] Weiss J V, Magonigal J P, Emerson D. Microbiological and Geochemical Evidence of Fe(III) Reduction in the Rhizosphere (Root-Zone) of Wetland Plants: Agu Spring Meeting [C]. 2002.
- [25] Shu D T, He Y L, Yue H, et al. Metagenomic and quantitative insights into microbial communities and functional genes of nitrogen and iron cycling in twelve wastewater treatment systems[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 290:21-30.
- [26] 唐思敏. 铁诱导全程自养脱氮工艺启动及运行性能强化机理研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.
- Tang Simin. Study on Start-up of Iron-induced Autotrophic Nitrogen Removal Process and Strengthening Mechanism of Operation Performance[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2020.