

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

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

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫酸脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能

信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元

(成都信息工程学院资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 从环境中筛选出 1 株耐高氨氮、具有产絮、异养硝化-好氧反硝化能力的新菌株 TN-14, 对其进行生理生化特征及分子鉴定、异养硝化-好氧反硝化能力以及产絮性能的考察, 并研究其与耐氨氮能力以及对高氨氮猪场废水的除污性能。根据菌株生理生化特征以及分子鉴定结果, 可初步确定菌株 TN-14 为不动杆菌 *Acinetobacter* sp.。异养硝化反应体系中, 24 h 内菌株 TN-14 对氨氮、总氮的去除率分别达到 97.13% 和 93.53%; 硝酸盐反硝化体系中, 24 h 内硝态氮从 94.24 mg·L⁻¹ 降到 39.32 mg·L⁻¹, 硝态氮的去除率达到 58.28%, 反硝化速率为 2.28 mg·(L·h)⁻¹; 亚硝酸盐反硝化体系中, 亚硝态氮从反应初始浓度 97.78 mg·L⁻¹ 下降到 21.30 mg·L⁻¹, 亚硝态氮去除率达 78.22%, 反硝化速率为 2.55 mg·(L·h)⁻¹。菌株 TN-14 具有良好的产絮特性, 其培养液对 0.4% 的高岭土悬浊液的絮凝率可达 94.74%; 菌株 TN-14 能够在氨氮高达 1200 mg·L⁻¹ 的环境下生长。菌株 TN-14 对实际猪场废水中的 COD、氨氮、总氮和总磷去除率分别达到 85.30%、65.72%、64.86% 和 79.41%, 在实际高氨废水生物处理中具有良好的应用前景。

关键词: 高氨氮; 产絮; 异养硝化-好氧反硝化; 脱氮性能; 猪场废水

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3926-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.040

Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification- Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities

XIN Xin, YAO Li, LU Lei, LENG Lu, ZHOU Ying-qin, GUO Jun-yuan

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A new strain of high ammonia nitrogen tolerant and heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium TN-14 was isolated from the environment. Its physiological and biochemical characteristics and molecular identification, performances of heterotrophic nitrification-aerobic, the abilities of resistance to ammonia nitrogen as well as the decontamination abilities were studied, respectively. It was preliminary identified as *Acinetobacter* sp. according to its physiological and biochemical characteristics and molecular identification results. In heterotrophic nitrification system, the ammonia nitrogen and total nitrogen removal rate of the bacterial strain TN-14 could reach 97.13% and 93.53% within 24 h. In nitrates denitrification system, the nitrate concentration could decline from 94.24 mg·L⁻¹ to 39.32 mg·L⁻¹ within 24 h, where the removal rate was 58.28% and the denitrification rate was 2.28 mg·(L·h)⁻¹; In nitrite denitrification systems, the initial concentration of nitrite could be declined from 97.78 mg·L⁻¹ to 21.30 mg·L⁻¹, with a nitrite nitrogen removal rate of 78.22%, and a denitrification rate of 2.55 mg·(L·h)⁻¹. Meanwhile, strain TN-14 had the capability of flocculant production, and the flocculating rate could reach 94.74% when its fermentation liquid was used to treat 0.4% kaolin suspension. Strain TN-14 could grow at an ammonia nitrogen concentration as high as 1 200 mg·L⁻¹. In the aspect of actual piggery wastewater treatment by strain TN-14, the removal rate of COD, ammonia nitrogen, TN and TP could reach 85.30%, 65.72%, 64.86% and 79.41%, respectively. Strain TN-14 has a good application prospect in biological treatment of real high-ammonia wastewater.

Key words: high ammonia nitrogen; flocculant production; heterotrophic nitrification-aerobic denitrification; denitrification characteristics; swine wastewater

近年来高氨氮废水(氨氮浓度 > 200 mg·L⁻¹) 日益增多,若处理不当排入水体,会导致富营养化等现象日趋严重,造成水体质量恶化。氮素在废水中以分子态氮、有机氮、氨氮、硝态氮以及亚硝态氮等多种形式存在,而氨氮是最主要的存在形式。《国家环境保护“十二五”规划》在继续降低 COD 排放量的基础上,将氨氮加入约束性指标进行总量控制。

如何经济有效去除废水中的氮素已经成为高氨氮废水处理中亟需解决的问题之一。目前,国内外对高氨氮废水的处理方法有物理化学脱氮法和生物脱氮

收稿日期: 2014-03-18; 修订日期: 2014-04-17

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2013GZ0067)

作者简介: 信欣(1976~),女,教授,博士研究生,主要研究方向为污染控制与资源化, E-mail: xx@cuit.edu.cn

法^[1-3]. 污水生物脱氮法与物理化学法相比较,以它经济、高效以及无二次污染等不可比拟的优点已被人们所广泛认可,成为水处理领域研究的主要内容之一. 传统脱氮理论认为废水中的氮素需要经过微生物一系列的硝化作用与反硝化作用来实现的^[4],由于硝化菌和反硝化菌对环境条件的要求不同,使实际污水生物脱氮工艺复杂^[5]. 近年来有学者研究发现某些细菌还可同时具备异养硝化和好氧反硝化的能力^[6]. 这一新发现突破了传统认识,揭示了异养硝化-好氧反硝化菌在自然界氮素循环过程中的重大意义. 异养硝化-好氧反硝化菌可使硝化-反硝化反应在同一个反应器中进行,具有大大减少占地面积和建设资金、高效去除废水中的氨氮、降低成本等优点而受到人们关注. 一些异养硝化-好氧反硝化菌逐步被人们选育出来,并研究其脱氮性能^[7-14]. 对这种异养硝化-好氧反硝化现象展开深入研究,可以对自然界中的氮循环过程的认识上升到一个新的高度,并增强人类对生物脱氮过程的控制能力,为废水生物脱氮处理带来更广阔的应用前景. 然而目前人们对异养硝化-好氧反硝化菌的分离和应用研究工作大多数集中在对其异养硝化和好氧反硝化能力的研究,很少涉及该类菌种耐受高氨氮的性能研究. 而实际一些废水(如养猪废水),其氨氮浓度非常高,处理该类废水的传统生物处理系统中,普通活性污泥往往由于低碳、高氨氮的基质而受到抑制,最终导致处理效果不好. 本研究从自然环境中选育出 1 株新型不动杆菌 *Acinetobacter* sp. TN-14,对其进行脱氮活性、产絮特性以及耐受高氨氮能力的分析,并将该菌株接种到实际高氨氮养猪废水中,探讨其除污性能,将拓宽人们对特殊环境微生物的认识和应用,以期高氨氮有机废水的生物强化技术提供良好的菌源,并提供可靠的实验基础和理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 菌株 TN-14 的富集及分离

取少量富营养化较严重的校园水沟底泥接种于硝化富集培养基中,利用微孔曝气头进行间歇曝气,每天分两个周期进行,每个周期均以新鲜的硝化富集培养基更换其中的培养液. 富集驯化 30 d 后,取少量污泥接种于异养硝化培养基中培养,1~2 d 后再转接于好氧反硝化培养基进行反硝化培养,1~2 d 后取细菌悬液 0.5~1 mL,用灭菌蒸馏水进行梯度

稀释,取 10 μ L 稀释倍数为 $10^3 \sim 10^8$ 倍的细菌悬液分别在 BTB 分离培养基上进行平板涂布,培养 2~5 d 后,挑取使周围培养基出现蓝色晕圈的菌落作为初筛菌;在新鲜的 BTB 分离培养基上进行重复划线以获得纯的单菌株,通过考察菌株的异养硝化和好氧反硝化脱氮能力,最终得到 TN-14 菌株.

1.1.2 培养基

硝化富集培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5, 柠檬酸三钠 4.08, KH_2PO_4 1.0, $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.5, $\text{CaCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.0, pH 7.0~7.5.

异养硝化培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.25~0.5, 琥珀酸钠 2.8~5.6, 50 mL 维氏盐溶液, pH 7.0~7.5. 其中:维氏盐溶液 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): K_2HPO_4 5.0, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05, NaCl 2.5, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.5, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.05; 琼脂 20(固).

反硝化培养基 A(B) ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): KNO_3 0.72 (NaNO_2 0.5), KH_2PO_4 1.0, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.0, 琥珀酸钠 2.8, pH 7.0.

溴百里酚蓝 (BTB) 初筛培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): KNO_3 1.0, L-天冬酰胺 1.0, 用酒精稀释 0.1% 的溴百里酚蓝 (BTB) 5 mL, 柠檬酸三钠 8.5, KH_2PO_4 1.0, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.0, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.2, $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.05, 琼脂 20, pH 7.0~7.5.

1.1.3 实验废水

本实验中,养猪废水采用水泡粪方式的模拟废水. 污水主要污染指标平均浓度 $\rho(\text{COD})$ 为 $4\ 800\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{氨氮})$ 为 $600.20\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{总氮})$ 为 $680.40\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{总磷}) = 30.30\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值在 7.0 左右.

1.2 实验方法

1.2.1 菌株 TN-14 的鉴定

根据菌株 TN-14 的形态、革兰氏染色、菌落等生理生化特征以及 16S rDNA 基因序列初步进行菌种鉴定. 采用扫描电镜观察菌体形态;菌落特征是将菌株稀释涂布在异养硝化固体培养基上培养,待长出单个菌落后进行观察;主要生理生化实验依据《常见细菌系统鉴定手册》进行;16S rDNA 基因序列采用细菌基因组 DNA 提取试剂盒提取,以其为模板进行 PCR 扩增,扩增引物选用一对通用引物(引物由上海生工生物有限公司合成),上游引物为 27f (5'-AGAGTTTGATCATGGCTCAG-3'),下游引物为 1492r (5'-TACGGTTACCTTGTTACGACTT-3'). PCR 反应体系为 50 μ L,加入 1 μ L 模板 DNA (0.1 μ g), 1 μ L P1 和 P2 (终浓度为 $0.5\ \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 1 μ L dNTP

(每种 NTP $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), $12.5 \text{ } \mu\text{L}$ $2 \times \text{Taq PCR Mastermix}$ 和 $34.5 \text{ } \mu\text{L}$ ddH_2O . PCR 扩增程序: 94°C 预变性 5 min , 94°C 变性 30 s , 56°C 退火 30 s , 72°C 延伸 2 min , 经 30 个循环后 72°C 延伸 10 min , 4°C 终止扩增反应. 用 1.0% 琼脂糖凝胶电泳对 PCR 扩增产物进行检测. 将 TN-14 的 16S rDNA 的扩增产物进行序列测序. 采用 BLAST, 将获得的 16S rDNA 片段序列.

1.2.2 菌株 TN-14 的异养硝化能力

挑取 TN-14 单菌落于 100 mL 富集培养基中过夜培养为种子培养液, 取其种子培养液按照体积比 2% 的比例接种到异养硝化培养基内, 30°C , $190 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下培养 2 d , 间隔 6 h 检测培养液中菌体生长 D_{600} 、氨氮、硝态氮、亚硝态氮和总氮浓度变化.

1.2.3 菌株 TN-14 的好氧反硝化能力

将 TN-14 种子培养液按照体积比 2% 的比例接种到以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的反硝化培养基中, $190 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下培养 48 h , 间隔 6 h 后检测培养液中菌体生长量 D_{600} 以及硝态氮、亚硝态氮和总氮的浓度变化.

1.2.4 菌株 TN-14 的产絮性能

取 TN-14 种子培养液按照体积比 2% 的比例接种到发酵培养基^[15], $190 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下振荡培养, 每隔 6 h 取其上清液按照体积比为 $(0.5 \sim 1): 100$ 投加到 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的高岭土悬浊液中, 1% CaCl_2 溶液做助凝剂, pH 值为 7.0 , 快速 $220 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 1 min ; 慢速 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 30 s 进行搅拌, 静置 10 min 后, 吸取上清液以蒸馏水作空白于 721 型分光光度计在 550 nm 处测定其吸光度. 絮凝率计算公式为:

$$\text{絮凝率} = \frac{A - B}{A} \times 100\%$$

式中, A 为对照样上清液在 550 nm 处的吸光度; B 为絮凝后上清液在 550 nm 处的吸光度.

1.2.5 菌株 TN-14 的耐高氨氮能力

将菌株 TN-14 种子培养液按照体积比 2% 的比例接种到不同氨氮浓度的异养硝化培养基内, 30°C , $190 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下振荡培养 60 h , 定期监测培养液中菌体生长量 D_{600} .

1.2.6 菌株 TN-14 处理实际高氨氮猪场废水

将菌株 TN-14 种子培养液按照体积比 5% 的比例接种到猪场废水中, 30°C , $190 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下培养 2 d . 测定处理前后污水 COD、氨氮、总氮以及总磷浓度变化.

1.3 分析方法

水体中氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总氮、总磷指标均采用文献[16]的标准方法测定.

2 结果与分析

2.1 菌株 TN-14 的形态、生理生化及分子生物学鉴定

通过富集分离, 从环境中筛选出 1 株具有异养硝化、好氧反硝化、产絮且耐高氨氮的菌株 TN-14. 个体成杆状, 大小 $0.8 \text{ } \mu\text{m} \times 1.2 \text{ } \mu\text{m}$ (图 1), 菌落为黄白色, 圆形, 稍凸起, 表面湿润、光滑, 不透明 (见图 2). 主要生化特征见表 1. 将菌株 TN-14 的 16S rDNA 基因序列与国际 GenBank 数据库中的序列进行网上同源性比较发现, 细菌 TN-14 与不动杆菌属 (*Acinetobacter* sp.) 多个菌株的同源性高达 98% 以上. 综合菌株的生理生化以及分子鉴定结果, 可确

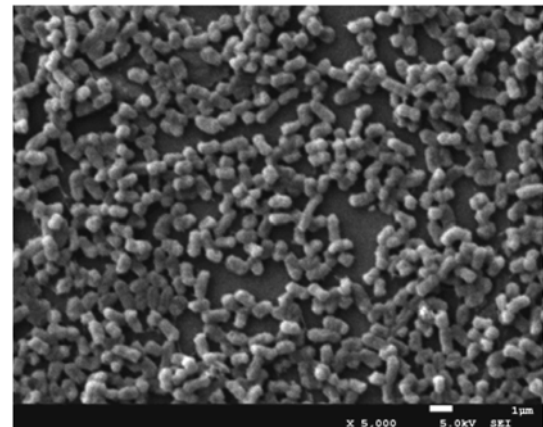


图 1 TN-14 菌株扫描电镜照片 ($\times 5000$)

Fig. 1 Scanning electronic microscope photograph of strain TN-14

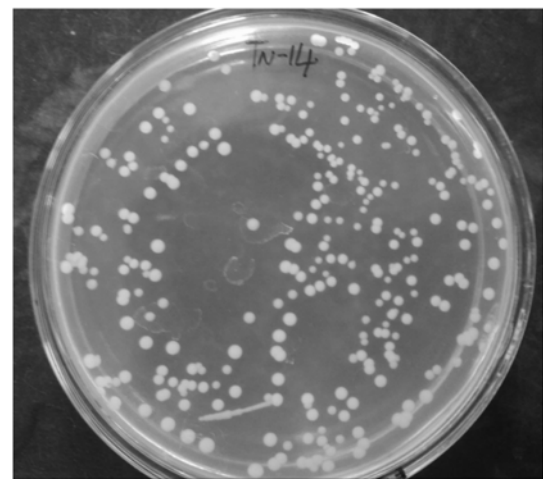


图 2 TN-14 菌株菌落

Fig. 2 Bacterial colony of strain TN-14

定细菌 TN-14 为不动杆菌(*Acinetobacter* sp.), 查阅资料,尚缺乏不动杆菌属有关实际高氨氮废水脱氮除碳性能以及耐受高氨氮并产絮的具体报道. 不动杆菌 *Acinetobacter* sp. TN-14 为新菌株,已于 2013 年 6 月 5 日保藏于中国典型培养物保藏中心(CCTCC),典藏号:CCTCC NO. M2013247. 本研究获得的菌株 TN-14,具有较好耐高氨氮、产絮、脱氮性能,在实际高氨氮养猪废水中具有高效脱氮除碳的功能. 这就拓宽了人们对不动杆菌 *Acinetobacter* sp. TN-14 在其功能方面的应用研究思路,并为高氨氮废水高效生物脱氮提供了有用的菌源和技术,具有较强的实际应用价值.

表 1 菌株 TN-14 的主要生化特征¹⁾

Table 1 Biochemical characteristics of strain TN-14

实验项目	结果	实验项目	结果
硝酸盐还原	+	半乳糖产酸产气	+ / +
亚硝酸盐还原	+	葡萄糖产酸产气	+ / +
葡萄糖氧化利用	+	蔗糖产酸产气	+ / +
柠檬酸盐利用	+	乳糖产酸产气	+ / -
阿拉伯糖产酸产气	- / -	果糖产酸产气	+ / +

1) “+”表示反应显示为阳性,“-”表示反应显示为阴性

2.2 菌株 TN-14 的异养硝化能力

异养硝化培养基体系中,菌株 TN-14 菌体生长 D_{600} 、氨氮、硝态氮、亚硝态氮和总氮浓度变化见图 3.

菌株 TN-14 在 20 h 之内,增长最快,之后基本长时间处于稳定期,随着菌体的增值过程,反应体系中氨氮和总氮的浓度从反应前的 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别降至 $2.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,24 h 内,菌株对氨氮、总氮的去除率分别达到 97.13% 和 93.53%. 一般自养硝化细菌好氧条件下,会把水体中的氨氮氧化为亚硝酸盐氮和硝酸盐,只具备硝化能力,并没

有明显去除水体中的总氮,而本实验中,菌株 TN-14 在整个生长过程中,反应体系产生的硝酸盐和亚硝酸盐含量极少,最高积累量分别为 $2.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明该菌株 TN-14 具备高效的异养硝化能力和脱氮能力.

2.3 菌株 TN-14 的好氧反硝化能力

好氧反硝化培养体系中,菌株 TN-14 菌体生长 D_{600} 、氨氮、硝态氮、亚硝态氮以及总氮浓度变化见图 4 和 5. 菌株在氮源为硝酸盐反硝化培养基中培养时(初始硝态氮浓度为 $94.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),36 h 时菌体生长 D_{600} 达到最大,其生长速率低于氮源为硫酸铵的硝化培养基,而反应体系中硝态氮浓度在 24 h 内,降到 $39.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,菌株对硝态氮的去除率达到 58.28%,反硝化速率为 $2.28\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 在进行反硝化过程中,基本无亚硝态氮积累,其含量极低,在 $0.98\sim 1.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 变化. 在氮源为亚硝酸盐反硝化培养基中培养时(初始亚硝态氮浓度为 $97.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),30 h 时菌体生长 D_{600} 达到最大,其生长速率低于氮源为硫酸铵的硝化培养基,但略高于氮源为硝酸盐的反硝化培养基. 并且,在整个培养时间内,反应体系中亚硝态氮随着菌体的增值而持续下降,从反应初始浓度 $97.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $21.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率达 78.22%,反硝化速率为 $2.55\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 实验中还发现,30 h 之内,伴随着生物的生长,反应体系中的硝态氮略有增加,30 h 为 $14.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在菌株的稳定期时,其含量又下降,降到 $4.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 综上,菌株能将亚硝酸盐氮以及硝化过程产生的硝酸盐氮通过反硝化作用转化为气态产物,具有良好的好氧反硝化能力.

2.4 菌株 TN-14 的产絮性能

在研究 TN-14 的脱氮能力实验时,发现其生长

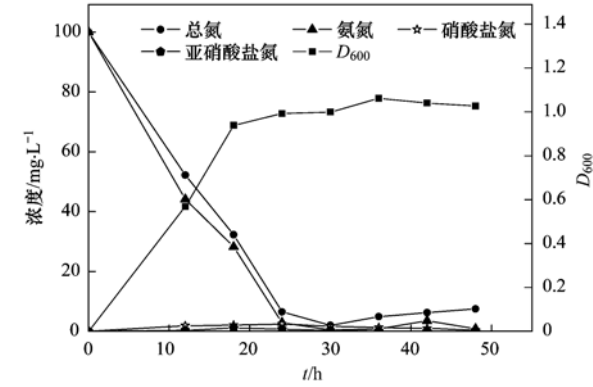


图 3 异养硝化培养基中各指标的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of each indicator in the heterotrophic nitrification medium

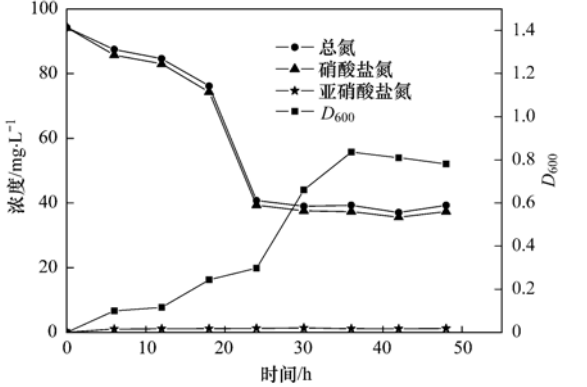


图 4 硝酸盐反硝化培养基中各指标的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of each indicator in the nitrate denitrification medium

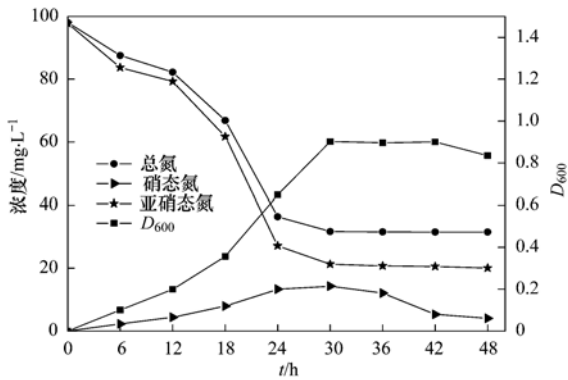


图5 亚硝酸盐反硝化培养基中各指标的动态变化
Fig. 5 Dynamic changes of each indicator in the nitrite denitrification medium

的培养基菌悬液具有一定的絮凝效果. 对 TN-14 在不同的生长阶段的絮凝效果进行了测定,其结果见图 6. 从中可知,TN-14 的絮凝效率随培养时间而增大,在 18 h 时趋于平衡,絮凝率为 90.7%,此后絮凝效率稳定,在培养结束时达到了 94.74%. 目前,关于异养硝化-好氧反硝化菌的脱氮性能的报道很多,但是,对该类菌群产絮性能的研究鲜见报道. 于申等^[17]曾报道过关于 1 株好氧反硝化假单胞菌属 *Pseudomonas* sp. Y1 在脱氮的同时,具有良好的产絮特性. 蔡亚君等^[18]分离出 1 株多功能水处理菌 CDN1,具有较强的反硝化活性,对硝态氮的降解率最高可达 94.01%,但对高岭土的絮凝活性最高为 79.82%. 本研究证明不动杆菌属 *Acinetobacter* sp. TN-14 具有相似的脱氮产絮功能,具有很好的工程应用前景.

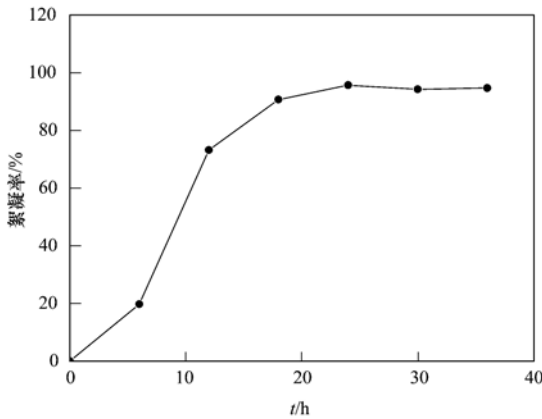


图6 絮凝性能
Fig. 6 Flocculating performances

2.5 菌株 TN-14 的耐高氨氮性能及处理实际高氨氮猪场废水

菌株 TN-14 在不同氨氮浓度的硝化培养基中

生长曲线及处理猪场废水的效果分别见图 7 和图 8. 从图 7 可见,当反应体系中氨氮浓度从 250 ~ 1 200 mg·L⁻¹时,菌株 TN-14 都能良好的生长,并且当氨氮浓度大于 400 mg·L⁻¹时,其生长 D₆₀₀值更大,说明该菌株生长喜欢高氨氮的环境,具有很好的耐受高氨氮的能力. 而传统生物脱氮好氧工艺的硝化过程由两种不同的细菌即氨氧化细菌和亚硝酸氧化菌联合完成. 根据文献[19]报道:氨氮在水中存在形式包括铵根离子和游离态氨氮,当 pH = 7 时,常温下游离氨约占氨氮的 1%,游离氨普遍对两种硝化菌产生抑制作用. 本实验菌株 TN-14 却能够在氨氮高达1 200 mg·L⁻¹的环境下生长,根据游离氨的计算公式^[16]可知,游离态氨氮浓度已经超过对普通两种硝化菌的抑制浓度,表明菌株 TN-14 具有很好的耐受高氨氮的能力,是处理高氨氮有机废水的良好工程菌剂. 为了进一步推进菌株 TN-14 在实际高氨氮废水中的应用,将按照接种体积比为 5% 接种

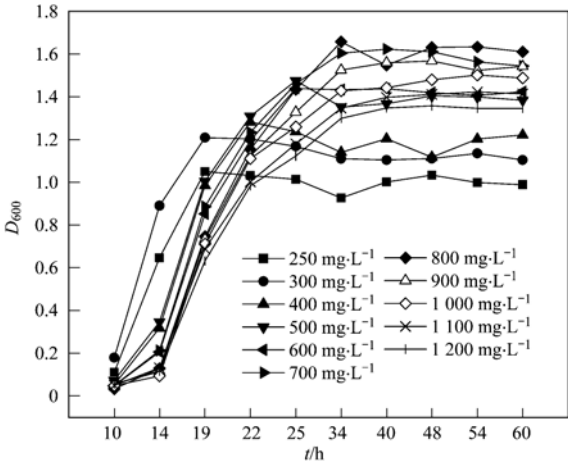


图7 耐受高氨氮的能力
Fig. 7 Tolerance to high ammonia nitrogen

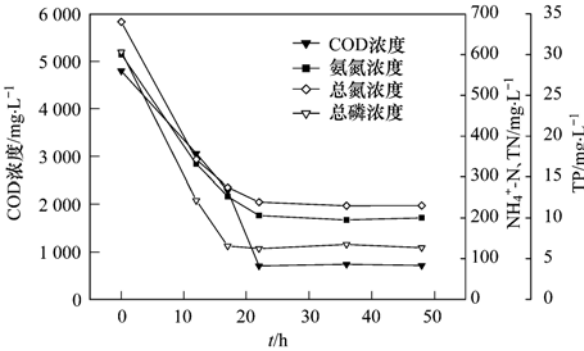


图8 菌株 TN-14 对养猪废水的除污性能
Fig. 8 Decontamination performances of strain TN-14 in treatment for swine wastewater

到猪场废水中, 30℃, 190 r·min⁻¹下培养 2 d, 其废水 COD、氨氮、总氮以及总磷浓度变化如图 8。在菌株培养 22 h 之内, 废水中 COD、氨氮、总氮和总磷去除速率最快, 废水 COD、氨氮、总氮和总磷的浓度由初始的 4 800、600.20、680.40 和 30.30 mg·L⁻¹ 分别降到 705.60、205.77、239.08 和 6.24 mg·L⁻¹, 菌株对废水 COD、氨氮、总氮和总磷去除率分别达到 85.30%、65.72%、64.86% 和 79.41%。

3 讨论

3.1 *Acinetobacter* sp. TN-14 高效脱氮及产絮特性

目前, 人们对不动杆菌 *Acinetobacter* sp. 的异养硝化-好氧反硝化能力的研究并不多, 且筛选出的异养硝化菌在异养硝化系统有的呈现较慢的生长速度、脱氮效率不高或亚硝酸盐积累的情况。如金敏等^[20]通过异养硝化培养基获得 1 株高效脱氮细菌 *Acinetobacter* sp. YY-5, 该菌株能在 3 d 内将氨氮由 95.23 mg·L⁻¹ 降解至 1.29 mg·L⁻¹, 降解率达到 98.6%, 同时未发现亚硝酸盐氮和硝酸盐氮积累; 但是不能发生好氧反硝化。辛玉峰等^[21]筛选的不动杆菌 *Acinetobacter* sp. YF14, 研究其在以琥珀酸钠为唯一碳源, 以硫酸铵为氮源的异养硝化培养基中生长时, 经过 3 d 的培养, 氨氮和总氮浓度持续下降, 3 d 后降解率可达到 92% 和 91%。刘芳芳等^[22]报道的 *Alcaligenes* sp. L116 经 48 h 氨氮和总氮降解率分别达 61.29% 和 43.37%。王弘宇等^[23]分离 *Alcaligenes faecali* ZW5 经 60 h 培养氨氮去除率达 48.52%。刘健楠等^[24]报道的异养硝化菌在硝化和反硝化过程中都有较高的硝酸盐和亚硝酸盐积累。而菌株 TN-14 是 1 株生长速度快、脱氮效率高的异养硝化-好氧反硝化菌, 异养硝化体系内培养 24 h, 对反应体系氨氮、总氮的去除率分别达到 97.13% 和 93.53%, 说明该菌株具有生长速度快, 脱氮效率高等优点; 并且在硝态氮反硝化体系, 菌株对硝态氮去除率分别达到 58.28%; 亚硝态氮反应体系中, 菌株对亚硝态氮去除率达 78.22%, 具有良好的好氧反硝化能力。菌株 *Acinetobacter* sp. TN-14 除了具有高效同步硝化-反硝化能力, 还具有良好的产絮特性。对 0.4% 高岭土悬浊液的絮凝率可达 94.74%, 这就进一步扩展了人们对不动杆菌属在环境科学与工程领域中新的用途的认识。

3.2 耐高氨氮性能

目前筛出的许多异养硝化菌耐受氨氮浓度不够

高^[25]。为了进一步推进异养硝化-好氧反硝化菌剂在高浓度氨氮废水生物处理中的应用, 一些学者开始注重耐高氨氮能力的异养硝化菌的选育。如司文攻等^[26]用筛选出的配伍菌群(N4 + N5 + N6)处理氨氮为 450 mg·L⁻¹的合成废水, 52 h 时氨氮浓度已由起始的 446.90 mg·L⁻¹ 降至 0.61 mg·L⁻¹, 总氮的去除比氨氮稍滞后, 总体上随着氨氮的去除而减少, 最终去除率为 66.5%, 表现出很好的耐受高氨氮能力及去除氨氮的性能。比较而言, 前者是配伍菌群(N4 + N5 + N6), 废水中氨氮浓度最高只报道了 450 mg·L⁻¹, 前 10 h 氨氮降解较缓慢, 10 h 后氨氮浓度开始快速下降; 而本实验中筛选的菌株 TN-14 耐受氨氮浓度更高, 当氨氮浓度为 1 200 mg·L⁻¹ 时仍然表现出很好的生长能力。吴建江等^[27]从垃圾渗滤液活性污泥中筛选出 1 株异养硝化菌 *Pseudomonas* sp. XS76, 能够在起始氨氮浓度约为 420 mg·L⁻¹ 的环境下存活, 并且废水 C/N (COD/NH₄⁺-N) 比对菌株 XS76 的氨氮去除特性影响比较显著, C/N 比越低, 菌株的氨氮去除效果越不好, 当废水 C/N 比低于 10:1 以下, XS76 的去除氨氮能力明显下降。而一些高浓度实际废水 C/N 比较低, 这样就会影响其去除氨氮的能力或增加污水补充碳源处理成本。并且模拟废水和实际废水有很大差异, 本实验中选育的菌株 TN-14 除了能耐受高氨氮的能力外, 当以实际猪场废水(C/N 约 8:1)为培养基质时, 菌株 TN-14 对实际高氨氮猪场废水的脱氮除碳表现出很好的降解速率, 22 h 之内, 能把猪场废水中的 COD、总氮、氨氮、总磷大部分去除。表明 TN-14 能在实际的高氨废水生物处理中具有良好的应用前景。

4 结论

(1) 从环境中筛选出 1 株新型环境工程菌 TN-14, 综合菌株的生理生化以及分子鉴定结果为不动杆菌 *Acinetobacter* sp. .

(2) 菌株 TN-14 具备高效的异养硝化能力和产絮能力。异养硝化反应体系内, 24 h 内菌株对氨氮、总氮的去除率分别达到 97.13% 和 93.53%; 并具有良好的产絮特性, 其培养液对 0.4% 的高岭土悬浊液的絮凝率可达 94.74%。

(3) 菌株 TN-14 具有良好的好氧反硝化能力。氮源为硝酸态氮反硝化培养基中培养, 反应体系中硝态氮浓度在 24 h 内, 从 94.24 mg·L⁻¹ 降到 39.32 mg·L⁻¹, 硝态氮的去除率达到 58.28%, 反硝化速率

为 $2.28 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$; 在氮源为亚硝态氮盐反硝化培养基中培养 24 h, 反应体系中亚硝态氮从反应初始浓度 $97.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $21.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝态氮去除率达 78.22%, 反硝化速率为 $2.55 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$.

(4) 菌株 TN-14 具有良好的耐氨氮和除污能力. 菌株 TN-14 能够在氨氮高达 $1200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的环境下生长; 22 h 之内能把实际猪场废水中的 COD、总氮、氨氮、总磷大部分去除, 在实际高氨废水生物处理中具有良好的应用前景.

参考文献:

- [1] 黄军, 邵永康. 高效吹脱法 + 折点氯化法处理高氨氮废水[J]. 水处理技术, 2013, **39**(8): 131-133.
- [2] 孟祥至, 孟昭福, 赵君楠, 等. 进水氨氮浓度对 SBR 法处理猪场废水的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(8): 1656-1663.
- [3] 王元月, 魏源送, 张树军. 厌氧氨氧化技术处理高浓度氨氮工业废水的可行性分析[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2359-2368.
- [4] Shin H S, Lim K H, Park H S. Effect of shear stress on granulation in oxygen aerobic upflow sludge bed reactors [J]. Water Science and Technology, 1992, **26**(3/4): 601-605.
- [5] 宋宇杰, 李屹, 刘玉香, 等. 碳源和氮源对异养硝化好氧反硝化菌株 Y1 脱氮性能的影响[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2491-2497.
- [6] Bernet N, Bizeau C, Moletta R, et al. Study of physicochemical factors controlling nitrite build up during heterotrophic denitrification [J]. Environmental Technology, 1995, **16**: 165-179.
- [7] 陈咄圳, 王立刚, 王迎春, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌的筛选及脱氮性能的实验研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3614-3618.
- [8] 周迎芹, 信欣, 姚力, 等. 一株高效异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及脱氮性能[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(10): 4127-4132.
- [9] 尹明锐, 汪苹, 廖小红. 硝化-好氧反硝化菌 WXZ-8 的脱氮产物 N_2O 和 N_2 研究[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(8): 16-23.
- [10] 张培玉, 曲洋, 于德爽, 等. 菌株 qy37 的异养硝化/好氧反硝化机制比较及氨氮加速降解特性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1819-1826.
- [11] 曲洋, 张培玉, 于德爽, 等. 异养硝化/好氧反硝化菌生物强化含海水污水的 SBR 短程硝化系统初探[J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2376-2384.
- [12] Chen Q, Ni J R. Heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by novel isolated bacteria[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2011, **38**(9): 1305-1310.
- [13] 陈茂霞, 王欢, 周后, 等. 珍异养硝化-好氧反硝化菌 HN-02 的筛选及其特性[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19**(4): 688-693.
- [14] 袁梦冬, 辛玉峰. 1 株异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及脱氮活性[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2012, **13**(3): 339-343.
- [15] 裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 等. 养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1951-1957.
- [16] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 105-218.
- [17] 于申, 马放, 李淑芹, 等. 一株好氧反硝化菌的产絮特性研究[J]. 给水排水, 2008, **34**(11): 172-175.
- [18] 蔡亚君, 桂震, 李锋, 等. 多功能水处理菌 *Pseudomonas stutzeri* CDN1 的筛选分离与性质鉴定[J]. 湖北农业科学, 2011, **50**(5): 908-910.
- [19] 张亮, 张树军, 彭永臻. 污水处理中游离氨对硝化作用抑制影响研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, **44**(2): 75-79.
- [20] 金敏, 王景峰, 孔庆鑫, 等. 好氧异养硝化菌 *Acinetobacter* sp. YY-5 的分离鉴定及脱氮机理[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15**(5): 692-697.
- [21] 辛玉峰, 曲晓华, 袁梦冬, 等. 一株异养硝化-反硝化不动杆菌的分离鉴定及脱氮活性[J]. 微生物学, 2011, **51**(12): 1646-1654.
- [22] 刘芳芳, 周德平, 吴淑杭, 等. 养殖废水中异养硝化细菌的分离筛选和鉴定[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(11): 2232-2237.
- [23] 王弘宇, 马放, 杨开, 等. 异养硝化细菌的氨氮去除特性[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(1): 47-52.
- [24] 刘健楠, 汪苹, 尹明锐, 等. 高效异养硝化-好氧反硝化菌株的分离鉴定与脱氮性能[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2010, **28**(2): 18-29.
- [25] 刘志培, 刘双江. 硝化作用微生物的分子生物学研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2004, **10**(4): 521-525.
- [26] 司文攻, 吕志刚, 许超. 耐受高浓度氨氮异养硝化菌的筛选及其脱氮条件优化[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3448-3454.
- [27] 吴建江, 王兆阳, 许培雅. 一株高效异养硝化菌的分离、鉴定及其氨氮去除特性[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(7): 1309-1315.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 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