

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛翌, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响

王琪¹, 刘辉¹, 姜林¹, 唐军²

(1. 北京市环境保护科学研究院国家城市环境污染控制工程技术中心, 污染场地风险模拟与修复北京市重点实验室, 北京 100037; 2. 中国环境科学研究院地下水与环境系统工程创新基地, 北京 100012)

摘要: 微生物厌氧降解六氯苯已经成为国内外六氯苯污染土壤修复技术研发的前沿和热点. 研究了在不同的初始 pH 值、反应温度及固液比等环境条件下, 3 种共存氯苯类同系物五氯苯、1,2,4,5-四氯苯、1,2,4-三氯苯对染料厂污染土壤中六氯苯厌氧降解活性的影响. 结果表明, 在降解过程中, 共存氯苯类同系物的累积对六氯苯的厌氧降解产生了反馈抑制作用, 影响了六氯苯的降解活性, 且在不同的环境条件下, 累积规律不同, 反馈抑制作用不同. 反应的初始 pH 值较低时, 五氯苯的反馈抑制作用更突出, 反应的初始 pH 值较高时, 1,2,4-三氯苯的反馈抑制作用更突出; 常温下, 五氯苯的反馈抑制作用更突出, 较高温度下, 1,2,4-三氯苯的反馈抑制作用更突出; 固液比越小, 五氯苯的反馈抑制作用越突出. 因此, 针对性地采取提高低氯苯类同系物降解活性的措施, 降低共存低氯苯类同系物在六氯苯厌氧降解过程中的累积, 不失为提高污染土壤中六氯苯降解率的一种好的选择.

关键词: 污染土壤; 六氯苯; 厌氧降解; 共存; 反馈抑制

中图分类号: X131; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1358-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.022

Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene

WANG Qi¹, LIU Hui¹, JIANG Lin¹, TANG Jun²

(1. Beijing Key Laboratory for Risk Modeling and Remediation of Contaminated Sites, National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. Research Center of Groundwater and Environmental System Engineering, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The anaerobic biodegradation of hexachlorobenzene is being an intensively studied technology for contaminated soil remediation. The effect of three coexisting chlorobenzene homologue (pentachlorobenzene, 1,2,4,5-tetrachlorobenzene and 1,2,4-trichlorobenzene) on anaerobic degradation of hexachlorobenzene in dye processing industry contaminated soil was studied under different environmental conditions such as initial pH, reaction temperature and solid-liquid ratio. The result showed that the anaerobic degradation activity of hexachlorobenzene was reduced due to the feedback inhibition caused by accumulation of chlorobenzene homologue. The feedback inhibition and accumulation may vary based on different environmental conditions. Pentachlorobenzene exhibited the strongest inhibitive effect compared to the other two chlorobenzene homologue with low initial pH values, at room temperature and low solid-liquid ratio, respectively. Whereas 1,2,4-trichlorobenzene significantly inhibited the degradation with high initial pH values and at higher temperature. As a conclusion, optimization of environmental conditions and reduction of chlorobenzene homologue accumulation in the process can enhance the degradation of hexachlorobenzene in contaminated soil.

Key words: contaminated soil; hexachlorobenzene; anaerobic degradation; coexistence; feedback inhibition

六氯苯是联合国环境规划署国际公约中首批控制的 12 种持久性有机污染物 (POPs) 之一^[1], 在杀虫剂、杀菌剂、合成橡胶助剂、木材防腐剂、有机合成化工原料的生产, 石墨阳极的处理, 军事烟雾的生产以及铝或其他金属制造过程中都会产生^[2].

六氯苯具有长期残留性、生物蓄积性、难溶于水等特点, 广泛分布在空气、水、土壤以及沉积物中^[3-6]. 由于性质稳定难以自然降解^[7], 土壤中存在的六氯苯不仅破坏了植被的自然生长, 而且容易造成地下水水质的恶化, 更重要的是污染土壤中的六氯苯能够通过直接摄入、皮肤接触及吸入土壤尘等

方式侵入人体, 并在人体内富积, 给人体健康造成严重的危害^[8,9]. 已有研究证实, 六氯苯具有累积性慢性或亚慢性毒性作用, 能够导致生物体内内分泌紊乱、生殖及免疫机能失调、神经行为和发育紊乱以及癌症等疾病^[10,11], 因而已被纳入环境内分泌干扰物之列. 因此, 六氯苯的环境污染已经成为制约城市可持

收稿日期: 2013-07-29; 修订日期: 2013-09-10

基金项目: 北京市环境保护科学研究院科技基金项目 (2012-B-02); 环境保护公益性行业科研专项 (201009032)

作者简介: 王琪 (1979 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为污水处理药剂研发、固体废物资源化及污染场地修复技术研发, E-mail: wq020704@126.com

续发展的世界性环境问题,而针对六氯苯污染土壤的修复研究也已上升为国内外土壤污染防治领域的重要研究课题和热点问题之一。

目前,国内外大多数专家学者在六氯苯污染土壤修复治理方面的研究主要集中在物理法和化学法^[12~17]两个方面,但是这两种方法终因存在处理成本高、易产生二次污染、工程可行性差等缺点,未得到更广泛的应用。而以厌氧降解为代表的生物法因其投资少、操作简单、对周围环境影响小且不产生二次污染等优点^[18],在降解和转化六氯苯方面表现出了巨大的潜力^[19],已逐渐成为国内外污染土壤修复技术研发的前沿和热点。但是,实际六氯苯污染土壤中往往共存多种低氯苯类同系物,在厌氧降解过程中,由于氯苯类同系物之间的相互作用^[20,21],六氯苯的降解活性通常会受到影响。

本研究分析了不同环境条件下,污染土壤中氯苯

类同系物的累积规律以及对六氯苯厌氧降解率的影响。实验采用水淹法营造厌氧环境,以乙酸作为碳源,考察了在初始 pH 值、反应温度、固液比等不同环境条件下,3 种共存氯苯类同系物五氯苯、1,2,4,5-四氯苯、1,2,4-三氯苯的累积规律及对六氯苯厌氧降解活性的影响,以期通过本研究为六氯苯实际污染土壤厌氧降解工艺的研发及工程设计,并最终为提高六氯苯的厌氧降解率提供可靠的借鉴。

1 材料与方法

1.1 实验原料与化学试剂

实验所用土样取自北京某染料厂长期受六氯苯污染的土壤,六氯苯作为染料生产的中间体在土壤中存留三十余年。土样经研磨、过筛后,用自封袋密封放置于冰箱中,于 4℃ 下保存。染料厂污染土壤中氯苯类同系物的含量及其理化性质见表 1。

表 1 污染土壤中氯苯类同系物的含量及其理化性质¹⁾

项目	六氯苯	五氯苯	1,2,4,5-四氯苯	1,2,4-三氯苯
$c/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.00~2.80	0.10~0.35	0.14~0.49	0.25~0.90
$M/\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	284.8	250.3	215.9	181.5
P^*/Pa	0.002 5	0.22	0.72	38.02
K_{iaw}	0.036	0.034	0.050	0.093
$C_{\text{iw}}^{\text{sat}}(\text{g}/100\text{ g 水})\times 10^{-6}$	0.028	2.630	5.888	165.959

1) c 为各氯苯在土壤中的含量范围; M 为摩尔浓度; P^* 为蒸气压; K_{iaw} 为空气-水分配常数; $C_{\text{iw}}^{\text{sat}}$ 为溶解度

化学试剂:乙酸(分析纯)、无水硫酸钠(分析纯)、氢氧化钠(分析纯)、硫酸(分析纯)、二氯甲烷(农残级)、丙酮(农残级)。

1.2 实验设备

生化培养箱(HPS-250,中国哈东联公司),雷磁 pH 计(PHSJ-4A,中国盛磁公司),平行蒸发仪(Syncore Analyst R-6,瑞士 BUCHI 公司),氮吹仪(HGC-12A,英国 STUART 公司),气相色谱质谱联用仪(ITQ 1100,美国热电公司),气相色谱仪(TRACE GC ULTRA,美国热电公司),质谱检测仪(DSQ II,美国热电公司),自动进样器(AS3000 GC-MS,美国热电公司),超声振荡器(DL-180D,上海之信仪器公司),恒温水浴振荡器(HZS-HA,中国哈东联公司)。

1.3 实验步骤

(1) 将污染土壤过孔径为 2 mm 的筛 2 次,确保土壤充分混合。

(2) 取 200 g 过筛后的污染土壤样品,置于 500 mL 棕色广口瓶中,按照一定固液比向其中加入一定体积的去离子水,同时加入 0.8 g 乙酸,形成淹水厌

氧环境。

(3) 使用硫酸和氢氧化钠调节反应体系的初始 pH 值。

(4) 调好反应体系的初始 pH 值后,将棕色广口瓶用凡士林密封后放入生化培养箱中,在设定温度下进行厌氧降解反应实验,反应时间为 33 d。

(5) 反应结束后,使用抽滤装置将悬浊液进行固液分离,泥样及水样中的含氯有机物采用气相色谱质谱联用仪进行分析检测。

(6) 实验过程中,为确保实验数据的准确性,减少实验误差,每组实验均做 3 个平行样。

(7) 对于初始 pH 值的影响实验,反应温度恒定为 45℃,固液比恒定为 1:1(g:mL),实验在初始 pH 值分别为 4、5、7、9 的条件下进行;对于反应温度的影响实验,初始 pH 值恒定为 5,固液比恒定为 1:1(g:mL),实验在反应温度分别为 25、35、45 和 55℃ 的条件下进行;对于固液比的影响实验,初始 pH 值恒定为 5,反应温度恒定为 45℃,实验在固液比分别为 1:1、1:1.5 和 1:2(g:mL)的条件下进行。

1.4 分析方法

1.4.1 泥样分析

(1) 称取样品. 称取质量为 (20 ± 0.05) g 的泥样至 250 mL 肖特瓶中.

(2) 去除水分. 将泥样与 20 g 无水硫酸钠充分混合, 以除去泥样中的水分. 如有必要, 可适当增加无水硫酸钠的用量.

(3) 振荡萃取. 向去除水分的待测样品及其质控样、空白样中均加入 100 mL 体积比为 1:1 的二氯甲烷/丙酮溶液, 然后将样品置于超声振荡器中振荡萃取 2 h.

(4) 过滤分离. 将振荡萃取后的样品移至过滤漏斗中, 进行萃取液与样品的分离. 过滤漏斗下端填上玻璃棉堵住漏斗的滤孔, 以避免细颗粒泥样随萃取液流下. 萃取液过滤至浓缩杯中后, 再用二氯甲烷润洗漏斗, 润洗液也转移至浓缩杯中.

(5) 蒸发. 将浓缩杯放至平行蒸发仪中. 平行蒸发仪的参数设定为: 冷凝水温度为 0°C , 水浴温度为 55°C , 顶盖温度为 60°C , 转速为 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 真空度为 480 mbar. 蒸发 30 min 后, 将真空度调至 400 mbar 继续蒸发 30 min, 再将真空度调至 350 mbar, 直至有机溶剂浓缩至约 1 ~ 2 mL.

(6) 浓缩. 将蒸发后的有机溶剂移至氮吹仪中继续对样品进行浓缩. 当溶液浓缩至 1 mL 以下时, 用二氯甲烷定容到 1 mL. 用 250 μL 的微量注射器移取 200 μL 样品至 400 μL 内插管中, 同时加入 5 μL 浓度为 200 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 SVOC 内标.

(7) 测定. 将样品置于气相色谱质谱联用仪中进行六氯苯及其氯苯类同系物的浓度测定.

气相色谱仪工作条件: 初始温度 40°C , 保持 4 min, 以 $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度升至 160°C , 保持 1 min, 以 $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度升至 280°C , 保持 4 min, 以 $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度升至 300°C , 保持 5 min, 色谱柱流量 (氦气) $1.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样口温度 270°C , 进样体积为 1 μL , 进样方式为不分流进样.

质谱仪条件: 质量范围为 35 ~ 500 u, 离子源温度为 275°C , 四级杆温度为 150°C .

(8) 计算. 样品中六氯苯及其氯苯类同系物浓度的计算见式(1)和(2).

$$m = c \times V/M \quad (1)$$

式中, m 为土壤样品中氯苯的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c 为有机溶剂中氯苯的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为有机溶剂的体积 (L); M 为土壤样品的干重 (kg).

$$y = (m_1 - m_2)/m_1 \quad (2)$$

式中, y 为氯苯的降解率 (%); m_1 为反应前土壤样

品中氯苯的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); m_2 为反应后土壤样品中氯苯的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.4.2 水样分析

(1) 量取样品. 量取 100 mL 水样置于 200 mL 分液漏斗中.

(2) 振荡萃取. 向分液漏斗中加入 6 mL 二氯甲烷, 并将分液漏斗置于恒温水浴振荡器中振荡萃取 20 min.

(3) 液液分离. 振荡结束后, 将分液漏斗取出, 静置 5 min, 将下层的二氯甲烷转移至浓缩杯中. 重复步骤(2)和(3)两次.

(4) 分析检测. 水样中六氯苯及其氯苯类同系物的浓度检测同 1.4.1 节中的(5)~(7).

1.5 回收率

为减少实验误差, 确保实验检测数据的准确性, 对采用内标法所得的 4 种氯苯的回收率进行了实验, 见表 2. 从中可知, 无论是六氯苯及氯苯同系物的单一回收率还是平均回收率均在 90% ~ 125% 之间, 说明该分析方法具有较好的可行性.

表 2 4 种氯苯的回收率/%

氯苯	检测限 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	回收率/%			
		1	2	3	平均
六氯苯	0.01	104	94.4	117	105.1
五氯苯	0.01	97	92.8	119	102.9
1,2,4,5-四氯苯	0.01	98.4	90.8	124	104.4
1,2,4-三氯苯	0.01	97.4	108	107	104.1

1.6 数据分析

本研究采用 SPSS 19.0 for windows 软件对实验数据进行了处理, 分析了不同初始 pH 值、反应温度及固液比条件下, 六氯苯降解率实验数据之间的显著性差异, 并通过多元线性回归分析探讨了影响六氯苯降解率的主要因素.

2 结果与讨论

2.1 不同初始 pH 值条件下的累积影响

不同初始 pH 值条件下, 3 种共存氯苯类同系物五氯苯、1,2,4,5-四氯苯、1,2,4-三氯苯的累积规律及对六氯苯降解率的影响结果见图 1, 六氯苯降解率差异显著性见表 3.

从图 1 不难看出, 六氯苯的厌氧降解率随着初始 pH 值的升高呈现先升高后降低的趋势. 而表 3 显示, 六氯苯的降解率在不同初始 pH 值条件下的差异显著, 也印证了六氯苯降解率的这一变化规律, 即在酸性及碱性反应条件下, 六氯苯的降解率较低,

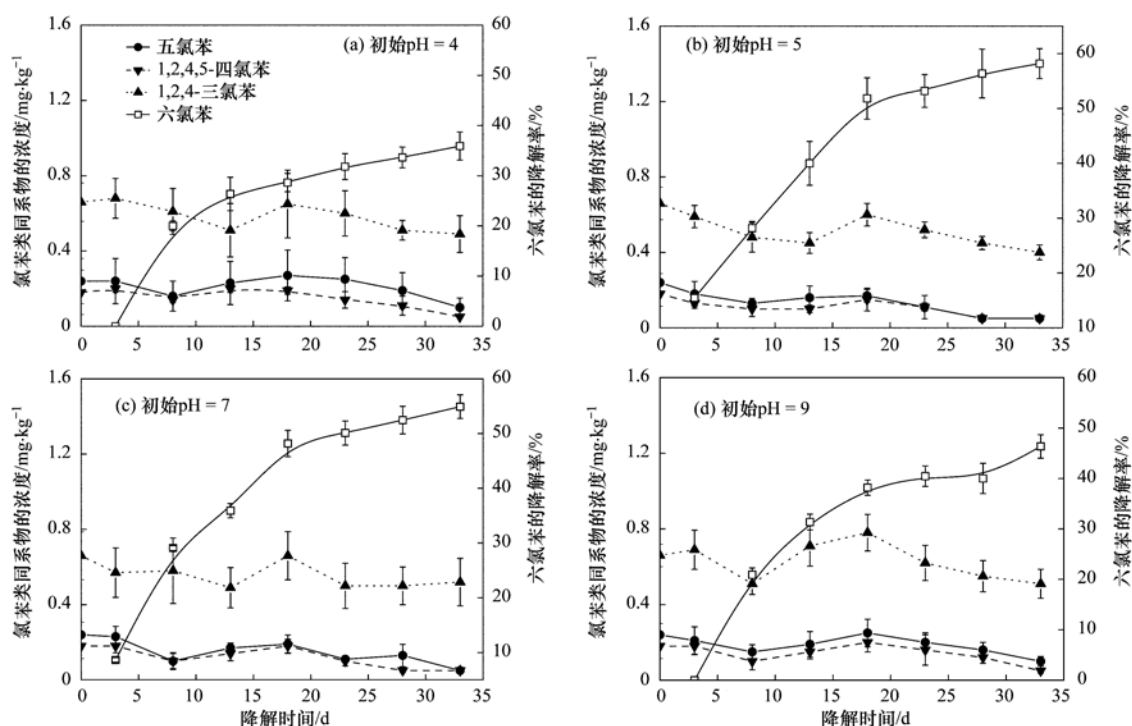


图1 不同初始 pH 值条件下共存氯代物的累积规律对六氯苯降解率的影响

Fig. 1 Effects of accumulation of chlorobenzene homologue on degradation of hexachlorobenzene under different initial pH values

而在弱酸性及中性反应条件下,六氯苯的降解率相对较高,尤其是在弱酸性反应条件下(初始 pH = 5),反应 33 d 的降解率更是达到了 58.18%。

实验同时发现,在不同的反应初始 pH 值条件下,五氯苯和 1,2,4,5-四氯苯表现出相同的累积规律,即土壤中浓度的累积均出现在酸性及碱性反应条件下,且最大累积浓度出现在降解第 18 d。当初始 pH = 4 时,五氯苯和 1,2,4,5-四氯苯的浓度分别从 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅分别达 12.5% 和 5.6%。当初始 pH = 9 时,五氯苯和 1,2,4,5-四氯苯的浓度分别从 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅分别达 4.2% 和 11.1%。而在弱酸性(初始 pH = 5)及中性(初始 pH = 7)反应条件下,五氯苯和 1,2,4,5-四氯苯在整个降解实验周期内未出现浓度累积。在六氯苯厌氧降解过程中,1,2,4-三氯苯在酸性及弱酸性条件下未出现浓度累积,在中性条件下开始出现浓度累积,且累积程度随初始 pH 值升高而增加,尤其是当初始 pH 值为 9 时,1,2,4-三氯苯从初始浓度 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 $0.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅达到 18.2%。

已经有研究表明,六氯苯在厌氧降解过程中是逐级脱氯的,即六氯苯的厌氧降解过程是一个从高

氯代苯逐渐转变为低氯代苯的过程^[22~24]。同时,在降解过程中,中间代谢产物的累积能够对微生物的代谢活动产生反馈抑制作用^[25~28]。所谓反馈抑制作用,即以代谢产物作为变构剂来抑制此产物合成过程中的某种酶活性的作用,中间代谢产物的累积也会对微生物的代谢活动形成抑制作用。因此,在初始 pH 值为 4 的反应条件下,六氯苯的降解率较低的原因可能是五氯苯和 1,2,4,5-四氯苯在整个降解周期内均出现了不同程度的累积导致,而且由于五氯苯的累积程度较高,对六氯苯降解的反馈抑制作用更加突出;相似地,在初始 pH 值为 9 的反应条件下,3 种共存氯苯类同系物在整个降解周期内均出现了不同程度的累积,由于 1,2,4-三氯苯的累积程度最大,因而在整个降解过程中的反馈抑制作用更加明显,这也导致了在该反应条件下六氯苯的降解率较低。

此外,实验采用多元回归分析,通过建立初始 pH 值、五氯苯浓度、四氯苯浓度及三氯苯浓度 4 个影响因素对六氯苯降解率的回归方程,探寻了影响六氯苯降解率的主要因素,逐步回归的分析结果见表 4。从中可以看出,逐步回归方程中只有五氯苯浓度 1 个变量入选,其余 3 个影响因素均被排除。由此可以推断,在改变初始 pH 值的实验条件下,五氯苯浓度是影响六氯苯降解率的主要因素。

表 3 不同初始 pH 值条件下六氯苯降解率的差异显著度 *F* 值和 *P* 值¹⁾

Table 3 The *F* value and *P* value of significant difference of degradation of hexachlorobenzene under different initial pH values

项目	反应时间/d						
	3	8	13	18	23	28	33
<i>F</i>	92.935	12.903	43.135	66.019	44.420	70.880	44.265
<i>P</i>	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

1) $P < 0.05$, 表示六氯苯降解率在不同初始 pH 值条件下存在显著差异

表 4 降解率和各影响因素的回归方程

Table 4 Stepwise multiple regression between degradation of hexachlorobenzene and environmental factors under different initial pH values

逐步回归方程	<i>R</i>	<i>F</i>
六氯苯降解率 = $63.812 - 117.903 \times$ 五氯苯浓度	0.959	23.132

2.2 不同反应温度条件下的累积影响

不同反应温度条件下,3 种共存氯苯类同系物五氯苯、1,2,4,5-四氯苯、1,2,4-三氯苯的累积规律及对六氯苯降解率的影响结果见图 2,六氯苯降解率差异显著性见表 5.

从图 2 不难看出,六氯苯的厌氧降解率随着反应温度的升高呈现先升高后降低的趋势,而表 5 显示,六氯苯的降解率在不同反应温度下的显著差异,也印证了六氯苯降解率的这一变化规律,即在反应温度为 45℃ 时,六氯苯的降解率较大,在整个 33 d 的降解实验周期内,降解率最高可达 58.18%. 而在

反应温度为 25℃ 和 55℃ 时,六氯苯的降解率较低,分别为 44% 和 34%.

图 2 的实验结果同时显示,当反应温度在 25 ~ 55℃ 的范围变化时,五氯苯在污染土壤中的累积程度呈现出先减少后增加的规律,当反应温度为 45℃ 时,五氯苯在整个六氯苯的降解实验周期内未出现累积,在反应温度为 25℃ 的条件下,五氯苯的累积程度最大,浓度由最初的 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅为 37.5%. 1,2,4,5-四氯苯的累积仅出现在温度较高的反应条件下,即在反应温度 55℃ 的条件下,降解第 18 d 出现了累积,其浓度由最初的 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅为 11.1%. 而在其他反应温度条件下,实验并未观察到 1,2,4,5-四氯苯的累积现象. 1,2,4-三氯苯在污染土壤中的累积程度是随反应温度的升高呈现先减少后增加的规律,即较低温度和较高温度条件下出现了不同程度的累积,而在适中温度 35℃ 和 45℃ 的条件下未出现累积现象. 其中,在较高反应温度条件下

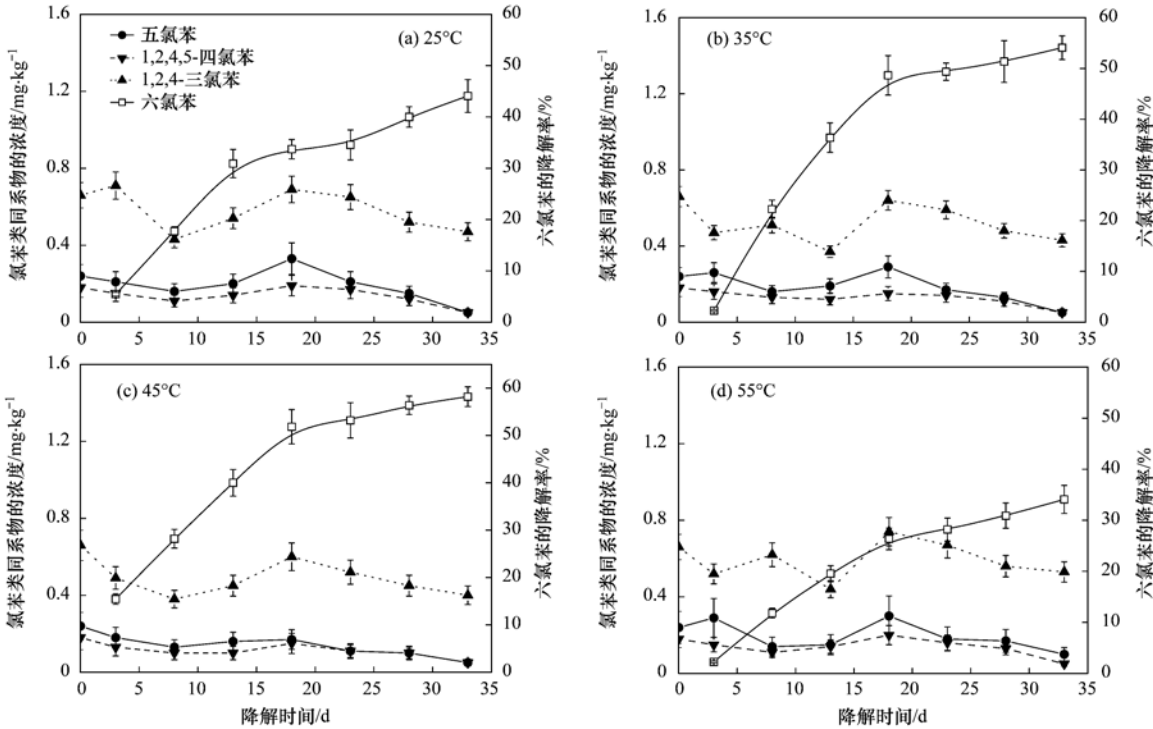


图 2 不同反应温度条件下共存氯代物的累积规律对六氯苯降解率的影响

Fig. 2 Effects of accumulation of chlorobenzene homologue on degradation of hexachlorobenzene under different reaction temperatures

(反应温度为 55℃ 时), 累积现象尤为明显, 在六氯苯厌氧降解的第 18 d, 1,2,4-三氯苯在污染土壤中的浓度由 0.66 mg·kg⁻¹ 增加至 0.88 mg·kg⁻¹, 增幅达到 33.3%.

因此, 可以推断在常温(25℃)反应条件下, 五氯苯和 1,2,4-三氯苯在污染土壤中的累积可能是造成六氯苯降解率低的主要原因, 其中五氯苯较高的累积程度使降解过程中的反馈抑制作用更加突出. 而在较高的反应温度(55℃)条件下, 六氯苯的降解率更低可能是由于 3 种共存氯苯类同系物在降解过程中同时

出现累积所致, 尤其以 1,2,4-三氯苯的累积程度最高, 对降解过程中反馈抑制作用的贡献最大.

此外, 实验采用多元回归分析, 通过建立反应温度、五氯苯浓度、四氯苯浓度及三氯苯浓度这 4 个影响因素对六氯苯降解率的回归方程, 探寻了影响六氯苯降解率的主要因素, 逐步回归的分析结果见表 6. 从中可以看出, 逐步回归方程中只有三氯苯浓度 1 个变量入选, 其余 3 个影响因素均被排除. 由此可以推断, 在改变反应温度的实验条件下, 三氯苯浓度是影响六氯苯降解率的主要因素.

表 5 不同反应温度条件下六氯苯降解率的差异显著度 *F* 值和 *P* 值¹⁾

项目	反应时间/d						
	3	8	13	18	23	28	33
<i>F</i>	140.296	36.249	104.392	72.289	99.282	48.932	69.122
<i>P</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

1) *P* < 0.05, 表示六氯苯降解率在不同反应温度条件下存在显著差异

表 6 降解率和各影响因素的回归方程

Table 6 Stepwise multiple regression between degradation of hexachlorobenzene and environmental factors under different reaction temperatures		
逐步回归方程	<i>R</i>	<i>F</i>
六氯苯降解率 = 159.355 - 176.444 × 三氯苯浓度	0.990	96.647

2.3 不同固液比条件下的累积影响

不同固液比条件下, 3 种共存氯苯类同系物五氯苯、1,2,4,5-四氯苯、1,2,4-三氯苯的累积规律及对六氯苯降解率的影响结果见图 3, 六氯苯降解率差异显著性见表 7.

由图 3 可知, 六氯苯的厌氧降解率随固液比的减小而减小. 表 7 同时显示, 六氯苯的降解率在不同固液比条件下的显著差异, 这也印证了上述六氯苯降解率的变化规律, 即在固液比为 1:1 时, 在整个降解实验周期内六氯苯的降解率最大, 接近 60%.

此外, 五氯苯、1,2,4,5-四氯苯和 1,2,4-三氯苯在厌氧降解过程中呈现出相似的累积规律(见图 3), 即累积程度均是随着固液比的减小而增加的.

在固液比为 1:1 的条件下, 3 种共存氯苯类同系物在整个降解实验周期内均未出现累积, 在固液比为 1:2 的条件下, 3 种共存氯苯类同系物分别出现了不同程度的累积, 在降解第 18 d, 初始浓度分别由 0.24、0.18 和 0.66 mg·kg⁻¹ 增加至 0.28、0.2 和 0.69 mg·kg⁻¹, 增幅分别为 16.7%、11.1% 和 4.5%.

很明显, 固液比越小, 3 种共存氯苯类同系物在污染土壤中的累积程度越大, 六氯苯的降解率越小. 在 3 种共存氯苯类同系物中, 以五氯苯的累积程度最大, 因而在对六氯苯的反馈抑制作用中产生的影响也最大.

此外, 实验采用多元回归分析, 通过建立固液比、五氯苯浓度、四氯苯浓度及三氯苯浓度这 4 个影响因素对六氯苯降解率的回归方程, 探寻了影响六氯苯降解率的主要因素, 逐步回归的分析结果见表 8. 从中可以看出, 逐步回归方程中只有五氯苯浓度 1 个变量入选, 其余 3 个影响因素均被排除. 由此可以推断, 在改变固液比的实验条件下, 五氯苯浓度是影响六氯苯降解率的主要因素.

表 7 不同固液比条件下六氯苯降解率的差异显著度 *F* 值和 *P* 值¹⁾

项目	反应时间/d						
	3	8	13	18	23	28	33
<i>F</i>	30.261	36.451	21.366	74.085	43.663	54.445	34.834
<i>P</i>	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000

1) *P* < 0.05, 表示六氯苯降解率在不同固液比条件下存在显著差异

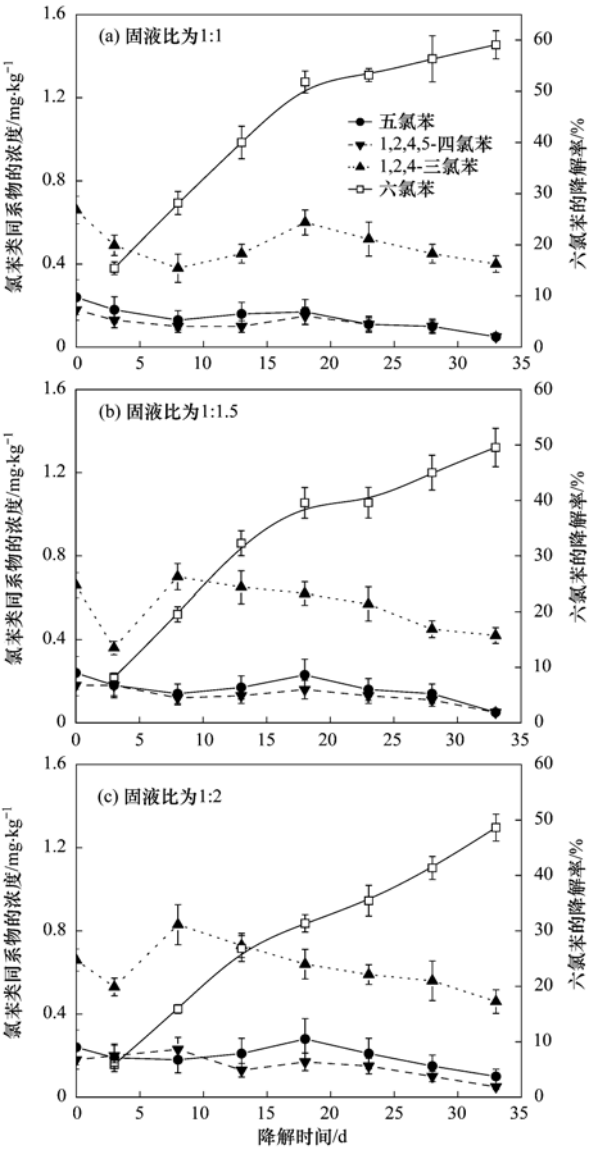


图3 不同固液比条件下共存氯代物的累积规律
对六氯苯降解率的影响

Fig. 3 Effects of accumulation of chlorobenzene homologue on degradation of hexachlorobenzene under different solid-liquid ratios

表8 降解率和各影响因素的回归方程

Table 8 Stepwise multiple regression between degradation of hexachlorobenzene and environmental factors under different solid-liquid ratios

逐步回归方程	R	F
六氯苯降解率 = 80.765 - 170.807 × 五氯苯浓度	0.996	2 859.912

3 结论

(1)在实际六氯苯污染土壤的厌氧降解过程中,共存氯苯类同系物的累积影响了六氯苯的降解活性,且这种以反馈抑制作用为特点的影响因外界环境条件的不同而不同.五氯苯在酸性、常温及低

固液比的反应条件下,对六氯苯降解活性的影响较大,而1,2,4-三氯苯在碱性及高温反应条件下,对六氯苯降解活性的影响较大.

(2)根据共存氯苯类同系物在不同外界环境条件下呈现出的累积规律,采取针对性的提高氯苯类同系物降解率的措施,以进一步提高实际污染土壤中六氯苯的降解率,不失为实际六氯苯污染土壤修复治理技术研发以及工程设计的一种好选择.

参考文献:

[1] 沈平.《斯德哥尔摩公约》与持久性有机污染物(POPs)[J]. 化学教育, 2005, (6): 6-10.

[2] 吴荣芳,解清杰,黄卫红,等.六氯苯的环境危害及其污染控制[J]. 化学与生物工程, 2006, 23(8): 7-10.

[3] 袁旭音,王禹,陈骏,等.太湖沉积物中有机氯农药的残留特征及风险评估[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 121-125.

[4] 蒋新,许士奋, Mantens D, 等. 长江南京段水、悬浮物及沉积物中多氯有毒有机污染物[J]. 中国环境科学, 2000, 20(3): 193-197.

[5] 蔡全英,莫测辉,吴启堂,等.部分城市污泥中氯苯类化合物的初步研究[J]. 环境化学, 2002, 21(2): 139-143.

[6] Barber J L, Sweetman A J, Van Wijk D V, et al. Hexachlorobenzene in the global environment: emissions, levels, distribution, trends and processes [J]. Science of the Total Environment, 2005, 349(1-3): 1-44.

[7] 刘辉,姜林,王琪,等.六氯苯微生物降解研究进展[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(1): 86-92.

[8] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009, 21(2-3): 558-565.

[9] 杜青平,贾晓珊. 1, 2, 4-三氯苯对大蒜根尖分生细胞有丝分裂的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 962-967.

[10] 陈晓东,吕永生,朱慧刚.六氯苯与健康危害[J]. 中国公共卫生, 2000, 16(9): 849-851.

[11] Bailey R E. Global hexachlorobenzene emissions [J]. Chemosphere, 2001, 43(2): 167-182.

[12] Yuan S H, Tian M, Lu X H. Electrokinetic movement of hexachlorobenzene in clayed soils enhanced by Tween 80 and β -cyclodextrin [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(2): 1218-1225.

[13] Shih Y H, Hsu C Y, Su Y F. Reduction of hexachlorobenzene by nanoscale zero-valent iron: Kinetics, pH effect, and degradation mechanism [J]. Separation and Purification Technology, 2011, 76(3): 268-274.

[14] Miyoshi K, Nishio T, Yasuhara A, et al. Detoxification of hexachlorobenzene by dechlorination with potassium-sodium alloy [J]. Chemosphere, 2004, 55(11): 1439-1446.

[15] Zacheis G A, Gray K A, Kamat P V. Radiation induced catalytic dechlorination of hexachlorobenzene on oxide surfaces [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2001, 105(20): 4715-4720.

[16] Nowakowska M, Szczubialka K. Photosensitized dechlorination of polychlorinated benzenes. 1. Carbazole-photosensitized dechlorination of hexachlorobenzene [J]. Chemosphere, 1999,

- 39(1): 71-80.
- [17] Lu M C, Anotai J, Liao C H, *et al.* Dechlorination of hexachlorobenzene by zero-valent iron[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2004, **8** (2): 136-140.
- [18] 曲传阳, 贾凌云. 六氯苯环境清除技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(22): 6895-6897, 6899.
- [19] 陈朱蕾, 蔡新美, 张文静, 等. 六氯苯厌氧降解菌的筛选及其降解能力的研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2006, **28**(6): 548-551.
- [20] 瞿福平, 张晓健, 何苗, 等. 氯苯类同系物共基质条件下相互作用研究[J]. 环境科学, 1998, (4): 52-55.
- [21] 瞿福平, 张晓健, 何苗, 等. 氯苯驯化污泥中氯苯类同系物共存对氯苯生物降解影响[J]. 中国环境科学, 1998, **18** (3): 202-205.
- [22] Yuan S Y, Su C J, Chang B V. Microbial dechlorination of hexachlorobenzene in anaerobic sewage sludge [J]. Chemosphere, 1999, **38**(5): 1015-1023.
- [23] Brahushi F, Dörfler U, Schroll R, *et al.* Stimulation of reductive dechlorination of hexachlorobenzene in soil by inducing the native microbial activity [J]. Chemosphere, 2004, **55** (11): 1477-1484.
- [24] Jayachandran O, Goerisch H, Adrian L. Dehalorespiration with hexachlorobenzene and pentachlorobenzene by *Dehalococcoides* sp. strain CBDB1 [J]. Archives of Microbiology, 2003, **180** (6): 411-416.
- [25] 周德庆. 微生物学教程[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2002. 144-166.
- [26] 段晓芹, 郑金伟, 张隼, 等. 3-PBA 降解菌 BA3 的降解特性及基因工程菌构建[J]. 中国环境科学, 2011, **32**(1): 240-246.
- [27] 高明军, 林聪, 张世湘, 等. 玉米秸秆的二相生物转化法降解及其优化条件的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23** (3): 594-598.
- [28] 周晓宏, 陈洪章, 李佐虎. 固态发酵中纤维素基质降解过程初步研究[J]. 过程工程学报, 2003, **3**(5): 447-452.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd (II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe (II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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