

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 20 期 Vol.32 No.20 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 20 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

太湖流域源头溪流氧化亚氮(N_2O)释放特征.....	袁淑方, 王为东 (6279)
闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素动态.....	曾从盛, 张林海, 王天鹅, 等 (6289)
宁夏荒漠草原小叶锦鸡儿可培养内生细菌多样性及其分布特征.....	代金霞, 王玉炯 (6300)
陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布.....	章一巧, 宗世祥, 刘永华, 等 (6308)
模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响.....	张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等 (6318)
中国井冈山生态系统多样性.....	陈宝明, 林真光, 李 贞, 等 (6326)
鄂西南木林子常绿落叶阔叶混交林恢复过程中优势树种生态位动态.....	汤景明, 艾训儒, 易咏梅, 等 (6334)
不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响	徐兴利, 金则新, 何维明, 等 (6343)
模拟长期大风对木本猪毛菜表观特征的影响	南 江, 赵晓英, 余保峰 (6354)
雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应	郭子武, 陈双林, 杨清平, 等 (6361)
利用树木年轮重建赣南地区 1890 年以来 2—3 月份温度的变化	曹受金, 曹福祥, 项文化 (6369)
川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态.....	胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等 (6376)
火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响	周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等 (6387)
黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异.....	佟小刚, 韩新辉, 吴发启, 等 (6396)
岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性	潘树林, 辜 彬, 李家祥 (6404)
坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响.....	张 地, 张育新, 曲来叶, 等 (6412)
太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响.....	王 瑛, 张建锋, 陈光才, 等 (6422)
基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究	黄和平 (6431)
中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例	孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟 (6440)
世界主要国家耕地动态变化及其影响因素	赵文武 (6452)
不同氮源下好氧反硝化菌 <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 的脱氮特性	肖继波, 江惠霞, 褚淑祎 (6463)
基于生态足迹方法的南京可持续发展研究.....	周 静, 管卫华 (6471)
基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究.....	蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等 (6481)
浦江县土壤碱解氮的空间变异与农户 N 投入的关联分析	方 斌, 吴金凤, 倪绍祥 (6489)
长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征	童春富 (6501)
深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究.....	周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等 (6511)
灰斑古毒蛾口腔反吐物诱导沙冬青细胞 Ca^{2+} 内流及 H_2O_2 积累	高海波, 张淑静, 沈应柏 (6520)
濒危物种金斑喙凤蝶的行为特征及其对生境的适应性.....	曾菊平, 周善义, 丁 健, 等 (6527)
细叶榕榕小蜂群落结构及动态变化.....	吴文珊, 张彦杰, 李凤玉, 等 (6535)
专论与综述	
流域生态系统补偿机制研究进展	张志强, 程 莉, 尚海洋, 等 (6543)
可持续消费的内涵及研究进展——产业生态学视角	刘晶茹, 刘瑞权, 姚 亮 (6553)
工业水足迹评价与应用.....	贾 佳, 严 岩, 王辰星, 等 (6558)
矿区生态风险评价研究述评.....	潘雅婧, 王仰麟, 彭 建, 等 (6566)
研究简报	
围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态.....	李学斌, 陈 林, 张硕新, 等 (6575)
密度和种植方式对夏玉米酶活性和产量的影响.....	李洪岐, 蔺海明, 梁书荣, 等 (6584)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 312 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10	

封面图说: 草丛中的朱鹮——朱鹮有着鸟中“东方宝石”之称。洁白的羽毛, 艳红的头冠和黑色的长嘴, 加上细长的双脚, 朱鹮历来被日本皇室视为圣鸟。20 世纪前朱鹮在中国东部、日本、俄罗斯、朝鲜等地曾有较广泛地分布, 由于环境恶化等因素导致种群数量急剧下降, 至 20 世纪 70 年代野外已认为无踪影。1981 年 5 月, 中国鸟类学家经多年考察, 在陕西省洋县重新发现朱鹮种群, 一共只有 7 只, 也是世界上仅存的种群。此后对朱鹮的保护和科学研究做了大量工作, 并于 1989 年在世界首次人工孵化成功。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203090318

肖继波, 江惠霞, 褚淑祎. 不同氮源下好氧反硝化菌 *Defluviibacter lusatiensis* str. DN7 的脱氮特性. 生态学报, 2012, 32(20): 6463-6470.

Xiao J B, Jiang H X, Chu S Y. Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium *Defluviibacter lusatiensis* str. DN7 using different sources of nitrogen. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6463-6470.

不同氮源下好氧反硝化菌 *Defluviibacter lusatiensis* str. DN7 的脱氮特性

肖继波, 江惠霞, 褚淑祎*

(浙江农林大学环境与资源学院, 临安 311300)

摘要:研究了不同氮源下好氧反硝化菌 *Defluviibacter lusatiensis* str. DN7 的脱氮特性。结果表明:菌株均能以硝酸盐和亚硝酸盐为唯一氮源进行好氧反硝化作用。反应 4 h, NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的去除率分别达 83.35% 和 85.72%。亚硝酸盐完全还原比硝酸盐提前 42 h。硝酸盐还原过程中基本无亚硝酸盐积累, 而亚硝酸盐还原过程中则检测到明显的硝酸盐积累, 反应 4 h, NO_3^- -N 积累量达到 21.83 mg/L。培养液中同时存在硝酸盐和亚硝酸盐时, 菌株优先选择硝酸盐作电子受体。亚硝酸盐共存对硝酸盐还原无显著影响, 但培养液中残留的 NO_2^- -N 随亚硝酸盐比例上升而增加, 当亚硝酸盐比例从 10% 升至 50% 时, NO_2^- -N 残留量由 3.38 mg/L 增至 7.60 mg/L。少量硝酸盐的加入对亚硝酸盐的还原产生抑制作用。当硝酸盐比例为 10% 时, 72 h NO_2^- -N 的去除率仅为 74.79%, 远低于以亚硝酸盐为唯一氮源情况(去除率 100%)。以氨氮为唯一氮源时, 菌株同时进行异养硝化和好氧反硝化反应, 72 h, NH_4^+ -N 去除率达 85.66%, 且基本无硝酸盐或亚硝酸盐积累。少量氨氮共存(氨氮比例 < 30%) 有利于促进菌株的好氧反硝化作用, 反之亦然。

关键词:好氧反硝化; 异养硝化; 脱氮; 去除率

Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium *Defluviibacter lusatiensis* str. DN7 using different sources of nitrogen

XIAO Jibo, JIANG Huixia, CHU Shuyi*

School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

Abstract: An aerobic denitrifying bacterium DN7 was isolated from the bio-contact oxidation reactor treating bamboo processing wastewater. Cellular morphology demonstrated that strain DN7 was a gram negative bacillus with an average size of $0.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$ and the colony was ivory. Based on the homologic analysis of the 16S rDNA sequence and physiochemical properties, the strain was identified as *Defluviibacter lusatiensis* str. . The denitrification characteristics of strain DN7 with different sources of nitrogen were investigated. Results showed that the strain could use either nitrate or nitrite as the sole source of nitrogen for aerobic denitrification, and the removal efficiencies of nitrate and nitrite were 83.35% and 85.72% in 4 h, respectively. The completely reduction of nitrite was 42 h before the nitrate. Almost no nitrite accumulation was observed in the aerobic denitrification process with nitrate as the sole nitrogen source, whereas nitrate accumulation was detected with nitrite as the sole nitrogen source, in which the maximum amount of nitrate reached 21.83 mg/L in 4 h. The strain preferred nitrate to nitrite in the nitrate-nitrite mixed system. Coexistence of nitrite and nitrate had no significant effect on nitrate reduction, however, the residual concentration of nitrite increased with the ratio of nitrite to nitrate. As the ratio of nitrite to nitrate increased from 1:9 to 5:5, the residual nitrite concentration increased from

基金项目: 水体污染控制与治理重大科技专项(2008ZX07101-006-08); 浙江省重大科技专项(2009C03006-3)

收稿日期: 2012-03-09; 修订日期: 2012-08-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chusy@zafu.edu.cn

3.38 mg/L to 7.60 mg/L. Little amount of nitrate would inhibit the nitrite reduction significantly. When the ratio of nitrate to nitrite was 1:9, the nitrite removal efficiency dropped to 74.79%, much lower than that with nitrite as the sole nitrogen source. The strain was capable of using ammonium nitrogen as the sole nitrogen source, in which both heterotrophic nitrification and aerobic denitrification occurred. Nitrate accumulation was observed in the heterotrophic nitrification and aerobic denitrification process, and the maximum value was 18.92 mg/L. In 72 h, the removal efficiency of ammonium nitrogen reached 85.66%, and neither nitrate nor nitrite accumulation was observed. The aerobic denitrification of the strain could be promoted in the presence of little amount of ammonium nitrogen. When the ammonium to nitrate ratio was 1:9, nitrate was completely reduced in 48 h, 24 h before that with nitrate as the sole nitrogen source. Coexistence of nitrate and ammonium nitrogen also enhanced the heterotrophic nitrification. When the nitrate to ammonium ratio was 1:9, removal efficiency of ammonium nitrogen reached 87.50%, 7.05% higher than that with ammonium nitrogen as the sole nitrogen source.

Key Words: aerobic denitrification; heterotrophic nitrification; denitrification; removal efficiency

好氧反硝化是微生物在有氧条件下以有机物为碳源及电子供体,利用氧和硝酸盐或亚硝酸盐为电子受体,将硝酸盐和亚硝酸盐还原为气态氮化物的过程^[1-2]。好氧反硝化菌的发现打破了反硝化只能在厌氧或缺氧条件下实现的传统观念,使硝化和反硝化在同一个反应器中进行,大大降低基建投资和运行费用^[3-4]。而部分好氧反硝化菌同时具有异养硝化性能^[5-6],进一步丰富了同时硝化反硝化(SND)理论,提高了反应器中 SND 的可能性。近年来,好氧反硝化菌的分离及其特性研究成为生物脱氮领域的研究热点^[7-9]。

大量研究表明,好氧反硝化菌株的脱氮性能与碳源、C/N、温度、溶解氧(DO)和 pH 值等因素有关^[10-12]。然而,由于硝酸盐、亚硝酸盐和氨氮的理化特性及氮元素氧化还原电位的不同,以其中之一为唯一氮源时,菌株的脱氮性能差异显著^[13]。且实际废水中往往同时存在硝酸盐、亚硝酸盐和氨氮,因此,探明以硝酸盐、亚硝酸盐和氨氮为唯一氮源,或混合系统中菌株的脱氮性能,对于推动好氧反硝化菌株在实际废水处理中的应用具有重要的指导意义。

课题组从实际处理竹子加工废水的生物接触氧化反应器生物膜上分离得到 1 株好氧反硝化菌 DN7,经鉴定为根瘤菌中的 *Defluviobacter lusatiensis* str.。为进一步探明该菌株的脱氮特性,研究了该菌株以硝酸盐、亚硝酸盐为唯一氮源进行好氧反硝化的特性及以氨氮为唯一氮源进行异养硝化的特性,并考察了硝酸盐和亚硝酸盐,硝酸盐和氨氮混合系统中菌株的脱氮特性,以期为该菌株的工程应用提供基础数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 菌源

实验菌株来源于稳定运行的处理竹子加工废水的生物接触氧化反应器中的生物漂带^[14]载体,为实验室保藏菌种,编号为 DN7。菌株为革兰氏阴性小杆菌,大小为 0.5 μm ×1.5 μm ,菌落边缘整齐,乳白色,不产色素。通过生理生化特性及 16S rDNA 同源性分析,鉴定该菌株为根瘤菌中的 *Defluviobacter lusatiensis* str., GenBank 序列登陆号为 GU726987.1。

1.2 培养基

好氧反硝化(DM)培养基^[15] $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 5 g、 KH_2PO_4 1 g、 K_2HPO_4 1 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g、蒸馏水 1000 mL,pH 值 7.2—7.6。根据实验要求添加氮源。

1.3 菌株的好氧反硝化特性

挑取一环保存的菌落,接种至 100 mL DM 液体培养基中,30 $^{\circ}\text{C}$,120 r/min 振荡培养 72 h。取 5 mL 菌悬液分别接种于 100 mL 以硝酸钾和亚硝酸钠为唯一氮源的 DM 液体培养基中(氮浓度均为 138.48 mg/L),30 $^{\circ}\text{C}$,120 r/min 摇床培养,每隔一定时间测定液体中的 NO_3^- 和 NO_2^- ,考察菌株对硝酸盐和亚硝酸盐的反硝化特

性,并以不接种的液体培养基作空白对照。

1.4 菌株的异养硝化特性

将 1.3 菌悬液以 5% 的接种量接入 100 mL 以硫酸铵为唯一氮源的液体培养基中(氮浓度为 138.48 mg/L),30 ℃,120 r/min 摇床培养,每隔一定时间测定培养液中 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 NO_2^- 。以不接种的液体培养基作空白对照。

1.5 硝酸盐-亚硝酸盐混合系统中菌株的脱氮特性

将以硝酸钾、亚硝酸钠为唯一氮源(氮浓度相等)的液体培养基以体积 1:9、3:7、5:5、7:3、9:1 比例混合,将 1.3 菌悬液以 5% 的接种量分别接入 100 mL 上述混合培养液中,30 ℃,120 r/min 摇床培养,每隔一定时间测定培养液中的 NO_3^- 和 NO_2^- 。

1.6 菌株的好氧反硝化-异养硝化特性

将以硝酸钾、硫酸铵为唯一氮源的培养液按 1.5 实验比例混合,以 5% 的接种量分别接入 1.3 菌悬液,30 ℃,120 r/min 摇床培养,每隔一定时间测定其中的 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 NO_2^- 。

1.7 检测方法 & 数据分析

NH_4^+ 采用纳氏试剂分光光度法; NO_3^- 、 NO_2^- 采用离子色谱法测定。脱氮率计算方法:脱氮率 = $(1 - c_{\text{TIN终}} / c_{\text{TIN初}}) \times 100\%$,式中 TIN 为总无机氮。以上实验均设置 4 个重复,平行样结果偏差小于 0.5% 则认为数据可行。所得结果剔除异常值后求均值,若 4 个平行样中存在 2 个及以上异常,则重新进行实验。采用 origin8.5 对实验数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 菌株的好氧反硝化特性

菌株以硝酸钾或亚硝酸钠为唯一氮源时的好氧反硝化特性如图 1 所示。从图可见,以硝酸钾为唯一氮源时, NO_3^- -N 浓度在 4 h 内由 138.48 mg/L 降至 23.06 mg/L,去除率达 83.35%,第 72 小时降至 0.81 mg/L,基本还原完全。反应过程中无亚硝酸盐积累。菌株于 8—48 h 处于对数生长期,最大光密度(OD_{max})为 0.901。由于硝酸盐还原消耗 H^+ ^[16],反应过程中培养液 pH 由 7.0 增至 8.8。空白对照中, NO_3^- -N 浓度基本不变。

以亚硝酸钠为唯一氮源时, NO_2^- -N 浓度在 4 h 内由 138.48 mg/L 降至 19.77 mg/L,去除率为 85.72%,第 28 小时降至 0.072 mg/L,基本还原完全。反应过程中检测到明显的硝酸盐积累,反应 4 h, NO_3^- -N 浓度达 21.83 mg/L,随后逐渐下降,至 52 h 时为 0.47 mg/L。菌株经历较长适应期后,于第 20 小时进入对数生长期,至 52 h,OD 达到最大,其值为 1.2。培养液中 pH 值由 6.6 增至 8.4 后下降,至 72 h 时,pH 值降至 7.8。空白对照中, NO_2^- -N 浓度基本无变化。

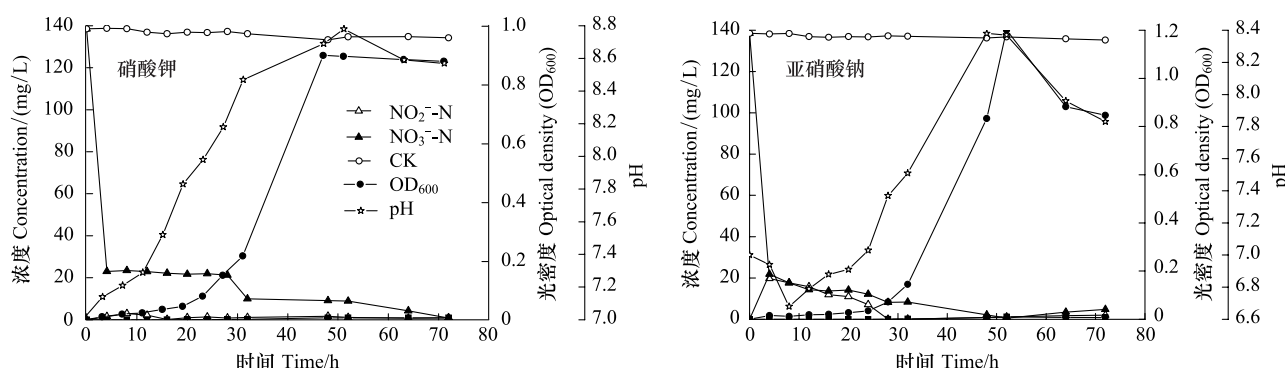


图 1 以硝酸钾和亚硝酸钠为唯一氮源时菌株 DN7 的好氧反硝化特性

Fig.1 Aerobic denitrification characteristics of strain DN7 with nitrate and nitrite as sole nitrogen source

2.2 菌株的异养硝化特性

以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 为唯一氮源时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除可分为 3 个阶段: 0—8 h, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度由 138.48 mg/L 降至 82.15 mg/L, 去除率为 40.68% (图 2)。期间检测到明显的硝酸盐积累, 第 8 小时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度达到 18.92 mg/L。培养液 pH 值由 7.02 降至 6.63; 8—24 h, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降缓慢, 去除率仅为 10.95%, 而硝酸盐则基本还原完全, 第 24 小时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度降至 0.98 mg/L, 且培养液 pH 值呈上升趋势; 24—72 h, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐步降至 19.86 mg/L, 去除率为 72.85%, 未检测到硝酸盐积累。培养液 pH 值升至 8.31 后又下降, 第 72 小时, pH 值降至 7.63。反应过程中, 均未检测到明显的亚硝酸盐积累。菌株生长良好, 于 16 h 时进入对数生长期, OD_{600} 为 1.16。

2.3 硝态氮-亚硝态氮混合系统中菌株的脱氮特性

在不同比例混合的硝酸盐-亚硝酸盐培养液中, 考察菌株 DN7 的脱氮特性。72 h 时培养液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度如图 3 所示。培养液中同时存在硝酸盐和亚硝酸盐时, 菌株的脱氮效率受到一定的抑制。 $\text{NO}_2^-\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别为 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 和 9:1 时, 脱氮率分别为 93.85%、93.32%、93.27%、93.59% 和 75.08%, 均低于以硝酸盐、亚硝酸盐为唯一氮源的情况。

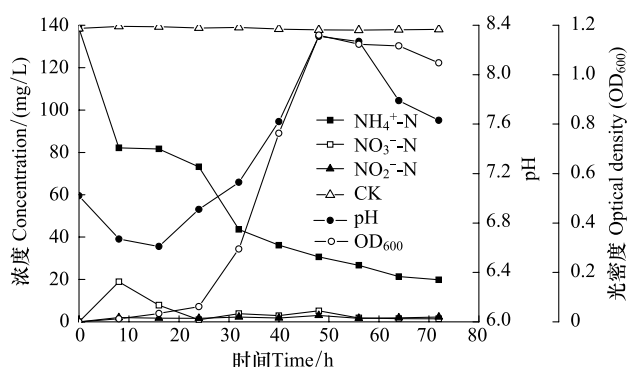


图 2 菌株 DN7 的异养硝化特性

Fig. 2 Heterotrophic nitrification characteristics of strain DN7

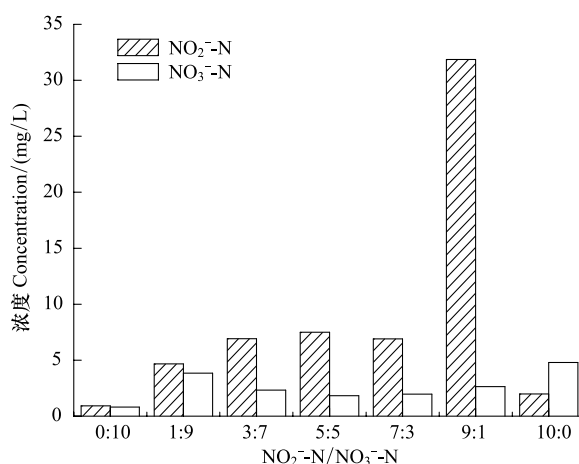


图 3 硝态氮-亚硝态氮混合系统中菌株 DN7 的脱氮特性

Fig. 3 Denitrification characteristics of strain DN7 in nitrate-nitrite mixed system

培养液中共存亚硝酸盐对硝酸盐还原无显著影响, 当 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 比例为 10%、30% 和 50% 时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率均在 97% 以上。而少量硝酸盐共存即对亚硝酸盐的还原产生抑制作用, 当 $\text{NO}_3^-\text{-N}:\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为 1:9 时, 溶液中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 残留量高达 30.08 mg/L, 去除率由 98.57% 降至 74.43%。然而随着培养液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比例提高, 其对亚硝酸盐还原的抑制作用降低, 当 $\text{NO}_3^-\text{-N}:\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为 3:7 时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除率升至 92.87%。为了探明硝酸盐和亚硝酸盐混合系统中菌株的脱氮特性, 选取 1:9、5:5 和 9:1 这 3 个具代表性的比例, 考察培养液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度随反应时间的变化情况。

不同比例的混合系统中, 硝酸盐和亚硝酸盐还原均主要发生在反应初期 (4 h 内)。随反应时间延长, 培养液中的硝酸盐被逐渐还原, 而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度变化较小。随着混合系统中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 比例上升, 培养液中残留的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度增加, $\text{NO}_2^-\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比例分别为 1:9、5:5 和 9:1 条件下, 第 90 小时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度依次为 3.38 mg/L、7.60 mg/L 和 26.08 mg/L (图 4)。少量亚硝酸盐的加入提高了菌株对硝酸盐的还原速率, 当 $\text{NO}_2^-\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 1:9 时, 第 28 小时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 即基本被还原完全。而少量硝酸盐的共存则抑制菌株对亚硝酸盐的还原活性, 当 $\text{NO}_2^-\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 9:1 时, 4 h 时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除率为 80.92%, 低于以亚硝酸盐为唯一氮源情况 (4 h 去除率为 85.72%), 且反应后期 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度基本不变。当混合系统中共存等量的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 时, 4 h 内,

菌株优先利用 NO_3^- -N, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 的去除率分别为 84.71% 和 76.75%。后 NO_3^- -N 浓度缓慢下降,第 56 小时, NO_3^- -N 浓度降至 0.78 mg/L,而 NO_2^- -N 浓度基本稳定在 8.00 mg/L。

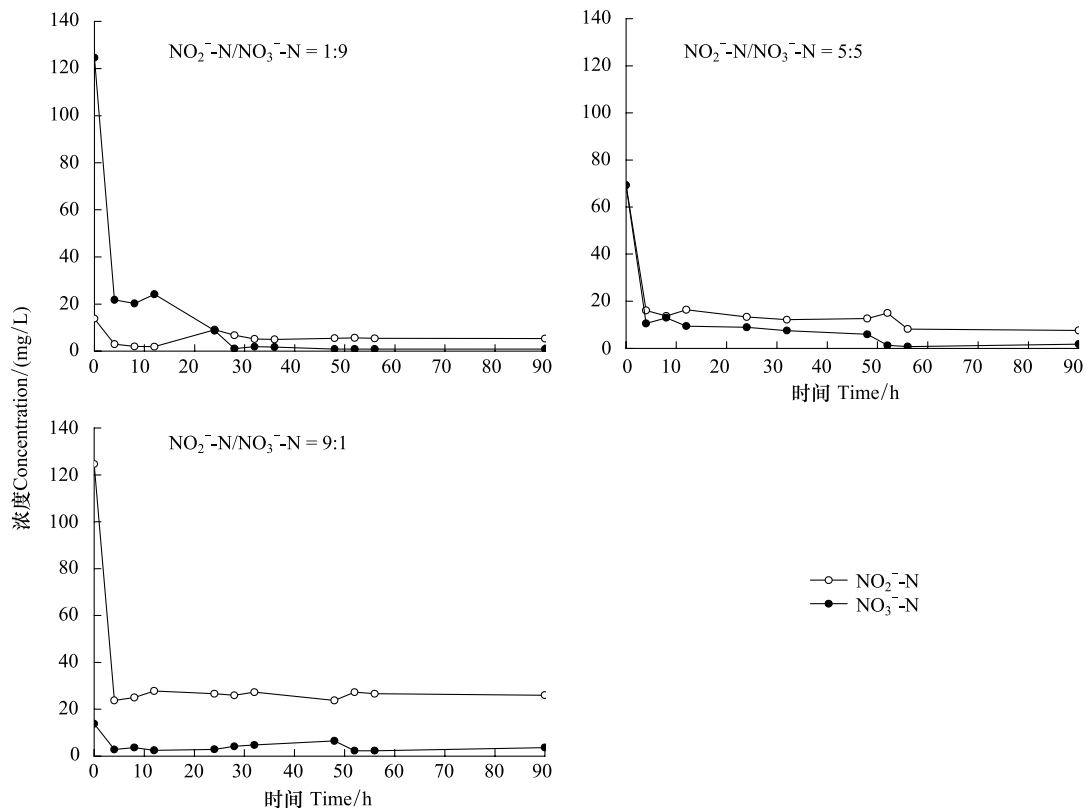


图 4 不同 NO_2^- -N/ NO_3^- -N 下菌株的脱氮特性

Fig. 4 Denitrification characteristics of strain DN7 under different nitrite to nitrate ratios

2.4 菌株的好氧反硝化-异养硝化特性

不同比例混合的硝酸钾-硫酸铵培养液中,考察菌株的异养硝化-好氧反硝化特性,72 h 后培养液中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 浓度如图 5 所示。少量氨氮共存基本不对菌株的好氧反硝化作用产生影响,当 NH_4^+ -N 比例为 10% 时, NO_3^- -N 的去除率仍高达 99.45% (图 5),但检测到亚硝酸盐积累,且脱氮率下降 3.61%。随着 NH_4^+ -N 比例上升,其逐渐对 NO_3^- -N 的还原产生抑制作用,当 NH_4^+ -N 比例升至 30% 和 50% 时, NO_3^- -N 的去除率分别降至 97.00% 和 80.96%。少量硝酸盐的存在利于氨氮的降解,当混合系统中存在 10% 的 NO_3^- -N 时, NH_4^+ -N 的去除率增至 96.42%,脱氮率增加 11.05%。但当 NO_3^- -N 比例由 10% 升至 50% 时, NH_4^+ -N 去除率降至 83.22%。为探明菌株 DN7 在异养硝化-好氧反硝化系统中的脱氮特性,实验分析了 NH_4^+ -N: NO_3^- -N 为 1:9、5:5 和 9:1 时 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 浓度的变化。

氨氮和硝酸盐共存于培养液中,硝酸盐的还原仍主要发生在 4 h 内。当 NH_4^+ -N: NO_3^- -N 为 1:9 时,4 h 时 NO_3^- -N 浓度由 124.63 mg/L 降至 20.95 mg/L,去除率为 83.19% (图 6)。少量氨氮共存促进了菌株对硝酸盐

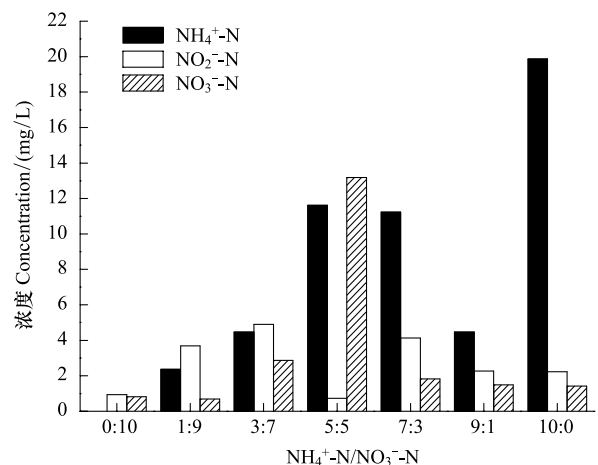


图 5 菌株 DN7 的异养硝化-好氧反硝化特性

Fig. 5 Heterotrophic nitrification-aerobic denitrification characteristics of strain DN7

的还原,至 48 h, NO_3^- -N 基本被还原完全,比以硝酸盐为唯一氮源提前 24 h。但反应过程中检测到明显的亚硝酸盐积累,其最大积累量达到 7.33 mg/L。少量硝酸盐的存在也利于菌株的异养硝化作用,当 NO_3^- -N : NH_4^+ -N 为 1:9 时,反应开始, NH_4^+ -N 浓度持续下降,至 56 h, NH_4^+ -N 浓度降至 15.27 mg/L,去除率达 87.75%,高于以氨氮为唯一氮源情况。 NO_3^- -N 在反应 4 h 时降至 2.32 mg/L,后基本稳定在 2 mg/L 以下,但反应后期检测到少量的亚硝酸盐积累。当系统中存在等量的硝酸盐和氨氮时,反应 4 h 内,菌株利用硝酸盐的好氧反硝化作用占优势。

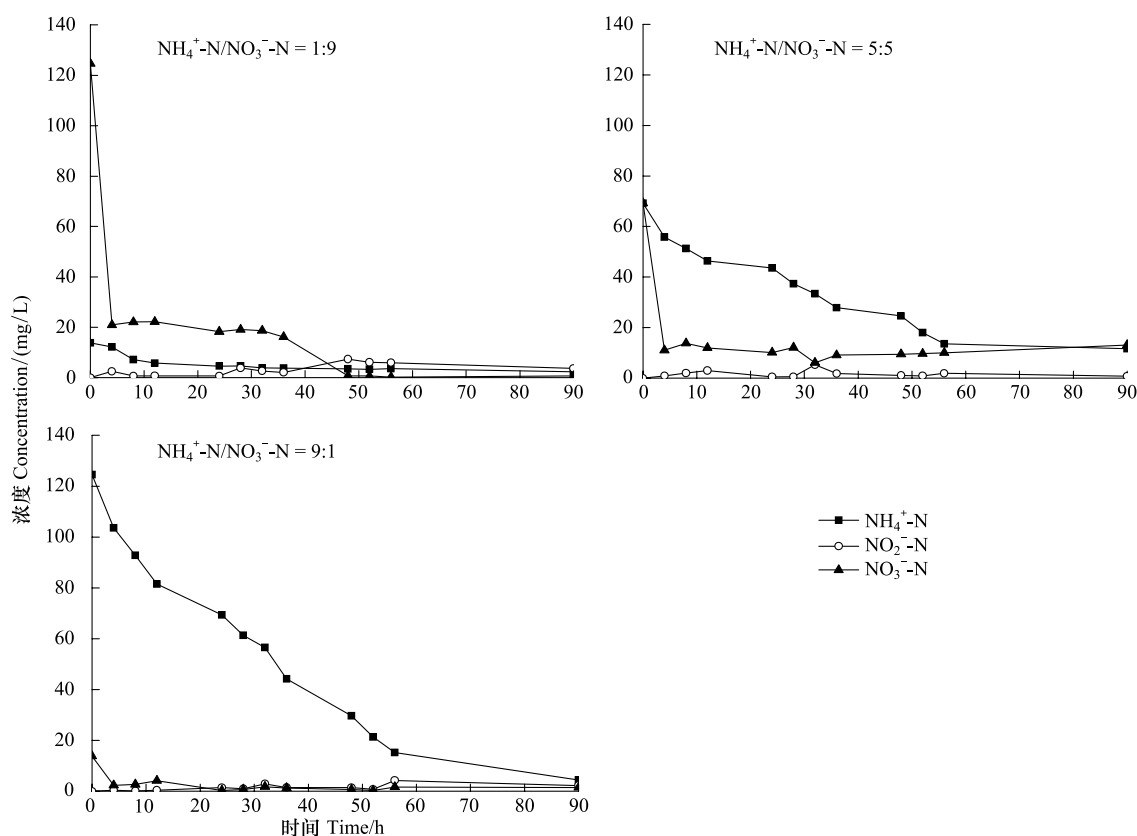


图 6 不同 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 下菌株的脱氮特性

Fig. 6 Denitrification characteristics of strain DN7 under different ammonium nitrogen to nitrate ratios

3 讨论与结论

菌株 DN7 均能利用硝酸盐和亚硝酸盐为唯一氮源进行好氧反硝化作用。在硝酸盐降解过程中,主要发生同化性和异化性还原作用。反应 4 h, NO_3^- -N 浓度迅速降低,去除率达 83.35%,然此时菌体生长处于适应期,说明期间主要发生异化性还原作用,大部分硝酸盐氮降解为气态氮化物而逸出^[1]。硝酸盐还原过程几乎无亚硝酸盐积累,可能是菌株的亚硝酸盐还原酶在硝酸盐还原酶存在时具有较高的反应活性,经菌株硝酸盐还原酶产生的亚硝酸盐在较高活性的亚硝酸盐还原酶作用下被迅速还原^[17]。以亚硝酸盐为唯一氮源时,由于亚硝酸盐在溶液中会产生游离亚硝酸(FNA),FNA 有较强的生物毒性,对微生物的生长代谢产生抑制作用^[18],因此,菌株适应期长达 20 h。说明菌株接种到新的以亚硝酸盐为氮源的培养基上时,需经历较长时间的调整 and 适应,以合成多种酶和细胞的组成成分。第 28 h, NO_2^- -N 浓度降至 0.072 mg/L,去除率达 99.95%,去除速率达 $4.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与李卫芬等^[19]分离的好氧反硝化菌 F1 相比, NO_2^- -N 去除率提高 17.22%,且所需时间更短。与张小玲等^[20]从池塘底泥中分离到的好氧反硝化菌株 H2 相比, NO_2^- -N 去除速率提高 $4.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从图 1 可见,亚硝酸盐完全还原比硝酸盐提前 48 h,马放等^[21]分离到的好氧反硝化菌株 X31 的反硝化特性分析中,亦发现亚硝酸盐还原早于硝酸盐还原。但亚硝酸盐还原过程中出现明显的硝酸盐积累,4

h 内, 15.76% 的 NO_2^- -N 转化为 NO_3^- -N, NO_3^- -N 积累量达到 21.83 mg/L。原因主要为亚硝酸盐浓度较高时诱导了亚硝酸氧化酶, 将 NO_2^- -N 氧化为 NO_3^- -N 所致^[22]。

当培养液中同时存在硝酸盐和亚硝酸盐时, 菌株优先利用硝酸盐进行好氧反硝化。当 NO_3^- -N : NO_2^- -N 为 5:5 时, 至 72 h, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 浓度分别降至 1.83 mg/L 和 7.49 mg/L。由于硝酸盐氮具有较高的氧化还原电位, 利用其作为电子受体时基质释放的能量较高^[6]。Frette 等^[23]认为理论上硝酸盐还原产生的能量是亚硝酸盐还原产生能量的 3.8 倍。因此, 根据优先利用原则, 菌株优先选择硝酸盐作电子受体。少量亚硝酸盐的加入提高了菌株对硝酸盐的还原速率, 然由于亚硝酸盐是硝酸盐反硝化过程的中间产物, 其浓度过高时, 易对硝酸盐还原为亚硝酸盐这一步骤产生抑制作用, 从而降低硝酸盐的还原量。实验中, NO_2^- -N : NO_3^- -N 为 5:5 时, 4 h 内, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 的去除率分别仅为 84.71% 和 76.75%。培养液中加入少量硝酸盐对亚硝酸盐还原产生抑制作用。加入 10% 的硝酸盐时, NO_2^- -N 浓度在反应初期 4 h 降至 23.78 mg/L, 但后期浓度基本无变化, 72 h 后的去除率仅为 74.79%, 远远低于以亚硝酸盐为唯一氮源的情况。其原因主要为硝酸盐对亚硝酸盐还原酶活性产生抑制作用。但当培养液中硝酸盐比例上升时, 随着菌株对硝酸盐的反硝化作用, 其产生的硝酸盐还原酶可促进亚硝酸盐还原酶的活性, 从而提高菌株对亚硝酸盐的反硝化能力。实验中, 当 NO_3^- -N : NO_2^- -N 上升至 3:7 时, NO_2^- -N 去除率增至 92.87%。

由于异养硝化过程产生硝酸盐或亚硝酸盐, 因此, 以氨氮为唯一氮源的异养硝化过程中可能同时存在好氧反硝化作用。在整个氨氮降解过程中没有检测到亚硝酸盐积累, 但出现了明显的硝酸盐积累, 说明菌株的异养硝化和好氧反硝化的结合点在硝酸盐氮上。反应 8 h 时, NH_4^+ -N 降解量为 56.36 mg/L, NO_3^- -N 的积累量为 18.92 mg/L, 为降解 NH_4^+ -N 量的 33.57%, 说明此时异养硝化速率大于好氧反硝化速率, 导致培养液中硝酸盐积累。而当硝酸盐积累到一定浓度时, 菌株优先利用硝酸盐进行好氧反硝化作用。8—24 h 内, NO_3^- -N 浓度由 18.92 mg/L 降至 0.98 mg/L, 而 NH_4^+ -N 没有明显的变化, 符合 Robertson 等^[24]提出的异养硝化-好氧反硝化工作模型。异养硝化是一种耗能的过程, 其中氨单加氧酶 (AMO) 的还原与菌体生长和代谢竞争有机碳源, 而好氧反硝化是一种产能的过程, 在菌体生长和能量利用方面比异养硝化效率更高^[25]。24—72 h, NH_4^+ -N 去除率达 72.85%, 此时菌株处于对数生长期, 说明氨氮的去除主要发生在对数生长期, 这与陈咄圳等^[26]的报道基本一致。

Stewart 等^[27]认为, 氨氮对异化性硝酸盐还原酶活性没有影响。张培玉等^[22]研究表明好氧反硝化反应不受异养硝化的影响。而 Kim 等^[5]研究发现, 硝酸盐或亚硝酸盐会抑制系统中的异养硝化反应。本实验中, 少量 NH_4^+ -N (比例 < 30%) 的加入利于促进菌株对硝酸盐的利用, 提高菌株的好氧反硝化速率, 当混合培养液中 NH_4^+ -N 的比例为 10% 时, 硝酸盐完全还原比以硝酸盐为唯一氮源时提前 24 h, 但检测到明显的亚硝酸盐积累, 可能是氨氮对亚硝酸盐还原酶的活性产生抑制作用。且随着氨氮比例上升, 亚硝酸盐积累量增大, 在底物抑制作用下, 硝酸盐的还原量大大减少; 少量硝酸盐的存在利于菌株的异养硝化反应, NO_3^- -N 比例为 10% 时, 第 56 小时, NH_4^+ -N 去除率达 87.75%。后续实验将从氮平衡角度进一步分析不同氮源下菌株的脱氮特性。

References:

- [1] Jetten M S M, de Bruijn P, Kuenen J G. Hydroxylamine metabolism in *Pseudomonas* PB16: involvement of a novel hydroxylamine oxidoreductase. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1997, 71(1/2): 69-74.
- [2] Ozeki S, Baba I, Takaya N, Shoun H. A novel C1-using denitrifier *Alcaligenes* sp. STC1 and its genes for copper-containing nitrite reductase and azurin. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2001, 65(5): 1206-1210.
- [3] Third K A, Gibbs B, Newland M, Cord-Ruwisch R. Long-term aeration management for improved N-removal via SND in a sequencing batch reactor. *Water Research*, 2005, 39(15): 3523-3530.
- [4] Wang P, Li X, Xiang M, Zhai Q. Characterization of efficient aerobic denitrifiers isolated from two different sequencing batch reactors by 16S-rRNA analysis. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2007, 103(6): 563-567.
- [5] Kim Y J, Yoshizawa M, Takenaka S, Murakami S, Aoki K. Isolation and culture conditions of a *Klebsiella pneumoniae* strain that can utilize ammonium and nitrate ions simultaneously with controlled iron and molybdate ion concentrations. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*,

2002, 66(5): 996-1001.

- [6] Taylor Shauna M, He Y, Zhao B, Huang J. Heterotrophic ammonium removal characteristics of an aerobic heterotrophic nitrifying-denitrifying bacterium, *Providencia rettgeri* YL. Journal of Environmental Science, 2009, 21(10): 1336-1341.
- [7] Joo H S, Hirai M, Shoda M. Piggery wastewater treatment using *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 with heterotrophic nitrification and aerobic denitrification. Water Research, 2006, 40(16): 3029-3036.
- [8] Wang H Y, Ma F, Su J F, Zuo W, Zhang X X, Zhang J. Influence of carbon source and C/N ratio on nitrogen removal of aerobic denitrifier. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(6): 968-972.
- [9] Wan C, Yang X, Lee D J, Du M, Wan F, Chen C. Aerobic denitrification by novel isolated strain using NO_2^- -N as nitrogen source. Bioresource Technology, 2011, 102(15): 7344-7248.
- [10] Zheng H, Liu Y, Sun G, Gao X, Zhang Q, Liu Z. Denitrification characteristics of a marine origin psychrophilic aerobic denitrifying bacterium. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(11): 1888-1893.
- [11] Liao S A, Zheng G L, Wang A L, Huang H H, Sun R Y. Isolation and characterization of a novel aerobic denitrifier from shrimp pond. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3718-3724.
- [12] Bernt K, Wojnowska-Baryla I. Carbon source in aerobic denitrification. Biochemical Engineering Journal, 2007, 36(2): 116-122.
- [13] Jin M, Wang J F, Kong Q X, Zhao Z G, Wang X W, Shen Z Q, Chen Z L, Qiu Z G, Li J W. Isolation and denitrification mechanism of an aerobic heterotrophic bacterium *Acinetobacter* sp. YY-5. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2009, 15(5): 692-697.
- [14] Xiao J B, Zhang L Q, Zhang M X. Biofiltration adsorption ribbon for water purification; China, 200820083807.6. 2009-02-25.
- [15] Zheng Q D, Zhong L N, Yao S J. Biological denitrification by mixed culture of nitrifying and denitrifying bacteria. Chemical Engineering, 2010, 38(3): 64-67.
- [16] Zhou S Q. Theoretical stoichiometry of biological denitrifications. Environmental Technology, 2001, 22(8): 868-880.
- [17] Zhang M, Huang S B. Identification and denitrification characteristics of a thermophilic aerobic denitrifier. Environmental Science, 2011, 32(1): 259-265.
- [18] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia and free nitrous acid concentration on the anabolic and catabolic processes of an enriched *Nitrosomonas* culture. Biotechnology Bioengineering, 2006, 95(5): 830-839.
- [19] Li W F, Fu L Q, Deng B, Chen N N, Zhou X X. Identification and denitrification characteristics of an aerobic denitrifier. Environmental Science, 2011, 32(8): 2404-2408.
- [20] Zhang X L, Zhang W D, Zhang L, Li Q L, Guo G J, Hua K, Zhang X. Selection of an aerobic denitrifying bacterium and its preliminary application in aquarium water. Microbiology, 2008, 35(10): 1556-1561.
- [21] Ma F, Wang H Y, Zhou D D, Zuo W. Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium *Pseudomonas Chloritidismutans* strain X31. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 33(7): 42-46.
- [22] Zhang P Y, Qu Y, Yu D S, Guo S S, Yang R X. Comparison of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification system by strain qy37 and its accelerating removal characteristic of NH_4^+ -N. Environmental Science, 2010, 31(8): 1819-1826.
- [23] Frette L, Gejlshjerg B, Westermann P. Aerobic denitrifiers isolated from an alternating activated sludge system. FEMS Microbiology Ecology, 1997, 24(4): 363-370.
- [24] Robertson L A, Cornelisse R, Vos P, Hadjioetomo R, Kuenen J G. Aerobic denitrification in various heterotrophic nitrifiers. Antonie Van Leeuwenhoek, 1989, 56(4): 289-299.
- [25] Robertson L A, Cornelisse R, Zeng R, Kuenen J G. The effect of thiosulphate and other inhibitors of autotrophic nitrification on heterotrophic nitrifiers. Antonie Van Leeuwenhoek, 1989, 56(4): 301-310.
- [26] Chen P Z, Wang L G, Wang Y C, Li J, Ding W, Ren T Z, Li S P. Screening and denitrification characteristics of a heterotrophic nitrification-aerobic denitrifier bacteria. Environmental Science, 2009, 30(12): 3614-3618.
- [27] Stewart B. Nitrate respiration in relation to facultative metabolism in enterobacteria. Microbiology, 1988, 52(2): 190-232.

参考文献:

- [8] 王弘宇, 马放, 苏俊峰, 左薇, 张献旭, 张佳. 不同碳源和碳氮比对一株好氧反硝化细菌脱氮性能的影响. 环境科学学报, 2007, 27(6): 968-972.
- [11] 廖绍安, 郑桂丽, 王安利, 黄洪辉, 孙儒泳. 养虾池好氧反硝化细菌新菌株的分离鉴定及特征. 生态学报, 2006, 26(11): 3718-3724.
- [13] 金敏, 王景峰, 孔庆鑫, 赵祖国, 王新为, 谌志强, 陈照立, 邱志刚, 李君文. 好氧异养硝化菌 *Acinetobacter* sp. YY-5 的分离鉴定及脱氮机理. 应用与环境生物学报, 2009, 15(5): 692-697.
- [14] 肖继波, 张立钦, 张妙仙. 水质净化生物过滤吸附带; 中国, 200820083807.6. 2009-2-25.
- [15] 郑巧东, 钟丽娜, 姚善涇. 硝化菌与反硝化菌混合培养生物脱氮的研究. 化学工程, 2010, 38(3): 64-67.
- [17] 张苗, 黄少斌. 高温好氧反硝化菌的分离鉴定及其反硝化性能研究. 环境科学, 2011, 32(1): 259-265.
- [19] 李卫芬, 傅罗琴, 邓斌, 陈南南, 周绪霞. 1 株好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性研究. 环境科学, 2011, 32(8): 2404-2408.
- [20] 张小玲, 张卫东, 张玲, 李清丽, 郭国军, 华开, 张霞. 好氧反硝化菌的选育及其初步应用. 微生物学通报, 2008, 35(10): 1556-1561.
- [21] 马放, 王弘宇, 周丹丹, 左薇. 好氧反硝化菌株 X31 的反硝化特性. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33(7): 42-46.
- [22] 张培玉, 曲洋, 于德爽, 郭沙沙, 杨瑞霞. 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. 环境科学, 2010, 31(8): 1819-1826.
- [26] 陈咄圳, 王立刚, 王迎春, 李季, 丁伟, 任天志, 李少朋. 异养硝化-好氧反硝化菌的筛选及脱氮性能的实验研究. 环境科学, 2009, 30(12): 3614-3618.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 20 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Characteristics of nitrous oxide (N ₂ O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin	YUAN Shufang, WANG Weidong (6279)
Nutrient dynamics of the litters during standing and sediment surface decay in the Min River estuarine marsh	ZENG Congsheng, ZHANG Linhai, WANG Tian'e, et al (6289)
Diversity and distribution of endophytic bacteria isolated from <i>Caragana microphylla</i> grown in desert grassland in Ningxia	DAI Jinxia, WANG Yujiong (6300)
Spatial distribution of <i>Trabala vishnou gigantina</i> Yang pupae in Shaanxi Province, China	ZHANG Yiqiao, ZONG Shixiang, LIU Yonghua, et al (6308)
Effects of drought stress on <i>Cyclobalanopsis glauca</i> seedlings under simulating karst environment condition	ZHANG Zhongfeng, YOU Yeming, HUANG Yuqing, et al (6318)
Ecosystem diversity in Jinggangshan area, China	CHEN Baoming, LIN Zhengguang, LI Zhen, et al (6326)
Niche dynamics during restoration process for the dominant tree species in montane mixed evergreen and deciduous broadleaved forests at Mulinzi of southwest Hubei	TANG Jingming, AI Xuenru, YI Yongmei, et al (6334)
Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> seedlings	XU Xingli, JIN Zexin, HE Weiming, et al (6343)
The effect of simulated chronic high wind on the phenotype of <i>Salsola arbuscula</i>	NAN Jiang, ZHAO Xiaoying, YU Baofeng (6354)
Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of <i>Phyllostachys praecox</i>	GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (6361)
Tree-ring-based reconstruction of the temperature variations in February and March since 1890 AD in southern Jiangxi Province, China	CAO Shoujin, CAO Fuxiang, XIANG Wenhua (6369)
Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China	HU Zongda, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (6376)
Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of <i>Betula platyphylla</i> and <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China	ZHOU Wenchang, MU Changcheng, LIU Xia, et al (6387)
Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area	TONG Xiaogang, HAN Xinhui, WU Faqi, et al (6396)
Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes	PAN Shulin, GU Bin, LI Jiaxiang (6404)
Effects of slope position on soil microbial biomass of <i>Quercus liaotungensis</i> forest in Dongling Mountain	ZHANG Di, ZHANG Yuxin, QU Laiye, et al (6412)
Responses of water quality to landscape pattern in Taihu watershed: case study of 3 typical streams in Yixing	WANG Ying, ZHANG Jianfeng, CHEN Guangcai, et al (6422)
Study on the fairness of resource-environment system of Jiangxi Province based on different methods of Gini coefficient	HUANG Heping (6431)
Simulation of the spatial pattern of land use change in China: the case of planned development scenario	SUN Xiaofang, YUE Tianxiang, FAN Zemeng (6440)
Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world	ZHAO Wenwu (6452)
Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 using different sources of nitrogen	XIAO Jibo, JIANG Huixia, CHU Shuyi (6463)
Study on sustainable development in nanjing based on ecological footprint model	ZHOU Jing, GUAN Weihua (6471)
Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province	CAI Zhenhua, SHEN Laixin, LIU Junguo, et al (6481)
Correlation analysis of spatial variability of Soil available nitrogen and household nitrogen inputs at Pujiang County	FANG Bin, WU Jinfeng, NI Shaoxiang (6489)
Characteristics of the fish assemblages in the intertidal salt marsh zone and adjacent mudflat in the Yangtze Estuary	TONG Chunfu (6501)
A comparison study on the secondary production of macrobenthos in different wetland habitats in Shenzhen Bay	ZHOU Fufang, SHI Xiuhua, QIU Guoyu, et al (6511)
Regurgitant from <i>Orgyia ericae</i> Germar induces calcium influx and accumulation of hydrogen peroxide in <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> (Maxim. ex Kom.) Cheng f. cells	GAO Haibo, ZHANG Shujing, SHEN Yingbai (6520)
Behavior characteristics and habitat adaptabilities of the endangered butterfly <i>Teinopalpus aureus</i> in Mount Dayao	ZENG Juping, ZHOU Shanyi, DING Jian, et al (6527)
Community structure and dynamics of fig wasps in syconia of <i>Ficus microcarpa</i> Linn. f. in Fuzhou	WU Wenshan, ZHANG Yanjie, LI Fengyu, et al (6535)
Review and Monograph	
Review and trend of eco-compensation mechanism on river basin	ZHANG Zhiqiang, CHENG Li, SHANG Haiyang, et al (6543)
Definition and research progress of sustainable consumption: from industrial ecology view	LIU Jingru, LIU Ruiquan, YAO Liang (6553)
The estimation and application of the water footprint in industrial processes	JIA Jia, YAN Yan, WANG Chenxing, et al (6558)
Research progress in ecological risk assessment of mining area	PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al (6566)
Scientific Note	
Litter amount and its dynamic change of four typical plant community under the fenced condition in desert steppe	LI Xuebin, CHEN Lin, ZHANG Shuoxin, et al (6575)
Effects of planting densities and modes on activities of some enzymes and yield in summer maize	LI Hongqi, LIN Haiming, LIANG Shurong, et al (6584)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 20 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 20 (October, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元