

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果

全向春, 岑艳, 钱殷

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 经富集培养、BTB 培养基初筛与反硝化能力测定, 从城市污水处理厂活性污泥中筛选得到 2 株好氧反硝化细菌. 通过 16S rDNA 同源性分析对 2 菌株进行鉴定; 并将这 2 菌株接种到贫营养生物膜体系中以探究它们对系统总氮的去除能力的强化. 结果表明, 这 2 菌株分别属于 *Pseudomonas aeruginosa* 和 *Pseudomonas putida*, 2 株好氧反硝化菌单独存在时, 对模拟废水的 TN 去除率分别达 78% 和 82%; 2 株细菌强化后的生物膜系统对 TN 去除率达 68% 和 64%, 较非强化对照系统分别提高 47% 和 43%, 且 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率均接近 100%. 说明这 2 株好氧反硝化细菌具有较强的反硝化能力, 并能够有效强化生物膜在贫营养条件下的反硝化能力, 并且不会抑制生物膜硝化能力, 可实现生物膜系统同步硝化反硝化.

关键词: 好氧反硝化菌; 16S rDNA; 贫营养生物膜; 强化; 脱氮; 同步硝化反硝化

中图分类号: X172; X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)07-2862-07

Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions

QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin

(School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Two aerobic denitrifying bacteria were isolated from the sludge of municipal wastewater treatment plant by enrichment, preliminary screening with BTB culture medium and the denitrification potential test and identified through 16S rDNA sequence analysis. Then they were bioaugmented to oligotrophic biofilm system respectively, aiming to enhance the denitrification capacity. The two strains were identified as *Pseudomonas aeruginosa* and *Pseudomonas putida* respectively. They could remove 78% or 82% of the total nitrogen in the simulate wastewater when existed alone. And the total nitrogen removal efficiency of the biofilm system reached 68% and 64% after bioaugmentation with two trains, increased by 47% and 43% compared to the control, respectively. Meanwhile, the ammonia nitrogen was nearly 100% removed. It can be concluded that two aerobic denitrifiers can enhance the denitrification of biofilm system significantly under oligotrophic conditions and will not inhibit the nitrification process, therefore can help biofilm system achieve simultaneous nitrification and denitrification.

Key words: aerobic denitrifying bacteria; 16S rDNA; oligotrophic biofilm system; enhance; denitrification; simultaneous nitrification and denitrification

近年来,随着工农业污染和水土流失加剧,氮素污染日益严重. 不仅会造成水体富营养化,也可能对人体和动物产生危害. 生物脱氮法高效、低耗,已成为污水脱氮处理中经济有效的方法之一^[1].

生物脱氮包括好氧硝化和缺氧反硝化两个过程. 传统理论认为,细菌反硝化过程是严格厌氧过程. 大多数反硝化菌在低溶氧($0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)条件下仍使用溶解氧作为最终电子受体,硝酸盐和亚硝酸盐并未消耗,因此阻止了反硝化反应进行. 但近年来的研究表明,有氧条件下也存在反硝化反应. 自 20 世纪 80 年代,Robertson 等^[2]在除硫和反硝化处理系统中首次分离出好氧反硝化菌后,国内外学者陆续分离出一些好氧反硝化菌^[3],发现有氧条件下的反硝化反应有利于实现同一生物反应器内同步硝化反硝化过程,可大大降低生物处理操作难度和运

行成本,缩短处理周期^[4].

目前,关于污染环境的生物脱氮理论与技术已有不少研究报道^[5~7],但是关于在贫营养条件下进行反硝化的高效脱氮细菌报道则相对较少^[8]. 贫营养条件主要针对微污染水. 微污染水是指水的物理、化学和微生物指标已不能达到《地表水环境质量标准》中作为生活饮用水源水的水质要求^[9],微污染水中污染物很多,包括天然有机物、合成有机物、氮化物、硫化物、 Fe^{2+} 等,它们的浓度一般在数 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但并无一个严格的上限^[10]. 在自然界中,绝大多数自然环境都是以贫营养为特征的,如沙漠中的有机碳含量不足 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占地球总面积 70% 以

收稿日期: 2012-10-06; 修订日期: 2013-01-09

作者简介: 全向春(1973~),女,博士,副教授,主要研究方向为废水生物处理, E-mail: xchquan@bnu.edu.cn

上的海洋中的可溶性有机碳(DOC)浓度为 $0.35 \sim 70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 颗粒性有机碳(POC)浓度为 $3 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 贫营养湖泊的光合强度不超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [11]; 另外, 也有研究认为城市污水二级出水(BOD_5 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SS $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ $25/30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) [12] 为贫营养水 [9, 13]。这些水体有机物浓度低, 一般微生物的生长、增殖和正常的新陈代谢功能会受到抑制而无法发挥作用 [14]; 从脱氮效应看, 由于溶解氧的存在, 厌氧反硝化菌难以发挥反硝化作用, 脱氮效果不理想。因此, 研究贫营养条件下好氧反硝化菌对于微污染水体的脱氮效果具有重要理论价值和实践意义。

本研究从城市污水处理厂分离筛选出 2 株好氧反硝化菌, 通过培养、结合 16S rDNA 序列分析对该菌进行了鉴定, 并将其加入贫营养生物膜系统, 考察其在贫营养条件下对生物膜系统脱氮能力的强化作用, 以期为其应用于污水处理, 实现同步硝化反硝化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 培养基

溴百里酚(BTB)培养基: L -天冬酰胺 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; KNO_3 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; KH_2PO_4 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{Mg}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; BTB $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ (1% 量溶于乙醇), 琼脂 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; pH $7.0 \sim 7.3$, 培养基呈墨绿色。

LB 表达培养基: 蛋白胨 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 葡萄糖 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 酵母提取物 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; NaCl $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; pH $7.0 \sim 7.5$ 。

筛选富集培养基: 丁二酸钠 $2.84 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; NaNO_3 $0.85 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; KH_2PO_4 $1.36 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $0.27 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 酵母提取物 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.19 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 微量元素溶液 [15] $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.2 。

1.2 好氧反硝化菌筛选

本研究从某城市污水处理厂活性污泥中筛选好氧反硝化细菌。

1.2.1 好氧反硝化菌初筛

取一定量城市污水处理厂污泥, 用 $1 \times \text{PBS}$ 溶液洗涤 3 次以上, 再用蒸馏水洗涤若干次, 加入一定量蒸馏水后用旋转匀浆仪充分打碎混匀。取 1 mL 混合液加到 200 mL 筛选富集培养基中, 于 30°C 下, $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温摇床中振荡 72 h 。从上述液体中取 5 mL 培养液, 加到新鲜筛选富集培养基中培养 72

h , 重复 3 次。取该培养菌液, 稀释后涂布于 BTB 固体培养基上, 于 30°C 下培养 $1 \sim 3 \text{ d}$, 挑取周围有蓝色晕圈的群落进行进一步筛选分离 [16~18]。

1.2.2 好氧反硝化菌的复筛

将分离后的菌株用肠杆菌科基因间重复一致序列 PCR (enterobacterial repetitive intergenic consensus-PCR, ERIC-PCR) 进行基因分型, 初步确定基因类别。引物为文献 [19] 报道的 ERIC-1: $5'$ -ATGTAAGCTCCTGGGGATTAC- $3'$ 和 ERIC-2: $5'$ -AAGTAAGTGACTGGGGTGAGCG- $3'$, 扩增体系 ($25 \mu\text{L}$ 体系) 配置如下: *Taq* DNA 聚合酶 T ($5 \text{ U} \cdot \mu\text{L}^{-1}$), $0.5 \mu\text{L}$; $10 \times \text{buffer}$, $2.5 \mu\text{L}$; dNTP Mixture ($2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), $2 \mu\text{L}$; 模板 DNA ($40 \sim 80 \text{ ng}$), $1 \mu\text{L}$; 引物 ERIC-1 ($20 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$), $0.5 \mu\text{L}$; 引物 ERIC-2 ($20 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$), $0.5 \mu\text{L}$; 灭菌 MilliQ 水, $18 \mu\text{L}$ 。反应程序: 95°C 预变性 7 min ; 94°C 变性 1 min , 52°C 退火 1 min , 65°C 延伸 8 min , 共 30 个循环; 65°C 延伸 16 min , 1 个循环, 共 5.5 h 。PCR 产物用 1% 琼脂糖凝胶电泳 1.5 h , 用凝胶成像系统观察结果, 并拍照判断; 用 Quantity one 4.6.2 (Bio-Rad) 分析凝胶电泳图, 进行聚类分析, 计算方法采用非加权组算术平均法 (unweighted pair-group method with arithmetic means, UPGMA), 初步判断基因型。

选取基因型不同的好氧反硝化菌在 LB 培养基中进行纯培养后, 接种于装有 100 mL 模拟废水 (TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的理论浓度分别为 50 、 15 、 $35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 浓度为 $100 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的锥形瓶中。将锥形瓶于 30°C 下、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中振荡 3 d , 定时取样测定 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化, 挑选对 TN 去除率最高的菌株进行下一步实验。

1.3 好氧反硝化菌鉴定

挑选出对 TN 去除率相对较高的菌株接种到 LB 表达培养基中进行纯培养, 然后采用 EZ Spin Column Genomic DNA Isolation Kit 试剂盒 (加拿大 BBI) 提取细菌总 DNA, 进行 16S rDNA 序列测定。

16S rDNA 扩增引物为 341F 和 907R, 扩增目标片段长度约为 550 bp 。

PCR 反应体系 ($50 \mu\text{L}$) 组份配置如下: *Taq* DNA 聚合酶 T ($5 \text{ U} \cdot \mu\text{L}^{-1}$), $0.25 \mu\text{L}$; $10 \times \text{Buffer}$ (Mg^{2+} Plus), $5 \mu\text{L}$; dNTP Mixture (各 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), $4 \mu\text{L}$; 模板 DNA (菌株总 DNA), $1 \mu\text{L}$; 引物 341F, $1 \mu\text{L}$; 引物 907R, $1 \mu\text{L}$; 灭菌 MilliQ 水, $38.75 \mu\text{L}$ 。

反应程序采用保守型降落式 PCR 反应 [20]: 94°C 预变性 5 min , 前 8 个循环为 94°C 变性 30 s , 63

~56℃退火 60 s, 72℃延伸 90 s(其中每一个循环后退火温度下降 1℃); 然后 94℃变性 30 s, 55℃退火 60 s, 72℃延伸 90 s, 循环 25 次, 最后 72℃延伸 7 min. PCR 产物使用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测, PCR 过程中每个目标片段扩增设置 3 个以上平行样, 以防止 PCR 偏好性造成结果偏差.

PCR 产物送交北京三博生物工程公司进行测序, 测序结果提交 NCBI 进行 BLAST 比对, 搜索序列同源性, 并结合国内外研究中已得到验证的好氧反硝化细菌序列, 进行系统发育分析, 确定该细菌同源性. 系统发育分析利用软件 Clustal 1.83 和 MEGA 4.1 完成, 建树方法采用 Neighbour-Joining 法, 进化距离计算方法为最大似然法(maximum composite likelihood), 验证 Bootstrap 计算 500 次.

1.4 好氧反硝化细菌对贫营养生物膜系统反硝化能力的强化

将筛选得到的高效反硝化细菌接种于 LB 表达培养基中, 于 30℃、120 r·min⁻¹ 恒温摇床中培养 12 h, 在 50 mL 离心管中分别加入等量菌液, 5 000 r·min⁻¹ 进行离心 10 min, 收集菌体, 用无菌蒸馏水洗涤 3 遍后再用无菌水稀释, 在漩涡振荡仪上混匀.

向 500 mL 锥形瓶中加入 200 mL 模拟废水, 加入一定量经过洗涤的挂膜填料, 按照 1:100 的比例投加好氧反硝化菌液, 对照组不加菌液, 将锥形瓶于 30℃下、150 r·min⁻¹ 摇床振荡. 模拟废水中 NH₄⁺-N 理论浓度为 20 mg·L⁻¹, 由 NH₄Cl 提供, COD 为 100 ~ 150 mg·L⁻¹, 由葡萄糖提供, NaHCO₃ 1 500 mg·L⁻¹, NaCl 30 mg·L⁻¹, KH₂PO₄ 50 mg·L⁻¹, KCl

14 mg·L⁻¹, MgSO₄·7H₂O 20 mg·L⁻¹, CaCl₂·2H₂O 18.5 mg·L⁻¹, 微量元素^[21] 0.5 mL·L⁻¹, pH 7.2. 定时取样测定 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 浓度变化, 考察反硝化细菌在贫营养条件下对生物膜反硝化功能的强化.

1.5 采样与分析方法

本实验所采用的采样器为自制针筒型采样器. 水样经过普通滤纸过滤后进行分析测定. COD 采用美国 HACH 快速测定仪测定, NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 采用美国 SEAL AA3 型流动分析仪测定, TN 采用国标过硫酸钾消解法测定; 另外, 恒温摇床为 HZQ-80 型, 漩涡振荡仪为德国 IKA 型; 所用生物膜来自本实验室的两级生物接触氧化工艺好氧区.

2 结果与分析

2.1 好氧反硝化菌筛选

利用富集培养基在好氧条件下培养好氧反硝化细菌, 在 BTB 平板上进行划线分离, 得到 14 株菌落特征不同的反硝化细菌. 利用肠杆菌属基因间重复一致序列聚合酶链反应(ERIC-PCR)对上述 14 株细菌进行基因分型, 用 Quantity one 4.6.2(Bio-Rad)分析指纹图谱, 进行聚类分析, 结果如图 1 所示. 一般认为相似值高于 0.60 的两个群体具有较好的相似性^[22], 综合指纹图谱和聚类分析图, 选取 14B、4C、1C、5C、2C、3C、7A、13B、5B 等 9 种反硝化细菌进行纯培养, 用以降解模拟废水, 进一步筛选在好氧条件下有较高 TN 去除率的好氧反硝化细菌. 其中 7A 和 14B 对模拟废水 TN 去除率最高, 分别达到

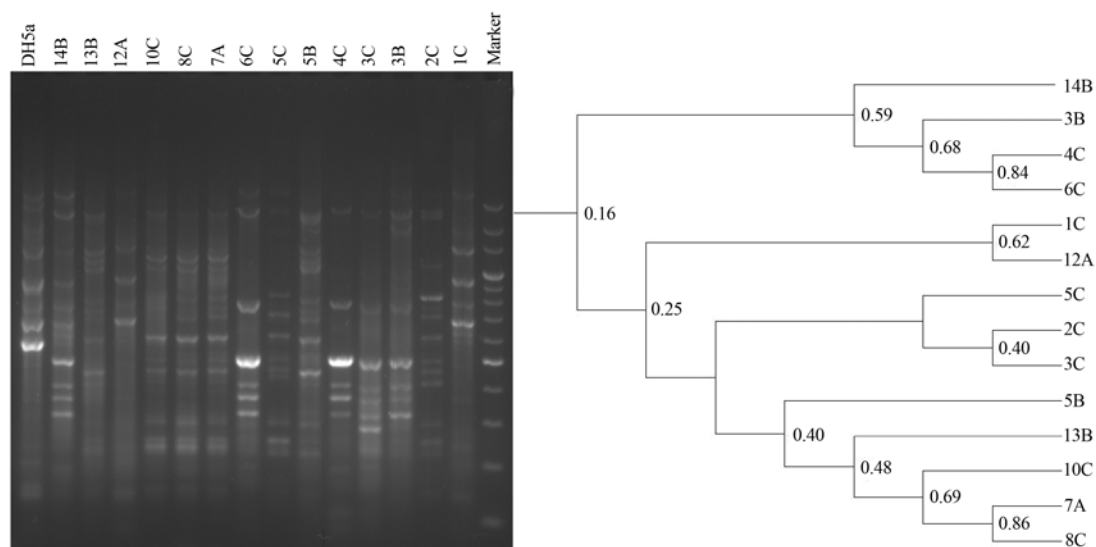


图 1 16 株筛选得到的菌株的 ERIC-PCR 指纹图谱及聚类分析

Fig. 1 ERIC-PCR fingerprints of the 16 stains screened and the dendrogram of ERIC-PCR fingerprints

78% 和 82%。

2.2 好氧反硝化菌鉴定

将编号为 7A 和 14B 的 2 株细菌进行 16S rDNA 测序, 结果提交 BLAST 比对, 结果发现 7A 与 *Pseudomonas aeruginosa* strain W3.1 相似度最高 (99%), 14B 与 *Pseudomonas putida* strain S826 序列相似度最高 (100%)。

国内外研究中已得到验证的高效好氧反硝化细菌主要有 *Alcaligenes denitrificans* DSM 12141T、*Paracoccus denitrificans* ATCC 19367、*Paracoccus versutus* ATCC25364、*Alcaligenes faecalis* B3/I、*Arthrobacter globiformis* DSM 20124T、*Arthrobacter*

ramosus DSM 20546T、*Bacillus coagulans* IAM 12463T、*Bacillus denitrificans* DSM 466、*Nitrosovibrio tenuis*、*Nitrosospira* sp. NpAV、*Nitrosomonas europaea* M103、*Pseudomonas aeruginosa* ATCC 25330、*Pseudomonas putida* ATCC 11172、*Rhodococcus coprophilus* ATCC29080T、*Rhodococcus* sp. SDN、*Rhodococcus rubber* DSM 43338T、*Rhodococcus fascians* ATCC 35014T。利用这些细菌的 16S rDNA 序列与本实验中筛选所得的 2 株好氧反硝化细菌的 16S rDNA 进行系统发育分析, 利用 Clustal 软件分析计算序列同源性, MEGA 软件生成系统进化树, 结果如图 2 所示。

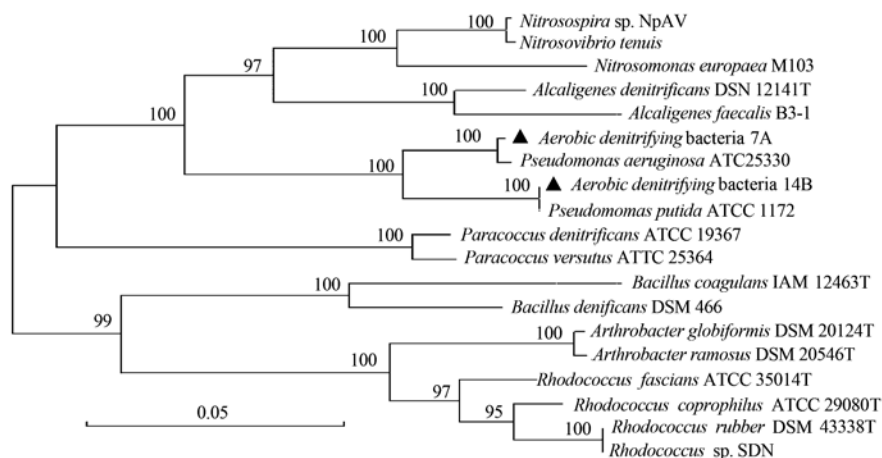


图 2 好氧反硝化细菌 7A 和 14B 的系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree of strains 7A and 14B

从图中可以看出, 反硝化细菌 7A 与 *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 25330 处于同一分支, 14B 与 *Pseudomonas putida* ATCC11172 同源性最高。根据系统发育树, 确定 7A 属于 *Pseudomonas aeruginosa*, 14B 属于 *Pseudomonas putida*。

2.3 好氧反硝化细菌对贫营养生物膜系统反硝化能力的强化

为探究 7A 和 14B 对生物膜在贫营养条件下反硝化能力的强化作用, 本研究对比了批次实验中不投加外源菌的对照系统和分别投加好氧反硝化细菌 7A 和 14B 的生物膜系统对低碳高氮模拟废水中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TN 的去除能力, 结果如图 3 所示。

由图 3(a) 可知, 投加 7A 和 14B 对生物膜系统 NH_4^+ -N 去除率没有明显影响, 前 3 h NH_4^+ -N 去除率均接近 100%, 说明外源菌对生物膜系统硝化作用影响不大。但 NO_3^- -N 和 TN 去除率提升幅度较大 [图 3(c)、图 3(d)]。不投菌的对照系统 NO_3^- -N 含

量在前 3 h 持续上升, 而投菌的生物强化系统 NO_3^- -N 含量的上升期则延长至 4 h, 但其积累量均小于 NH_4^+ -N 减少量, 可能是因为部分氮素经过反硝化作用生成气体、 N_2O 或用于微生物自身生长^[23]。随后 3 个系统的 NO_3^- -N 含量开始下降, 此时系统中反硝化作用应强于硝化作用, 且投菌系统的 NO_3^- -N 含量下降更多, 表明外源好氧反硝化菌的反硝化作用较为明显。3 个系统中, 3 h (对照系统和投加 7A 的系统) 或 4 h (投加 14B 的系统) 后, NO_3^- -N 和 TN 含量基本保持一致, 且不投菌系统、投加 7A 的系统, 投加 14B 的系统中两者含量分别在 4、9、12 h 后保持稳定, 说明原生物膜系统的硝化菌和反硝化菌在 4 h 后基本停止活动, 而 7A 和 14B 的活动时间则较原生物膜系统的反硝化菌的长, 且 14B 较 7A 更长, 可见外源菌在生物膜系统中受土著微生物影响较小。在任意时刻, 投加外源菌的强化系统 TN 含量都较对照系统低。综上, 外源好氧反硝化菌能强化系统的脱氮性能。经计算, 对照系统和投

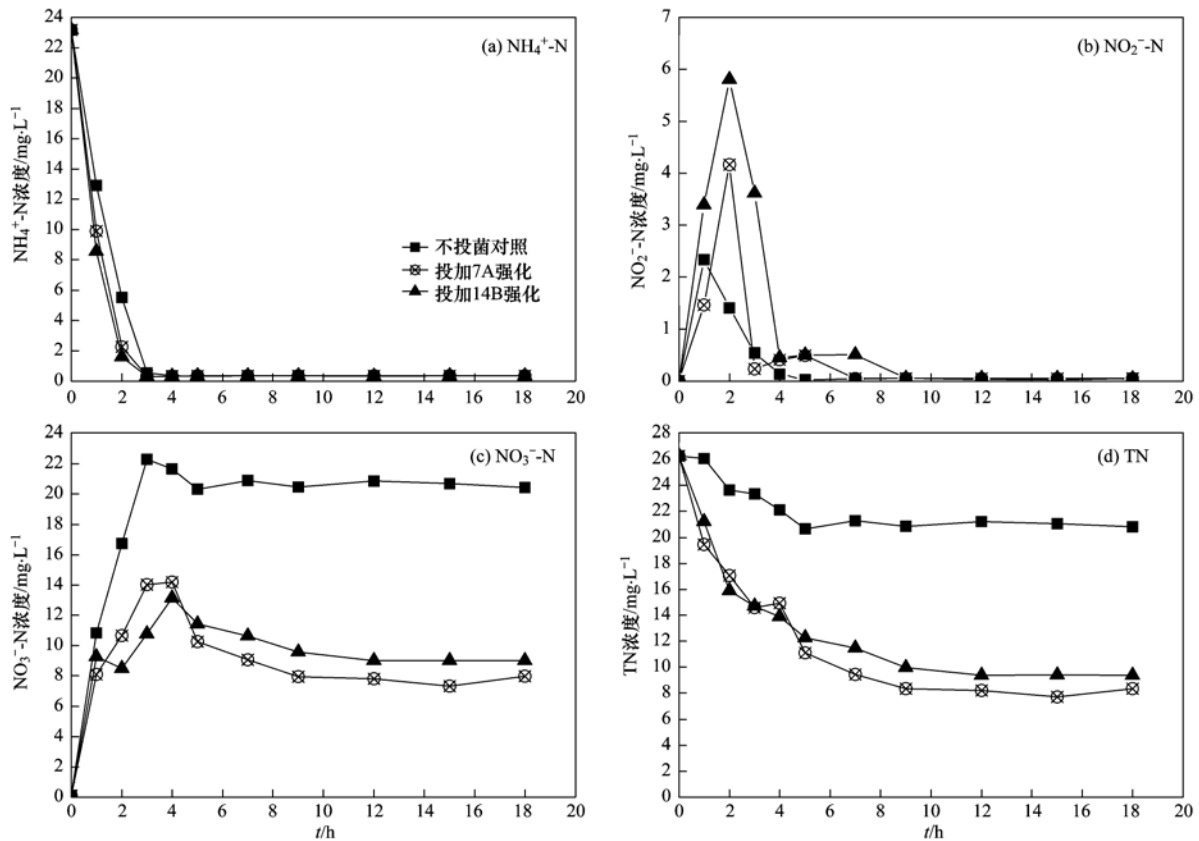


图3 强化生物膜系统及其对照系统的脱氮效果

Fig. 3 Nitrogen removal by the enhanced biofilm system and its control system

加7A、14B的生物膜系统分别获得21%、68%、64%的TN去除率,投加7A和14B的生物膜系统TN去除率分别提升47%和43%。可见,本实验筛选得到的7A和14B两种菌株对生物膜系统脱氮能力有明显的强化作用,与原生物膜系统可实现同步硝化反硝化。但是与只投加7A或只投加14B系统的脱氮效率相比略有下降,可能是种间竞争导致的。

硝化反应和反硝化反应中均产生 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ ^[24],从 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度来看,不投菌系统的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度在1 h达到峰值 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在3 h降到最低,接近于 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;而投加7A和14B的系统 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度均在2 h达到峰值,分别为 $4.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,分别在7 h和9 h才降低到接近于0,可能是在投菌系统中存在的好氧反硝化菌活动时间较对照系统中硝化菌的活动时间长,导致强化系统和对照系统 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度差异。

3 讨论

本研究筛选得到的2株好氧反硝化菌分别属于*Pseudomonas aeruginosa*和*Pseudomonas putida*。国内

外诸多文献已报道*Pseudomonas aeruginosa*和*Pseudomonas putida*的好氧反硝化性能^[25~28],本研究结果与之一致。

筛选所得的好氧反硝化菌在贫营养生物膜系统中能很好地发挥反硝化作用,提高系统脱氮能力,且对原生物膜系统微生物硝化作用影响不大。Satoh等^[29]研究了生物强化技术和生物促生技术强化生物转盘工艺生物膜硝化性能,发现在生物膜系统中投加硝化细菌,外源细菌能够很好地驻留在生物膜表面,大大提高硝化细菌丰度,并有效增强生物膜工艺的硝化活力。Joo等^[30]研究了2株不同的*Alcaligenes faecalis*细菌的硝化和反硝化能力,通过实验证明多菌种混合条件下的硝化率较单一菌种存在时提高1倍,反硝化速率也更高,原因可能是2株细菌的协同作用提高了系统硝化和反硝化能力。本研究在生物膜系统中投加好氧反硝化细菌获得更高的TN去除率,可能也是基于多种外源微生物与土著微生物的协同作用。

3个生物膜系统中均出现了 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的持续累积和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的短暂累积。这与某些单研究好氧反硝化菌时的情况不同。如Chen等^[23]在1株异养硝

化-好氧反硝化菌的研究中,分析了 C/N 比为 8.28, 以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为初始氮源时的氮平衡,初始 TN 为 $97.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 24 h 后,剩余 $8.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $2.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{N H}_2\text{OH}$ 、 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $1.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_3^- - \text{N}$ 以及 $34.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 胞内氮。本研究的结果可能与筛选出的好氧反硝化菌本身的硝化功能与生物膜系统复杂的生物相有关。生物膜本身就是一个由细菌、真菌、菌胶团、藻类、原生动物、后生动物以及一些肉眼可以看见的蠕虫、昆虫的幼虫等组成的有机的,动态的生物群落,与外源好氧反硝化菌的作用也尤为复杂。可能由于外源好氧反硝化菌的反硝化速率小于生物膜微生物的硝化速率,从而导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的累积;期间与硝化、反硝化作用相关的一些酶^[31]可能受到影响,这些需要进一步实验探索。

4 结论

(1)从城市污水处理厂活性污泥系统中筛选得到 2 株好氧反硝化细菌 7A 和 14B, 分别属于 *Pseudomonas aeruginosa* 和 *Pseudomonas putida*, 它们单独存在时对模拟废水 TN 去除率分别为 78% 和 82%。

(2)在贫营养条件下,7A 和 14B 能够提高生物膜系统对 TN 的去除速率,能有效强化生物膜系统脱氮能力。投加 7A 或 14B 后生物膜系统对 TN 去除率分别达到 68% 和 64%, 比对照系统分别高 47% 和 43%。

(3)7A 和 14B 对生物膜系统硝化性能影响较小,说明这两种菌可与生物膜系统在同一条件下实现同步硝化反硝化,具有良好的工程应用潜力。

参考文献:

- [1] 侯金良, 康勇. 城市污水生物脱氮除磷技术的研究进展[J]. 化工进展, 2007, **26**(3): 366-370, 376.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 陈浚, 于佳佳, 蒋铁锋, 等. 生物转鼓过滤器中一株好氧反硝化菌的分离鉴定与降解特性研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 948-954.
- [5] Chen P Z, Li J, Li Q X, et al. Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by bacterium *Rhodococcus* sp. CPZ24[J]. Bioresource Technology, 2012, **116**: 266-270.
- [6] 曹国民, 赵庆祥, 龚剑丽, 等. 新型固定化细胞膜反应器脱氮研究[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(2): 189-193.
- [7] 李志刚, 易红星. 生物脱氮技术研究进展[J]. 甘肃科技, 2008, **24**(20): 97-99.
- [8] 魏巍, 黄廷林, 苏俊峰, 等. 1 株贫营养好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(9): 2166-2171.
- [9] 徐鸣. 贫营养生物接触氧化新技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2005. 2-14.
- [10] 郝爱玲. 用于微污染地表水处理的膜生物反应器的中试研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. 5-6.
- [11] 王颖群, 严共华. 寡营养细菌[J]. 微生物学通报, 1995, **22**(5): 302-304.
- [12] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [13] 夏辉. 净水贫营养细菌的筛选及其低营养特性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006. 10-14.
- [14] 杨宏, 熊晓丽, 段晓东, 等. 贫营养条件下生物除铁除锰滤池生态稳定性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 99-103.
- [15] Ozeki S, Baba I, Takaya N, et al. A novel C1-utilizing aerobic denitrifier *Alcaligenes* sp. STC1 and its genes for copper-containing nitrite reductase and azurin [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2001, **65**(5): 1206-1210.
- [16] Patureau D, Zumstein E, Delgenes J, et al. Aerobic denitrifiers isolated from diverse natural and managed ecosystems [J]. Microbial Ecology, 2000, **39**(2): 145-152.
- [17] Gupta A, Gupta S. Simultaneous carbon and nitrogen removal from high strength domestic wastewater in an aerobic RBC biofilm [J]. Water Research, 2001, **35**(7): 1714-1722.
- [18] Takaya N, Catalan-Sakairi M A B, Sakaguchi Y, et al. Aerobic denitrifying bacteria that produce low levels of nitrous oxide[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(6): 3152-3157.
- [19] Rafiee M, Bara M, Stephens C, et al. Application of ERIC-PCR for the comparison of isolates of *Haemophilus parasuis* [J]. Australian Veterinary Journal, 2000, **78**(12): 846-849.
- [20] 肖勇, 杨朝晖, 曾光明, 等. PCR-DGGE 研究处理垃圾渗滤液序批式生物膜反应器 (SBBR) 中的细菌多样性[J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 1095-1101.
- [21] Donlan R M. Biofilms: microbial life on surfaces[J]. Emerging Infectious Diseases, 2002, **8**(9): 881-890.
- [22] 陈法霖, 张凯, 郑华, 等. PCR-DGGE 技术解析针叶和阔叶凋落物混合分解对土壤微生物群落结构的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, **17**(2): 145-150.
- [23] Chen Q, Ni J. Ammonium removal by *Agrobacterium* sp. LAD9 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, **113**(5): 619-623.
- [24] Taylor S. Further study on the heterotrophic nitrification-aerobic denitrification ability of two MBR isolated bacteria-*Providencia rettgeri* YL and *Alcaligenes faecalis* NR[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong Univirestry, 2009. 2-7.
- [25] Chen F, Xia Q, Ju L K. Aerobic denitrification of *Pseudomonas*

- aeruginosa* monitored by online NAD (P) H fluorescence [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(11): 6715-6722.
- [26] Ridgway H F, Safarik J, Phipps D, *et al.* Identification and catabolic activity of well-derived gasoline-degrading bacteria from a contaminated aquifer [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, **56**(11): 3565-3575.
- [27] Kim M, Jeong S Y, Yoon S J, *et al.* Aerobic denitrification of *Pseudomonas putida* AD-21 at different C/N ratios [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2008, **106**(5): 498-502.
- [28] 李慧颖, 黄少斌, 范利荣. 一株好氧反硝化菌的反硝化性能研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(8): 9-12.
- [29] Satoh H, Okabe S, Yamaguchi Y, *et al.* Evaluation of the impact of bioaugmentation and biostimulation by in situ hybridization and microelectrode [J]. Water Research, 2003, **37**(9): 2206-2216.
- [30] Joo H S, Hirai M, Shoda M. Improvement in ammonium removal efficiency in wastewater treatment by mixed culture of *Alcaligenes faecalis* no. 4 and L1 [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2007, **103**(1): 66-73.
- [31] 梁炜. 好氧反硝化菌用于高温生物滴滤系统脱除 NO_x 的性能分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. 11.

欢迎订阅 2013 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2013 年为大 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行