

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性

李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平*

(中国科学院城市环境研究所城市污染物转化重点实验室, 厦门 361021)

摘要: 采用气相色谱法实时监测了厌氧条件下, 以苯甲酸盐为唯一碳源的驯化活性污泥体系对三氯乙烯 (TCE) 的还原脱氯情况; 同时, 结合 454 焦磷酸测序和实时荧光定量 PCR 技术对该体系中的微生物群落结构及脱卤拟球菌 (DHC) 的数量进行分析。结果表明, 该驯化体系在 94 d 内能将 TCE 完全去除, 最终转化产物为一氯乙烯 (VC), 同时伴随大量的甲烷产生; 体系中微生物的多样性很高, 涵盖了 16 个门、33 个纲、52 个目、88 个科和 129 个属, 而且体系中约有 51.2% 的微生物的分类地位尚未明确, 说明体系中还存在很多未知的功能菌; 体系对 TCE 的降解过程其实就是还原脱氯菌与其它功能菌相互作用的结果, 且起主要还原脱氯作用的是携带 *tceA* 功能基因的 DHC。

关键词: 三氯乙烯; 454 焦磷酸测序; 实时荧光定量 PCR; 还原脱氯; 脱卤拟球菌

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3756-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.026

Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures

LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, YU Chang-ping*

(Key Laboratory of Urban Pollutant Conversion, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: Gas chromatography was used to monitor the reductive dechlorination of trichloroethylene (TCE) by anaerobic enrichment cultures with benzoate as the sole carbon source. The 454 pyrosequencing technique was used to investigate the microbial community and the real-time quantitative PCR was used to quantify the gene copies of *Dehalococcoides* spp. (DHC). The results showed that TCE was dechlorinated to vinyl chloride along with the formation of methane in 94 days. The anaerobic enrichment cultures exhibited a high diversity, which were classified into 16 phyla, 33 classes, 52 orders, 88 families and 129 genera, while 51.2% of them belonged to unclassified group, which inferred that there were a large portion of bacteria with unknown functional in this system. Degradation of TCE was accomplished by reductive dechlorinating and other functional populations, and the DHC which carried *tceA* gene could be the dominant reductive dechlorinating populations in the system.

Key words: trichloroethylene; 454 pyrosequencing; real-time quantitative PCR; reductive dechlorinating; *Dehalococcoides* spp.

三氯乙烯 (trichloroethylene, TCE) 作为一种典型的有机氯代溶剂, 已被广泛应用于五金、电子、化工、制革、干洗、医药等多个行业^[1]。然而, 随着三氯乙烯制品的广泛使用、相关废弃物的随意处置及工厂三氯乙烯泄漏事故的发生, 氯乙烯污染地下水的事件时有发生, TCE 目前已成为我国和很多其它国家 (如美国、加拿大、德国、日本和泰国等) 土壤和地下水中最为常见的污染物之一^[2~6]。由于 TCE 具有较高的生物毒性和较强的“致癌、致畸、致突变”效应, 容易通过食物链在生物体内富集, 对人体和动物的肝、肾、心血管和胃肠等器官都有极强的毒害作用^[7~9], 如果 TCE 污染的土壤和地下水没有得到及时的治理, 势必会严重威胁到人类及其它生物的生命安全。

近年来, 由于越来越多的有机和无机污染物进入水体以及这些污染物在水环境中的长期积累和暴露, 水体污染的复合性特征也表现得越来越突

出^[10]。高存荣等对全国 31 个省的 69 个城市地下水有机污染检测结果表明, 除了 TCE 等卤代烃有较高的检出率外, 还同时检测到大量的氯代苯类、单环芳烃及多环芳烃等有毒污染物^[3]。在地下水中, TCE 很少以单独污染的形式出现, 它经常与其它卤代烃及芳香族化合物在一起形成一个复合的污染羽, 这在一定程度上加大了 TCE 污染的治理难度。目前, 纳米铁还原^[11,12]及氧化剂氧化 TCE^[13,14]是研究和应用较多的原位修复技术, 然而这些技术都或多或少地存在作用半径小、会带来二次污染等问题, 再加上地下水和土壤多为密闭的厌氧环境, 这些因素使得越来越多的科学家们将注意力转向了更加

收稿日期: 2014-10-04; 修订日期: 2015-04-30

基金项目: 福建省杰出青年科学基金项目 (2013J06012); 厦门南方海洋研究中心项目 (14GNY022NF22); 中国科学院科技创新“交叉与合作团队”项目

作者简介: 李姜维 (1982~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: jwli@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: cpyu@iue.ac.cn

经济、环保和有效的厌氧生物修复技术。

在厌氧条件下(如图1),TCE作为电子受体,其氯原子逐步被氢原子(电子供体)取代生成1,2-二氯乙烯(1,2-DCE)、VC和乙烯(ETH)。目前已报道的具有这种完全脱氯能力的菌株只有DHC^[15],而DHC只能在特定的碳源和电子供体的情况下才能正常的生长并发挥脱氯功能^[16~18]。为了能更好地提高TCE污染地下水的自我修复能力,人们已经尝试选择一些释氢基质(如甲醇、乙醇、乙酸、丙酸、乳酸、丁酸及苯甲酸等)来代替H₂作为DHC的电子供体^[18,19]。而在这些释氢基质中,苯甲酸又恰好是苯、扁桃酸、甲苯等多种芳香族化合物厌氧降解过程的中间体^[20,21],如果能驯化出一批以苯甲酸为碳源的厌氧还原脱氯体系,则很可能在一定程度上可以解决TCE等卤代烃与苯系化合物的复合污染问题。围绕这个目的,本文结合气相色谱与高通量测序及实时荧光定量PCR技术对苯甲酸盐驯化的三氯乙烯降解体系展开研究,希望从生态学的角度探讨厌氧还原脱氯过程中的协同修复特性,以为有机复合污染环境的生物修复提供理论依据。

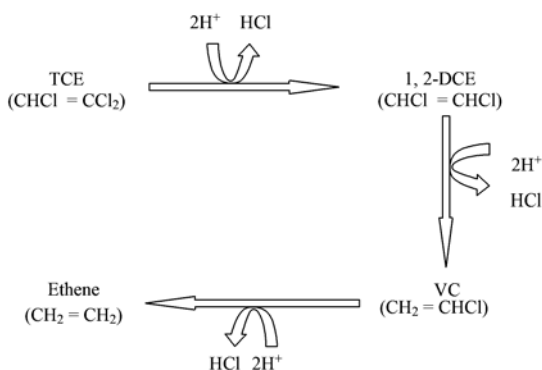


图1 TCE的厌氧还原脱氯原理^[20]

Fig. 1 Reductive dechlorination principle of TCE in the anaerobic condition

1 材料与方法

1.1 样品采集

从厦门一污水处理厂现场用一次性无菌注射器抽取活性污泥并转移至预先灭过菌的血清瓶中,用冰盒保存并带回实验室。

1.2 实验方法

1.2.1 TCE降解菌的富集培养

BAV1培养基(培养基配方参考文献^[22]的方法)如下。

①矿物盐:(g·L⁻¹)50×储液(1 L培养基中加入20 mL);②微量元素溶液(g·L⁻¹)1 000×储液

(1 L培养基中加入1 mL);③Se/Wo solution(g·L⁻¹)1 000×储液(1 L培养基中加入1 mL);④维生素混合溶液(g·L⁻¹)1 000×储液(1 L培养基中加入1 mL);⑤还原缓冲液(g·L⁻¹)(1 L培养基中加入8 mL)。

将上述①、②、③、⑤这4种溶液按所表示比例加入1L培养液中,培养液中事先加入苯甲酸钠并加热至煮沸约15 min后,通入99.99%氮气进行冷却,调节pH值至7.2~7.3,将配制好的完全培养基分装至血清瓶中,盖好铝盖,经高压灭菌后,向瓶中加入④溶液及10 μmol TCE(分析纯)作为电子受体,摇匀,按10%的比例接种活性污泥,于恒温培养箱中倒置培养,定期用气相色谱仪(Agilent 7890)的FID检测器检测培养过程中TCE浓度的变化,选择降解效果最好的驯化体系进行传代培养,直至获得具有稳定降解效果的培养体系。

1.2.2 TCE降解过程的测定

(1)气相色谱仪器配置

仪器:气相色谱仪;进样方式:顶空手动进样;色谱柱:DB-624(60 m×0.32 mm×1.8 μm);检测器:FID检测器;载气:高纯氮(99.999%)。

(2)仪器分析条件

柱温:50℃,进样口温度200℃;检测器(FID)温度:220℃;载气为高纯氮(99.999%);柱流速:6 mL·min⁻¹;分流比:2:1;尾气吹扫流量:50 mL·min⁻¹;空气流量:500 mL·min⁻¹;氢气流量:50 mL·min⁻¹;压力:145.13 kPa;进样体积:100 μL。

(3)驯化体系对TCE降解特性的测定

取上述已经驯化好的具有稳定降解效果的培养体系,按10%的比例平行转接至新鲜培养基中,根据先前驯化体系的降解特性定期检测体系中氯乙烯类物质的浓度,并同时采集该时刻的培养液,冻存于-20℃冰箱中以备下一步实验使用(所有培养体系均设置重复和对照)。

1.2.3 实时荧光定量PCR

(1)引物和探针的设计

引物和探针的设计参照文献^[23]。本实验中主要考察了3种与TCE降解相关的还原脱氯酶编码基因*tceA*、*vcrA*及*bvcA*的数量变化情况。其中,*tceA*基因所编码的还原脱氯酶主要催化TCE到DCE和VC的转化;*vcrA*基因所编码的还原脱氯酶主要催化DCE到VC的转化;而*bvcA*基因所编码的还原脱氯酶主要催化VC到ETH的转化^[23]。

(2) DNA 的提取

由于每个驯化体系的体积(约 40 mL)比较小,且 TCE 的主要降解菌 *Dehalococcoides* spp. 生长非常缓慢,如果取的菌液过多会影响体系的稳定性及降解效率,加之 *Dehalococcoides* spp. 对 O₂ 非常敏感,如果取样过于频繁,很容易给体系造成不可逆的冲击,所以在做荧光定量时,只取初始与终了两个时间点的样品来分析。取样时,用 5 mL 的一次性针管从充分混匀的驯化污泥体系中抽取 4 mL 菌液,用 0.22 μm 的混合纤维素酯微孔滤膜过滤,将膜剪碎后存于 1.5 mL 的无菌 EP 管中,DNA 提取步骤按照 EZNA[®] Soil DNA Kit(Omega Bio-Tek, USA)提示的方法进行操作。

(3) 标准质粒的提取

选用带功能基因的环境样品,通过 PCR 获取目的基因片段,再连接到已知载体质粒 PMD18-T(Takara 公司)上并转化到感受态细胞 DH5α(Takara 公司)中,将携带有功能基因片段的克隆子进行富集培养,按照 EZNA[®] Plasmid Mini Kit II(Omega Bio-Tek, USA)的操作方法提取质粒,并用 Nanodrop 分光光度计(Thermo Fisher 公司)对质粒进行定量并计算其拷贝数,具体步骤参照文献[23]。

(4) PCR 条件及程序

通过预实验对实时荧光定量 PCR 反应体系和扩增条件进行优化,确定最佳体系及条件。

总反应体系为 20 μL: 正、反向引物(10 μmol·L⁻¹) 0.4 μL 和探针 0.8 μL、TaqMan Mix 10 μL、模板 DNA 2 μL、ROX Reference Dye 0.4 μL、Nuclease-Free Water 6 μL。

荧光定量 PCR 扩增条件(采用两步法):

预变性 95℃ 30 s, 1 个循环; 95℃ 5 s, 60℃ 34 s, 40 个循环。

同时以 Nuclease-Free Water 为模板作为阴性对照。

在荧光定量 PCR(ABI 7500, 美国)运行过程中,借助 ABI 公司的 SDS 软件实时观察 PCR 荧光扩增曲线、采集分析数据。

1.2.4 基于 16S rRNA 基因的高通量测序

(1) 测序样品的预处理

提取 TCE 完全降解时培养菌液的 DNA 样品,用细菌 16S rRNA 基因 V1 ~ V3 高可变区 27F/534R^[24]引物对采集样品的 DNA 进行扩增,F 引物 5'端带有 10 bp 序列标签用于样品区分。PCR 反应

程序如下: 94℃ 预变性 5 min; 94℃ 变性 30 s, 55℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 90 s, 共 25 个循环; 最终 72℃ 延伸 7 min。PCR 产物用胶纯化试剂盒(Qiagen 公司)纯化,回收产物浓度用 Qubit dsDNA BR Assay Kit(Life Technologies 公司)进行精确定量。回收产物等量混合后送至深圳华大基因科技公司完成 454(GS-FLX Titanium System)焦磷酸测序,序列数据递交至 NCBI SRA 数据库(序列号: SRX193676)。

(2) 生物信息学分析

454 测序数据用 QIIME 软件进行分析。为保证生物信息学分析质量,本研究对原始数据进行多步质控,包括: ①去除序列长度小于 150 bp 的序列; ②去除含有模糊碱基 N 的序列; ③去除平均测序精确度低于 99.7% 的序列; ④去除 PCR 引物和识别标签中含有模糊碱基的序列; ⑤去除含有超过 6 个连续同聚体(相同碱基)的序列。以 97% 序列相似度划分操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU)。序列用 RDP Classifier 完成种属分类,并应用 CREST 软件完成细菌类群的分类。

2 结果与讨论

2.1 驯化体系对 TCE 的降解

在厌氧条件下,三氯乙烯作为电子受体,其氯原子被氢原子(电子供体)取代,并逐步脱氯生成 1,2-DCE、VC 和 ETH。如图 2 所示,实验组体系中的 TCE(初始量为 10 μmol)在 94 d 内被完全去除;随着 TCE 的降解,VC 逐渐累积,在 TCE 完全降解时达到峰值;1,2-DCE 有两种同分异构体:顺式 1,2-DCE(*cis*-DCE)和反式 1,2-DCE(*trans*-DCE),检测结果显示,在体系培养两周后出现 *cis*-DCE,在第四周时达到峰值(≤1 μmol),随着反应的进行 *cis*-DCE 逐渐消失,反应过程中未发现 *trans*-DCE,这个现象与 Futagami 等^[25]的研究结果较一致;在 TCE 降解过程中有非常少量的 ETH 产生,但在反应终体系中却未检测到 ETH,取而代之的是大量的甲烷(图中未给出)。这个现象说明体系中至少存在两类菌,一类属于 DHC,这类菌在还原脱氯反应中发挥了主要作用;另一类属于产甲烷菌,它们在体系中会与 DHC 争夺电子供体^[19],从而抑制 DHC 的生长并导致 TCE 脱氯不完全。但也有研究报道,在厌氧环境中,产甲烷菌和其它微生物常携带有大量的还原性过渡金属辅助因子(reduced transition-metal cofactors),能通过共代谢作用将 TCE 还原脱氯,但这种共代谢作用会随着逐步脱氯而逐级递减,导致

最终的产物停留在 *cis*-DCE 和 VC^[26]. 体系中的还原脱氯过程究竟是在哪一类菌的作用下完成的呢? 可能还需要通过进一步的实验来证实.

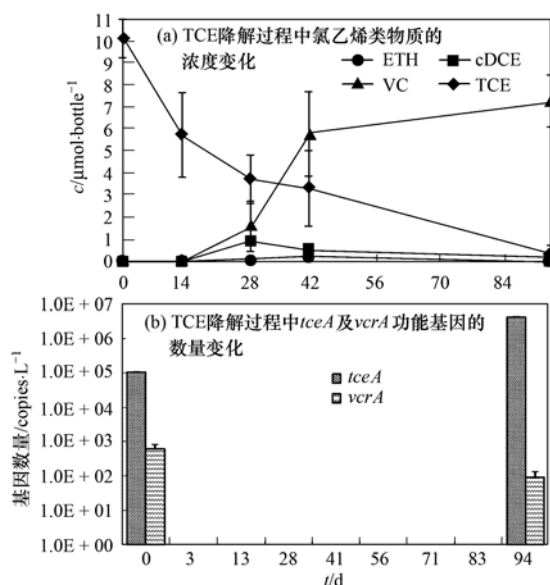


图2 体系中氯乙烯类物质浓度与功能基因 (*tceA* 及 *vcrA*) 数量的关系

Fig. 2 Relation between the concentration of VOCs and copies of functional gene (*tceA* and *vcrA*) in enrichment cultures

DHC 对 TCE 的还原脱氯过程是在位于该类菌细胞膜上的还原脱氯酶的催化作用下完成的^[16], 不同种类的还原脱氯酶所执行的脱氯功能也是不同的, 如 *tceA* 基因所编码的还原脱氯酶 (存在于 *Dehalococcoides* 195 和 FL2 菌株中) 主要催化 TCE 转化为 *cis*-DCE 和 VC; *vcrA* 基因所编码的还原脱氯酶 (存在于 *Dehalococcoides* VS 和 GT 菌株中) 主要催化 *cis*-DCE 到 VC 的转化; 而 *bvcA* 基因所编码的还原脱氯酶 (存在于 *Dehalococcoides* VS 和 GT 菌株中) 主要催化 VC 到 ETH 的转化^[27]. 前期的预实验发现体系中只检测到 *tceA* 和 *vcrA* 两种功能基因, 没有检测到 *bvcA* 基因, 所以后期的实验没有对 *bvcA* 基因进行定量. 从图 2(b) 中可以看出, 随着 TCE 的完全降解, 携带有还原脱氯基因 *tceA* 的功能菌的数目显著增加 (从 1×10^5 $\text{copies} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 4×10^6 $\text{copies} \cdot \text{L}^{-1}$), 而携带有还原脱氯基因 *vcrA* 的功能菌的数目不但没有增加, 反而减少 (从 6×10^2 $\text{copies} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 9×10^1 $\text{copies} \cdot \text{L}^{-1}$), 从而可以推测出该反应体系中发挥还原脱氯作用的主要功能菌为携带 *tceA* 功能基因的 DHC.

2.2 驯化体系的微生物群落结构分析

454 焦磷酸测序共获得 4 195 条原始序列, 经多

步质控后获得 2 133 条高质量序列信息, 经 RDP 分类得到 594 个 OTU. 从图 3 的 RDP 分析结果来看, 这些序列可归入 16 个门, 33 个纲, 52 个目, 88 个科和 129 个属, 随着分类等级的降低, 可归类到确切的纲、目、科、属的序列数比例也在减少, 分别为 94.1%、79.8%、78.3%、67.6% 和 48.8%, 这说明该体系中还有很大一部分微生物的分类地位还不明确, 很可能存在一些未知功能菌.

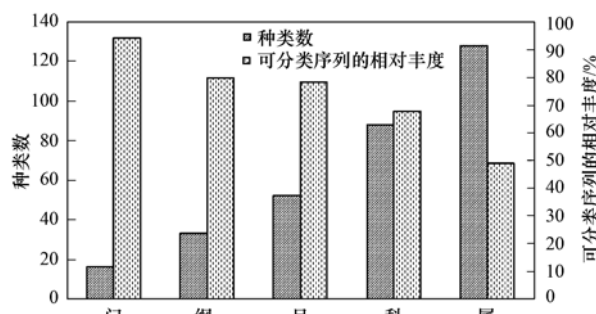


图3 驯化体系中微生物群落的 RDP 分类结果

Fig. 3 RDP classification results of microbial community

在门类划分水平上 (图 4), 体系中占主导地位的门类为 Chloroflexi、Proteobacteria、Bacteroidetes、Firmicutes、Actinobacteria 和细菌域内的未知门, 所占比例分别为 39.0%、19.0%、12.9%、11.0%、7.7% 和 5.7%; 在纲划分水平上, 体系中占主导地位的门类为 Anaerolineae、Bacteroidetes 门类的未知纲、Clostridia、Actinobacteria、Deltaproteobacteria、Gammaproteobacteria、细菌域内的未知纲、Dehalococcoidetes、Caldilineae 及 Betaproteobacteria, 所占比例分别为 29.1%、11.1%、10.2%、7.7%、7.6%、6.2%、5.7%、3.9%、3.5% 和 3.1%; 在目划分水平上, 体系中占主导地位的门类为 Anaerolineales、Bacteroidetes 门类的未知目及 Clostridiales, 所占比例分别为 29.1%、11.1% 和 9.5%; 在科划分水平上, 体系中占主导地位的门类为 Anaerolineaceae、Bacteroidetes 门类的未知科、细菌域内的未知科、Desulfobulbaceae、Dehalococcoides 目类的未知科、Caldilineaceae 及 Moraxellaceae, 所占比例分别为 29.1%、11.1%、5.7%、4.2%、3.9%、3.5% 和 3.5%; 而在属划分水平上, 体系中优势属为 Anaerolineaceae 科内的未知属、Bacteroidetes 门内的未知属、Leptolinea、细菌域内的未知属、Desulfobulbus、Dehalococcoides 目内的未知属、Longilinea、Caldilinea、Acinetobacter 及 Bellilinea, 它们在体系中所占的比例分别为 13.9%、11.1%、8.0%、5.7%、4.2%、3.9%、3.6%、

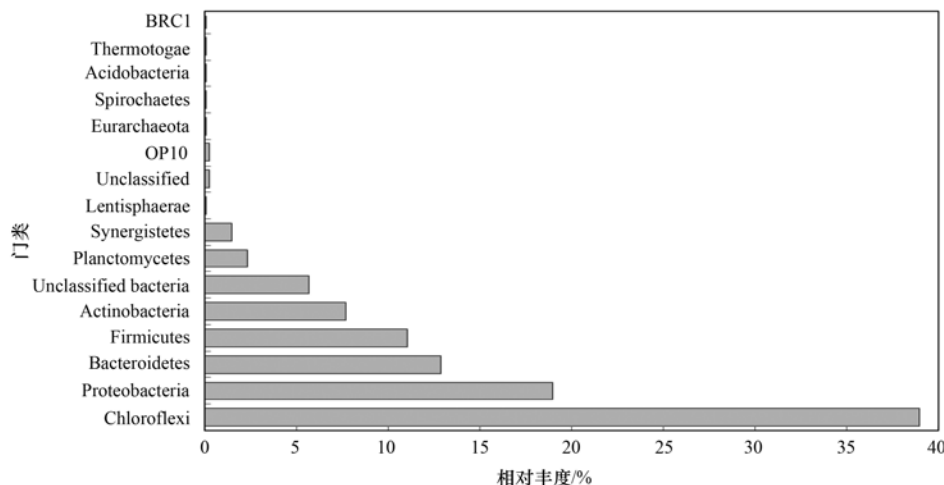


图4 驯化体系中微生物群落的门类结构

Fig. 4 Phylum distribution of microbial community

3.5%、3.5%和3.0%。

为了更好地理解优势菌的系统进化地位,将这些优势菌(百分比 $\geq 1\%$)的代表 OTU 与已报道可培养菌的最相似序列(摘自 <http://www.ezbiocloud.net/eztaxon>)进行比对,并构建系统发育树。从亲缘关系上看(图5),除了部分 OTU (unclassified group 1、group 2 和 group 3)不能比对到相应的种属外,其余大部分 OTU 均能比对到相近的种属;部分 OTU (6145、12124、959、12244 和 1997)与已报道过的还原脱氯功能菌 DHC 的进化地位十分接近,荧光定量 PCR 的结果[图2(b)]也证实了这一类菌的存在,可以判定 DHC 类群菌在体系的还原脱氯作用中发挥了主要的作用;体系中除了 DHC 外,还有一些 OTU (6150、8477 和 2892)与 *Geobacter* 的亲缘关系很近,而这类菌也具有一定的还原脱氯功能^[17,28],但这类菌是否参与了 TCE 的还原脱氯过程,还有待进一步验证;在厌氧降解体系中,属于 δ -Proteobacteria 纲的 *Syntrophus* 和 *Desulfovibrio* 及 Clostridia 纲的 *Syntrophomonas* 和 *Desulfotomaculum* 经常作为初级代谢者为体系中的降解菌提供有效的碳源及电子供体^[29,30],体系中系统进化关系与 *Desulfovibrio* 相近的 OTU (4032、11550 及 8480) 以及与 *Syntrophomonas* 相近的 OTU (13630、5371 及 11484)很可能作为 DHC 的共生菌辅助 DHC 完成还原脱氯作用;已有研究表明,维生素 B₁₂是还原脱氯酶(RDases)的必需辅助因子,然而,由于 DHC 本身缺乏咕啉环(合成维生素 B₁₂的重要前体物)合成途径,只能通过它的共生菌(如 *Pelosinus*、*Dendrosporobacter*、*Sporotalea* 和 *Clostridium*)来提

供^[31,32],体系中与 *Clostridium* 相近的 OTU (13800、450、10836、9319 及 11798)很可能在辅助 DHC 进行还原脱氯作用方面起到了一定的作用;另外,体系中还有一部分 OTU (约占 2.3%)的亲缘关系与 *Thauera* 相接近,据报道,此类菌多参与苯环类化合物的降解过程^[29,30],很可能这类菌与体系中的苯甲酸代谢相关,通过代谢苯甲酸间接为 DHC 提供碳源或电子供体;在比对结果中还发现,有少部分 OTU (约占 1%)与产甲烷古菌 *Methanosaeta* 和 *Methanobacterium* 相似度很高,虽然含量不高,但很可能这类菌在后期的碳源及电子供体竞争中取得优势,从而抑制了 DHC 的完全脱氯作用,导致体系中 VC 和甲烷的大量累积。

TCE 厌氧降解体系中的微生物群落结构是十分复杂的,从体系的代谢及微生物群落结构特征,可以推断出体系中各类菌群之间的大致代谢关系(图6),体系中一些发酵型细菌(如 *Thauera*)能直接利用苯甲酸生成次级代谢产物(如乙酸和 H₂),而这些产物为 DHC 提供了直接碳源或电子供体,辅助它们进行生长代谢;另一类菌(如 *Desulfovibrio*、*Syntrophomonas* 及 *Desulfotomaculum* 等)与 DHC 构成共生关系,它们在进行生长代谢时,能合成还原脱氯作用所需的 V₁₂或电子供体,辅助 DHC 进行脱氯;还有一类菌(如产甲烷菌)与 DHC 构成竞争关系,它们会与 DHC 竞争碳源和电子供体,从而抑制 DHC 的脱氯功能。TCE 的还原脱氯过程其实是还原脱氯菌与其它功能菌共同作用的结果,至于它们之间的共生或竞争机制如何演绎,还需要通过进一步的实验来佐证。

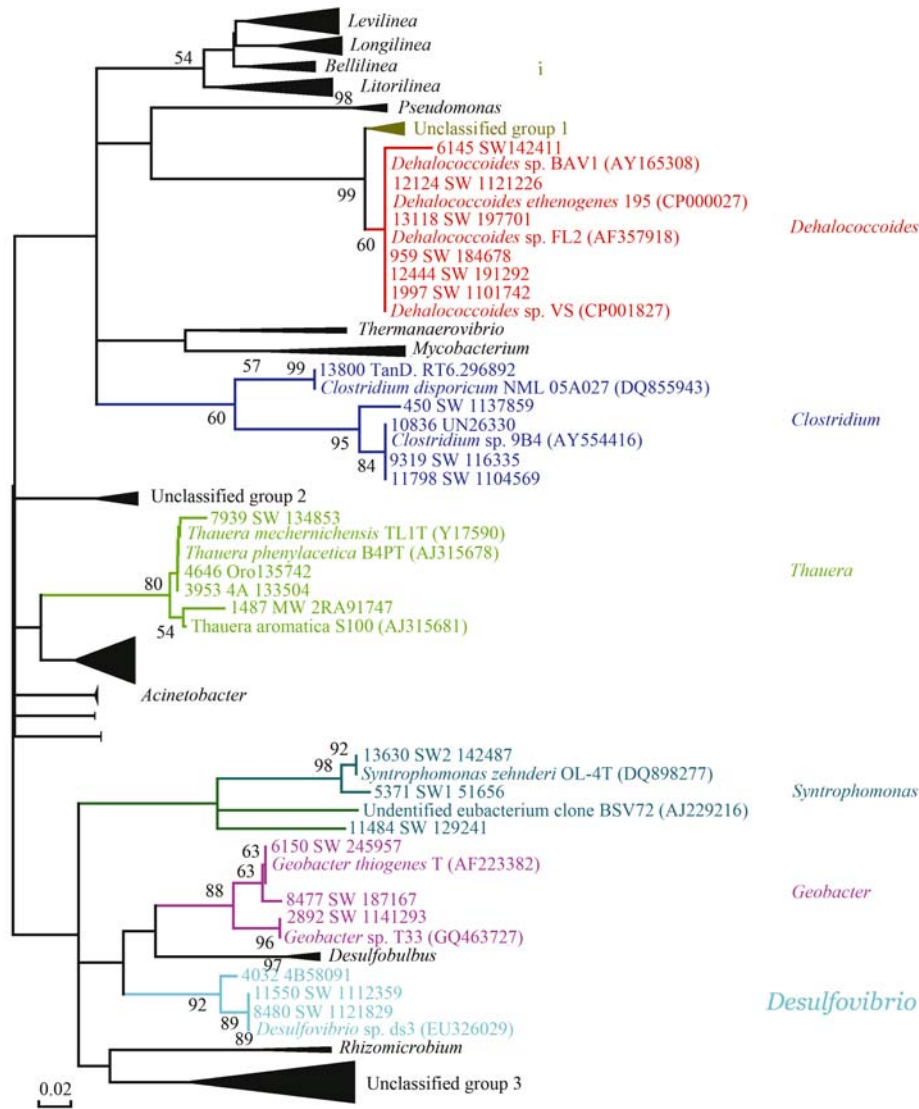


图 5 驯化体系中优势菌属的系统发育树

Fig. 5 Phylogenetic tree of dominant genera in the enrichment cultures

3 结论

(1) 以苯甲酸盐为唯一碳源和电子供体的活性污泥驯化体系能够将 TCE 逐步脱氯还原至 VC, 同时伴有大量的甲烷产生。

(2) 体系中起主要还原脱氯作用的是携带 *tceA* 功能基因的 DHC, 其数量随着 TCE 的降解而不断增加。

(3) 体系中的微生物多样性很高, 涵盖了 16 个门、33 个纲、52 个目、88 个科和 129 个属, 而且随着分类等级的降低, 可归类到确切的纲、目、科、属的序列数比例也在减少, 约有 51.2% 的序列的分类地位尚未明确, 说明体系中存在很多未知的功能菌。

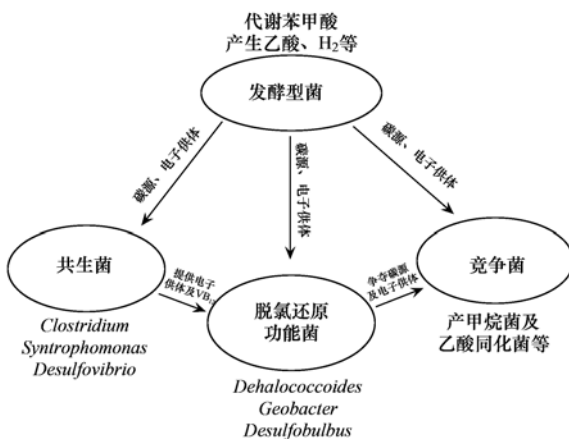


图 6 TCE 降解过程中各菌群的代谢关系 [20, 33 ~ 35]

Fig. 6 Metabolic interactions in the process of TCE-degradation

(4)体系对 TCE 的降解过程是以 DHC 为主导的, 在 *Desulfovibrio*、*Syntrophomonas* 及 *Desulfotomaculum* 等共生菌的辅助下完成的还原脱氯过程。

参考文献:

- [1] 钱翌, 岳飞, 褚衍洋. 三氯乙烯环境污染修复技术研究进展[J]. 环境化学, 2012, **31**(9): 1335-1343.
- [2] Suttinun O, Luepromchai E, Müller R. Cometabolism of trichloroethylene: concepts, limitations and available strategies for sustained biodegradation [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2013, **12**(1): 99-114.
- [3] 高存荣, 王俊桃. 我国 69 个城市地下水有机污染特征研究[J]. 地球学报, 2011, **32**(5): 581-591.
- [4] 孟凡生, 王业耀. 三氯乙烯污染地下水和土壤的修复[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(4): 34-36.
- [5] 俞光明, 刘红樱, 张泰丽, 等. 杭州市浅层地下水有机污染及其风险初步评价[J]. 资源调查与环境, 2007, **28**(3): 198-204.
- [6] 张凤君, 王斯佳, 马慧, 等. 三氯乙烯和四氯乙烯在土壤和地下水中的污染及修复技术[J]. 科技导报, 2012, **30**(18): 65-72.
- [7] Bácsi I, Török T, B-Béres V, et al. Laboratory and microcosm experiments testing the toxicity of chlorinated hydrocarbons on a cyanobacterium strain (*Synechococcus* PCC 6301) and on natural phytoplankton assemblages[J]. Hydrobiologia, 2013, **710**(1): 189-203.
- [8] Fang Z Z, Krausz K W, Tanaka N, et al. Metabolomics reveals trichloroacetate as a major contributor to trichloroethylene-induced metabolic alterations in mouse urine and serum[J]. Archives of Toxicology, 2013, **87**(11): 1975-1987.
- [9] Rusyn I, Chiu W A, Lash L H, et al. Trichloroethylene: Mechanistic, epidemiologic and other supporting evidence of carcinogenic hazard[J]. Pharmacology & Therapeutics, 2014, **141**(1): 55-68.
- [10] 曲久辉. 我国水体复合污染与控制[J]. 科学对社会的影响, 2000, (1): 35-39.
- [11] Elliott D W, Zhang W X. Field assessment of nanoscale bimetallic particles for groundwater treatment[J]. Environmental Science and Technology, 2001, **35**(24): 4922-4926.
- [12] 王薇, 金朝晖, 李铁龙. 包覆型纳米铁的制备及其去除三氯乙烯的研究[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(8): 811-815.
- [13] 刘晓文, 李荣飞, 李霞, 等. 过硫酸钠原位修复三氯乙烯污染土壤的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(11): 2935-2940.
- [14] 吴嘉怡, 蔡信德, 靖元孝, 等. 高锰酸钾氧化去除砂壤土中三氯乙烯的试验研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(5): 810-814.
- [15] Matturro B, Rossetti S. GeneCARD-FISH: detection of *tceA* and *vcrA* reductive dehalogenase genes in *Dehalococcoides mccartyi* by fluorescence *in situ* hybridization[J]. Journal of Microbiological Methods, 2015, **110**: 27-32.
- [16] Brisson V L, West K A, Lee P K, et al. Metagenomic analysis of a stable trichloroethene-degrading microbial community[J]. The ISME Journal, 2012, **6**(9): 1702-1714.
- [17] Pant P, Pant S. A review: Advances in microbial remediation of trichloroethylene (TCE)[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(1): 116-126.
- [18] Schneidewind U, Haest P J, Atashgahi S, et al. Kinetics of dechlorination by *Dehalococcoides mccartyi* using different carbon sources[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2014, **157**: 25-36.
- [19] Löffler F E, Ritalahti K M, Zinder S H. *Dehalococcoides* and reductive dechlorination of chlorinated solvents[A]. In: Stroo H F, Leeson A, Ward C H, (eds.). Bioaugmentation for Groundwater Remediation[M]. New York: Springer, 2013. 39-88.
- [20] Bunge M, Kleikemper J, Miniaci C, et al. Benzoate-driven dehalogenation of chlorinated ethenes in microbial cultures from a contaminated aquifer [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **76**(6): 1447-1456.
- [21] 张晓云, 盖忠辉, 台萃, 等. 微生物降解苯甲酸的研究进展[J]. 微生物学通报, 2012, **39**(12): 1808-1816.
- [22] He J Z, Ritalahti K M, Yang K L, et al. Detoxification of vinyl chloride to ethene coupled to growth of an anaerobic bacterium [J]. Nature, 2003, **424**(6944): 62-65.
- [23] Holmes V F, He J Z, Lee P K H, et al. Discrimination of multiple *Dehalococcoides* strains in a trichloroethene enrichment by quantification of their reductive dehalogenase genes [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, **72**(9): 5877-5883.
- [24] Hu A Y, Yang X Y, Chen N W, et al. Response of bacterial communities to environmental changes in a mesoscale subtropical watershed, Southeast China [J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 746-756.
- [25] Futagami T, Morono Y, Terada T, et al. Dehalogenation activities and distribution of reductive dehalogenase homologous genes in marine subsurface sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, **75**(21): 6905-6909.
- [26] Gantzer C J, Wackett L P. Reductive dechlorination catalyzed by bacterial transition-metal coenzymes[J]. Environmental Science & Technology, 1991, **25**(4): 715-722.
- [27] Doğan-Subaşı E, Bastiaens L, Leys N, et al. Quantitative and functional dynamics of *Dehalococcoides* spp. and its *tceA* and *vcrA* genes under TCE exposure[J]. Biodegradation, 2014, **25**(4): 493-504.
- [28] Maillard J, Charnay M P, Regard C, et al. Reductive dechlorination of tetrachloroethene by a stepwise catalysis of different organohalide respiring bacteria and reductive dehalogenases[J]. Biodegradation, 2011, **22**(5): 949-960.
- [29] Leuthner B, Leutwein C, Schulz H, et al. Biochemical and genetic characterization of benzylsuccinate synthase from *Thauera aromatica*: a new glyceryl radical enzyme catalysing the first step in anaerobic toluene metabolism [J]. Molecular Microbiology,

- 1998, **28**(3): 615-628.
- [30] Mechichi T, Stackebrandt E, Gad'on N, *et al.* Phylogenetic and metabolic diversity of bacteria degrading aromatic compounds under denitrifying conditions, and description of *Thauera phenylacetica* sp. nov., *Thauera aminoaromatica* sp. nov., and *Azoarcus buckelii* sp. nov.[J]. Archives of Microbiology, 2002, **178**(1): 26-35.
- [31] He J Z, Holmes V F, Lee P K H, *et al.* Influence of vitamin B₁₂ and cocultures on the growth of *Dehalococcoides* isolates in defined medium[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(9): 2847-2853.
- [32] Men Y J, Lee P K H, Harding K C, *et al.* Characterization of four TCE-dechlorinating microbial enrichments grown with different cobalamin stress and methanogenic conditions [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97**(14): 6439-6450.
- [33] Morris B E L, Henneberger R, Huber H, *et al.* Microbial syntrophy: interaction for the common good [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2013, **37**(3): 384-406.
- [34] Shukla A K, Upadhyay S N, Dubey S K. Current trends in trichloroethylene biodegradation: a review[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2014, **34**(2): 101-114.
- [35] Watanabe K, Kouzuma A. Syntrophic interactions in biodegradative consortia[A]. In: Nojiri H M, Tsuda M, Fukuda M, *et al* (Eds.). Biodegradative Bacteria[M]. Tokyo: Springer Verlag, 2014. 267-277.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2014年9月26日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续13次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行