

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

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

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征

潘峰¹, 王利利¹, 赵浩², 尤奇中¹, 刘林¹

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 新乡 453007; 2. 南京工业大学环境学院, 南京 210009)

摘要: 为了解有机氯农药生产企业搬迁遗留场地土壤的污染状况, 于 2010 年 11 月对原新乡市某林丹生产企业搬迁遗留场地进行了调研, 采用索氏提取-气相色谱-电子捕获检测器(SE-GC-ECD)法对其污染土壤中六六六(HCH)进行分析检测。结果表明, 在所有采样点位中, 六六六的 4 种异构体的检出率均为 100%。0~20 cm 表层土壤中六六六的浓度变化具有波动性, 总残留量($\sum$ HCH)范围在 0.034 3~19.560 8 mg·kg⁻¹; 前后院中心 0~80 cm 垂向土壤中六六六浓度随土壤深度的增加呈现先增加后减小的趋势, 总残留量($\sum$ HCH)范围在 0.031 3~0.294 7 mg·kg⁻¹。通过对污染物的组成分析发现, 4 种异构体的含量顺序符合 β -HCH > δ -HCH > γ -HCH > α -HCH, β -HCH 异构体的平均含量在 50% 左右, 远远高于其它异构体的含量, 表明该场地并没有新的六六六输入。采用《土壤环境质量标准(GB 15618-1995)》对污染场地土壤残留六六六进行风险评价, 结果表明, 经过十几年的降解, 大部分采样点位六六六的污染浓度(67.9%)低于土壤环境质量二级标准 0.5 mg·kg⁻¹, 处于安全级别, 厂区后院西部及东部靠近生产车间的土壤污染仍较为严重, 超出土壤环境质量三级标准(1.0 mg·kg⁻¹)1.5~20 倍, 存在较大的安全隐患和风险。

关键词: 六六六; 污染土壤; 残留特征; 组成分析; 风险评价

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)02-0705-07

Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise

PAN Feng¹, WANG Li-li¹, ZHAO Hao², YOU Qi-zhong¹, LIU Lin¹

(1. Key Laboratory for Yellow River and Huaihe River Water Environmental and Pollution Control, Ministry of Education, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. College of Environment, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to study the soil pollution status of the fields left by organochlorine pesticide manufacturing enterprises, soils from a former lindane production enterprise of Xinxiang were investigated in November, 2010. A soxhlet extraction-gas chromatography-electron capture detector (SE-GC-ECD) method was used to detect the HCH residues in the contaminated soil samples. Results showed that the detection rate of the four HCHs isomers in each sampling site was 100%. In the 0-20 cm topsoil, concentrations of HCH residues ($\sum$ HCH) changed with volatility, ranging from 0.034 3 to 19.560 8 mg·kg⁻¹. In the soil layer at 0-80 cm depth and around the center point, concentrations of HCH residues ($\sum$ HCH) first increased and then reduced while the soil depth increased, varying from 0.031 3 to 0.294 7 mg·kg⁻¹. Analysis of HCH composition showed that concentrations of the four isomers were in the order of β -HCH > δ -HCH > γ -HCH > α -HCH. The average percentage of β -HCH isomer was approximately 50%, which was obviously higher than those of the other isomers, indicating that there was no recent input of HCH. The results showed that over the recent decades, the HCH level in most of the soil samples (67.9%) were below the residue criterion of 0.5 mg·kg⁻¹ of the China Soil Environmental Quality Standard (GB 15618-1995), indicating that they were safe. However, soil samples in western and eastern parts of backyard near the production plant were still seriously contaminated, the HCH concentrations in which were 1.5-20 times higher than the residue criterion of 1.0 mg·kg⁻¹ of the China Soil Environmental Quality Standard, causing great potential safety hazard to human and environment.

Key words: HCH; contaminated soil; residue characteristics; composition analysis; risk assessment

有机氯农药于 20 世纪 40 年代开始大规模生产, 由于其低廉的价格及良好的杀虫效果, 在全球范围内得到了广泛的应用^[1]。在我国, 截至 1983 年有机氯农药被禁止使用时, 生产的六六六总量高达 490 万 t, 滴滴涕总量约 40 万 t^[2], 分别占全世界生产总量的 33% 和 20%^[3,4]。尽管大部分有机氯农药

收稿日期: 2012-04-25; 修订日期: 2012-07-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(SQ2009AA06XK1482460); 江苏省科技厅基础 research 计划重点项目(BK2010084); 河南省科技厅基础与前沿技术研究项目(122300410289); 河南省科技厅软科学研究项目(102400440070)

作者简介: 潘峰(1969~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境科学, E-mail: fengpan@htu.cn

已经禁用近 30 年,但其在土壤环境中仍有广泛的残留^[5-13],特别是在有机氯生产企业遗留场地的土壤中,有机氯农药的残留浓度更高。

据不完全统计,全国有机氯农药(滴滴涕、六六六、氯丹、灭蚁灵等)污染场地有数百个。丛鑫等^[14]研究了某农药厂表层土壤中的 HCH 和 DDT 污染状况,大多数点位的浓度超过荷兰相关健康标准,即使经过 20 多年的降解,厂区土壤污染依然非常严重。李常亮等^[15]检测了某 HCH 生产企业土壤中的 HCH 残留, $\sum$ HCH 值最大为 $271.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远高于国内外标准。赵娜娜等^[16]研究了多年生产 DDT 的企业厂区内及周围土壤 DDT 的空间分布规律,结果表明生产厂区污染严重,生产车间周围的表层土壤中 DDT 含量高达 $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。但针对林丹生产企业遗留场地土壤中六六六残留特征的报道较少,且我国从 1990 年开始又恢复了对林丹的限制注册使用^[17,18]。为了解林丹污染的特征及其独特性,本研究针对某林丹生产企业搬迁遗留场地中的污染土壤,采用索氏提取及柱层析法进行前处理,经 GC-ECD 分析测定,了解该场地六六六的残留分布特征及污染来源,并对土壤中残留的六六六(HCH)进行风险评价^[19],以期为此类污染场地的实地土壤修复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 主要仪器与试剂

气相色谱仪(7890A, Agilent), 色谱柱为 DB-624 石英毛细管色谱柱($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 1.40 \mu\text{m}$); 旋转蒸发仪(RE-52, 上海亚荣生化仪器厂); 数显恒温水浴锅(HH-2, 金坛市科析仪器有限公司); 聚四氟乙烯层析柱($10 \text{ mm i. d.} \times 200 \text{ mm}$)。

六六六的 4 种混标(α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH, $10 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ in Cyclohexane)购于百灵威科技有限公司; 正己烷(HPLC 级, J&K Chemical LTD); 正己烷(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 丙酮(分析纯, 洛阳昊华化学试剂公司); 二氯甲烷(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 无水硫酸钠(分析纯, 天津市东丽区天大化学试剂厂); 硅胶(色谱层析用试剂, 200~300 目, 青岛海洋化工厂)。

1.2 样品采集

所选研究对象为某林丹粉生产企业搬迁遗留场地, 原林丹粉生产车间位于现厂区东北角, 林丹粉生产车间和林丹粉仓库地面均用水泥硬化, 四周窗户也用水泥封上, 现作为仓库使用。采样区域选择原林

丹粉生产车间前后院的空地(见图 1), 采用网格布点法, 在两条直线的交点处, 用铁铲采集 0~20 cm 的表层土壤, 并在前后院中心点 QDZ2、DZ2 处分别采集深层 20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 土壤样品, 记作 QDZ4、QDZ6、QDZ8、DZ4、DZ6、DZ8; 后院西中部位置从上至下依次为落叶层、煤灰层、土壤 0~20 cm 层, 分别采集样品, 记作 XZ1、XZ2、XZ3, 西南位置已挖出深坑, 被垃圾石块填埋, 不作为取样点。所采集样品装入聚乙烯样品袋中, 带回实验室。样品在室内自然风干后, 用药碾碾碎, 除去碎石, 砂砾及植物残体等杂质, 用四分法分取所需土样量, 过 200 目(0.071 mm)筛子, 装入样品袋, 于 -20°C 冰箱中存放。

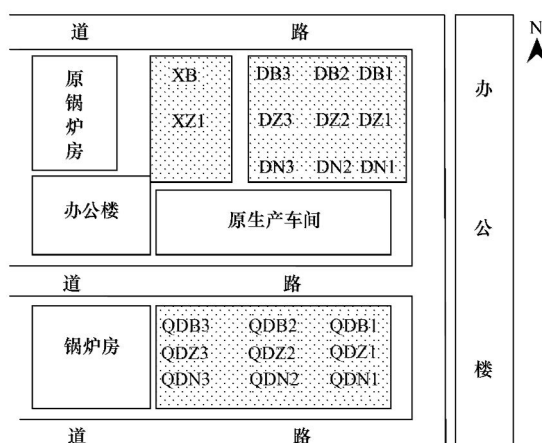


图 1 厂区采样布置示意

Fig. 1 Map of the factory and sampling sites

1.3 样品分析

准确称取 2.000 g 土壤样品, 加入 2 g 无水硫酸钠, 充分混匀后置于索氏提取器滤纸套筒中, 加入正己烷-丙酮(体积比 1:1)的混合溶剂 150 mL , 沸石数粒, 于 60°C 水浴加热, 自第一次回流开始计时, 连续抽提 24 h 。提取液经旋转蒸发浓缩至 1 mL , 加入 10 mL 正己烷后, 再次浓缩至 1 mL 。浓缩后的提取液经层析柱净化, 正己烷-二氯甲烷(体积比 1:1)混合溶剂 35 mL 淋洗。收集洗脱液, 旋转蒸发浓缩至 1 mL , 加入 10 mL 正己烷后, 再次浓缩至 1 mL , 轻柔氮气吹干, 用色谱纯正己烷定容, 待测定。

六六六的分析测定采用 Agilent 7890A 气相色谱仪, 配有 μ -ECD 检测器, 高纯氮气($>99.999\%$)为载气, 载气流速为 $2.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

色谱条件为: 进样口温度 250°C ; 检测器温度 300°C 。起始温度 120°C , 以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率升温至 220°C , 保持 10 min , 再以 $5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率升温

至 250℃,保持 25 min. 采用无分流进样方式,进样量为 1.0 μL.

1.4 质量控制

1.4.1 标准工作曲线

本实验通过外标峰面积法定量,保留时间定性. 将六六六的混合标准储备液分别配制成一系列浓度

为 0.005、0.01、0.05、0.2、0.5 mg·L⁻¹ 的标准工作液,以色谱峰面积(*Y*)对浓度(*X*)作线性回归方程,得出六六六的 4 种异构体的线性方程,线性范围及相关系数 *R*² (见表 1). 在 0.005 ~ 0.5 mg·L⁻¹ 范围内,各异构体的线性关系良好,所测样品的浓度均在线性范围内,符合测定要求.

表 1 各异构体的线性范围、线性方程及 *R*²

Table 1 Linear range, linear equation and <i>R</i> ² of each isomer			
农药	线性范围/mg·L ⁻¹	线性方程	<i>R</i> ²
α-HCH	0.005 ~ 0.5	<i>Y</i> = 76 554 <i>X</i> - 378. 59	0. 999 5
β-HCH	0.005 ~ 0.5	<i>Y</i> = 42 538 <i>X</i> - 135. 89	0. 999 5
γ-HCH	0.005 ~ 0.5	<i>Y</i> = 95 459 <i>X</i> - 340. 48	0. 998 9
δ-HCH	0.005 ~ 0.5	<i>Y</i> = 96 041 <i>X</i> - 534. 59	0. 999 5

1.4.2 仪器检出限

取仪器信噪比(*S/N*)为 3 时对应的样品浓度作为实验浓度(0.85 μg·L⁻¹),精确配制 8 个该浓度的标样,重复测定 8 次,用标准曲线定量,并计算这 8 次测定的标准偏差(*S*),仪器检出限(*IDL*) = 3.00*S*^[20]. 六六六的 4 种异构体 α-HCH、β-HCH、γ-HCH、δ-HCH 的仪器检出限均为 0.3 μg·L⁻¹. 实际样品中六六六含量均在检出限以上,符合痕量物质的检测方法要求.

1.4.3 方法精密度

对六六六工作曲线两端点的浓度值 0.005 mg·L⁻¹、0.5 mg·L⁻¹ 的混合标样分别平行测定 6 次,按峰面积来计算相对标准偏差,*RSD* 均在 4% 以

下,具有良好的精密度,符合测定要求. 分析过程中,随机插入标准样品,各指标重复分析结果的相对误差均小于规定要求,满足误差要求.

1.4.4 加标回收率

准确称取同一土壤样品 6 份,分别加入一定量标准品溶液(α-HCH、β-HCH、γ-HCH、δ-HCH 均为 1 000 mg·L⁻¹ 的单个标准溶液),3 个添加水平(添加水平 I 1.5 μg·g⁻¹;添加水平 II 2.5 μg·g⁻¹;添加水平 III 15 μg·g⁻¹),每个添加水平 2 份,按 1.3 节的方法对样品进行分析测定,计算回收率及相对标准偏差,结果见表 2. 在不同的基质加标浓度下,各异构体的回收率范围均在 85% ~ 120% 之间,相对标准偏差均在 20% 以下,符合测定要求.

表 2 各异构体的加标回收率及 *RSD*

农药	回收率/%			平均回收率/%	<i>RSD</i> /%
	I	II	III		
α-HCH	89. 74	71. 46	93. 83	85. 01	14. 01
β-HCH	112. 56	112. 3	85. 25	103. 37	12. 4
γ-HCH	125. 84	116. 05	84. 54	108. 81	16. 19
δ-HCH	125	143. 8	98. 45	122. 42	18. 61

2 结果与讨论

2.1 表层土壤中六六六的残留分布特征

取自某林丹生产企业搬迁遗留场地表层土壤的 22 个样品,经前处理后,采用 GC-ECD 法分析测定,其结果列于表 3.

由表 3 可知,所有采样点中六六六的 4 种异构体含量差别较大,表层土壤样品中六六六的总残留量(∑HCH)范围在 0.034 3 ~ 19.560 8 mg·kg⁻¹,4 种异构体 α-HCH、β-HCH、γ-HCH、δ-HCH 的检出率均为 100%. 采样区域中,六六六总残留量

(∑HCH)浓度高于 1.0 mg·kg⁻¹ 的占 18% 左右,集中在后院西部采样区及东部靠近原生产车间的中部采样点. 从污染范围看,高浓度污染区域只占场区面积的很小一部分,受污染场地很集中. 主要原因是:当年生产林丹时原料储备和产品存放条件非常简陋,从外地批量购进的林丹原粉大多采用麻袋包装,生产的产品用纸袋包装,通常这些原药和成品会堆放在生产车间西部的空地或靠近厂房堆放. 由于包装材料及存放条件的限制,会造成某些包装的破损,使部分农药混入土壤,造成较严重的残留和污染. 另外,剂粉类农药在生产 and 包装过程中产生的含

表3 研究场地表层土壤中六六六含量¹⁾/mg·kg⁻¹
Table 3 HCH contents in top soils of the study site/mg·kg⁻¹

采样点	α -HCH	β -HCH	γ -HCH	δ -HCH	$\sum$ HCH
DB1	0.007 9	0.030 2	0.008 7	0.014 1	0.060 9
DB2	0.012 6	0.054 4	0.021 9	0.024 8	0.113 7
DB3	0.008 1	0.023 8	0.013 1	0.014 5	0.059 5
DZ1	0.029 3	0.046 8	0.064 6	0.032 6	0.173 2
DZ2	0.011 9	0.034 7	0.012 0	0.018 4	0.077 0
DZ3	0.017 3	0.072 9	0.091 9	0.042 8	0.224 9
DN1	0.008 5	0.075 4	0.013 7	0.016 9	0.114 5
DN2	2.077 4	1.260 7	0.482 9	12.145 7	15.966 8
DN3	0.066 3	0.169 7	0.015 3	0.061 9	0.313 2
XB	1.560 0	15.924 9	0.784 8	1.291 1	19.560 8
XZ1	0.066 7	0.157 5	0.054 4	1.259 3	1.537 9
XZ2	0.150 3	2.047 4	0.212 9	0.217 0	2.627 6
XZ3	0.230 1	2.156 0	0.072 0	0.337 5	2.795 6
QDB1	0.009 5	0.070 6	0.083 7	0.015 6	0.179 4
QDB2	0.006 5	0.049 6	0.009 3	0.013 3	0.078 7
QDB3	0.006 8	0.074 4	0.008 9	0.013 5	0.103 7
QDZ1	0.010 9	0.040 2	0.007 2	0.011 7	0.070 0
QDZ2	0.006 5	0.048 8	0.006 9	0.011 7	0.073 8
QDZ3	0.005 8	0.037 6	0.005 5	0.010 9	0.059 9
QDN1	0.006 2	0.017 3	0.006 5	0.013 4	0.043 3
QDN2	0.005 0	0.016 1	0.004 5	0.008 7	0.034 3
QDN3	0.007 1	0.024 8	0.005 0	0.008 7	0.045 7

1) 表中黑体表示浓度超出 GB 15618-1995 土壤环境质量三级标准

有污染物的粉尘也会随风扩散到场区地面,沉降在土壤中,造成污染。

表层土壤中六六六的浓度变化具有波动性,总含量($\sum$ HCH)超出 1.0 mg·kg⁻¹的点位分别是 DN2、XB、XZ1(落叶层),XZ2(煤灰层),XZ3(表层土壤),其中,XB 点浓度高达 19.560 8 mg·kg⁻¹,DN2 浓度为 15.966 8 mg·kg⁻¹,XZ1 浓度为 1.537 9 mg·kg⁻¹,XZ2 浓度为 2.627 6 mg·kg⁻¹,XZ3 表层土壤浓度为 2.795 6 mg·kg⁻¹。西部中间位置六六六含量低于北部,可能是由于北部靠近道路,曾作为原料和林丹的装卸点,更容易有农药的散落。且中间位置有大量的落叶和灰分,与其它取样位置土壤成分不同,可能其中某些物质造成了六六六的降解和转化。但前院土壤中 4 种异构体的含量普遍低于后院,说明前院当时并没有大量或者长久存放原料或产品,残留浓度较低。

2.2 深层土壤中六六六的残留分布特征

取自污染场地前后院中心处的深层土壤样品,经提取净化后测定,其结果列于图 2~3。

由图 2~3 可知,0~80 cm 垂向土壤中六六六的总残留量($\sum$ HCH)范围在 0.031 3~0.294 7 mg·kg⁻¹,4 种异构体皆有检出。六六六在后院场区

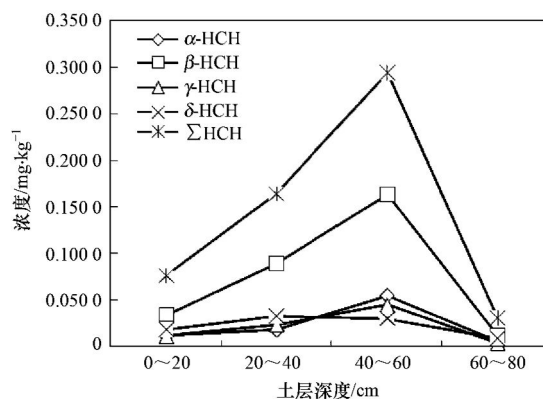


图2 后院土壤六六六垂向分布特征

Fig. 2 Vertical distribution features of HCH in soils of the backyard

土壤中垂向浓度随深度增加呈现先增大后减小的趋势,0~60 cm 含量逐渐增加,60~80 cm 含量急剧下降,在 40~60 cm 深的土壤层中含量最高。前院土壤六六六垂向浓度随深度增加先减小后增大,之后又呈下降趋势,推测可能是由于前院人为活动较多,用地情况复杂,对六六六的浓度存在一定的人为扰动现象,但是前后院土壤中六六六均在 40~60 cm 深的土壤层中含量最高。这是由于六六六在土壤中具有一定的垂向迁移性,随着土壤深度逐渐迁移转化,但其迁移的局限性,使污染物主要沉积在 40~60 cm 深度土壤层。

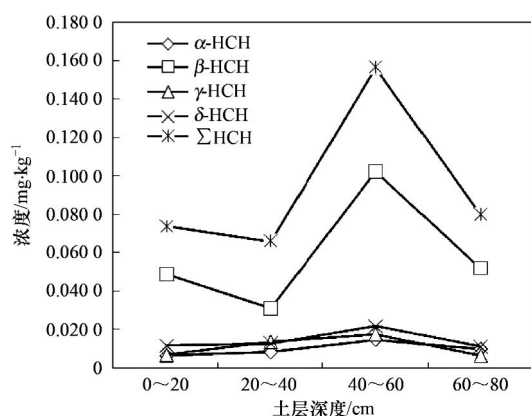


图3 前院土壤六六六垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution features of HCH in soils of the forecourt

余世清等^[21]对杭州某农药厂废弃场地土壤及纳污河道底泥中HCH进行分析,结果表明,60~100 cm层土壤中六六六浓度最高,呈明显的垂直迁移特性.本研究中HCH浓度在40~60 cm土层最高,由此可以推断,HCH的迁移与土壤类型、降雨频率等因素有关,南方雨水丰富,雨水的淋溶作用能有效地促进六六六向深层土壤迁移,土壤结构也会影响六六六的迁移能力,本实验场地土壤为黏土,吸附能力较强,阻碍了HCH随水分的深度迁移.

2.3 污染土壤中六六六的组成分析

由图4~6可知,4种异构体的含量顺序大体上符合 $\beta\text{-HCH} > \delta\text{-HCH} > \gamma\text{-HCH} > \alpha\text{-HCH}$,但后院采样点DN2及XZ1处 $\delta\text{-HCH}$ 异构体含量最高,推测可能是由于DN2采样点靠近原生产车间且曾长期堆放生产原料和成品,其中的外源杂质组分扰动了六六六的降解及转化,XZ1处是厚实的落叶堆积层,其中的有机组分异于土壤类型,吸附性能大有差异,致使各异构体的残留不同,也可能是由于林丹污染的独特性造成,具体机制有待进一步研究.所有采样点中 $\beta\text{-HCH}$ 异构体的平均百分含量在50%左右,远远高于其它异构体,这主要是由 $\beta\text{-HCH}$ 异构体的特殊结构及性质决定的, $\beta\text{-HCH}$ 异构体的所有氯原子全部位于分子的平伏键上,具有极强的结构对称性,分子活化能较低.另外, $\beta\text{-HCH}$ 异构体的辛醇-水分配系数高于其它异构体,且蒸汽压较低,以上所述性质使其与土壤有机质结合的能力更强,也更容易吸附在土壤有机质中,因此能够稳定存在于土壤中,降解速率远远小于其它异构体^[8].Wang等^[22]认为土壤中六六六的降解速率为 $\beta\text{-HCH} < \delta\text{-HCH} < \gamma\text{-HCH} < \alpha\text{-HCH}$,土壤中六六六含量与其自身的降解速率及土壤结合能力密切相关,与本实验研究结果

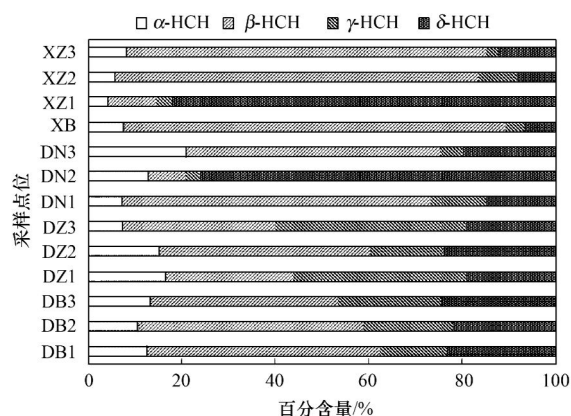


图4 后院表层土壤中六六六的组成

Fig. 4 Compositions of HCH in top soils of the backyard

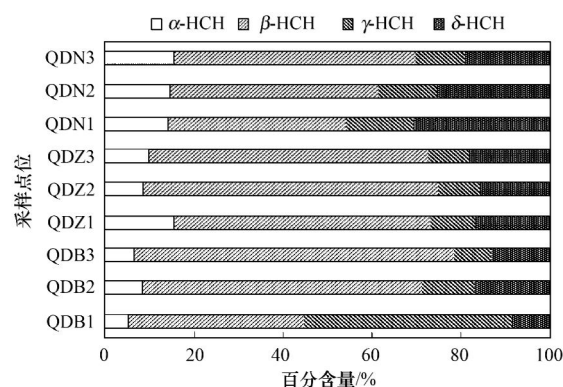


图5 前院表层土壤中六六六的组成

Fig. 5 Compositions of HCH in top soils of the forecourt

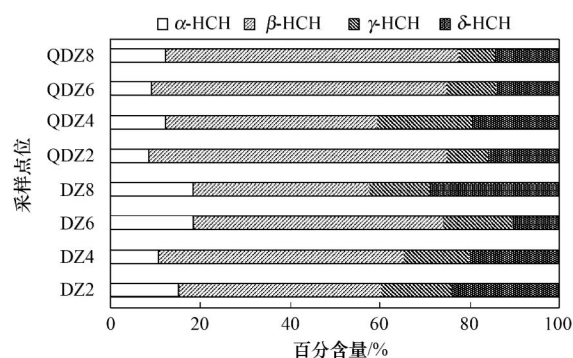


图6 垂直土壤中六六六的组成

Fig. 6 Compositions of HCH in vertical soils

一致.由于工业用地土壤缺乏翻耕,微生物含量较低,只能靠光解、淋溶等自然条件对六六六进行降解和转化,其长期风险值得关注.

$\beta\text{-HCH}$ 异构体性质比其它异构体稳定,在土壤环境中最难降解; $\gamma\text{-HCH}$ 异构体最不稳定,可被微生物降解,并通过光化学反应转化成 $\alpha\text{-HCH}$, $\alpha\text{-HCH}$ 能在微生物作用下转化成 $\beta\text{-HCH}$ ^[23].所以 $\beta\text{-HCH}$ 异构体在土壤中浓度最高,含量远远高于其它

异构体.在六六六的异构体中,仅 γ -HCH 具有杀虫功效,但由于 γ -HCH 在土壤中吸附系数较低,水溶性较高,使得在土壤中 γ -HCH 异构体的质量分数相对较低^[24].但由于所选场地原来是生产林丹的车间,林丹粉在生产、包装、储存及运输过程中的外泄和散落,造成土壤中林丹的大量输入,虽经过几十年的转化降解,其浓度仍然高于 α -HCH 异构体的含量.

阳文锐等^[25]对某主要生产六六六和滴滴涕的废弃工业场地进行调研,结果表明,HCH 的 4 种异构体含量为 β -HCH > α -HCH > γ -HCH > δ -HCH; 丛鑫等^[14]对某有机氯农药生产企业搬迁遗留场地表层土壤中六六六进行检测,结果表明,HCH 异构体含量顺序大体为 β -HCH > α -HCH > δ -HCH > γ -HCH; 李常亮等^[15]对某 HCH 生产企业污染土壤进行研究,结果表明,HCH 的 4 种异构体含量符合 β -HCH > γ -HCH > α -HCH > δ -HCH. 本实验结果中, δ -HCH 异构体含量在 20% 左右,远高于他们的结果,可能是由于林丹粉生产原料、工艺的独特性及地理空间的差异造成.由于以往研究中对 δ -HCH 异构体的关注较少,且我国林丹禁用时间较短,因此,对此类废弃场地中六六六的残留特征及风险评价应予以特别重视及进一步研究.

2.4 污染土壤中六六六的来源分析

在污染土壤中,林丹可以通过分解或生物转化等途径转化为其它六六六的异构体,林丹在表层土壤中的半衰期受土壤类型的影响,但平均为 2 个月^[26].刘晨等^[6]研究表明,如果土壤样品中 γ -HCH 异构体含量占绝对优势,表明污染场地有新的六六六输入.由图 7 可知,在表层与深层土壤中,质量分数最高的均是 β -HCH 异构体,所有采样区域中 γ -HCH 异构体含量均不占主导优势,说明该遗留场地

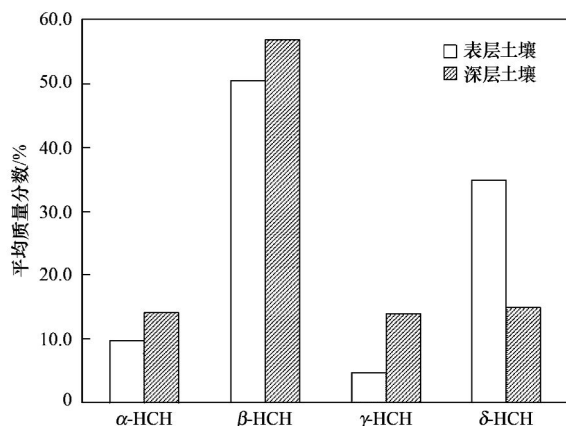


图 7 不同土层的六六六质量分数

Fig. 7 Mass fraction of HCH isomers in different soil profiles

并没有新的六六六输入源,所残留六六六均为原来林丹生产时所造成的污染.

2.5 污染土壤中六六六的风险评价

采用文献[19]各级标准值(表 4),对污染场地土壤中残留六六六进行风险评价.

表 4 土壤环境质量标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Soil Environmental Quality Standard/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
级别	$\sum$ HCH	评价适用范围
一级	≤ 0.05	国家自然保护区、集中式生活饮用水源地及其它保护地区的土壤
二级	≤ 0.5	一般农田蔬菜地、果园、茶园等土壤
三级	≤ 1.0	林地土壤及污染物容量较大的高背景值土壤和矿产地附近的农田土壤(蔬菜地除外)

由表 5 可知,所有采样点中, $\sum$ HCH $\leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样品有 4 个,满足土壤环境质量一级标准,合格率为 14.3%; $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} < \sum$ HCH $\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样品有 19 个,满足土壤环境质量二级标准,合格率为 67.9%; $\sum$ HCH $> 1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样品有 5 个,超出土壤环境质量三级标准,分别为后院东部采样点 DN2 及西部采样点 XB、XZ1、XZ2、XZ3,污染极为严重,对人体和环境存在较大的安全隐患和风险,需加强对其的治理和修复力度.其它大部分采样点位的六六六浓度均在土壤环境质量的限制值($0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)以下,较为安全.前院整体污染较轻,远离生产车间的南部采样点六六六浓度均在 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,属于清洁区域.

表 5 土壤样品中六六六的含量分布

Table 5 HCH content distribution in soils		
$\sum$ HCH / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	样品数/个	比例/%
0 ~ 0.05	4	14.3
0.05 ~ 0.5	19	67.9
0.5 ~ 1.0	0	0
> 1.0	5	17.8
累计	28	100

后院土壤的污染较为严重,是由于曾经长期堆放原料和林丹成品等原因造成的,而且,后院环境较为偏僻,缺乏人为活动的参与,土壤缺乏翻动,微生物活性较弱,污染物残留多降解少,造成了较为严重的环境遗留问题,亟待治理.可以通过种植植物等方式,对污染土壤进行修复,具有较好修复作用的常见植物有玉米、向日葵、芥菜、烟草、大豆等^[27].

3 结论

(1) 所有采样点位中,六六六的 4 种异构体

α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH 皆有检出。

(2) 0~20 cm 表层土壤中六六六浓度变化具备波动性, 厂区后院西部及东部靠近生产车间土壤污染严重, 残留浓度最高达到 $19.5608 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3) 0~80 cm 垂向土壤中六六六浓度随深度增加呈现先增大后减小的趋势, 在 40~60 cm 深的土壤层中含量最高。

(4) 六六六的 4 种异构体含量顺序符合 β -HCH > δ -HCH > γ -HCH > α -HCH, β -HCH 异构体占据主导优势, 表明该遗留场地土壤中六六六均为历史遗留, 没有新的污染源输入。

(5) 前院及后院远离生产车间土壤中六六六的含量均在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 低于土壤环境质量二级标准, 属于较为安全的区域。后院西部所有采样点位及东部靠近厂房的采样点, 六六六的残留浓度远远超出了土壤环境质量三级标准 ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 污染较为严重, 对人体存在极大的潜在风险。

致谢: 感谢南京工业大学环境学院徐炎华老师课题组的帮助和资金支持! 感谢耿秋娟、白宇航等同学在采样和实验方面的帮助!

参考文献:

- [1] 游远航, 祁士华, 叶琴, 等. 土壤环境有机氯农药残留的研究进展[J]. 资源与环境工程, 2005, **19**(2): 115-119.
- [2] Li J, Zhang G, Qi S H, *et al.* Concentrations, enantiomeric compositions, and sources of HCH, DDT and chlordane in soils from the Pearl River Delta, South China[J]. Science of the Total Environment, 2006, **372**(1): 215-224.
- [3] Hua X M, Shan Z J. Production and application of pesticides and factor analysis for their pollution in environment in China[J]. Advanced Environment Science, 1996, **2**(3): 33-45.
- [4] Fu J M, Mai B X, Sheng G Y, *et al.* Persistent organic pollutants in environment of the Pearl River Delta, China: an overview[J]. Chemosphere, 2003, **52**(9): 1411-1422.
- [5] 蒋煜峰, 王学彤, 孙阳昭, 等. 上海市城区土壤中有机氯农药残留研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 409-414.
- [6] 刘晨, 陈家玮, 杨忠芳. 北京郊区农田土壤中滴滴涕和六六六地球化学特征研究[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 82-89.
- [7] 赵炳梓, 张佳宝, 朱安宁, 等. 黄淮海地区典型农业土壤中六六六(HCH)和滴滴涕(DDT)的残留量研究——I. 表层残留量及其异构体组成[J]. 土壤学报, 2005, **42**(5): 761-768.
- [8] 赵炳梓, 张佳宝, 朱安宁, 等. 黄淮海地区典型农业土壤中六六六(HCH)和滴滴涕(DDT)的残留量研究——II. 空间分布及垂直分布特征[J]. 土壤学报, 2005, **42**(6): 916-922.
- [9] 杨国义, 万开, 张天彬, 等. 广东省典型区域农业土壤中六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)的残留及其分布特征[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 113-117.
- [10] 吴志昇, 谢光炎, 杨国义, 等. 广州市农业土壤中六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)的残留特征[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1256-1260.
- [11] 刘宜, 黄成敏. 土壤残留滴滴涕、六六六的人群健康风险评估——以江苏省无锡市为例[J]. 环境监测管理与技术, 2009, **21**(4): 17-22.
- [12] 周晓燕, 崔兆杰. 土壤及果树中 HCH 和 DDT 残留及分布规律研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(5): 62-65.
- [13] 张翠菊, 王海琰, 李星华. 浅析农药环境污染与防治措施[J]. 江苏环境科技, 2008, **21**(S1): 145-146.
- [14] 丛鑫, 薛南冬, 梁刚, 等. 某有机氯农药企业搬迁遗留场地表层土壤中污染物残留特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(3): 850-854.
- [15] 李常亮, 刘文彬, 汪莉, 等. 典型污染场地六六六残留特征分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 809-813.
- [16] 赵娜娜, 黄启飞, 王琪, 等. 滴滴涕在我国典型 POPs 污染场地中的空间分布研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(10): 1669-1674.
- [17] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [18] 江孝焯, 李瑞琴, 江希流. 施用林丹跟踪监测研究[J]. 农业环境保护, 1994, **13**(6): 252-255.
- [19] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [20] EPA SW-846, Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (third edition)[S].
- [21] 余世清, 唐伟, 王泉源. 某农药厂废弃场地六六六和滴滴涕污染状况初探[J]. 环境科技, 2011, **24**(1): 48-52.
- [22] Wang X J, Piao X Y, Chen J, *et al.* Organochlorine pesticides in soil profiles from Tianjin, China[J]. Chemosphere, 2006, **64**(9): 1514-520.
- [23] Wu W Z, Xu Y, Schramm K W, *et al.* Study of sorption, biodegradation and isomerization of HCH in stimulated sediment/water system[J]. Chemosphere, 1997, **35**(9): 1887-1894.
- [24] 魏中青, 刘丛强, 梁小兵, 等. 贵州红枫湖地区水稻土多氯联苯和有机氯农药的残留[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 255-260.
- [25] 阳文锐, 王如松, 李锋. 废弃工业场地有机氯农药分布及生态风险评估[J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5454-5460.
- [26] 胡望钧. 常见有毒化学品环境事故应急处置技术与监测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993: 24-25.
- [27] Anderson T A, Coats J R. Bioremediation through rhizosphere technology[M]. Washington, DC: American Chemical Society, 1993: 71-157.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i>	(810)

《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2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 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