

# 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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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, 商细彬, 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影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演 ..... 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孔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)

石家庄市区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<sub>60</sub>凝聚行为的影响 ..... 方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)

钆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迁变规律 ..... 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<sup>2</sup>/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, 吕镗, 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<sub>p</sub>WHLux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)

# 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

(上海师范大学生命与环境科学学院, 环境科学与工程系, 上海 200234)

**摘要:** 厌氧条件下, 以乳酸钠为电子供体, 2,4,6-三氯酚为电子受体对活性污泥进行驯化, 考察了驯化污泥厌氧脱氯的代谢特性. 结果发现, 污泥可对2,4,6-三氯酚进行高效脱氯, 乳酸钠、2,4,6-三氯酚初始浓度为 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $40 \sim 80 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,  $9 \sim 24 \text{ h}$ 内可实现2,4,6-三氯酚100%初始性降解. 中间产物有2,4-二氯酚, 但检出浓度较低( $< 4.22 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 4-氯酚和苯酚为主要产物. 驯化污泥以脱邻位氯(2,4,6-三氯酚, 2,4-二氯酚)降解菌为优势种群, 对4-氯酚和苯酚的进一步转化有限. 厌氧代谢残留物经好氧污泥处理后, 4-氯酚(初始浓度 $33 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )2 h实现100%去除. 驯化污泥可快速将 $\text{Fe}(\text{III})$ 还原为 $\text{Fe}(\text{II})$ , 并具有较强的腐殖质(AQDS)还原能力, 说明驯化污泥中富集了异化铁还原菌. 电子介体[ $\text{Fe}(\text{III})$ 和AQDS]明显地加速了脱氯速率, 在电子介体的介导作用下, 污泥可同步进行胞外呼吸脱氯.

**关键词:** 还原脱氯; 2,4,6-三氯酚; 电子介体

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3764-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.10.027

## 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, GUO Cui-xiang, ZHANG Yong-ming, LI Zu-yuan, WANG Tian-li

(Department of Environmental Science and Engineering, College of Life and Environment Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract:** In anaerobic conditions, the acclimation of activated sludge was studied with sodium lactate as the electron donor and 2,4,6-trichlorophenol as the electron acceptor. Metabolic characteristics of dechlorination were the focus of this study. The result showed highly efficient dechlorination on 2,4,6-trichlorophenol that the conversion rate reached to 100% in 9-24 h when initial concentrations of sodium lactate and 2,4,6-trichlorophenol were  $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $40 \sim 80 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. The intermediate product 2,4-dichlorophenol was found in low concentration ( $< 4.22 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ). And 4-chlorophenol and phenol were the main products. Ortho chlorophenol (2,4,6-trichlorophenol, 2,4-dichlorophenol) can be converted rapidly by acclimated sludge, while the further conversion of 4-chlorophenol and phenol was limited. The residues of anaerobic metabolism were degraded by aerobic sludge, among which 4-chlorophenol (initial concentration of  $33 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) removal rate was up to 100% under aerobic conditions. The acclimated bacteria can rapidly transfer  $\text{Fe}(\text{III})$  and humus (AQDS) into reductive  $\text{Fe}(\text{II})$  and  $\text{AQH}_2\text{DS}$  which indicated that the dissimilatory iron reducing bacteria was enriched in the acclimated sludge. The electron mediator [ $\text{Fe}(\text{III})$  and AQDS] significantly accelerated the dechlorination rate. The acclimated sludge could perform extracellular respiration dechlorination with electron mediators.

**Key words:** reductive dechlorination; 2,4,6-trichlorophenol; electron mediator

2,4,6-三氯苯酚(2,4,6-TCP)作为防腐剂、杀菌剂、防霉剂<sup>[1,2]</sup>广泛应用于各类制造业,导致大面积土壤、地表水、地下水受到了氯代有机物的污染<sup>[3-5]</sup>,在污水厂剩余污泥中亦有发现<sup>[6]</sup>. 因其高毒性,持久性和致癌性,2,4,6-TCP被美国、中国等国家列入优先控制污染物<sup>[7,8]</sup>.

多氯酚很难在好氧条件下降解,而在氧化还原电位低的厌氧环境中,在相应酶的作用下进行厌氧还原脱氯,代谢速率较高<sup>[7]</sup>,且厌氧脱氯的原理与应用对于修复土壤或地下水更具现实意义,受到研究者的重视. 通过富集活性污泥可获得厌氧降解

2,4,6-TCP的混合微生物<sup>[9]</sup>,氯取代基被脱除后,生物毒性大大降低<sup>[10,11]</sup>,再通过好氧处理,可实现彻底矿化. 对于复杂的氯代化合物,其矿化过程具有步骤性,每步生成的产物往往越来越不容易脱氯<sup>[17]</sup>,且脱氯菌与其他厌氧细菌形成复杂的互养关系而受到制约<sup>[18,19]</sup>,相关研究有待进一步深入. 目前

收稿日期: 2015-02-25; 修订日期: 2015-05-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51208302); 教育部博士点新教师基金项目(20123127120008); 上海市教育委员会科研创新项目(12YZ083)

作者简介: 宋佳秀(1979~),女,博士,主要研究方向为废水厌氧生物处理技术, E-mail: songjiaxiu@shnu.edu.cn

已从土壤、地下水中分离鉴定出多种氯酚降解菌<sup>[12-16]</sup>, 这些微生物以有机物作为电子供体, 有机氯代物作为电子受体进行呼吸代谢作用. 其中, *Dehalococcoides ethenogenes*、*Dehalobacter restrictus* 等通过还原脱氯酶进行脱氯呼吸 (chlororespiration), 另外, 异化铁还原菌 (dissimilatory iron reduction bacteria) 的脱氯作用近年来成为研究热点<sup>[13,14]</sup>, 如 *Gobacter*、*Shewanella*、*Desulfitobacterium* 等, 这些微生物可同时进行 Fe(III) 还原与脱氯呼吸. 在不同的微生物及环境条件下, 厌氧脱氯转化过程受到影响, 并显著影响脱氯速率. 因此深入研究 2,4,6-TCP 在厌氧污泥群中的代谢特性和影响因素对于实现 2,4,6-TCP 彻底矿化, 深入还原脱氯机制具有重要的意义.

本研究通过驯化活性污泥富集 2,4,6-TCP 还原脱氯污泥, 探索厌氧条件下驯化污泥对 2,4,6-TCP 还原脱氯途径、代谢特征和影响因素, 探讨相关机制, 以期加速还原脱氯的方法、实现多氯酚的彻底矿化及实际应用提供理论基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 基本营养物

研究中所采用的培养基含有以下物质: ① 主要营养物质 ( $\times 10^{-2} \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ): KCl (0.15),  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (1.36),  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (2.68); ② 微量元素 ( $\times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ):  $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (0.024),  $\text{ZnCl}_2$  (0.075),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (0.019),  $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (0.024),  $\text{Na}_2\text{Mo}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0.024),  $\text{FeCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (1.344),  $\text{MnSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (0.026),  $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (1.556),  $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (2.336),  $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (0.009),  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (3.446); ③ 维生素 ( $\times 10^{-3} \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[20]</sup>: 生物素 (20), 叶酸 (20), 维生素  $\text{B}_6$  (100), 维生素  $\text{B}_1$  (50), 维生素  $\text{B}_{12}$  (1), 对氨基苯甲酸 (50), 泛酸 (50), 维生素  $\text{B}_6$  (100), 硫辛酸 (50); ④ 酵母浸膏: 0.002%. 其余物质根据实验内容另行添加.

### 1.2 污泥驯化

污泥取自上海市长桥污水处理厂二沉池回流污泥, 其中未测得氯酚类物质. 驯化前, 将污泥淘洗 3 次, 接种至可密封厌氧瓶内, 添加 1.1 节所述营养物质. 添加乳酸钠 ( $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )、2,4,6-TCP ( $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 所有物质添加完毕后定容至 1 L, 氮气吹脱 20 min 密封, 置于恒温磁力搅拌器 (IKA RET/RCT Basic, 德国) 上, 内置磁力搅拌子,  $30^\circ\text{C}$  条件培养, 定期更换培养液. 培养液加入前经高纯  $\text{N}_2$  吹脱

20 min, 更换时以  $\text{N}_2$  保护, 维护反应所需的厌氧条件. 定期检测酚类物质浓度变化, 直至驯化完成.

### 1.3 实验方法

间歇实验按照以下步骤进行: ① 配制培养基: 按 1.1 节所述配方以去离子水配制基本营养物培养基, 分装至 100 mL 厌氧瓶内, 高纯氮气吹脱 20 min 密封,  $121^\circ\text{C}$  灭菌后待用. 实验时, 根据实验内容,  $\text{N}_2$  保护下分别添加各类物质: 乳酸钠 ( $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  或  $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 2,4,6-TCP、2,4-二氯苯酚 (2,4-DCP)、4-氯苯酚 (4-CP)、苯酚, 添加浓度为  $40 \sim 80 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 柠檬酸三铁 ( $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$ , 1、5、10  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )、腐殖质模式物蒽醌-2,7-双磺酸钠 (2,7-AQDS, 1、5、10  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 所有实验均为 3 组平行, 结果取平均值, 所有物质添加完毕后接种驯化污泥. ② 污泥接种: 取出适量驯化污泥, 无氧条件下淘洗, 置于混匀器 (GS-10) 上,  $\text{N}_2$  保护条件下利用注射器抽取 10 mL, 接种至 100 mL 厌氧瓶内, 以去离子无氧水定容至 50 mL. ③ 置于恒温培养箱 (HZQ-X160) 内振荡培养, 定时取样检测. ④ 取样:  $\text{N}_2$  保护下, 利用无菌注射器抽取液体样品, 利用微滤膜 ( $0.45 \mu\text{m}$ ) 过滤待测. 以 Agilent 1100 高效液相色谱仪 (波长 282 nm 的紫外荧光器, ZORBAXSB-C18 反相色谱柱) 检测液相 2,4,6-TCP、2,4-DCP、4-CP 和苯酚浓度, 流动相为甲醇水溶液, 体积比为甲醇: 水 (含 1% 醋酸) = 80: 20, 温度为  $25^\circ\text{C}$ , 流速为  $1 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 检出限  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 加标回收率  $>98\%$ . 采用 Cervantes 等<sup>[21]</sup> 描述的方法于 450 nm 波长处用 UNICO 1200 型分光光度计测定其还原态  $\text{AH}_2\text{QDS}$  的吸光度. 采用 ICS-1000 离子色谱测定液相总 Fe(II) 浓度, 样品量 50  $\mu\text{L}$ , 分离柱 IonPac CS5A + CG5A, 流速  $1.2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 柱后与 PAR 反应 (530 nm). 采用 Multi N/C UV HS 型 TOC 仪 (NDIR 检测器) 测定样品中的总有机碳 (TOC), 样品量 500  $\mu\text{L}$ , 检测限  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

### 1.4 主要试剂

蒽醌-2,7-双磺酸钠, 分析纯, 购于东京化成工业株式会社; 2,4,6-三氯苯酚、2,4-二氯苯酚、4-氯苯酚、柠檬酸铁等其他药剂均为分析纯, 购于国药集团化学试剂有限公司; 高纯氮气购于上海南汇化工轻工有限公司.

## 2 结果与讨论

### 2.1 污泥厌氧降解 2,4,6-TCP 特性

驯化初期, 2,4,6-TCP 需 30 d 实现初始性降解,

驯化至 90 d 时, 2, 4, 6-TCP 24 h 内转化率达到 100%, 此时认为污泥驯化完成. 9 个月的实验中, 100% 转化 2, 4, 6-TCP 一般耗时为 9 ~ 24 h. 厌氧条件下, 大多数氯酚都可通过还原脱氯过程逐步脱氯, 降低毒性. 已有研究显示<sup>[22]</sup>, 2, 4, 6-TCP 厌氧脱氯的中间产物可能有 2, 4-DCP、4-氯酚、苯酚, 苯酚开环转化为苯甲酸进而通过厌氧产甲烷作用生成  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ . 本研究中, 产物经 HPLC 检测有 2, 4-DCP、4-CP、苯酚, 有少量  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  产生(未做准确测定), 2, 4, 6-TCP 降解曲线及中间产物变化见图 1. 其中, 初始浓度为  $66 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 2, 4, 6-TCP 24 h 内转化率为 100%. 2, 4-DCP 浓度较低, 多批次的实验中 2, 4-DCP 浓度一般在  $0 \sim 4.22 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 4-CP 会逐渐累积, 少量转化为苯酚. 9 个月多批次实验中, 2, 4, 6-TCP 始终未实现最终性降解, 终产物为 4-CP 和少量苯酚, 这与相关研究相符<sup>[19, 22 ~ 27]</sup>, TOC 在这一过程中降解率较低 ( $< 20\%$ ), 可见, 单独厌氧降解可实现快速脱氯, 但难以实现 2, 4, 6-TCP 及有机物的彻底矿化. 与已有研究相比(见表 1), 驯化污泥具有快速转化 2, 4, 6-TCP 的能力, 这说明

通过本实验的驯化方法可富集大量厌氧脱氯细菌. 厌氧降解残留物主要包含 4-CP、苯酚和有机物, 通过好氧污泥(未驯化)处理后, 残留的 4-CP(反应初始浓度  $33 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 2 h 后无检出, 6 h TOC 去除率  $> 90\%$ , 无酚类物质和苯系物检出. 因此, 加速 2, 4, 6-TCP 的厌氧脱氯是实现其彻底矿化的关键, 深入研究厌氧脱氯的影响因素和相关机制具有重要的意义.

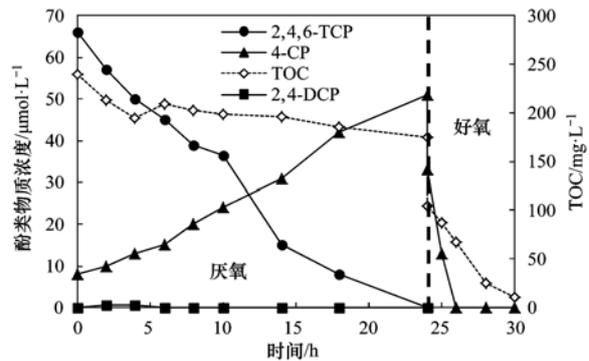


图 1 污泥厌氧/好氧降解 2, 4, 6-三氯酚及中间产物变化  
Fig. 1 Degradation of 2, 4, 6-TCP by anaerobic/aerobic sludge and the change of intermediate products

表 1 驯化的厌氧污泥或富集培养物降解 2, 4, 6-TCP 速率及产物比较

Table 1 Degradation rate and products of 2, 4, 6-trichlorophenol by acclimated sludge and enrichment culture

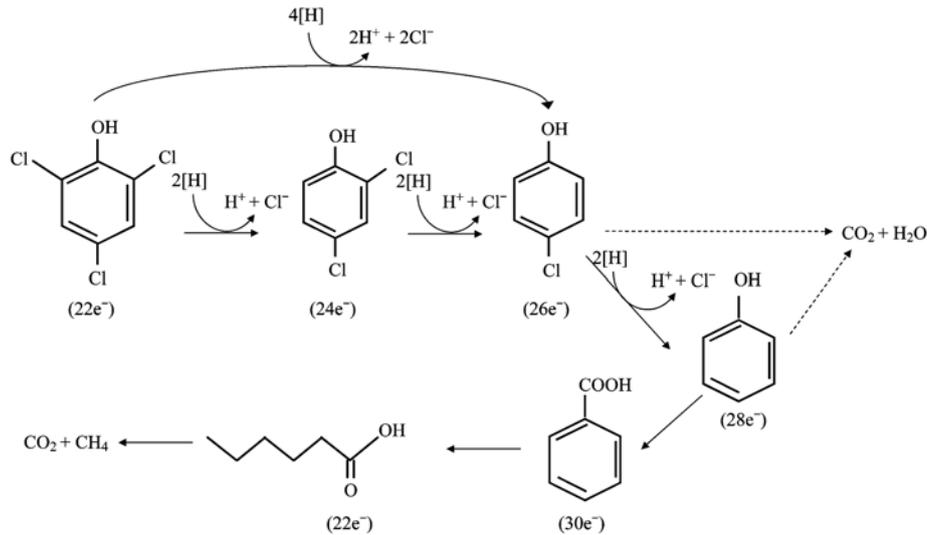
污泥来源	反应类型	TCP 初始浓度 $/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	电子供体/浓度 $/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	降解时间 (降解率)	终产物	文献
厌氧固定床	连续	90	—	100 h	4-CP	[25]
富集培养物	间歇	85	乳酸/10	15 d	2, 4-DCP, 4-CP	[23]
驯化污泥	间歇	25	蔗糖/9 ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	12h	4-CP	[22]
<i>Desulfotobacterium</i> strains 强化的膨胀床颗粒污泥	连续	250 ~ 760	COD/8 ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	25 h (HRT)	4-CP	[26]
驯化颗粒污泥	间歇	152	乳酸/10	144 h (80%)	4-CP、苯酚	[27]
富集培养物 ( <i>Clostridium</i> -like species 为主)	间歇	20	甲酸/—	15 d (77%)	4-CP	[19]
驯化污泥	间歇	40 ~ 80	乳酸/20	9 ~ 24 h	4-CP、苯酚	本研究

1) 此表所摘文献为代表性文献, 并通过重新计算以统一单位; 若非特别说明, 初始性降解率均为 100%; 降解时间或降解速率为获得的最短时间或最高速率, “—”表示文献中未说明

根据 Löffler 等<sup>[28]</sup>的理论, 乳酸钠为氯代有机物提供电子, 通过微生物的呼吸链传递给氯代有机物使其还原脱氯, 这一过程产生的能量被微生物转化为 ATP. 根据空间位阻效应理论, 2, 4, 6-TCP 先是逐个脱去邻位的氯, 然后再脱去对位氯. 而本体系中, 在降解初始 4-CP 浓度即增加, 2, 4-DCP 一直有检出, 但浓度一直很低, 且未发现累积过程, 推断存在 2, 4, 6-TCP 同时脱去两个邻位的氯的途径<sup>[29]</sup>. 同时, 本实验中, 2, 4-DCP 在体系中的出现说明存在 2, 4, 6-TCP 经由 2, 4-DCP 中间体进而脱氯生成 4-CP 这一途径. 上述两种途径可能同时发生, 因此推测转化途径见图 2.

## 2.2 污泥对中间产物的降解

研究中以乳酸钠为电子供体, 接种驯化污泥, 分别添加 2, 4, 6-TCP 及其厌氧降解的中间产物 2, 4-DCP、4-CP 和苯酚及基本营养物质, 于 100 mL 厌氧瓶内进行间歇培养实验(具体方法见 1.3 节), 考察各中间产物的降解特性. 结果发现, 33 h 驯化污泥对含邻位氯氯酚(2, 4, 6-TCP、2, 4-DCP, 初始浓度为  $84.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $45.3 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的初始性降解为 100%, 产物主要为 4-CP(图 3); 对位氯酚(4-CP, 初始浓度为  $45.7 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 降解率为 22%, 产物为少量苯酚; 而苯酚(初始浓度  $68.4 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 基本未降解.



实线箭头: 厌氧途径; 虚线箭头: 好氧途径

图 2 2,4,6-三氯酚厌氧/好氧降解途径及电子数变化

Fig. 2 Possible pathway of anaerobic/aerobic degradation for 2,4,6-trichlorophenol and the change of electron number

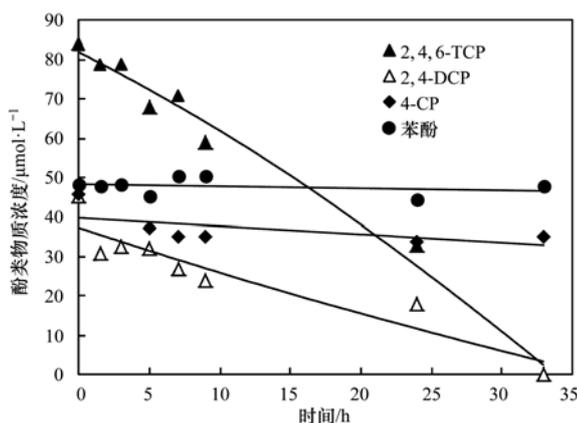


图 3 驯化污泥对中间代谢产物的降解

Fig. 3 Degradation of intermediate products by acclimated sludge

Mohn 等<sup>[30]</sup>发现对位氯在厌氧环境难以脱氯, 4-CP 分子结构的稳定性使得在酶作用下氯原子难以被亲核取代. 当邻位和对位或间位共存时, 邻位优先脱氯, 因为该路径具有较小的氧化还原电势. 本研究中仅添加 4-CP, 无竞争存在, 电子供体充足, 无产物抑制, 说明驯化污泥的对位氯降解功能有限, 具有明显的底物专一性. Li 等<sup>[23]</sup>的研究显示, 一些脱氯菌的种属对含对位氯的氯酚的降解止步于 4-CP. 根据不同氯取代位置, 厌氧脱氯一般需要不同的菌群或催化酶. Kim 等<sup>[31]</sup>发现, 降解 2,4,6-TCP 的 *Pseudomonas solanacearum* TCP114 和降解 4-CP 的 *Pseudomonas testosteroni* CPW301 不仅有严格的底物专一性, 且 2,4,6-TCP 对 4-CP 降解菌产生毒性, 两类细菌难以共存. 因此, 本研究的驯化污泥以脱邻位氯降解菌为优势, 尽管驯化过程 4-CP 一直存

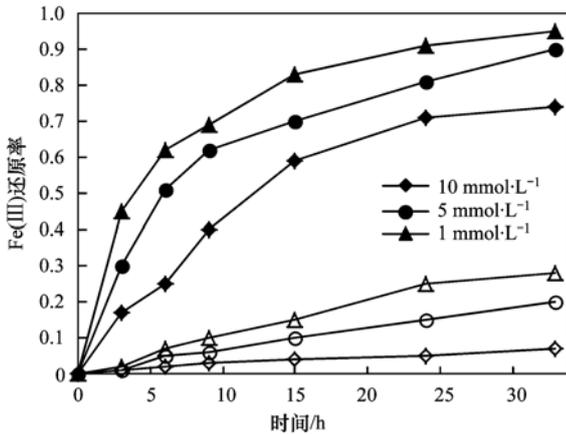
在, 但未富集出降解 4-CP 的优势种群. 苯酚在本体系几乎不降解, 分析也是上述原因. 这一结果有重要的意义, 在 2,4,6-TCP 的厌氧降解中, 4-CP 和苯酚的最终性转化成为限制步骤. 因此, 探明 2,4,6-TCP 和 4-CP 降解菌的生态关系、强化微生物脱对位氯功能, 是今后的研究重点.

### 2.3 电子介体影响

在已分离出的厌氧脱氯菌中发现<sup>[13,16,33]</sup>很多种属 (*Clostridium beijerinckii* Z1-9、*Desulfuromonas chlorethetica*、*Geobacter Sulfurreducens*、*Klebsiella pneumoniae* strain L17、*Anaeromyxobacter dehalogenans* strain 2CP-C) 被证实在脱氯呼吸时伴随三价铁[Fe(III)]的还原, 一些电子介体显著影响脱氯代谢<sup>[29]</sup>. 这类微生物分布广泛, 在不同的科、属中均有发现, 是生态环境中重要的微生物群体. 其功能多样, 除 Fe(III), 可将电子传递给不同的电子受体(如腐殖质). 研究中采用间歇实验, 以乳酸钠为电子供体, 以 Fe(III) (柠檬酸三铁) 和腐殖质模式物蒽醌-2,7-双磺酸钠(2,7-AQDS) 作为电子介体考察二者对驯化污泥降解 2,4,6-TCP 的影响(具体方法见 1.3 节), 另分别以 Fe(III) 和 AQDS 为唯一电子受体考察未经驯化的污泥和驯化污泥对二者的还原能力, 结果如下.

#### 2.3.1 Fe(III)

由图 4 可见, 同对照组(未经驯化的接种污泥)相比, 驯化的污泥可快速将 Fe(III) 还原为 Fe(II), 这说明污泥富集了一定数量的铁还原菌. 由图 5 可



空心图例表示相应的对照组

图4 驯化污泥还原Fe(III)

Fig. 4 Reductive of Fe(III) by acclimated sludge

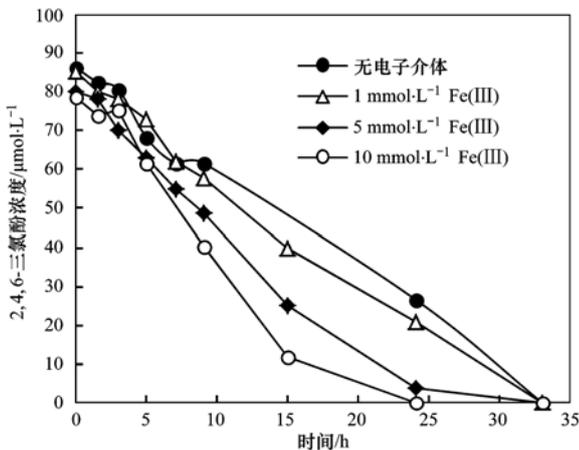


图5 Fe(III)对驯化污泥降解2,4,6-三氯酚影响

Fig. 5 Effects of Fe(III) on 2,4,6-trichlorophenol degradation by acclimated sludge

见,随Fe(III)浓度的增加,2,4,6-TCP的降解速率逐渐加快,Fe(III)浓度为1 mmol时即可明显强化2,4,6-TCP的降解,浓度为10 mmol·L<sup>-1</sup>时,24 h实现100%转化,与对照样相比缩短了9 h。Fe(III)一方面可作为酶的激活剂促进代谢速率,另一方面可在一些微生物的作用下,作为呼吸链的电子受体接受降解有机物释放的电子<sup>[32]</sup>,再将电子传递给氯酚,加速脱氯过程中的电子传递。铁元素并未被微生物同化,这一过程发生在细胞外,因此其机制与“脱氯呼吸”不同,这种代谢方式又称“胞外呼吸”。能够进行上述方式进行呼吸代谢的微生物称异化铁还原菌。驯化污泥不仅可以还原脱氯,还具有还原Fe(III)的功能,且Fe(III)的存在强化了系统的脱氯,因此驯化污泥中应富集了异化铁还原菌的相关种属。当含氯有机物存在时,Fe(III)起到电子转运

的功能。而提高Fe(III)的电子转运效率是强化还原脱氯的关键之一,因此深入研究异化铁还原菌及在污泥中的地位、功能对强化还原脱氯有重要的意义。

### 2.3.2 AQDS

由图6可见,乳酸钠为电子供体AQDS为唯一电子受体时,驯化污泥可快速将AQDS还原为AH<sub>2</sub>QDS,24 h的还原率均可达到80%以上,而未经驯化的污泥AQDS还原能力有限,还原率均不到30%。这进一步说明污泥中富集了一定数量的异化铁还原微生物,并通过胞外电子传递的方式,以乳酸钠为电子供体将电子传递给氧化态的AQDS,生成还原态的AH<sub>2</sub>QDS。完成电子传递的是AQDS分子内的醌基,醌基接受氢后转化为氢醌,因此这一过程又称醌呼吸,醌呼吸是异化铁还原菌代谢特性之一。而同时添加AQDS和2,4,6-TCP时发现,AQDS明显加快了2,4,6-TCP的脱氯,24 h降解率为90.4%,而对对照样为69.1%,见图7(10 mmol·L<sup>-1</sup>、5 mmol·L<sup>-1</sup> 2,7-AQDS对HPCL出峰有干扰,数据未列出)。AQDS不仅可在厌氧环境中充当有机物矿化的电子受体,而且可在异化铁还原菌和可还原态物质(重金属、有机污染物、染料等)之间充当电子穿梭体,促进这些物质的还原<sup>[33,34]</sup>。本研究进一步证明,AQDS可强化2,4,6-TCP还原脱氯,其原理可能是AQDS的介导作用加速了电子在微生物和有机氯之间的传递,目前尚无明确的结论,需进一步研究。

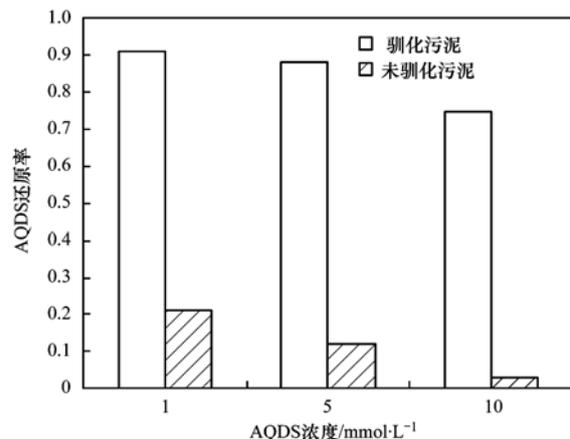


图6 驯化污泥还原转化AQDS

Fig. 6 Reductive of AQDS by acclimated sludge

驯化污泥可在不同的条件下由不同的脱氯机制主导,其中,一些微生物通过还原脱氯酶进行脱氯呼吸作用;异化铁还原菌在无电子供体时,进行直接脱氯作用。当有电子供体时,则通过电子介体的介

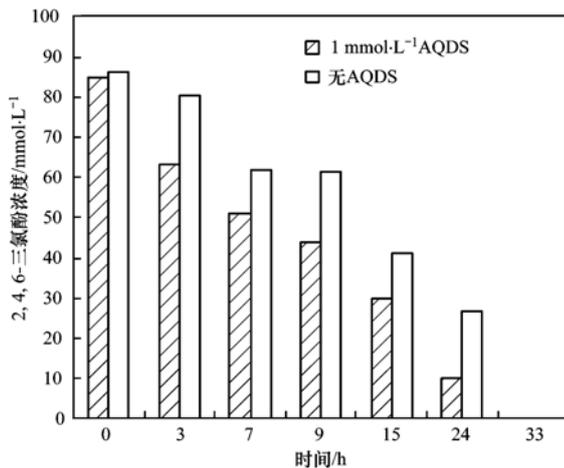


图7 AQDS对驯化污泥降解2,4,6-三氯酚影响

Fig. 7 Effects of AQDS on 2,4,6-trichlorophenol degradation by acclimated sludge

导作用,实现有机氯的还原. 电子介体为Fe(III)时,部分微生物则同步进行异化铁还原脱氯,为AQDS时,则进行醌呼吸脱氯,其本质均为胞外呼吸电子传递的代谢作用,且脱氯作用在电子介体的作用下得到强化,其电子传递途径为:有机物→异化铁还原菌→电子介体→有机氯,污泥的脱氯途径见图8.因此,深入研究微生物之间相互联系、相互促进及介导机制等是今后亟待解决的问题.

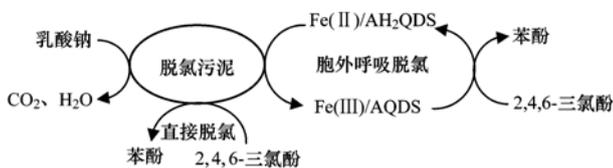


图8 驯化污泥还原脱氯途径

Fig. 8 Pathway of reductive dechlorination by acclimated sludge

### 3 结论

(1) 厌氧条件下,以乳酸钠为电子供体,2,4,6-TCP为电子受体驯化活性污泥,可实现2,4,6-TCP快速初始性降解,9~24 h内40~80  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  TCP可100%转化,中间产物有2,4-DCP,终产物主要为4-CP及苯酚.

(2) 驯化污泥以脱邻位氯降解菌为优势种群,可同时脱除2,4,6-TCP和2,4-DCP的邻位氯,单独降解4-CP和苯酚时,代谢速率慢,转化率低,具有明显的底物专一性.

(3) 驯化污泥降解2,4,6-TCP残留物经好氧污泥处理可实现快速彻底矿化,好氧条件下,残留的4-CP( $33\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )2 h实现100%去除.

(4) 驯化污泥可将Fe(III)还原为Fe(II),并具有较强的腐殖质(AQDS)还原能力,说明驯化污泥富集了异化铁还原菌.

(5) 电子介体Fe(III)和AQDS可强化2,4,6-TCP转化速率,在电子介体的介导作用下,厌氧污泥可同时进行胞外呼吸实现脱氯.

#### 参考文献:

- [1] Han J, Deming R L, Tao F M. Theoretical study of molecular structures and properties of the complete series of chlorophenols [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 2004, **108** (38): 7736-7743.
- [2] Furukawa K. Oxygenases and dehalogenases: molecular approaches to efficient degradation of chlorinated environmental pollutants [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2006, **70**(10): 2335-2348.
- [3] Samanta S K, Singh O V, Jain R K. Polycyclic aromatic hydrocarbons: environmental pollution and bioremediation [J]. *Trends in Biotechnology*, 2002, **20**(6): 243-248.
- [4] Zhang C L, Bennett G N. Biodegradation of xenobiotics by anaerobic bacteria [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, **67**(5): 600-618.
- [5] Geng A L, En Wei Soh A, Lim C J, et al. Isolation and characterization of a phenol-degrading bacterium from an industrial activated sludge [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **71**(5): 728-735.
- [6] Xun L Y, Webster C M. A monooxygenase catalyzes sequential dechlorinations of 2, 4, 6-trichlorophenol by oxidative and hydrolytic reactions [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2004, **279**(8): 6696-6700.
- [7] Olaniran A O, Igbino E O. Chlorophenols and other related derivatives of environmental concern: properties, distribution and microbial degradation processes [J]. *Chemosphere*, 2011, **83** (10): 1297-1306.
- [8] 史雅娟, 吕永龙, 任鸿昌, 等. 持久性有机污染物研究的国际发展动态 [J]. *世界科技研究与发展*, 2003, **25**(2): 73-78.
- [9] Smidt H, De Vos W M. Anaerobic microbial dehalogenation [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2004, **58**, 43-73.
- [10] Chang B V, Chen K S, Yuan S Y. Dechlorination of 2, 4, 6-TCP by an anaerobic mixed culture [J]. *Chemosphere*, 1995, **31** (8): 3803-3811.
- [11] Breitenstein A, Andreesen J R, Lechner U. Analysis of an anaerobic chemostat population stably dechlorinating 2, 4, 6-trichlorophenol [J]. *Engineering in Life Sciences*, 2007, **7**(4): 380-387.
- [12] Adrian L, Dudková V, Demnerová K, et al. "Dehalococcoides" sp. strain CBDB1 extensively dechlorinates the commercial polychlorinated biphenyl mixture Aroclor 1260 [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, **75**(13): 4516-4524.
- [13] Li X M, Zhou S G, Li F B, et al. Fe(III) oxide reduction and carbon tetrachloride dechlorination by a newly isolated *Klebsiella*

- pneumoniae* strain L17 [J]. Journal of Applied Microbiology, 2009, **106**(1): 130-139.
- [14] Jung B, Shin J W, Ghorpade P A, *et al.* Dechlorination of liquid wastes containing chlorinated hydrocarbons by a binder mixture of cement and slag with Fe(II) [J]. Science of the Total Environment, 2013, **449**: 443-450.
- [15] Lu G N, Tao X Q, Huang W L, *et al.* Dechlorination pathways of diverse chlorinated aromatic pollutants conducted by *Dehalococcoides* sp. strain CBDB1 [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(12): 2549-2554.
- [16] Villemur R, Lanthier M, Beaudet R, *et al.* The *Desulfitobacterium* genus [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2006, **30**(5): 706-733.
- [17] Saito H, Sudo M, Shigeoka T, *et al.* In vitro cytotoxicity of chlorophenols to goldfish GF-scale (GSF) cells and quantitative structure-activity relationships[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1991, **10**(2): 235-241.
- [18] Zhang H S, Ziv-El M, Rittmann B E, *et al.* Effect of dechlorination and sulfate reduction on the microbial community structure in denitrifying membrane-biofilm reactors [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(13): 5159-5164.
- [19] Zhang C F, Suzuki D, Li Z L, *et al.* Polyphasic characterization of two microbial consortia with wide dechlorination spectra for chlorophenols [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, **114**(5): 512-517.
- [20] Balch W E, Fox G E, Magrum L J, *et al.* Methanogens: Reevaluation of a unique biological group [J]. Microbiological Reviews, 1979, **43**(2): 260-296.
- [21] Cervantes F J, Van der Velde S, Lettinga G, *et al.* Quinones as terminal electron acceptors for anaerobic microbial oxidation of phenolic compounds [J]. Biodegradation, 2000, **11**(5): 313-321.
- [22] Mum C H, Ng W J, He J Z. Acidogenic sequencing batch reactor start-up procedures for induction of 2, 4, 6-trichlorophenol dechlorination [J]. Water Research, 2008, **42**(6-7): 1675-1683.
- [23] Li Z L, Suzuki D, Zhang C F, *et al.* Involvement of *Dehalobacter* strains in the anaerobic dechlorination of 2, 4, 6-trichlorophenol [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2013, **116**(5): 602-609.
- [24] Yoshida N, Yoshida Y, Handa Y, *et al.* Polyphasic characterization of a PCP-to-phenol dechlorinating microbial community enriched from paddy soil [J]. Science of the Total Environment, 2007, **381**(1-3): 233-242.
- [25] Armenante P M, Kafkewitz D, Lewandowski G A, *et al.* Anaerobic-aerobic treatment of halogenated phenolic compounds [J]. Water Research, 1999, **33**(3): 681-692.
- [26] Puyol D, Mohedano A F, Rodriguez J J, *et al.* Effect of 2, 4, 6-trichlorophenol on the microbial activity of adapted anaerobic granular sludge bioaugmented with *Desulfitobacterium* strains [J]. New Biotechnology, 2011, **29**(1): 78-89.
- [27] 万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 等. 不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 [J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1808-1814.
- [28] Löffler F E, Tiedje J M, Sanford R A. Fraction of electrons consumed in electron acceptor reduction and hydrogen thresholds as indicators of halo-respiratory physiology [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(9): 4049-4056.
- [29] Aulenta F, Pera A, Rossetti S, *et al.* Relevance of side reactions in anaerobic reductive dechlorination microcosms amended with different electron donors [J]. Water Research, 2007, **41**(1): 27-38.
- [30] Mohn W W, Tiedje J M. Microbial reductive dehalogenation [J]. Microbiological Reviews, 1992, **56**(3): 482-507.
- [31] Kim J H, Oh K K, Lee S T, *et al.* Biodegradation of phenol and chlorophenols with defined mixed culture in shake-flasks and a packed bed reactor [J]. Process Biochemistry, 2002, **37**(12): 1367-1373.
- [32] Aeschbacher M, Sander M, Schwarzenbach R P. Novel electrochemical approach to assess the redox properties of humic substances [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(1): 87-93.
- [33] Xu Y, He Y, Feng X L, *et al.* Enhanced abiotic and biotic contributions to dechlorination of pentachlorophenol during Fe(III) reduction by an iron-reducing bacterium *Clostridium beijerinckii* Z [J]. Science of the Total Environment, 2014, **473-474**: 215-223.
- [34] Sachs S, Bernhard G. Humic acid model substances with pronounced redox functionality for the study of environmentally relevant interaction processes of metal ions in the presence of humic acid [J]. Geoderma, 2011, **162**(1-2): 132-140.

## 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>60</sub> 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 <sup>2</sup> /O- <i>MBR</i> 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 <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -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 ADP1_pWHlux 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. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人