

环境科学

(HUANJING KEXUE)

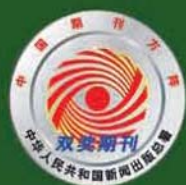
ENVIRONMENTAL SCIENCE

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,邹义萍,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)	

拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性

颜薇芝^{1,2}, 郝健², 孙俊松^{1,2}, 史吉平^{1,2*}

(1. 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049; 2. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

摘要: 拉乌尔菌属是肠杆菌科中新分类的一个属, 具有降解多种环境污染物的能力. 本研究通过异养硝化培养基富集, 从活性污泥中筛选出 1 株拉乌尔菌, 命名为 sari01. 通过单因素和响应曲面实验研究, 得出菌株 sari01 硝化作用的最适条件: 碳源为柠檬酸钠、pH 为 7.0~7.5、温度为 30℃、C/N 为 15、接种量为 7.5%、溶氧以装液量计取 50 mL, 此时氨氮去除率可达 99.9%, 其中 33.7% 被转化成气体而去除, 剩余部分转化为细胞生物量. 菌株 sari01 能够利用亚硝酸盐和硝酸盐为唯一氮源进行生长, 在优化培养条件下氮的去除率分别为 98.4% 和 65.2%. 说明菌株 sari01 具有很强的异养硝化和好氧反硝化特性, 能够独立完成异养硝化和好氧反硝化脱氮过程, 在污水处理中具有潜在的应用价值.

关键词: 异养硝化; 好氧反硝化; 生物脱氮; 拉乌尔菌; 响应面

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2673-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.034

Isolation of *Raoultella* sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics

YAN Wei-zhi^{1,2}, HAO Jian², SUN Jun-song^{1,2}, SHI Ji-ping^{1,2*}

(1. College of Life Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: The genus of *Raoultella* belongs to the family of *Enterobacteriaceae*, and some strains of *Raoultella* sp. have the function of degrading chemical pollutants in the environment. A *Raoultella* sp. strain was isolated from activated sludge through enrichment cultured with heterotrophic nitrification medium. This strain was named *Raoultella* sp. sari01. Single-factor and response surface methodology experiments results showed that efficient heterotrophic nitrification of strain sari01 occurred with sodium citrate as the carbon source, at pH of 7.0-7.5, temperature of 30℃, C/N ratio of 15, inoculation volume of 7.5% and loading volume of 50 mL, while the removal rate of nitrogen was 99.9%, of which 33.7% was converted to gaseous product and escaped to air, and the residual nitrogen was fixed in cell biomass. Using nitrite and nitrate as the sole nitrogen source, the nitrogen degradation ratios were 98.4% and 65.2%, respectively. Hence, strain sari01 could remove nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification independently, quickly and effectively, which demonstrated that strain sari01 has the potential to be used in wastewater treatment.

Key words: heterotrophic nitrification; aerobic denitrification; biological removal of nitrogen; *Raoultella* sp.; response surface methodology (RSM)

工业废水和生活污水中的氮素以氨氮、有机氮、硝态氮、亚硝态氮等多种形式存在, 以氨氮为主要的存在形式. 脱氮是污水处理的一个最重要指标, 传统的生物脱氮工艺是基于好氧自养硝化和厌氧反硝化的过程^[1]. 在好氧阶段, 氨氮通过硝化过程氧化为亚硝酸盐, 亚硝酸盐再氧化为硝酸盐; 在厌氧阶段, 硝酸盐通过反硝化作用还原为亚硝酸盐, 接着还原为一氧化二氮、二氧化氮, 直至氮气排入大气. 近年来人们开发了一些新型的生物脱氮工艺, 包括部分亚硝化, 好氧反硝化, 厌氧性氨氧化等^[2]. 1972 年, 首次有报道从自然环境中分离出 1 株具有异养硝化能力的节细菌属细菌 (*Arthrobacter* sp.)^[3]. 其后多个种属的具有异养硝化-好氧反硝化的细菌被报道, 包括粪产碱菌 (*Alcaligenes faecalis*)^[4]、施氏假单胞菌 (*Pseudomonas*

stutzeri)^[5]、铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*)^[6]、土壤杆菌属 (*Agrobacterium* sp.)^[7]、不动杆菌属 (*Acinetobacter* sp.)^[8,9]、克雷伯氏肺炎杆菌 (*Klebsiella pneumoniae*)^[10]、芽孢杆菌属 (*Bacillus* sp.)^[11]、泛养硫球菌 (*Thiosphaera pantotropha*)^[12] 等. 异养硝化细菌与自养菌相比, 具有更高的生长率, 并能利用有机物质作为碳源和能源在有氧条件下将氨氮转变为 N₂^[13,14]. 此外, 反硝化过程中产生的碱性可以部分中和由硝化过程产生的酸^[5]. 因此, 同步硝化反硝化可以实现低运营成本和一个反应器达到高速脱氮的效果.

收稿日期: 2015-12-22; 修订日期: 2016-02-01

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目 (沪农科攻字 (2015) 第 1-4 号)

作者简介: 颜薇芝 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: yanwz@sari.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: shijp@sari.ac.cn

2001 年解鸟氨酸克雷伯氏菌 (*Klebsiella ornithinolytica*)、植生克雷伯氏菌 (*Klebsiella planticola*) 和土生克雷伯氏菌 (*Klebsiella terrigena*) 等从克雷伯氏菌属中被分离出来单独成立了一个拉乌尔菌新属 (*Raoultella* gen. nov.)^[15]. 2,4,6-三硝基甲苯 (TNT) 是一种广泛使用的炸药, TNT 在土壤中的残留带来了大量污染, 植生拉乌尔菌 (*Raoultella planticola*) 可以在几小时内将 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 TNT 完全降解^[16]. 2,4,5-三氯苯氧基醋酸是一种高毒性的除草剂, 可以通过食物链进行富集, 1 株植生拉乌尔菌可以降解土壤中的 2,4,5-三氯苯氧基醋酸^[17]. 本研究从活性污泥中筛选出 1 株异养硝化菌, 经鉴定为拉乌尔菌属细菌, 通过单因素实验和响应曲面实验对该菌的脱氮性能进行了分析.

1 材料与方法

1.1 培养基^[18~20]

硝化富集培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.945, 柠檬酸钠 6.536, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1, NaCl 0.12, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.01, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05, KH_2PO_4 0.25, Na_2HPO_4 0.3, pH 7.0 ~ 7.5. 固体培养基添加 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 琼脂.

异养硝化培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.945, 柠檬酸钠 12.25, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1, KH_2PO_4 0.25, Na_2HPO_4 0.3, pH 7.0 ~ 7.5.

反硝化培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): KNO_3 0.722 (NaNO_2 0.5), 柠檬酸钠 6.128, KH_2PO_4 0.25, Na_2HPO_4 0.3, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1, pH 7.0.

溴百里酚蓝培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): KNO_3 1, 琥珀酸钠 8.5, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1, CaCl_2 0.15, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05, KH_2PO_4 0.25, Na_2HPO_4 0.3, 1% 溴百里酚蓝乙醇溶液 1 mL, 琼脂 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.2 富集培养及菌株分离

活性污泥取自江苏省常州市某铝业公司废水处理池, 取 5 mL 污泥悬浮于 45 mL 硝化富集培养基, 30°C , $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床富集培养 12 h, 将富集液进行梯度稀释涂布于硝化富集固体培养基, 培养 1 d 后, 挑取单菌落得到初筛菌株^[20]. 挑取初筛菌株接种于溴百里酚蓝固体平板, 挑取培养基出现蓝色晕圈的菌株, 进行异养硝化性能和好氧反硝化性能测定^[21].

1.3 菌株的鉴定

菌株鉴定采用 16S rDNA 序列比对法. 提取菌株总 DNA, 利用一对通用引物扩增菌株 16S rDNA.

上游引物为 8f (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCA-3'), 下游引物为 1492r (5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3'). 基因测序后通过 GenBank 进行同源性序列分析, 应用 MEGA5.0 软件构建该菌株系统发育树.

1.4 脱氮性能研究

1.4.1 培养条件对菌株异养硝化的影响

利用单因素实验研究碳源、温度、接种量和氨氮质量浓度对氨氮去除效果的影响. 碳源选择柠檬酸钠、琥珀酸钠、乙酸钠、葡萄糖和蔗糖; 温度选择 20°C 、 30°C 和 37°C ; 接种量 (菌液 $D_{600} = 2$) 为 1%、2.5%、5%、7.5% 和 10%; 初始氨氮质量浓度分别为 100 、 200 、 300 、 500 、 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 将处于对数期的菌液接种于装有 50 mL 异养硝化培养基的 250 mL 锥形瓶中, 恒温培养, 测定样品中 D_{600} 、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、亚硝氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、羟氨 ($\text{NH}_2\text{OH} - \text{N}$) 和总氮 (TN) 的质量浓度变化.

1.4.2 响应面法优化培养条件 (response surface methodology, RSM)

基于 Box-Behnken design 的中心组合实验设计原理, 以氨氮降解率为响应值, 通过响应面曲面分析进行培养条件的优化, 考察因素供氧量 (X_1)、温度 (X_2)、碳氮比 (X_3)、接种量 (X_4) 对菌株脱氮能力的影响, 并运用 Design-Expert V8.0.6 软件分析得到最优培养条件. 其中, 以装液量定性表征供氧量的高低, 装液量的含量与溶氧量的大小呈反比关系, 装液量多则溶氧低. 初始氨氮的质量浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 依照不同的碳氮比计算柠檬酸钠质量.

1.4.3 菌株 sari01 的异养硝化功能验证

将菌株接入异养硝化培养基中, 在优化条件下培养, 1 d 后检测培养基中各组分氮的质量浓度变化.

1.4.4 菌株 sari01 的好氧反硝化能力验证

将菌株 sari01 接入反硝化培养基中, 分别以硝酸盐和亚硝酸盐为唯一氮源, 30°C 、 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温摇床培养, 测定样品中各组分氮的质量浓度变化.

1.5 分析方法

菌体生长吸光度 (D_{600}) 采用吸光度法测定; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度采用纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度采用紫外分光光度法 (HZ-HJ-SZ-0138); $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度采用 N -(1-萘基)-乙二胺光度法 (GB 7493-87); 细胞内氮的含量采用凯氏定氮法 (GB 11891-89), 绘制菌体密度和含氮量的关系图^[22]; $\text{NH}_2\text{OH} - \text{N}$ 浓度采用间接分光光度法^[23]; TN 浓度为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_2\text{OH} - \text{N}$ 浓度之和.

2 结果与分析

2.1 菌株的分离及鉴定

通过异养硝化培养基富集培养,获得在异养硝化固体培养基上生长的菌株 10 株. 将这些菌株通过溴百里酚蓝平板复筛,获得 1 株菌,命名为 sari01. sari01 菌落表面为乳白色,圆形,表面光滑,不透明,革兰氏染色为阴性.

通过 BLAST 检索与 GenBank 中的核酸序列

进行菌株 sari01 16S rDNA 序列的同源性比对,该序列与 NCBI 数据库的 *Raoultella* sp. XT-8 (NCBI 登录号为: KR063539.1) 同源性达 99%,结合菌株的形态特征,确定菌株 sari01 属于拉乌尔菌属 (*Raoultella* sp.). 将菌株 sari01 与其他拉乌尔菌属和一些异养硝化好氧反硝化细菌进行系统发育分析,得到菌株的系统进化树(图 1). 由图 1 可以看出,菌株 sari01 与拉乌尔菌和克雷伯氏菌亲缘关系较近.

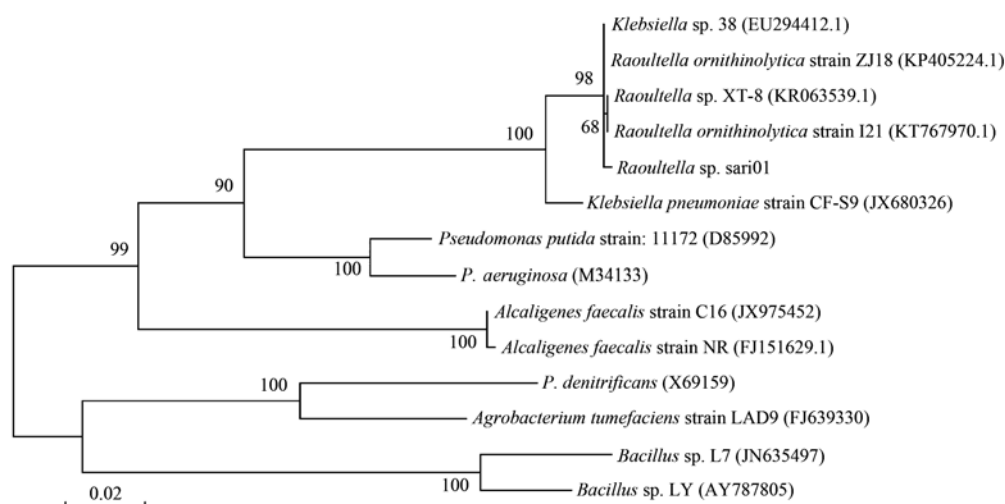


图 1 菌株 *Raoultella* sp. sari01 的系统进化树

Fig. 1 Phylogenetic tree of *Raoultella* sp. sari01 derived from maximum-likelihood analysis of partial 16S rRNA gene sequence

2.2 菌株 sari01 异养硝化性能研究

2.2.1 碳源、温度和接种量对菌株 sari01 脱氮性能的影响

选取不同碳源进行脱氮实验,结果见图 2(a). 柠檬酸钠和乙酸钠为碳源时,12 h 和 24 h 氨氮去除率分别达到 96% 和 94% 以上. 葡萄糖、蔗糖和琥珀酸钠作为碳源时,氨氮去除率较低,24 h 氨氮去除率分别为 51.7%、50.5% 和 34.2%. 结果表明,柠檬酸盐为菌株 sari01 的最佳碳源.

选取不同培养温度进行脱氮实验,结果见图 2(b). 可以看出,随着培养温度的升高,菌株的生物量和氨氮去除率逐渐增加,30℃ 和 37℃ 条件下,菌株的生长适应期最短,4 h 后进入对数期,48 h 内氨氮去除率分别达到 99.1% 和 98.7%,对应的 D_{600} 分别为 2.97 和 2.85. 而 20℃ 条件下,菌株经过 12 h 才进入对数期,48 h 后其氨氮去除率仅达到 67.2%. 表明菌株 sari01 的最适生长温度是 30℃.

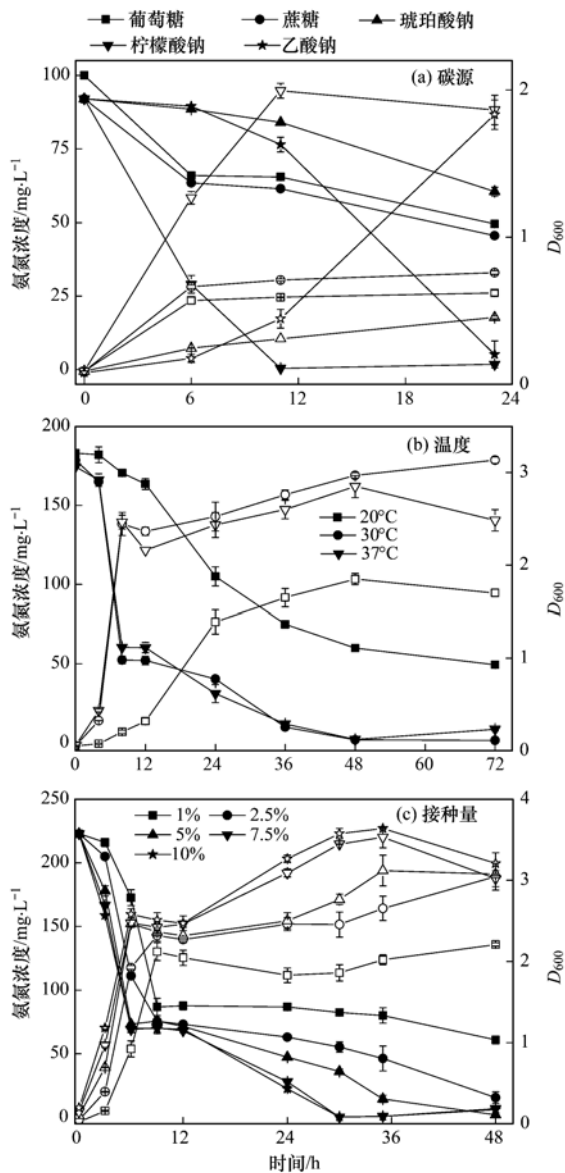
不同接种量对菌株脱氮性能的影响见图 2(c). 可以看出,在接种量为 7.5% 和 10% 时,菌株 sari01 具有很好的生长及氨氮去除性能,最高的氨氮去除

率在 30 h 分别达到 99.9% 和 99.8%. 说明 7.5% 和 10% 的接种量的去除效果一致. 接种量为 1% 和 2.5% 时,经过 60 h,氨氮去除率分别为 75.2% 和 95.5%. 此时,菌株的 D_{600} 仍在增长,氨氮浓度能够进一步减小. 说明接种量的大小主要是决定菌株繁殖的速度,接种量过大会引起溶氧不足,过小会影响培养时间,从而都可能影响氨氮去除效果^[24]. 结果表明,初始接种量越高,菌株繁殖速度越快,缩短脱氮时间,7.5% ~ 10% 为最佳接种量.

从图 2 可以看出,在不同的碳源、温度和接种量的条件下,菌体密度的增长与氨氮浓度的减少呈正相关. 随着氨氮浓度的降低, D_{600} 相对应的增长,当氨氮浓度趋于稳定后, D_{600} 亦趋于稳定,进入稳定期. 说明菌株 sari01 对氨氮的降解主要发生在对数期.

2.2.2 菌株 sari01 的氨氮浓度耐受性

将菌株 sari01 接种于不同初始氨氮浓度的培养基中,培养 1 d 后测定培养基氨氮浓度,结果如图 3 所示. 初始氨氮质量浓度分别为 200、500、1 000 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮去除率分别为 99.7%、61.2%、



图中实心符号表示氨氮,空心符号表示 D_{600}
图2 碳源、温度和接种量对菌株 sari01 的生长以及脱氮性能的影响

Fig. 2 Effects of carbon source, temperature and inoculation volume on ammonium removal and the growth of strain sari01

37.6%和12.3%,其对应的 D_{600} 分别是3.46、4.57、4.49和0.336。虽然高浓度下菌株的去除效率较低,但是各实验条件下氨氮去除量差别不大,分别是200、300、350、230 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。说明菌株生长量与氨氮的去除成正相关。但在初始氨氮质量浓度为2 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,生长量仅有0.336。主要原因是在浓度较低的情况下,营养物质提高有利于细菌的生长繁殖;而氨氮质量浓度过高时会对菌株产生抑制作用,抑制了菌株的生长代谢以及有效反应。同时菌株在初始氨氮质量浓度低于1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时均生长良好, D_{600} 高达5左右,说明菌株 sari01 的氨氮耐受

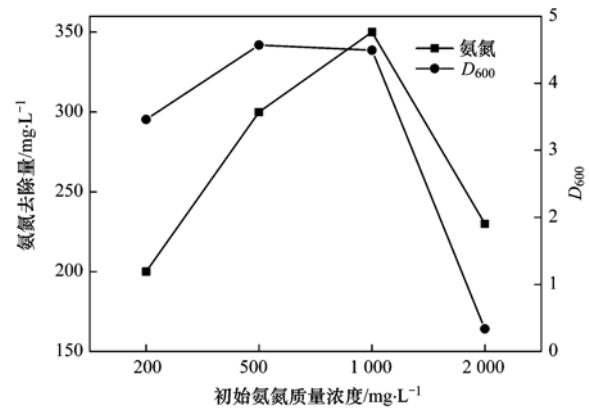


图3 不同初始氨氮浓度对菌株 sari01 的生长以及脱氮性能的影响

Fig. 3 Effects of different initial ammonium loads on the growth of strain sari01 and the nitrogen removal performance

范围很宽。

2.3 基于 Box-Behnken design 的响应面实验优化

2.3.1 响应面实验及方差分析

选取对脱氮性能影响较大的因素通过响应面实验设计进行优化。通过 Design-Expert V8.0.6 软件进行表1数据的二次响应面回归分析,得到多元二次响应面回归模型。

表1 Box-Behnken design 设计方案及响应值

Table 1 Box-Behnken experimental design along with the corresponding responses

编号	X_1	X_2	X_3	X_4	氨氮去除率/%
1	150	36	5	0.10	40.46
2	50	36	15	0.10	78.60
3	50	30	10	0.10	88.19
4	50	42	10	0.10	2.72
5	100	36	5	0.05	53.20
6	100	42	10	0.05	0.00
7	100	36	10	0.10	67.32
8	100	36	15	0.05	82.70
9	50	36	10	0.15	85.67
10	150	42	10	0.10	5.84
11	100	42	5	0.10	0.12
12	100	30	5	0.10	50.84
13	100	42	15	0.10	0.00
14	100	36	10	0.10	76.92
15	100	36	5	0.15	52.02
16	100	36	10	0.10	71.16
17	100	36	15	0.15	90.91
18	100	30	15	0.10	99.03
19	150	36	10	0.05	74.40
20	100	30	10	0.05	66.07
21	100	36	10	0.10	78.00
22	50	36	5	0.10	57.21

根据统计学知识对回归模型进行方差分析,结果见表2和表3。

表 2 响应面结果的方差分析¹⁾

Table 2 Analysis of variance for the RSM results						
方差来源	自由度	平方和	均方	回归系数	P 值	显著性
Model	14	27 223. 93	1 944. 57			
X_1	1	233. 98	233. 98	-4. 42	0. 012 6	*
X_2	1	16 847. 55	16 847. 55	-37. 47	<0. 000 1	**
X_3	1	2 342. 56	2 342. 56	13. 97	<0. 000 1	**
X_4	1	121. 86	121. 86	3. 19	0. 058	
$X_1 X_2$	1	102. 79	102. 79	5. 07	0. 078 8	
$X_1 X_3$	1	13. 02	13. 02	1. 80	0. 510 7	
$X_1 X_4$	1	79. 26	79. 26	-4. 45	0. 118 1	
$X_2 X_3$	1	554. 58	554. 58	-11. 77	0. 000 6	**
$X_2 X_4$	1	110. 30	110. 30	-5. 25	0. 069 7	
$X_3 X_4$	1	22. 04	22. 04	2. 35	0. 394 8	
X_1^2	1	8. 40	8. 40	-1. 14	0. 596 3	
X_2^2	1	6 303. 76	6 303. 76	-31. 17	<0. 000 1	**
X_3^2	1	245. 56	245. 56	-6. 15	0. 011	*
X_4^2	1	16. 57	16. 57	1. 60	0. 459 2	
残差	14	400. 25	28. 59			
失拟项	10	315. 56	31. 56		0. 373 1	不显著
纯误差	4	84. 69	21. 17			
总离差	28	27 624. 18				

1) * 表示显著相关($P < 0. 05$), ** 表示非常显著($P < 0. 01$)

表 3 二次回归方程的方差分析

Table 3 Analysis of variance for the quadratic model	
项目	数值
标准差	5. 35
均值	57. 41
变异系数 C. V. %	9. 31
PRESS	1 949. 94
R-Squared	0. 985 5
Adj R-Squared	0. 971 0
Pred R-Squared	0. 929 4
信噪比	26. 754 4

从表 2 可以看出,回归方程模型的 $P < 0. 000 1$,说明回归方程描述各因子与响应值之间的关系极其显著,即该模型是可靠的;虚拟项极其不显著,说明实验的误差很小. 由表 2 模型中的回归系数进行显著性检验可知,模型一次项 X_1 对氨氮去除率的线性效应显著, X_2 和 X_3 对氨氮去除率的线性效应非常显著;交互项 X_2 、 X_3 相交影响非常显著,其余相交影响均不显著;二次项 X_3^2 的曲面效应显著, X_2^2 的曲面效应非常显著. 说明所选因素与响应值之间不是简单的线性关系. 回归系数的符号为正表明因子

与响应值之间是正相关,负值则为负相关,而其绝对值越大说明相关性越大. 因子 X_1 、 X_2 与响应值负相关,即因子 X_1 、 X_2 越小,响应值越大. 根据绝对值的大小可判断 4 个因素对氨氮去除率的影响顺序为: $X_2 > X_3 > X_1 > X_4$.

从表 3 的方差分析可以看出,实验的信噪比为 26. 75,其值通常应大于 4,说明该模型有足够分辨率,能很好地反映实验结果;变异系数低于 10%,说明实验有良好的稳定性;模型的相关系数 $R^2 = 0. 985 5$,表明 98. 5% 的实验数据可用该模型进行解释,说明方程可靠性较高,回归有效. 综上分析,该模型可以用来分析和预测菌株 sari01 降解氨氮的最佳实验条件.

2.3.2 响应曲面分析

为了形象地表现溶氧(X_1)、温度(X_2)、碳氮比(X_3)、接种量(X_4)这 4 个因素之间的相互作用对氨氮去除率的影响情况,根据模型参数拟合出响应曲面,如图 4 所示.

通过 Design-Expert 8. 0 软件分析,由响应面和等高线图以及回归方程分析可知,菌株 sari01 去除氨氮的理论最优条件为:装液量 50 mL,温度为 30℃,碳氮比为 15,接种量为 7. 5%,菌株 sari01 对氨氮的去除率达到 100%. 为了检验响应面法所得结果的可靠性,在此条件下进行了 3 次重复验证实验,去除率的平均值为 99. 9%,与理论值基本吻合,这说明该方程与实际情况拟合很好,充分验证了所建数学模型的可靠性,表明响应面法适用于对氨氮去除条件进行回归分析和参数优化.

2.4 菌株 sari01 硝化过程氮平衡分析

菌株 sari01 硝化实验中的氮平衡分析如表 4 所示. 以氨氮作为初始氮源,初始总氮浓度为 239 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 培养结束后,氨氮质量浓度下降到 0. 151 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,同时伴有微量亚硝酸盐的积累,而羟胺和硝酸盐几乎无积累. 与初始总氮相比,在整个异养硝化-好氧反硝化过程中,33. 7% 的初始氮被转化成气体产物而去除,而剩下的 66. 3% 的氮被菌株 sari01 转化为生物量,说明菌株 sari01 具有良好的异养硝化作用.

表 4 以氨氮为唯一氮源时菌株 sari01 的氮平衡¹⁾/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 4 Nitrogen balance of strain sari01 during the heterotrophic nitrification-aerobic denitrification using $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ as the sole nitrogen source/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NH}_2 \text{-OH}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	细胞内氮	总氮降解率/%
初始浓度	230 $\pm$ 0. 98	—	—	—	8. 968 $\pm$ 0. 07	—
最终浓度	0. 151 $\pm$ 0. 05	—	0. 103 $\pm$ 0. 001	—	161. 864 $\pm$ 0. 87	33. 7

1) “—”表示未检测到;总氮降解率 = [(初始 TN - 反应后 TN)/初始 TN] $\times$ 100%

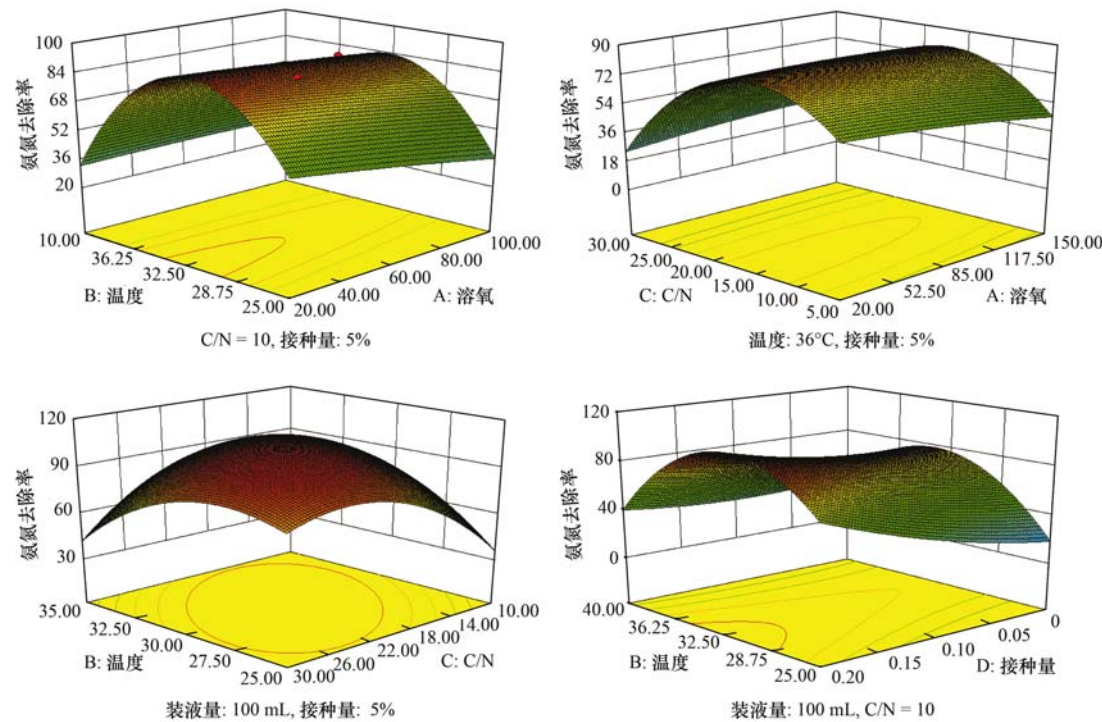


图4 不同因素间交互作用的响应面和等高线

Fig. 4 Response surface plots and contour plots of degradation rate under the interaction of different factors

2.5 菌株 sari01 反硝化能力验证

以硝酸盐作为唯一氮源培养菌株 sari01, 培养过程中各组分变化如图 5(a) 所示, 培养 24 h 硝酸盐去除率为 65.2%, 8 h 亚硝酸盐积累到 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 12 h 降到 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最后完全消耗. 相比于菌株 *Rhodococcus pyridinivorans* CPZ24^[25] 只能将硝氮浓度由初始的 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降解到 $16.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 菌株 sari01 对硝氮的利用更具优势.

以亚硝酸盐为唯一氮源培养菌株 sari01, 结果

如图 5(b) 所示, 初始亚硝酸盐氮为 $114 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 24 h 亚硝酸盐去除率为 98.4%, 氨氮少量积累, 无硝酸盐和羟胺的累积. 相比于菌株 *Serratia marcescens* N-2^[26] 以初始浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚硝酸钠为氮源时, 72 h 后对亚硝氮的去除率可达 98.52%, 菌株 sari01 降解亚硝氮的能力更强.

说明菌株 sari01 能够利用高浓度的氨氮以及低浓度的硝酸盐和亚硝酸盐生长以及反应, 以氨氮为底物时, 菌株 sari01 的生长量最大, 反应效率最高, 亚硝酸盐、硝酸盐次之.

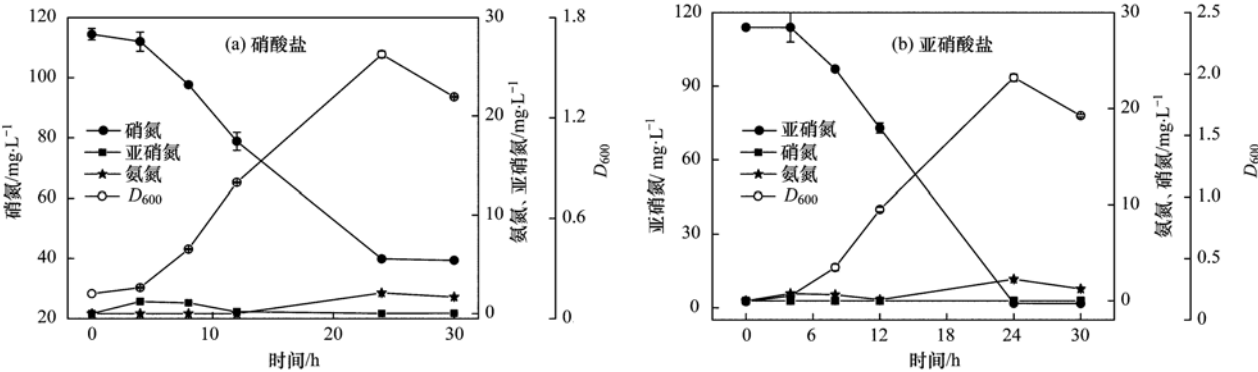


图5 以硝酸盐和亚硝酸盐为唯一氮源, 菌株 sari01 的生长以及脱氮性能

Fig. 5 Growth of strain sari01 and its nitrogen removal performance using nitrate and nitrite as the sole nitrogen source

3 讨论

单因素实验表明菌株 sari01 在柠檬酸为唯一碳

源时脱氮效率最高, 但其也能在葡萄糖和蔗糖为碳源条件下生长, 能够适应更广泛的底物. 而报道较多的异养硝化菌 *Acinetobacter junii* YB^[18] 在葡萄糖

为碳源条件下是基本不能生长的,极大地限制了该菌株的应用。

通过培养条件的优化实验,初步确定了各培养条件对菌株 sari01 氨氮去除率的影响水平范围。通过响应面实验优化表明,4 个因素对菌株 sari01 氨氮去除率的影响顺序依次为温度、碳氮比、溶氧和接种量,其中温度影响最显著,最佳温度为 30 ~ 37℃ 左右,与 *Providencia rettgeri* YL^[27] 和 *A. faecalis* sp.^[28] 的最佳脱氮温度一致。

目前许多筛出的异养硝化菌耐受氨氮浓度不够高,报道的大多数菌株的初始氨氮质量浓度在 100 mg·L⁻¹ 以内^[13,18,29]。配伍菌群(N4 + N5 + N6)^[30] 处理氨氮质量浓度为 446.9 mg·L⁻¹ 的合成废水,52 h 降至 0.61 mg·L⁻¹,氨氮去除率达到 99.8%,总氮去除率为 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;而本实验中筛选的菌株 sari01 可以适应 1 000 mg·L⁻¹ 以内的初始氨氮浓度,其氨氮耐受范围很宽。

总氮平衡表分析表明,33.7% 总氮被菌株 sari01 转化为气体脱除,这些氮可能是通过异养硝化和好氧反硝化的耦合作用转化为气体产物而被脱除的,而异养硝化的产物直接成为反硝化反应的底物。现有研究表明,大多数菌株的氨氮脱除率在 30% ~ 50%。Kim 等^[11] 研究的芽孢杆菌在初始氨氮质量浓度为 50 mg·L⁻¹ 时,有 33% 的氮素通过异养硝化脱除,Chen 等^[7] 研究的 *Agrobacterium* sp. LAD9 在初始氨氮质量浓度为 97 mg·L⁻¹ 时,脱除率达到了 49%,王弘宇等^[31] 筛得的菌株 ZW2 和 ZW5 经过 60 h 的培养对氮素的去除率可以分别达到 43.90% 和 48.52%。以硝酸盐和亚硝酸盐作为唯一氮源的实验表明,菌株 sari01 能够在有氧条件下利用硝酸盐和亚硝酸盐,相比于菌株 *Acinetobacter* sp. TN-14^[32] 只能在 24 h 内将硝氮从 94.2 mg·L⁻¹ 降到 39.3 mg·L⁻¹,亚硝氮从反应初始浓度 97.8 mg·L⁻¹ 下降到 21.3 mg·L⁻¹,具有更好的好氧反硝化能力。菌株 sari01 为污水处理用菌株提供了更多的选择。

4 结论

(1) 从活性污泥中筛得 1 株异养硝化-好氧反硝化菌 sari01,经鉴定为拉乌尔菌属(*Raoultella* sp.)。其氨氮耐受能力较强,能在高浓度(1 000 mg·L⁻¹) 的氨氮溶液中生长及反应。

(2) 应用响应面法对菌株 sari01 去除氨氮的条件进行优化,当碳源为柠檬酸钠,C/N 为 15,pH 为 7.0 ~ 7.5,温度为 30℃,溶氧以装液量计取 50 mL,接种量为 7.5% 时菌株 sari01 降解氨氮效果最佳。

(3) 在最佳条件下,氨氮去除率为 99.9%,其中 33.7% 的氨氮被菌株转化成气体产物的形式去除,而剩下的 66.3% 的氨氮被菌株 sari01 转化为细胞内的生物量。

(4) 菌株 sari01 能够利用亚硝酸盐和硝酸盐进行生长代谢,去除率分别为 98.4% 和 65.2%,说明菌株 sari01 具有良好的反硝化能力。

参考文献:

- [1] 姚樱,张文,马民. 新型生物脱氮工艺的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2005, **28**(S2): 138-140, 148.
- [2] 闫志英,廖银章,李旭东,等. 新型废水生物脱氮的微生物学研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2006, **12**(2): 292-296.
- [3] Verstraete W, Alexander M. Heterotrophic nitrification by *Arthrobacter* sp [J]. Journal of Bacteriology, 1972, **110**(3): 955-961.
- [4] Joo H S, Hirai M, Shoda M. Characteristics of ammonium removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis* No. 4 [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2005, **100**(2): 184-191.
- [5] Zhang J B, Wu P X, Hao B, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by the bacterium *Pseudomonas stutzeri* YZN-001 [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(21): 9866-9869.
- [6] 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): 1749-1756.
- [7] Chen Q, Ni J R. Ammonium removal by *Agrobacterium* sp. LAD9 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, **113**(5): 619-623.
- [8] Huang X F, Li W G, Zhang D Y, et al. Ammonium removal by a novel oligotrophic *Acinetobacter* sp. Y16 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification at low temperature [J]. Bioresource Technology, 2013, **146**: 44-50.
- [9] Yao S, Ni J R, Ma T, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at low temperature by a newly isolated bacterium, *Acinetobacter* sp. HA2 [J]. Bioresource Technology, 2013, **139**: 80-86.
- [10] Padhi S K, Tripathy S, Sen R, et al. Characterisation of heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying *Klebsiella pneumoniae* CF-S9 strain for bioremediation of wastewater [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, **78**: 67-73.
- [11] Kim J K, Park K J, Cho K S, et al. Aerobic nitrification-denitrification by heterotrophic *Bacillus* strains [J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(17): 1897-1906.

- [12] Gupta A B. *Thiosphaera pantotropha*: a sulphur bacterium capable of simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 1997, **21** (8): 589-595.
- [13] Zhao B, He Y L, Joseph H, *et al.* Heterotrophic nitrogen removal by a newly isolated *Acinetobacter calcoaceticus* HNR [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(14): 5194-5200.
- [14] Zhao B, An Q, He Y L, *et al.* N₂O and N₂ production during heterotrophic nitrification by *Alcaligenes faecalis* strain NR [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **116**: 379-385.
- [15] Drancourt M, Bollet C, Carta A, *et al.* Phylogenetic analyses of *Klebsiella* species delineate *Klebsiella* and *Raoultella* gen. nov., with description of *Raoultella ornithinolytica* comb. nov., *Raoultella terrigena* comb. nov. and *Raoultella planticola* comb. nov [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2001, **51**: 925-932.
- [16] Claus H, Bausinger T, Lehmler I, *et al.* Transformation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) by *Raoultella terrigena* [J]. *Biodegradation*, 2007, **18**(1): 27-35.
- [17] Zharikova N V, Markusheva T V, Galkin E G, *et al.* *Raoultella planticola*, a new strain degrading 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid [J]. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2006, **42** (3): 258-262.
- [18] 刘晶晶, 汪苹, 王欢. 一株异养硝化-好氧反硝化菌的脱氮性能研究[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(3): 121-125.
- [19] 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.
- [20] 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): 18-23, 29.
- [21] 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.
- [22] 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. 254-279.
- [23] Frear D S, Burrell R C. Spectrophotometric method for determining hydroxylamine reductase activity in higher plants [J]. *Analytical Chemistry*, 1955, **27**(10): 1664-1665.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 刘杰凤, 周天, 刘正辉, 等. 一株新型异养硝化细菌的分离鉴定及硝化特性[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(8): 99-103.
- [27] Taylor S M, He Y L, Zhao B, *et al.* Heterotrophic ammonium removal characteristics of an aerobic heterotrophic nitrifying-denitrifying bacterium, *Providencia rettgeri* YL [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(10): 1336-1341.
- [28] Kesik M, Blagodatsky S, Papen H, *et al.* Effect of pH, temperature and substrate on N₂O, NO and CO₂ production by *Alcaligenes faecalis* sp. [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2006, **101**(3): 655-667.
- [29] Chen Q, Ni J R. Heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by novel isolated bacteria [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2011, **38**(9): 1305-1310.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.

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 Dye-stuff 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