

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

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

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区VOCs特征及O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的A ² O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
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	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N ₂ O产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)	

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

孙庆花¹, 于德爽¹, 张培玉¹, 林学政², 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: 以海水为基质, 采用传统的微生物分离纯化方法, 从海底沉积物中分离筛选得到 1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化细菌 y5, 经形态、生理生化特性以及 16S rRNA 基因序列分析, 鉴定该菌为克雷伯氏菌 (*Klebsiella* sp.). 对其脱氮特性及影响因素进行了研究, 结果表明, 菌株 y5 的最佳碳源为柠檬酸三钠, 最适 pH 值为 7.0, 最适 C/N 为 17. 菌株均能以 NH_4Cl 、 NaNO_2 和 KNO_3 为唯一氮源进行反应, 36 h 的去除率分别为 77.07%、64.14% 和 100%. 3 种氮源共存时, 36 h 的去除率达到 100%. 表明菌株 y5 在高盐废水中具有独立高效的异养硝化和好氧反硝化作用.

关键词: 异养硝化; 好氧反硝化; 海洋环境; 克雷伯氏菌; 混合系统; 脱氮特性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0647-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.033

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

SUN Qing-hua¹, YU De-shuang¹, ZHANG Pei-yu¹, LIN Xue-zheng², 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 strain named y5 was isolated from marine environment by traditional microbial isolation method using seawater as medium. It was identified as *Klebsiella* sp. based on the morphological, physiological and 16S rRNA sequence analysis. The experiment results showed that the optimal carbon resource was sodium citrate; the optimal pH was 7.0; and the optimal C/N was 17. The strain could use NH_4Cl , NaNO_2 and KNO_3 as sole nitrogen source, and the removal efficiencies were 77.07%, 64.14% and 100% after 36 hours, respectively. The removal efficiency reached 100% after 36 hours in the coexistence of NH_4Cl , NaNO_2 and KNO_3 . The results showed that the strain y5 had independent and efficient heterotrophic nitrification and aerobic denitrification activities in high salt wastewater.

Key words: heterotrophic nitrification; aerobic denitrification; marine environments; *Klebsiella* sp.; heterotrophic nitrification-aerobic denitrification system; characteristics of nitrogen removal

异养硝化-好氧反硝化 (heterotrophic nitrification-aerobic denitrification, HN-AD) 菌是一类能够在有机物存在的条件下将氨氮氧化、在溶解氧存在条件下将亚硝态氮、硝态氮代谢为氮气的微生物. 早在 1983 年, Robertson 等^[1]就从脱硫脱氮污水处理系统中分离出 1 株具有 HN-AD 能力的副球菌 *Paracoccus pantotrophus* ATCC 35512 (曾被命名为 *Thiosphaera pantotropha*). 此后, 具有此特性的菌株被从不同环境中不断分离出来^[2~9]. 由于异养硝化-好氧反硝化菌具有生长快速、耐有机负荷、耐溶解氧、脱氮效率高等特点, 在污水处理中具有潜在的优势, 成为当今的研究热点.

目前, 许多国家和地区都在加快对海水的直接利用以缓解所面临的缺水问题. 海水直接利用产生的废水盐度普遍较高, 而高盐环境会导致微生物的

生长代谢受到抑制, 脱氢酶活性降低, 较高的渗透压还会引起微生物细胞的质壁分离, 导致细胞破裂死亡^[10]. 国内外对 HN-AD 菌的研究多集中在生活污水的处理中, 对同时具有耐盐和 HN-AD 功能的菌株的研究鲜见报道.

本研究从胶州湾海底沉积物中分离筛选得到 1 株海洋 HN-AD 菌 y5, 对其进行了鉴定. 探讨了高盐环境下不同有机碳源、初始 pH 值以及不同 C/N 值对该菌株生长及其脱氮性能的影响. 通过研究其在

收稿日期: 2015-07-13; 修订日期: 2015-09-16

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

高盐单一或混合氮源条件下的脱氮特性,以期丰富生物脱氮理论并且为开发高盐废水的生物处理工艺提供一定的理论和技术支持.

1 材料与方法

1.1 菌株来源和培养基

本实验所用菌株是从胶州湾海底沉积物中分离筛选得到.

菌株分离和生长培养基: KH_2PO_4 0.2 g, K_2SO_4 0.1 g, NH_4Cl 0.5 g, KNO_3 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 7.0~8.0. 固体培养基加入 2% 琼脂粉.

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, 固体培养基加入 2% 琼脂粉.

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_3 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 菌株的鉴定

1.2.1 细菌形态观察和生理生化实验

将菌株接种至 2216E 海水固体培养基上, 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) 对菌株进行生化鉴定.

1.2.2 16S rRNA测序及系统发育分析

接种一环菌株至液体海水 2216E 培养基, 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. 通过正向引物 27F: 5'-AGAGTTTGATCCTGGTCAG-3', 反向引物 1492R: 5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3' 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 $\times$ *Tap* PCR MasterMix 25 μL ; 细菌 DNA 模板 2 μL ; ddH_2O 21 μL .

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 MEGA6.0 软件, 以 Neighbor-joining 法构建系统发育树.

1.3 菌株脱氮特性影响因素研究

如表 1 所示, 选择的因素为碳源、pH、C/N 三项, 以分离培养基为基础, 调节培养基的初始 pH 值为 7.0 (2 号除外), C/N 为 10 (3 号除外), 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. 置于气浴恒温振荡器 (转速 160 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 中, 28℃ 培养 24 h 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.

表 1 菌株 y5 生长条件实验设置

Table 1 Experimental setting of strain y5 growth conditions

序号	因素	氮源	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	变量
1	碳源	$\text{NH}_4\text{Cl}:\text{KNO}_3=1:1$	100	碳源分别为乙酸钠、丁二酸钠、柠檬酸三钠、蔗糖和葡萄糖
2	pH	$\text{NH}_4\text{Cl}:\text{KNO}_3=1:1$	100	初始 pH 值分别为 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0 和 9.5
3	C/N	$\text{NH}_4\text{Cl}:\text{KNO}_3=1:1$	100	C/N 分别为 1、5、9、13、17、21

1.4 菌株脱氮性能实验

以分离培养基为基础, 柠檬酸三钠为碳源, pH = 7.0, C/N 为 17 配制菌株 y5 的高盐脱氮测试液. 分别以氯化铵、亚硝酸钠、硝酸钾为唯一氮源, 研究菌株 y5 的异养硝化作用和好氧反硝化作用. 分别配制含氯化铵 + 亚硝酸钠、氯化铵 + 硝酸钾、氯化铵 + 亚硝酸钠 + 硝酸钾的降解测试液, 研究菌株 y5 在混合氮源系统中的异养硝化-好氧反硝化作用.

将活化后处于对数增长期的菌液 (D_{600} 约为 0.80) 按 2% 的接种量接入盛有高温灭菌后的 300 mL 测试液的 500 mL 三角瓶中, 实验设置 2 个重复, 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, 测定测试液中的菌体的生长量 (D_{600}), 氨氮、亚硝态氮和硝态氮浓度.

1.5 分析方法

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. 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}), 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 形态特征和生理生化特性

菌株 y5 在固体培养基上培养 24 h 后, 菌落大小约为 1.0 ~ 1.5 mm, 呈圆形, 乳白色, 表面光滑, 湿润, 隆起, 不透明, 黏稠, 边缘整齐[如图 1(a)]. 通过扫描电子显微镜观察菌体如图 1(b) 所示, 菌株为短杆菌, 大小为 $0.5 \mu\text{m} \times 0.2 \mu\text{m}$, 无芽孢和鞭毛.

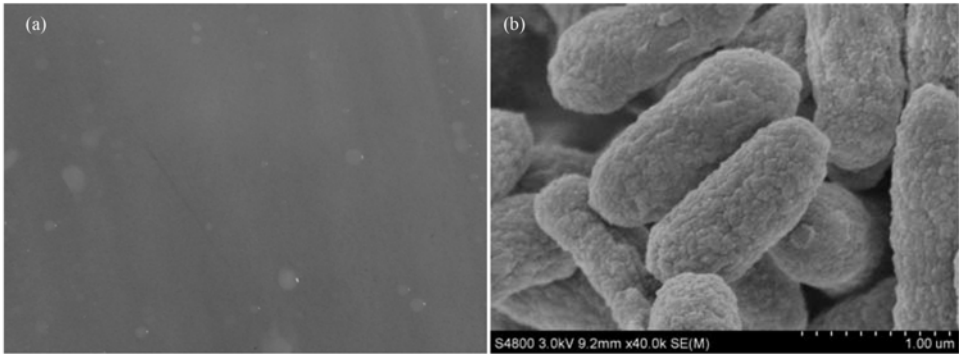


图 1 菌株 y5 的形态特征
Fig. 1 Electronic microscope photograph of strain y5

2.2 16S rRNA 基因序列和系统发育分析

对菌株 y5 测序获得长度为 1363 bp 的部分 16S rRNA 基因序列, 在 GenBank 中的登录号: KP215627. 将所得的基因序列提交至 GenBank 中通过 Blast 检索, 应用 MEGA 6.0 软件, 以 Neighbor-joining 法绘制系统发育树, 如图 2 所示. 菌株 y5 与菌株 *Klebsiella pneumoniae* AUH-BG208 的同源性为 100%, 与多株 *Klebsiella pneumoniae* 同源性达 99%, 结合菌株的形态特征和生理生化特征, 可初步确定菌株 y5 属克雷伯氏菌属 (*Klebsiella* sp.).

2.3 菌株脱氮特性影响因素研究

2.3.1 不同碳源对菌株生长和脱氮特性影响

如图 3 所示, 菌株 y5 在以乙酸钠、丁二酸钠、柠檬酸三钠、葡萄糖和蔗糖为唯一碳源时均能生

对菌株 y5 生理生化鉴定的结果表明, 该菌为不动杆菌, 氧化酶、水解酶反应阳性, 甲基红实验、吲哚实验阴性. 菌株 y5 的生理生化鉴定结果见表 2.

表 2 菌株 y5 的生理生化特征			
Table 2 Physiological and biochemical characteristics of strain y5			
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	-

长. 以蔗糖为唯一碳源时, 菌株 y5 的 D_{600} 值最高, 生长最好, 其次为葡萄糖、柠檬酸三钠. 碳源为柠檬酸三钠时, 菌株 y5 对氨氮的去除效率最高为 71.02%, 对硝态氮的去除率最高为 90.72%. 蔗糖和葡萄糖为碳源时, 对硝态氮的去除率也比较高, 但是系统内有大量的亚硝态氮的积累, 氨氮的去除率也较低. 所以菌株 y5 的最佳碳源是柠檬酸三钠.

2.3.2 不同初始 pH 值对菌株生长和脱氮特性的影响

初始 pH 为培养基灭菌后的 pH, 分别为 4.9、5.4、5.9、6.4、7.0、7.4、8.0、8.4、8.9、9.5. 如图 4 所示, 反应 24 h 以后, 初始 pH 为 6.0 ~ 8.0 时硝态氮的去除率都在 99% 以上, 菌体生长较好. 当 pH 为 7.0 时, 硝态氮的脱除率最大达到 100%, D_{600}

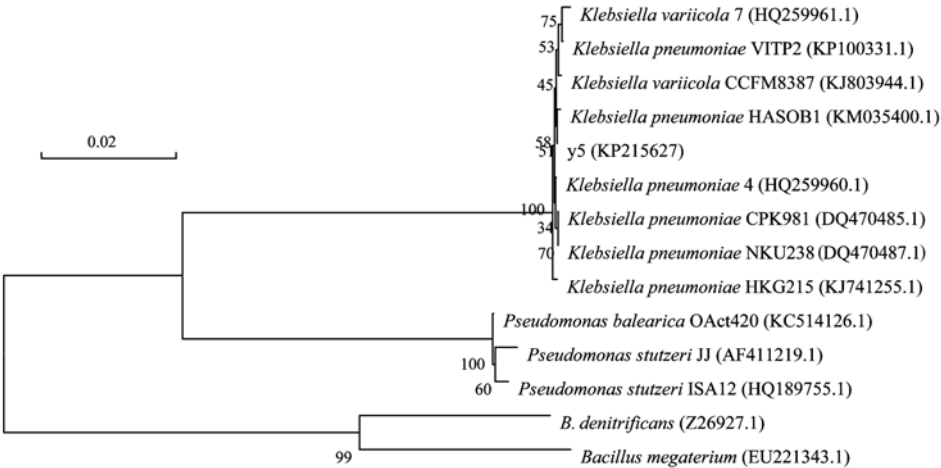


图 2 基于16S rRNA基因序列同源性构建的菌株 y5 的系统发育树
Fig. 2 Phylogenetic tree of strain y5 based on the complete sequence of 16S rRNA gene

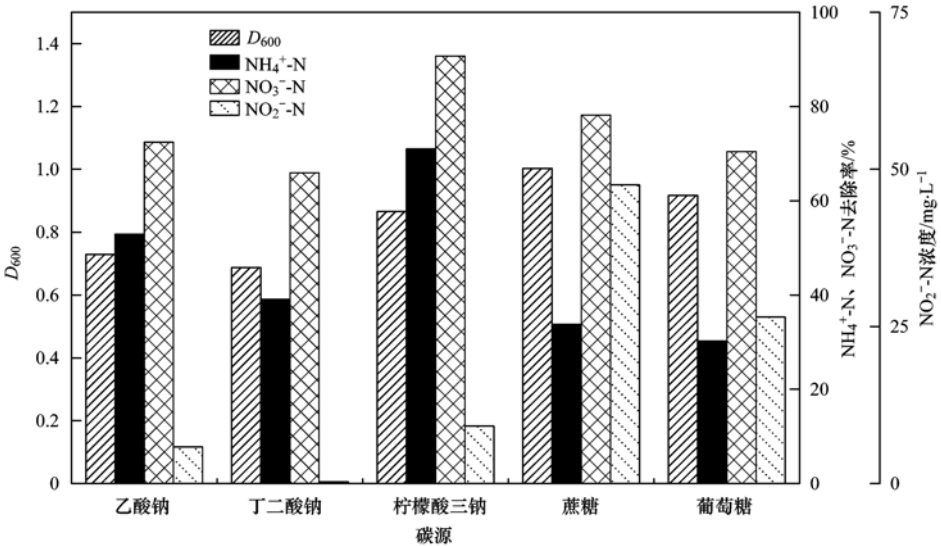


图 3 碳源对菌株 y5 生长和脱氮反应的影响
Fig. 3 Effects of carbon resource on the growth and nitrogen removal reaction of strain y5

值最大为 1.09,亚硝态氮的累积量也较低. pH 为

7.0 ~ 7.5 时,氨氮的去除率都在 60% 以上. 当 pH 为 7.0 时,氨氮的去除率最大为 65.24%. 所以菌株 y5 的最适 pH 为 7.0.

2.3.3 不同碳氮比对菌株生长和脱氮特性的影响

如图 5 所示,随着 C/N 的升高,菌株 y5 的生长量、对氨氮和硝态氮的脱除率也随之升高,当 C/N = 17 时,菌株的生长量达到最大值为 1.09,氨氮和硝态氮的脱除率也达到最大值分别为 99.86% 和 85.88%,之后均有所下降. 当 C/N 比小于 5 时,菌株 y5 的生长量较低,对氨氮和硝态氮的脱除效果也较差. 在 C/N 为 9 ~ 21 的范围内,菌株的反硝化能力均在 97% 以上,当 C/N 为 9 ~ 17 时,氨氮的降解率均在 79% 以上. 菌株 y5 的最佳 C/N 为 17.

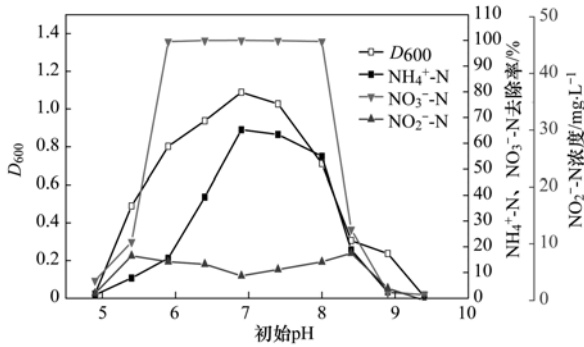


图 4 不同 pH 对菌株 y5 生长和脱氮反应的影响
Fig. 4 Effects of pH on the growth and nitrogen removal reaction of strain y5

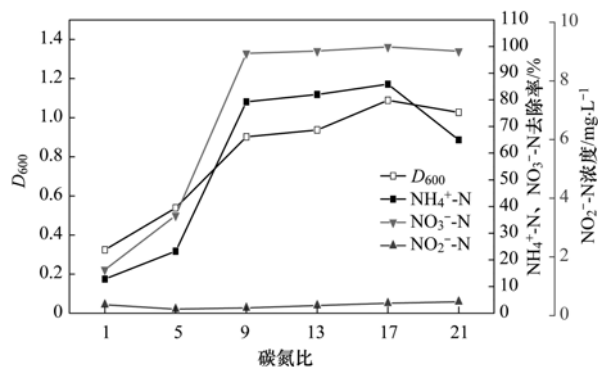


图5 不同 C/N 对菌株 y5 生长和脱氮反应的影响

Fig. 5 Effects of C/N ratio on the growth and nitrogen removal reaction of strain y5

2.4 菌株脱氮性能实验

2.4.1 菌株 y5 的异养硝化能力

如图6所示,以 NH_4Cl 为唯一氮源时,0~9 h 为菌株的生长适应期,菌体从9 h 开始进入对数增长期, D_{600} 最大为 1.32. NH_4^+-N 的浓度由初始的 $100.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经 36 h 反应后,降至 $22.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 77.07%. NH_4^+-N 从 9 h 开始快速去除,平均去除速率为 $2.59 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$,这说明 NH_4^+-N 的去除主要发生在细菌的对数增长期. 反应过程中,几乎检测不到硝酸盐和亚硝酸盐的积累.

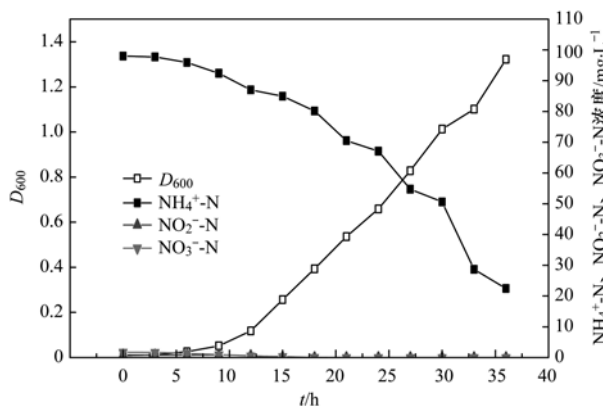


图6 菌株 y5 的异养硝化过程

Fig. 6 Process of heterotrophic nitrification of strain y5

2.4.2 菌株 y5 的好氧反硝化能力

如图7所示,以 NaNO_2 为唯一氮源时,0~12 h 菌株 y5 处于适应期,12 h 以后进入对数增长期, D_{600} 最大为 0.70. NO_2^--N 的浓度由初始的 $189.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经 36 h 反应后,降至 $67.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 64.14%. NO_2^--N 在 15 h 以后进入快速降解阶段,平均降解速率为 $5.21 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 说明菌株 y5 的亚硝酸盐好氧反硝化作用主要发生在对数增长期. 亚硝酸盐的降解过程中,没有明显的氨氮和

硝酸盐氮的累积.

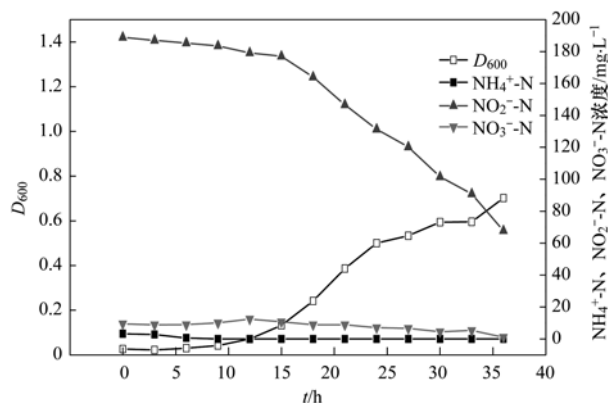


图7 菌株 y5 的亚硝酸盐好氧反硝化过程

Fig. 7 Process of nitrate denitrification of strain y5

如图8所示,以 KNO_3 为唯一氮源时,0~12 h 为菌株 y5 的生长适应期,12 h 以后进入对数增长期, D_{600} 最大为 1.03,在 21~27 h 内菌体的生长处在停滞状态,这是因为亚硝态氮的大量累积对细菌的生长产生了抑制. NO_3^--N 的浓度由初始的 $86.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经 36 h 反应后,降至 0,去除率为 100%. 12~24 h 为 NO_3^--N 的快速降解阶段,平均降解效率为 $6.37 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$,菌株 y5 的好氧反硝化作用主要发生在对数增长期. NO_3^--N 的还原过程中,产生的 NO_2^--N 在 24 h 时累积量最大为 $33.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,到 30 h 时几乎降解完全.

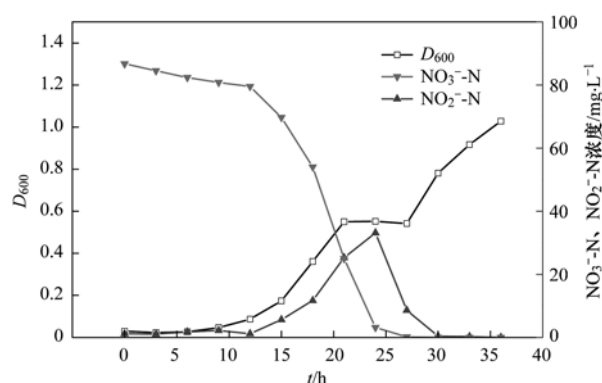


图8 菌株 y5 的硝酸盐好氧反硝化过程

Fig. 8 Process of nitrite denitrification of strain y5

2.4.3 菌株 y5 的异养硝化-好氧反硝化能力

如图9所示,氨氮和亚硝态氮共存时,菌体在 0~12 h 处于生长适应期,从 12 h 开始进入对数增长期, D_{600} 最大为 1.11. NH_4^+-N 的浓度由初始的 $50.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经 36 h 反应后,完全去除. NO_2^--N 的浓度由初始的 $97.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经 36 h 反应后,降至 $19.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 79.50%. NH_4^+-N 从 12 h 开始快

速去除,平均去除速率为 $1.79 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 从 15 h 后开始快速去除,平均去除速率为 $3.72 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 菌株 y5 的异养硝化-亚硝酸盐好氧反硝化作用主要发生在对数增长期. 反应过程中几乎没有硝酸盐的产生.

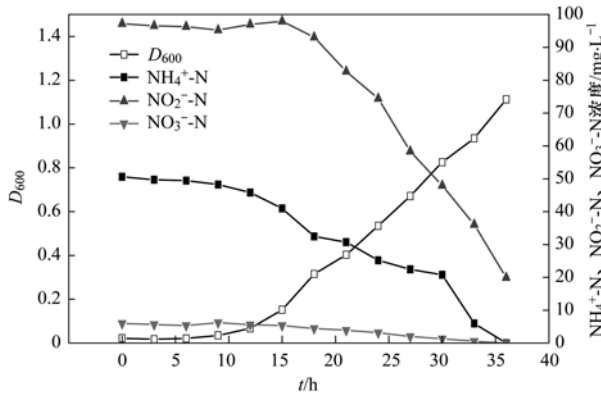


图9 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 混合氮源系统下菌株 y5 的脱氮过程

Fig. 9 Process of nitrogen removal in the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_2^- \text{-N}$ system of strain y5

如图 10 所示,氨氮和硝态氮共存时,菌体在 0 ~ 12 h 处于适应期,从 12 h 进入对数增长期, D_{600} 最大为 1.19. $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度由初始的 $51.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经 33 h 反应后,完全去除,平均去除速率为 $1.57 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度由初始的 $42.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经 30 h 反应后,完全去除. $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的还原主要发生在 15 ~ 21 h, 平均去除速率为 $6.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 在 18 h 时累积量最大为 $29.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 到 27 h 时几乎降解完全.

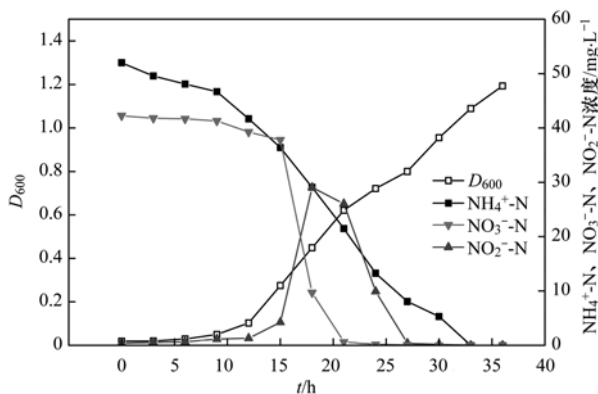


图10 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 混合氮源系统下菌株 y5 的脱氮过程

Fig. 10 Process of nitrogen removal in the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ system of strain y5

如图 11 所示,氨氮、亚硝态氮和硝态氮共存时, 0 ~ 9 h 菌体处于适应期, 9 h 进入对数增长期, D_{600} 最大为 1.10. $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度由 $53.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 经 36

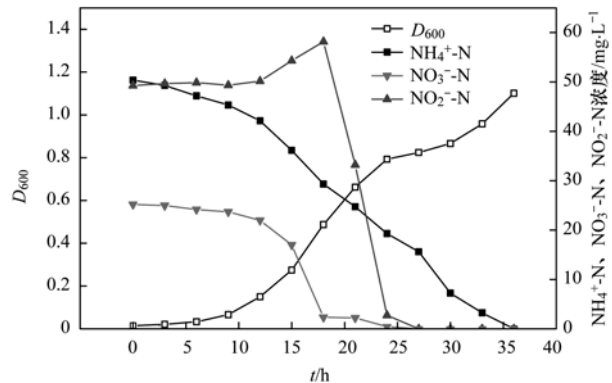


图11 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 混合氮源系统下菌株 y5 的脱氮过程

Fig. 11 Process of nitrogen removal in the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ system of strain y5

h 反应完全去除, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度由 $25.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 经 27 h 反应完全. $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的浓度由 $49.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 18 h 达到最大值为 $58.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 到 27 h 反应完全.

3 讨论

迄今为止,研究者从土壤、污水处理反应器、海洋等环境中分离出的异养硝化-好氧反硝化菌主要包括不动杆菌 (*Acinetobacter*)、假单胞菌 (*Pseudomonas*)、蜡状芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*) 及盐单胞菌 (*Halomonas*) 等^[11]. 本研究从胶州湾深海底泥中分离筛选的菌株 y5 经鉴定为克雷伯氏菌属 (*Klebsiella* sp.), 属于异养硝化-好氧反硝化菌的新菌种, 之前关于克雷伯氏菌属异养硝化-好氧反硝化的研究尚没有报道, 仅见罗霆等^[12] 从甘蔗根系分离出 1 株具有固氮能力的克雷伯氏菌属. 这进一步丰富了异养硝化-好氧反硝化菌的涵盖范围, 也为高盐废水的生物处理提供了新的选择.

有机碳源在菌株的 HN-AD 过程中提供能量和电子, 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. 赵丹等^[13] 研究发现菌株 ZD8 的最佳碳源也为柠檬酸钠. 本实验中, 菌株 y5 在以蔗糖为唯一碳源时, 菌株生长最好, 但是亚硝酸盐的积累量相当高, 以柠檬酸三钠为唯一氮源时, 菌株 y5 生长良好, 脱氮效率最高. 综合考虑, 菌株 y5 的最佳碳源为柠檬酸三钠.

反应体系中的 pH 会直接影响微生物细胞膜的电荷, 进而通过影响微生物对营养物质的吸收来影响菌体的生长^[14]. 过高或过低的 pH 均会导致微生物酶的活性降低或丧失^[15]. 迄今分离出的异养硝化-好氧反硝化菌大多数适宜 pH 范围为中性或偏

碱. 高喜燕等^[16]发现菌株在 pH 为 7.5 时的脱氮率最高,但在过酸(pH < 5.5)或过碱(pH > 9)的条件下,菌株几乎不生长,脱氮率也很低. 黄廷林等^[17]筛选出的贫营养菌株 A14 在 pH 为 7 的条件下,对 NO_3^- 的去除效果最佳. 在本实验中,菌株 y5 的最适 pH 为 7.0.

许多研究结果表明,脱氮效率随着 C/N 的增大而升高,达到一定值后继续增大 C/N,脱氮效率不会有太大变化甚至有一定的下降^[18,19]. 本实验也得到类似的结论,当 C/N 比小于 5 时,菌株 y5 的生长量较低,对氨氮和硝态氮的脱除效果也较差. 碳源不足的情况下氨单加氧酶(AMO)和羟氨氧化酶(HAO)对碳源存在竞争,随着 C/N 的增加,竞争减小,脱氮效率上升. 碳源量增加使细菌的消化性能增强,但过多的碳源会嵌入酶结构中,降低酶的活性,使硝化能力下降^[20]. 菌株 y5 在 C/N 为 9~21 时,具有较高的脱氮效率. 最佳 C/N 为 17, C/N 继续增高,菌株的生长和脱氮效率降低.

目前人们所认可的氨氮的异养硝化途径主要有两种^[21],一种是 NH_3 经 AMO 氧化为 NH_2OH ,再经 HAO 氧化为 NO_2^- 、 NO_3^- ; 另一种是 NH_2OH 直接转化为 N_2O 、 N_2 . 本实验中,以 NH_4Cl 为唯一氮源时,菌株 y5 的增长速率最大,且反应过程中几乎检测不到 NO_3^- -N 的存在,判断菌株 y5 对 NH_4^+ -N 的异养硝化过程为第二种硝化途径,氨氮经 AMO 氧化为羟氨后,羟氨在 HAO 的催化作用下,直接转变为 N_2O 、 N_2 从系统中脱除,类似于菌株 qy37^[22] 的硝化过程. 由于 N_2O 作为温室气体的辐射增温潜势是 CO_2 的 296 倍,同时也会破坏大气臭氧层,其存在不可忽视,通过控制工艺的运行参数可以有效地减少 N_2O 的产生.

以亚硝酸钠和硝酸钾为唯一氮源的条件下,菌株 y3 均能进行好氧反硝化作用. 以亚硝酸盐为唯一氮源时,菌株的生长速率最小,反应过程中几乎没有硝酸盐的积累,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^[23] 所研究的 HN-AD 菌 YL 具有相似亚硝酸盐降解特性. 以硝酸盐为唯一氮源时,检测到大量亚硝酸盐的积累,随后被迅速还原. 表明菌株 y5 先将 NO_3^- -N 还原为 NO_2^- -N,诱导亚硝酸盐还原酶产生,进而将 NO_2^- -N 还原为气态氮溢出系统.

氨氮和亚硝酸盐或氨氮和硝酸盐共存时,菌株优先利用 NH_4^+ -N 进行异养硝化作用,氨氮的降解效率高于以氯化铵为唯一氮源的情况,这表明亚硝酸

盐或硝酸盐的加入促进菌体对氨氮的代谢. 原因是亚硝酸盐或硝酸盐诱导反硝化酶的产生,从而加快了硝化-反硝化过程的电子传递速率,促进氨氮的代谢进程. 肖继波等^[24] 在对 *Deffluibacter lusatiensis* str. DN7 的研究中也发现少量的硝酸盐的存在有利于菌株的异养硝化反应,与本实验的结果相类似. 氨氮的存在对菌株 y5 的好氧反硝化无显著影响,这与 Stewart^[25] 的研究结果一致. 硝酸盐存在时, NO_2^- -N 的降解速率显著提高,原因可能是硝态氮的添加,诱导产生硝酸盐还原酶,在促使硝态氮向亚硝态氮转化的同时,刺激亚硝酸盐还原酶的大量产生,进而提高 NO_2^- -N 的降解速率.

4 结论

(1) 从胶州湾海底沉积物中分离筛选出的 1 株同时具有异养硝化和好氧反硝化能力的菌株 y5,经形态观察、生理生化实验和 16S rRNA 序列分析,鉴定为克雷伯氏菌属(*Klebsiella* sp.).

(2) 菌株 y5 的最佳碳源为柠檬酸三钠,最适 pH 为 7.0,最适 C/N 为 17.

(3) 菌株 y5 的异养硝化和好氧反硝化作用主要发生在对数增长期,菌株优先利用氨氮进行硝化作用,其次是硝态氮,最后进行亚硝态氮的好氧反硝化. 低浓度的硝酸盐或亚硝酸盐的存在有利于菌株的异养硝化反应,氨氮对好氧反硝化几乎没有影响.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨航, 黄钧, 刘博. 异养硝化-好氧反硝化菌 *Paracoccus pantotrophus* ATCC 35512 的研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(4): 585-592.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Wan C L, Yang X, Lee D J, et al. Aerobic denitrification by novel isolated strain using NO_2^- -N as nitrogen source [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(15): 7244-7248.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Shapovalova A A, Khijniak T V, Tourova T P, *et al.* Heterotrophic denitrification at extremely high salt and pH by haloalkaliphilic Gammaproteobacteria from hypersaline soda lakes [J]. *Extremophiles*, 2008, **12**(5): 619-625.
- [11] 苏婉昀, 高俊发, 赵红梅. 异养硝化-好氧反硝化菌的研究进展[J]. *工业水处理*, 2013, **33**(12): 1-5.
- [12] 罗霆, 欧阳雪庆, 杨丽涛, 等. 1株有固氮能力的甘蔗克雷伯氏菌的分离鉴定及固氮特性[J]. *热带作物学报*, 2010, **31**(6): 972-978.
- [13] 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.
- [14] 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*, 2014, **35**(6): 2341-2348.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [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] 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.
- [23] 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.
- [24] 肖继波, 江惠霞, 褚淑祎. 不同氮源下好氧反硝化菌 *Deffluibacter lusatiensis* str. DN7 的脱氮特性[J]. *生态学报*, 2012, **32**(20): 6463-6470.
- [25] Stewart V. Nitrate respiration in relation in to facultative metabolism in enterobacteria [J]. *Microbiology Reviews*, 1988, **52**(2): 190-232.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行