

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性

梁贤¹, 任勇翔^{1*}, 杨垒¹, 赵思琪¹, 夏志红²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 陕西省建筑设计研究院有限责任公司, 西安 710016)

摘要: 针对传统自养硝化-厌氧反硝化工艺流程长、脱氮效率低的问题, 从驯化成熟且具有高效同步硝化反硝化作用的 SBR 反应器中筛得 1 株异养硝化菌 YL, 经鉴定为铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*), 并通过单因子试验和正交试验对其异养硝化和好氧反硝化特性进行了研究. 结果表明, 菌株 YL 进行氨氧化作用的最适条件为: 碳源为琥珀酸钠、C/N 为 10、pH 为 7.0、温度为 30℃、转速为 160~200 r·min⁻¹, 此时氨氧化速率为 5.05 mg·(g·h)⁻¹, TOC 转化速率为 45.95 mg·(g·h)⁻¹, 氨氮和 TOC 去除率分别为 100% 和 90.8%; 菌株 YL 还能够利用亚硝酸盐、硝酸盐和羟胺进行生长代谢, 去除率分别为 92.7%、93.6% 和 94.8%; 影响菌株 YL 好氧反硝化性能最主要的因素为 C/N, 在最优条件(C/N = 10, T = 30℃, r = 200 r·min⁻¹, pH = 7)下, 硝氮去除率为 94.6%, 总氮去除率 76.3%. 表明菌株 YL 能够独立快速高效地完成异养硝化和好氧反硝化脱氮过程.

关键词: 异养硝化; 好氧反硝化; 铜绿假单胞菌; 脱氮; 正交试验

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1749-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.033

Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL

LIANG Xian¹, REN Yong-xiang^{1*}, YANG Lei¹, ZHAO Si-qi¹, XIA Zhi-hong²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: Traditional process of autotrophic nitrification-anaerobic denitrification usually has problems of long procedure and low efficiency. To overcome these problems, a heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium YL was isolated from a domesticated mature SBR reactor with efficient simultaneous nitrification and denitrification ability, and was identified as *Pseudomonas aeruginosa* YL. Meanwhile, the characteristics of the nitrogen removal of strain YL was investigated through single-factor experiments and an orthogonal experiment. The results showed that the preferred conditions were: succinate as the carbon source, C/N ratio of 10, pH of 7.0, temperature of 30℃, and the shaking speed of 160-200 r·min⁻¹, while the removal rate of ammonia oxidation was 5.05 mg·(g·h)⁻¹, the transformation rate of TOC was 45.95 mg·(g·h)⁻¹, and the removal rates of nitrogen and TOC were 100% and 90.8%, respectively. Nitrite, nitrate and hydroxylamine could also be metabolized by strain YL, and the removal rates were 92.7%, 93.6% and 94.8%, respectively. The most important influencing factor on aerobic denitrification of strain YL was C/N ratio. Under the optimal conditions (C/N = 10, T = 30℃, r = 200 r·min⁻¹, pH = 7), the removal rates of nitrate and total nitrogen were 94.6% and 76.3%, respectively. Hence, strain YL could remove nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification independently, quickly, and effectively.

Key words: heterotrophic nitrification; aerobic denitrification; *Pseudomonas aeruginosa*; nitrogen removal; orthogonal experiment

传统的生物脱氮工艺即自养硝化-厌氧反硝化工艺, 存在基建费用高、水力停留时间长、能耗大、抗冲击能力弱等不足. 近年越来越多的异养硝化-好氧反硝化(heterotrophic nitrification-aerobic denitrification, HN-AD)菌被发现, 主要包括泛养硫球菌(*Thiosphaera pantotropha*)^[1]、产碱菌属(*Alcaligenes*)^[2]、假单胞菌属(*Pseudomonas*)^[3]、芽孢杆菌(*Bacillus*)^[4]、不动杆菌(*Acinetobacter*)^[5]等. 这些细菌因具有生长快、活性高、增殖底物广泛、能同时进行异养硝化和好氧反硝化等优势而具有显著的工程应用价值. Joo 等^[6]将 *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 应用于养猪场废水处理, 在高有机和高氨负荷下取得了良好的碳氮去除效果; Yao 等^[7]通

过向实验室人工配水 SBR 反应器中投加耐寒 HN-AD 菌, 显著改善了低温时氮的去除. 但是国内外对 HN-AD 菌的研究尚处于起步阶段, 因此筛选出更多可同步脱氮除碳的 HN-AD 菌并对其生物学特性进行深入研究, 对丰富生物脱氮理论和指导工程实践具有重要意义.

本研究从实验室长期稳定运行的 SBR 反应器中筛得 1 株异养硝化菌株 YL 并对其进行了鉴定,

收稿日期: 2014-10-16; 修订日期: 2014-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878179); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20126120110017)

作者简介: 梁贤(1990~), 女, 硕士, 主要研究方向为污水生物处理, E-mail: xian122122@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: ryx@xauat.edu.cn

同时对其脱氮特性进行了分析。

1 材料与方法

1.1 菌株的分离及鉴定

从稳定运行的 SBR 反应器(进水 NH_4^+-N 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 1200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)中取活性污泥样品 10 mL 充分悬浮于 90 mL 0.9% 的无菌生理盐水中,在异养硝化培养基上进行稀释涂布,于生化培养箱 30℃ 下培养。进行多次纯化分离,挑选出形成的单菌落进行异养硝化能力测试^[8]。将筛选出的具有较高异养硝化特性的菌株悬浮在 25% 的甘油中,于 -80℃ 保存。

观察菌株的菌落特征,个体形态和革兰氏染色结果。菌株的 DNA 提取采用细菌基因组提取试剂盒(MO BIO, USA),将提取菌株的 DNA 作为 16S rDNA 的扩增模板,采用德国 Eppendorf 银制梯度 PCR 仪(型号: 5345 000.579)进行扩增,反应引物为 27F: 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCTAG-3' 和 1492R: 5'-GGTTACCTTGTACGACTT-3'。采用北京六一仪器厂生产的 DYY-6D DYCP-31DN 水平电泳系统琼脂糖凝胶电泳分离检测 PCR 产物,产物的测序由上海生工生物技术有限公司完成。测序结果用 BLAST 程序和 GenBank 中已登录的 16S rDNA 序列进行核苷酸同源性比较,然后应用 MEGA 5.0 软件构建该菌株系统发育树。

1.2 培养基

异养硝化培养基($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.47, 琥珀酸钠 5.62, 维氏盐溶液 50 mL, C/N = 10, pH = 7.0。

羟胺培养基($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): HONH_2Cl 0.25, 琥珀酸钠 2.81, 维氏盐溶液 50 mL, pH = 7.0。

亚硝氮培养基($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): NaNO_2 0.49, 琥珀酸钠 5.62, 维氏盐溶液 50 mL, pH = 7.0。

硝氮培养基($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): KNO_3 0.72, 琥珀酸钠 5.62, 维氏盐溶液 50 mL, pH = 7.0。

维氏盐溶液($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): K_2HPO_4 5.0, $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.5, NaCl 2.5, $\text{MnSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.05, $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05。

1.3 菌株 YL 的脱氮特性研究

1.3.1 不同反应条件对菌株 YL 异养硝化的影响

分别研究碳源、C/N、pH、温度和转速对氨氮去除效果的影响。碳源包括葡萄糖、乙酸钠、蔗糖、柠檬酸钠和琥珀酸钠; C/N 分别为 2、5、10 和 15; pH 分别为 4、5、6、7、8、9、10 和 11; 温度分别为

10、20、30 和 37℃; 摇床转速分别为 80、120、160 和 200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; 其中氨氮浓度均为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。固定单一影响因子,其余条件分别为温度 30℃、pH = 7.0、C/N = 10 以及转速 160 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。将处于对数生长期的菌液($D_{600} = 1.000$)以 1% 接种量接种于 100 mL 的不同培养基中,各培养基分装于 250 mL 锥形瓶中经高压灭菌。摇床培养约 24 h,测定 D_{600} 、氨氮和 TOC 浓度变化。

1.3.2 菌株 YL 对不同氮源的利用

碳源为琥珀酸钠,氮源分别为氨氮、羟胺、亚硝酸盐和硝酸盐,培养基对应的浓度为: 氨氮 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、羟胺 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、亚硝氮和硝氮均为 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。接种量为 1%、C/N = 10、30℃、160 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下培养 48 h,定时测定其 D_{600} 、pH、TOC 以及氮浓度,判断菌株 YL 对 4 种氮源的利用情况。

1.3.3 正交试验设计

为优化菌株 YL 好氧反硝化性能的条件,以硝酸盐为利用氮源,设计 $L^{16}(4^4)$ 正交试验,因素水平表见表 1。将菌液以 1% 的接种量接种于装有 100 mL 培养基的 250 mL 锥形瓶中,采用恒温摇床培养,取上清液测定硝氮浓度及总氮浓度。

表 1 正交试验因素水平表

因素	转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	C/N	温度/℃	pH
水平 1	80	5	15	6
水平 2	120	10	20	7
水平 3	160	15	30	8
水平 4	200	20	37	9

1.4 分析方法

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 和 TN 浓度均采用标准方法测定^[9]; $\text{NH}_2\text{OH}-\text{N}$ 浓度采用间接分光光度法^[10]; 菌体生长吸光度(D_{600})采用吸光度法测定; TOC 采用日本岛津 TOC-LCPN 分析仪测定; pH 值采用雷磁 DHS-3D pH 计测定。

2 结果与讨论

2.1 菌株的鉴定

YL 的菌落表面扁平湿润、不透明,光泽度好。菌落颜色为蓝绿色,表明在培养过程中菌株分泌了某种色素。革兰氏染色为阴性,大小为 0.5 $\mu\text{m} \times (1.0 \sim 1.5) \mu\text{m}$ 。电镜扫描照片见图 1。

经 16S rDNA 测序(序列号: KJ765709)BLAST 同源性检索,发现 YL 与 *Pseudomonas aeruginosa*



图1 菌株 YL 的电镜扫描照片

Fig. 1 Scanning electron micrograph of strain YL

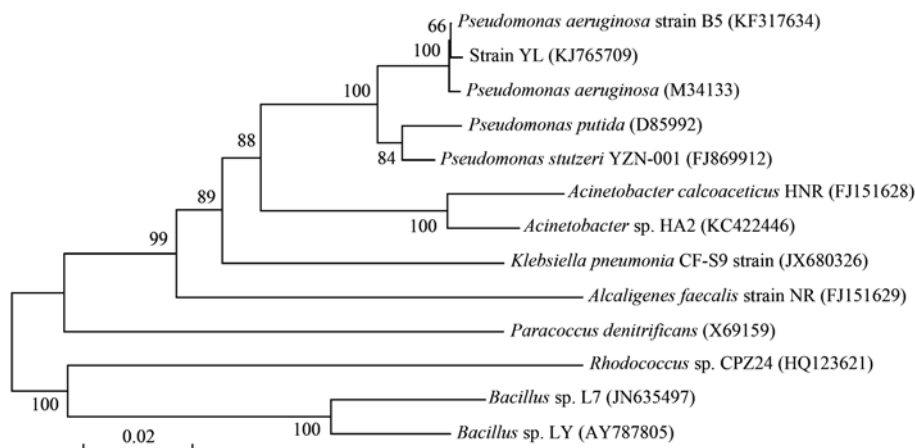


图2 YL 的系统进化树

Fig. 2 Phylogenetic tree of strain YL

TOC 去除率仅为 8.1% 和 8.9%。可见菌株 YL 利用有机酸优于像葡萄糖和蔗糖这种常用糖类,这与姜磊等^[11]研究的菌株 *Pseudomonas* sp. N6 对乙酸钠和琥珀酸钠利用率高于对大分子有机物的利用一致。所以琥珀酸钠可作为菌株 YL 的最佳碳源。

从图 3(b) 可以看出, C/N = 2 和 C/N = 5 时, D_{600} 分别为 0.303 和 0.707, 氨氮去除率仅为 39.4% 和 67.6%, TOC 几乎完全去除, 说明碳源不足会使菌体的生长受到抑制, 氨氮去除效果差。C/N 为 10 和 15 时, 氨氮去除率分别为 98.9% 和 99.2%, TOC 去除率分别为 90.8% 和 90.1%, 对应的 D_{600} 分别为 1.382 和 1.229。菌体在较高 C/N = 15 下生长快速, 更快进入内源呼吸期, D_{600} 较 C/N = 10 时有所下降。所以适宜菌株 YL 生长及反应的 C/N 为 10。

由图 3(c) 可知, 在弱碱环境 (pH 7~9) 下, 菌株 YL 有着很好的氨氧化效果, 对应 D_{600} 值分别为

(M34133) 的相似性在 99% 以上, 结合菌株的形态学特征, 可以初步确定菌株为铜绿假单胞菌, 命名为 *Pseudomonas aeruginosa* YL。使用 MEGA 5.0 核酸分析软件将菌株 YL 与某些异养硝化细菌和其他假单胞菌属进行系统发育分析, 得到 YL 的系统进化树 (图 2), 进一步表明菌株 YL 为 *Pseudomonas aeruginosa*。

2.2 不同反应条件对菌株 YL 异养硝化的影响

图 3(a) 表明, 当碳源是乙酸钠、琥珀酸钠和柠檬酸钠时, 24 h 后氨氮去除率均达到 90.0% 以上, TOC 去除率均达到 80% 以上, D_{600} 均在 0.735 以上。其中利用琥珀酸钠时氨氮去除率为 98.9%、TOC 去除率为 90.8%, 且 D_{600} 达到最大 1.382。而碳源为葡萄糖和蔗糖时, 氨氮去除率仅为 26.3% 和 16.8%,

1.382、1.387 和 1.476, 氨氮去除率分别高达 98.9%、98.3% 和 97.8%, TOC 去除率分别为 90.8%、85.6% 和 80.3%。在偏酸条件 (pH = 5) 及碱性条件 (pH = 10) 下, 氨氮去除率降至 85.5% 和 65.5%。而在 pH < 5 以及 pH > 10 这种过酸过碱的环境下, 菌株 YL 几乎不生长。可见菌株 YL 耐受 pH 范围为 5~10, 最佳 pH 为 7.0。菌株 YL 适应的 pH 范围与王兆阳等^[12]研究的耐冷兼性嗜碱性菌株 *Pseudomonas* sp. GL19 (pH 6~10) 大致相同。

由图 3(d) 可见, 温度为 10℃ 时, 菌株 YL 几乎不生长。随着温度升高, 菌体生长量和氨氮去除率增加, 30℃ 下氨氮去除率为 98.9%, TOC 去除率为 90.8%, D_{600} 值为 1.382。但在 37℃, D_{600} 明显降低, 氨氮和 TOC 去除率也下降, 这是因为随着温度升高, 生物活性物质变性, 细胞功能下降甚至死亡, 从而影响反应效果^[13]。可见菌株 YL 最适温度为

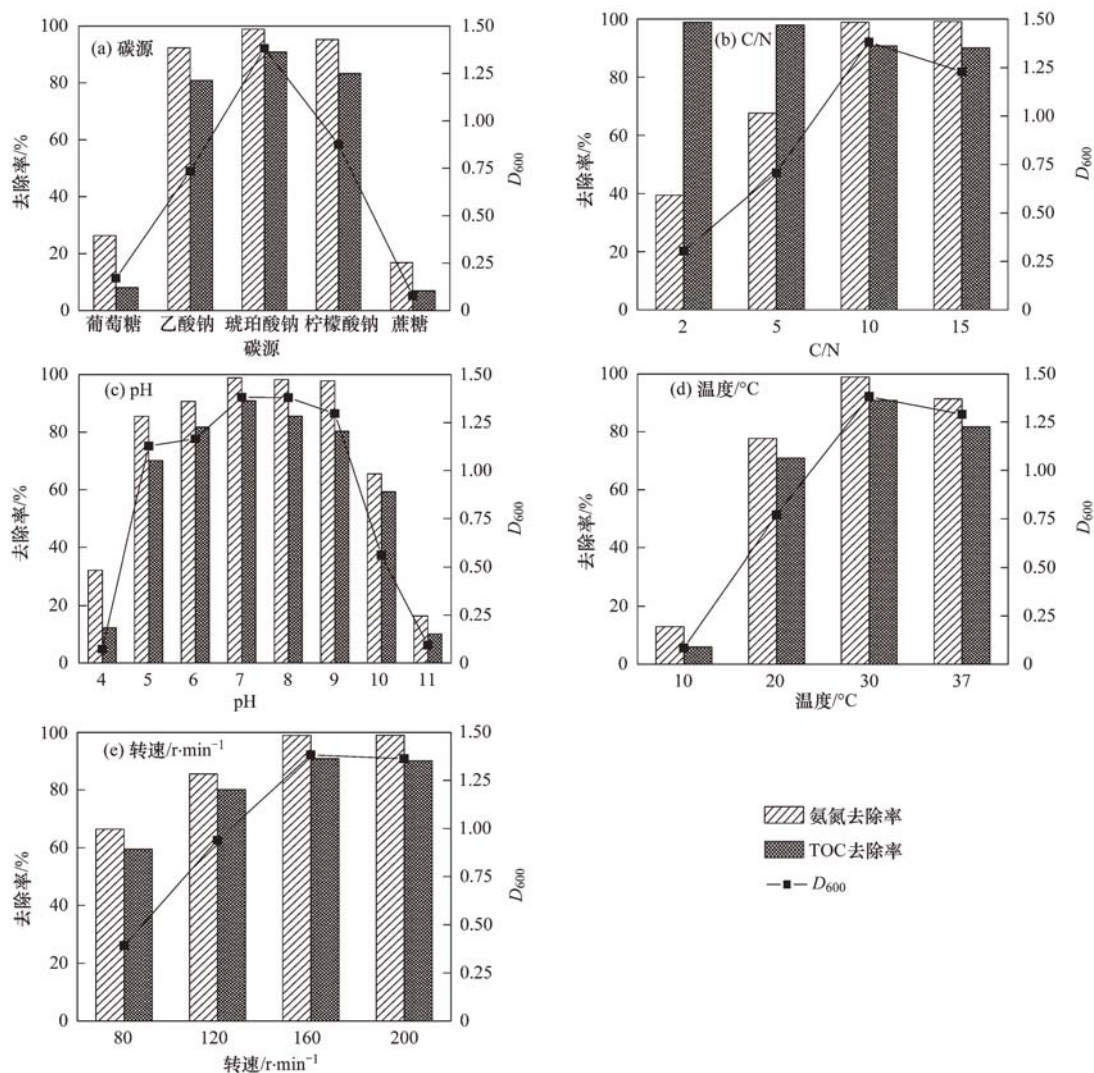


图3 不同反应条件对菌株 YL 异养硝化的影响

Fig. 3 Effects of various reaction conditions on heterotrophic nitrification of strain YL

30℃.

如图3(e)所示,随着转速的增加,菌体的 D_{600} 和氨氮去除率增加. 在转速为 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,氨氮都接近完全去除,去除率分别为 98.9% 和 99.0%, TOC 去除率分别为 90.8% 和 90.2%. 但转速 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下的 D_{600} 相比略低,分别为 1.382 和 1.362. 转速太低,溶解氧不足,反应效果差;提高转速可以加快氧的传递,反应完全. 所以,转速在 $160 \sim 200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间,菌株生长、氨氧化效果及 TOC 去除效果好.

2.3 菌株 YL 对不同氮源的利用

分别以硫酸铵、亚硝酸钠、硝酸钾和盐酸羟胺作为单一氮源培养 48 h,考察菌株 YL 对不同氮源的利用情况,结果见图4.

图4(a)表明,氨氮和总氮在 18 h 去除率均达

到 100%. 反应 24 h 后 D_{600} 值达到最大 1.382, pH 从 7.0 增至 9.0. TOC 随着氨氮的降解而显著下降, TOC 去除率和 TOC 转化速率分别为 90.8% 和 $50.55 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ [$45.95 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$]. 反应过程中出现明显的羟胺转化,9 h 时 $\text{NH}_2\text{OH-N}$ 浓度达到最大,积累量为 $2.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此后逐渐降低. 反应 20 h 后氨氮浓度逐渐增加,说明此时菌群进入内源呼吸期,之前用于细胞合成的氮源分解为氨氮再次回到水中. 通过菌生长合成所去除的氨氮占总去除氨氮的 50.2%. 菌株 YL 最大比生长速率为 0.19 h^{-1} ,而自养硝化细菌的比生长速率通常为 $0.008 \sim 0.045 \text{ h}^{-1}$ [14],可见菌株 YL 增殖速率较自养硝化细菌高出一个数量级;最大氨氮降解速率在 12 ~ 18 h 时,为 $8.37 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ [$7.61 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$],平均氨氧化速率为 $5.55 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ [5.05

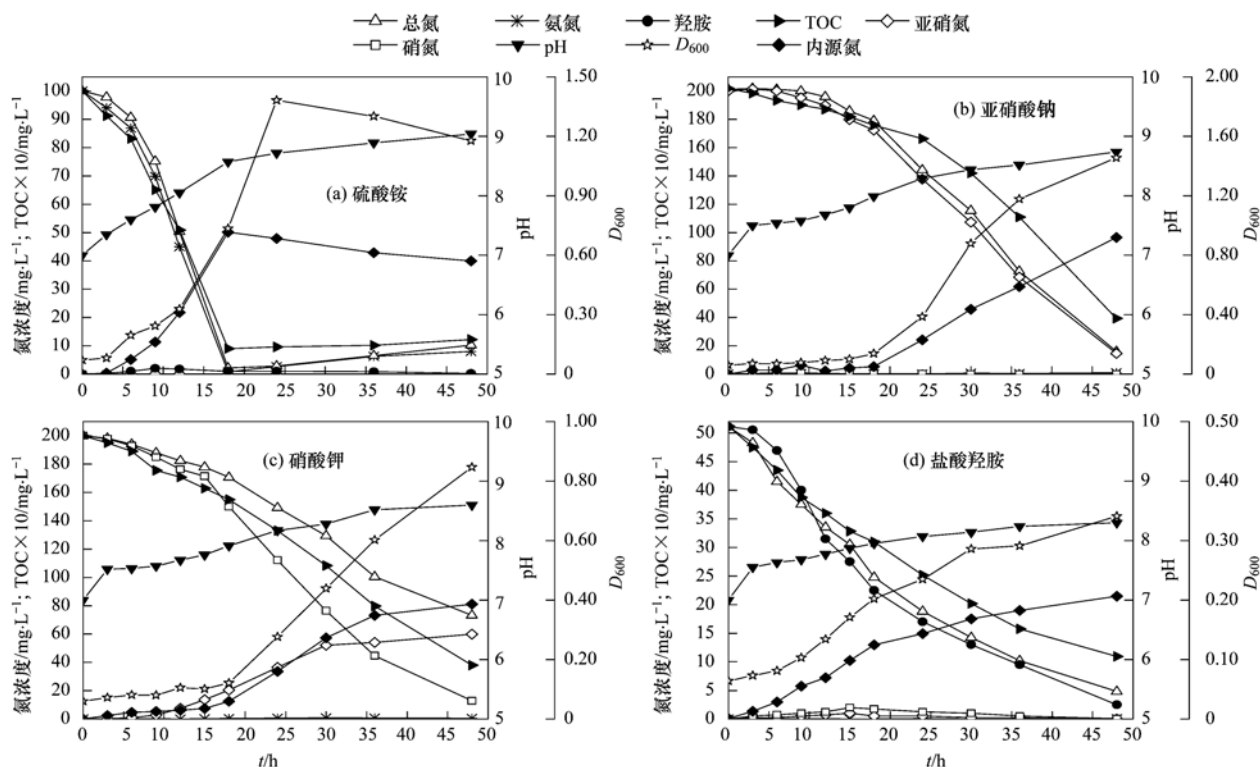


图4 菌株 YL 对不同氮源的降解

Fig. 4 Biodegradation of nitrogen sources by strain YL

$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$], 与自养硝化细菌的平均氨氧化速率 $7.0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ [14] 相比在同一数量级。另外, 反应过程无亚硝氮积累且总氮去除完全, 这不同于同等条件时菌株筛选所用 SBR 中的硝化污泥, 即脱氮时出现明显亚硝氮积累 (最高浓度为 $28.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 总氮去除率仅为 56.4%。故菌株 YL 可以用于处理高氨废水或作为生物添加的候选菌株。

由图 4(b) 和 4(c) 可见, 在初始亚硝氮浓度和硝氮浓度均为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 菌株 YL 均生长良好, 内源氮和 D_{600} 值同时在 48 h 时达到最大, pH 由 7.0 分别上升至 8.7 和 8.6, TOC 去除率分别为 80.3% 和 81.0%, 说明 YL 能够利用亚硝酸盐和硝酸盐生长及代谢。这与已报道的一些异养硝化菌一致, 如 *Pseudomonas stutzeri* F1 [15]、*P. mendocina* TN-05 [16]、*P. stutzeri* YZN-001 [17] 等。以亚硝酸盐为唯一氮源时, 反应 9 h 内亚硝氮浓度没有明显变化, 9 h 后才显著下降, 说明高浓度亚硝酸盐虽对微生物活性有抑制作用, 但菌株 YL 对其有适应性。最大比生长速率在 24 ~ 30 h 时, 为 0.09 h^{-1} 。最大亚硝氮降解速率在 30 ~ 36 h, 为 $6.46 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ [5.87 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$], 平均降解速率为 $3.86 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ [3.51 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$], 与 *Klebsiella pneumoniae* CF-S9 [18]、*Acinetobacter* sp. TN-14 [19] 等相当。反应中有

痕量氨氮和硝氮的产生, 最终亚硝氮去除率及总氮去除率分别为 92.7% 和 91.9%。相比于 *Bacillus* sp. YX-6 在亚硝氮浓度超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时反硝化活性便受到抑制 [20], 以及 *Acinetobacter* sp. HA2 在起始亚硝氮浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的去除率仅为 83.6% [21], 菌株 YL 更能高效利用较高浓度的亚硝氮。以硝酸盐为唯一氮源时, 菌株 YL 最大比生长速率在 18 ~ 24 h 时, 为 0.10 h^{-1} 。最大硝氮降解速率在 15 ~ 18 h 时, 为 $7.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ [6.55 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$]。平均降解速率为 $3.90 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ [3.55 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$]。最终硝氮去除率为 93.6%, 对硝氮的去除率高于利用亚硝氮。去除硝氮过程中亚硝氮逐渐累积, 在 48 h 时积累量为 $59.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总氮去除率为 63.4%。说明硝氮只是快速地转化为亚硝氮, 没有达到完全的氮去除, 这是因为硝氮初始浓度高达 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高浓度硝氮大量转化为亚硝氮、而亚硝氮反硝化不及时所致。

在以羟胺为唯一氮源时, 如图 4(d), D_{600} 值在 48 h 可达到 0.341, 最大比生长速率在 9 ~ 12 h 时, 为 0.07 h^{-1} 。羟胺去除率达到 94.8%, 平均降解速率为 $1.0 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ [0.91 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$], TOC 去除率为 78.1%。pH 从 7.0 增至 8.3。通过氮平衡分析, 内源氮占消耗羟胺的 45.2%, 其余

54.8% 用于反硝化. 反应 15 h 内亚硝氮和硝氮浓度逐步增加,15 h 后逐渐降低. 可见菌株 YL 能够利用羟胺生长,这与一些已报道的菌株不同,如 *Acinetobacter calcoaceticus* HNR^[22] 既不能利用亚硝酸盐、硝酸盐,也不能利用羟胺生长; *Thiosphaera pantotropha*^[23] 能利用亚硝酸盐和硝酸盐生长,却不能利用羟胺生长.

综上,菌株 YL 能够利用氨氮、亚硝氮、硝氮和羟胺这 4 种氮源,但以氨氮为增殖底物时菌株 YL

的最大比生长速率最快,其次分别为硝氮、亚硝氮和羟胺.

2.4 菌株 YL 的好氧反硝化性能优化

对正交试验结果进行分析,见表 2. 在初始硝氮浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,培养 1 d 后,有 9 组条件下硝氮去除率达到 50% 以上,说明菌株 YL 环境适应性好. 分别以硝氮去除率和总氮去除率为指标,通过极差分析法分析各因素对菌株 YL 好氧反硝化性能的影响顺序.

表 2 正交试验结果分析

Table 2 Analysis of orthogonal experiment results

试验编号	转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	C/N	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH	硝氮去除率/%	总氮去除率/%
1	80	5	15	6.0	12.6	9.1
2	80	20	30	9.0	66.4	50.5
3	80	15	20	8.0	57.6	40.3
4	80	10	37	7.0	59.2	42.8
5	120	10	20	6.0	47.4	43.9
6	120	20	15	8.0	33.9	29.6
7	120	15	37	9.0	51.5	44.6
8	120	5	30	7.0	56.1	49.3
9	160	15	30	6.0	67.7	58.8
10	160	10	15	9.0	64.9	59.7
11	160	5	37	8.0	32.3	27.9
12	160	20	20	7.0	65.7	54.7
13	200	20	37	6.0	54.7	48.3
14	200	15	15	7.0	64.6	58.3
15	200	5	20	9.0	52.3	47.8
16	200	10	30	8.0	87.3	67.8
K1	49.0	35.7	38.3	33.5	44.0	39.2
K2	47.2	41.9	64.7	53.6	55.8	46.7
K3	57.7	50.3	60.4	50.5	69.4	56.6
K4	64.7	55.6	55.2	45.8	49.4	40.9
极差 R	17.5	19.9	26.4	20.0	25.4	17.4

从表 2 看出,以硝氮去除率为指标,各因素影响好氧反硝化性能的主次顺序为 $\text{C/N} > \text{温度} > \text{转速} > \text{pH}$,以总氮去除率为指标,各因素影响的主次顺序为 $\text{C/N} > \text{转速} > \text{温度} > \text{pH}$,说明好氧反硝化时 YL 对 C/N 的敏感度高. 另外,充足的碳源虽能保证好氧反硝化的有效进行,但 C/N 过高会使有机物嵌入酶结构而影响酶活性,从而抑制反应^[24]. 转速和温度影响次之,pH 影响最小. 而且通过这两个指标分析推出的最优条件均为: $\text{C/N} = 10, T = 30^{\circ}\text{C}, r = 200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}, \text{pH} = 7.0$.

为验证正交试验结果的有效性,在最优水平组合条件下对菌株 YL 进行硝氮降解试验,结果如图 5 所示. 反应 24 h 内,硝氮浓度持续下降, D_{600} 值和 pH 持续增大,说明菌体生长处于增殖期,菌株生长良好. 24 h 后进入内源呼吸期, D_{600} 值开始下降,出

现少量氨氮累积. 最大硝氮降解速率在 12 ~ 15 h 时,为 $8.47\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ [$7.70\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$],降解速率较之前有所提高. 反应 48 h 后,硝氮去除率达

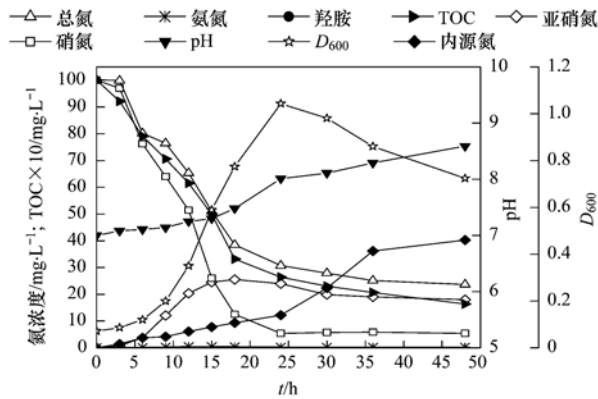


图 5 优选条件下菌株 YL 的反硝化特性

Fig. 5 Denitrification characteristics of strain YL under the optimal condition

到 94.6%, TOC 去除率为 83.6%, 虽整个反应过程中亚硝氮逐渐积累, 但总氮的去除率达到 76.3%。通过氮平衡计算得出, 内源氮占去除硝氮的 42.6%。内源呼吸期时硝氮值稳定在 $5.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 无明显降解现象, 相比于 HN-AD 菌 *Rhodococcus pyridinivorans* CPZ24 只能将硝氮浓度由初始的 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降解到 $16.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [25], 菌株 YL 对硝氮的利用更具优势。

3 结论

(1) 从高氮环境的 SBR 反应器中筛得 1 株异养硝化-好氧反硝化菌 YL, 鉴定为铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*)。

(2) 菌株 YL 氨氧化最适宜的碳源是琥珀酸钠、C/N 为 10、pH 为 7.0、温度为 30°C , 以及转速 $160 \sim 200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。此时氨氧化速率为 $5.05 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, TOC 转化速率为 $45.95 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。氨氮和 TOC 去除率分别为 100% 和 90.8%。

(3) 菌株 YL 不仅能去除氨氮, 还能利用亚硝酸盐、硝酸盐和羟胺生长代谢。相比于其它氮源, 以氨氮为增殖底物时菌株 YL 的增殖速率最大, 且无亚硝氮和硝氮的积累。

(4) 影响菌株 YL 好氧反硝化特性最主要的因素是 C/N, 优化条件为: C/N = 10, $T = 30^\circ\text{C}$, $r = 200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, pH = 7。

参考文献:

- [1] Robertson L A, Van Niel E W J, Torremans R A M, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat cultures of *Thiosphaera pantotropha* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1988, **54**(11): 2812-2818.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 刘健楠, 汪苹, 尹明锐, 等. 高效异养硝化-好氧反硝化菌株的分离鉴定及脱氮性能[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2010, **28**(2): 18-23.
- [5] 辛玉峰, 曲晓华, 袁梦冬, 等. 一株异养硝化-反硝化不动杆菌的分离鉴定及脱氮活性[J]. 微生物学报, 2011, **51**(12): 1646-1654.
- [6] Joo H S, Hirai M, Shoda M. Piggery wastewater treatment using *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 with heterotrophic nitrification and aerobic denitrification [J]. Water Research, 2006, **40**(16): 3029-3036.
- [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] Ren Y X, Yang L, Liang X. The characteristics of a novel heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium, *Acinetobacter junii* YB [J]. Bioresource Technology, 2014, **171**: 1-9.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 254-279.
- [10] Frear D S, Burrell R C. Spectrophotometric method for determining hydroxylamine reductase activity in higher plants [J]. Analytical Chemistry, 1955, **27**(10): 1664-1665.
- [11] 姜磊, 徐成斌, 马溪平, 等. 1 株好氧反硝化菌的分离鉴定和反硝化特性研究[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(3): 12-15.
- [12] 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.
- [13] 杨秀玲, 杨宗政, 庞金钊, 等. 具有硝化作用的异养菌脱除氨氮的性能研究[J]. 天津科技大学学报, 2005, **20**(1): 24-26.
- [14] 张自杰. 排水工程[M]. (第四版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 311-312.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Padhi S K, Tripathy S, Sen R, *et al.* Characterisation of heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying *Klebsiella pneumoniae* CF-S9 strain for bioremediation of wastewater [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, **78**: 67-73.
- [19] 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.
- [20] Song Z F, An J, Fu G H, *et al.* Isolation and characterization of an aerobic denitrifying *Bacillus* sp. YX-6 from shrimp culture ponds [J]. Aquaculture, 2011, **319**(1-2): 188-193.
- [21] Yao S, Ni J R, Ma T, *et al.* Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at low temperature by a newly isolated bacterium, *Acinetobacter* sp. HA2 [J]. Bioresource Technology, 2013, **139**: 80-86.
- [22] Zhao B, He Y L, Hughes J, *et al.* Heterotrophic nitrogen removal by a newly isolated *Acinetobacter calcoaceticus* HNR [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(14): 5194-5200.

- [23] Arts P A M, Robertson L A, Kuenen J G. Nitrification and denitrification by *Thiosphaera pantotropha* in aerobic chemostat cultures [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1995, **18**(4): 305-315.
- [24] 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.
- [25] 陈咄圳, 王立刚, 王迎春, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌的筛选及脱氮性能的实验研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3614-3618.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@rcees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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