

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.9
第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)

郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)

济南市背景区域大气 PM_{2.5} 污染特征及其对能见度的影响 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)

2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)

长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)

燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)

高速公路沿线 PM_{2.5} 中重金属污染特征 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)

北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)

风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)

京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)

成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)

工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)

典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析 王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)

不同方法制备 Co₃O₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制 仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)

全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征 崔文杰, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)

江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笄文怡, 季鹏飞 (4000)

城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浞江为例 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)

水华对沉积物中氮的转化和去除的影响 肖琳, 杨佳怡 (4018)

沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)

汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)

新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)

基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性 张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)

FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例 陈倩, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)

天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制 邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)

镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb²⁺ 的去除 何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)

2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb²⁺ 晋圣珧, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)

钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验 白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)

大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (4105)

A²/O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)

上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)

微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析 张若晨, 陈川, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)

基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验 张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)

聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)

厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学 唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)

Ca²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响 张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)

从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷 畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)

信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏漪旋 (4177)

海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响 胡越航, 宣丽霞, 袁琼芬 (4185)

耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)

稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响 保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)

地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)

氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N₂O 排放的影响 吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)

三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N₂O) 分布和释放 程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)

沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响 朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)

新建铅蓄电集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征 丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)

不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)

基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法 张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)

缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征 罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)

西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)

调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)

海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源 陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)

《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)

信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响

徐金兰^{1,2}, 陈紫薇^{1,2}, 张少枫^{1,2}, 魏旖旎^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055)

摘要: 为探究信号分子联合菌对同步脱氮除硫效果的影响, 发现同时投加信号分子和脱氮硫杆菌可以加快硫化物和硝酸盐氮的去除且相比单独投加时更有利于单质硫的稳定积累和氮气产量的增加, 并通过 FISH 技术检测了反应结束后微生物总量, 信号联合脱氮硫杆菌可以增加微生物总数, 因此能够实现较好地脱氮除硫效果. 实验从不同信号分子浓度中找出了有利于单质硫稳定积累的最佳浓度, 进而在此浓度下分析了单独投加信号分子、单独投加脱氮硫杆菌, 以及同时投加信号分子和脱氮硫杆菌 3 种情况下的脱氮除硫效果. 结果表明, 当硫化物浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 延长反应时间至 72 h 后, 信号分子联合脱氮硫杆菌使硫化物的去除率提高至 99.8%, 硝酸盐去除率提高至 96.9%, 且单质硫转化为硫酸盐的速率减慢, 氮气的产量增加, 反应结束后其单质硫和氮气的量分别达到 59.0 mg 和 80.0 mL. 当硫化物浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 单独投加 $2.5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的信号分子在 72 h 时其硫化物和去除率达到 99.0%, 硝酸盐的去除率达到 93.9%, 单质硫和氮气的产量分别达到 63.1 mg 和 79.5 mL.

关键词: 信号分子; 脱氮硫杆菌; 脱氮除硫; 单质硫; 荧光原位杂交 (FISH)

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4177-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903012

Effect of Signal Molecule Combined with *Thiobacillus denitrificans* on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur

XU Jin-lan^{1,2}, CHEN Zi-wei^{1,2}, ZHANG Shao-feng^{1,2}, WEI Yi-ni^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: The effects of *Thiobacillus denitrificans* combined with signal molecules on the removal of sulfide and nitrate was investigated. By adding signal molecules and *T. denitrificans* at the same, the total number of microorganisms increased, the removal of sulfide and nitrate was accelerated, and an increase in nitrogen gas and more stable accumulation of elemental sulfur was observed. The total number of microorganisms after the reaction was detected using fluorescence *in situ* hybridization (FISH) technique. In this experiment, the optimal concentration for the stable accumulation of elemental sulfur from six concentrations of signal molecules was revealed. Further, the effects of adding signal molecules, *T. denitrificans*, and their combination were analyzed at this concentration. The results showed that it was easier to accumulate elemental sulfur after the addition of $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ signal molecule. After adding both *T. denitrificans* and $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ signal molecules at a sulfide concentration of $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the removal of sulfide and nitrate increased to 99.8% and 96.9% at 72 h, respectively, and increases in nitrogen gas and sulfur were observed. The amounts of elemental sulfur and nitrogen gas reached to 59.0 mg and 80.0 mL, respectively, after adding $2.5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ signal molecules at 72 h when the sulfide concentration was $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Under those conditions, the removal efficiency of sulfide and nitrate reached 99.0% and 93.9%, and the production of elemental sulfur and nitrogen reached 63.1 mg and 79.5 mL, respectively.

Key words: signal molecule; *Thiobacillus denitrificans*; simultaneous removal of nitrogen and sulfur; elemental sulfur; fluorescence *in situ* hybridization (FISH)

随着工业化进程的不断深入, 许多行业排放的废水中含有大量的氮和硫. 氮不仅会引起水华或赤潮, 在水体中还会被氧化为硝酸盐和亚硝酸盐, 如摄入过量, 则会导致人体中毒. 硫酸盐会降低厌氧段的废水处理效率, 还会释放出气体, 味臭有毒, 且具有强烈的腐蚀性^[1~3].

传统去除硫化物的物理、化学方法运行成本高、二次污染严重、且剩余污泥难处理. 而生物同步脱硫、脱氮技术具有条件温和、能耗低、投资少等优势, 是目前最经济有效、可行性高的水体脱氮除硫的方法^[4,5]. 同步脱氮除硫技术采用厌氧工艺将废水中的硫酸根离子转化为单质硫达到回收目

的, 同时将氨氮转化为氮气达到脱氮目的, 以减轻后续好氧处理工艺脱氮的负担^[6~9].

信号分子是生物体内的某些化学分子, 能够调控细菌生理行为, 影响生物的群集运动、聚集生长、胞外多糖的合成和生物膜形成, 同时影响污泥微生物生态组成与功能, 影响菌群结构和优势菌, 适宜浓度的信号分子可能对生物脱氮除硫起到一定作用^[10~12]. 目前与生物脱氮相关的主要功能菌是革兰氏阴性细菌, 可以通过分泌 AHLs (Acyl-homoserine

收稿日期: 2019-03-02; 修订日期: 2019-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778524)

作者简介: 徐金兰 (1973~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为废水生物处理, E-mail: xujinlan@xauat.edu.cn

lactones)信号分子刺激菌群生长和代谢的活性. OHHL (*N*-3-oxo-hexanoyl-homoserine-lactone) 作为 AHLs 类信号分子能够促进硝化污泥生长、提高微生物生长速率、增强硝化污泥活性^[13].

脱氮硫杆菌(*Thiobacillus denitrificans*)作为生物处理含硫含氮废水中的主要菌属微生物,在厌氧条件下不仅可以实现同步脱氮、除硫回收单质硫的目标,而且该工艺无需对反应器进行曝气,无需外加有机物作为电子受体,生成的单质硫可进行资源回收^[14~16].但脱氮硫杆菌也存在对温度、进水硫化物浓度等耐受性不强,反应所生成的单质硫和氮气产量有待提高等问题,因此利用脱氮硫杆菌的硫自养反硝化和其他技术相结合,增强其实际应用潜力十分必要^[17].

荧光原位杂交 (fluorescence in situ hybridization, FISH)技术,其原理是利用荧光标记好的针对微生物 DNA 上某一特异序列的探针与活性污泥等混合菌进行杂交,从而将含有探针序列具有互补序列的细菌检测出来的一种方法^[18].目前已在国内外废水处理领域广泛运用,不仅可测定不可培养微生物的形态特征,而且可以原位分析他们的空间及数量分布^[19~23].

本研究向 200 mg·L⁻¹和 300 mg·L⁻¹进水硫化物浓度下,投加不同浓度梯度的 OHHL 信号分子,发现当信号分子 OHHL 浓度为 1.0 μmol·L⁻¹时,更有利于脱氮除硫反应的进行.因此在此浓度下加入脱氮硫杆菌,拟将 OHHL 信号分子与脱氮硫杆菌自养反硝化作用相叠加,达到更好地脱氮除硫效果.本实验从不同信号分子浓度中找出了有利于单质硫稳定积累的最佳浓度,并分析了此信号分子浓度下单独投加 OHHL 信号分子、单独投加脱氮硫杆菌,以及同时投加 OHHL 和脱氮硫杆菌 3 种情况下的脱

氮除硫效果,发现同时投加信号分子和脱氮硫杆菌的脱氮除硫效果优于其单独投加时的效果,且单质硫和氮气的产量增加.本实验结合 FISH 技术检测了各反应器中反应结束后微生物总量,发现信号分子联合菌相比于单独投加时,其微生物总数增大,因此具有较好地脱氮除硫效果.

1 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未央区啤酒路 1 号西安汉斯啤酒厂污水处理站,实验接种的脱氮硫杆菌与文献[24]中相同,采用的信号分子为 OHHL.含氮硫的废水由人工合成,实验用水通过煮沸消除溶解氧的影响,试剂 Na₂S·9H₂O 提供 S²⁻,作为生化反应的电子供体,试剂 NaNO₃ 提供 NO₃⁻,作为生化反应的电子的受体.

1.2 实验设计

本实验分两部分进行,第一部分分 2 组进行,第 1 组的进水硫化物浓度为 200 mg·L⁻¹,第 2 组的进水硫化物浓度为 300 mg·L⁻¹,N/S 摩尔比均为 0.67.每组设置 6 个容积为 1 L 的密闭厌氧反应器,以蒸馏水为溶剂配制 500 μmol·L⁻¹的 OHHL 溶液,向各反应器中分别投加不同体积的信号分子溶液,使其浓度梯度为 1.0、2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 μmol·L⁻¹,并在每组各反应器中分别加入 200 mL 厌氧污泥.第二部分实验分 2 组,第 1 组和第 2 组的进水硫化物浓度分别为 200 mg·L⁻¹和 300 mg·L⁻¹,N/S 摩尔比均为 0.67.每组设置 3 个反应器,并在每组各反应器中分别加入 200 mL 厌氧污泥,每组反应器中实验设计如表 1 所示.各反应器中脱氮硫杆菌菌液 *D*₆₀₀ 均为 0.3,且其培养环境和生长状态相同.

表 1 实验设计¹⁾

Table 1 Experimental design

项目	第 1 组实验设计			第 2 组实验设计		
	1 号	2 号	3 号	1 号	2 号	3 号
脱氮硫杆菌/mL	150	—	150	150	—	50
信号分子/μmol·L ⁻¹	—	1.0	1.0	—	1.0	1.0

1)“—”表示不添加

1.3 测定方法

通过亚甲蓝分光光度法 (HACH DR5000) 检测硫化物 (S²⁻-S),紫外分光光度法 (HACH DR5000) 检测硝酸盐 (NO₃⁻-N), *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法 (HACHDR5000) 检测亚硝酸盐 (NO₂⁻-N), 阴离子色谱法 (戴安娜 ICS-1100) 检测硫酸盐 (SO₄²⁻-S) 和硫代硫酸盐 (S₂O₃²⁻-S). 硫酸盐的测定条件如

下:AS 23 色谱柱,AG 23 保护柱,操作温度 30℃,流速 1.0 mL·min⁻¹,抑制电流 25 mA,进样量 25 μL,洗脱液浓度 4.5 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 和 0.8 mmol·L⁻¹ NaHCO₃. 硫代硫酸盐的测定条件如下:抑制电流 49 mA,洗脱液浓度为 9.0 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 和 1.6 mmol·L⁻¹ NaHCO₃. 其他测定条件与硫酸盐相同.测定氮气体积 (Agilent 6890N 气相色

谱仪), 柱温为 120°C , 检测器温度为 160°C , 烘箱温度为 100°C . 通过碱性亚硫酸盐法确定单质硫 (S_0). 预先测定样品硫代硫酸盐浓度, 由于单质硫与亚硫酸盐在高 pH 条件下会转化为硫代硫酸盐, 在样品中加入亚硫酸盐, 以 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 调节 pH, 通过测定反应前后硫代硫酸盐浓度即可间接得到单质硫含量. 通过 FISH 评估来自生物反应器的污泥样品中存在的微生物群体的数量和分布. Amann^[25] 描述了样品制备和完整步骤. 实验使用由上海生工提供的总菌探针 EUB338 (GCT GCC TCC CGT AGG AGT), 并通过激光共聚焦显微镜 (Leica TCS SP8, Germany) 扫描样品.

2 结果与讨论

2.1 不同浓度信号分子脱氮除硫效果分析

当进水硫化物浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 由图 1 (a) 和 1(c) 可知, 当信号分子浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其硫化物的去除效果与其他信号分子浓度下相差不大, 而整个反应过程中其单质硫的产量均高于同时段其他浓度下相应值, 说明此信号分子浓度下有利于硫化物向单质硫的转化. 另外, 当信号分子浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其单质硫产量在 36h 时达到最大值为 58.32 mg , 且 96 h 时仍稳定在 42.16 mg , 说明信号分子在此浓度下减慢了单质硫转化为硫酸盐的速度, 有利于单质硫的积累. 而由图 2(a)

和图 2(c) 可知, 当信号分子浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其硝酸盐氮去除效果和氮气的产量均维持在较高水平. 说明在信号分子浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时有利于单质硫的积累并能保证较好地脱氮除硫效果.

由图 1(b) 和 1(d) 可知, 在进水硫化物浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下, 当信号分子浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其硫化物去除率在整个反应过程中均优于其他信号分子浓度下的相应值, 表现出较好的除硫效果. 和进水硫化物浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况类似, 当信号分子浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时单质硫的产量相比其他浓度下较高, 在 48 h 时达到最大值 64.96 mg , 且其转化为硫酸盐的速度较慢. 另外, 当 OHHL 信号分子浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 60 h 后, 其出水硝酸盐氮的浓度相比其他浓度快速降低, 且氮气产量均高于其他信号分子浓度下相应值, 说明此信号分子浓度下, 反应后期有利于氮的去除和氮气的产生.

综上, 在 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 进水硫化物浓度下, 相比于其他条件, 加入浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ OHHL 信号分子后, 其硫化物和硝酸盐的去除效果较好, 单质硫的产量相比其他信号分子浓度下较高, 且单质硫向硫酸盐转化的速度减慢, 有利于单质硫的稳定积累. 因此, 本研究在 OHHL 信号分子浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 同时投加脱氮硫杆菌, 进行了第二部分的实验, 拟利用脱氮硫杆菌

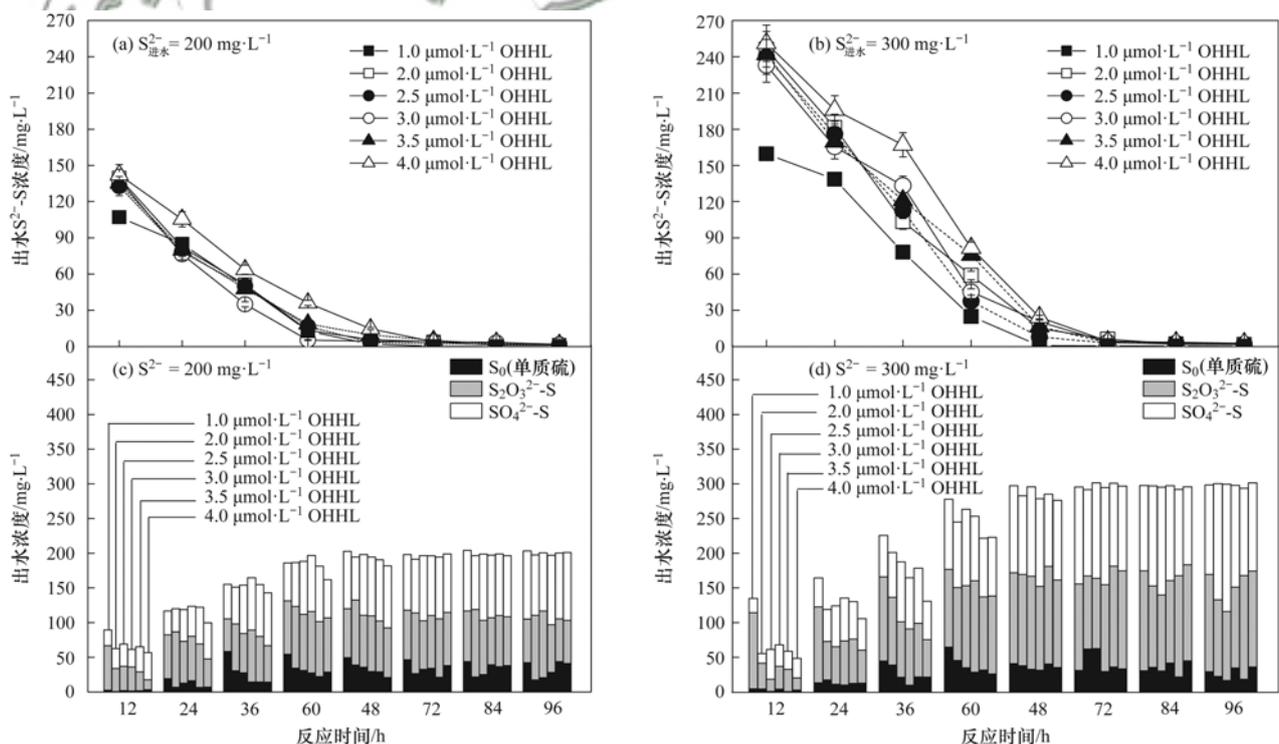


图 1 信号分子对除硫效果与硫转化的影响

Fig. 1 Effects of signal molecules on the removal of sulfur and sulfur transition

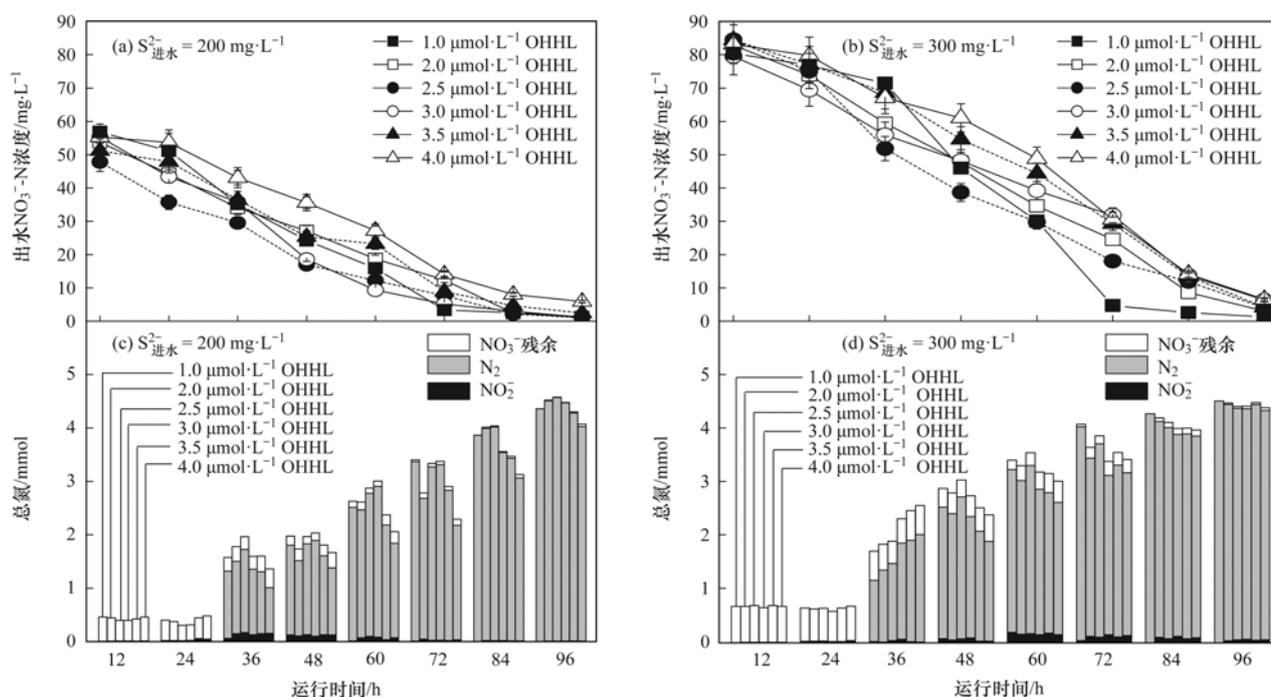


图 2 信号分子对脱氮效果与氮转化的影响

Fig. 2 Effects of signal molecules on the removal of nitrogen and nitrogen transition

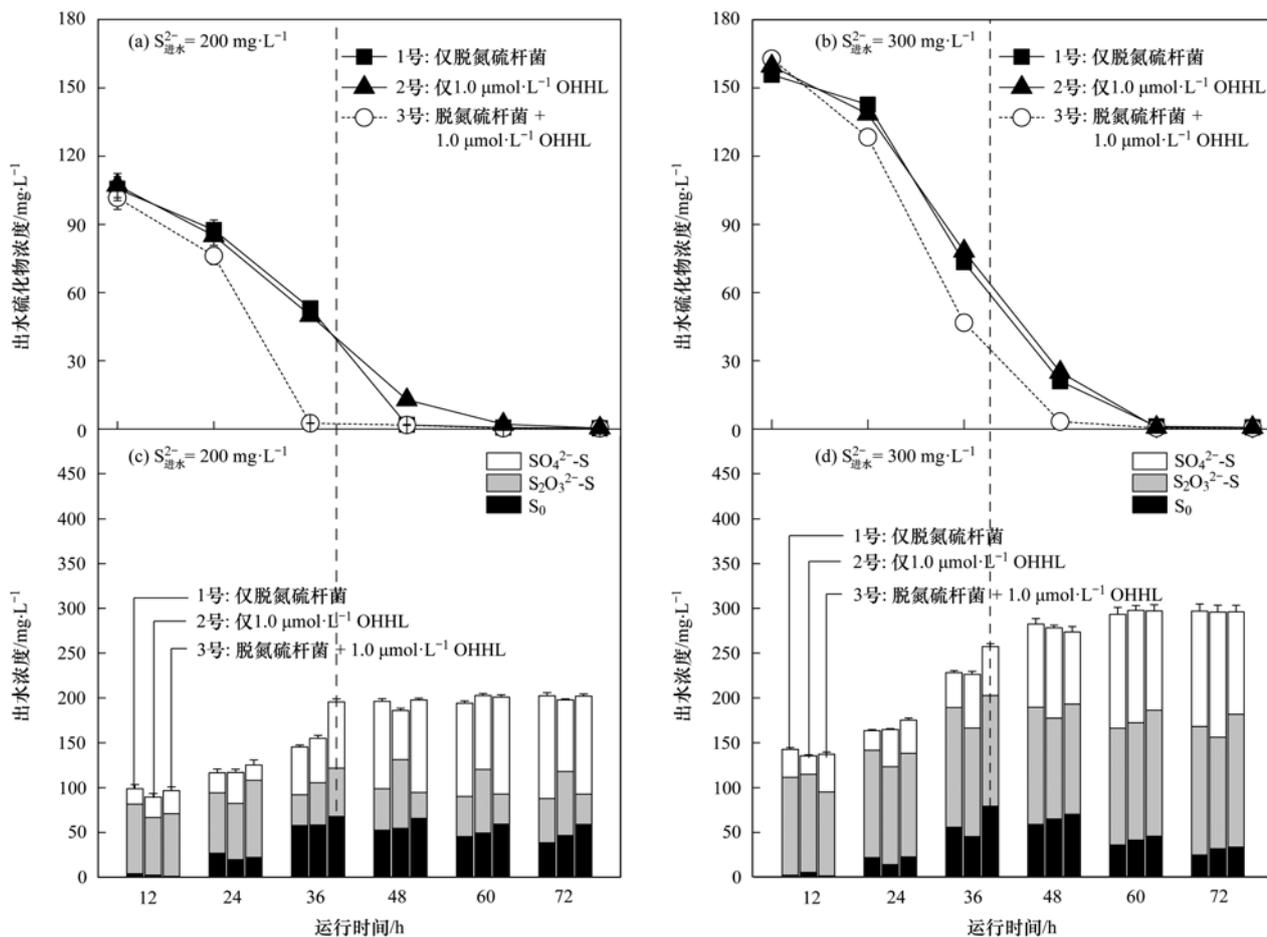
的硫自养反硝化作用和信号分子相结合,优化脱氮除硫效果.

2.2 信号分子联合菌脱氮除硫效果分析

当进水硫化物浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,由图 3 (a) 和 3(c) 可知,同时添加脱氮硫杆菌和信号分子的 3 号反应器在整个反应过程中,其硫化物去除效果均优于其他两组反应器. 36 h 时,3 号反应器中硫化物去除率达到 98.7%,比 1 号反应器 (73.5%) 高出 25.2%,比 2 号反应器 (75.0%) 高出 23.7%,而王爱杰^[26]等人的研究中相同进水硫化物浓度下同时刻硫化物去除率仅为 60.3%. 相比于单独投加,同时投加脱氮硫杆菌和信号分子达到相同去除率所需的时间明显缩短,说明信号分子联合菌使脱硫速率有了很大地提高. 3 号反应器中单质硫产量同样在 36 h 达到最大值 67.7 mg,高于此刻下仅投加脱氮硫杆菌 (57.6 mg) 和仅投加信号分子 ($51.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的两个反应器中相应值,说明同时添加信号分子和脱氮硫杆菌后可能调节了硫化物向单质硫的转化过程,提高了单质硫的产量. 由图 4(a) 和图 4(c) 可知,在同时添加 OHHL 和脱氮硫杆菌 3 号反应器中,硝酸盐氮的去除率在整个反应过程中均高于其他两组反应器,在 72h 时达到最高为 97.8%,比 1 号反应器 (92.1%) 和 2 号反应器 (94.7%) 分别高出 5.7% 和 3.1%. 而在孙莹^[27]的研究中,利用脱氮硫杆菌结合黄铁矿进行反硝化脱氮,在培养基中硝酸盐氮初始浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,脱氮硫杆菌对氮的去除率最高为 76.94%. 另外,3

号反应器中氮气的产量在 36 ~ 72 h 中均高于其他两组反应器,72 h 时氮气的产量达到最大值 3.57 mmol (80 mL). 说明信号分子结合菌提高了硝酸盐的去除速率,同时增加了氮气的转化量. 综合整个脱氮除硫过程可以发现,当进水硫化物浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,反应 36 h 时其硫化物几乎完全去除且单质硫产量达到最大,而硝酸盐的充分去除和氮气的产量最大值则出现在 72 h. 由图 1(c) 可知,36 h 后单质硫的产量基本保持稳定,72 h 时仍保持在 59.0 mg,因此可以通过延长反应时间至 72 h,在硝酸盐氮去除率和氮气产量达到最大的条件下,同时保证单质硫产量和硫化物的充分去除.

由图 3(b) 和 3(d) 可知,当进水硫化物浓度提高至 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,同时投加信号分子和脱氮硫杆菌的 3 号反应器中硫化物去除率在 24 ~ 72 h 内高于其他两组反应器,其数值在 48 h 时达到 98.9%,比仅添加脱氮硫杆菌的 1 号反应器 (93.0%) 高出 5.9%,比仅添加信号分子的 2 号反应器 (91.7%) 高出 7.2%,且达到相同硫化物去除效果所需的时间明显缩短,说明同时添加 OHHL 和脱氮硫杆菌加速了硫化物的去除. 另外,在整个反应过程中,3 号反应器中单质硫的产量均高于其他两组反应器,且在 36 h 时达到最大值 79.1 mg,分别高出 1 号反应器 (60.6 mg) 和 2 号反应器 (63.0 mg) 18.5 mg 和 16.1 mg,说明同时添加信号分子和脱氮硫杆菌提高了单质硫的产量,但此时硫化物去除率仅为 84.4%,即单质硫回收效果最佳时,其硫化物的



红色虚线为 3 号反应器中单质硫产量最高时相应硫化物的去除率

图 3 信号分子和脱氮硫杆菌对除硫效果与硫转化的影响

Fig. 3 Effects of signal molecules and *Thiobacillus denitrificans* on the removal of sulfur and sulfur transition

去除并不完全。由图 4(b)和 4(d)可知, 3 号反应器中硝酸盐氮的去除效果在整个反应过程中均优于其他两组反应器, 硝酸盐的去除率在 72 h 时达到最高为 96.9%, 分别高出 2 号反应器(93.2%)和 1 号反应器(94.7%)6.4%和 2.2%, 且氮气产量均高于其他两组反应器, 在 72 h 时氮气产量达到最大值 4.2 mmol(94.6 mL)。说明添加信号分子与脱氮硫杆菌能够加速对硝酸盐氮的去除并提高氮气产量。综合整个脱氮除硫过程可知, 同时投加 OHHL 和脱氮硫杆菌单质硫产量在 36 h 达到最大值, 此时硫化物仍有较多残余, 而硝酸盐氮的充分去除的时间则出现在 72 h, 因此需要延长反应时间方可达到同时脱氮除硫的效果, 但 72 h 时其单质硫的产量降低至 33.6 mg, 说明此时脱氮硫杆菌的活性降低, 信号分子结合菌对单质硫的提升效果较小, 不利于单质硫的回收。由图 1(d)可知, 单质硫产量较高的另一时刻出现在 72 h 单独投加 2.5 μmol·L⁻¹ OHHL 时, 其产量达到 63.1 mg, 且此时硫化物和去除率达到 99%, 硝酸盐的去除达到 93.9% 且氮气产量为 3.55 mmol

(79.5 mL), 而 72 h 时信号分子联合菌在对单质硫产量影响不大, 因此单独投加 2.5 μmol·L⁻¹ OHHL, 即能获得较好地同步脱氮除硫效果, 并使单质硫和氮气的产量保持在较高值。

综上, 在进水硫化物浓度为 200 mg·L⁻¹ 和 300 mg·L⁻¹ 时, 同时投加 OHHL 和脱氮硫杆菌相比于单独投加时, 提高了硫化物和硝酸盐的去除速率, 有利于缩短脱硫的反应时间, 并增加了单质硫和氮气的产量。本文在 2.3 节中通过 FISH 技术从生物角度进行其机制的研究。当进水硫化物浓度为 200 mg·L⁻¹ 时, 信号分子联合脱氮硫杆菌使硫化物的去除率提高至 98.7%, 单质硫的产量达到 67.7 mg。延长反应时间至 72 h 后, 硝酸盐去除率提高至 96.9%, 且氮气产量达到 80 mL, 此时单质硫的产量保持在 59.0 mg。当硫化物浓度为 300 mg·L⁻¹ 时, 单独投加 2.5 μmol·L⁻¹ 的信号分子在 72 h 时其硫化物和去除率达到 99%, 硝酸盐的去除达到 93.9%, 单质硫和氮气的产量分别达到 63.1 mg 和 79.5 mL。本研究与其他脱氮除硫工艺效果对比如图 5 所示。

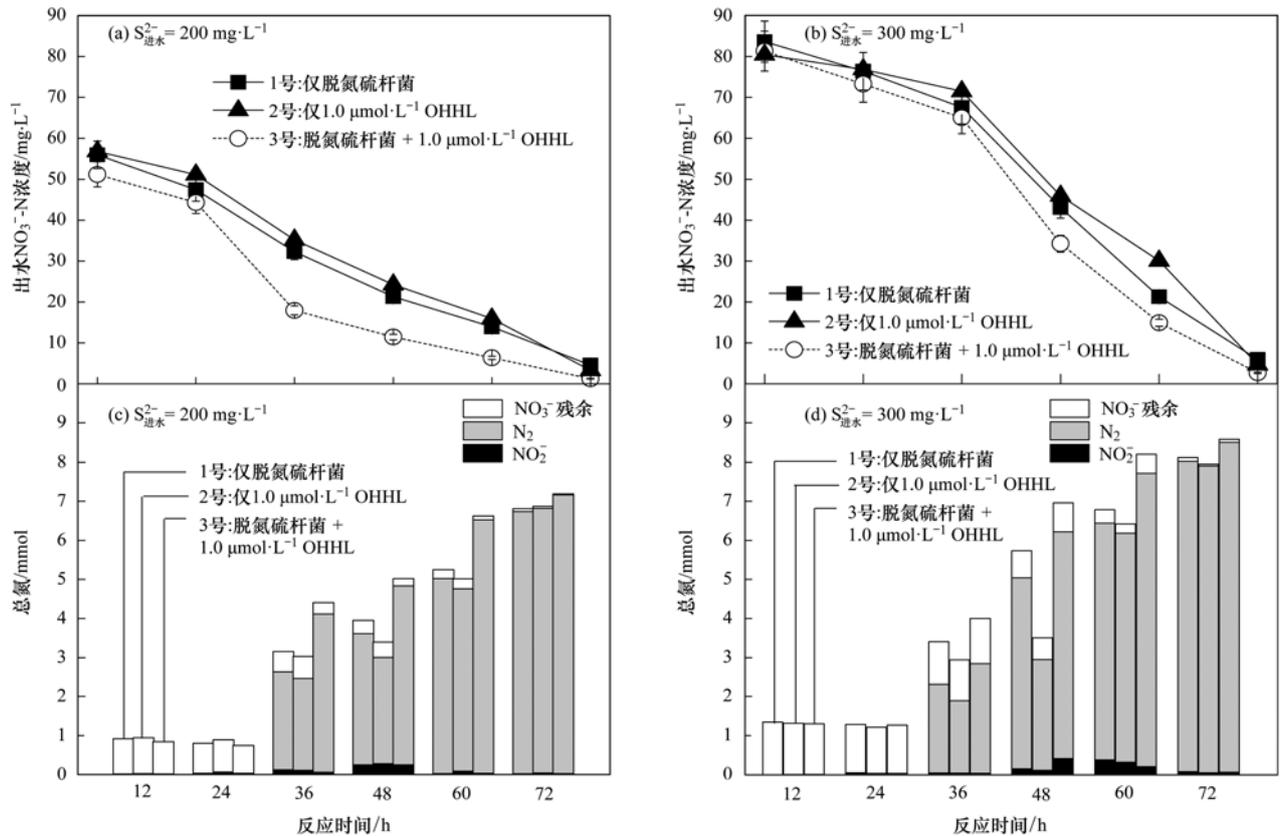
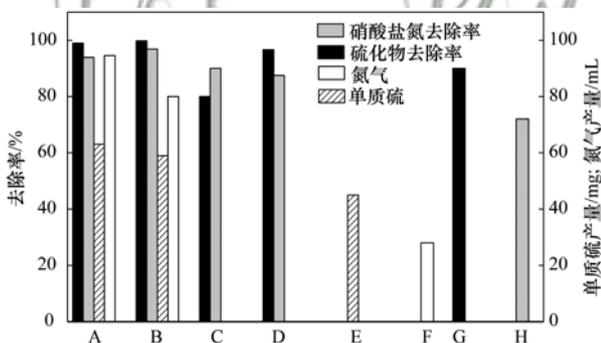


图4 信号分子和脱氮硫杆菌对脱氮效果与氮转化的影响

Fig. 4 Effects of signal molecules and *Thiobacillus denitrificans* on denitrification and nitrogen transition

A: 本研究, 初始硫化物浓度 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; B: 本研究, 初始硫化物 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C: 文献[28], 初始硝酸盐浓度 $43.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 初始硫化物浓度 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; D: 文献[29], 进水硫化物负荷 $500 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; E: 文献[30], 初始硫化物浓度 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; F: 文献[26], 初始硫化物浓度 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; G: 文献[31], 进水硫化物负荷 $12 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; H: 文献[18], 初始硫化物浓度 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

图5 脱氮除硫工艺效果对比

Fig. 5 Comparison of effects on nitrogen and sulfur removal

2.3 微生物群落特征分析

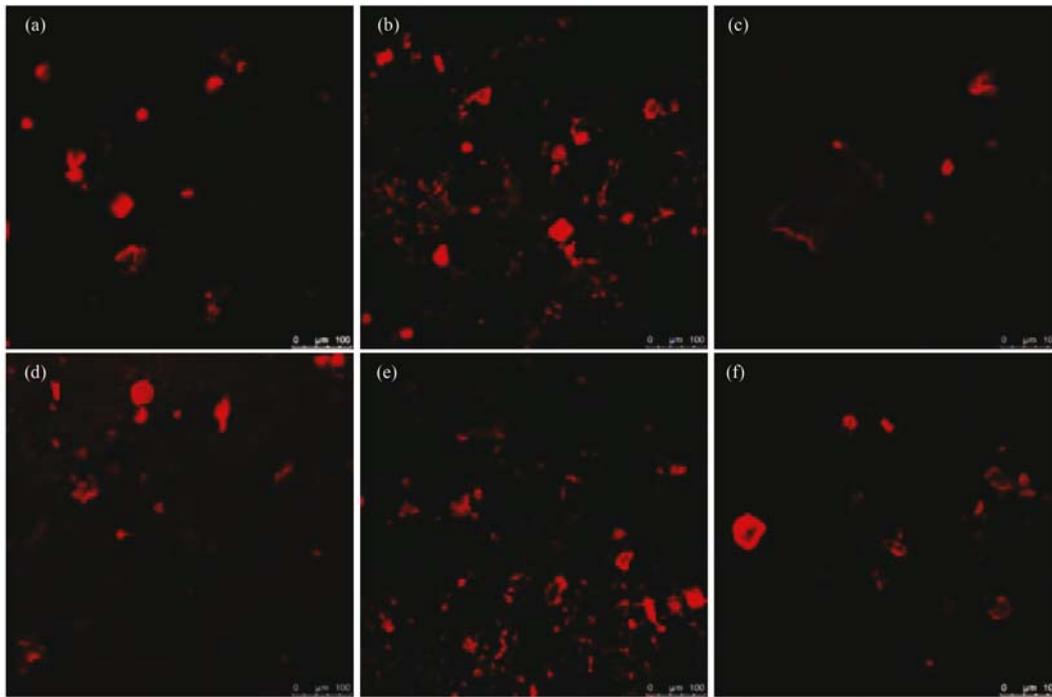
图6为进水硫化物浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应36 h时各反应器中总菌的FISH图像. 各反应条件下对应的FISH图像的对象数利用Daime软件统计, 对象数的总计可近似认为是不同反应条件下大多数细菌相对数量的总和. 在进水硫化物浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 同时投加

OHHL和脱氮硫杆菌的反应器中, 微生物总和的相对数量最高. 当进水硫化物浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 添加 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ OHHL与脱氮硫杆菌的反应器中, FISH图像中的对象数总和为2444, 为仅添加脱氮硫杆菌(1522)的1.6倍, 为仅添加OHHL(1363)的1.8倍; 当进水硫化物浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, FISH图像中的对象数总和为2915, 为仅添加脱氮硫杆菌(1695)的1.7倍, 为仅添加OHHL(1726)的1.7倍. 这之前2.2节中所讨论的同时添加OHHL与脱氮硫杆菌反硝化脱硫效果优于单独投加的效果这一结论相一致. 说明同时添加OHHL结合脱氮硫杆菌, 促进了系统中微生物总量的积累, 有利于脱氮除硫反应的进行, 从而使反应中硫化物和硝酸盐氮的去除速率提高, 同时单质硫和氮气的产量增加.

3 结论

(1) 当进水硫化物浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时在OHHL信号分子浓度为 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下, 其单质硫产量相比于其他信号分子浓度下产量较高且保持稳定, 说明此信号分子浓度有利于硫化物向单质硫的转化和单质硫的稳定积累.

(2) 同时投加信号分子和脱氮硫杆菌相比于单



(a) $S^{2-}-S = 200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 仅脱氮硫杆菌; (b) $S^{2-}-S = 200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 脱氮硫杆菌 + $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ OHHL; (c) $S^{2-}-S = 200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ OHHL; (d) $S^{2-}-S = 300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 仅脱氮硫杆菌; (e) $S^{2-}-S = 300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 脱氮硫杆菌 + $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ OHHL; (f) $S^{2-}-S = 300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ OHHL; 放大倍数: 10×200

图 6 脱氮除硫反应中总菌的 FISH 图

Fig. 6 FISH diagram of total bacteria count in the process of simultaneous removal of nitrogen and sulfur

独投加时, 微生物总量数量明显增加, 因此反应中硫化物和硝酸盐氮的去除速率均有所提高, 且单质硫和氮气的产量增加。

(3) 当进水硫化物浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 信号分子联合脱氮硫杆菌在延长反应时间至 72 h 时达到最佳脱氮除硫条件, 此时硫化物的去除率提高至 99.8%, 单质硫的产量达到 59.0 mg, 硝酸盐去除率提高至 96.9%, 且氮气产量达到 80.0 mL。当硫化物浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其最佳脱氮除硫条件为单独投加 $2.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的信号分子且反应时间为 72 h 时, 其硫化物和硝酸盐氮去除率分别达到 99.0% 和 93.9%, 单质硫和氮气的产量分别达到 63.1 mg 和 79.5 mL。

参考文献:

- [1] 延利军. 水中硝酸盐污染现状、危害及脱除技术[J]. 城镇供水, 2013, (1): 70-72.
- [2] 池勇志, 李亚新. 硫化物的危害与治理进展[J]. 天津城市建设学院学报, 2001, 7(2): 105-108.
Chi Y Z, Li Y X. Progress in harm and treatment of sulfide[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2001, 7(2): 105-108.
- [3] Liu H, Luo G Q, Hu H Y, et al. Emission characteristics of nitrogen- and sulfur-containing odorous compounds during different sewage sludge chemical conditioning processes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235-236: 298-306.
- [4] 武鑫, 赵晋忠. 脱氮硫杆菌对废水中硫氮的脱除[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(1): 175-178.
Wu X, Zhao J Z. Removal of nitrate and sulfide from wastewater by *Thiobacillus denitrificans* [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2013, 19(1): 175-178.
- [5] Chen C, Ren N Q, Wang A J, et al. Simultaneous biological removal of sulfur, nitrogen and carbon using EGSB reactor[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 78(6): 1057-1063.
- [6] Liu C S, Zhao D F, Yan L H, et al. Elemental sulfur formation and nitrogen removal from wastewaters by autotrophic denitrifiers and anammox bacteria[J]. Bioresource Technology, 2015, 191: 332-336.
- [7] Reyes-Avila J, Razo-Flores E, Gomez J. Simultaneous biological removal of nitrogen, carbon and sulfur by denitrification [J]. Water Research, 2004, 38(14-15): 3313-3321.
- [8] Cai J, Zheng P, Qaisar M, et al. Kinetic characteristics of biological simultaneous anaerobic sulfide and nitrite removal[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(5): 1387-1394.
- [9] 张丽, 黄勇, 袁怡, 等. 生物同步脱氮除硫工艺研究进展[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(12): 70-73, 79.
Zhang L, Huang Y, Yuan Y, et al. Research advances of biological processes for simultaneous removal of nitrogen and sulfur [J]. Environmental Pollution and Control, 2012, 34(12): 70-73, 79.
- [10] Basudhar D, Ridnour L A, Cheng R, et al. Biological signaling by small inorganic molecules [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2016, 306: 708-723.
- [11] 李蒙英, 陆鹏, 张迹, 等. 生物膜中群体感应因子细菌的分离及成膜能力[J]. 中国环境科学, 2007, 27(2): 194-198.
Li M Y, Lu P, Zhang J, et al. Isolation and biofilm forming capacity of quorum sensing factor bacterium [J]. China Environmental Science, 2007, 27(2): 194-198.
- [12] 孙颖, 宋协法, 马真. 两种 AHLs 信号分子对生物膜法养殖

- 污水处理条件下水体环境的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2250-2254.
- Sun J, Song X F, Ma Z. Impacts of two kinds of AHLs on aquaculture environment with biofilm treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(6): 2250-2254.
- [13] 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 B L, Li A J, Sun Q. The effect of N-acy-homoserine lactones mediated quorum-sensing on the adhesion growth and nitrification of nitrifying sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(9): 2773-2779.
- [14] 王爱杰, 杜大仲, 任南琪, 等. 脱氮硫杆菌在废水脱硫、脱氮处理工艺中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(4): 423-425, 429.
- Wang A J, Du D Z, Ren N Q, et al. Application of *Thiobacillus denitrificans* in wastewater denitrification and de-sulfide treatment processes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(4): 423-425, 429.
- [15] Yu L P, Yuan Y, Chen S S, et al. Direct uptake of electrode electrons for autotrophic denitrification by *Thiobacillus denitrificans*[J]. Electrochemistry Communications, 2015, 60: 126-130.
- [16] Nanda J, Whiteley C G, Chang J S, et al. Production of elemental sulfur from sulfide and nitrate-laden wastewaters by methanogenic culture via sulfide denitrifying removal process[J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, 78: 128-131.
- [17] 方圆, 贺艳妮, 杜耀, 等. 反硝化脱硫菌的代谢特征及其环境应用研究进展[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(4): 84-88.
- Fang Y, He Y N, Du Y, et al. Review of the metabolic characteristics of nitrate-reducing, sulfide-oxidizing bacteria and its environmental application [J]. Environmental Pollution and Control, 2015, 37(4): 84-88.
- [18] 万春黎. 同步脱氮脱硫工艺生物强化及种群动态分析初探[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. 58-59.
- Wan C L. Bioaugmentation for simultaneously desulfate and denitrate process and analysis on microbe community development [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. 58-59.
- [19] Zhang T C, Lampe D G. Sulfur: limestone autotrophic denitrification processes for treatment of nitrate-contaminated water; batch experiments[J]. Water Research, 1999, 33(3): 599-608.
- [20] Wang J L, Han L P, Shi H C, et al. Biodegradation of quinoline by gel immobilized *Burkholderia* sp. [J]. Chemosphere, 2001, 44(5): 1041-1046.
- [21] 邢德峰, 任南琪, 王爱杰. FISH 技术在微生物生态学中的研究及进展[J]. 微生物学通报, 2003, 30(6): 114-119.
- Xing D F, Ren N Q, Wang A J. Application of fluorescence in situ hybridization (FISH) in microbial ecology[J]. Microbiology China, 2003, 30(6): 114-119.
- [22] 李冰冰, 肖波, 李蓓. FISH 技术及其在环境微生物监测中的应用[J]. 生物技术, 2007, 17(5): 94-97.
- Li B B, Xiao B, Li B. Application of fluorescence in situ hybridization in monitor of environmental microbial ecology[J]. Biotechnology, 2007, 17(5): 94-97.
- [23] Juretschko S, Timmermann G, Schmid M, et al. Combined molecular and conventional analyses of nitrifying bacterium diversity in activated sludge: *Nitrosococcus mobilis* and *Nitrospira*-like bacteria as dominant populations [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(8): 3042-3051.
- [24] 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 J L, Hou S C, Huang T L. Characteristic of autotrophic denitrification in bioaugmented anaerobic system [J]. Environmental Science, 2010, 31(5): 1246-1251.
- [25] Amann R I. In situ identification of micro-organisms by whole cell hybridization with rRNA-targeted nucleic acid probes [A]. In: Akkermans A D L, Van Elsas J D, De Bruijn F J (Eds.). Molecular Microbial Ecology Manual[M]. Dordrecht: Springer, 1995. 331-345.
- [26] 王爱杰, 杜大仲, 任南琪, 等. 一种同步脱氮脱硫并回收单质硫的新工艺初探[J]. 中国科技信息, 2005, (9): 56-57, 71.
- Wang A J, Du D Z, Ren N Q, et al. A new process of simultaneous de-sulfurization and de-nitrification [J]. China Science and Technology Information, 2005, (9): 56-57, 71.
- [27] 孙莹. 脱氮硫杆菌利用不同硫源去除地下水硝酸盐的实验研究[J]. 广东化工, 2012, 39(7): 5-6, 44.
- Sun Y. The thiobacillus denitrificans use of different sulfur source to remove the nitrate of groundwater[J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(7): 5-6, 44.
- [28] 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 J, Zhang W W, Wang L J, et al. Study on the start-up of sulfur autotrophic denitrification bioreactor for the simultaneous removal of nitrogen and sulfur[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(1): 162-165.
- [29] 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, 31(S1): 433-436, 446.
- Zheng X F, Wang L, Zheng T L, et al. Study of simultaneous denitrification and desulfurization by biological packed tower[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(S1): 433-436, 446.
- [30] Huang C, Liu Q, Chen C, et al. Elemental sulfur recovery and spatial distribution of functional bacteria and expressed genes under different carbon/nitrate/sulfide loadings in up-flow anaerobic sludge blanket reactors [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 324: 48-53.
- [31] 左剑恶, 袁琳, 胡纪萃, 等. 利用无色硫细菌氧化废水中硫化物的研究[J]. 环境科学, 1995, 16(6): 7-10.
- Zuo J E, Yuan L, Hu J C, et al. Biotechnological removal of sulfides in the effluent from sulfate reducing reactors [J]. Environmental Science, 1995, 16(6): 7-10.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, CAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China .....	..... CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province .....	..... SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City .....	..... GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal .....	..... XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs .....	..... LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River .....	..... WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang .....	..... WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons .....	..... ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau .....	..... CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals .....	..... SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent .....	..... HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode .....	..... JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄ .....	..... BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants .....	..... JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater .....	..... RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment .....	..... YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions .....	..... ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal .....	..... ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal .....	..... YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge .....	..... TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge .....	..... ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge .....	..... CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur .....	..... XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage .....	..... HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process .....	..... ..... ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils .....	..... BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland .....	..... CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover .....	..... LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River .....	..... CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters .....	..... ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals .....	..... ..... DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings .....	..... YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety .....	..... ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns in Jinyun Mountain .....	..... LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China .....	..... ..... TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice .....	..... PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo .....	..... CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)