

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青宪,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王宏伟,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和巯基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响

陈子爱, 陈会娟, 魏本平, 刘刚金, 邓良伟*, 吴力斌

(农业部沼气科学研究所, 成都 610041)

摘要: 在温度 30℃、pH 为 7、硫氮比为 5/3、厌氧条件下, 对比研究了不同 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌混培养菌同步脱氮除硫影响。随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 减小, 荧光假单胞菌、铜绿假单胞菌对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率逐渐增高, 而 S^{2-} 去除率却依次减少, 混培养菌对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除效率先增加后趋于平稳。 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌去除 S^{2-} 几乎没有影响。荧光假单胞菌能迅速将 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, 但 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转为 N_2 却相对缓慢, 培养液中出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积; 而铜绿假单胞菌将 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 还原 N_2 的能力明显比荧光假单胞菌强, 培养液未反应的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主, 未出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积。混培养菌对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 转化的情况介于荧光假单胞菌与铜绿假单胞菌之间。荧光假单胞菌同时获得较高 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 去除的 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为 5/5, 铜绿假单胞菌为 10/0, 混培养菌为 5.0/5.0。混培养菌对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的同步去除效果优于单菌株荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌。

关键词: $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$; 混培养; 荧光假单胞菌; 铜绿假单胞菌; 脱氮; 除硫

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0746-07

Effects of the Ratio of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ to $\text{NO}_2^- - \text{N}$ on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture

CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, LIU Gang-jin, DENG Liang-wei, WU Li-bin

(Biogas Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China)

Abstract: Effects of the ratio of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ to $\text{NO}_2^- - \text{N}$ on removal of sulfide and nitrogen by *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aeruginosa* and mixed culture were investigated at the pH value of 7.0, temperature of 30℃, ratio of sulfide to nitrate of 5/3 and anaerobic condition. Along with the decrease of ratio of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ to $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_x^- - \text{N}$, the removal rate by *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas aeruginosa* increased gradually, while S^{2-} removal rate reduced. The $\text{NO}_x^- - \text{N}$ removal rate by mixed culture increased first and became steady along with the decrease of ratio of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ to $\text{NO}_2^- - \text{N}$. The ratio of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ to $\text{NO}_2^- - \text{N}$ had hardly influence on S^{2-} removal by mixed culture. Accumulation of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ occurred due to a faster rate of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ reduction over $\text{NO}_2^- - \text{N}$ reduction in the liquid culture of *Pseudomonas fluorescens*. Accumulation of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ did not occur in the liquid culture of *Pseudomonas aeruginosa* because it has a stronger ability to convert $\text{NO}_2^- - \text{N}$ than *Pseudomonas fluorescens*. The behavior of $\text{NO}_x^- - \text{N}$ by mixed culture in located between *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas aeruginosa*. The optimum ratio of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ to $\text{NO}_2^- - \text{N}$ to achieve high removals of sulfide and nitrogen for *Pseudomonas fluorescens* and mixed culture were 5/5, 10/0 for *Pseudomonas aeruginosa*. The performance of sulfide and nitrogen removal by the mixed culture was higher than that by *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas aeruginosa*.

Key words: ratio of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ to $\text{NO}_2^- - \text{N}$; mixed culture; *Pseudomonas fluorescens*; *Pseudomonas aeruginosa*; nitrogen removal; sulfide removal

猪场废水是一种高氨氮高浓度有机废水, 通常采用厌氧消化并回收沼气的方法进行前处理。一方面, 猪场废水经过厌氧消化前处理后, 再进行好氧处理, 运行效果比较差^[1, 2], 主要原因是厌氧消化液好氧处理过程的反硝化阶段缺乏电子供体。另一方面, 厌氧消化产生的沼气中含有硫化氢, 具有毒性和腐蚀性, 在沼气利用前往往需要脱除硫化氢。在沼气脱硫过程中, 有电子供体——硫化氢, 缺乏电子受体^[3, 4]。因此, 厌氧消化液脱氮与沼气脱硫可以互补, 基于这一思路, 笔者所在的研究团队提出了猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联工艺, 并取得了较好的废

水中氮与沼气中硫化氢同步去除效果^[5~7]。

在废水生物脱氮过程的硝化阶段, 铵态氮首先转化为亚硝态氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$), 然后再转化成硝态氮 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 以硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 为电子受体进行反硝化, 就是全程硝化反硝化。如果将转化进程控制在亚硝态氮阶段, 然后以亚硝态氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$) 为电子受

收稿日期: 2013-04-07; 修订日期: 2013-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31101749); 国家高技术研究发展规划(863)项目(2013AA102805-02)

作者简介: 陈子爱(1975~), 女, 副研究员, 主要研究方向为废水生物处理及资源化, E-mail: cza0903@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dengliangwei@caas.cn

体进行反硝化,就是短程硝化反硝化工艺. 在异养反硝化过程中,电子受体类型($\text{NO}_2^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_3^- - \text{N}$)及其比例对反硝化具有明显的影响,一般认为, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的还原速度较 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的还原速度快^[8]. 而张小玲等^[9]研究却有不同结果,在温度为 25℃、pH 值为 7、基质浓度 $< 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时以 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为初始基质的反硝化速率较快,但当基质浓度 $> 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后,反而是以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为初始基质的反硝化速率较快. 在以硫化物为电子供体的自养反硝化过程中,电子受体类型($\text{NO}_2^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_3^- - \text{N}$)及其比例对反硝化有何影响目前还鲜见报道. 因此,有必要对此展开研究.

近年来的研究表明,微生物菌剂在提高系统的处理效果及稳定性方面可以发挥积极作用^[10],因此,废弃物处理微生物菌剂的研究越来越受到重视^[11, 12]. 前期研究已经从猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联反应器混合液中分离得到 2 株具有同步脱氮除硫能力功能菌,其同步脱氮除硫能力与耦联反应器混合液的混培养菌相比是否具有优势,这一问题仍然值得探讨. 同时,通过对比研究可为猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联的微生物制剂研制奠定基础.

1 材料与方法

1.1 试验微生物

1.1.1 纯培养菌

本实验室分离的荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens*)、铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*)^[13]. 试验时,菌液接种量为 10%.

1.1.2 混培养菌

本试验所用的混培养菌为猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联反应器的混合液^[14],取出 500 mL 装入 500 mL 烧杯中,用塑料膜密封,放入 4℃ 冰箱内保存待用,试验时,菌液接种量为 14%.

1.2 试验废水

本试验废水为猪场废水厌氧消化液好氧后处理硝化阶段出水. 将猪场粪便污水处理沼气工程厌氧消化器出水(简称厌氧消化液)取回实验室后,对其进行间歇曝气,方法参照文献^[15],曝气阶段结束后,沉淀 1 h,取上清液作为微生物培养基,并根据试验需要进行稀释,添加 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_3^- - \text{N}$.

1.3 试验方法

将试验废水灭菌后加入硫化钠,通过稀释及加入 KNO_3 和 KNO_2 量将培养液配制成 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 分别为 10/0、7.5/2.5、5/5、2.5/7.5、

0/10 的 5 个处理,培养液的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ ($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 之和)为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,硫氮比为 5/3,通过稀盐酸或氢氧化钠控制 pH 至 7,将培养菌液按上述比例加入试验废水中,总体积为 70 mL,三角瓶加塞密封,保持厌氧状态. 以未接种的试验液为空白对照,每个处理做 2 个重复平行试验. 在温度 30℃ 条件下培养 2 d,取培养前后培养液进行离心,再取上清液测定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 NO_2^- 、 S^{2-} 及 SO_4^{2-} 的含量,扣减空白对照试验结果后,计算纯培养菌与混培养菌对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的去除率.

1.4 分析项目与测定方法

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 浓度和 pH 的测定分别采用酚二磺酸光度法、二硝基苯二胺光度法、铬酸钡分光光度法、亚甲基蓝分光光度法和酸度计法^[16].

2 结果与分析

2.1 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对荧光假单胞菌同步脱氮除硫的影响

在初始 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 浓度约 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, S^{2-} 浓度约 $85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对荧光假单胞菌同步去除 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 和 S^{2-} 的试验结果见图 1. 从中可以看出,培养后的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 浓度随 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 的降低而呈下降趋势,且 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 下降趋势非常接近. 培养后的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 主要为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,出现了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积;培养后的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度很低,都在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除率随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 的降低而升高[图 1(a)]. 荧光假单胞菌对 S^{2-} 的去除率趋势与 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除率趋势不同,随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 的降低,荧光假单胞菌对 S^{2-} 的去除率依次降低,即在 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较高时, S^{2-} 去除率相对较高[图 1(b)].

荧光假单胞菌同时获得较高 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 去除的 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为 5.0/5.0.

2.2 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对铜绿假单胞菌同步脱氮除硫的影响

在初始 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 浓度约 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, S^{2-} 浓度约 $85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对铜绿假单胞菌同步去除 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 和 S^{2-} 的试验结果见图 2. 从中可以看出,培养后的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 浓度随 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 的降低而

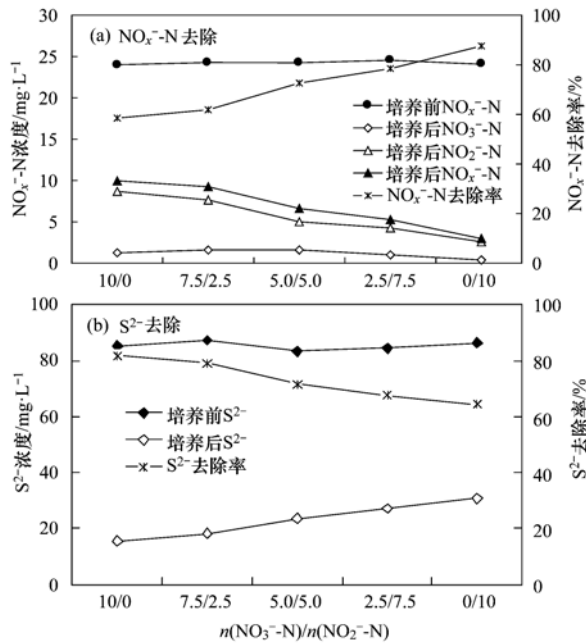


图1 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 比对荧光假单胞菌去除氮、 S^{2-} 的影响

Fig. 1 Influence of the ratio of $n(\text{NO}_3^- \text{-N})$ to $n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ on the removal of nitrogen and S^{2-} concentration by *Pseudomonas fluorescens*

呈下降趋势. 培养后的 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 几乎都为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度接近 0, 没有出现 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 累积. 另外, $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 去除率随着 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 的降低而升高[图 2(a)]. 铜绿假单胞菌对 S^{2-} 的去除率随着 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 的降低而依次减少, 即在 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度较高时, S^{2-} 去除率相对较低[图 2(b)].

铜绿假单胞菌同时获得较高 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 、 S^{2-} 去除的 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 为 7.5/2.5.

2.3 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 对混培养菌同步脱氮除硫的影响

在初始 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 浓度约 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, S^{2-} 浓度约 $85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 对混培养菌同步去除 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 和 S^{2-} 的试验结果见图 3. 从中可知, 培养后的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 浓度随 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 的降低先稍微有所下降, 然后趋于平稳. 培养后的 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 既有 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 也有 $\text{NO}_2^- \text{-N}$, $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 为 10/0 时, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度几乎一样, 其它几个 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 比时, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度高于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 出现了少量 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 累积. $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 去除效率随 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 的降低先增加后趋于平

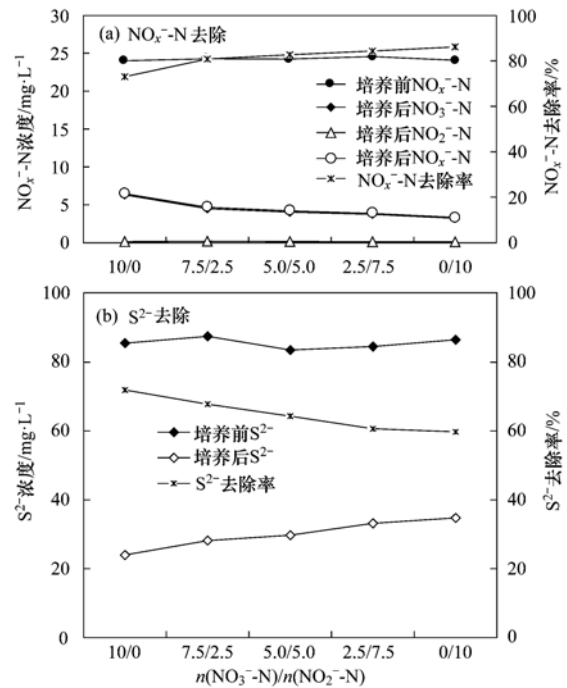


图2 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 对铜绿假单胞菌去除氮、 S^{2-} 的影响

Fig. 2 Influence of the ratio of $n(\text{NO}_3^- \text{-N})$ to $n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ on the removal of nitrogen and S^{2-} concentration by *Pseudomonas aeruginosa*

稳, 在 5/5 时 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 去除效率最高, 达到约 93%, 2.5/7.5 和 0/10 时的 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 去除率分别高于 7.5/2.5 和 10/0[图 3(a)]. 总体上, 混培养菌对 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 转化的情况介于荧光假单胞菌与铜绿假单胞菌之间. 在不同 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 时, 混培养菌对 S^{2-} 去除率基本相同, 大约 85%, 说明 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 比对 S^{2-} 去除几乎没有影响[图 3(b)].

混培养菌同时获得较高 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 、 S^{2-} 去除的 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 与荧光假单胞菌相似, 为 5.0/5.0.

3 讨论

3.1 化学转化对 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 、 S^{2-} 转化的贡献

一些研究人员对硫化物的化学氧化、生物氧化机制和动力学已进行了广泛的研究^[17], 本试验也研究了纯培养菌和混培养菌试验过程化学转化对整个 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 、 S^{2-} 转化的影响. 本研究将未接种的空白对照试验中 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 、 S^{2-} 转化视为化学转化(图 4). 荧光假单胞菌、铜绿假单胞菌以及混培养菌在不同的 $n(\text{NO}_3^- \text{-N})/n(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 条件下, 化学转化 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 、 S^{2-} 的趋势基本一致, $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 和 S^{2-} 的化学转化率分别约为 7%、15%. 这是因为对照试验的

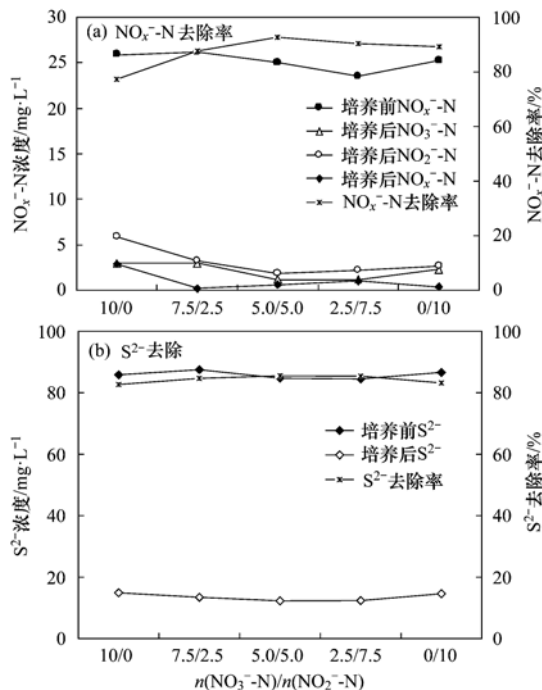
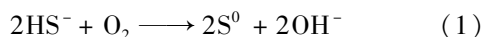


图3 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 比对微生物混培养菌去除氮、 S^{2-} 的影响

Fig. 3 Influence of the ratio of $n(\text{NO}_3^- - \text{N})$ to $n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ on the removal of nitrogen and S^{2-} concentration by mixed cultured microorganism

培养液均为猪场废水厌氧消化液好氧后处理硝化阶段出水,且 $n(\text{S}^{2-})/n(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 一致,均为 5/3. 去除 $n(\text{S}^{2-})/n(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 为 3, S^{2-} 的化学转化率明显高于 $\text{NO}_x^- - \text{N}$, 因为 S^{2-} 除了与 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 反应外,培养液中含有少量的溶解氧,虽然含量低,在 0.5% 以下,但也能与 S^{2-} 反应^[18]:



另外,培养液中含有的 Cu^+ 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 等金属离子^[19]也能与 S^{2-} 发生反应产生硫化物沉淀^[20].

荧光假单胞菌、铜绿假单胞菌以及混培养菌在不同的 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 条件下,对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 总去除效果包含生物转化和化学转化. 在荧光假单胞菌、铜绿假单胞菌培养试验中, $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 化学转化分别占总转化率的 8% ~ 18%; 而混培养菌培养试验中,化学转化占总转化率的 7% ~ 15%. 本研究的结果与其它文献报道的结果相似,生物氧化硫化物过程中,在菌体最佳生长 pH 值范围内,化学氧化占 9% ~ 17%^[21]. 显而易见,生物转化占绝对优势.

3.2 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 同步去除的影响

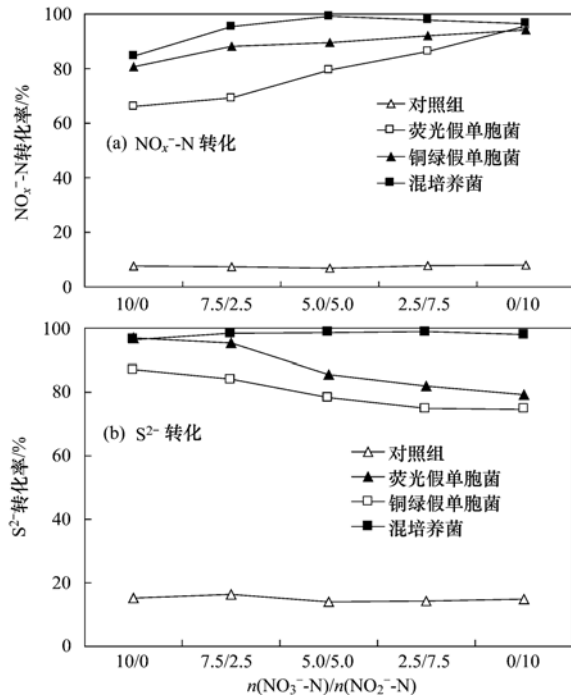
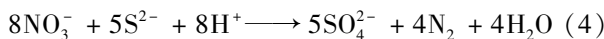
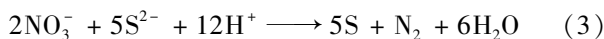


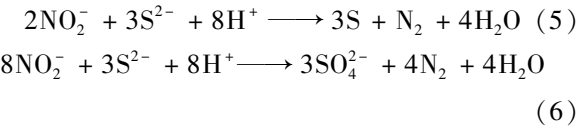
图4 纯培养与混培养试验条件下 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的化学转化与总的转化

Fig. 4 Chemic conversion and total conversion for $\text{NO}_x^- - \text{N}$ and S^{2-} in the experiment of pure culture and mixed culture

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 分别为 10/0 和 0/10 时,荧光假单胞菌对 S^{2-} 、 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除效率相差较大, $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 分别为 7.5/2.5 和 2.5/7.5 时次之,在 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为 5/5 时,对 S^{2-} 、 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除效率最接近,同步性最好(图1). 而铜绿假单胞菌在 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为 10/0 时对 S^{2-} 、 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除效率最为接近,同步去除效果最好,而随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 的降低,对 S^{2-} 、 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除效率差别越大(图2).

随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 依次减少,即 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 比例逐渐增大,荧光假单胞菌、铜绿假单胞菌对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率逐渐增高,而 S^{2-} 去除率却依次减少. 这是因为在相同 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 量和形成同样产物的前提下,每摩尔 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 反应所需的 S^{2-} 比 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 要少 1mol,相反,在相同 S^{2-} 量和形成同样产物的前提下,每摩尔 S^{2-} 与反应所需 NO_2^- 量比 NO_3^- 量要多,因此,随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 依次减少,荧光假单胞菌、铜绿假单胞菌对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除率依次增加. 见式(3) ~ (6)^[22]:

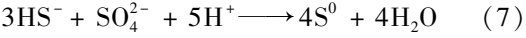




混培养菌在 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为 5/5 时,对 S^{2-} 、 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除效率最接近,都达到 90% 以上,氮硫去除同步性最好. 而在 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 分别为 10/0 和 0/10 时,对 S^{2-} 、 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除效率相差较大(图 3).

混培养菌随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 依次减少,即 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 比例逐渐增大, $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除趋势略有波动,但总体逐渐增高,而 S^{2-} 的去除率相对比较稳定,波动不大. 对 S^{2-} 的去除趋势略有差别,这与混培养菌多样性有关. 据报道,硫化物与硫酸盐之

间会发生歧化反应(厌氧硫氧化),见反应式(7). 1 mol 硫化物与 1 mol 硫酸盐完全反应而转化为单质硫^[23].



在 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 初始浓度和 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 相同的条件下,混培养菌对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的同步去除效果均优于荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌纯培养(图 1~3),在换算成相同微生物接种量前提下,混培养菌对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的转化速率几乎是荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌单菌株的 2 倍(表 1). 可见,在同样条件下,混培养菌对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的同步去除效果明显优于单菌株荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌.

表 1 不同 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 条件下纯培养菌和混培养菌对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的转化速率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$

Table 1 Conversion rate of $\text{NO}_x^- - \text{N}$ and S^{2-} for pure cultures and mixed cultured microorganism at different $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ ratios/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$

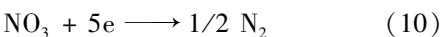
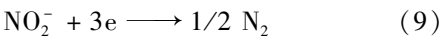
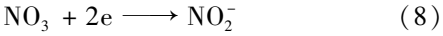
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$	荧光假单胞菌		铜绿假单胞菌		混培养菌	
	$\text{NO}_x^- - \text{N}$	S^{2-}	$\text{NO}_x^- - \text{N}$	S^{2-}	$\text{NO}_x^- - \text{N}$	S^{2-}
10/0	7.03	34.86	9.68	30.68	20.00	70.89
7.5/2.5	7.51	34.52	10.40	29.60	23.00	74.04
5.0/5.0	8.81	29.82	10.48	26.80	23.17	72.40
2.5/7.5	9.64	28.53	11.30	25.58	21.27	72.15
0/10	10.55	27.81	11.58	25.81	22.60	72.00

在厌氧条件下,能同步脱除 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的微生物种类较多,常见的有硫杆菌属的脱氮硫杆菌(*Thiobacillus denitrificans*)^[24, 25],施氏假单胞菌、苍白杆菌、芽胞杆菌等^[26~30],包括从废水脱氮与沼气脱硫耦合反应器中分离出 2 株功能菌:荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌^[13]. 这些微生物对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的去除效果以及代谢活性存在一定的差异,这些差异对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的去除同步性及效果往往能形成互补,如荧光假单胞菌能迅速将 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,但 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转为 N_2 却相对缓慢,而铜绿假单胞菌将 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 还原为 N_2 的能力明显比荧光假单胞菌强(图 1、图 2),最后导致荧光假单胞菌纯培养试验中出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积,而铜绿假单胞菌未反应的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主,未出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积. 荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 去除起到很好的协同作用. 同时,废水脱氮与沼气脱硫耦合反应器含有其他未分离出的同步脱氮除硫功能菌.

因此,相对于纯培养菌,混合菌群的转化能力一般都较高,对底物的利用范围也较广^[31],在菌剂实际应用中,人们更倾向于采用混合菌群进行生物强化^[10].

3.3 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对反应产物的影响

$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 一样,也可以作为电子受体,氧化硫离子和硫单质. 但每摩尔 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最多只能接受 3 个电子,每摩尔 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 最多能接受 5 个电子[式(8)~(10)],可以氧化更多的硫离子或硫单质. 同理,硫离子作为电子供体,还原 $\text{NO}_x^- - \text{N}$,每摩尔硫离子释放 2 个电子转化为单质硫,每摩尔单质硫释放 6 个电子被氧化为硫酸盐[式(11)~(12)].



$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的比例不同,会导致硫离子主要的氧化产物不同(图 5、图 6).

随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 减少,荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌培养液中硫酸盐的增加量由初始较大逐渐减少, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 比例越大,硫酸盐几乎没有增加,与培养前硫酸盐浓度较为接近(图 5).

同样,混培养菌培养液中,随着 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 所占比例的增大,生成 SO_4^{2-} 的量逐渐减小,甚至在

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为 2.5/7.5、0/10 时, SO_4^{2-} 的量反而减少. 这是因为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 能接受的电子量比 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 少, 不能将生成的单质硫转化为 SO_4^{2-} , 同时, 混培养菌培养液中 S^{2-} 与 SO_4^{2-} 发生厌氧硫酸化, 也可导致 SO_4^{2-} 浓度出现降低 (图 5).

如果考虑产物资源化, S^{2-} 理想转化产物应以单质硫为主 (图 6), 尽量减少 SO_4^{2-} 生成, 则荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌最佳 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 分别为 2.5/7.5、7.5/2.5, 而混培养菌最佳比值为 2.5/7.5, 在这种情况下, 几乎没有 SO_4^{2-} 的生成, 而且总 $\text{NO}_x - \text{N}$ 去除率 (含化学转化) 较高, 为 98% 以上, 总 S^{2-} 去除率 (含化学转化) 也高, 大约 99%.

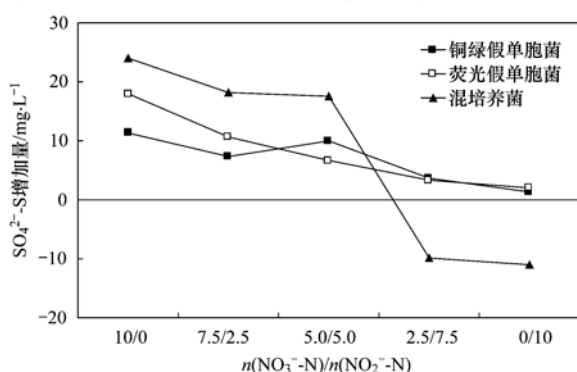


图 5 不同 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 条件下纯培养菌与混培养菌硫酸盐的增加量

Fig. 5 Increase quantity of sulfate at different $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ ratios by pure culture and mixed cultured microorganism

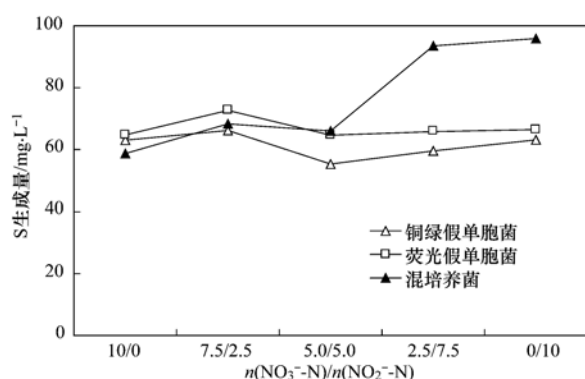


图 6 不同 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 条件下纯培养菌与混培养菌单质 S 的生成量

Fig. 6 Generation quantity of sulfur at different $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ ratios by pure culture and mixed cultured microorganism

4 结论

(1) 随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 减小, 即 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 比例逐渐增大, 荧光假单胞菌、铜绿假单胞菌对 $\text{NO}_x - \text{N}$ 去除率逐渐增高, 而 S^{2-} 去除率却依次

减少.

(2) 混培养菌随着 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 减少, $\text{NO}_x - \text{N}$ 去除效率先增加后趋于平稳, $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 比对混培养菌去除 S^{2-} 几乎没有影响.

(3) 荧光假单胞菌同时获得较高 $\text{NO}_x - \text{N}$ 、 S^{2-} 去除的 $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 比为 5/5, 铜绿假单胞菌为 10/0, 混培养菌为 5.0/5.0.

(4) 混培养菌对 $\text{NO}_x - \text{N}$ 、 S^{2-} 的同步去除效果优于荧光假单胞菌和铜绿假单胞菌.

参考文献:

- [1] 吴剑, 齐鄂荣, 程晓如, 等. 废水生物脱氮技术的研究发展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(1): 76-79.
- [2] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 10-20.
- [3] 邓良伟, 唐一, 吴彦. 生物脱硫机理及其研究进展[J]. 上海环境科学, 1998, 17(5): 35-39.
- [4] Mahmood Q, Zheng P, Cai J, et al. Sources of sulfide in waste streams and current biotechnologies for its removal[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2007, 8(7): 1126-1140.
- [5] Deng L W, Chen H J, Chen Z A, et al. Process of simultaneous hydrogen sulfide removal from biogas and nitrogen removal from swine wastewater[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(23): 5600-5608.
- [6] 陈子爱, 邓良伟, 贺莉. 硫氮比对废水脱氮与沼气脱硫耦联功能菌的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1394-1401.
- [7] 陈子爱, 邓良伟, 陈会娟, 等. 废水脱氮与沼气脱硫耦联菌株的驯化和分离[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 1099-1103.
- [8] 施永生. 亚硝酸型生物脱氮技术[J]. 给水排水, 2000, 26(11): 21-23.
- [9] 张小玲, 彭党聪, 王志盈. 传统与短程反硝化的影响因素及特性研究[J]. 中国给水排水, 2002, 18(9): 1-3.
- [10] Mohan S V, Rao N C, Prasad K K, et al. Bioaugmentation of an anaerobic sequencing batch biofilm reactor (AnSBBR) with immobilized sulphate reducing bacteria (SRB) for the treatment of sulphate bearing chemical wastewater [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(8): 2849-2857.
- [11] Quan X C, Shi H C, Liu H. Removal of 2,4-dichlorophenol in conventional activated sludge system through bioaugmentation [J]. Process Biochemistry, 2004, 39(11): 1701-1707.
- [12] Kennes C, Mendez R, Lema J M. Methanogenic degradation of p-cresol in batch and in continuous UASB reactors [J]. Water Research, 1997, 31(7): 1549-1554.
- [13] 陈子爱. 同步脱氮除硫菌株的筛选、分离和鉴定[J]. 中国沼气, 2008, 26(6): 3-7, 12.
- [14] 陈会娟, 邓良伟, 陈子爱. 猪场废水脱氮与沼气脱硫耦联反应器的启动[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1542-1548.
- [15] 邓良伟, 郑平, 李淑兰, 等. 添加原水改善 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化液性能[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 105-109.

- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版) 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 252-275, 319-335.
- [17] Buisman C N, Wit B, Lettinga G. Biotechnological sulphide removal in three polyurethane carrier reactors: stirred reactor, biorotor reactor and upflow reactor[J]. Water Research, 1990, **24**(2): 245-251.
- [18] 左剑恶, 袁琳, 胡纪翠, 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.
- [19] 李远瞩, 李国学, 刁剑雄, 等. 麦秆黄原酸酯的合成条件优化及其在去除沼液中重金属的应用[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(9): 1848-1853.
- [20] 吴华山, 郭德杰, 马艳, 等. 猪粪沼液贮存过程中养分变化[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(12): 2493-2499.
- [21] 贡俊, 张肇铭. 脱氮硫杆菌氧化硫化氢过程中的生物氧化和化学氧化[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(3): 477-482.
- [22] 王爱杰, 杜大仲, 任南琪. 脱氮硫杆菌同步脱硫反硝化技术的关键因素研究[J]. 地球科学进展, 2004, **19**(6): 533-536.
- [23] Cai J, Zheng P, Mahmooda Q. Effect of sulfide to nitrate ratios on the simultaneous anaerobic sulfide and nitrate removal[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(13): 5520-5527.
- [24] Kleerebezem R, Mendez R. Autotrophic denitrification for combined hydrogen sulfide removal from biogas and post-denitrification[J]. Water Science and Technology, 2002, **45**(10): 349-356.
- [25] Syed M, Soreanu G, Falletta P, et al. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes-A review[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2006, **48**(2): 2. 1-2. 14.
- [26] 李献, 马光庭. 生物脱氮除硫(S^{2-})菌株的分离和特征[J]. 广西农业生物科学, 2006, **25**(1): 52-55, 64.
- [27] 么兰, 郭珺, 管世敏. 一株硫化氢脱臭菌的分离、纯化与鉴定[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2007, **27**(3): 267-269.
- [28] 蔡靖, 郑平, 胡宝兰, 等. 脱氮除硫菌株的分离鉴定和功能确认[J]. 微生物学报, 2007, **47**(6): 1027-1031.
- [29] Mahmood Q, Hu B L, Cai J, et al. Isolation of *Ochrobactrum* sp. QZ2 from sulfide and nitrite treatment system[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **165**(1-3): 558-565.
- [30] Mahmooda Q, Zheng P, Hua B L, et al. Isolation and characterization of *Pseudomonas stutzeri* QZ1 from an anoxic sulfide-oxidizing bioreactor[J]. Anaerobe, 2009, **15**(4): 108-115.
- [31] Buitron G, Gonzalez A. Characterization of the microorganisms from an acclimated activated sludge degrading phenolic compounds[J]. Water Science and Technology, 1996, **34**(5-6): 289-294.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人