

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)	

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^{1,2,4,5,6}, 邓代永^{1,4,5}, 孙国萍^{1,4,5}, 刘永定³, 许玫英^{1,4,5*}

(1. 广东省微生物研究所广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广州 510070; 2. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 3. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 4. 广东省微生物应用新技术公共实验室, 广州 510070; 5. 广东省华南应用微生物重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 广州 510070; 6. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 通过投加硝酸钙为电子受体, 促进厌氧环境中有机污染物降解转化的方式已被广泛应用于沉积物的污染修复, 然而目前有关硝酸盐对复合污染沉积物中有机污染物的减量特点及其微生物响应的了解极少. 本研究通过在实验室模拟条件下添加硝酸盐到河涌沉积物中, 采用极性和非极性逐步分离萃取、GC-MS 相对含量测定, 以及 PCR-DGGE 分子生态学分析手段相结合, 研究硝酸盐对河涌沉积物中有机污染物降解转化和微生物菌群结构特点的影响. 结果表明, 硝酸钙的投加可有效提高有机物的去除效果. 沉积物 TOC 以及总有机物的去除率比未添加硝酸盐的对照组分别高出 47.25%、29.55%. 各类有机物的去除效果由高到低依次为含硅有机物、烷烃、多环芳烃、杂环、烯烃类、苯系物、极性物质、邻苯二甲酸酯类、醛酮和羧酸酯类物质. 其中含硅有机物、持久性有机污染物多环芳烃、苯系物以及杂环物质的去除率比对照组分别高出 46.73%、36.25%、23.19%、35.92%. 细菌 16S rDNA V3 区 PCR-DGGE 图谱显示, 硝酸盐添加前后沉积物中的微生物群落结构存在显著差异. 其中 10 个主要条带中 4 条归属于变形细菌 (Proteobacteria) 的 δ 和 γ 两个亚群, 2 条归属于放线菌门 (Actinobacteria), 1 条归属于梭菌纲 (Clostridia), 1 条归属于绿弯菌门 (Chloroflexi), 1 条归属于新发现的细菌门 (Caldiserica), 1 条为未培养微生物. 本研究结果将为利用硝酸盐促进厌氧沉积物的污染治理提供科学依据和理论指导.

关键词: 沉积物生物修复; 硝酸盐还原; 有机物减量; 气相色谱-质谱联用; 微生物菌群

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2847-08

Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments

LIU Jin^{1,2,4,5,6}, DENG Dai-yong^{1,4,5}, SUN Guo-ping^{1,4,5}, LIU Yong-ding³, XU Mei-ying^{1,4,5}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 4. Guangdong Open Laboratory of Applied Microbiology, Guangzhou 510070, China; 5. State Key Laboratory of Applied Microbiology (Ministry-Guangdong Province Jointly Breeding Base), South China, Guangzhou 510070, China; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The strategy promoted pollutant degradation and transformation under the anaerobic circumstance by adding nitrate as an electron acceptor has been widely used in sediment bioremediation. However, few literature reports on organic removal characteristics and microbial community responses in the contaminated river sediment under the nitrate reduction condition. Methods including the polar and non-polar chemical fractionation, relative abundance detection of organic matters by GC-MS were combined and applied to investigate organic removals and PCR-DGGE analysis was used for microbial community structures in sediment incubation systems with or without calcium nitrate addition. The results indicated that the addition of calcium nitrate could significantly enhance removal efficiencies of organic pollutants. The removal efficiency of total organic carbon (TOC) and the total peak area of organic matters in GC-MS were 47.25% and 29.55% which were higher than those of the control. The effect descending order of organic pollutants was: silicon materials > alkanes > polycyclic aromatic hydrocarbons > heterocyclic compounds > olefins > benzene homologues > polar compounds > phthalates > aldehydes and ketones > alkyl esters. And removal rates of silicon materials, the persistent organic pollutants, benzene homologues and heterocyclic compounds were 46.73%, 36.25%, 23.19% and 35.92% which were higher than those of the control. The PCR-DGGE profile of bacterial 16S rDNA V3 fragments showed obviously different microbial community structures between the treatment and the control systems. Blastn analysis revealed that sequences of 10 predominant bands from DGGE

收稿日期: 2012-10-15; 修订日期: 2012-12-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2012CB22307); 广东省中国科学院全面战略合作项目(2010B09031048); 广东省自然科学基金研究团队项目(9351007002000001); 佛山市院市合作项目(2010YS023); 佛山市顺德区容桂街道科技计划项目; 广东省自然科学基金项目(S2011040000770)

作者简介: 刘近(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: liujin1926@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xumy@gdim.cn

profile were closely related to Proteobacteria, Actinobacteria, Clostridia, Chloroflexi, Caldiseica and uncultured bacterium. The research findings provide some helpful scientific information for promoting organic pollutant removal of river sediment by nitrate reduction.

Key words: sediment bioremediation; nitrate reduction; organic reduction; GC-MS; microbial community

河涌黑臭是近几年典型的环境污染问题之一,主要是过量纳污后水体供氧和耗氧失衡的结果.缺氧和厌氧条件下,污染物转化并产生氨氮、硫化氢、挥发性有机酸等恶臭物质,同时和铁、锰等金属离子形成黑色金属硫化物而呈现黑色^[1-3].河涌底泥的原位处理技术主要概括为两大类:原地生物/化学处理和原地固化/稳定化处理^[4].向底泥中注入氧化剂等技术,目前已作为一种生化技术得到广泛的应用,以此达到改善河涌臭味、有机物去除的目的^[4-7].

Wauer 等^[8,9]利用硝酸盐和 Fe^{3+} 作为缓释药剂,应用于控制德国 Dagowsee 湖底泥污染物的释放.加拿大国家水研究所采用对汉密尔顿港受污染底泥注入硝酸钙和有机调理剂的方法,先后开展实验室以及中试研究.结果表明,在 197 d 内,底泥中 78% 的油和 68% 的 PAHs 被生物降解^[4,10].Macrae 等^[11]研究硝酸盐还原条件下 PAHs 的降解效果,发现在缺氧条件下降解菌株对 3 环和 4 环的 PAHs 的生物降解效果较好,而高环 PAHs 的生物降解则很慢.尽管利用硝酸盐进行河涌原位修复的研究早已开展,但是有关硝酸盐还原条件下沉积物中有机污染物的减量及微生物群落响应特点研究仍然较少,这也是限制该技术推广应用的主要原因^[12,13].

本研究通过采集黑臭河涌的沉积物,在实验室小试条件下,向沉积物中投加一定量的硝酸钙,并以不添加硝酸钙的沉积物为对照,定期采集沉积物进行有机污染物指纹图谱^[14]及微生物菌群结构分析,探讨硝酸还原对污染沉积物中有机物减量及微生物菌群结构的影响,以期为进一步利用硝酸还原促进沉积物中的有机污染治理提供科学理论指导.

1 材料与方法

1.1 样品采集与小试装置的建立

实验用的沉积物采集自广东省佛山市顺德区容桂街道内河涌,经充分混匀后平均分装到两个玻璃缸中(规格:长 36 cm,宽 26 cm,高 38 cm),各有底泥 20 L,原水 10 L,以不添加硝酸钙的体系为对照组,处理组按 $750 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的添加量注入硝酸钙.于玻璃缸对角线上距离 4 个角等距离位置上采集底泥样品并等比例混合,分别取注入硝酸钙之前(0 d)、

注入后第 30 d 和第 65 d 的样品各 3 个平行处理进行分析比较.

1.2 实验方法

1.2.1 底泥总有机碳(TOC)的测定方法

按照沉积物中总有机碳的测定方法^[15],采用 liqui TOC II 型 TOC 分析仪(德国)测定.

1.2.2 底泥有机物样品的 GC-MS 分析

(1) 化学试剂

正己烷(色谱纯, CNW Technologies GmbH, 德国)、二氯甲烷(色谱纯, CNW Technologies GmbH, 德国)、甲醇(分析纯, 广州化学试剂厂, 纯度 $\geq 99.5\%$)、铜片(天津市光复精细化工研究所, 纯度 $\geq 99.9\%$); 硅胶(80 ~ 100 目, 青岛海洋化工厂分厂)、中性氧化铝(100 ~ 200 目, 国药集团化学试剂有限公司), 使用前分别在 180℃、250℃ 高温活化 12 h, 冷却后加入 3% 的超纯水去活化平衡过夜, 之后加入正己烷浸没其表面备用^[16,17].

(2) 样品前处理及测定分析

将风干并研磨过筛的 10 g 样品, 55℃ 下 200 mL 二氯甲烷索氏抽提 48 h. 索氏抽提中于平底烧瓶中加入适量的铜片. 抽提液经旋转蒸发仪(BÜCHI Labortechnik AG CH-9230 Flawil Switzerland)浓缩、置换为正己烷后, 过硅胶/氧化铝(2:1)层析柱分离. 每个样品等分为 4 组, 按照正己烷(F1)、正己烷/二氯甲烷(4:1)(F2)、二氯甲烷(F3)、甲醇(F4)先后次序, 分别用 20 mL 洗脱液洗脱. 洗脱液经浓缩、氮吹定容至 500 μL , 进行 GC-MS(Thermo Finnigan Trace DSQ)分析, GC-MS 图谱根据保留时间采用 NIST 谱库(NIST MS Search 2.0)检索与手工检索相结合的方法进行分析^[16-21]. 分析结果与质谱库中的标准峰图比对, 选择最高匹配度的物质, 重点监测物质则选择其匹配度 $> 90\%$ 的结果, 主要被确定有机物种类的匹配范围约为 85% ~ 100%, 平均匹配度约为 91%.

(3) 有机物相对去除率的计算方法

检出的有机物以峰面积为相对定量的参考参数, 并用有机物相对去除率来评估硝酸盐对有机物氧化减量的影响效果, 计算公式:

$$\text{有机物相对去除率}(\%) = [(CA_{65} - TA_{65})/A_0] \times 100$$

式中, CA_{65} 为对照组有机物在 65 d 的峰面积; TA_{65} 为投加硝酸钙的处理组有机物在 65 d 的峰面积; A_0 为投加硝酸钙前(0 d)有机物的峰面积。

(4) GC-MS 分析条件^[22]

HP-5ms (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm) 色谱柱。升温程序: 50℃ 保持 2 min, 以 6℃ · min⁻¹ 升至 300℃, 保持 15 min。进样口温度 290℃, 不分流进样; 载气为高纯氦气 (99.999%); 流量 1 mL · min⁻¹, 进样量 1 μL。质谱离子源: 电子轰击源 (EI), 离子源温度 220℃, 扫描范围 (m/z): 29.00 ~ 550.00。

1.2.3 微生物菌群的 PCR-DGGE 分析

(1) 底泥微生物总 DNA 提取纯化

采用 CTAB 法提取^[23], 并采用上海生工生物工程有限公司的 SanPrep 柱式 DNA 胶回收试剂盒 (产品编号: SK8132) 对总 DNA 粗提液进行纯化。

(2) 总 DNA 的 PCR 扩增

以提取的总 DNA 为模板, 采用对大多数细菌和古细菌的 16S rDNA 基因 V3 区具有特异性的引物对 341f/534r^[24], 它们的序列分别为: 341f (5'-CCTACGGGAGGCAGCAG-3'), 534r (5'-ATTACCGCGGCTGCTGG-3'), 扩增片段长约为 193 bp。40bp GC 发夹结构 (5'-CGCCCGCCGCGCGCGCGGGGGGCGGGCGGGGACGGGGGG-3') 加于 341f 的 5' 端, 扩增片段长约为 233 bp。上述引物由上海生工生物技术有限公司合成提供。

50 μL PCR 反应体系: 模板 1 μL, 10 μmol · L⁻¹ 引物各 1 μL, 10 mmol · L⁻¹ dNTPs 1 μL, 5 μL 10 × PCR Buffer, 5U Taq DNA 聚合酶 0.5 μL, 适量的无菌 dd H₂O 补足 50 μL。

PCR 反应条件: 95℃ 预变性 5 min, 94℃ 变性 1 min, 56℃ 退火 40 s, 72℃ 延伸 40 s。共 30 个循环。72℃ 最终延伸 8 min, 4℃ 保存。PCR 反应的产物用 1.0% 琼脂糖凝胶电泳检测。

(3) PCR 产物的变形梯度凝胶电泳分析

采用美国 Bio-Rad 公司的 DcodeTM 基因突变检测系统对 PCR 产物分离。使用 8% 的丙烯酰胺凝胶, 变性剂浓度为 45% ~ 75%, 电泳缓冲液为 1 × TAE, 30 μL PCR 产物 (加入 5 μL 6 × Loading buffer), 电压 80 V, 60℃, 电泳 12 h, goldview 染色 0.5 h, 凝胶成像系统 (美国 BioRad 公司) 拍照。

(4) 细菌 16S rDNA 序列的测定

对 DGGE 胶中的主要条带以及差异性的条带进行切割, 并用 200 μL 无菌 dd H₂O 洗涤两次, 最后

加入 50 μL 无菌 dd H₂O 4℃ 浸泡过夜后取上清液为模板, 用引物 341f/534r (不带夹子) 进行 16S rDNA V3 区的 PCR 扩增, 反应条件同前。扩增产物采用上海生工的 SanPrep 柱式 PCR 产物纯化试剂盒 (产品编号: SK8141) 纯化后与 pMD[®] 19-T Simple Vector [TaKaRa, 宝生物工程 (大连) 有限公司] 连接, 转化到大肠杆菌 JM109 感受态细胞, 在含有 X-gal, IPTG 和氨苄青霉素的 LB 培养基上, 37℃ 培养过夜后筛选具有氨苄抗性的白色克隆。采用 pMD[®] 19-T Simple Vector 通用引物 M13-47/RV-M (M13-47: 5'-CGCCAGGGTTTCCAGTCACGAC-3'; RV-M: 5'-GAGCGGATAACAATTTTCACACAGG-3') 进行菌落 PCR, 琼脂糖电泳检测插入片段的大小, 将位于约 220 bp 位置的菌株进行测序 (由北京六合华大基因科技股份有限公司完成)。

2 结果与讨论

2.1 硝酸钙对沉积物中 TOC 的去除效果

TOC 为总有机碳, 作为有机物的综合性指标其精确性高于 COD, 已经在国际上普遍采用^[21]。添加硝酸钙 65 d 后沉积物的 TOC 去除率为 52.60%, 远远高于对照组 TOC 的去除率 (图 1), 说明硝酸钙对沉积物 TOC 有较好的去除效果。刘娇^[12]在对有机污染型河口潮滩的研究中也发现, 投加硝酸盐的处理组中 TOC 去除效果明显优于对照组以及同时加入铵盐和硝酸盐的处理组。

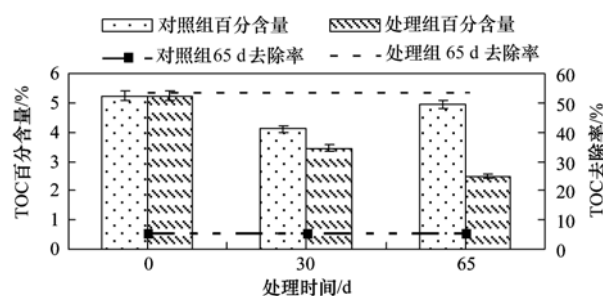


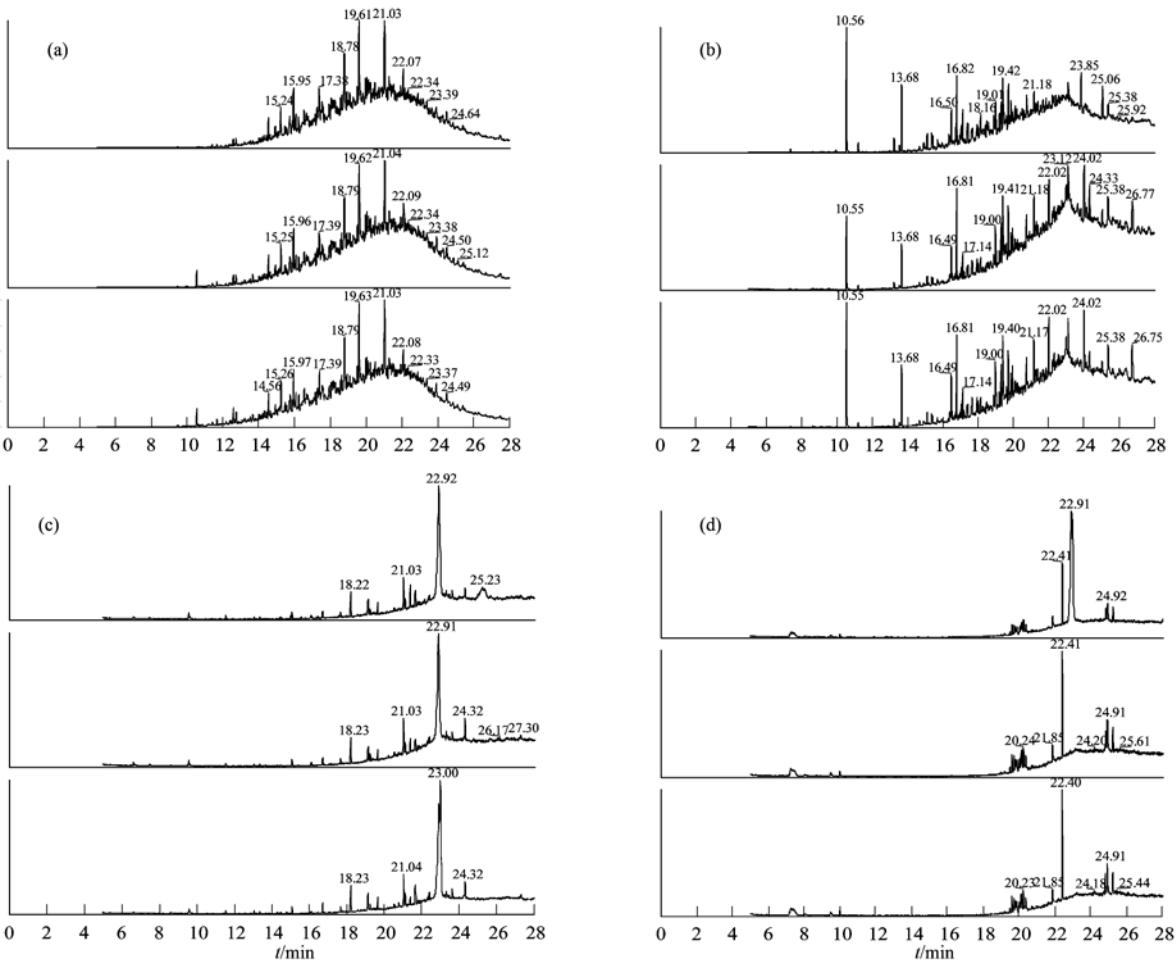
图 1 投加硝酸钙对底泥 TOC 的百分含量及去除率的影响

Fig. 1 Effects of calcium nitrate on the percentage contents and removal rates of TOC in sediments

2.2 投加硝酸钙对沉积物中各类有机物减量的影响

按照极性逐步增强的方式对层析纯化的有机物质可实现有效的分布洗脱, 峰型图 (图 2) 显示同一分离组分中保留时间分布均匀, 不同物质间含量差异明显, 分离效果较好。对检出的有机物进行归类分析^[14]。

以峰面积为相对定量的参考参数, 分析各类有机物的相对去除率, 计算公式参照式 (1), 结果见图 3。



(a) F1: 为正己烷洗脱, 上图: 0 d, 中图: 修复 30 d, 下图: 修复 65 d; (b) F2: 为正己烷/二氯甲烷(4:1)洗脱, 上图: 0 d, 中图: 修复 30 d, 下图: 修复 65 d; (c) F3: 为二氯甲烷洗脱, 上图: 0 d, 中图: 修复 30 d, 下图: 修复 65 d; (d) F4: 为甲醇洗脱, 上图: 0 d, 中图: 修复 30 d, 下图: 修复 65 d

图 2 各组分有机物质量色谱

Fig. 2 Mass chromatogram of different components of organic pollutants

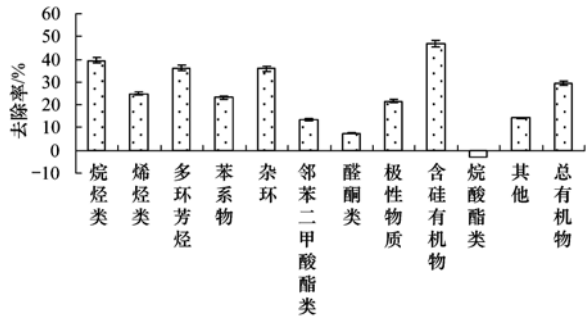


图 3 投加硝酸钙对底泥中不同有机物去除的促进作用
Fig. 3 Enhancements of organic pollutant removals
by calcium nitrate addition in sediments

向底泥中注入硝酸钙溶液,一定程度上增加了底泥微生物可利用的电子受体,加快了底泥有机物的降解,达到对各类有机物的有效去除.底泥修复 65 d 后,各类有机物的去除效果由高到低依次为含

硅有机物、烷烃、多环芳烃、杂环、烯烃类、苯系物、极性物质、邻苯二甲酸酯类、醛酮、烷酸酯类.较对照而言,处理组有机物的去除效果明显(图 3).有研究报道指出^[4,6],硝酸钙氧化有机物的效果随着有机物种类的不同而有较大的差异,一般对于低分子量有机物,硝酸钙的氧化作用相对较好,反之较差.对于酚、醛、醇、有机酸、酯类、以及被烷基、硝基取代的芳烃,其氧化效果较好,而对于卤化烃、饱和酯以及苯类物质的氧化效果较差,与本研究的结果基本一致.

(1)本研究样品中烷烃的检出种类和含量最多的为短链烷烃^[14],较容易被沉积物中的土著微生物降解利用.与对照组相比,投加硝酸钙后沉积物中烷烃的去除率提高了 39.54%.说明投加硝酸钙后加快了对烷烃类有机物的降解.这与刘娇^[12]在对

有机质污染型河口潮滩的研究中,沉积物中注入硝酸盐后对油类物质具有较好的去除效果的研究结果一致。

(2)极性物质包括酚类、醇类、有机酸以及其他极性化合物,与非极性物质相比,其水溶性更好,更容易被微生物利用。但通常条件下极性物质的自然去除效果并不理想,投加硝酸钙后的去除率提高了 21.71%。同样,对于硝酸钙氧化作用较好的醛酮物质的去除率较低仅为 7.44%,主要原因可能是微生物在降解代谢其他有机物的同时,生成了小分子的代谢产物,使其在被微生物代谢的同时,其含量也在增加^[25]。刘娇^[12]在对有机质污染型潮滩的研究中,也报道了红外光谱显示的结果:加入硝酸钙后多糖、蛋白质等有机物迅速降解生成有机酸、酰胺等小分子物质。

(3)对于难降解有机物多环芳烃(2 或 3 环)^[14,26],投加硝酸钙后的去除率提高了 36.25%。这与宗栋良报道的底泥微生物较容易利用水溶性相对较好、生物可利用性高的如萘、菲、芴、蒽等低环芳烃,且对烷基或硝基取代的芳烃去除效果更佳的研究结果一致^[7]。Macrae 等^[11]也报道了硝酸盐作用条件下沉积物中低环芳烃的半衰期(33~88 d)明显低于高环芳烃的半衰期(143~812 d)。因此,投加硝酸钙有助于沉积物中低环芳烃的降解。

(4)邻苯二甲酸酯在厌氧环境中很容易成为持久性污染物^[27],被美国 EPA 归为主要内分泌干扰物之一^[28,29],虽然在底泥中的总有机物占比不是很高^[14],但其造成的危害不容忽视。与对照组相比,投加硝酸钙后邻苯二甲酸酯类的去除率提高了 13.47%,去除效果不是很理想。吴东雷等^[30]在研究邻苯二甲酸酯分子结构与厌氧生物降解的相关性研究中也指出,邻苯二甲酸酯的降解半衰期都在 80 d 以上,并且厌氧降解速率很低,与本研究结果一致。

(5)检出的苯系物(联苯,甲苯等)和杂环物质,因其结构都较简单,且其总有机物占比都较低^[14],与对照组相比,投加硝酸钙后的相对去除率分别达 23.19%、35.92%。说明硝酸钙对于结构简单的苯系物以及杂环类有机物有相对较好的去除效果。陈余道等^[31]在对芳香烃自然去除的研究中,报道指出了甲苯很容易被自然去除,但是对于苯、联苯类物质的去除则需要很长时间,并且硝酸盐浓度的升高有助于提高生物降解苯系物淋滤组分的活性。李宇华等^[32]在对苯污染地下水系统的研究中也指出硝

酸盐与苯浓度具有一定的相关性,说明硝酸盐作为电子受体可以促进苯物质的降解。本研究中苯系物的自然去除率很低,主要可能是联苯等自然去除作用差的有机物的存在^[31]。

(6)检出的烯烃多为较低碳数的烷烯,同烷烃类有机物一样,较容易被微生物分解利用,投加硝酸钙后的去除率提高了 24.93%。齐永强等^[33]在探索各类石油烃中不同组分在生物修复过程中(投加氧化剂 H_2O_2 和表面活性剂)的降解模式和降解速率的研究中,指出实验组烯烃类有机物的含量变化与空白组烯烃变化相似,而本研究结果与此相反,这正说明采用硝酸钙对底泥的这种修复方式可以提高对烯烃的去除效果。

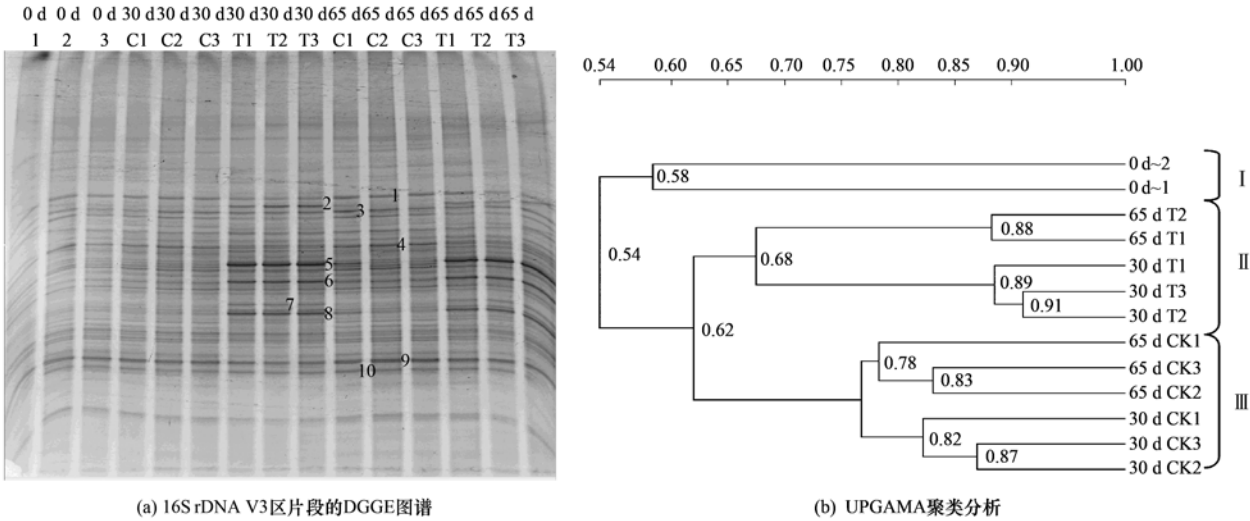
(7)对于烷酸酯类有机物,与对照组相比,投加硝酸钙后的去除率反而降低,说明硝酸钙处理对烷酸酯类有机物的去除效果不理想。这和宗栋良等^[7]报道中硝酸钙对于饱和酯类有机物的氧化作用较低的研究一致。

(8)检出的与电子工业产业相关的含硅有机物^[14],投加硝酸钙的去除率比对照组高出 46.73%。硅类有机物的去除率之所以这么高,主要在于其总有机物占比较小,分子量低,较容易被微生物利用。

2.3 投加硝酸钙对沉积物中微生物群落结构的影响

DGGE 分析结果如图 4(a)所示,沉积物中注入硝酸钙前后,条带的数目及亮度差异明显,说明硝酸钙对沉积物中的微生物群落结构有显著的影响。硝酸钙修复 30 d 后,DGGE 图谱中第 2 和第 7 号条带出现,第 5、第 6 和第 8 这 3 个条带亮度增强。采用 Quantity One 分析软件(Bio-Rad)对不同样品的 DGGE 分析结果作聚类分析(UPGAMA)[图 4(b)],硝酸钙的投加使底泥样品分为三类,其中原始沉积物样品聚为 I 类,投加硝酸钙处理组和不投加硝酸钙的对照组分别聚为 II 和 III 类。由此可见,沉积物在自然净化过程中,微生物群落结构也会发生变化,而硝酸钙的加入使沉积物中的微生物群落结构发生了明显的变化。

对 DGGE 图谱上共有的和具有差异的 10 个条带切胶回收[图 4(a)],并进行序列分析,测定的序列采用 DNAMAN 软件去除序列两端的载体序列,经 BLAST (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) 比对分析,选取与其序列相似性较高(94%~100%)的 2~3 条序列,分析结果如表 1 所示。这些序列分属于变形细菌(Proteobacteria)的 δ 和 γ 两个亚群,放线菌门(Actinobacteria)的微杆菌属,梭菌纲



C:对照; T:处理(硝酸钙)

图 4 投加硝酸钙对底泥中细菌群落结构的影响

Fig. 4 Effects of calcium nitrate on bacterial community structures in sediments

表 1 DGGE 图谱优势条带的序列比对结果

Table 1 Sequence alignment results of DGGE predominant bands

条带位置	最相似菌	GenBank 登录号	相似度/%	系统类群
1	Uncultured <i>Deltaproteobacteria</i> bacterium clone QEDR2CG08	CU922677.1	100	δ-Proteobacteria
	Uncultured <i>Deltaproteobacteria</i> bacterium clone QEDS2BH06	CU921052.1	100	δ-Proteobacteria
	Uncultured <i>Proteobacteria</i> clone MV12	AM117922.1	100	Proteobacteria
2	Uncultured <i>Deltaproteobacteria</i> clone P15	HE648188.1	98	δ-Proteobacteria
	Uncultured <i>Deltaproteobacteria</i> bacterium clone QEDN11CA05	CU926802.1	98	δ-Proteobacteria
3	Uncultured bacterium clone AN021	GQ860010.1	100	Uncultured bacterium
	Uncultured bacterium clone AN165	GQ859992.1	100	Uncultured bacterium
4	Uncultured <i>Clostridium</i> sp. clone SR_5_(6)	JX301590.1	99	Clostridia
	Uncultured <i>Gelria</i> sp. clone L6B-366	GU000266.1	97	Clostridia
5	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone MS-N29	FJ949217.1	94	Chloroflexi
	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone MSB-5E12	DQ811884.1	94	Chloroflexi
6	<i>Thermomonas fusca</i> strain LMG 21739	AJ519988.1	99	γ-Proteobacteria
	<i>Thermomonas</i> sp. enrichment culture clone ANA-RAS-36	HM769666.1	99	γ-Proteobacteria
7	<i>Microbacterium pumilum</i> strain B1PC13	JQ689185.1	99	Actinobacteria
	<i>Microbacterium</i> sp. H6-73	JQ897314.1	99	Actinobacteria
8	Uncultured <i>Gammaproteobacteria</i> clone W2020	AM259334.1	99	γ-Proteobacteria
	<i>Thermomonas koreensis</i> strain: NBRC 101155	AB681399.1	98	γ-Proteobacteria
9	<i>Microbacterium</i> sp. Ci14	HE589769.1	100	Actinobacteria
	<i>Microbacterium</i> sp. T4-7	JN595859.1	100	Actinobacteria
10	Uncultured <i>Caldiserica</i> bacterium clone SR_25_(1)	JX301627.1	98	Caldiserica
	Uncultured <i>Caldisericum</i> sp. clone DSS-17	JN806348.1	97	Caldiserica

(Clostridia)的热厌氧杆菌科、梭菌属,绿弯菌门以及新发现的细菌门 Caldiserica 和未培养微生物. 这些微生物大部分分离于厌氧或者极端环境下的反应器、废水以及河涌沉积物中,具体分为 γ-Proteobacteria 亚群中与硝化作用和硝酸盐还原相关的热单胞菌属、PCB 降解菌(未培养菌),还有于厌

氧反应器中分离得到的梭状芽胞杆菌以及嗜热环境中分离得到的嗜热厌氧杆菌科(Thermoanaerobacteriaceae). 变形细菌的类型比较复杂,在自然环境中作为不同角色参与物质代谢,并作为微生物群落的重要组成部分参与群落演替过程^[34]. 归属于 γ-变形细菌中的 *Thermomonas* sp.

(热单胞菌属)^[35]属于异养菌,可以利用硝酸盐作为电子受体参与反硝化作用,并分解厌氧环境中的有机物质为其自身生长提供所需的能量^[35]。γ-变形细菌除参与硝酸盐还原外,还与硫酸盐的氧化和还原有关^[36]。而δ-变形细菌主要包括2个类群,一类如蛭弧菌和黏细菌,另一类主要是在厌氧环境下参与硫酸盐还原,如脱硫弧菌等^[37]。微杆菌属属于放线菌科,是沉积物中主要的优势菌群之一^[38],一些微杆菌在厌氧环境下可以利用有机物作为碳氮源生长,如硝基苯胺降解菌(*Microbacterium* sp. PNA8)。热厌氧杆菌是一类能利用碳水化合物化合物的异养嗜热菌^[39,40],在底泥厌氧环境中分解有机物质供其生长。绿弯菌门是一种非硫细菌,与第5条带的相似性为94%(表1)。

3 结论

(1) 与对照组相比,硝酸钙的投加可以促进沉积物中有机物的减量。沉积物的TOC以及总有机物的去除率比未添加硝酸盐的对照组分别高出47.25%、29.55%,各类有机物的去除效果由高到低依次为含硅有机物、烷烃、多环芳烃、杂环、烯烃类、苯系物、极性物质、邻苯二甲酸酯类、醛酮、烷酸酯类。其中含硅有机物、持久性有机污染物多环芳烃、苯系物以及杂环物质的去除率比对照组分别高出46.73%、36.25%、23.19%、35.92%。

(2) 尽管沉积物在自然净化过程中,微生物群落结构也会发生变化,而硝酸钙的加入可显著影响沉积物中的微生物群落结构。其中DGGE图谱的10个主要条带中4条归属于变形细菌(Proteobacteria)的δ和γ两个亚群,2条归属于放线菌门(Actinobacteria),1条归属于梭菌纲(Clostridia),1条归属于绿弯菌门(Chloroflexi),1条归属于新发现的细菌门-Caldiserica,1条为未培养微生物。这些微生物大部分分离于厌氧或者极端环境下的反应器、废水以及河涌沉积物中,且具有硝酸还原或有机物降解转化相关的功能。

参考文献:

- [1] 赵振. 氧化试剂(硝酸钙)控制黑臭底泥营养盐释放的效果研究[J]. 环境科技, 2010, 23(4): 17-19, 23.
- [2] 郭怡雯, 张明, 陈熙. 硝酸盐(钙)颗粒应用于底泥原位修复的研究[J]. 环境研究与监测, 2009, (1): 51-55.
- [3] 刘树娟, 陈磊, 钟润生, 等. 硝酸钙对河流底泥中含硫化合物臭味原位控制[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 691-698.
- [4] Renholds J. In situ treatment of contaminated sediments[R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office, 1998. 1-33.
- [5] 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 硝酸钙对底泥有机物及氮磷迁移循环的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 58-63.
- [6] Murphy T P, Lawson A, Kumagai M, et al. Review of emerging issues in sediment treatment[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 1999, 2(4): 419-434.
- [7] 宗栋良, 张光明. 硝酸钙在底泥修复中的作用机理及应用现状[J]. 中国农村水利水电, 2006, (4): 52-54.
- [8] Wauer G, Gonsiorczyk T, Casper P, et al. P-immobilisation and phosphatase activities in lake sediment following treatment with nitrate and iron[J]. Limnologia, 2005, 35(1-2): 102-108.
- [9] Wauer G, Gonsiorczyk T, Kretschmer K, et al. Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release[J]. Water Research, 2005, 39(2-3): 494-500.
- [10] 洪祖喜, 何晶晶, 邵立明. 水体受污染底泥原地处理技术[J]. 环境保护, 2002, (10): 15-17.
- [11] Macrae J D, Hall K J. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in marine sediment under denitrifying conditions[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(11): 177-185.
- [12] 刘娇. 有机污染型河口滩涂的修复技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. 27-68.
- [13] 孙博, 曾思育, 陈吉宁. 富营养化湖泊底泥污染控制技术评估[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(8): 61-64.
- [14] 刘近, 邓代永, 许玫英, 等. 典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1142-1149.
- [15] GBT 19145-2003, 沉积岩中总有机碳的测定[S].
- [16] 康跃惠, 麦碧娴, 黄秀娥, 等. 珠江三角洲地区水体表层沉积物中有机污染状况初步研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(S1): 164-170.
- [17] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江及南海北部海域表层沉积物中多环芳烃分布及来源[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 129-134.
- [18] 曾峰, 陈丽旋, 崔昆燕, 等. 硅胶-氧化铝层析柱-气相色谱法测定沉积物中邻苯二甲酸酯类有机物[J]. 分析化学, 2005, 33(8): 1063-1067.
- [19] 陈建林, 王炳坤, 冯建昉. 运河水中悬浮物和底泥上有机污染物的探查[J]. 环境科学, 1995, 16(2): 69-72.
- [20] Pereira W E, Rostad C E, Taylor H E, et al. Characterization of organic contaminants in environmental samples associated with Mount St. Helens 1980 volcanic eruption[J]. Environmental Science & Technology, 1982, 16(7): 387-396.
- [21] 赵大传, 王伟. 黄河水中有机物的分析及去除规律的研究[J]. 山东建筑大学学报, 2008, 23(4): 320-327.
- [22] Yang Chun, Peng X Z, Wang Z D, et al. Fingerprinting analysis and characterization of hydrocarbons in sediment cores from the Pearl River Estuary, China[J]. Environmental Forensics, 2011, 12(1): 49-62.

- [23] Zhou J Z, Bruns M A, Tiedje J M. DNA recovery from soils of diverse composition [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(2): 316-322.
- [24] Muyzer G, De Waal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(3): 695-700.
- [25] 叶秀雅, 周少奇, 郑可. 运用 GC-MS 技术分析垃圾渗滤液有机污染物的去除特性[J]. *化工进展*, 2011, **30**(6): 1374-1378.
- [26] 吴兴让, 尹平河, 赵玲, 等. 珠江广州段水体微表层与次表层中多环芳烃的分布与组成[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(4): 868-873.
- [27] 夏凤毅, 吴东雷, 郑平, 等. 邻苯二甲酸酯的厌氧生物降解规律研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2006, **32**(4): 444-448.
- [28] 张建, 石义静, 崔寅, 等. 土壤中邻苯二甲酸酯类物质的降解及其对土壤酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 3056-3061.
- [29] 吕怡兵, 付强, 陈瑛. 环境中邻苯二甲酸酯类物质的污染现状与监测方法[J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(5): 66-70.
- [30] 吴东雷, 夏凤毅, 王传花, 等. 邻苯二甲酸酯分子结构与厌氧生物降解相关性研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2005, **42**(6): 1206-1209.
- [31] 陈余道, 朱义年, 蒋亚萍, 等. 汽油污染含水层中芳香烃的自然去除与生物降解特征[J]. *地球化学*, 2004, **33**(5): 515-520.
- [32] 李宇华, 张旭, 李广贺, 等. 苯污染地下水系统反硝化菌分布及其净化过程[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, **6**(6): 12-15.
- [33] 齐永强, 王红旗, 刘敬奇, 等. 土壤中石油污染物微生物降解过程中各石油烃组分的演变规律[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 834-836.
- [34] Uthicke S, McGuire K. Bacterial communities in Great Barrier Reef calcareous sediments: contrasting 16S rDNA libraries from nearshore and outer shelf reefs[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **72**(1-2): 188-200.
- [35] 邹平, 毕晓伊, 孙珮石, 等. 生物净化烟气 NO_x 填料塔生物膜的细菌优势种群[J]. *煤炭学报*, 2011, **36**(8): 1375-1380.
- [36] Nercessian O, Fouquet Y, Pierre C, *et al.* Diversity of Bacteria and Archaea associated with a carbonate-rich metalliferous sediment sample from the Rainbow vent field on the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Environmental Microbiology*, 2005, **7**(5): 698-714.
- [37] 常玉梅, 杨琦, 郝春博, 等. 城市污水厂活性污泥强化自养反硝化菌研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1210-1216.
- [38] Wu X D, Liu M, Wang W, *et al.* Alkalophilicity and genomic library construction of *Microbacterium oxydans* isolated from an extreme environment [J]. *Biosystems Engineering*, 2011, **23**(2): 409-414.
- [39] 黎霞, 承磊, 汪卫东, 等. 一株油藏嗜热厌氧杆菌的分离、鉴定及代谢产物特征[J]. *微生物学报*, 2008, **48**(8): 995-1000.
- [40] Fardeau M L, Magot M, Patel B K, *et al.* *Thermoanaerobacter subterraneus* sp. nov., a novel thermophile isolated from oilfield water[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2000, **50**(6): 2141-2149.

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