

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)	

A²O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性

高莎^{1,2}, 金德才², 赵志瑞², 齐嵘², 彭霞薇^{1,2*}, 白志辉^{2*}

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 活性污泥法是应用最广泛的污水处理方法之一, 但是由于丝状菌过度繁殖而引发的污泥膨胀是制约其发展的重大难题. 本研究从 A²O 工艺城市污水处理系统的膨胀期活性污泥中分离培养出 17 株丝状细菌. 对各菌株进行了 16S rDNA 测序和系统发育树分析, 结果表明, 这些分离的可培养丝状细菌均属于链霉菌属; 利用 rep-PCR 指纹图谱技术进一步分析了所得菌株属内多样性, 显示出活性污泥中链霉菌存在丰富的多样性. 由于这些可培养丝状细菌与引起污泥膨胀的优势丝状菌(微丝菌)生理特征差别较大, 不会在污水处理系统中过度繁殖, 本研究向活性污泥中投加一定量的链霉菌分离菌株, 发现部分菌株对污泥的沉降性能有明显改善作用, 为污泥膨胀的防控提供了新的思路.

关键词: 污泥膨胀; 丝状细菌; 链霉菌; 16S rDNA; rep-PCR

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2912-06

Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A²O Wastewater Treatment Process

GAO Sha^{1,2}, JIN De-cai², ZHAO Zhi-rui², QI Rong², PENG Xia-wei^{1,2}, BAI Zhi-hui²

(1. College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The anoxic-anaerobic-oxic (A²O) process is widely used in wastewater treatment plant, however, sludge bulking and foaming are the most frequent operational problems in this process. Activated sludge bulking is caused by the overgrowth of some types of filamentous bacteria, especially *Microthrix parvicella*. In the study, 17 strains of filamentous bacteria were isolated from the bulking sludge of A²O process using Gause's medium. The 16S rRNA genes of the 17 isolates were sequenced to analyze their diversity. The results showed all of the 17 isolates were *Streptomyces*. Further analysis of these strains by the repetitive sequence based on polymerase chain reaction (rep-PCR) technology showed that there was a high diversity in these isolated *Streptomyces*. The physiological properties of them were different from *Microthrix parvicella*. The settleability of activated sludge was improved when some of the isolates were inoculated.

Key words: bulking sludge; filamentous bacteria; *Streptomyces*; 16S rDNA; rep-PCR

污泥膨胀是活性污泥法污水处理厂运行管理中经常碰到的异常问题, 严重时可能导致整个活性污泥系统运行的瘫痪^[1,2]. 大多数污泥膨胀问题是由丝状微生物过度增殖引起, 在寒冷季节较为多发. 因此, 考察活性污泥内丝状细菌的群落结构特性对污泥膨胀控制方法的研究具有重要意义^[3,4]. 目前, 由丝状菌引起的膨胀问题尚缺乏有效的控制对策. 目前常采用投加药剂的方法来控制污泥膨胀, 但膨胀现象极易复发, 且易造成出水水质恶化的不良后果^[5-8]. 另外, 也有设置生物选择器来控制污泥膨胀的报道, 但其应用效果不稳定^[9,10].

随着对丝状菌鉴定工作的深入, 通过探究污泥内丝状菌群落结构和生理特性, 从微生物生态学的角度控制污泥膨胀的方法已被提出. 相关研究显示膨胀期活性污泥内, 丝状细菌存在丰富的多样性, 包括: *Nocardia* 属(如 *Nocardia amarae*, *Nocardia pinensiss*)、*Flexibacter* 属(如 Type 0092)、*Cytophaga*

属(如 Type0411)、*Thiothrix* 属、*Beggiatoa* 属、Type 0914、*Haliscomenobacter hydrossis*、*Microthrix parvicella*、*Sphaerotilus natans* 等. 多数情况下 *Microthrix parvicella*(微丝菌)为优势种群, 常出现在冬季发泡活性污泥中, 易引发污泥膨胀, 大部分种群也出现在发泡或膨胀污泥中, 但由于与前几种丝状细菌生理特性不同(如对温度、pH、DO 值及营养状况的敏感度), 在膨胀污泥中不发生过度增值现象^[11-13]. 这些研究结果对污泥膨胀防控措施的研究具有重要意义, 但是对于活性污泥系统中可培养丝状细菌的多样性研究鲜见报道.

本研究采用传统分离培养方法, 从膨胀期活性

收稿日期: 2013-02-21; 修订日期: 2013-05-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-JC407-3); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-09-3)

作者简介: 高莎(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: shagao152@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xiaweipeng@163.com; zhbai@rcees.ac.cn

污泥中分离出一批丝状细菌,并利用分子生物学技术进行初步鉴定和遗传多样性分析。由于这些可培养丝状细菌具有与微丝菌相似的菌丝体结构,但与微丝菌的生理特性差异较大,在活性污泥内属非优势菌种^[14],不会过度增殖引发污泥膨胀。本研究初步测试在膨胀污泥中投加适量可培养丝状细菌来替代微丝菌形成活性污泥絮体的骨架结构,以期污泥膨胀抑制方法的研究提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料

采自清河污水处理厂A²O工艺厌氧池膨胀期活性污泥, -20℃保存备用。

1.2 培养基

分离培养基^[15]: 采用高氏一号合成培养基, 淀粉 20 g, 硝酸钾 1 g, 氯化钠 0.5 g, 磷酸氢二钾 0.5 g, 硫酸镁 0.5 g, 硫酸亚铁 0.01 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1000 mL, 重铬酸钾 50 mg, pH 7.2 ~ 7.4。

富集培养基: 高氏一号合成培养基(不含重铬酸钾)。

葡萄糖天冬氨酸培养基: 葡萄糖 0.2 g, 天门冬酰胺 0.1 g, 磷酸氢二钾 0.05 g, 硫酸镁 0.05 g, 琼脂 2 g, 水 100 mL, pH 7.2 ~ 7.4。

液体发酵培养基: 土豆 100 g, 硝酸钾 1 g, 氯化钠 0.5 g, 磷酸氢二钾 0.5 g, 硫酸镁 0.5 g, 硫酸亚铁 0.01 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1000 mL, pH 7.2 ~ 7.4。

1.3 菌种分离及形态观察

无菌条件下称取 5 g 活性污泥样品于装有 45 mL 无菌水的三角瓶中, 室温振荡混匀 20 min。将悬浊液依次梯度稀释成 10⁻⁴、10⁻⁵、10⁻⁶、10⁻⁷ 的稀释液, 取 100 μL 涂布于高氏一号培养基上, 28℃ 恒温培养 4 ~ 7 d^[5]。将分离到的单菌落挑取到富集培养基上进行划线分离纯化培养, 培养 5 ~ 10 d, 观察并记录菌落培养特征; 将所筛菌株进行插片培养 5 ~ 7 d, 革兰氏染色后, 置于光学显微镜(放大 1000 倍油镜)下观察所筛菌株的形态特征。

1.4 基因组 DNA 提取和 16S rDNA 的 PCR 扩增

采用细菌基因组提取试剂盒(天根生化)对放线菌基因组 DNA 进行小量提取。16S rDNA 保守序列扩增引物为通用引物 27f 和 1492r。

16S rDNA-PCR 反应体系(50 μL): 5 μL 10 × Buffer, 4 μL dNTP (2.5 nmol·L⁻¹), 正反向引物各 1 μL, 1.2 μL DNA 模板(小于 1 μg), 0.5 μL *Taq* DNA 聚合酶。PCR 反应条件: 95℃ 5 min; 94℃ 1

min; 55℃ 1 min; 72℃ 2 min, 30 个循环; 72℃ 7 min。PCR 产物于 -20℃ 冻存待用。

1.5 16S rDNA 序列测定及系统发育构建

将分离丝状细菌 16S rDNA 的 PCR 扩增产物送北京博迈德生物技术有限公司进行测序。测序结果与 NCBI 的 GenBank 进行 Blast 分析, 并采用序列分析软件 MEGA4, N-J 法构建系统发育树^[16~18]。

1.6 Rep-PCR 基因指纹图谱分析^[19]

PCR 扩增引物为 BOXAIR (5'-CTACGGCAAGG CGACGCTGACG-3')。扩增体系 25 μL 体系^[15]: 2.5 μL 10 × Buffer, 2 μL dNTP (2.5 nmol·L⁻¹), 2 μL 引物, 1.5 μL DNA 模板, 双蒸水补足至 25 μL。PCR 扩增条件: 95℃ 5 min; 95℃ 45 s; 44℃ 1 min; 72℃ 3 min; 35 个循环; 72℃ 10 min。扩增产物的电泳分离条件按文献^[11,12,16]进行了改进, 1.5% 的琼脂糖凝胶于 TBE 缓冲液中, 取 6 μL 产物于 3 μL loading Buffer 混合, 80 V 电泳 150 min 或 100 V 电泳 120 min。

1.7 投加链霉菌分离菌株对污泥沉降性能的影响实验

将分离菌株接种于液体发酵培养基中, 27℃, 160 r·min⁻¹ 摇床培养 2 ~ 3 d, 室温保存待用。取 100 mL 膨胀期活性污泥于 150 mL 摇瓶内, 将上述菌种发酵混合液按污泥体积的 2%、5%、10% 投加于盛有膨胀污泥的三角瓶内, 在 25℃, 60 r·min⁻¹ 摇床振荡混合, 每隔 3 h 测定一次污泥的污泥体积指数(SVI), 每个浓度梯度做两个平行实验, 取平均值, 如果平行实验结果的标准偏差超过 10%, 则再做重复实验。

2 结果与讨论

2.1 丝状细菌的分离纯化和形态特征

利用稀释平板分离法, 共分离到 17 株菌落形态各异的菌株(表 1), 革兰氏染色结果显示, 菌株均为 G⁺。对 17 株菌进行插片形态观察表明, 多数菌株菌丝内菌丝分枝发达, 无横隔, 不断裂, 个别菌株菌丝体有断裂。图 1 为其中 9 株可培养丝状菌的插片培养显微照片(放大 1000 倍), 与活性污泥直接 DAPI 染色的荧光显微镜照片下的丝状菌形态做一直观的对比。

2.2 16S rDNA 基因序列及系统发育树分析

对 17 株丝状细菌的 16S rDNA 序列分别进行了测定, 与 GenBank 数据库序列比较, 结果表明: 所得 17 株丝状细菌都属于链霉菌属, 其 16S rDNA 序列与参比序列相似度均达到了 97% 以上(表 2)。

表 1 分离菌株在高氏一号培养基上培养的形态特征

Table 1 Culture features of the isolated filamentous strains on Gause's medium

菌株编号	培养特征		可溶性色素
	气生菌丝体	基内菌丝体	
GS01	白	浅黄	无
GS02	乳白	浅黄	无
GS03	灰白	深黄	无
GS04	金黄	黄	无
GS05	玫红	黄	浅红
GS06	灰	灰	无
GS07	浅绿	浅黄	无
GS08	白	深黄	黄
GS09	灰白	蛋黄	无
GS10	黑白	黄	无
GS11	灰白	蛋黄	无
GS12	黄白	浅黄	无
GS13	深红	浅黄	无
GS14	棕黑	深黄	棕
GS15	白	棕黄	黄
GS16	乳白	黄	无
GS17	粉红	蛋黄	浅红

系统发育树分析结果表明,17 株链霉菌可聚为两大类群(图 2)。类群 I: GS12、GS16、GS02、GS03、GS01、GS14、GS11、GS17、GS07; 类群 II: GS15、GS13、GS05、GS09、GS08、GS04、GS10、GS06。

类群 I 中,GS12、GS16、GS02、GS03、GS01、GS14 聚在一个分支,分别与 *Streptomyces microflavus* 126196 (JN180208)、*Streptomyces cavourensis* 173883 (EU570437)、*Streptomyces microflavus* 2429 (JN180194)、*Streptomyces microflavus* PM258 (JQ422163) 等菌株的相似度最高,均达到 99% 以上。其中,GS03 与 *Streptomyces microflavus* PM258 相似度达到了 100%; 菌株 GS11 与 GS17 的亲缘关系最近,它们与 *Streptomyces rubiginosohelvolus* NXPT24 (JN999920) 的相似度最高,分别为 99.5% 和

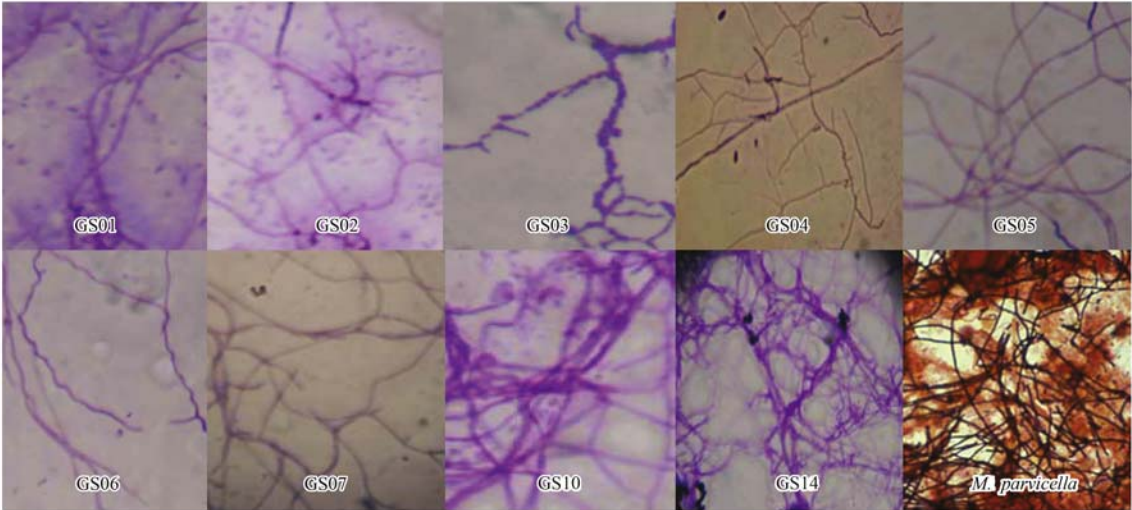


图 1 分离菌株的插片培养显微镜照片与微丝菌显微镜照片^[18]

Fig. 1 Microscopic photograph of the cultured isolates and *Microthrix parvicella*

表 2 可培养丝状细菌的 16S rDNA 序列分析

Table 2 16S rDNA sequence analysis of the culturable filamentous bacteria

菌株编号	16S rDNA 序列 GenBank 登录号	GenBank 中最相似菌株及其登录号	相似度/%
GS01	JX430438	<i>Streptomyces flavofuscus</i> (JQ924410)	99.9
GS02	JX430439	<i>Streptomyces microflavus</i> 2429 (JN180194)	99.8
GS03	JX430440	<i>Streptomyces microflavus</i> (JQ422163)	100
GS04	JX430441	<i>Streptomyces phaeochromogenes</i> (EU594471)	99.5
GS05	JX430442	<i>Streptomyces</i> sp. XAS589 (GQ395243)	99.6
GS06	JX430443	<i>Streptomyces</i> sp. OA20 (JN942132)	99.9
GS07	JX430444	<i>Streptomyces</i> sp. CPE393 (JN969034)	99.6
GS08	JX430445	<i>Streptomyces</i> sp. CPE338 (JN969025)	99.5
GS09	JX430446	<i>Streptomyces rochei</i> (FJ792577)	99.5
GS10	JX430447	<i>Streptomyces</i> sp. 195018 (GU263875)	99.9
GS11	JX448396	<i>Streptomyces rubiginosohelvolus</i> NXPT24 (JN999920)	99.5
GS12	JX679243	<i>Streptomyces microflavus</i> (JN180208)	97.8
GS13	JX465725	<i>Streptomyces</i> sp. XAS589 (GQ395243)	99.7
GS14	JX465726	<i>Streptomyces</i> sp. QZGY-A23 (JQ812080)	97.7
GS15	JX679244	<i>Streptomyces</i> sp. MJM3859 (EU603347)	99.7
GS16	JX679245	<i>Streptomyces lavendulae</i> (AB184079)	99.9
GS17	JX465724	<i>Streptomyces rubiginosohelvolus</i> NXPT24 (JN999920)	99.8

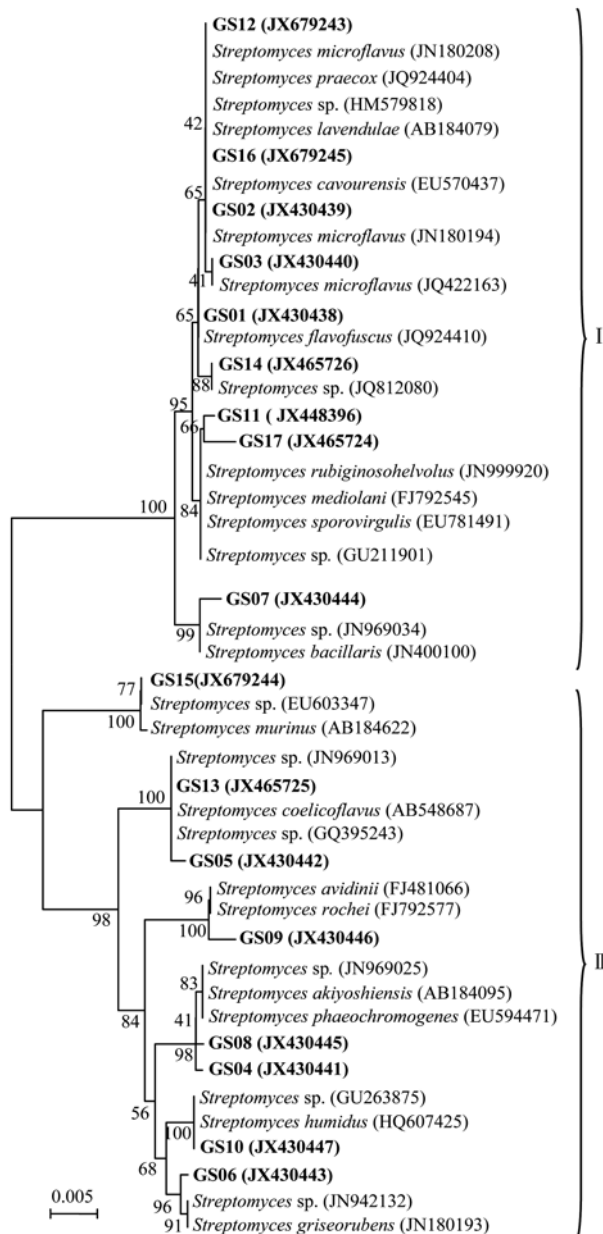


图2 链霉菌 16S rDNA 序列 N-J 系统发育树分析

Fig. 2 Neighbor joining phylogenetic tree ananlysis of 16S rDNA of *Streptomyces*

99.8%。GS07 与类群 I 中其他菌株的亲缘关系较远,独自聚在一个分支上,与菌株 *Streptomyces* sp. CPE393 (JN969034) 的相似度为 99.6%。类群 II 所含 8 株菌可细划分为 2 个分支。除 GS15 菌株独自聚于一个分支外,其余 7 株菌均聚在第二个分支上。GS15 与 *Streptomyces* sp. MJM3859 (EU603347) 的相似性最高,达 99.7%; 其余 7 株菌与其最相似菌株的相似度均达到 99% 以上。另外,由于系统发育树的相同分支上会出现不同种的参比菌种,可见链霉菌属内存在 16S rDNA 序列非常相似的不同菌种,因此仅用分离菌株的 16S rDNA 序列与 GenBank 数

据库中的参比序列进行比对,还不能鉴别到种的水平。

2.3 Rep-PCR 基因指纹图谱分析

采用 BOXAIR 引物对 17 株链霉菌进行了 rep-PCR 扩增和电泳分离(图 3)。对所得图谱进行聚类分析后发现:这些链霉菌可被细分为 4 大类群。类群 I:GS10、GS06、GS08; 类群 II:GS17、GS15; 类群 III:GS07、GS11、GS03、GS12; 类群 IV:GS09、GS04、GS05、GS01、GS02、GS16。值得一提的是,每个类群中,各菌株泳带 DNA 序列长度、数量各不相同,存在一定的差异性,符合 rep-PCR 技术适用于种属关系较近菌株多样性分析的特点。另外,将系统发育树的分析结果与 rep-PCR 图谱结果比较后发现,两种方法得到的结论基本一致。

2.4 投加链霉菌分离菌株对污泥沉降性能的影响

本实验分离到的 17 株链霉菌,与引发污泥膨胀的微丝菌形态结构相似,但生理特性差异较大^[20~23],且在膨胀期的活性污泥内,不会出现大量增殖的现象。摇瓶培养发现某些菌株的菌丝团在水中沉降速度很快,或许能够用于改善活性污泥的沉降性能。

污泥体积指数(SVI)是衡量活性污泥沉降性能的指标,一般认为污泥的 SVI 值在 60~100 mL·g⁻¹ 时,其沉降性能最佳,当 SVI 超过 150 mL·g⁻¹ 时,预示着活性污泥开始处于膨胀状态,此时污泥结构松散,质量变轻,沉淀压缩性能差;当 SVI 达到 300 mL·g⁻¹ 以上时,污泥严重膨胀^[24]。

本实验初步尝试了向活性污泥中分别投加链霉菌分离菌株的发酵液,测试了在 2%、5%、10% 投加量下,17 株链霉菌分别对污泥沉降性能的影响。结果表明,GS05、GS14、GS17 菌株发酵液的投加对活性污泥的沉降性能有明显的改善,而且 5% 的投加量效果相对稳定,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,与不投加链霉菌的对照活性污泥相比,向活性污泥中加入 5% 体积的 GS05、GS14、GS17 菌株发酵液后,SVI 值在 3 h 内迅速降低,表明污泥的沉降性能得到明显改善。虽然对照活性污泥在摇瓶振荡条件下,其 SVI 值也呈下降趋势,但其下降幅度较小。这个初步实验结果显示了这些链霉菌分离菌株可能具有控制污泥膨胀的潜力。活性污泥是微生物群体及它们所依附的有机物质和无机物质的总称;活性污泥系统中丝状菌与菌胶团细菌互相竞争互相依存。在正常运行情况下,丝状菌作为菌胶团的骨架,与其他细菌共同形成活

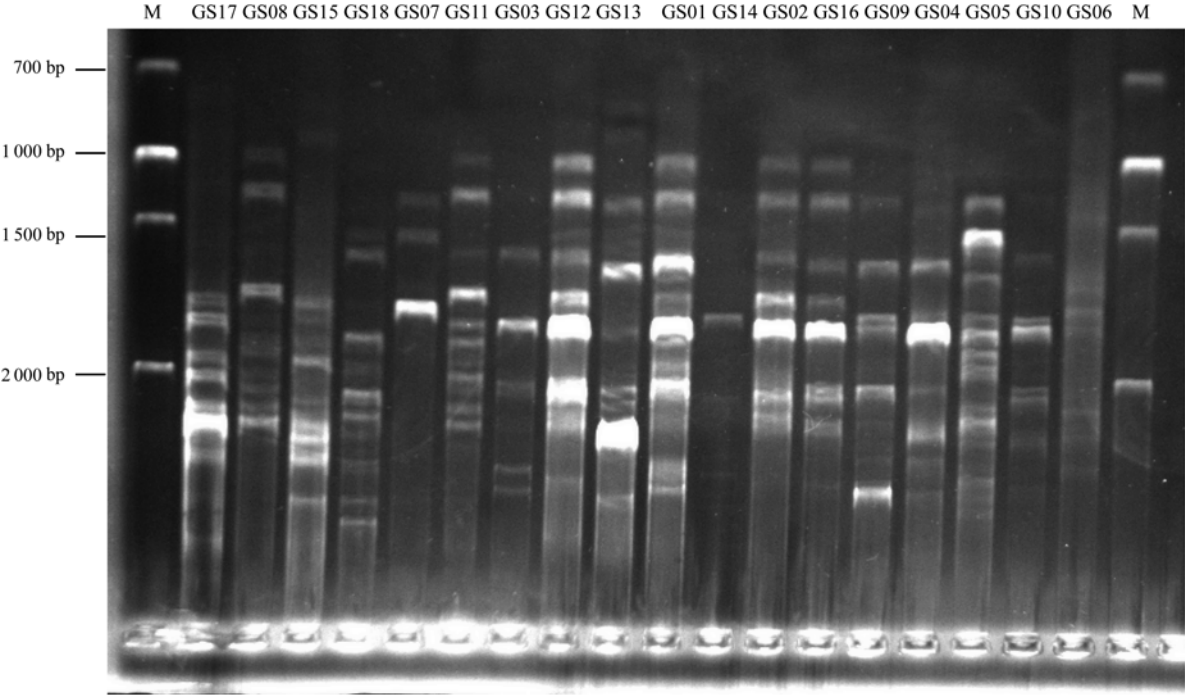


图 3 链霉菌 BOX-PCR 指纹图谱

Fig. 3 Fingerprints of BOXAIR-PCR electrophoresis

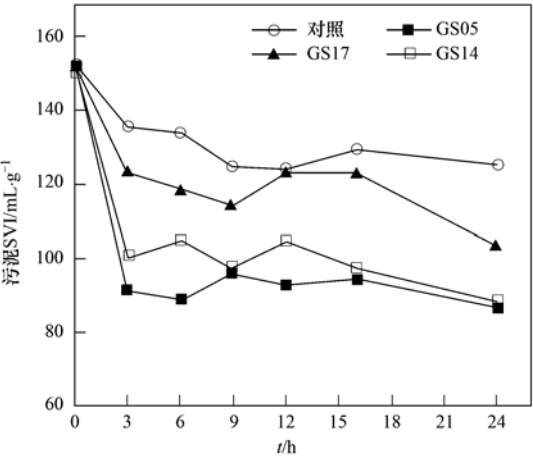


图 4 投加 5% 分离菌株发酵液对活性污泥 SVI 值的影响

Fig. 4 Effect of the isolated *Streptomyces* strains on SVI of activated sludge

性污泥的主体,形成具有良好沉降性能和高效降解污染物性能的微生物群落^[25,26]。但是当污泥膨胀的诱导因素如溶解氧、pH 值、温度、营养成分、污泥负荷等超过一定范围时,某些丝状细菌(尤其是微丝菌)会过度繁殖,引起污泥沉降性能下降,发生污泥膨胀。如果分离的这些沉降性能良好的链霉菌可以形成活性污泥菌胶团的骨架结构,它们又不会过度繁殖,或许可用于构建沉降性能良好且稳定的活性污泥微生物生态系统,还有待深入开展实验和机制研究。

3 结论

- (1) 膨胀期活性污泥中可培养丝状细菌的多样性比较丰富,用高氏一号培养基分离的菌株均为链霉菌。
- (2) 对分离所得 17 株链霉菌的 16S rDNA 序列进行系统发育分析,多株分离菌株分别与不同种的链霉菌处于相同分枝,不易判断其确切分类地位。采用 rep-PCR 可以更好地区分这些种属关系较近的分离菌种间的基因型多样性。
- (3) 向活性污泥中分别投加不等量链霉菌分离菌株发酵液,部分菌株与活性污泥混合后可以显著改善活性污泥的沉降性能。

致谢:本研究得到了中国科学院生态研究中心环境生物技术实验室多位同学的支持与协助,谨致谢忱。

参考文献:

[1] 张著,高大文,袁向娟,等. 营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3197-3201.

[2] 王建芳,赵庆良,林估侃,等. 低溶解氧和磷缺乏引发的非丝状菌污泥膨胀及控制[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 546-550.

[3] Guo F, Zhang T. Profiling bulking and foaming bacteria in activated sludge by high throughput sequencing [J]. Water Research, 2012, 46(8): 2772-2782.

- [4] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, *et al.* Filamentous bulking sludge – a critical review[J]. *Water Research*, 2004, **38**(4): 793-817.
- [5] Caravelli A, Giannuzz L, Zaritzky N. Effect of chlorine on filamentous microorganisms present in activated sludge as evaluated by respirometry and INT-dehydrogenase activity[J]. *Water Research*, 2004, **38**(9): 2395-2405.
- [6] 赵霞一, 赵阳丽, 陈忠林, 等. 好氧颗粒污泥发生丝状菌污泥膨胀的控制措施[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(3): 15-19.
- [7] 胡海涛, 周利, 刘灵菊. 高岭土控制污泥膨胀的研究[J]. *环境保护科学*, 2010, **36**(1): 11-13.
- [8] 彭赵旭, 彭永臻, 王淑莹, 等. 丝状菌污泥膨胀的工艺控制策略[J]. *北京工业大学学报*, 2011, **37**(9): 1416-1423.
- [9] 孟建丽, 崔利军, 杨云龙. 丝状菌性污泥膨胀及生物选择器控制[J]. *科技情报开发与经济*, 2004, **14**(9): 210-212.
- [10] 屠唯华, 刘媛. 反硝化控制丝状菌膨胀的研究[J]. *山西能源与节能*, 2007, (3): 34-35, 37.
- [11] Seviour E M, Williams C, DeGrey B, *et al.* Studies on filamentous bacteria from Australian activated sludge plants[J]. *Water Research*, 1994, **28**(11): 2335-2342.
- [12] Lacko N, Bux F, Kasan H C. Survey of filamentous bacteria in activated sludge plants in KwaZulu-Natal[J]. *Water SA*, 1999, **25**(1): 63-68.
- [13] Blackall L L, Seviour E M, Bradford D, *et al.* Towards understanding the taxonomy of some of the filamentous bacteria causing bulking and foaming in activated sludge plants[J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(5-6): 137-144.
- [14] Jin DC, Wang P, Bai Z H, *et al.* Analysis of bacterial community in bulking sludge using culture-dependent and -independent approaches[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(11): 1880-1887.
- [15] 宋飞, 张建丽, 张娟. 天山云杉林下土壤放线菌的分离与DNA指纹分析方法的初步研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (1): 68-74.
- [16] 张海涛, 靳艳, 虞星炬, 等. 16S rDNA-RFLP 分析繁茂膜海绵可培养放线菌的多样性[J]. *微生物学报*, 2005, **45**(6): 828-831.
- [17] Rani A, Porwal S, Sharma R, *et al.* Assessment of microbial diversity in effluent treatment plants by culture dependent and culture independent approaches[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(15): 7098-7101.
- [18] Slijkhuys H, Deinema M H. Effect of environmental conditions on the occurrence of *Microthrix parvicella* in activated sludge[J]. *Water Research*, 1988, **22**(7): 825-828.
- [19] Ishii S, Sadowsky M J. Applications of the rep-PCR DNA fingerprinting technique to study microbial diversity, ecology and evolution[J]. *Environmental Microbiology*, 2009, **11**(4): 733-740.
- [20] Rossetti S, Tomei M C, Nielsen P H, *et al.* “*Microthrix parvicellai*”, a filamentous bacterium causing bulking and foaming in activated sludge systems: a review of current knowledge[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2005, **29**(1): 49-64.
- [21] Tandoi V, Rossetti S, Blackall L L, *et al.* Some physiological properties of an Italian isolate of “*Microthrix parvicellai*” [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4-5): 1-8.
- [22] Rossetti S, Tomei M C, Levantesi C, *et al.* “*Micronthrix parvicella*”: A new approach for kinetic and physiological characterization[J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(1-2): 65-72.
- [23] Lebek M, Rosenwinkel K H. Control of the growth of *Microthrix parvicella* by using an aerobic selector-results of pilot and full scale plant operation[J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(1-2): 491-494.
- [24] 陈滢, 彭永臻, 刘敏, 等. 营养物质对污泥沉降性能的影响及污泥膨胀的控制[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 54-58.
- [25] 葛峰, 郭坤, 周广灿, 等. 南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1647-1651.
- [26] 李彤鲜, 费学宁, 池勇志, 等. 活性污泥丝状膨胀早期预警的研究进展[J]. *环境化学*, 2012, **31**(8): 1151-1156.

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