

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

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

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)

北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)

上海典型持续性PM_{2.5}重度污染的数值模拟 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印 (1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀荣, 赵乐军, 田乐琪 (1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)

1株*Arthrobacter arilaitensis*菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)

海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)

《环境科学》征订启事(1138) 《环境科学》征稿简则(1155) 信息(824,853,883)

海洋菌株 y3 的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性

孙庆花¹, 于德爽¹, 张培玉¹, 林学政², 徐光耀¹, 李津^{1*}

(1. 青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 国家海洋局海洋生物活性物质重点实验室, 青岛 266061)

摘要: 从胶州湾海底沉积物中筛选出 1 株高效的海洋异养硝化-好氧反硝化细菌 y3, 经形态学观察、生理生化实验和 16S rRNA 基因序列分析, 确定该菌株为假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.)。对其在实际含氮海水中的脱氮实验结果表明, 菌株 y3 的最佳碳源为柠檬酸三钠, 最适 pH 为 7.0, 最适 C/N 为 13; 菌株均能以 NH_4Cl 、 NaNO_2 和 KNO_3 为唯一氮源进行反应, 20 h 后其去除率分别为 98.69%、78.38% 和 72.95%, 在硝化过程中几乎没有亚硝酸盐和硝酸盐的积累。以不同比例混合两种氮源反应 20 h, 当 NO_3^- -N: NO_2^- -N 分别为 2:1、1:1 和 1:2 时, 脱氮率分别为 99.56%、99.75% 和 99.41%; 当 NH_4^+ -N: NO_3^- -N 分别为 2:1、1:1、1:2 时, 脱氮率均为 100%; 当 NH_4^+ -N: NO_2^- -N 分别为 2:1、1:1、1:2 时, 脱氮率分别为 90.43%、92.79% 和 99.96%, 多高于单一氮源的情况。该菌株具有较好的高盐废水脱氮处理效能。

关键词: 海洋菌株; 异养硝化; 好氧反硝化; 假单胞菌属; 混合氮源; 脱氮特性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-1089-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.03.039

Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment

SUN Qing-hua¹, YU De-shuang¹, ZHANG Pei-yu¹, LIN Xue-zheng², XU Guang-yao¹, LI Jin^{1*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Bioactive Substances, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: A heterotrophic nitrification - aerobic denitrification bacterium named y3 was isolated from the sludge of Jiaozhou Bay using the enrichment medium with seawater as the matrix. It was identified as *Pseudomonas* sp. based on the morphological observation, physiological experiments and sequence analysis of 16S rRNA. The experiment results showed that the optimal carbon resource was sodium citrate, the optimal pH was 7.0, and the optimal C/N was 13. The strain could use NH_4Cl , NaNO_2 and KNO_3 as sole nitrogen source, and the removal efficiencies were 98.69%, 78.38% and 72.95% within 20 hours, respectively. There was no nitrate and nitrite accumulation during the heterotrophic nitrification process. Within 20 hours, the nitrogen removal efficiencies were 99.56%, 99.75% and 99.41%, respectively, in the mixed system with NO_3^- -N: NO_2^- -N of 2:1, 1:1 and 1:2. When the NH_4^+ -N: NO_3^- -N ratios were 2:1, 1:1, 1:2, the nitrogen removal efficiencies were all 100%. When the NH_4^+ -N: NO_2^- -N ratios were 2:1, 1:1, 1:2, the nitrogen removal efficiencies were 90.43%, 92.79% and 99.96%, respectively. They were higher than those with single nitrogen source. As a result, strain y3 had good nitrogen removal performance in high saline wastewater treatment.

Key words: marine bacterium; heterotrophic nitrification; aerobic denitrification; *Pseudomonas* sp.; mixed nitrogen sources; nitrogen removal characteristics

异养硝化-好氧反硝化 (heterotrophic nitrification-aerobic denitrification, HN-AD) 菌所具有的同步去除有机物、氨氮和硝态氮的特点使其成为当今污水处理技术领域的研究热点之一。近年来研究者从土壤、水库、污水处理反应器等环境中分离出的 HN-AD 菌多适宜盐度较低的废水处理, 对耐盐菌株的研究较少。张培玉等^[1]从稳定运行的处理高浓度氨氮含盐废水的 MBR 和 A/O 反应器活性污泥中筛选出 1 株耐盐 HN-AD 菌, 并详细地研究了其异养硝化和好氧反硝化特性。孙雪梅等^[2]从浅海网箱养殖区的富营养沉积环境中分离筛选到 1 株盐单胞菌属 X3, 并对其脱氮特性进行了深入研究。刘天琪

等^[3]从大连海域典型繁茂膜海绵 (*Hymeniacidon perleve*) 中筛选出 1 株耐盐 HN-AD 菌 ADN-42。因此筛选出更多耐盐并可同步脱氮除碳的 HN-AD 菌株、深入研究其生物学特性和脱氮机制, 对高盐废水的生物脱氮具有重要的理论价值和指导意义。

本研究从胶州湾海底沉积物中筛选分离出 1 株

收稿日期: 2015-07-24; 修订日期: 2015-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278258, 51478229); 山东省自然科学基金项目 (BS2015HZ007); 山东省高等学校科技计划项目 (J15LC61); 青岛市应用基础研究项目 (13-1-4-203-jch)

作者简介: 孙庆花 (1989~), 女, 硕士, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: sunny7249@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ljin0532@126.com

海洋 HN-AD 菌株 y3, 从形态、生理生化和 16S rRNA 序列测定及系统发育分析方面对该菌株进行了鉴定, 并对其在实际含氮海水中的生长条件和脱氮特性进行了深入分析, 旨在为微生物强化处理高盐废水提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 菌株来源和培养基

本实验中所研究菌株分离自胶州湾海底沉积物。

菌株分离和生长高盐培养基为: KH_2PO_4 0.2 g, K_2SO_4 0.1 g, NH_4Cl 0.5 g, KNO_2 1 g, 柠檬酸三钠 1.5 g, 微量元素溶液 I、II 各 1.25 mL, 海水 1 000 mL, pH 7.0 (用 HCl 和 NaOH 进行调节)。121℃ 压力锅灭菌 30 min。

观察菌落的形态学特征和活化菌株时采用海水 2216E 培养基: 蛋白胨 5 g, 酵母粉 1 g, 海水 1 000 mL。121℃ 压力锅灭菌 30 min。

海水取自青岛沿海的近海水域, 海水盐度约为 31.8‰。

微量元素溶液 I: EDTA 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

微量元素溶液 II: EDTA 15 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, H_3BO_4 0.014 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.99 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.25 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.43 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.19 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.22 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.24 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.21 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.2 菌株形态和生理生化实验

将菌株接种至 2216E 海水固体培养基上, 培养 12 h 后观察菌株在固体培养基上的菌落特征。通过拍摄扫描电镜照片来观察菌株的个体形态。

利用细菌生化鉴别试剂盒 (BIO-KNOT Rap·E-15 肠杆菌科鉴定) 对菌株进行生理生化分析。

1.3 16S rRNA 序列测定及系统发育分析

接种一环菌株至海水 2216E 培养基上, 以温度 28℃、转速 160 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 培养 12 h 后取 200 μL 菌液于 EP 管中, 先经沸水浴 13 min 再经冰浴 7 min 后制得 DNA 模板。通过通用引物进行 PCR 扩增。

PCR 反应体系 (50 μL): 正向引物 27F (10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 1 μL ; 反向引物 1492R (10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 1 μL ; $2\times\text{Tap}$ PCR MasterMix 25 μL ; 细菌 DNA 模板 2 μL ; ddH_2O 21 μL 。

正向引物 27F: 5'-AGAGTTTGATCCTGGTCAG-3'。

反向引物 1492R: 5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3' PCR 反应程序: 95℃ 预变性 5 min, 94℃ 变性 40 s, 52℃ 复性 40 s, 72℃ 延伸 90 s, 30 个循环, 72℃ 延伸 7 min。

系统发育分析: PCR 产物由上海金斯瑞生物有限公司测序, 测序结果与 GenBank 中已提交的模式菌株的 16S rRNA 基因序列通过 Blast 软件进行同源性比较, 通过 BIOEDIT 软件中的程序进行多重序列比对分析, 利用 MEGA 6.0 软件, 以 Neighbor-joining 法构建系统发育树。

1.4 菌株脱氮特性影响因素研究

本研究所选用的碳源包括乙酸钠、丁二酸钠、柠檬酸三钠和葡萄糖。pH 根据已有的研究结果显示 HN-AD 的适应环境为中性或弱碱性, 因此设置 pH 分别为 5.0、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5。结合实际污水的 C/N 以及考虑高 C/N 对菌株的影响设置实验的 C/N 为 1、5、9、13、17 和 21。以分离培养基为基础, 设置单一变量, 其他条件设定碳源为柠檬酸三钠、pH = 7.0、C/N = 13 配制测试液。按 2% 的接种量即吸取对数生长期的菌液 (D_{600} 约为 0.80) 2 mL 接种至 100 mL 灭菌后的培养基中, 设置初始的氨氮的添加量为 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和硝态氮的添加量为 60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 即总氮为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。置于气浴恒温振荡器 (转速 160 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 中, 28℃ 培养 20h 后检测培养基中菌体的生长量 (D_{600}), 氨氮、亚硝态氮和硝态氮的浓度。

1.5 异养硝化-好氧反硝化特性研究

以菌株的分离培养基为基础, 柠檬酸三钠为碳源, 初始 pH 值为 7.0, C/N = 13 配制菌株 y3 的脱氮性能实验测试液, 氮源分别为氯化铵、硝酸钾、亚硝酸钠、硝酸钾 + 亚硝酸钠、氯化铵 + 硝酸钾、氯化铵 + 亚硝酸钠, 氮的初始添加量为 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 混合氮源系统中氮的投加比例分别为 2:1、1:1 和 1:2。

将活化后处于对数增长期的菌液按 2% 的接种量接入盛有高温灭菌后的 300 mL 培养基中, 置于恒温气浴振荡器 (转速 160 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 中, 28℃ 培养, 定时取样, 测定测试液中 D_{600} 、氨氮、亚硝态氮和硝态氮的浓度变化。

1.6 分析方法

氨氮: 纳氏试剂分光光度法; 亚硝态氮: N-(1-萘基)乙二胺分光光度法; 硝态氮: 麝香草酚分光光度法; 菌体生长量: 测定菌液在 600 nm 波长时的吸光度值 (D_{600}), 实验中对氨氮、亚硝态氮、硝态氮浓度以及菌体生长量 (D_{600}) 的测定均采用 UV 5200 紫

外/可见分光光度计进行. pH 和 ORP 使用 WTW pH/Oxi340i/SET 测定. 脱氮率计算方法如下:

$$R = (1 - c_T / c_1) \times 100\% \quad (1)$$

$$V = (c_1 - c_T) / t \quad (2)$$

式中, R 为氮的去除率, c_T 为终态氮浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), c_1 为初始氮浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), V 为氮的去除速率 [$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$], t 为时间.

2 结果与分析

2.1 菌株形态与生理生化鉴定

菌株 y3 在固体培养基上的菌落形态如图 1(a) 所示, 菌落呈乳白色, 不透明, 表面干燥粗糙, 边缘整齐, 紧贴在培养基表面, 易挑取. 菌体的扫描电镜照

片如图 1(b) 所示, 菌株 y3 为长杆菌, 大小约为 $2 \mu\text{m} \times 0.3 \mu\text{m}$, 无芽孢和鞭毛. 对菌株 y3 生理生化鉴定的结果表明, 该菌为不动杆菌, 氧化酶、水解酶甲基红实验、吲哚实验均呈阴性. 菌株 y3 的生理生化鉴定结果见表 1.

2.2 菌株 16S rRNA 序列测定及系统发育分析

将获得的菌株 y3 的 16S rRNA 基因序列(长度为 1 352 bp, 登录号为: KR559931) 提交至 GenBank 中, 经 Blast 检索分析, 应用 MEGA 6.0 软件, 以 Neighbor-joining 法绘制系统发育树, 结果如图 2 所示. 菌株 y3 与多株 *Pseudomonas stutzeri* 的同源性达 98%, 可初步判定菌株 y3 为假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.).

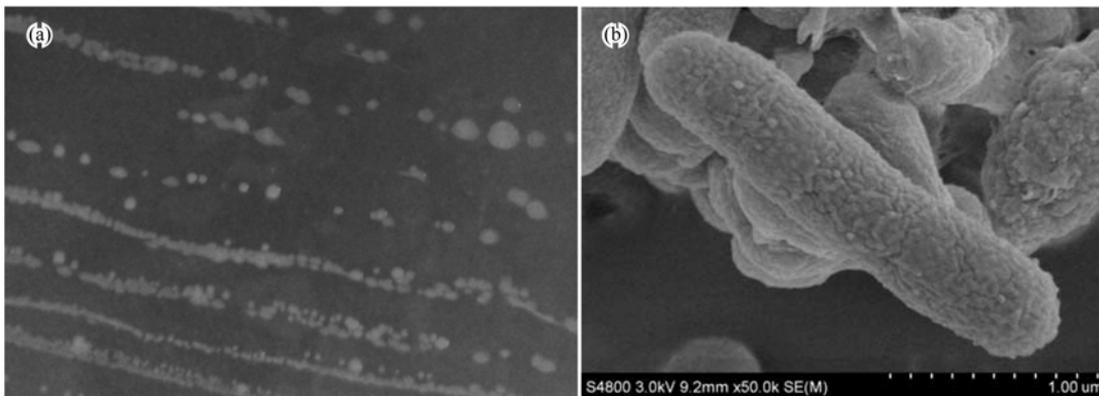


图 1 菌株 y3 的形态特征

Fig. 1 Phylogenetic tree of strain y5 based on the homology of 16S rRNA gene sequences

表 1 菌株 y3 的生理生化特征

代号	底物	反应	结果
ODC	鸟氨酸	脱羧酶	-
LDC	赖氨酸	脱羧酶	-
MR	葡萄糖	甲基红实验	-
CEL	纤维糖	发酵氧化	-
SOR	山梨醇	发酵氧化	-
ADO	戊五醇	发酵氧化	-
RHA	鼠李糖	发酵氧化	-
XYL	木糖	发酵氧化	-
SUC	蔗糖	发酵氧化	-
MAL	丙二盐	碳源利用	-
MAN	甘露醇	发酵氧化	-
ARA	阿拉糖	发酵氧化	-
IND	色氨酸	吲哚产生	-
ESC	七叶苷	水解酶	-
MOT	动力	悬滴法	-

2.3 菌株脱氮特性影响因素研究

2.3.1 碳源对菌株脱氮特性的影响

从图 3 中可以看出, 菌株 y3 在以乙酸钠、丁二

酸钠、柠檬酸三钠以及葡萄糖为唯一碳源时, 20 h 后氨氮的去除率 (R) 均在 55% 以上, 硝酸盐氮的去除率均在 95% 以上, 亚硝酸盐的累积量甚微. 碳源为乙酸钠、柠檬酸三钠和葡萄糖时, D_{600} 均在 0.80 以上. 其中碳源为柠檬酸三钠时, 脱氮效率最高, NH_4^+ -N 的降解率为 77.75%, NO_3^- -N 的降解率为 99.54%, 均高于以乙酸钠、葡萄糖或丁二酸钠为碳源的情况. 可见菌株 y3 的最佳碳源为柠檬酸三钠.

2.3.2 初始 pH 对菌株脱氮特性的影响

如图 4 所示, pH 范围在 6.0 ~ 8.0 之间时, NO_3^- -N 的降解率均在 97% 以上, NO_2^- -N 的累积量很少. pH 范围在 6.5 ~ 8.0 之间时, NH_4^+ -N 的降解率均在 91% 以上, D_{600} 值均在 0.98 以上. pH = 7.0 时, NO_3^- -N 的降解率最高为 99.92%, NH_4^+ -N 的降解率最高为 98.46%, D_{600} 值也是最高为 1.25. 菌株 y3 的较适宜的 pH 范围是 6.5 ~ 8.0, 最适 pH 值为 7.0.

2.3.3 C/N 对菌株脱氮特性的影响

由图 5 可见, 当 C/N \leq 13 时, 随着比值得升高,

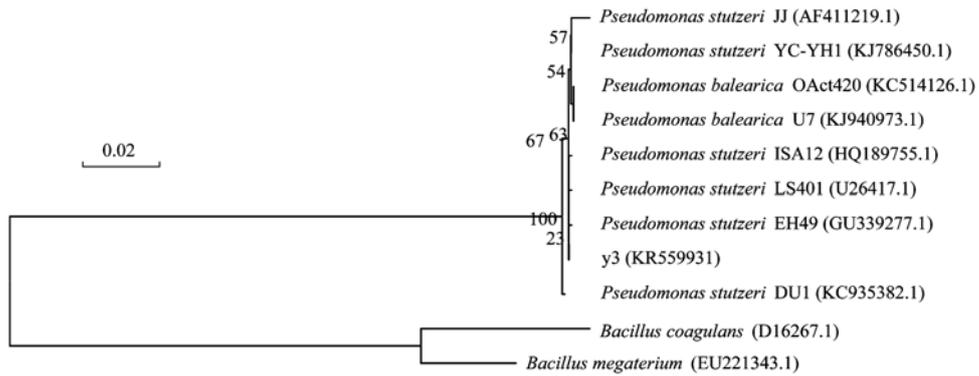


图 2 基于 16S rRNA 基因序列同源性构建的菌株 y3 的系统发育树

Fig. 2 Effect of carbon resource on the growth and nitrogen removal reaction of strain y3

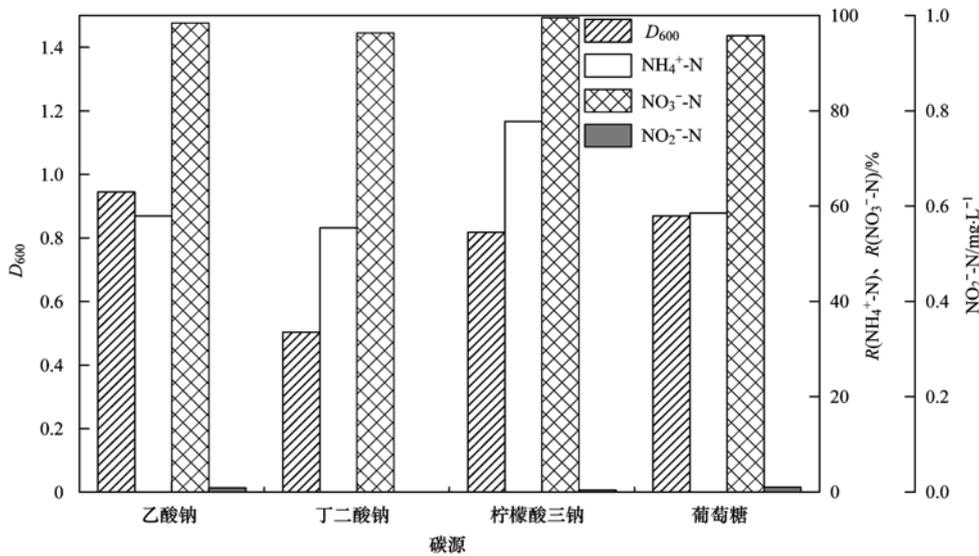


图 3 碳源对菌株 y3 生长和脱氮反应的影响

Fig. 3 Effect of pH on the growth and nitrogen removal reaction of strain y3

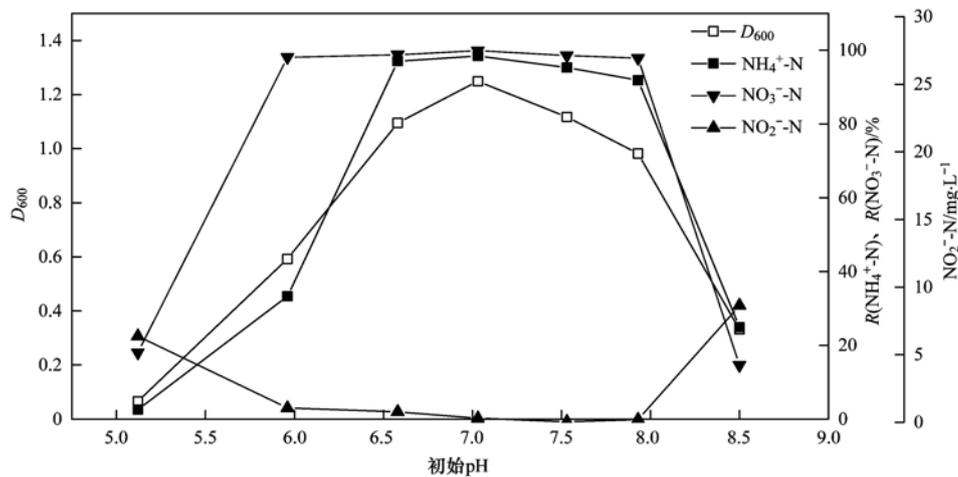


图 4 不同 pH 对菌株 y3 生长和脱氮反应的影响

Fig. 4 Effect of C/N ratio on the growth and nitrogen removal reaction of strain y3

菌株的生长量和脱氮效率升高. 当 C/N = 13 时, D_{600} 达到最大值为 1.30, 氨氮和硝态氮的降解率也

达到最大值分别为 99.21% 和 96.92%. 比值继续增加, 脱氮效率反而下降. C/N 范围在 9 ~ 17 时,

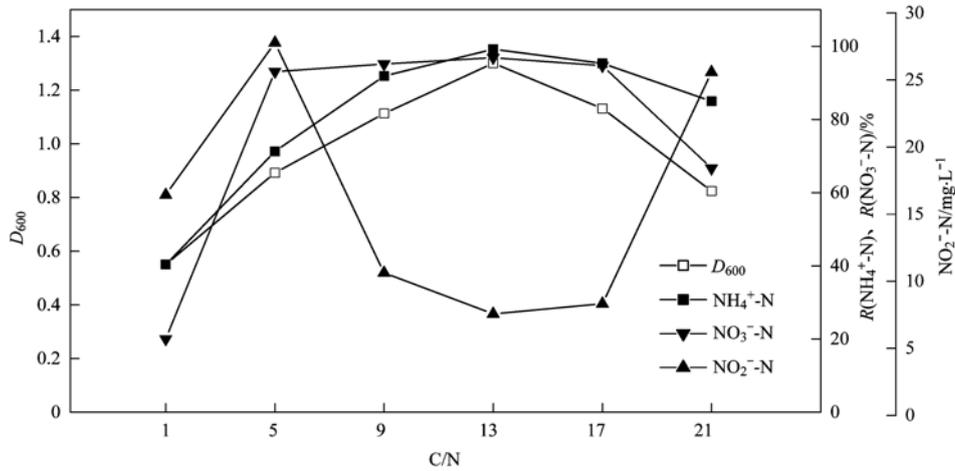


图5 不同 C/N 对菌株 y3 生长和脱氮反应的影响

Fig. 5 Effects of C/N ratio on the growth and nitrogen removal reaction of strain y3

NO₃⁻-N 的降解率在 94% 以上, NH₄⁺-N 的降解率均在 91% 以上, D₆₀₀ 均在 1.11 以上, 且 NO₂⁻-N 的累积量很少. 菌株 y3 的最佳 C/N 为 13.

2.4 异养硝化-好氧反硝化特性研究

2.4.1 菌株异养硝化特性

如图 6 所示, 以 NH₄Cl 为唯一氮源时, 0 ~ 10 h 细菌处于适应期, NH₄⁺-N 的浓度由 142.99 mg·L⁻¹ 降至 139.89 mg·L⁻¹, 只有微量的降解, 硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的累积量甚微. 菌株于 10 h 进入对数生长期, NH₄⁺-N 开始快速降解, 到 20 h 时, NH₄⁺-N 的浓度降至 1.87 mg·L⁻¹, 去除率达 98.69%, 到 22 h 时, 降解完全. 氨氮降解过程中没有硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的累积, 菌体的生长量达到 1.94.

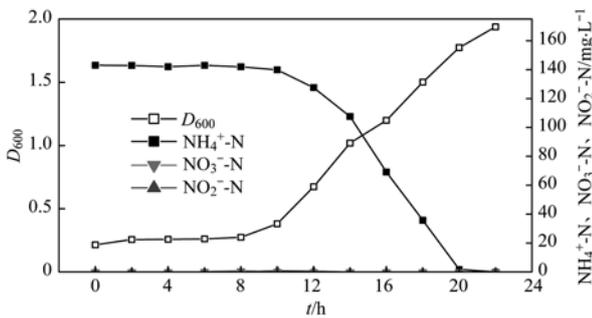


图6 菌株 y3 的异养硝化过程

Fig. 6 Process of heterotrophic nitrification of strain y3

2.4.2 菌株好氧反硝化特性

图 7 为分别以 KNO₃ 和 NaNO₂ 为唯一氮源时菌株 y3 的好氧反硝化特性的测试结果. 从图 7(a) 可见, 以 KNO₃ 为唯一氮源时, 0 ~ 14 h 细菌处于适应期, NO₃⁻-N 的浓度由 144.57 mg·L⁻¹ 降至 140.98 mg·L⁻¹. 14 h 后菌株进入对数增长期, 但增长速度

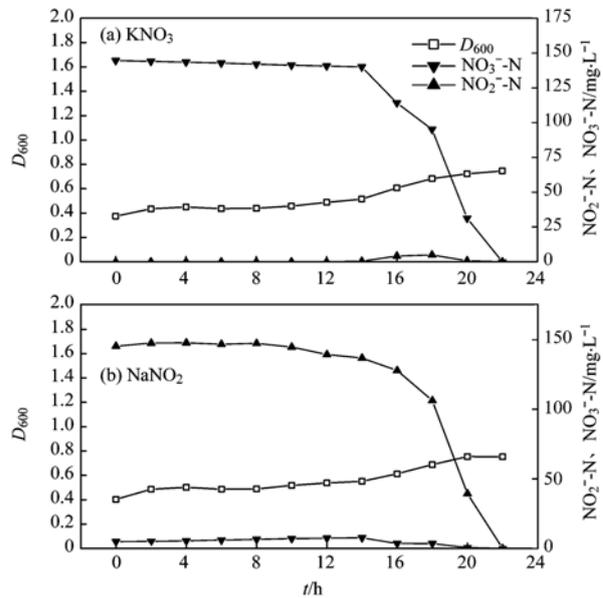


图7 菌株 y3 的好氧反硝化过程

Fig. 7 Process of aerobic denitrification of strain y3

非常缓慢, D₆₀₀ 最大只有 0.74. NO₃⁻-N 开始快速降解, 反应到 20 h 时, NO₃⁻-N 的浓度降至 31.25 mg·L⁻¹, 去除率达 78.38%. 到 22 h 时, 降解完全. 整个过程中, NO₂⁻-N 的累积量较少, 18 h 时达到最大累积量, 仅为 4.95 mg·L⁻¹.

如图 7(b) 所示, 以 NaNO₂ 为唯一氮源时, 0 ~ 14 h 细菌处于适应期, NO₂⁻-N 的浓度由 145.42 mg·L⁻¹ 降至 136.83 mg·L⁻¹. 之后进入对数增长期, 菌体的增殖速度同样缓慢, D₆₀₀ 最大只有 0.75. NO₂⁻-N 开始快速降解, 反应到 20 h 时, NO₂⁻-N 的浓度降至 39.33 mg·L⁻¹, 去除率达 72.95%. 到 22 h 时, 降解完全. 整个过程中, 几乎没有 NO₃⁻-N 的累积.

图 8 所示为在不同比例混合 KNO_3 和 NaNO_2 的系统中菌株 y3 的好氧反硝化特性. 0 ~ 12 h 内为细菌生长的适应期, 12 ~ 20 h 为细菌生长的对数增长期, 20 ~ 24 h 为细菌生长的稳定期. 同时存在硝酸盐和亚硝酸盐时, 菌株的生长速率和脱氮效率均有提高. 反应到 20 h 时, NO_3^- -N: NO_2^- -N 分别为 2: 1、1: 1 和 1: 2 的系统中, D_{600} 分别为 1.45、1.50 和 1.49, 脱氮率分别为 99.56%、99.75% 和 99.41%, 均高于以硝酸钾和亚硝酸钠为唯一氮源的系统.

系统中共存的硝酸盐和亚硝酸盐, 对彼此的还原均有促进作用. 到 20 h 时, NO_3^- -N: NO_2^- -N 分别为 2: 1、1: 1 和 1: 2 的系统中, 硝酸盐的去除率分别为 99.44%、99.51% 和 98.32%, 亚硝酸盐的去除率分别为 99.79%、100% 和 100%, 均高于以硝酸钾和亚硝酸钠为唯一氮源的系统.

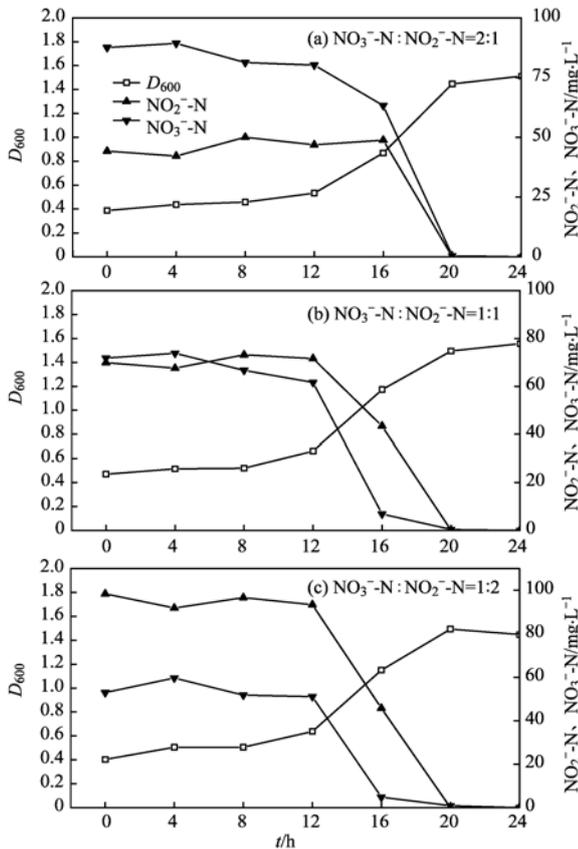


图 8 混合氮源系统内菌株 y3 的好氧反硝化过程
Fig. 8 Process of aerobic denitrification of strain y3 in systems with mixed nitrogen sources

2. 4. 3 菌株异养硝化-好氧反硝化特性

以不同比例混合氨氮和硝酸氮的培养液 测试菌株 y3 的异养硝化-好氧反硝化脱氮特性实验结果如图 9 所示. NH_4^+ -N: NO_3^- -N 分别为 2: 1、1: 1、1: 2 时, D_{600} 的最大值分别为 1.51、1.32 和 0.99, 均低于

以铵盐为唯一氮源的情况, 高于以硝酸盐为唯一氮源的情况. 反应进行 20 h, NH_4^+ -N: NO_3^- -N 分别为 2: 1、1: 1、1: 2 的系统内, 脱氮率均为 100%, 均高于以铵盐、硝酸盐为唯一氮源的情况.

系统中共存铵盐和硝酸盐时, 对彼此的降解有促进作用. 反应到 20 h, NH_4^+ -N: NO_3^- -N 分别为 2: 1、1: 1、1: 2 的系统内, 氨氮和硝态氮的降解效率均达到 100%, 均高于以铵盐、硝酸盐为唯一氮源的情况. 反应过程中, 检测到亚硝酸盐的积累, 最大累积量分别为 24.18、47.55 和 56.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 可见, 系统中硝酸盐所占的比例越大, 亚硝酸盐的累积量越多.

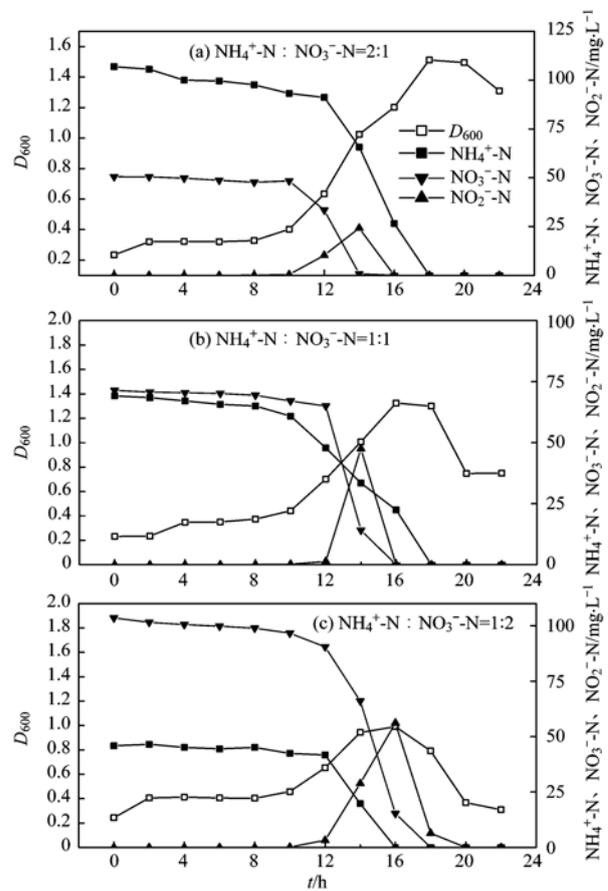


图 9 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 混合氮源系统下菌株 y3 的脱氮过程
Fig. 9 Process of nitrogen removal of strain y3 in the NH_4^+ -N and NO_3^- -N systems

图 10 所示为 NH_4Cl 和 NaNO_2 共存时菌株 y3 的异养硝化-好氧反硝化特性. 从中可以看出, NH_4^+ -N: NO_2^- -N 分别为 2: 1、1: 1、1: 2 时, D_{600} 的最大值分别为 1.78、1.52 和 1.29, 均低于以铵盐为唯一氮源的情况, 高于以亚硝酸盐为唯一氮源的情况. 可见系统中的氨氮促进细菌的增殖, 氨氮含量越高, 菌株对数增长时间越长, 菌体的生长量越大. 反应

至 20 h 时, 菌株的脱氮率分别为 90.43%、92.79% 和 99.96%, 均高于以亚硝酸盐为唯一氮源的情况。

系统中共存的铵盐对亚硝酸盐的还原有促进作用, 反应 20 h 后, 各系统内 NO_2^- -N 的去除率均在 99% 以上。而亚硝酸盐的存在对氨氮的氧化产生一定的抑制, NH_4^+ -N: NO_2^- -N 分别为 2:1 和 1:1 时, NH_4^+ -N 的去除率分别为 85.90% 和 85.67%, 低于以氯化铵为唯一氮源的情况。反应过程中, 几乎没有硝酸盐的累积, 亚硝酸盐的浓度也没有明显的上升。

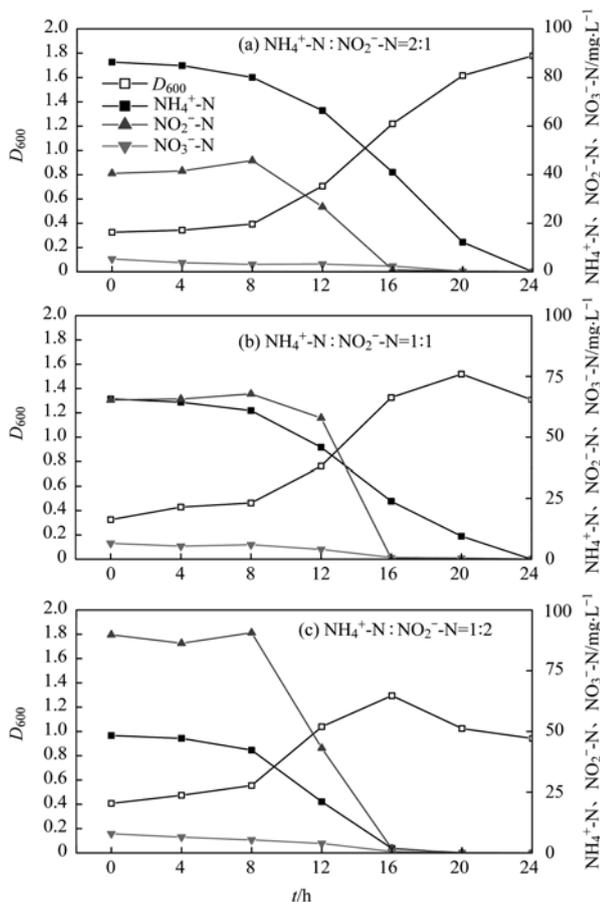


图 10 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 混合氮源系统下菌株 y3 的脱氮过程

Fig. 10 Process of nitrogen removal of strain y3 in the NH_4^+ -N and NO_2^- -N systems

3 讨论

目前已被筛选出来的 HN-AD 菌主要有副球菌属 (*Paracoccus*)^[4]、假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.)^[5]、芽孢杆菌属 (*Bacillus* sp.)^[6]、不动杆菌属 (*Acinetobacter* sp.)^[7] 等, 主要适用于低盐度废水的处理。而本实验从胶州湾海底沉积物中分离筛选出 1 株具有高效 HN-AD 能力的海洋菌株 y3, 适用于高盐度废水的生物处理。通过形态学观察、生理生化鉴定菌及 16S rRNA 基因序列测定和系统发育分

析, 确定该菌株为假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.)。

碳源除了支持细菌生长外, 还为菌株的 HN-AD 过程提供电子和能量。Richardson 等^[8] 在对菌株 *Thiosphaera pantotropha* 的研究中发现, 碳源对周质硝酸盐还原酶的活性有很大的影响。韩永和等^[9] 对耐盐高效好氧反硝化细菌 A-13 的研究结果显示, 该菌的最适碳源为丁二酸钠。宋宇杰等^[10] 的研究发现菌株 *Acinetobacter* sp. Y1 的最佳碳源为柠檬酸钠和乙酸钠。方海洋等^[11] 对 *Alcaligenes faecalis* No. 4 的研究发现该菌能利用柠檬酸钠和乙酸钠作为唯一碳源, 以柠檬酸钠为碳源时脱氮活性最高。本实验的研究发现, 菌株 y3 在以乙酸钠和葡萄糖为碳源时, 菌体生长最好; 以柠檬酸三钠为碳源时, 菌株对氨氮的去除率最高为 77.75%, 对硝酸盐氮的去除率为 99.54%, 菌株 y3 的最佳碳源为柠檬酸三钠。这说明不同种属的菌株对碳源的利用状况有所不同, 不同碳源因其结构和分子量的差异对菌株的生长和脱氮效果的影响也不同, 分子量较小的碳源更容易为细菌利用, 脱氮效率也较高。此外, 许多研究发现, 在一定的碳氮比范围内, 碳源浓度越高, 菌株的脱氮效率越高。吴建江等^[12] 筛选出的假单胞菌 XS76 的最佳 C/N 为 15, 相比 C/N = 10 时, 氨氮的最终去除率有大幅提高。超过一定的范围, 碳源浓度继续增加对菌株的生长和脱氮效率没有明显的贡献, 甚至有下降的趋势^[13~15]。本研究的结果与之相似, C/N < 13 时, 随着比值的升高, 菌株的生长量和脱氮效率升高。当 C/N = 13 时, 菌株的生长量达到最大值为 1.30, 氨氮和硝态氮的降解率也达到最大值分别为 99.21% 和 96.92%。随着 C/N 继续增加, 系统内有机物增加, 对细菌的生长以及酶的活性产生一定的抑制作用, 因此菌株的生长量和脱氮效率呈下降趋势。

pH 值对细菌的生长及其酶的活性有直接的影响, pH 值过高或过低都会抑制细菌的生长和脱氮效率。许多研究发现, HN-AD 菌适宜的 pH 环境为中性或弱碱性^[16~18]。李卫芬等^[19] 研究发现, 菌株 F1 在中性 (pH = 7) 或偏碱 (pH = 7.5) 的条件下, 菌体生长较好, 脱氮效率较高, 在酸性 (pH ≤ 6.5) 或强碱 (pH ≥ 8) 条件下, 菌体生长滞缓, 脱氮效率低下。黄廷林等^[20] 研究发现贫营养菌株 A14 在 pH 为 7 时, 反硝化效果最佳。本研究与现有报道一致, pH 范围在 6.5 ~ 8.0 之间时, 菌株 y3 的生长较好, NH_4^+ -N 的降解率在 91% 以上, NO_3^- -N 的降解率 97% 以上。

目前人们所认可的异养硝化途径主要有两种,

是由 Richardson 等^[21] 提出脱氮假想途径(图 11)。氨氮经氨单加氧酶(AMO)氧化为羟氨后,在羟氨氧化酶(HAO)的催化作用下有两条不同的氧化途径,一种是氧化为 NO_2^- 、 NO_3^- ; 另一种是 NH_2OH 直接转化为 N_2O 、 N_2 。相比于其他氮源,在以氯化铵为底物时,菌株 y3 的增长速率最大,且在氨氮降解的过程中几乎检测不到 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N, 因此推测该海洋 HN-AD 菌株 y3 的异养硝化途径属于第二种。

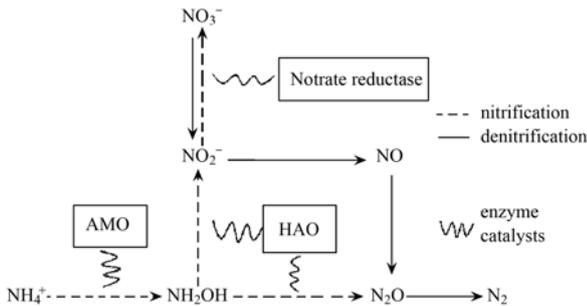


图 11 Richardson 提出的脱氮假想途径^[21]

Fig. 11 Hypothetic nitrogen removal pathway proposed by Richardson

在以硝酸钾或亚硝酸钠为唯一氮源时,经过 22 h 反应后,硝酸盐氮和亚硝酸盐氮分别去除完全,说明菌株 y3 均能够利用硝酸盐和亚硝酸盐进行代谢,与异养硝化菌 *P. stutzeri* YZN-001^[22]、*P. mendocina* TN-05^[23] 等一致。硝酸盐的还原过程中,亚硝酸盐的积累量较少,是因为在硝酸盐还原酶的刺激下,菌株的亚硝酸盐还原酶具有很高的反应活性,使硝酸盐还原产生的亚硝酸盐被迅速的还原,这与肖继波等^[24] 的研究结果类似。以亚硝酸盐为唯一氮源时,硝酸盐的累积量很少,说明亚硝酸盐在亚硝酸盐还原酶的作用下直接还原为氮的气态产物溢出反应系统。与梁贤等^[25] 所研究的 HN-AD 菌 YL 具有相似亚硝酸盐降解特性。当硝酸盐和亚硝酸盐共存时,能促进菌株的生长和脱氮效率。硝酸盐还原酶的产生刺激了亚硝酸盐还原酶的活性,同时亚硝酸盐还原酶也促进了硝酸盐还原酶的活性,使得菌株 y3 对硝酸盐和亚硝酸盐的反硝化能力提高。

NH_4Cl 和 KNO_3 为氮源或者 NH_4Cl 和 NaNO_2 为氮源时,菌株的好氧反硝化效率高于单一氮源的情况,因为氨氮的存在促进菌体细胞的生长,使得硝酸盐还原酶和亚硝酸盐还原酶的合成加快,活性加强,从而提高了菌株的好氧反硝化速率。在 NH_4Cl 和 KNO_3 为氮源的混合系统内,反应进行到 18h 时,氨氮几乎降解完全,相比单一氮源系统,异养硝化效率提高。这是因为异养硝化过程耗能,而好氧反硝

化过程产能,硝态氮的反硝化为异养硝化过程提供一定的能量支持,使得菌株的异养硝化进程加快。该海洋 HN-AD 菌株具有较好的同步异养硝化好氧反硝化功能,可以实现高盐废水的同步、高效脱氮除碳。

4 结论

(1) 从胶州湾海底沉积物中筛选出 1 株海洋性 HN-AD 菌 y3,通过形态学观察、生理生化鉴定以及 16Sr RNA 序列测定和系统发育分析,确定该菌属于假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.)。

(2) 菌株 y3 的最佳碳源为柠檬酸三钠,最适宜 pH 为 7.0,最佳碳氮比为 13。

(3) 菌株 y3 对氨氮、硝酸盐和亚硝酸盐均能代谢,其中以氨氮为底物时,菌株的增殖速率最大,硝酸盐和亚硝酸盐的存在对菌株的生长均有抑制。

(4) 菌株 y3 的异养硝化和好氧反硝化作用主要发生在对数增长期。氨氮能促进菌株的好氧反硝化作用,硝酸盐的存在有利于菌株的异养硝化作用的进行,而亚硝酸盐会对菌株的异养硝化产生抑制作用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘天琪,金若菲,周集体,等. 异养硝化-好氧反硝化菌 ADN-42 的脱氮特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 989-996.
- [4] 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.
- [5] 赵丹,于德爽,李津,等. 菌株 ZD8 的分离鉴定及其异养硝化和缺氧/好氧反硝化特性研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 3007-3016.
- [6] 尹明锐,汪莘,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.
- [7] 苏俊峰,黄廷林,李倩,等. 应用于景观水体异养硝化细菌的筛选鉴定及效果研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(14): 8526-8528.
- [8] Richardson D J, Ferguson S J. The influence of carbon substrate on the activity of the periplasmic nitrate reductase in aerobically grown *Thiosphaera pantotropha* [J]. Archives of Microbiology, 1992, 157(6): 535-537.
- [9] 韩永和,章文贤,庄志刚,等. 耐盐好氧反硝化菌 A-13 菌株

- 的分离鉴定及其反硝化特性[J]. 微生物学报, 2013, **53**(1): 47-58.
- [10] 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.
- [11] 方海洋, 王智, 李建华, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌粪产碱杆菌的脱氮特性[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(2): 983-988.
- [12] 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.
- [13] Robertson L A, Kuenen J G. *Thiosphaera pantotropha* gen. nov. sp. nov., a facultatively anaerobic, facultatively autotrophic sulphur bacterium[J]. Journal of General Microbiology, 1983, **129**(9): 2847-2855.
- [14] 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.
- [15] 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 等. 1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性[J]. 环境科学, 2013, **35**(6): 2341-2348.
- [16] 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.
- [17] 王弘宇, 马放, 苏俊峰, 等. 好氧反硝化菌株的鉴定及其反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1548-1552.
- [18] 高喜燕, 刘鹰, 郑海燕, 等. 一株海洋好氧反硝化细菌的鉴定及其好氧反硝化特性[J]. 微生物学报, 2010, **50**(9): 1164-1171.
- [19] 李卫芬, 傅罗琴, 邓斌, 等. 1 株好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2403-2408.
- [20] 黄廷林, 张丽娜, 张海涵, 等. 一株贫营养异养硝化-好氧反硝化菌的筛选及脱氮特性[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(1): 113-120.
- [21] Richardson D J, Wehrfritz J M, Keech A, et al. The diversity of redox proteins involved in bacterial heterotrophic nitrification and aerobic denitrification [J]. Biochemical Society Transactions, 1998, **26**(3): 401-408.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 肖继波, 江惠霞, 褚淑祎. 不同氮源下好氧反硝化菌 *Deftluibacter lusatiensis* str. DN7 的脱氮特性[J]. 生态学报, 2012, **32**(20): 6463-6470.
- [25] 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.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 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	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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行