

环境科学

(HUANJING KEXUE)

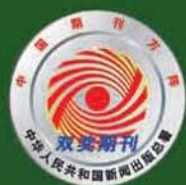
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015 年北京市两次红色预警期间 PM _{2.5} 浓度特征	
..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)	
北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 PM _{2.5} 变化特征对气象因素的响应	张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)
兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析	李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)
南京北郊冬季 PM _{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析	张亚飞, 马嫣, 仝鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)
海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响	孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 李秀镇 (2443)
新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价	杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)
重庆地区大气场降水氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系	温艳茹, 王建力 (2462)
湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析	
..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)	
河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例	
..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)	
亚热带典型岩溶流水气界面 CO ₂ 交换通量变化过程及其环境影响	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)	
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 荧光光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)	
华东地区某水源水中 13 种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价	
..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)	
北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平	张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)
输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险	昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)
卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征	何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)
岩溶地下水水中多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)
哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性	孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)
降水对泃河水质和水体微生物的影响	卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)
不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应	王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)
布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究	景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邵义萍, 樊静静 (2577)
化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响	蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)
活性炭负载 Co ₃ O ₄ 活化过一硫酸盐降解金橙 G	王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)
碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙 G 过程及动力学	张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)
碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素	邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)
铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中 AOX、色度和 TOC 的去除效果研究	
..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)	
Fenton 氧化去除制药企业活性污泥中 AOX 的效果研究	陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)
中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估	刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)
基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究	鲍林林, 陈婉秋 (2639)
异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究	李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)
基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析	
..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)	
NUA-DAS 生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究	汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)
葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合	程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)
拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性	颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)
海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX ₂ 的筛选及脱氮特性	成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)
焦化废水活性污泥中降解硫化物细菌种群多样性分析	徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)
浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应	戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)
磷脂脂肪酸 (PLFA) 法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构	左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)
半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应	赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)
三峡库区消落带 N ₂ O 排放及其影响因素	李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)
不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N ₂ O 排放研究	高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)
冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征	易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀兰, 木志坚 (2738)
藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析	罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)
基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析	宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)
水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响	丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)
减磷施肥有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)
水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律	
..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)	
组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较	
..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)	
生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制	商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)
热处理天然褐铁矿制备 γ-Fe ₂ O ₃ 及其 NH ₃ -SCR 活性探究	徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)
《环境科学》征订启事 (2569) 《环境科学》征稿简则 (2576) 信息 (2744, 2769, 2790)	

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX₂ 的筛选及脱氮特性

成钰^{1,2}, 李秋芬^{2*}, 费聿涛^{1,2}, 张艳²

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 青岛 266071)

摘要: 从分离自刺参养殖环境的 7 株候选菌株中筛选出 1 株具有较强异养硝化和好氧反硝化能力的菌株 SLWX₂, 通过形态学特征、生理生化特性和 16S rDNA 基因测序分析鉴定其为花津滩芽孢杆菌 (*Bacillus hwajinpoensis*)。该菌株脱氮特性研究结果表明, SLWX₂ 24 h 对氨氮、亚硝酸氮和硝酸氮的去除率分别达到 100%、99.5% 和 85.6%; 当 3 种无机氮源同时存在时, 菌株优先利用氨氮, 再利用 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N, 72 h 3 种无机氮的质量浓度均降至 0.013 mg·L⁻¹ 以下, 表明该菌株能同时进行异养硝化和好氧反硝化完成脱氮; 在氨氮负荷 500 mg·L⁻¹、亚硝酸氮负荷 100 mg·L⁻¹ 和硝酸氮负荷 200 mg·L⁻¹ 范围内, 该菌的脱氮能力不受明显抑制, 对 3 种形态的氮均有良好去除效果, 96 h 最多可去除 180 mg NH₄⁺-N、30 mg NO₂⁻-N 和 120 mg NO₃⁻-N, 并且在硝化过程中没有亚硝酸氮积累。该菌株在海水养殖和高盐高氮工业废水的脱氮处理方面具有更大潜力。

关键词: 异养硝化; 好氧反硝化; 生物脱氮; 氮负荷; 去除率

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2681-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.07.035

Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX₂ from Sea Water

CHENG Yu^{1,2}, LI Qiu-fen^{2*}, FEI Yu-tao^{1,2}, ZHANG Yan²

(1. College of Fisheries and life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: In this study, an efficient heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacteria strain SLWX₂ was screened from 7 strains isolated from *Stichopus japonicus* culture ponds, with removal rates of NH₄⁺-N, NO₂⁻-N and NO₃⁻-N up to 100%, 99.5% and 85.6% within 24 h, respectively. Through morphologic observation, physiological characteristics and 16S rDNA sequence analysis, strain SLWX₂ was identified as *Bacillus hwajinpoensis*. The results of nitrogen removal characterization experiments indicated that, when NH₄⁺-N, NO₂⁻-N and NO₃⁻-N existed at the same time, SLWX₂ utilized NH₄⁺-N firstly, then utilized NO₂⁻-N and NO₃⁻-N, and removed almost all the inorganic nitrogen within 72 h, suggesting that it could achieve simultaneous nitrification and denitrification itself. The results of nitrogen tolerance examination indicated that strain SLWX₂ showed perfect nitrogen removal ability when the ammonia load was not above 500 mg·L⁻¹, nitrite load was not above 100 mg·L⁻¹ and nitrate load was not above 200 mg·L⁻¹, the maximal removal of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen within 96 h reached 180 mg, 30 mg and 120 mg, respectively. Moreover, there was no NO₂⁻-N accumulation during nitrification. This strain showed great potential in biological nitrogen removal of wastewater with high salt and nitrogen from mariculture and industries.

Key words: heterotrophic nitrification; aerobic denitrification; biological nitrogen removal; nitrogen load; removal rate

氮素污染物的过量排放导致水体富营养化问题日益突出, 因此, 加强废水脱氮研究尤为迫切^[1]。目前, 废水的脱氮处理主要有生物法和物理化学法, 而生物脱氮被认为是去除污水中氮素最经济有效的方式^[2]。近 20 年来, 国内外研究者陆续发现了一些新型的脱氮菌株^[3~5], 这些菌株既可以进行异养硝化, 同时又能进行好氧反硝化, 被称为异养硝化-好氧反硝化细菌。这类细菌能同时去除 C 和 N 的污染, 在硝化前不用去除 COD, 不用为反硝化额外添加 C 源, 硝化反硝化各自产生的酸碱能部分相互中和, 减

少缓冲剂的投加。这些发现和研究突破了人们对传统脱氮理论的认识, 使得氨化、硝化和反硝化同时, 在好氧条件下进行成为可能, 对在污水处理中构建同步脱氮体系具有重要意义, 逐渐成为生物脱氮领域研究的热点^[6~10]。近年来, 国内外对异养硝化-好氧

收稿日期: 2015-11-22; 修订日期: 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170113); 海洋公益性行业科研专项(201305043)

作者简介: 成钰(1991~)女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋环境微生物, E-mail: 15371110886@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liqf@ysfri.ac.cn

反硝化菌的研究尚处于起步阶段,已报道的该类菌株主要有假单胞菌属(*Pseudomonas*)^[11]、盐单胞菌属(*Halomonas*)^[4]、芽孢杆菌属(*Bacillus*)^[12]、不动杆菌属(*Acinetobacter*)^[13]和产碱菌属(*Alcaligenes*)^[14]等,但因大多数菌不耐高盐或高氮,能成功应用于海水养殖废水和高盐高氮工业废水处理中的报道尚不多。为此,本文报道从刺参养殖环境中分离筛选出的同时具备硝化和反硝化功能的菌株 SLWX₂,及针对该菌株做的鉴定和脱氮性能研究工作,以期进一步丰富生物脱氮理论,并为异养硝化-好氧反硝化菌在污水处理工程中的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品来源

试验样品于2014年7月采自山东省青岛市红岛刺参养殖池塘的水体和沉积环境。水样和泥样低温保存,及时带回实验室。

1.2 培养基

分离培养基^[4]: KNO₂ 1 g, (NH₄)₂SO₄ 2 g, MgSO₄·7H₂O 0.1 g, NaH₂PO₄ 0.5 g, K₂HPO₄ 0.5 g, NaCl 30 g, CaCO₃ 1 g, FeSO₄ 0.1 g, 葡萄糖 0.3 g, NH₄Cl 0.5 g, 酵母膏 0.03 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 8.0, 121℃ 高压蒸汽灭菌 20 min。

筛选培养基: KNO₂ 6 mg、KNO₃ 7.14 mg 或 (NH₄)₂SO₄ 4.67 mg, 葡萄糖 0.6 g (孔径 0.22 μm 滤膜过滤灭菌), 陈海水 600 mL (121℃ 灭菌 20 min)。

组合测试培养基: MgSO₄·7H₂O 0.06 g、NaH₂PO₄ 0.12 g、K₂HPO₄ 0.3 g、NaCl 18 g、CaCO₃ 0.6 g、FeSO₄ 0.06 g、蒸馏水 600 mL (121℃ 灭菌 20 min)、KNO₂ 6 mg、KNO₃ 7.14 mg 或 (NH₄)₂SO₄ 4.67 mg 及葡萄糖 0.6 g (孔径 0.22 μm 滤膜过滤灭菌)。

氮负荷耐受测试培养基: MgSO₄·7H₂O 0.06 g、NaH₂PO₄ 0.12 g、K₂HPO₄ 0.3 g、NaCl 18 g、CaCO₃ 0.6 g、FeSO₄ 0.06 g、蒸馏水 600 mL (121℃ 灭菌 20 min) 和最终质量浓度为 1 g·L⁻¹ 的葡萄糖 (孔径 0.22 μm 滤膜过滤灭菌) 为基液。分别添加氮质量浓度为 10~500 mg·L⁻¹ 的系列硫酸铵、亚硝酸钠或硝酸钾。

上述试剂均为分析纯,采购自国药集团。

1.3 菌株的分离与筛选

1.3.1 富集与分离

带回实验室的水样和泥样经充分搅拌后,无菌

条件下取 10 mL 水样和 10 g 泥样,分别接入装有 90 mL 无菌生理盐水中,振荡 10 min。分别吸取 10 mL 上清液接种于液体异养硝化培养基中,28℃、150 r·min⁻¹ 振荡培养 2~3 d。重复接种培养 3 次后,取 10 mL 富集液适当稀释后,取 100 μL 均匀涂布于异养硝化菌培养基平板,置入恒温培养箱,28℃ 培养 2~3 d。挑选不同形态的单菌落进行平板划线分离,重复 2~3 次,直至得到纯的单菌落。再接种于异养硝化菌分离培养基斜面,培养后 4℃ 和 -80℃ 冰箱保存。

1.3.2 菌株筛选

在添加葡萄糖的条件下,将 7 株候选菌接种于添加氮源(亚硝酸钾、硝酸钾或硫酸铵各含氮 1.65 mg·L⁻¹) 的 600 mL 筛选培养基中,接种量控制在 1.8~1.9×10⁶ CFU·mL⁻¹ 范围内,置于 28℃、150 r·min⁻¹ 振荡培养。每隔 24 h 取一次样,测定 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 值。选取对 3 种无机氮去除效果最佳的菌株。

1.4 菌种鉴定

将 -80℃ 冰箱中保存的菌株接到异养硝化培养基上,培养 3 d,再用无菌水从平板洗下,放入灭菌的菌种保存管,委托中国科学院微生物研究所通过形态观察、革兰氏染色、生理生化等试验及 16S rRNA 和 rpoB 基因测序进行菌种鉴定。并将测序结果提交到 NCBI 核酸数据库,用 Blast 进行比对,获得同源序列,通过 MEGA 5.0 软件,以 Neighbor-joining 法构建系统发育树,对其进行系统发育分析。

1.5 多种氮源同时存在时的脱氮特性

在添加葡萄糖的条件下,将菌株 SLWX₂ 接种于同时添加 3 种氮源(亚硝酸钾、硝酸钾和硫酸铵,总含氮 4.95 mg·L⁻¹) 的 600 mL 组合测试培养基中,接种量控制在 1.8×10⁶~1.9×10⁶ CFU·mL⁻¹ 范围内,置于 28℃、150 r·min⁻¹ 振荡培养。每隔 24 h 取一次样,测定 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 值。

1.6 对不同浓度氮负荷的耐受性

分别以硫酸铵、亚硝酸钠、硝酸钾为氮源,配制氮添加量为 10、50、100、200、300、400 和 500 mg·L⁻¹ 的 600 mL 系列测试培养基,每个浓度设 3 个重复。将菌种(菌液浓度控制在 1.8×10⁶~1.9×10⁶ CFU·mL⁻¹) 接种于各系列测试培养基,置于 28℃、150 r·min⁻¹ 振荡培养。每隔 24 h 取一次样,测定 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 值。

1.7 无机氮测定方法

参照《海洋监测规范》(GB 17378.4-2007)^[4],

氨氮的测定采用次溴酸盐氧化法；亚硝酸氮的测定采用盐酸萘乙二胺分光光度法；硝酸氮的测定采用锌-镉还原法。

2 结果与分析

2.1 菌株分离与筛选

经富集、分离和纯化,从刺参养殖池塘水中获得 3 株候选异养硝化细菌,分别编号为 SLWX₁、SLWX₂ 和 SLWX₃,从底泥中分离到 4 株,编号为 SLNX₁、SLNX₂、SLNX₃ 和 SLNX₄。

将 7 株候选菌株在添加葡萄糖、以硫酸铵为氮源的筛选培养基(氮添加量为 1.65 mg·L⁻¹)中连续培养 72 h,如图 1 所示,24 h,SLWX₁、SLWX₂ 和 SLNX₂ 组氨氮基本均降到 0; 其余组连续培养 72 h 后,氨氮变化不大,说明 SLWX₁、SLWX₂ 和 SLNX₂ 对氨氮去除效果较好。

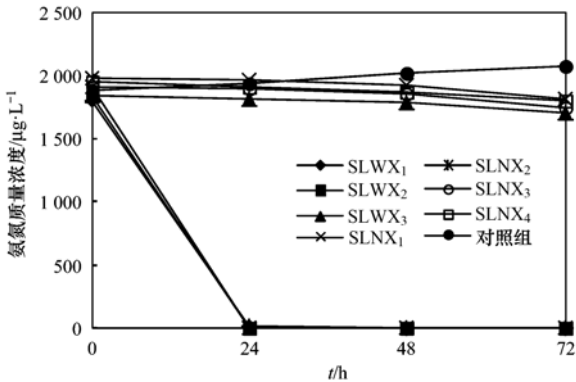


图 1 7 株候选菌对氨氮的去除效果

Fig. 1 NH₄⁺-N removal performance of 7 candidate strains

将 7 株候选菌株分别在添加葡萄糖、以亚硝酸钠为氮源的筛选培养基(氮添加量为 1.65 mg·L⁻¹)中连续培养 72 h,如图 2 所示,24 h,SLWX₂ 组亚硝酸氮去除率已达 99.5%; SLWX₁ 和 SLNX₂ 组 72 h 后亚硝酸氮去除率分别是 16.5% 和 36.1%,明显较 SLWX₂ 差; 其余组亚硝酸氮并未见明显的降低,说明 SLWX₂ 对亚硝酸氮的去除效果最好。

将 7 株候选菌株分别在添加葡萄糖、以硝酸钾为氮源的筛选培养基(氮添加量为 1.65 mg·L⁻¹)中连续培养 72 h,如图 3 所示,24 h,SLWX₂ 组下降最明显,去除率达 85.6%,SLWX₁ 和 SLNX₂ 组 72 h 硝酸氮去除率才分别达 26.7% 和 82.2%; 其余组培养基中硝酸氮没有明显降低,说明 SLWX₂ 对硝酸氮的去除能力最强。

综上,菌株 SLWX₂ 同时具备去除氨氮、亚硝酸氮和硝酸氮这 3 种无机氮的能力,且 24 h 内脱氮效

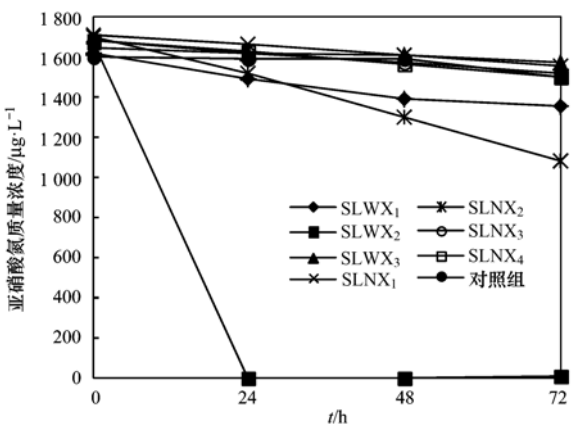


图 2 7 株候选菌对亚硝酸氮的去除效果

Fig. 2 NO₂⁻-N removal performance of 7 candidate strains

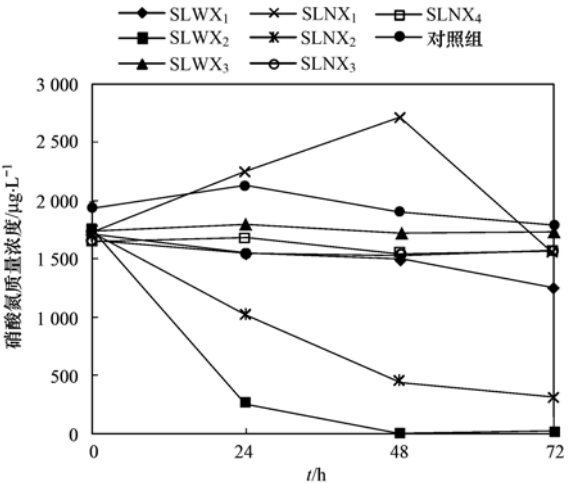


图 3 7 株候选菌对硝酸氮的去除效果

Fig. 3 NO₃⁻-N removal performance of 7 candidate strains

率最高,所以,后期对该菌株的分类地位和脱氮特性做进一步研究。

2.2 菌种鉴定

2.2.1 菌株 SLWX₂ 的形态特征和生理生化特性

菌株在硝化细菌培养基平板上培养后观察其菌落形态呈圆形、边缘不整齐,直径约为 0.5 mm,表面平坦;显微镜下细胞呈杆状,可形成芽孢,芽孢不膨大,不形成伴孢晶体,革兰氏染色呈阳性。生理生化试验结果如表 1 所示,β-半乳糖苷酶、接触酶、淀粉水解、明胶水解、酪素酶水解、VP 试验呈阳性;氧化酶、精氨酸双水解酶、鸟氨酸脱羧酶、赖氨酸脱羧酶、脲酶、甲基红、产 H₂S 试验呈阴性;可利用碳源有乳酸钠、D-果糖-6-磷酸、果胶、L-乳酸、丁酸钠,8% NaCl 中仍能生长,在 pH 5 条件下不能生长。

2.2.2 16S rRNA 基因测序和系统发育分析

对菌株 SLWX₂ 测序,得到长度为 1 460 bp 的

表 1 菌株 SLWX₂ 的生理生化特征

Table 1 Physiological and biochemical characteristics of strain SLWX ₂							
试验项目	结果	试验项目	结果	试验项目	结果	试验项目	结果
细胞形态	杆状	革兰氏染色	+	形成芽孢	+	芽孢膨大	-
伴孢晶体	-	接触酶	+	氧化酶	-	50℃ 生长	-
甲基红反应	-	柠檬酸生长	-	明胶水解	+	酪素水解	+
淀粉水解	+	硝酸盐还原	-	β-半乳糖苷酶	+	精氨酸双水解酶	-
赖氨酸脱羧酶	-	鸟氨酸脱羧酶	-	H ₂ S 产生	-	脲酶	-
吡啶产生	-	VP 反应	+				
BIOLOG GEN III							
阴性对照	-	α-D-葡萄糖	-	明胶	-	p-羟基苯乙酸	-
糊精	-	D-甘露糖	-	甘氨酸-L-脯氨酸	-	丙酮酸甲酯	-
D-麦芽糖	-	D-果糖	-	L-丙氨酸	-	D-乳酸甲酯	-
D-海藻糖	-	D-半乳糖	-	L-精氨酸	-	L-乳酸	+
D-纤维二糖	-	3-甲基-D-葡萄糖	-	L-天冬氨酸	-	柠檬酸	-
龙胆二糖	-	D-岩藻糖	-	L-谷氨酸	-	α-酮戊二酸	-
蔗糖	-	L-岩藻糖	-	L-组氨酸	-	D-苹果酸	-
松二糖	-	L-鼠李糖	-	L-焦谷氨酸	-	L-苹果酸	-
水苏糖	-	肌苷	-	L-丝氨酸	-	溴代丁二酸	-
阳性对照	+	1% 乳酸钠	+	林可霉素	-	茶啶酸	-
pH 6.0	+	夫西地酸	-	盐酸胍	-	氯化锂	+
pH 5.0	-	D-丝氨酸	-	十四烷硫酸钠	-	亚碲酸钾	+
D-棉子糖	-	D-山梨醇	-	果胶	+	吐温 40	-
α-D-乳糖	-	D-甘露醇	-	D-半乳糖醛酸	-	γ-氨基丁酸	-
D-蜜二糖	-	D-阿糖醇	-	L-半乳糖酸内酯	-	α-羟丁酸	-
β-甲基-D-葡萄糖苷	-	肌醇	-	D-葡萄糖酸	-	β-羟基-D,L-丁酸	-
D-水杨苷	-	甘油	-	D-葡萄糖醛酸	-	α-丁酮酸	-
N-乙酰-D-葡萄糖胺	-	D-葡萄糖-6-磷酸	-	葡萄糖醛酰胺	-	乙酰乙酸	-
N-乙酰-β-D-甘露糖胺	-	D-果糖-6-磷酸	+	黏酸	-	丙酸	-
N-乙酰-D-半乳糖胺	-	D-天冬氨酸	-	奎宁酸	-	乙酸	-
N-乙酰神经氨酸	-	D-丝氨酸	-	糖质酸	-	甲酸	-
1% NaCl	+	醋竹桃霉素	-	万古霉素	-	氨曲南	-
4% NaCl	+	利福霉素 SV	-	四唑紫	+	丁酸钠	+
8% NaCl	+	二甲胺四环素	-	四唑蓝	+	溴酸钠	+

16S rRNA 基因序列, GenBank 序列登录号为 KT952330, 经 Blast 比对, 发现该菌株与 *Bacillus hwajinpoensis* 同源性为 99% 以上, 再结合菌株的形态学和生理学特征, 确定分离的菌株 SLWX₂ 为花津滩芽孢杆菌 (*Bacillus hwajinpoensis*). 将该菌株与同源性高的细菌进行系统发育分析, 得到系统进化发育树 (图 4).

2.3 多种氮源同时存在时, 菌株 SLWX₂ 的脱氮特性

菌株 SLWX₂ 在添加葡萄糖, 同时含亚硝酸钾、硝酸钾和硫酸铵的组合测试培养基中连续振荡培养 96 h, 如图 5 所示, 24 h, 氨氮首先有明显的下降, 48 h 之后亚硝酸氮和硝酸氮也持续下降; 说明菌株 SLWX₂ 优先利用氨氮, 再利用亚硝酸氮和硝酸氮. 72 h, 氨氮、亚硝酸氮和硝酸氮去除率分别为 100%、98.3% 和 99.9%, 证明菌株 SLWX₂ 有良好的硝化和反硝化性能, 且此过程中并没有亚硝酸氮

和硝酸氮的积累, 表明该菌株能独立完成异养硝化和好氧反硝化过程, 进行脱氮.

2.4 菌株 SLWX₂ 对不同浓度无机氮的耐受和利用情况

如图 6 所示, 菌株连续培养 96 h, 7 组氨氮负荷测试培养基中 NH₄⁺-N 都呈持续下降趋势; 48 h, 各组氨氮均有大幅度下降, 去除速率达到最大, 分别为 0.21、1.04、1.80、3.98、4.07、4.13、4.09 mg·(L·h)⁻¹, 说明高浓度氨氮对该菌株的脱氮没有明显抑制作用; 72 h, 10、50 和 100 mg·L⁻¹ 组氨氮降解完全, 96 h, 200 ~ 500 mg·L⁻¹ 组氨氮分别降至 5、19、114、197 mg·L⁻¹, 可见, 菌株 SLWX₂ 可耐受 500 mg·L⁻¹ 氨氮, 最多可去除 180 mg 氨氮, 比去除速率为 3.13 mg·(L·h)⁻¹.

同时检测了各培养基中 NO₂⁻-N 的质量浓度, 发现无论是低浓度还是高浓度氨氮负荷, 其去除过程中几乎没有亚硝酸盐的积累 (表 2).

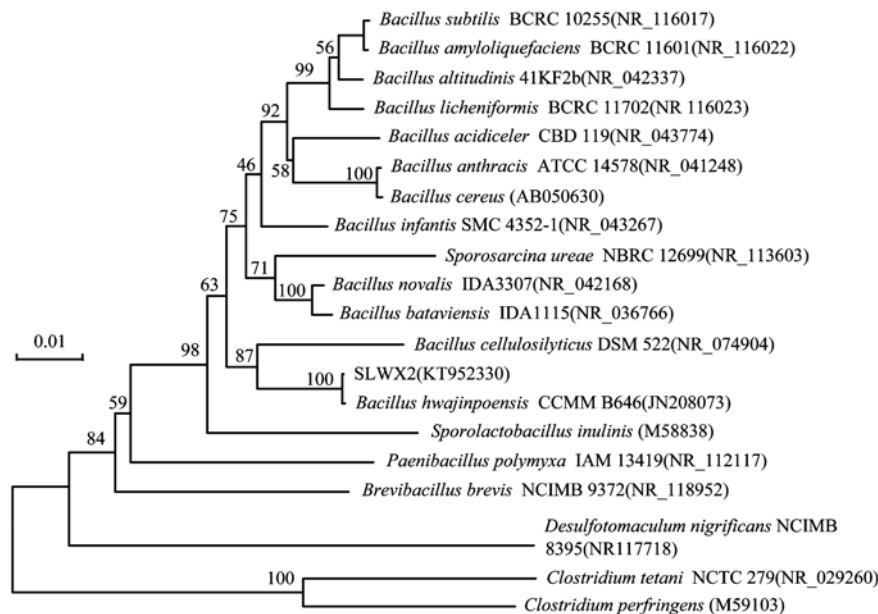


图 4 基于16S rRNA 基因序列同源性构建的菌株 SLWX₂ 的系统发育树

Fig. 4 Phylogenetic tree of strain SLWX₂ based on the sequence homology of 16S rRNA gene

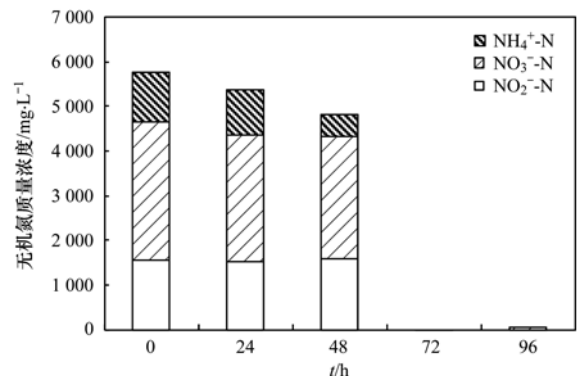


图 5 组合测试培养基中 3 种无机氮含量随时间的变化

Fig. 5 Changes of the concentrations of inorganic nitrogen in the combined test medium with time

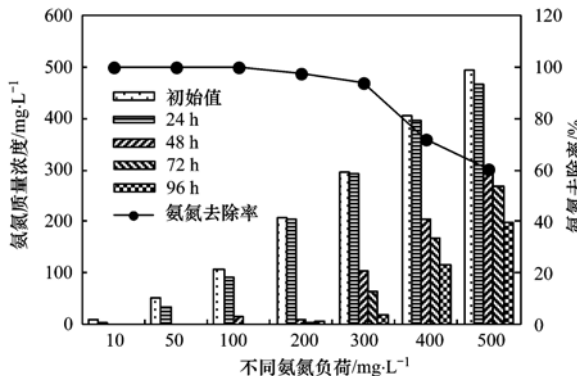


图 6 菌株 SLWX₂ 对不同浓度氨氮的利用

Fig. 6 Utilization of different concentrations of ammonia-nitrogen by strain SLWX₂

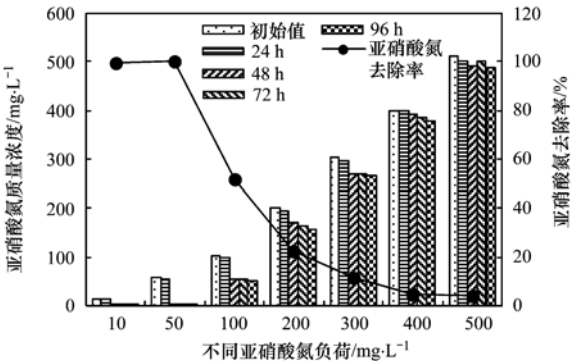


图 7 菌株 SLWX₂ 对不同浓度亚硝酸氮的利用

Fig. 7 Utilization of different concentrations of nitrite-nitrogen by strain SLWX₂

下降,10 mg·L⁻¹和 50 mg·L⁻¹组降至 0.03 mg·L⁻¹以下,去除率达 99% 以上,其余组亚硝酸氮降解不完全,去除速率分别是 0.96、0.66、0.65、0.13 和 0.41 mg·(L·h)⁻¹,之后各组 NO₂⁻-N 降解幅度减小;96 h,100 ~ 500 mg·L⁻¹组氨氮降至 49、155、266、377、490 mg·L⁻¹,可见,菌株 SLWX₂ 可耐受 300 mg·L⁻¹亚硝酸氮,最多可去除 30 mg 亚硝酸氮,比去除速率为 0.52 mg·(L·h)⁻¹.

如图 8 所示,菌株连续培养 96 h,7 组硝酸氮负荷测试培养基中 NO₃⁻-N 都呈持续下降趋势,24 h,10 mg·L⁻¹和 50 mg·L⁻¹组硝酸氮略有下降,去除速率为 0.02 mg·(L·h)⁻¹和 0.31 mg·(L·h)⁻¹,其余组硝酸氮有明显下降,去除速率分别为 0.96、0.31、1.55、2.74、2.62 mg·(L·h)⁻¹,说明该菌在高浓度

从图 7 可以看出,48 h,各组亚硝酸氮均有明显

含硝酸氮的培养基中其脱氮能力不受抑制; 72 h, 10 ~ 200 mg·L⁻¹ 组培养基中硝酸氮基本降解完全, 均在 0.15 mg·L⁻¹ 以下; 96 h 时, 其余组氨氮降至 141、255、330 mg·L⁻¹, 可见, 菌株 SLWX₂ 可耐受 500 mg·L⁻¹ 硝酸氮, 最多可去除 120 mg 硝酸氮, 比去除速率为 2.08 mg·(L·h)⁻¹.

同时检测了各培养基中 NO₂⁻-N 质量浓度, 发现硝酸氮负荷低于 200 mg·L⁻¹ 时, 去除过程中基本没有 NO₂⁻-N 的积累, 而负荷高于 300 mg·L⁻¹ 时, 72 h 后亚硝酸氮积累明显增加, 约 5 ~ 8 mg·L⁻¹ (表 3).

3 讨论

在现有研究报道的异养硝化-好氧反硝化细菌

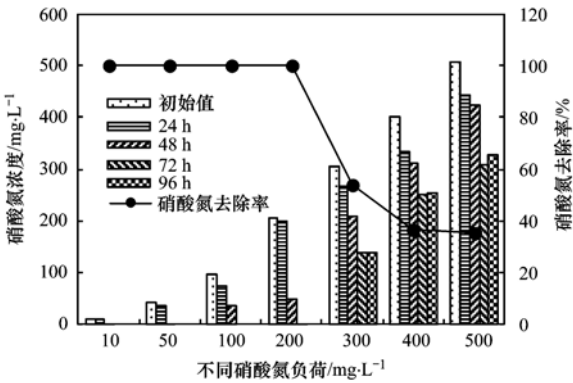


图 8 菌株 SLWX₂ 对不同浓度硝酸氮的利用

Fig. 8 Utilization of different concentrations of nitrate-nitrogen by strain SLWX₂

表 2 菌株 SLWX₂ 对不同浓度氨氮利用过程中 NO₂⁻-N 的积累/mg·L⁻¹

Table 2 Accumulation of NO₂⁻-N during ammonia-nitrogen utilization by strain SLWX₂/mg·L⁻¹

不同氮负荷组/mg·L ⁻¹	0 h	24 h	48 h	72 h	96 h
10	0.006 6	0.009 7	0.025 3	0.024 6	0.084 4
50	0.005 7	0.014 8	0.026 6	0.030 7	0.029 1
100	0.005 5	0.005 6	0.018 9	0.012 7	0.01 1
200	0.005 6	0.020 5	0.016 4	0.014 4	0.017 7
300	0.006 2	0.021 4	0.017 0	0.018 1	0.014 9
400	0.006 2	0.027 6	0.018 7	0.016 6	0.014 9
500	0.005 9	0.028 3	0.018 9	0.016 3	0.016 4

表 3 菌株 SLWX₂ 对不同浓度硝酸氮利用过程中 NO₂⁻-N 的积累/mg·L⁻¹

Table 3 Accumulation of NO₂⁻-N during nitrate-nitrogen utilization by strain SLWX₂/mg·L⁻¹

不同氮负荷组/mg·L ⁻¹	0 h	24 h	48 h	72 h	96 h
10	0.008 2	0.005 5	0.013 2	0.018 9	0.020 6
50	0.005 3	0.003 1	0.005 5	0.016 7	0.028 4
100	0.005 5	0.002 9	0.086 7	0.004 2	0.004 5
200	0.006 6	0.011 1	6.675 5	0.015 7	0.020 0
300	0.010 5	0.001 2	0.005 3	5.936 8	5.465 2
400	0.005 6	0.001	0.005 0	6.554 7	5.565 3
500	0.005 4	0.000 9	0.003 8	8.106 5	6.711 4

中, 有部分为芽孢杆菌, 包括地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*)^[15]、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*)^[16]、蜡状芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*)^[17]、巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megeterium*)^[18] 以及弯曲芽孢杆菌 (*Bacillus flexus*)^[19] 等. 本研究从刺参养殖池塘水体中分离获得 1 株同时具备异养硝化和好氧反硝化性能的菌株 (SLWX₂), 经中国科学院微生物研究所鉴定为花津滩芽孢杆菌 (*Bacillus hwajinpoensis*), 为首次报道该种具有这种功能. 菌株 SLWX₂ 在 1% ~ 8% NaCl 条件下均能生长, 对盐度有较好的适应能力. 本试验结果表明 3% NaCl 条件下, 菌株 SLWX₂ 能高效去除培养基中的氨氮、亚硝酸氮和硝酸氮, 24 h 的去除率分别是 100%、99.5% 和

85.6% (图 1 ~ 3). 与其他同类芽孢杆菌^[20~22] 相比, 在脱氮能力相当的情况下, 该菌株有明显的耐高盐优势, 且能实现同步硝化和反硝化, 这对海水养殖或高盐工业废水的脱氮有重要意义.

在研究异养硝化-好氧反硝化细菌的脱氮特性时, 多数学者采用氨氮和硝酸氮为唯一氮源, 以研究被测菌株的硝化和反硝化性能, 陈茂霞等^[23]、黄廷林等^[24]、孙庆花等^[25] 采用了 3 种无机氮为唯一氮源, 但每种氮源仅设置了一个初始浓度, 难以确定测试菌株对各种氮的耐受限度, 也不能确定菌株在特定培养条件下对不同浓度氮的去除效果, 这部分数据的缺失不利于菌株在实际生产上的应用. 本试验分别以氨氮、亚硝酸氮和硝酸氮为唯一氮源培养菌

株 SLWX₂,且每种氮源设置了 7 个浓度梯度,测试菌株的脱氮效果,结果显示:菌株 SLWX₂ 可耐受 500 mg·L⁻¹ 的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N,及 300 mg·L⁻¹ 的 NO₂⁻-N 负荷,高于很多同类菌株可耐受的氮负荷^[26~28],96 h 最多可去除 180 mg NH₄⁺-N,且该过程中没有亚硝酸盐的积累;最多可去除 30 mg NO₂⁻-N 和 120 mg NO₃⁻-N,亚硝酸盐仅在高浓度硝酸氮测试培养基后期有积累,最大积累量为 8 mg·L⁻¹,均低于张培玉等^[29]分离的菌株 GYL 和石小彤等^[30]筛选的耐盐反硝化细菌 F1 反硝化过程中亚硝酸盐的积累,说明该菌株在处理高浓度含氮废水的净化方面更具优势。

近年来,越来越多的异养硝化-好氧反硝化细菌从自然界或人工系统中被筛选出来,研究发现不同种类的菌株,其生长特性、脱氮途径和酶学特征等都有较大的差异,目前 Richardson 等^[31]提出的异养-好氧反硝化细菌“脱氮假想途径”获得了国内外学者的广泛认可。本研究中多种无机氮源同时存在时,组合培养基中氨氮最先有明显的下降,而亚硝酸氮和硝酸氮没有明显增加,随后这 3 种无机氮均被降解完全,并且菌株 SLWX₂ 对 7 种不同氨氮负荷的利用过程中,NO₂⁻-N 基本没有积累,而 300~500 mg·L⁻¹ 硝酸盐负荷测试培养基中 72 h 和 96 h 均能检测到亚硝酸氮,说明该菌株好氧反硝化过程中产生亚硝酸盐,但因试验过程中并未检测羟胺含量和气体组成,该菌的异养硝化和反硝化途径及机制有待进一步研究。

4 结论

(1)从刺参养殖环境中筛选出 1 株具有较强异养硝化和好氧反硝化能力的菌株 SLWX₂,该菌株 24 h 对氨氮、亚硝酸氮和硝酸氮的去除率分别达到 100%、99.5% 和 85.6%,在 1%~8% NaCl 条件下均能生长。经鉴定其为花津滩芽孢杆菌(*Bacillus hwajinpoensis*)。

(2)多种无机氮源同时存在时,菌株 SLWX₂ 优先利用氨氮,再利用亚硝酸盐和硝酸盐,并独立完成硝化和反硝化,72 h 无机氮从 4.95 mg·L⁻¹ 可降至 0.03 mg·L⁻¹。

(3)菌株 SLWX₂ 可耐受 500 mg·L⁻¹ 的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N,及 300 mg·L⁻¹ 的 NO₂⁻-N,在氨氮负荷 500 mg·L⁻¹、亚硝酸氮负荷 100 mg·L⁻¹ 和硝酸氮负荷 200 mg·L⁻¹ 范围内,该菌的脱氮能力不受明显抑制,

对 3 种形态的氮均有良好去除效果,96 h 最多可去除 180 mg NH₄⁺-N、30 mg NO₂⁻-N 和 120 mg NO₃⁻-N。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王晓静.红鳍东方鲀循环水养殖系统中一株异养氨氧化-好氧反硝化菌的分离鉴定及性能研究[D].青岛:青岛理工大学,2013.
- [3] Ren Y X, Yang L, Liang X. The characteristics of a novel heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium, *Acinetobacter junii* YB[J]. Bioresource Technology, 2014, 171: 1-9.
- [4] 孙雪梅,李秋芬,张艳,等.一株海水异养硝化-好氧反硝化菌系统发育及脱氮特性[J].微生物学报,2012,52(6):687-695.
- [5] 乔森,刘雪洁,周集体.异养硝化-好氧反硝化在生物脱氮方面的研究进展[J].安全与环境学报,2014,14(2):128-135.
- [6] 王弘宇,马放,杨开,等.两株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.
- [7] 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.
- [8] Yao S, Ni J R, Chen Q, et al. Enrichment and characterization of a bacteria consortium capable of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at low temperature [J]. Bioresource Technology, 2013, 127: 151-157.
- [9] Shoda M, Ishikawa Y. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification of high-strength ammonium in anaerobically digested sludge by *Alcaligenes faecalis* strain No. 4[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, 117(6): 737-741.
- [10] 梁贤,任勇翔,杨垒,等.异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性[J].环境科学,2015,36(5):1749-1755.
- [11] Miyahara M, Kim S W, Zhou S M, et al. Survival of the aerobic denitrifier *Pseudomonas stutzeri* strain TR2 during co-culture with activated sludge under denitrifying conditions[J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 2012, 76(3): 495-500.
- [12] 何伟,王薇,王洁,等.一株好氧反硝化菌的分离鉴定及其混合应用特性研究[J].生态与农村环境学报,2009,25(2):88-93.
- [13] 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].微生物学报,2011,51(12):1646-1654.
- [14] 余润兰,苗雷.异养硝化细菌 *Alcaligenes* sp. S3 除氮特性及动力学[J].环境工程学报,2012,6(3):869-872.
- [15] 聂欢欢,赵群芬,李长红,等.一株高效去除亚硝酸氮细菌的分离鉴定及其脱氮特性研究[J].微生物学通报,2013,40(11):2146-2155.
- [16] 曹林,衣学文,董滨,等.活性污泥中异养硝化-好氧反硝化菌的分离及其脱氮性能[J].净水技术,2014,33(3):91-95.

- [17] 尹明锐, 汪苹, 刘健楠, 等. 具有 N_2O 控逸能力的异养硝化-好氧反硝化菌株的筛选鉴定[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 515-520.
- [18] 刘健楠, 汪苹, 尹明锐, 等. 味精废水处理系统中高效细菌的分离鉴定及其脱氮性能[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(3): 355-360.
- [19] 吴海武, 郭聪, 朱彦博, 等. 热带芽孢杆菌的筛选及对人工废水效果研究[J]. 水产科学, 2014, **33**(11): 723-727.
- [20] 郭强, 杨云龙, 陈宏平. 一株地衣芽孢杆菌异氧硝化-好氧反硝化特性研究[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(7): 38-42.
- [21] 黄石, 张翠绵, 胡栋, 等. 一株高效亚硝化芽孢杆菌的分离鉴定及脱氮特性研究[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2014, **38**(2): 190-194.
- [22] 杨希, 刘德立, 邓灵福, 等. 蜡状芽孢杆菌好氧反硝化特性研究[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(3): 155-159.
- [23] 陈茂霞, 王欢, 周后珍, 等. 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.
- [24] 黄廷林, 白士远, 张海涵, 等. 一株贫营养异养硝化-好氧反硝化细菌的分离鉴定及脱氮特性[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(12): 5665-5671.
- [25] 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 等. 1 株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 647-654.
- [26] 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.
- [27] 信欣, 姚力, 鲁磊, 等. 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[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3926-3932.
- [28] 王国英, 崔杰, 岳秀萍, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌脱氮同时降解苯酚特性[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(9): 2644-2649.
- [29] 张培玉, 郭艳丽, 于德爽, 等. 一株轻度嗜盐反硝化细菌的分离鉴定和反硝化特性初探[J]. 微生物学通报, 2009, **36**(4): 581-586.
- [30] 石小彤, 李彦芹, 邢国伟, 等. 一株耐盐好氧反硝化细菌的分离筛选及鉴定[J]. 生物技术通报, 2013, (3): 175-180.
- [31] Richardson D J, Wehrfritz J M, Keech A, *et al.* The diversity of redox proteins involved in bacterial heterotrophic nitrification and aerobic denitrification [J]. Biochemistry Society Transactions, 1998, **26**(3): 401-408.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollutional Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrochemical Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dyeing Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sarI01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行