

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲢鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

厌氧污泥降解萘动力学与生物多样性研究

曹新垵, 杨琦*, 郝春博

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 为对工业废水中的萘进行高效的生物处理, 采集某石油工业废水处理装置的厌氧活性污泥, 以萘和萘与乳酸钠为电子供体进行驯化培养。当一个驯化周期中萘去除率达到 90% 以上时, 研究间歇反应条件下分别以萘和萘与乳酸钠为电子供体时的降解动力学, 并提取去除率高的污泥中微生物总 DNA, 构建 16S rDNA 基因片段克隆文库分析细菌群落结构。结果表明, 以单一萘为电子供体时萘的降解率远远小于萘与乳酸钠共代谢时的降解率; 两种驯化模式下萘浓度与时间符合一级反应动力学, 动力学常数 K 分别为 $3.5 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ 和 $16 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ 。萘与乳酸钠共代谢污泥中细菌类群主要为 *Deltaproteobacteria*、*Thermotogae*、*Bacteroidetes*、*Chloroflexi* 和 *Unclassified bacteria*, 其中 *Deltaproteobacteria* 类细菌占主导地位。在成熟的厌氧活性污泥中 *Desulfobulbus* sp. 所占比例为 24.2%; *Kosmotoga* 占 21.0%。此外, 反应器中还存在 *Smithella*、*Syntrophobacter*、*Levilinea* 等细菌。对厌氧活性污泥中细菌多样性的研究有利于优化反应条件, 从而提高污泥中萘的去除率。

关键词: 厌氧污泥; 萘降解; 降解动力学; 克隆文库; 系统发育分析

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3535-07

Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity

CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo

(School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: For efficient biological treatment of naphthalene in the industrial wastewater, activated anaerobic sludge was collected from a wastewater treatment plant of petroleum industry, and domesticated with naphthalene, naphthalene and lactate as electron donors, respectively. When the removal efficiency of naphthalene reached more than 90% in a domestication cycle, degradation kinetics were investigated in batch reactions with naphthalene, naphthalene and lactate as electron donors, respectively. Meanwhile, the microbial DNA was extracted from the sludge with high naphthalene removal efficiency, the 16S rDNA clone library was built up, and the bacterial community was analyzed. The results indicated that the degradation rate of naphthalene in reaction with naphthalene as the sole electron donor was much lower than that with naphthalene and lactate as electron donors. In both domestication modes, the naphthalene concentration and the time followed the first order reaction kinetics model and the kinetic constant K were $3.5 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ and $16 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$, respectively. In addition, phylogenetic analysis indicated that the bacterial communities in naphthalene and lactate co-metabolism sludge were mainly composed of *Deltaproteobacteria*, *Thermotogae*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi* and *Unclassified bacteria*. *Deltaproteobacteria* was the main phylum in the sludge. In mature anaerobic activated sludge, *Desulfobulbus* sp. and *Kosmotoga* accounted for 24.2% and 21.0%, respectively. *Smithella*, *Syntrophobacter* and *Levilinea* were also found in the bioreactor. The study of the bacteria diversity in the anaerobic sludge is conducive to the optimization of reaction conditions for efficient removal of naphthalene.

Key words: anaerobic sludge; naphthalene removal; degradation kinetics; clone library; phylogenetic analysis

萘(naphthalene)是一种常见的双环芳香烃化合物,是多环芳烃中水溶性和挥发性最强的一种。是煤焦油和杂酚油的主要成分,长期接触萘会引起人体内血液成分的变化、人体疾病,严重威胁人体健康。萘对水生生物也有毒害作用,表现为抑制呼吸强度,降低叶绿素含量,最终导致水生生物萎缩死亡^[1]。

萘是常见的多环芳烃化合物,研究表明绝大部分的多环芳烃主要通过生物降解途径从环境中缓慢去除,因此多环芳烃的生物降解受到广泛关注^[2,3]。1964 年 Davies 等首次对萘的生物降解及降解途径进行了研究。自此利用各种生物降解萘也有了越来

越多的研究,发现了很多菌种可以降解萘。诸如近年来,邵宗泽等^[4]从厦门储油码头油污水中分离出 2 株假单孢菌属的海洋石油降解菌,3 d 对萘降解率

收稿日期: 2011-12-26; 修订日期: 2012-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40102027,50578151);北京市自然科学基金项目(8052017,8092025);北京市教委校企合作项目(51900265005);北京市产学研项目(51900265005);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07207-008,2009ZX07419-002,2009ZX07207-001);中央高校基本科研业务费专项(2010ZD03,2011YX1016);北京市科委计划项目(Z111100074211003)

作者简介: 曹新垵(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为生物化学与分子生物学,E-mail: xinkai_c@yahoo.com.cn

* 通讯联系人,E-mail: yq@cugb.edu.cn

能达到 80% 以上;温洪宇等^[5]从石油污染土壤里分离出了 1 株微球菌 N-1,降解率达到 94.7%;张春杨等^[6]从污水处理厂附近的活性污泥中分离出 1 株可以降解萘的假中间苍白杆菌 NAP_A;贾燕等^[7]研究了假单胞菌 N7 对水中萘的降解特性及其降解途径(降解率达到 95.66%)。

萘降解的半反应为: $C_{10}H_8 + 20H_2O \rightarrow 10CO_2 + 48H^+ + 48e^-$ ^[8]。全向春等^[9]对硝酸盐还原条件下不同碳源对萘生物降解特性做了较全面的研究,而在硫酸盐还原条件下生物降解萘的研究并不多。

本研究的活性污泥取自某处理石油废水的厌氧污泥池,在硫酸盐还原条件下,用萘与萘和乳酸钠进行驯化培养,当活性污泥去除萘效率达到 90% 以上时,研究单一基质及共代谢培养条件下厌氧污泥对萘的降解动力学,对比两种不同驯化模式的效果差异,为后续的研究做铺垫,并提取去除率高的厌氧污泥微生物总 DNA,构建 16S rDNA 基因片段克隆文库分析细菌群落结构,对厌氧活性污泥中细菌多样性的研究有利于优化反应条件,从而更高效处理含萘废水。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 主要仪器

Agilent 高效液相色谱,PCR 仪(美国 Bio-rad),凝胶成像仪(美国 Bio-rad),离心机,恒温水浴锅,高压灭菌锅,电泳槽(北京六一厂),超净工作台,电子天平。

1.1.2 主要试剂

污泥培养液:乳酸钠(70%)0.35 g, NH_4Cl 0.1 g, $CaCl_2$ 0.01 g, K_2HPO_4 0.05 g, Na_2SO_3 0.05 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.267 g,微量元素 1 mL, $FeSO_4$ 微量,水 1 000 mL, pH 7.0 ~ 7.2。

萘:北京益利精细化学品有限公司出产的分析纯固体萘,加蒸馏水(放置大于 2 周)配制成萘($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)溶液。

STE 缓冲液: $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Tris-HCl (pH 8.0) 2.5 mL, $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA 0.5 mL, $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 5 mL,加水至 250 mL。

PCR 相关生化试剂(美国 Promega 公司)

1.1.3 接种污泥

采集自某石油工业废水处理装置。

1.2 方法

1.2.1 污泥的培养与驯化

将厌氧活性污泥放在 500 mL 培养瓶中,用导气管连接污泥瓶与史氏发酵管,史氏发酵管用于测定污泥产气情况,培养瓶底层为污泥,上层为污泥培养液,放置于 35℃ 恒温培养箱中培养,使厌氧活性污泥进水 COD 维持在 $2\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, pH 为 7.2 左右,每 96 h 换一次水(COD 去除率 > 90%)。将厌氧污泥分别采用乳酸钠为共代谢基质和萘为单一基质进行间接驯化,逐步提高萘的浓度(共代谢的污泥萘去除率 > 90%),萘最终驯化浓度达到 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2.2 萘浓度测定

Agilent 高效液相色谱仪器型号为 HPLC-5020,色谱柱为 C18 反相碳柱。荧光监测器的波长为 218 nm,流动相为 A(80% 甲醇)、B(20% 水)流速为 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,进样量 20 μL ,柱温为 40℃,柱压 168 bar,检测灵敏度为 $1 \times 10^5 \text{ UV}$ 。定量方法为外标法。

1.2.3 降解动力学测定

在完成驯化后,从两种驯化模式分别取驯化效果好的厌氧污泥一瓶,一瓶加入乳酸钠($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)作为共代谢基质,再加入无机盐培养液及微量元素和一定量的萘溶液使反应瓶中萘浓度保持为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;另一瓶加入萘作为单一碳源($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),再加入无机盐培养液和微量元素。加入萘后的 12、24、48、72、96 和 120 h 分别对两瓶的萘连续取样分析。

1.2.4 细菌多样性分析

(1) 污泥样品预处理

当活性污泥去除萘效率达到 90% 以上时,取污泥加入无菌离心管中,以 $12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,离心 10 min,弃上清液,加入已灭菌的生理盐水洗涤 2 ~ 3 次,再用 STE 缓冲液洗涤一遍。

(2) 污泥细菌总 DNA 提取

参考文献[10]的土壤细菌基因组提取方法:用 STE 缓冲溶液悬浮,加入溶菌酶至浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 37℃ 水浴处理 30 min,然后加入蛋白酶 K 至浓度为 $3 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, SDS 至浓度为 2%, 50℃ 水浴处理 45 min;等体积的氯仿抽提 2 次,取上清液;向上清液中加入 $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 10% 的乙酸钠,再加入等体积的异丙醇, -20℃ 放置 1 h; $12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,弃上清液;沉淀用 75% 的乙醇洗涤 1 次,自然干燥,最后用 50 μL 的无菌水溶解。

(3) 16S rDNA 基因全长的 PCR 扩增

使用细菌 16S rDNA 通用引物 16S1 (5'-AGA

GTT TGA TCM TGG CTC AG-3') 和 16S2 (5'-TAC GGY TAC CTT GTT ACG ACT T-3'), 以厌氧活性污泥提取的总 DNA 为模板, PCR 扩增样品中的相应基因. 50 μL 的 PCR 反应体系: $5 \times \text{PCR buffer}$ 10 μL 、 $25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$ 5 μL 、 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ dNTP}$ 1 μL 、 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 正反引物 2 μL 、模板 25 ~ 50 ng、*Taq* DNA 聚合酶 5U、适量的双蒸水补足 50 μL . PCR 反应条件为: 预变性条件为 95°C 5 min, 94°C 变性 30 s, 54°C 退火 30 s 和 72°C 延伸 2 min, 共 35 个循环, 最后在 72°C 下延伸 7 min. PCR 反应的产物用 10% 琼脂糖凝胶电泳检测^[11].

(4) 构建分子克隆文库

按照 Peasy T1 说明书构建 5 μL 连接反应体系, 25°C 连接 13 min, 然后热激转化到大肠杆菌 DH5 α 感受态细胞中, 涂布 LB(Amp/IPTG/X-Gal) 平板上, 37°C 培养 16 h 后 4°C 静置 1 h 使蓝斑充分显现后, 随机挑取白色菌落, 重新纯化培养. 将重新纯化培养的白色菌落作为模板, 以 M13F 和 M13R 为引物, 以少许菌体为模板, PCR 扩增验证插入片段的大小, 筛选阳性克隆.

(5) 16S rDNA 序列测定和系统进化分析

从 200 个阳性克隆随机挑取 80 个送去测序, 测序工作由北京中科希林生物科技有限公司完成. 用 Dotur 软件对所得序列进行分类, 剔除相同序列, 并做饱和和曲线. 将所得序列输入 NCBI 网站, 用 Blast 程序进行比对, 下载同源性较高的序列作为参考, 将所有序列用 BioEdit 中 ClustalW 程序比对后, 用 MEGA 4.0 软件绘制系统发育树^[12,13].

2 结果与讨论

2.1 降解动力学

在缺氧条件下, 微生物就可以利用诸如 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等作为电子受体获取能量^[14], 根据污水处理厂的条件, 选择以 SO_4^{2-} 为电子受体, 即反应在硫酸盐还原条件下进行, 完全反应时萘与电子受体理论值之比萘/硫酸根 = 1:6, 因此溶液中实际所加入的各电子受体的量均为理论值的 3 倍以上, 能够保证完全氧化萘所需要的充足的电子受体, 而不会成为反应的限制因素.

降解动力学实验中污泥的初始萘浓度均为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (在加入萘的最初 30 min 到 1 h 内, 考虑到污泥对萘的吸附暂不取样检测), 根据实验方案测定萘在不同时刻的浓度, 得到在一个水力停留时间 (5 d) 内污泥溶液中剩余萘浓度随时间的变化规律.

图 1 为厌氧活性污泥降解萘的实验结果数据.

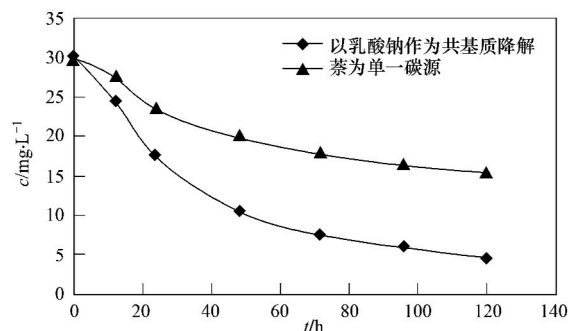


图 1 萘浓度变化曲线

Fig. 1 Concentration change curve of naphthalene

通过对实验数据的回归分析, 萘降解符合一级反应动力学规律. 根据一级反应动力学 $dS/dt = -KS$ (S 底物浓度、 X 细菌浓度、 K 动力学常数), 做出厌氧活性污泥在共基质条件下和以萘为单一碳源时降解萘的 $-\ln(S/S_0)-t$ 曲线, 结果如图 2.

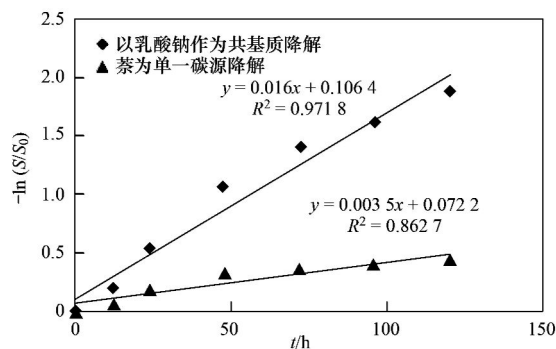


图 2 萘降解的 $-\ln(S/S_0)-t$ 回归曲线

Fig. 2 Regression curve of $-\ln(S/S_0)-t$ of naphthalene degradation

由图 2 可见, 厌氧污泥对萘的降解 $-\ln(S/S_0)$ 与 t 之间线性相关性良好, 通过对上述曲线进行线性拟合, 求得各污泥对萘厌氧降解速率常数 K 和相关系数及半衰期 $t_{1/2} = (\ln 2)/K$, 结果见表 1.

表 1 萘降解速率常数、相关系数及半衰期

Table 1 Degradation rate constant, correlation coefficient and half-life of naphthalene

条件	硫酸还原污泥	
	共基质	单一碳源
动力学常数		
$K \times 10^{-3}/\text{h}^{-1}$	16	3.5
相关系数	0.97	0.86
半衰期/h	36.67	177.41

综上分析可得, 两种不同驯化方法驯化出的厌氧污泥对萘的降解都符合一级反应动力学, 共基质条件下萘的去除率和降解速率都大于萘为单一碳源

时的情况,在共基质条件下拟合一级动力学降解的降解方程为 $c = 26.97e^{-0.016t}$; 萘为单一碳源降解时,厌氧污泥降解萘条件下拟合一级动力学降解方程为 $c = 27.91e^{-0.0035t}$. 在共基质降解和萘为单一碳源降解的两种不同情况下,从降解速率常数 K 值的大小可以比较出两种条件下污泥降解萘能力的强弱,可以看出加入共代谢基质的厌氧污泥对于萘的降解能力更强.

2.2 微生物群落结构研究

2.2.1 总 DNA 提取结果

将乳酸钠与萘共同驯化的污泥提取细菌总 DNA,细菌总 DNA 提取结果如图 3 所示,A1、A2 为平行样. 所提 DNA 片段大小约为 23kb,证明已获得较为完整的基因组 DNA.

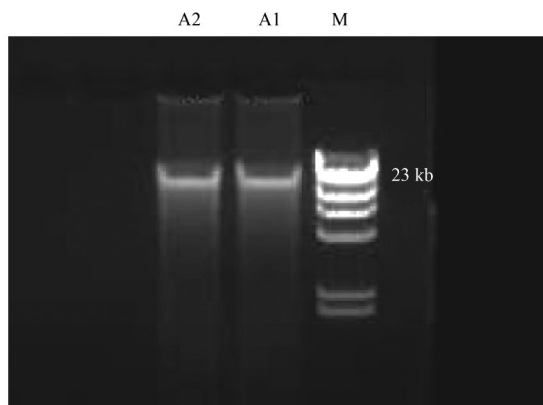


图 3 16S rDNA 全长扩增

Fig. 3 Amplified full-length 16S rDNA

2.2.2 16S rDNA 扩增结果

对污泥细菌总 DNA 经 PCR 扩增后,得到 1 500 bp 大小的目的片段,如图 4,CK 为阴性对照,1 (25 ng)、1.2 (30 ng)、1.5 (37.5 ng)、2 (50 ng) 为提取的 DNA 稀释至不同浓度加入 PCR 体系扩增的结果.

PCR 产物经连接转化后随机挑取 80 个白色克隆进行测序,将所得序列用 Dutor 软件进行分类并绘制饱和曲线(如图 5)剔除相同序列后得到 16 种基因型,文库已趋于饱和.

将每种基因型的序列输入 RDP 网站,利用 Classifier 程序确定其系统发育类群,结果表明:文库中细菌克隆的 16S rDNA 序列分属 6 个细菌类群(如图 6). 程序与数据库中已有的序列进行比对分析,主要比对结果如表 2 所示. 分别为将每种基因型的序列输入 NCBI 网站,用 BLAST 将所有序列用 ClustalX 1.81 比对后,用 Phylip 3.65 软件绘制系统

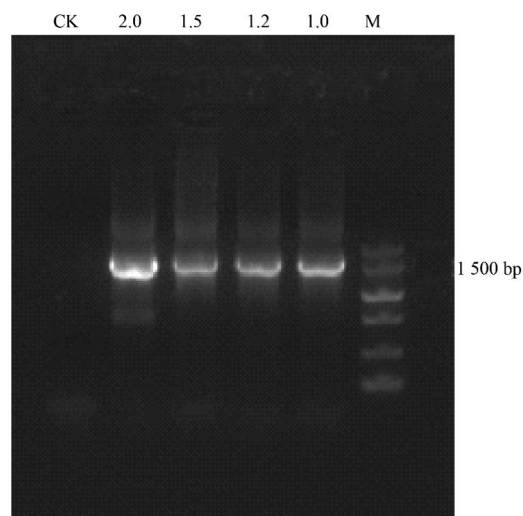


图 4 16S rDNA 全长扩增

Fig. 4 Amplified full-length 16S rDNA

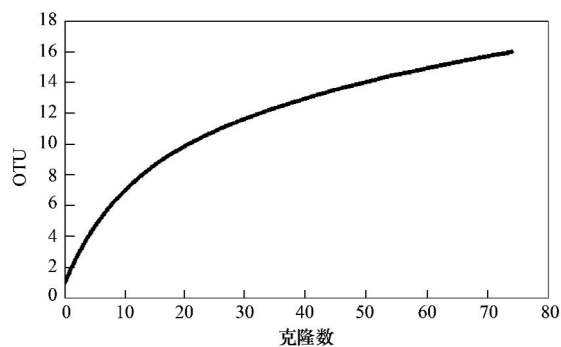


图 5 16S rDNA 克隆文库饱和曲线

Fig. 5 Evolution of representative clones obtained from the anaerobic sludge (with naphthalene and lactate)

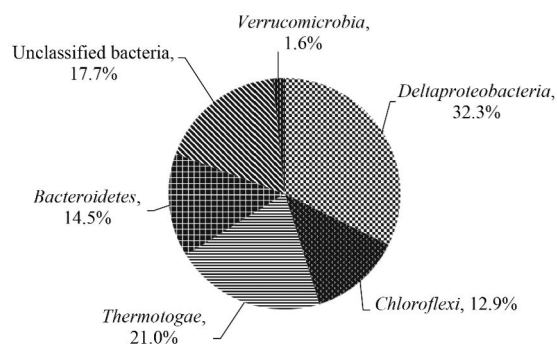


图 6 各类细菌在文库中所占比例

Fig. 6 Proportion of each phylotype in the clone library

发育树,用 TreeView 软件输出,图 7 是基于 16S rDNA 序列的细菌系统发育树.

从表 2 可以看出 *Deltaproteobacteria* 为文库中第一大类群,占总文库的 32.3%,主要特点是硫还原即以硫酸盐为电子受体降解有机污染物. 其中脱硫叶菌属 (*Desulfobulbus*) 厌氧条件下嗜常温硫酸盐还

表 2 活性污泥中部分细菌 16S rDNA 序列比对结果

Table 2 BLAST analysis of 16S rDNA sequences of the bacteria in the sludge

克隆号	基因频率/%	基因类群	数据库中最接近种或克隆	同源性/%
CC-10	4.9	<i>Deltaproteobacteria</i>	Bacterium enrichment culture clone R4-63B(GU196225)	99
CC-121	3.2	<i>Deltaproteobacteria</i>	Uncultured Deltaproteobacteria bacterium(CU921479)	99
CC-129	4.9	<i>Bacteroidetes</i>	<i>Bacteroidetes</i> bacterium 4F6B(AB623230)	99
CC-140	1.6	<i>Verrucomicrobia</i>	Uncultured bacterium clone B1(GU322883)	98
CC-142	24.2	<i>Deltaproteobacteria</i>	<i>Desulfobulbus</i> sp. RPF35L17(AY548775)	99
CC-144	11.3	<i>Chloroflexi</i>	Uncultured Chloroflexi bacterium(CU917659)	97
CC-145	21.0	<i>Thermotogae</i>	Uncultured bacterium gene(AB195919)	99
CC-147	9.7	<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured bacterium gene(AB195893)	98
CC-154	11.3	Unclassified bacteria	Uncultured bacterium clone BB-B50(GQ844339)	93
CC-158	1.6	<i>Chloroflexi</i>	<i>Levilinea saccharolytica</i> gene(AB109439)	98
CC-81	6.4	Unclassified bacteria	Unidentified eubacterium clone vadinBA07(U81641)	98

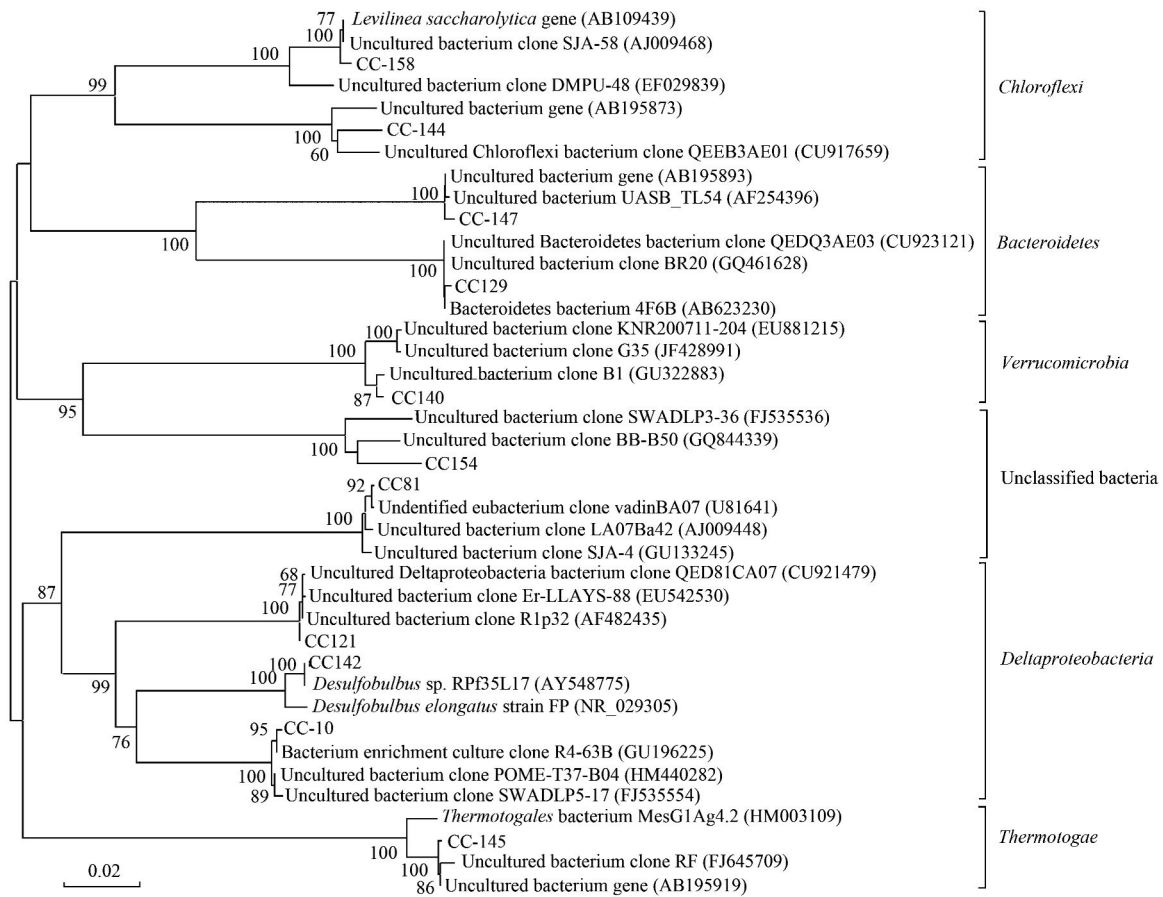


图 7 基于 16S rDNA 序列的细菌系统发育树

Fig. 7 Phylogenetic tree of the bacteria based on the 16S rDNA sequences

原菌,相似克隆占整个克隆文库的 24.2%,革兰氏阴性,可以将 SO_4^{2-} 还原为 H_2S 、 HS^- 、 S^{2-} 反应方程为: $\text{SO}_4^{2-} + \text{COD} \longrightarrow \text{HS}^- + \text{CO}_2$ [15,16]。在溶解的微量氧气作用下生成硫元素供 *Kosmotoga* 利用。另据报道有些硫酸盐还原菌可以直接利用原油中的芳香烃作为能源物质 [17,18]。

同时还包括与 *Smithella* sp. (史密斯氏菌属)相

似的代表克隆占 4.9%,属于互养菌科 (*Syntrophaceae*)。Ariesyady 等 [19] 在产甲烷反应器中通过特别的 FISH 探针,结合微量自动照相分析 (MAR),发现 *Smithella* sp. 氧化葡萄糖、丙酸、丁酸和乙酸,并且有实验表明这种菌与降解芳香类化合物有关。

Syntrophobacter sp. (互营杆菌属)在发育树上

属于同一分支,占整个克隆文库的 3.2%,*Syntrophobacter* sp. 是产氢产乙酸细菌,为绝对厌氧菌或是兼性厌氧菌,可将各种挥发性脂肪酸降解为乙酸和 H_2 . Boone 等^[20] 论述了沃淋互营杆菌这种革兰氏阴性细菌能够与硫酸盐还原菌结合降解丙酸盐。

Thermotogae 热袍菌门是一类嗜热细菌,其细胞外面有一层膜包裹,可利用碳水化合物,不同种类可适应不同的盐度和氧含量。其中 *Kosmotoga* 属是新近发现的一种新型的高温异养菌,属于革兰氏阴性菌,占整个克隆文库的 21.0%,是克隆文库中含量第二高的属。该菌株最初从北海石油平台 Troll B 分离得到,在 20~80℃ (最佳 65℃) 生长最旺盛,生长 pH 值 5.5~8.0 (最适 pH 值 6.8),已知可利用硫代硫酸钠等物质作为最终电子受体,生成氢气、二氧化碳、醋酸、乙醇或丙酸等物质^[21,22]。根据基因比对结果,分离出的 *Kosmotoga* 菌基因序列更接近于 2011 年发现的一种中温嗜温菌“mesotoga”,最适生长温度为 30~50℃,可以氧化乳酸盐,并以硫元素为最终电子受体,在厌氧共代谢条件下降解氯酚、多环芳烃、邻苯二甲酸二甲酯等芳香族化合物,对于生态系统中芳香族化合物污染的降解发挥着重要的作用^[23]。可见其在反应器中对萘降解扮演着重要的角色,可根据这种菌的生长特性对反应条件进行强化,加强反应器中厌氧活性污泥对萘的降解能力。

Chloroflexi 丝状菌群是厌氧污泥驯化中常见的纲,占整个克隆文库的 12.9%,其中 *Levilinea saccharolytica* 属可以代谢丙酸、丁酸、戊酸等形成乙酸^[24]。

Bacteroidetes 拟杆菌门序列在文库中所占比例为 14.5%,该属细菌是厌氧污泥培养中常见的菌种。

Verrucomicrobia 疣微菌门序列在文库中所占比例为 1.6%,其最相似序列来自中温的丙酸酯降解的微生物群落^[25]。

3 结论

(1) 在共基质存在时,萘可以在缺氧硫酸盐还原条件下被降解,大部分 (60%~70%) 的萘降解主要发生在加入萘后 48 h 以内,至 96 h 时 95% 以上的萘可以被生物降解。

(2) 萘也可以作为单一碳源在厌氧硫酸盐还原条件下被降解,其去除率和降解速率都要远远低于

有共基质存在的情况。

(3) 萘在厌氧污泥条件下的降解符合一级反应动力学,共代谢基质存在时萘的降解速率常数 K 为 $16 \times 10^{-3} h^{-1}$,降解动力学方程为 $c = 26.97e^{-0.016t}$ 。萘为单一碳源时,厌氧污泥降解萘的速率常数 K 为 $3.5 \times 10^{-3} h^{-1}$,降解动力学方程为 $c = 27.91e^{-0.0035t}$ 。

(4) *Desulfobulbus* 是系统中含量最高的属,比例为 24.2%,可为系统中的 *Kosmotoga* 提供硫元素作为电子受体,且有报道指出可以直接降解原油中的芳香烃化合物。

参考文献:

- [1] Edwards N T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the terrestrial environment-a review [J]. Journal of Environmental Quality, 1983, 12(4): 427-441.
- [2] Dean-Ross D, Moody J, Cerniglia C E. Utilization of mixtures of polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria isolated from contaminated sediment [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002, 41(1): 1-7.
- [3] 张杰,刘永生,孟玲,等. 多环芳烃降解菌筛选及其降解特性 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1783-1786.
- [4] 邵宗泽,许晔,马迎飞,等. 2 株海洋石油降解细菌的降解能力 [J]. 环境科学, 2004, 25(5): 133-137.
- [5] 温洪宇,廖银章,李旭东. 菌株 N-1 对萘的降解特性研究 [J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(1): 96-98.
- [6] 张春杨,彭振兴. 萘降解菌 NAP_A 的分离、降解性能和分子系统学研究 [J]. 生态环境, 2008, 17(1): 109-112.
- [7] 贾燕,尹华,叶锦韶,等. 假单胞菌 N7 的萘降解特性及其降解途径研究 [J]. 环境科学, 2008, 29(3): 756-762.
- [8] Dou J F, Liu X, Ding A Z. Anaerobic degradation of naphthalene by the mixed bacteria under nitrate reducing conditions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1-3): 325-331.
- [9] 全向春,王文燕,何孟常,等. 硝酸盐还原条件下不同碳源对萘生物降解特性的影响 [J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 261-265.
- [10] Zhou J Z, Mary A B, James M T. DNA recovery from soils of diverse composition [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, 62(2): 316-322.
- [11] 常玉梅,李冬梅,杨琦,等. 1,1-二氯乙烯降解菌的筛选及其生物学鉴定 [J]. 净水技术, 2010, 29(2): 53-57.
- [12] 郝春博,王广才,董健楠,等. 石油污染地下水中细菌多样性研究 [J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2464-2472.
- [13] Tamura K, Dudley J, Nei M, et al. MEGA4: molecular evolutionary genetics analysis (MEGA) software version 4.0 [J]. Molecular Biology and Evolution, 2007, 24(8): 1596-1599.
- [14] Roychoudhury A N, Merrett G L. Redox pathways in a petroleum contaminated shallow sandy aquifer: iron and sulfate reductions [J]. Science of the Total Environment, 2006, 366(1): 262-274.

- [15] Krishnakumar B, Majumdar S, Manilal V B, *et al.* Treatment of sulphide containing wastewater with sulphur recovery in a novel reverse fluidized loop reactor (RFLR) [J]. *Water Research*, 2005, **39**(4): 639-647.
- [16] 周敏. 细菌在纸厂废水净化生物硫循环中的作用[J]. *国际造纸*, 2010, **29**(5): 9-14.
- [17] Rueter P, Rabus R, Wilkest H, *et al.* Anaerobic oxidation of hydrocarbons in curde oil by new types of sulphate-reducing bacteria[J]. *Nature*, 1994, **372**(6505): 455-457.
- [18] 向廷生, 万家云, 蔡春芳. 硫酸盐还原菌对原油的降解作用和硫化氢的生成[J]. *天然气地球科学*, 2004, **15**(2): 171-173.
- [19] Ariesyady H, Ito T, Okabe S. Functional bacterial and archaeal community structures of major trophic groups in a full-scale anaerobic sludge digester[J]. *Water Research*, 2007, **41**(7): 1554-1568.
- [20] Boone D R, Bryant M P. Propionate-degrading bacterium, *Syntrophobacter wolini* sp. nov. gen. nov., from methanogenic ecosystems[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1980, **40**(3): 626-632.
- [21] Swithers K S, DiPippo J L, Bruce D C, *et al.* Genome sequence of *Kosmotoga olearia* strain TBF 19.5.1, a thermophilic bacterium with a wide growth temperature range, isolated from the Troll B oil platform in the north sea[J]. *Journal of Bacteriology*, 2011, **193**(19): 5566-5567.
- [22] Dipippo J L, Nesbø C L, Dahle H, *et al.* *Kosmotoga olearia* gen. nov., sp. nov., a thermophilic, anaerobic heterotroph isolated from an oil production fluid[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2009, **59**(12): 2991-3000.
- [23] Haniaa W B, Ghodbanea R, Postec A, *et al.* Cultivation of the first mesophilic representative ("mesotoga") within the order *Thermotogales*[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2011, **34**(8): 581-585.
- [24] Tabatabaei M, Zakaria M R, Rahim R A, *et al.* PCR-based DGGE and FISH analysis of methanogens in an anaerobic closed digester tank for treating palm oil mill effluent (POME) [J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2009, **12**(3): 1-12.
- [25] 郝春博, 王广才, 董健楠, 等. 石油污染地下水中细菌分子生态学研究[J]. *地学前缘*, 2009, **16**(4): 391-400.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xiu, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人