

信号分子 OHHL 对厌氧同步脱氮除硫的影响

徐金兰, 张苗佳, 丁可帅, 张小艳

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了探究信号分子对厌氧同步脱氮除硫的影响, 本文采用信号分子 OHHL (N-3-oxo-hexanoyl-homoserine-lactone), 在两种进水硫化物浓度(100 mg/L 和 200 mg/L)条件下, 研究 OHHL 浓度对脱氮除硫的影响. 结果表明, 在进水硫化物浓度为 100 mg/L 条件下, 信号分子 OHHL 投加浓度为 1.5 μM 时硫化物和硝酸盐在反应进行 36 h 时的去除率高达 99.0%、96.1%, 单质硫产量高达 60 mg/L, 远高于未投加信号分子及投加浓度为 1.0 μM 、2.0 μM 的体系. 可见投加信号分子可以促进硫化物和硝酸盐的去除, 提高单质硫产量. 这是由于投加信号分子时(1.5 μM)体系中的总菌数量大幅度提高至 1.1×10^5 CFU/mL, 远高于其他条件下的相应值($2.6 \times 10^4 \sim 7.0 \times 10^4$ CFU/mL), 增强了异养反硝化作用. 此外, 进水硫化物浓度为 200 mg/L 时, 需要延长反应时间至 72h 才可达到较高(91.7%)的硝酸盐去除效果.

关键词: 信号分子; 厌氧脱氮除硫; 异养反硝化; 荧光原位杂交

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0281-07

Effect of signal molecule OHHL on anaerobic simultaneous denitrification and desulfurization

XU Jinlan, ZHANG Miaojia, DING Keshuai, ZHANG Xiaoyan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The subject of this study is to investigate the effect of signal molecules on anaerobic simultaneous denitrification and desulfurization. Four concentrations (0 μM , 1.0 μM , 1.5 μM and 2.0 μM) of N-3-oxo-hexanoyl-homoserine-lactone (OHHL) were applied to explore the effect of OHHL concentration on simultaneous removal of nitrate and sulfide with 100 mg/L or 200 mg/L of sulfide influent. The results suggested that when the influent sulfide concentration was 100 mg/L, sulfide and nitrate removal efficiencies reached 99.0% and 96.1% with the application of 1.5 μM OHHL after 36 h reaction. Meanwhile, the yield of elemental sulfur was as high as 60 mg/L, much higher than that with 0 μM , 1.0 μM and 2.0 μM OHHL amended. The above results indicated that the removal of sulfide and nitrate and the yield of elemental sulfur were enhanced with the application of OHHL. The possible explanation was that with the addition of 1.5 μM OHHL, the total population of bacteria substantially increased to 1.1×10^5 CFU/mL, which was significantly higher than the corresponding values ($2.6 \times 10^4 \sim 7.0 \times 10^4$ CFU/mL) under the other conditions, thus leading to an enhancement of the heterotrophic denitrification. Moreover, as the influent sulfide concentration was increased to 200 mg/L, the extent of reaction time (72 h) was necessary to obtain a relatively high nitrate removal efficiency (91.7%).

Key words: signal molecule; anaerobic denitrification and desulfurization; heterotrophic denitrification; fluorescence in situ hybridization

硫元素广泛存在于地壳中, 很多行业在化工原料生产过程中都会产生硫化物废水, 含硫污染物会刺激呼吸道, 影响中枢神经系统, 长期接触硫化物严重影响人体健康, 甚至导致死亡^[1]. 可见, 水体中硫化物的危害不容忽视, 研究含硫废水的处理工艺具有重要的意义. 目前, 生物脱氮除硫工艺条件温和、能耗低、投资少, 是一种经济性和可行性高的水体脱氮除硫的方法^[2-4]. 但是,

其大多数的研究主要集中在 N/S、S/Fe、温度、硫化物浓度、进水氨氮、pH 及外加碳源等对厌氧脱氮除硫工艺的影响^[5].

信号分子是指生物体内的某些化学分子, 信号分子浓度影响细胞传递信息^[6-7], 激发特定基因的表达, 调控生物行为. 目前, 很多对信号分子调控作用的研究集中在调节微生物去除水体生物中的氮磷等物质^[8], 而关于信号分子对废水厌氧脱

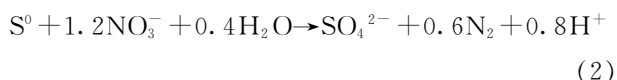
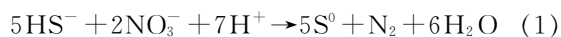
收稿日期: 2018-05-27

修改稿日期: 2019-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778524)

第一作者: 徐金兰(1973—), 女, 教授, 博导. 主要研究方向为石油污染土壤修复. E-mail: xujinlan@xauat.edu.cn

氮除硫工艺影响的研究并不多见。由厌氧生物脱氮除硫的主要反应见式(1)、式(2)^[9-11]



本实验猜想在厌氧脱氮除硫体系中加入信号分子,可以提高功能菌的活性及菌量,加速反应的进行,提高脱氮除硫效率。故本文研究了在两种进水硫化物浓度下,信号分子 N-(3-oxo-hexanoyl)-L-homoserine lactone(OHHL)(图1)浓度对异养反硝化调节废水厌氧脱氮除硫的影响。

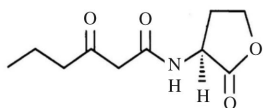


图1 OHHL 结构图

Fig.1 Structure of OHHL

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本实验厌氧活性污泥取自陕西省西安市某啤酒厂污水处理站,脱氮硫杆菌的菌种分离自西安市硫酸厂含硫土壤^[20]。实验所用的信号分子 OHHL 购买自美国 sigma-aldrich 公司。

实验废水制备:将去离子水煮沸并降至室温,在其中加入一定量的 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 和 NaNO_3 人工配制模拟废水,使进水 N/S 值保持在 0.67,同时投加一定量 Fe、Co、Ni、Zn 等微量元素。

1.2 信号分子对生物脱氮除硫的影响

实验分为两组,进水硫化物浓度分别为 100 mg/L(第一组)和 200 mg/L(第二组)。每组设置四个反应器,其中对照组反应器未投加信号分子 OHHL,其余三个反应器分别投加浓度为 1.0、1.5 和 2.0 μM 的信号分子。反应器均由有机玻璃构成,总容积为 1 L。反应器接种 150 mL 脱氮硫杆菌菌液和 200 mL 厌氧污泥,以 NO_3^- 为电子受体,在进水 N/S 值为 0.67 下(相应的理论 NO_3^- -N 浓度分别为 29.17 mg/L 和 58.63 mg/L)进行厌氧脱氮除硫试验。利用真空泵将原水泵入反应器,通过恒温水浴控制水温为 $(33 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。反应器顶部开设进水口、出水口和集气口,排气口用于进出水平衡反应器内气压,出水管伸到距反应器底部 7 cm 处,采用虹吸方式定时排水,气体采样口用于取样分析气体组分,采用排水集气法收集反应产生的气体。每隔 12 h 后取样测定出水硫化物、

硝酸盐、亚硝酸盐、硫代硫酸盐浓度及 N_2 产量,并分析出水中的单质硫和硫酸盐浓度。

1.3 电子平衡计算方法

电子平衡计算公式=(总共失去的电子-总共得到的电子)/(理论生成 SO_4^{2-} 失去电子数)。

由于硫化物转换成硫酸根时,每 mol 转移 8e^- ;硫化物转换成单质硫时,每 mol 转移 2e^- ;硝氮转换成氮气时,每 mol 转移 5e^- 。

因此,计算总共失去的电子数=生成的硫酸根摩尔数 $\times 8$ +生成的单质硫摩尔数 $\times 2$;

计算总共得到的电子数=生成的硝氮摩尔数 $\times 5$;理论生成 SO_4^{2-} 失去电子数=消耗的硫化物摩尔数 $\times 8$ 。

如,当消耗的硫化物 mmol=6.19,消耗的硝氮 mmol=2.83,生成的硫酸根 mmol=0.4,生成的单质硫 mmol=1.11 时,电子衡算= $(0.4 \times 8 + 1.11 \times 2 - 2.83 \times 5) \div (6.19 \times 8) = -17.62\%$ 。

但应注意,如果有其他中间产物需要将其考虑在内时:电子衡算=(生成的硫酸盐 $\times 8$ +生成的单质硫 $\times 2$ +生成的硫代硫酸盐 $\times 4$ -消耗的硝氮 $\times 5) \div (\text{消耗的硫化物} \times 8)$ 。

1.4 分析方法

硫化物(S^{2-} -S):亚甲基蓝分光光度法(HACH DR5000);硝酸盐(NO_3^- -N):紫外分光光度法(HACH DR5000);亚硝酸盐(NO_2^- -N):N-(1-萘基)-乙二胺光度法(HACH DR5000);硫酸盐(SO_4^{2-} -S):离子色谱分析测定,采用戴安 ICS-1100 阴离子色谱仪,色谱柱 AS 23,保护柱 AG 23,工作温度 30°C ,流速 1.0 mL/min,抑制器电流 25 mA,进样体积 25 μL 。淋洗液浓度为 4.5 mmol/L Na_2CO_3 和 0.8 mmol/L NaHCO_3 使用超纯水配置;硫代硫酸盐($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -S):离子色谱分析测定,抑制器电流 49 mA,淋洗液为 9.0 mmol/L 的 Na_2CO_3 和 1.6 mmol/L 的 NaHCO_3 ,其余测定方法与硫酸盐相同;氮气由气相色谱仪检测,采用安捷伦 6890N 气相色谱仪,色谱柱采用兰化 TDX-0108-10-075 填充柱,进样口温度 120°C ,检测器温度 160°C ,柱箱温度 100°C ; S^0 :采用亚硫酸盐法,预先测定样品硫代硫酸盐浓度,由于 S^0 与亚硫酸盐在高 pH 条件下会转化为硫代硫酸盐,进而测定反应后硫代硫酸盐浓度,即可测定生物单质硫含量^[21]。

1.5 生物种群分析

采用 FISH 法测定体系中的细菌含量及分布,样品的制备及测定过程采用 Amann^[22] 的方法。测

定总菌探针为 EUB 338 (GCTGCCTCCCGTAG-GAGT), 购买自上海生工. FISH 图中细菌菌量的算法采用 daime 软件计算^[23].

2 结果与讨论

2.1 信号分子 OHHL 浓度对脱氮除硫的影响

当进水硫化物浓度为 100 mg/L, 反应 36 h, 投加 1.5 μM 信号分子的硫化物和硝酸盐的去除量分别高达 99.1 mg (99.1%)、38.3 mg (96.5%), 远高于未投加信号分子及信号分子投加浓度为 1.0 μM 、2.0 μM 时的相应值 (72.4~97.1 mg 和 25.9~34.8 mg), 此时, 体系中单质硫的产量最高, 可达 57.0 mg/L (图 2). 可见, 投加信号分子可以促进污染水体中硫化物和硝酸盐的去除, 且信号分子投加浓度为 1.5 μM 时两者的去除量均可达到最高, 单质硫产率最佳 (50%). 这可能是该浓度的信号分子有效提高了细菌数量, 从而促进

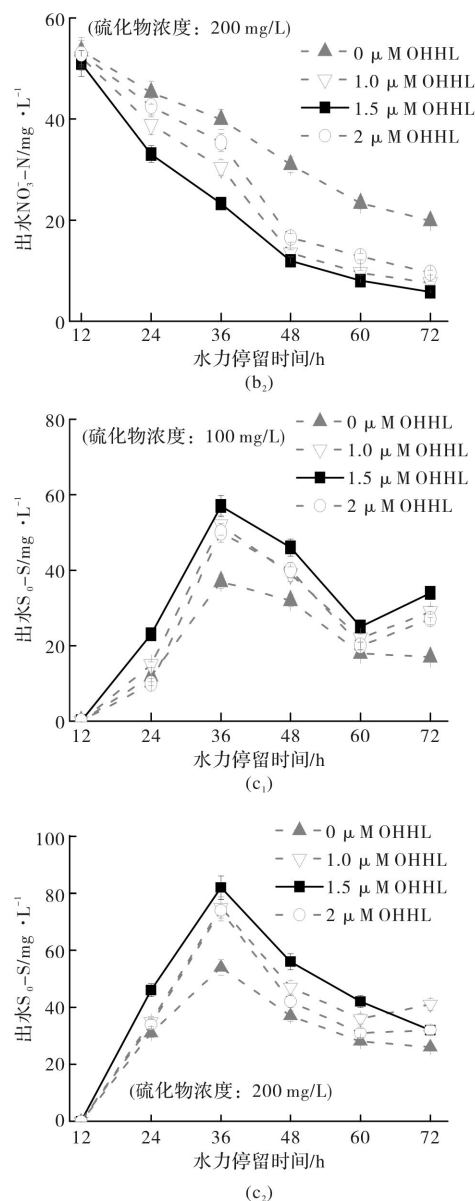
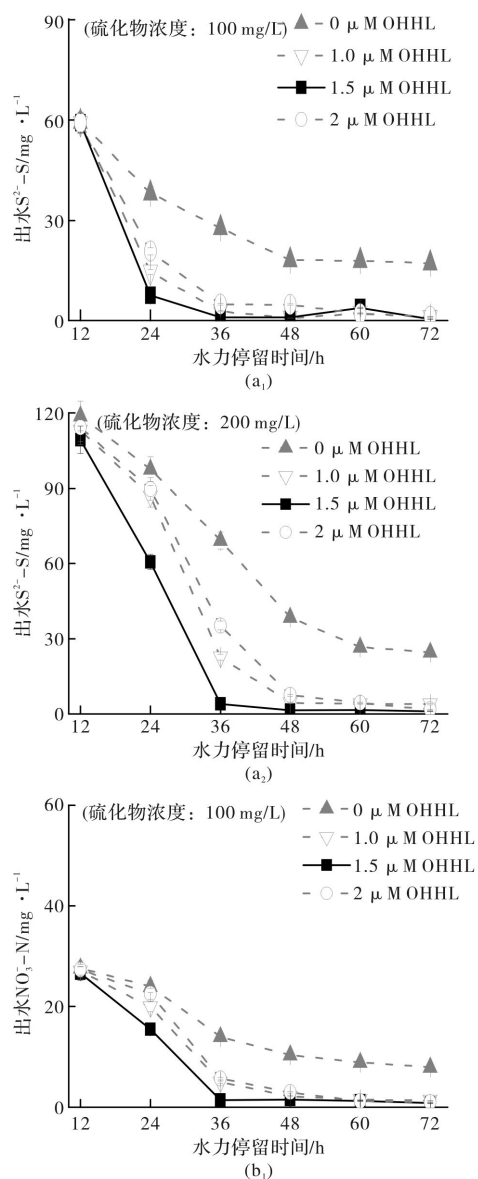


图 2 信号分子对脱氮除硫的影响 (a₁, b₁, c₁)
进水硫化物浓度 100 mg/L (a₂, b₂, c₂)
进水硫化物浓度 200 mg/L

Fig. 2 Effect of signal molecule on nitrate and sulfide removal (a₁, b₁, c₁) influent sulfide concentration of 100 mg/L (a₂, b₂, c₂) influent sulfide concentration of 200 mg/L

了脱氮除硫过程的进行. Chen 等人^[16]的研究中, 在进水硫化物负荷为 2 100 mg S/(L·d)时, 单质硫的转化率仅为 10%~40%, 低于我们的研究. 此外, 当进水硫化物浓度为 200 mg/L, 反应进行至 36 h, 投加 1.5 μM 信号分子的硫化物去除量可达 196 mg (98.0%), 而硝酸盐的去除率仅为 46.4 mg (66.6%), 当水力停留时间延长至 72 h, 硝酸盐的去除率才可达到 63.9 mg (91.7%) (图 2). 这可能是由于高浓度的进水硫化物浓度对功能菌的脱氮过程有所抑制. 此时单质硫产率为

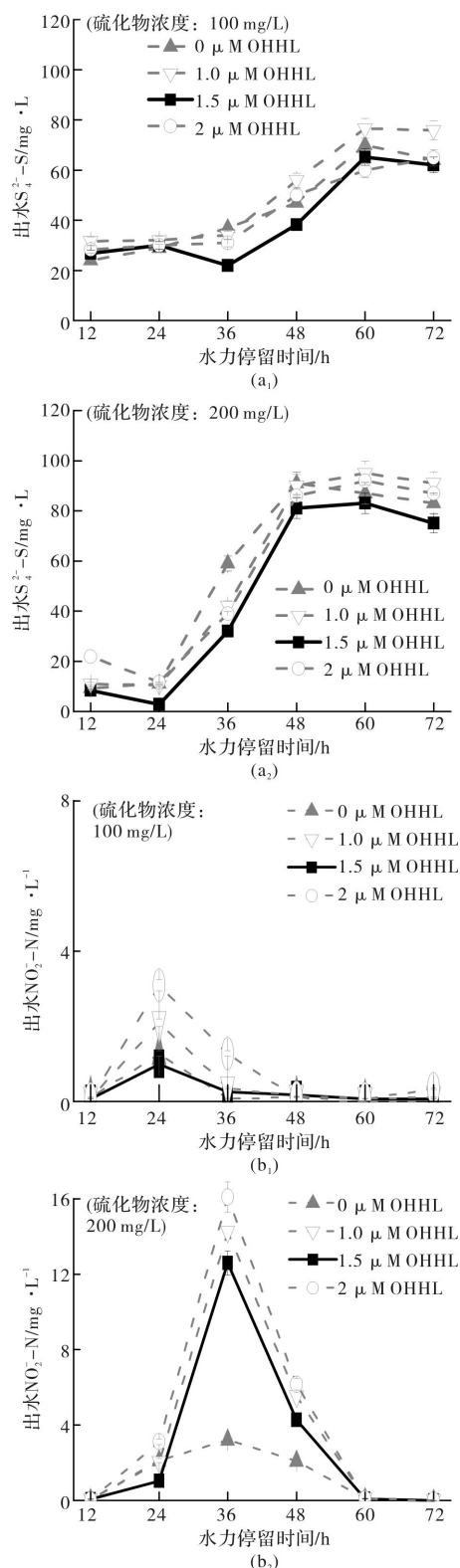
40%, 略低于进水硫化物为 100 mg/L (50%) 的体系。

此外, 反应初期(12 h)四组反应器出水硫化物的浓度分别为 48.9~49.4 mg/L、109.3~118.8 mg/L, 相应的硫化物去除率分别为 50.6%~51.0%、40.6%~45.3%。可以看出, 投加与未投加信号分子的体系对硫化物的初始去除效果(12 h)差异不大。在反应时间为 12 h 之后才体现出较为明显的差异, 这说明信号分子的作用是在反应进行 12 h 之后才发挥作用的。李军等人^[17]利用厌氧生物滤池进行硫自养反硝化研究, 反应 30 d 时硫化物和硝酸盐的去除率才能达到 80%~90% 以上, 这一结果远低于我们的研究(投加信号分子反应 36 h 硫化物的去除率接近 100%)。同时, 硫化物浓度为 200 mg/L 时初始硫化物的去除率比浓度为 100 mg/L 的体系降低 10%。这可能是由于硫化物浓度为 100 mg/L 时的体系适宜于功能菌的快速繁殖, 实验初期快速反应, 从而加快硫化物的转化速率。这与郑香凤等人^[18]的研究相符, 他们的研究表明, 硫的去除率随进水硫化物浓度增大而降低。

2.2 信号分子 OHHL 对硫、氮转化的影响

由图 3 可见, 在进水硫化物浓度为 100 mg/L 条件下, 反应时间为 36 h 时, 投加信号分子浓度为 1.5 μ M 时出水硫酸盐浓度为 22 mg/L, 远低于未投加信号分子和投加信号分子浓度为 1.0 μ M 和 2.0 μ M 时的相应值(34 mg/L、31 mg/L), 此时单质硫的产率最高(57%), 亚硝酸几乎不存在(0.1 mg/L)。可见, 投加 1.5 μ M 信号分子时, 可以促进脱氮除硫的进行, 产生大量单质硫。延长反应时间至 48 h 时, 硫酸盐浓度得到大幅度提高(提高 22 mg/L), 单质硫产率快速降低至 46%, 相应地氮气产量得到明显提高(增加 9 mL)。这是由于延长反应时间时, 体系中生成的单质硫与硝酸盐发生反应, 从而使得体系中产生了大量的硫酸盐和氮气。而未加信号分子和投加其他浓度的信号分子条件下, 硫酸盐浓度均大量提高(10~19 mL), 远高于信号分子投加浓度为 1.5 μ M 条件下的相应值, 这是由于在 36~48 h 时, 单质硫和硝酸盐发生反应, 使得体系中产生的单质硫被大量转化为硫酸盐, 同时产生大量氮气(增加 9~12 mL)。这可能是由于信号分子投加浓度为 1.5 μ M 条件下体系中的细菌数量较高, 从而保持较高的硫化物和硝酸盐的去除效果。在进水硫化物浓度为 200 mg/L 条件下, 呈现出相似的规律。但是硫酸盐浓度在反应进行至 24 h 时达到最低(仅

为 1.7 mg/L), 而后随着水力停留时间的延长, 硫酸盐浓度明显增多, 这是由于在 24 h 后促进了单质硫与硝酸盐的反应。但是单质硫的产量依旧在 36 h 时达到最高, 此时的亚硝酸盐浓度较高(12 mg/L), 这可能是由于在 24~36 h 时的脱氮除硫反应的反应速率要高于单质硫与硝酸盐的反应速率, 同时体系中发生了硝化反应的原因。



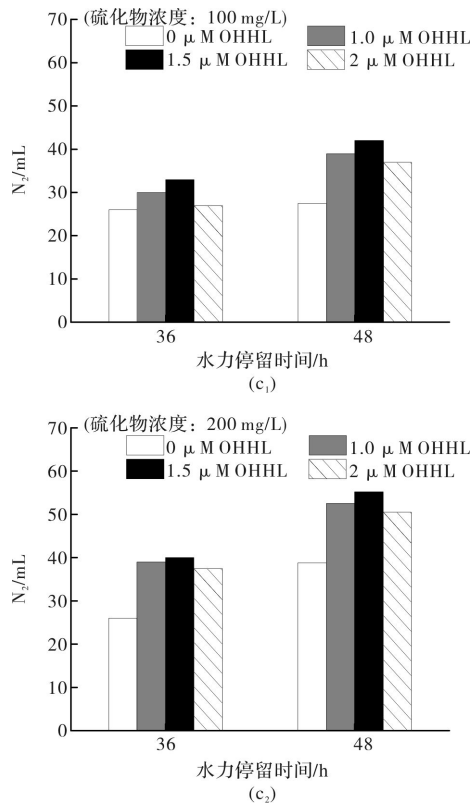


图 3 信号分子对氮、硫转化的影响 (a₁, b₁, c₁)
进水硫化物浓度 100 mg/L (a₂, b₂, c₂)
进水硫化物浓度 200 mg/L
Fig. 3 Effect of signal molecule on nitrogen and sulfur transformation (a₁, b₁, c₁) influent sulfide concentration of 100 mg/L (a₂, b₂, c₂) influent sulfide concentration of 200 mg/L

2.3 电子平衡及微生物群落分析

表 1 电子衡算方程

Tab. 1 Electronic balance equation

氧化反应	还原反应
$HS^- \rightarrow S^0 + H^+ + 2e^-$	$NO_3^- + H^+ + 2e^- \rightarrow NO_2^- + OH^-$
$HS^- + 4H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 9H^+ + 8e^-$	$NO_3^- + 6H_2O + 5e^- \rightarrow 0.5N_2 + 3H_2O$

根据表 1 进行电子平衡计算. 由图 4 表明在不同 OHHL 浓度下, 系统失去电子的相对数量均小于得到电子的相对数量, 说明体系中可能发生着不同程度的异养反硝化. 在 100 mg/L 体系投加 1.5 μM 的信号分子时, 得电子数远大于失电子数, 体系同时发生自养、异养反硝化作用, 此时细菌总量达到最高 (1.1×10^5 CFU/mL (图 5)), 相应的脱氮除硫效率达到最高 (分别为: 99.0%、96.6%). 当信号分子浓度为 1.0 μM 、2.0 μM 时, 其得电子数远小于 1.5 μM 的体系, 异养反硝化作

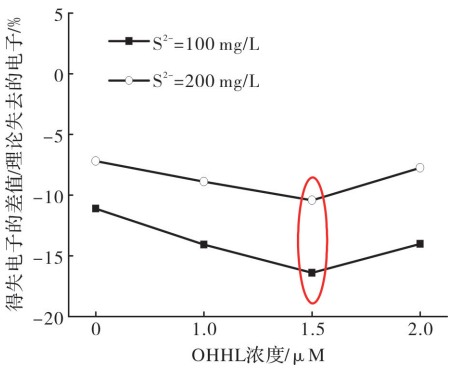


图 4 电子平衡计算结果 (36 h)
Fig. 4 Electronic balance calculation (36 h)

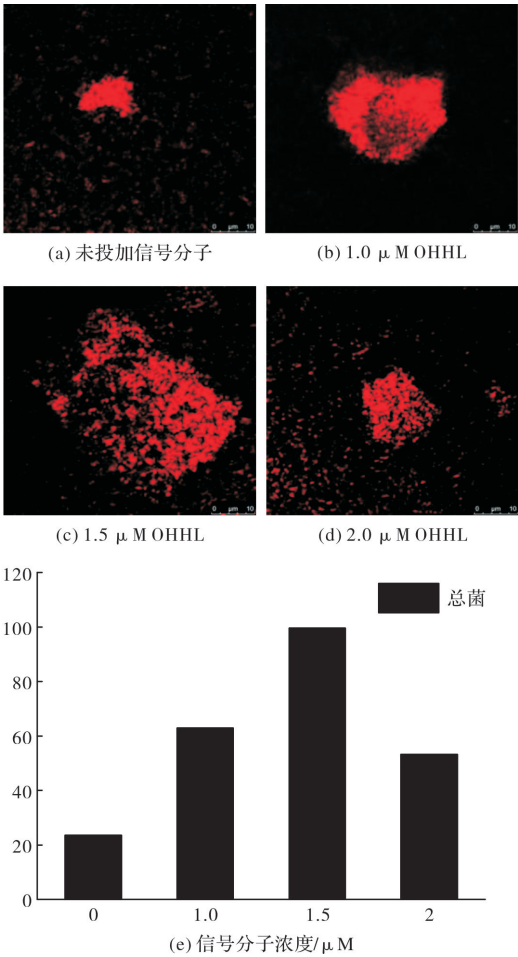


图 5 反应 36 h 时 100 mg/L 硫化物浓度体系总菌的 FISH 扫描图 (扫描倍数: 10×200)
Fig. 5 Scanning images of the most bacteria after 36 h with 100 mg/L of S^{2-} -S (magnification: 10×200)
用较弱, 细菌总量 (7.0×10^4 CFU/mL、 5.9×10^4 CFU/mL) 也远小于 1.5 μM 的体系, 故其脱氮除硫效果较差. 而未投加信号分子时, 得失电子基本守恒, 体系主要发生以硫化物为电子供体、硝酸盐为电子受体的自养反硝化作用, 此时细菌总量 (2.6×10^4 CFU/mL) 远小于投加信号分子体系, 大大降低了脱氮除硫效率及单质硫的产量. 当

进水硫化物浓度增加至 200 mg/L 时, 体系得电子数相对于 100 mg/L 时的相应值降低, 其异养反硝化作用减弱, 这可能是由于在 100 mg/L 进水浓度时体系中更多的内生碳源与硝酸盐反应加强了异养反硝化的程度. Wang 等人^[19]发现在含有机物、 NO_3^- 和硫化物的环境中同时存在异养和自养反硝化, 即兼养反硝化, 李巍等人^[20]也表明缺氧反应器中同时发生了自养反硝化和异养反硝化作用, 但其并未研究异养反硝化的程度.

3 结论

(1)投加信号分子 OHHL 时硫化物和硝酸盐的去除量和单质硫的产量均得到了大幅度提高.

(2)当信号分子 OHHL 投加浓度为 1.5 μM 时的去除量最高, 可达 99.0% 和 96.1%, 单质硫产量高达 60 mg/L.

(3)荧光原位杂交技术测定结果表明, 投加信号分子主要提高了体系中的总菌数量, 进而促进了异养反硝化作用, 提高了硫化物和硝酸盐的去除效率.

(4)进水硫化物浓度为 200 mg/L 时, 36 h 即可有效去除硫化物, 而硝酸盐需要水力停留时间延长至 72 h 才能达到 91.7% 的去除效率.

参考文献 References

- [1] 魏世林. 制革废水中的硫化物对环境的污染及其治理方法[J]. 中国皮革, 2003, 32(1):3-5.
WEI Shilin. Environmental pollution and treatment method of sulfides in tannery effluents [J]. China Leather, 2003, 32(1):3-5.
- [2] WANG A, LIU C, REN N, et al. Simultaneous removal of sulfide, nitrate and acetate: Kinetic modeling. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178 (1-3):35.
- [3] YIN Z, LI X, QI Z. Effects of sulfide on the integration of denitrification with anaerobic digestion [J]. Journal of Bioscience & Bioengineering, 2015, 120 (4):426-431.
- [4] 蔡靖, 郑平, 胡宝兰, 等. 硫氮比对厌氧生物同步脱氮除硫工艺性能的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28 (8):1506-1514.
CAI Jing, ZHENG Ping, HU Baolan, et al. The effect of sulfide to nitrate ratio on the performance of a simultaneous anaerobic sulfide and nitrate removal process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28 (8):1506-1514.
- [5] 陈婷婷, 肖蓉蓉, 施金豆, 等. 影响 AFB-MFC 同步脱

- 氮除硫性能因素的研究[J]. 环境科学与技术, 2013 (10):85-89.
CHEN Tingting, XIAO Rongrong, SHI Jindou, et al. Factors affecting performance of AFB-MFC for simultaneous nitrogen and sulfate removal[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(10):85-89.
- [6] 冯艳. 人体内细胞间的信号转导[J]. 生物学教学. 2010, 35(8): 68-69.
FEN Yan. Signal transduction between cells in human body[J]. Biology teaching, 2010, 35(8): 68-69.
- [7] 侯保连, 李安婕, 孙趣. AHLs 群体感应信号分子对硝化污泥附着生长及硝化效果的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9):2773-2779.
HOU Baolan, LI Anjie, SUN Q. The effect of N-acyl-homoserine lactones mediated quorum-sensing on the adhesion growth and nitrification nitrifying sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35 (9): 2773-2779.
- [8] 肖琳, 杨柳燕, 蒋丽娟, 等. 附生假单胞菌信号分子对铜绿微囊藻磷代谢的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4):557-561.
XIAO Lin, YANG Liuyan, JIANG Lijuan, et al. The effect of signal molecular produced by attached bacteria on the Mi-crosystis aeruginosa phosphorus metabolism [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4):557-561.
- [9] KOENIG A, LIU L H. Kinetic model of autotrophic denitrification in sulphur packed-bed reactors[J]. Water Research, 2001, 35(8):1969-1978.
- [10] STEUDEL R. Inorganic Polysulfides S_n , $n=2, \dots$, and Radical Anions $\text{S}_n^{\cdot-}$ [M]// Elemental Sulfur und Sulfur-Rich Compounds II. Berlin Heidelberg: Springer, 2003:281-288.
- [11] YANG W, VOLLERTSEN J, Hvitved-Jacobsen T. Anoxic sulfide oxidation in wastewater of sewer networks[J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2005, 52(3):191.
- [12] 徐金兰, 侯圣春, 黄廷林. 强化厌氧污泥体系同步脱硫反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(5):1246-1251.
XU Jinlan, HOU Shengchun, HUANG Tinglin. Characteristic of autotrophic denitrification in bioaugmented anaerobic system[J]. Environmental Science, 2010, 31(5):1246-1251.
- [13] XU J, DING K, YANG C, et al. Regulation of influent sulfide concentration on anaerobic denitrifying sulfide removal. [J]. Environmental Technology, 2017:1-21.

- [14] AMANN R I. In situ identification of micro-organisms by whole cell hybridization with rRNA-targeted nucleic acid probes[M]//Molecular Microbial Ecology Manual. Switzerland:Springer,1995:331-345.
- [15] DAIMS H, LÜCKER S, WAGNER M. Daime, a novel image analysis program for microbial ecology and bio-film research[J]. Environmental Microbiology, 2006, 8(2):200-213.
- [16] CHEN C, REN N, WANG A, et al. Microbial community of granules in expanded granular sludge bed reactor for simultaneous biological removal of sulfate, nitrate and lactate[J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2008, 79(6):1071-1077.
- [17] 李军, 张文文, 王立军, 等. 硫自养反硝化同步脱氮除硫启动试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(1):162-165.
- LI Jun, ZHANG Wenwen, WANG Lijun, et al. Start-up test of simultaneous nitrogen and sulfur removal by sulfur autotrophic denitrification[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(1):162-165.
- [18] 郑香凤, 汪莉, 郑天龙, 等. 生物填料塔同步脱氮除硫的研究[J]. 环境工程, 2013(s1):433-436.
- ZHENG Xiangfeng, WANG Li, ZHENG Tianlong, et al. Study of Simultaneous Denitrification and Desulfurization by Biological Packed Tower[J]. Environmental Engineering, 2013(s1):433-436.
- [19] WANG A J, DU D Z, REN N Q, et al. Tentative study on a new way of simultaneous desulfurization and denitrification[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2005, 13(3):422-425.
- [20] 李巍, 赵庆良, 刘颢. 缺氧附着生长反应器同步脱氮除硫除碳运行效果探讨[J]. 环境科学, 2008, 29(7):1855-1859.
- LI Wei, ZHAO Qingliang, LIU Jing. Simultaneous removal of sulfide, nitrogenous compounds and organic carbon by anoxic attached-growth bioreactor[J]. Environmental Science, 29(7):1855-1859.
- (编辑 沈 波)

(上接第 274 页)

- [16] 胡园园, 王志荣, 蒋军成. 自然通风条件下室内 CO₂ 扩散浓度变化的数值模拟[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2012, 34(3):129-133.
- HU Yuanyuan, WANG Zhirong, JIANG Juncheng. Numerical simulation of indoor concentration change of carbon dioxide dispersion under natural ventilation condition[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 34(3):129-133.
- [17] HANNA S, BRITTER R, ARGENTA E, et al. The Jack Rabbit chlorine release experiments: Implications of dense gas removal from a depression and downwind concentrations[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 213-214(3): 406-412.
- [18] 周宁, 滕欣, 袁雄军等. 基于可视化理论的重气泄漏扩散研究[J]. 环境工程, 2016, 34(10):147-152.
- ZHOU Ning, TENG Xin, YUAN Xiongjun, et al. Research of heavy gas leakage and diffusion based on the visualization theory[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(10):147-152.
- [19] 周超, 王志荣, 蒋军成. 室内空间重气泄漏扩散过程的影响因素[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2011, 33(4):88-92.
- ZHOU Chao, WANG Zhirong, JIANG Juncheng. Influence factors of dense gas leakage and dispersion indoor[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 33(4):88-92.
- (编辑 沈 波)