

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明 (1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水平 (8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思 (15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳 (21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远 (27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋 (34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨 (39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋 (45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇 (51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙 (61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁 (69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍 (77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军 (84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元 (91)
湘江沉积物铜和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山 (98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男 (108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟 (116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强 (121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军 (129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新 (137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦 (145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民 (150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳 (156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐 (163)
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直 (169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺 (177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴 (182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓 (188)
污水厂微曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇 (194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根 (198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文 (204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢 (209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立楠,何宝燕,李跃鹏 (217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳 (226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南 (231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛 (237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福 (244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	于志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏 (251)
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾 (257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远 (263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文 (271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林 (277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国 (283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博 (288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇 (293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,贾玉娟 (302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₂ O ₃ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少峰,黄永锋 (308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲 (315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎 (321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志 (328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易 (336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强 (347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文	
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛 (357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正 (364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强 (373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维 (379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新 (385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌 (395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌 (401)
《环境科学》征订启事 (26)	《环境科学》征稿简则 (68)
信息 (76,144,301,400)	专辑征稿通知 (394)

基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究

曾宪委, 刘建国*, 聂小琴

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 利用 Ag、Pb 和 Cu 作为催化金属与微米级铁粉制成不同的双金属体系还原脱氯六氯苯(hexachlorobenzene, HCB), 探讨不同催化金属种类、不同双金属添加量以及不同离子强度 3 种因素对 HCB 脱氯效率的影响, 并剖析双金属催化条件下 HCB 的脱氯规律。结果表明, 微米级铁粉对 HCB 几乎无还原脱氯效果, 添加 Ag、Pb 和 Cu 对 HCB 均具有良好的催化脱氯能力, 当 Ag/Fe、Pb/Fe 和 Cu/Fe 的最佳比例分别为 0.2%、0.5% 和 1% 时, 反应 2 h 后 HCB 的脱氯率分别达到 93.5%、88.5% 和 49.6%; 同时, 由于催化金属均匀附着在零价铁表面可以形成更多的微型原电池, 故增加双金属投加量可有效提高 HCB 脱氯速率, 0.1 g Pb/Fe 对 HCB 脱氯率为 38.3%, 而 0.8 g Pb/Fe 对 HCB 脱氯率可达到 88.6%; 另外, 离子强度增大对 HCB 的脱氯也有一定促进作用, 在 Na_2SO_4 浓度分别为 0、0.05 和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 3 个反应器中, 反应 2 h 后 HCB 脱氯率分别达到 93.5%、98.0% 和 98.9%。

关键词: 六氯苯; 零价铁; 催化金属; 双金属; 还原脱氯

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0182-06

Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron

ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the reducing capacity of zero valent iron, the study investigated the behavior of dechlorination of hexachlorobenzene by bimetals synthesized using Fe with Ag, Pb or Cu as catalysts, respectively. The results showed that bimetals could dechlorinate HCB faster than Fe(0) did, the optimal ratios of Ag/Fe, Pb/Fe and Cu/Fe were 0.2%, 0.5% and 1%. After reacting 2 hours, the dechlorination rates of HCB by Ag/Fe, Pb/Fe and Cu/Fe were 93.5%, 88.5% and 49.6% respectively. The catalyst metal distribution had a great effect on the reductive dechlorination capacity of the bimetal systems, due to more galvanic cells produced by well-distributed catalyst metal and iron. Increasing the amount of bimetal was an effective way to promote HCB dechlorination rate, 88.6% HCB was degraded in 2 h by 0.8 g Pb/Fe while only 38.3% HCB was degraded by 0.1 g Pb/Fe. Besides, HCB dechlorination could be enhanced a little with increasing ionic strength, the HCB dechlorination rates were 93.5%, 98.0% and 98.9% respectively with Na_2SO_4 concentration at 0, 0.05 and $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Key words: hexachlorobenzene (HCB); iron; catalyst metal; bimetal; dechlorination

六氯苯在 2001 年签订的《斯德哥尔摩公约》中
被列为首批需要采取国际行动的 12 种持久性有机
污染物之一, 为剧毒化合物。六氯苯碳环上的六个氢
均被氯原子取代, 化学结构比较稳定, 在自然环境下
对生物脱氯、光脱氯和化学分解等都具有很强的抵
抗能力。HCB 排放到环境中很难被分解, 可在环境
中存留数年到数十年, 生物富集因子很高, 对人类健
康和环境安全具有很大威胁, 现已知 HCB 对人体器
官具有致病风险^[1,2]。

许多学者使用还原能力较好的金属脱氯氯代有
机物, 研究发现 Mg、Al、Zn、Fe、Sn 等零价金属可以
使氯代有机物发生脱氯反应, 基于这些金属的还原
能力, 添加具有较高电极电势的金属 Pd、Pt、Au、Ag、
Ni、Cu、Pb 等可以显著提高其对氯代有机物的脱氯
速率^[3~14]。零价铁来源广泛, 价格低廉, 具有较强的
还原能力, 文献^[15~19]已发现, 零价铁能有效脱

氯一些短链脂肪烃的氯代有机物, 如四氯化碳、三氯
乙烯和四氯乙烯等。为快速处理污染物, Muftikian
等^[20]在零价铁表面添加 Pd 制成 Pd/Fe, 可将 TCE
和 PCE 在几分钟内被还原成无毒的乙烷。零价铁和
基于铁的双金属体系也被用来处理氯酚类^[21~23]和
氯苯类^[24~26]污染物, 对污染物均具有脱氯能力。由
于纳米级铁粉具有更高的脱氯能力^[11], Xu 等^[24]、
Shih 等^[25]和 Zhu 等^[26]分别用纳米 Ag/Fe、纳米 Pd/
Fe 和纳米 Cu/Fe 作为还原剂, 在常温下研究 HCB
的脱氯过程, 发现 HCB 脱氯缓慢, 反应数天后仍有
较多 HCB 剩余。相对于微米级或更大粒径铁粉, 纳
米铁具有更高的还原脱氯能力, 此前的研究者多采

收稿日期: 2012-03-24; 修订日期: 2012-04-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA064001)

作者简介: 曾宪委(1986~), 男, 硕士, 主要研究方向为固体废物资
源化, E-mail: zengxianweioo@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jgliu@tsinghua.edu.cn

用纳米级双金属作为还原剂,分析对不同氯代有机物的处理效果,并对影响因素和脱氯机制进行探究.

本研究以 HCB 为目标污染物,选用微米级铁粉制备 Ag/Fe、Pb/Fe 和 Cu/Fe 这 3 种双金属体系,在 50℃ 条件下脱氯 HCB,探讨在不同催化金属种类、不同双金属添加量以及不同离子强度 3 种因素对 HCB 脱氯效率的影响,并剖析双金属催化条件下 HCB 的脱氯规律,以期对含氯代有机物的液态或固态危险废物的安全处置、含较高浓度氯代有机物污染土壤的处理处置等工程应用提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验材料

六氯苯,标准品;正己烷,色谱纯;浓盐酸、氢氧化钠、乙醇、300 目铁粉、硝酸银、二合水氯化铜、氯化铅、乙醚、无水硫酸钠均为分析纯;高纯氮气.水浴摇床,摇床,气相色谱仪(Agilent 6890N GC),天平,手套箱,扫描式电子显微镜(FE-SEM, USA, Quanta 200FEG).

1.2 实验准备

用天平称取 HCB 50 mg 溶于 500 mL 乙醚中,装入密闭棕色瓶中待用;称取 AgNO_3 3.77 g、 PbCl_2 3.1 g、 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 3.8 g 分别溶于 1 000 mL 去离子水中,作为制备双金属的置换液;称取 72 g Na_2SO_4 溶于 1 000 mL 去离子水中,作为调节离子强度溶液.

1.3 双金属制备

Ag/Fe 制备:取 4 组 5 g 铁粉用 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸清洗,再用去离子水冲洗,分别加入 100、40、20、8 和 4 mL 硝酸银储备液和 100、160、180、192 和 196 mL 去离子水,摇晃均匀后放置 1 h,倒出上清液,用乙醇溶液清洗两次,再氮气吹干,得到不同比例的 Ag/Fe. Pb/Fe 制备:取 4 组 5 g 铁粉用 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸清洗,再用去离子水冲洗,分别加入 200、80、40 和 8 mL PbCl_2 储备液和 0、120、160 和 192 mL 去离子水,摇晃均匀后放置 1 h,倒出上清液,用乙醇溶液清洗两次,再氮气吹干,得到不同比例的 Pb/Fe. Cu/Fe 制备:取 4 组 5 g 铁粉用 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸清洗,再用去离子水冲洗,分别加入 40、20、8、4 和 2 mL CuCl_2 储备液和 160、180、192、196 和 198 mL 去离子水,摇晃均匀后放置 1 h,倒出上清液,用乙醇溶液清洗两次,再氮气吹干,得到不同比例的 Cu/Fe.

以上实验在充满氮气的手套箱中操作,避免氧

气氧化.制备好的双金属粉末用扫描电镜分析微观形貌.

1.4 不同双金属体系影响实验

在充满氮气的手套箱中,称取 0.5 g Ag/Fe、Pb/Fe 和 Cu/Fe 分别放入 40 mL 顶空玻璃瓶中(带硅胶/聚四氟乙烯垫片和螺口盖),添加 10 mL 去离子水和 0.3 mL HCB 储备液,每个样品做 2 个平行样.然后将顶空玻璃瓶取出放入 50℃ 水浴振荡器中反应,反应 2 h 后取出玻璃瓶待分析.

1.5 双金属体系表面积影响实验

根据 1.3 节方法,选用粒径为 300 目的零价铁制备 Pb/Fe 比例为 0.5% 的双金属体系,在充满氮气的手套箱中,取 0.1、0.2、0.5 和 0.8 g Pb/Fe 分别加入 40 mL 顶空玻璃瓶中,并加入 10 mL 去离子水和 0.3 mL HCB 储备液,每个样品做 2 个平行样.放入 50℃ 水浴振荡器反应 2 h 取出玻璃瓶待分析.根据 1.3 方法,分别选用粒径为 100、300、600、800 和 3 000 目的零价铁制备比例为 0.5% 的 Pb/Fe 双金属体系,在充满氮气的手套箱中,分别称取不同粒径的 Pb/Fe 各 0.5 g,加入 40 mL 顶空玻璃瓶中,并加入 10 mL 去离子水和 0.3 mL HCB 储备液,每个样品做 2 个平行样.放入 50℃ 水浴振荡器反应 2 h 取出玻璃瓶待分析.

1.6 离子强度影响实验

选用粒径为 300 目的零价铁制备 Ag/Fe 比例为 0.2% 的双金属体系,在充满氮气的手套箱中,称取 3 份 0.5 g Ag/Fe 加入 40 mL 顶空玻璃瓶中,3 个反应器中分别加入去离子水 10、9 和 0 mL,并加入调节离子强度的 Na_2SO_4 储备液 0、1 和 10 mL,再加入 0.3 mL HCB 储备液,每个样品做 2 个平行样.放入 50℃ 水浴振荡器反应 2 h 取出玻璃瓶待分析.

1.7 HCB 定量分析

向样本中添加 10 mL 正己烷,在摇床上振荡 30 min,吸取上层萃取液并用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤头过滤,再用无水硫酸钠干燥后用 GC 分析. HCB 去除率计算方法为:

$$\text{HCB 去除率} = \frac{\text{HCB 初始浓度} - \text{HCB 剩余浓度}}{\text{HCB 初始浓度}}$$

式中 HCB 剩余浓度为平行样的平均值.

2 结果与讨论

2.1 不同的双金属体系的影响

零价铁体系中添加的催化金属与铁构成了双金属体系,利用原电池原理促进水相中 HCB 的还原脱

氯反应. 本研究选用 Cu、Pb、Ag 这 3 种常见金属与零价铁制备成双金属, 在实验室条件下脱氯 HCB. 如图 1 所示, 单独零价铁对 HCB 的脱氯效果微弱, 反应 2 h 后 HCB 的脱氯率仅为 0.35%. 添加少量的 Cu、Pb 或 Ag 的双金属体系对 HCB 还原脱氯有显著的促进作用, 当 Cu、Pb、Ag 这 3 种金属添加量为 0.1% 的双金属体系在反应 2 h 对 HCB 的脱氯率分别达到 30.5%、78.5% 和 93.5%. 对比图 1 中 HCB 的脱氯效率, 可以看出 3 种双金属对 HCB 的脱氯效果存在差异, 3 种双金属对 HCB 的脱氯能力依次为 $\text{Ag/Fe} > \text{Pb/Fe} > \text{Cu/Fe}$. 在双金属还原脱氯的研究中, 全燮等^[27]用 Pd、Ni 和 Cu 与铁形成的双金属体系脱氯四氯化碳、三氯乙烯等短链氯代烃类, 这 3 种金属的催化能力依次为 $\text{Pd} > \text{Ni} > \text{Cu}$, 但是 Kim 等^[28]发现, Pd、Ni 和 Cu 与铁形成双金属体系对 PCP 的脱氯效果相近, 没有明显差别. 因此, 各种添加金属对不同的氯代有机物具有不同脱氯催化规律.

另外, 第二金属的添加比例也会影响双金属体系的还原脱氯能力. 由图 1(a)、1(b)可以看出, 当 $\text{Ag/Fe} < 0.5\%$ 、 $\text{Pb/Fe} < 0.2\%$ 时, 增加惰性金属添加量能有效提高 HCB 脱氯率, 再继续其添加量时, 脱氯效率反而下降. 这主要是因为, 在双金属体系中, Fe 一般作为阳极, 添加的惰性金属负载于零价铁表面形成阴极, 刚开始阴极面积相对阳极很小, 故增加阴极面积有利于提高反应速率, 但添加金属达到一定比例时, 继续提高添加金属量反而会覆盖有效反应表面, 降低双金属的脱氯能力. 在本研究中, Ag/Fe 、 Pb/Fe 最佳添加比例分别为 0.5% 和 0.2%. 但从图 1(c)可以看出, HCB 脱氯效率随 Cu/Fe 添加量升高一直在增大, 没有出现最佳添加比, 可能与 Cu 的活性相对较弱有一定关系.

为进一步解释其原因, 以 Ag/Fe 为例, 使用扫描电镜 (SEM) 观察不同比例的 Ag/Fe 表面微观形貌. 图 2 为添加不同量 Ag 制备的双金属扫描电镜图 (根据图 3 可知铁表面的不规则附着物为金属银). 从中可以看出, 提高 Ag 添加量会影响铁表面形貌, 未添加 Ag 时零价铁表面光滑, 添加 Ag 的铁表面可以观察到不规则的沉降物, 随着 Ag 添加量增加, 表面沉降更加密集. 当 Ag 添加量过高时, 在零价铁表面形成密集的附着物, 阻碍金属铁与溶液接触, 降低阳极的反应速率, 从而抑制了双金属脱氯的整体活性.

2.2 双金属体系表面积影响

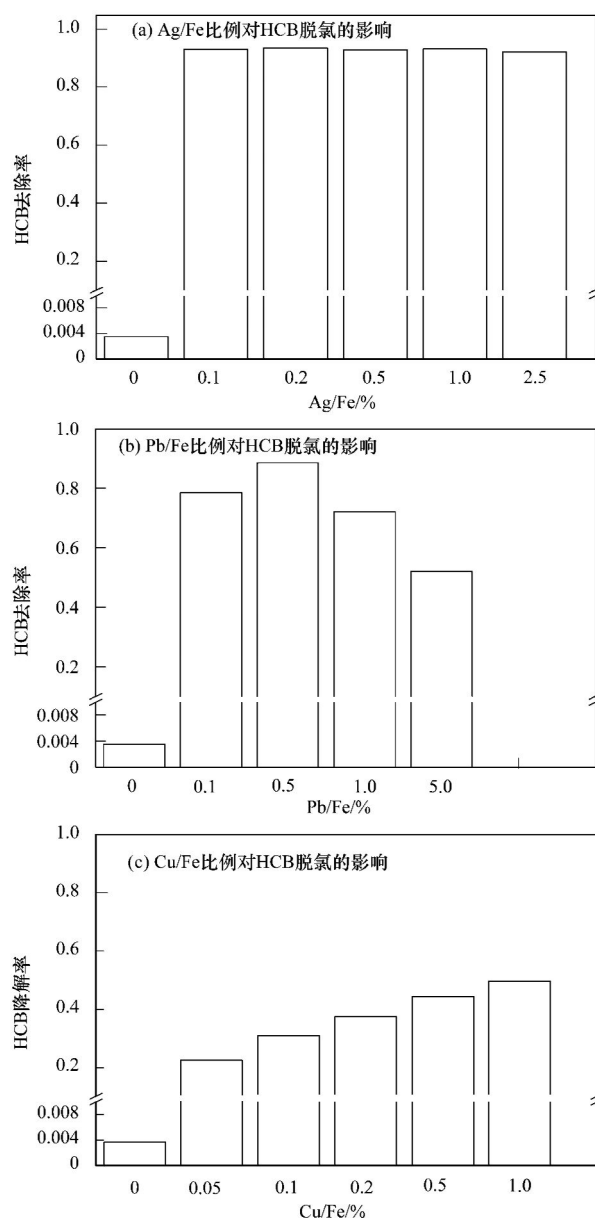


图 1 催化金属添加量对 HCB 还原脱氯影响

Fig. 1 HCB dechlorination rate at bimetallics with different catalyst ratios

在双金属体系中, 铁和催化金属组成原电池体系, 此体系为 HCB 的还原脱氯提供反应界面, 因此提高双金属体系的表面积有利于提高 HCB 的脱氯速率. 在反应器中可以通过 2 种方式提高双金属体系的表面积.

(1) 增加双金属的投加量. 图 4(a) 为在相同的 HCB 溶液中, 分别添加 300 目的 Pb/Fe 0.1、0.2、0.5 和 0.8 g 反应 2 h 后的 HCB 脱氯率, 其值分别为 38.3%、78.4%、86.0% 和 88.6%. 随着 Pb/Fe 添加量的增加, 反应器中 HCB 的脱氯率显著提高. 当反应器中 Pb/Fe 量 > 0.5 g 时, 再提高双金属添加量

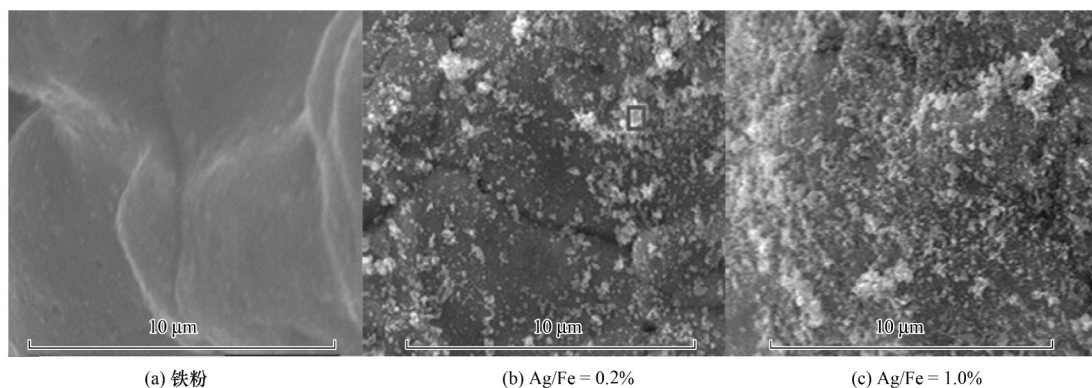


图2 不同 Ag/Fe 比例双金属颗粒放大 5 000 倍的表面微观形貌

Fig. 2 SEM of Ag/Fe particles with different catalyst ratios with 5000 times

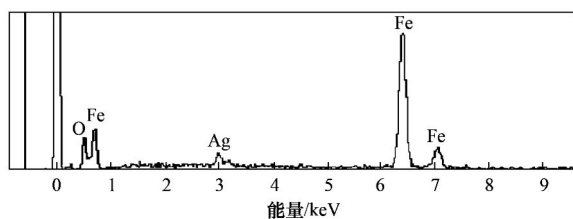


图3 0.2% Ag/Fe X 射线能量色散谱(EDS)

Fig. 3 EDS of Ag/Fe particle with catalyst ratio in 0.2%

对 HCB 脱氯速率的促进作用减弱,这可能是由于反应器中的双金属量过高,弱化了溶液中反应物质的迁移能力.

(2)不改变投加量的情况下,使用更小粒径的双金属体系.图4(b)为不同粒径零价铁铁粉制备 Ag/Fe 对 HCB 的脱氯情况,其中 100、300、600 和 800 目的 Ag/Fe 体系对 HCB 均有较好的去除效果,而3 000目铁粉制备的双金属对 HCB 脱氯效果较差.根据实验数据发现,六氯苯的脱氯率与铁粉表面积并没有呈现出良好的正相关性,假设铁粉颗粒形状相似,相同质量的 100、300、600、800 和3 000 目铁粉的表面积比约为:1:3:6:8:30,对应的 HCB 的脱氯率依次为 84.3%、88.5%、84.6%、92.3% 和 32.2%.由于 HCB 的还原脱氯主要是在铅表面发生,当 Pb 添加量相同时,不同粒径 Pb/Fe 表面 Pb 面积相近,导致 100~800 目粒径的 Pb/Fe 对 HCB 脱氯率也相近.关于3 000目 Pb/Fe 对 HCB 的脱氯率远低于其他大粒径的 Pb/Fe 体系的现象,可能是由于制备 Pb/Fe 时,3 000目的零价铁粒径较小,导致 Pb 沉淀没能均匀有效的附着在铁粉表面,减弱了 3 000目 Pb/Fe 体系对 HCB 的脱氯能力.由图5不同粒径铁粉的表现形貌可以看出,随着铁粒径的降低,300 目、800 目和3 000目粒径的 Pb/Fe 表面的 Pb 沉淀越来越稀疏,300 目的 Pb/Fe 表面可以观察

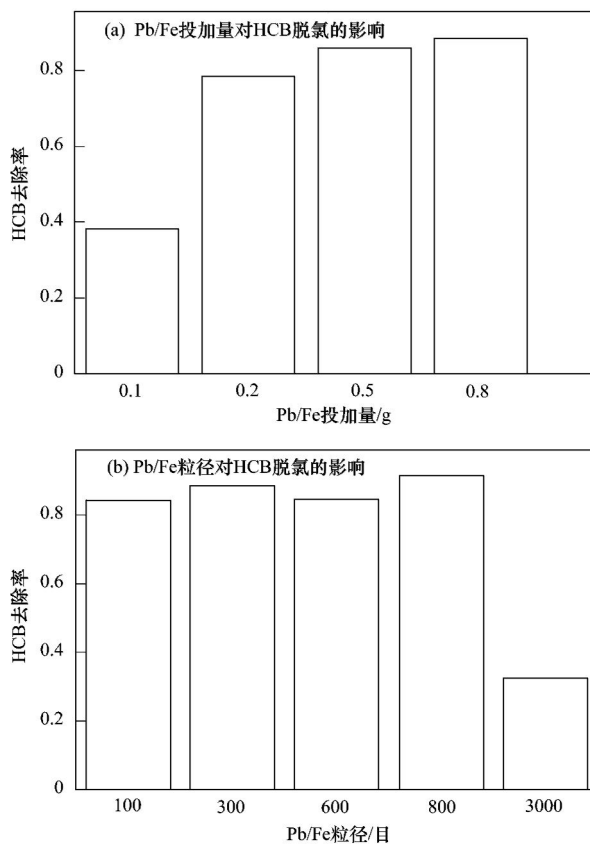


图4 Pb/Fe 表面积对 HCB 脱氯率影响

Fig. 4 HCB dechlorination rate in different surface areas

到密集的 Pb 沉淀,而3 000目的 Pb/Fe 粒径表面催化金属最佳添加比例与添加金属在混合体系中的存在形式有一定关联,如果催化金属均匀分布在零价铁表面,只需添加少量催化金属便能达到良好效果,如果制备条件不当,如催化金属在置换过程中发生聚集,或没有均匀分布在零价铁表面,则不能有效的和零价铁形成原电池体系,则催化脱氯效率会大大降低.

2.3 离子强度影响

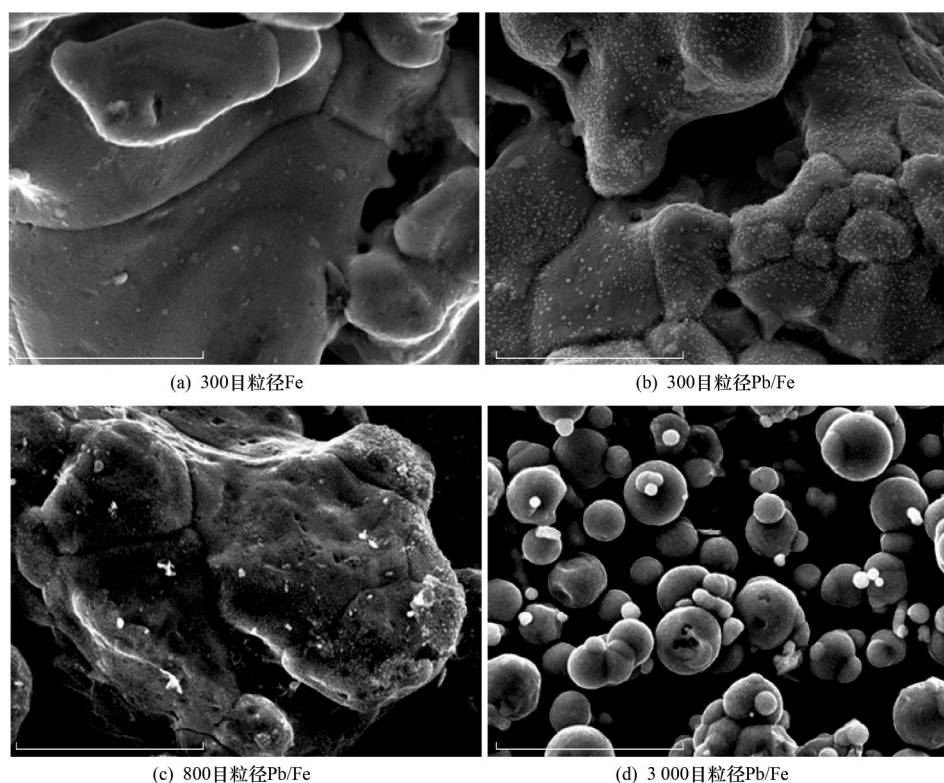


图5 不同粒径 Pb/Fe 表面微观形貌

Fig. 5 SEM of Pb/Fe particles with different particle sizes

增大反应溶液中的离子强度,可提高溶液的电导率,从而增强溶液的导电性能,加速金属铁的电化学氧化腐蚀. 涂传青^[29]研究了水体中离子对零价铁脱氯二硝基甲苯影响,发现添加硫酸根离子、氯离子、铵离子和硝酸根离子均可以促进零价铁的还原活性的提高;但是有些离子会对铁腐蚀产生其他影响,如水体中的磷酸根、硅酸根、碳酸根会和二价铁、三价铁反应生成磷酸盐沉淀,这些沉淀附着在零价铁表面,阻碍了铁与液相中反应物的有效接触. 硫酸钠在水相不会和铁的反应产物(Fe^{2+} 或 Fe^{3+})发生反应,本文选用硫酸钠来调节离子强度,研究离子强度对双金属体系脱氯 HCB 的影响. 图 6 为添加不同浓度硫酸钠的 HCB 脱氯率随时间的变化曲线. 在硫酸钠浓度分别为 0、0.05 和 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下, HCB 脱氯率分别达到了 93.5%、98.0% 和 98.9%,说明提高离子强度有利于 Ag/Fe 还原脱氯 HCB. 但相比于其他两个影响因素,离子强度对 HCB 脱氯的促进程度较小.

3 结论

(1) 基于零价铁的双金属体系中, Ag、Pb 和 Cu 对 HCB 脱氯都有显著的促进作用, 3 种金属对

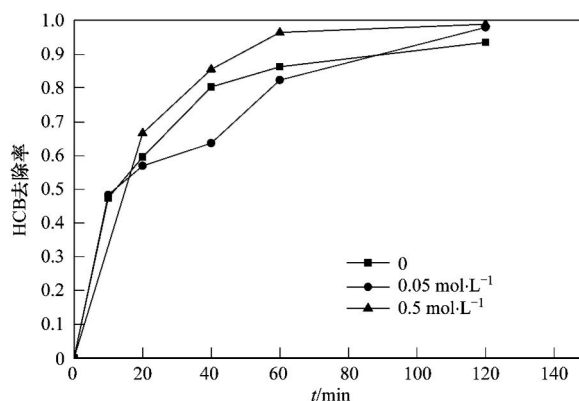


图6 不同离子强度下 HCB 脱氯率随时间变化

Fig. 6 HCB dechlorination rate in different ionic strengths

HCB 的脱氯催化能力依次为: $\text{Ag} > \text{Pb} > \text{Cu}$; 另外, 适当提高催化双金属体系中的催化金属量有利于 HCB 的脱氯, 但添加量过高会阻碍铁与溶液的接触, 从而降低脱氯活性.

(2) 提高反应器中双金属的投加量可提高脱氯速率; 催化金属在还原体系中的分布对 HCB 脱氯有重要影响, 均匀分散在颗粒表面的添加金属有利于脱氯反应.

(3) 离子强度对双金属体系脱氯 HCB 有一定促进作用, 但相对前两个影响因素, 其促进效果稍弱, 故处理过程中无需调节溶液中的离子强度.

参考文献:

- [1] Randi A S, Cocca C, Carbone V, *et al.* Hexachlorobenzene is a tumor co-carcinogen and induces alterations in insulin-growth factors signaling pathway in the rat mammary gland [J]. *Toxicological Sciences*, 2006, **89**(1): 83-92.
- [2] Gustafson D L, Long M E, Thomas R S, *et al.* Comparative hepatocarcinogenicity of hexachlorobenzene, pentachlorobenzene, 1,2,4,5-tetrachlorobenzene, and 1,4-dichlorobenzene; application of a medium-term liver focus bioassay and molecular and cellular indices[J]. *Toxicological Sciences*, 2000, **53**(2): 245-252.
- [3] Yang B, Deng S B, Yu G, *et al.* Bimetallic Pd/Al particles for highly efficient hydrodechlorination of 2-chlorobiphenyl in acidic aqueous solution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **189**(1-2): 76-83.
- [4] Agarwal S, Al-Abad S R, Dionysios D. Enhanced corrosion-based Pd/Mg bimetallic systems for dechlorination of PCBs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(10): 3722-3727.
- [5] Choi J H, Kim Y H. Reduction of 2,4,6-trichlorophenol with zero-valent zinc and catalyzed zinc [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **166**(2-3): 984-991.
- [6] Lin C J, Liou Y H, Lo S L. Supported Pd/Sn bimetallic nanoparticles for reductive dechlorination of aqueous trichloroethylene[J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(2): 314-319.
- [7] Tee Y H, Bachas L, Bhattacharyya D. Degradation of trichloroethylene by iron-based bimetallic nanoparticles[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 2009, **113**(22): 9454-9464.
- [8] Schrick B, Blough J L, Jones A D, *et al.* Hydrodechlorination of trichloroethylene to hydrocarbons using bimetallic nickel-iron nanoparticles[J]. *Chemistry of Materials*, 2002, **14**(12): 5140-5147.
- [9] Lin C J, Lien S L, Liou Y H. Dechlorination of trichloroethylene in aqueous solution by noble metal-modified iron[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, **116**(3): 219-228.
- [10] Feng J, Lim T T. Iron-mediated reduction rates and pathways of halogenated methanes with nanoscale Pd/Fe: analysis of linear free energy relationship[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(9): 1765-1774.
- [11] Nagpal V, Bokare A D, Chikate R C, *et al.* Reductive dechlorination of γ -hexachlorocyclohexane using Fe-Pd bimetallic nanoparticles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 680-687.
- [12] Wang X Y, Chen C, Chang Y, *et al.* Dechlorination of chlorinated methanes by Pd/Fe bimetallic nanoparticles [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **161**(2-3): 815-823.
- [13] Ganesh K, Parshetti, Doong R. Dechlorination of chlorinated hydrocarbons by bimetallic Ni/Fe immobilized on polyethylene glycol-grafted microfiltration membranes under anoxic conditions [J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(4): 392-399.
- [14] Ma H, Huang Y P, Shen M W, *et al.* Enhanced dechlorination of trichloroethylene using electrospun polymer nanofibrous mats immobilized with iron/palladium bimetallic nanoparticles [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **211-212**(17): 349-356.
- [15] Matheson L J, Tratnyek P G. Reductive dehalogenation of chlorinated methanes by iron metal[J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, **28**(12): 2045-2053.
- [16] Han Y, Li W, Zhang M H, *et al.* Catalytic dechlorination of monochlorobenzene with a new type of nanoscale Ni(B)/Fe(B) bimetallic catalytic reductant[J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(1): 53-58.
- [17] Deng B L, Burris D R, Campbell T J. Reduction of vinyl chloride in metallic iron-water systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(15): 2651-2656.
- [18] 廖娣勃, 杨琦, 李俊鎔. 零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 469-475.
- [19] Li T, Farrell J. Reductive dechlorination of trichloroethene and carbon tetrachloride using iron and palladized-iron cathodes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(1): 173-179.
- [20] Muflikian R, Fernando Q, Korte N. A Method for the rapid dechlorination of low molecular weight chlorinated hydrocarbons in water[J]. *Water Research*, 1995 **29**(10): 2434-2439.
- [21] Wei J J, Xu X H, Liu Y, *et al.* Catalytic hydrodechlorination of 2,4-dichlorophenol over nanoscale Pd/Fe: reaction pathway and some experimental parameters [J]. *Water Research*, 2006, **40**(2): 348-354.
- [22] Zhou T, Li Y Z, Lim T T. Catalytic hydrodechlorination of chlorophenols by Pd/Fe nanoparticles: comparisons with other bimetallic systems, kinetics and mechanism[J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, **76**(2): 206-214.
- [23] 卫建军. 纳米级 Pd/Fe 双金属对水中氯酚的催化脱氯研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [24] Xu Y, Zhang W X. Subcolloidal Fe/Ag particles for reductive dehalogenation of chlorinated benzenes [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2000, **39**(7): 2238-2244.
- [25] Shih Y H, Chen Y C, Chen M Y, *et al.* Dechlorination of hexachlorobenzene by using nanoscale Fe and nanoscale Pd/Fe bimetallic particles [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, **332**(2-3): 84-89.
- [26] Zhu N R, Luan H W, Yuan S H, *et al.* Effective dechlorination of HCB by nanoscale Cu/Fe particles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176**(1-3): 1101-1105.
- [27] 全燮, 刘会娟, 杨凤林, 等. 二元金属体系对水中多氯有机物的催化还原脱氯特性[J]. *中国环境科学*, 1998, **18**(4): 333-336.
- [28] Kim Y H, Carraway E R. Dechlorination of pentachlorophenol by zero valent iron and modified zero valent irons [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(10): 2014-2017.
- [29] 涂传青. 金属铁与电解法还原难降解有机物反应机理和影响因素的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allelochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolofop- <i>p</i> -ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人