

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, 周跃飞, 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)

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, 辛术贞, 苏德纯*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 通过盆栽试验研究不同镉污染土壤上分别连作3茬玉米和菜豆, 根茬连续还田后对后茬作物生长、镉吸收及土壤中镉赋存形态的影响。结果表明, 两种镉污染土壤上分别连作3茬菜豆和玉米, 根茬累计还田量占土壤质量的0.4%~1.1%, 通过根茬累计还田的镉占土壤全镉的1.3%~3.5%。玉米和菜豆根茬连续还田对后茬大白菜和冬小麦生长均无显著影响, 但在镉污染土壤上根茬连续还田后显著增加了后茬大白菜地上部镉含量。根茬连续还田对后茬小麦吸收镉无影响。根茬连续还田增加了土壤轻组有机质含量和模拟镉污染土壤中轻组有机质中镉占土壤全镉的比例。镉污染土壤连续还田玉米根茬后土壤碳酸盐结合态镉含量显著降低, 在模拟镉污染土壤上菜豆根茬连续还田显著降低了土壤交换态镉含量, 根茬连续还田增加了土壤中氧化物结合态镉含量。

关键词: 镉; 土壤; 根茬; 形态; 生物有效性

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0685-07

Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return

ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, SU De-chun

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Pot experiments were conducted under greenhouse condition to investigate the effects of crop root return on succeeding crops growth, Cd uptake and soil Cd speciation in Cd-contaminated soil and artificial Cd-contaminated soil. The results showed that the amount of root residue returned to soil by corn and kidney bean growth successive for 3 times was 0.4%-1.1%. The Cd returned to soil by root residue was 1.3%-3.5% to the total soil Cd. There was no significant difference in the shoot dry weights of winter wheat and Chinese cabbage grown on the 2 Cd-contaminated soils with and without root return. While Cd concentration of Chinese cabbage increased significantly in the Cd-contaminated soil with corn or kidney bean root return. Light fraction of soil organic matter increased with root return in both of the Cd-contaminated soils. The percentage of Cd in the light fraction of soil organic matter increased with root return in the artificial Cd-contaminated soil. Soil carbonates-bound Cd concentration decreased significantly with corn root return in the Cd-contaminated soil. Soil exchangeable Cd concentration decreased and soil Fe-Mn oxide-bound Cd concentration increased significantly with kidney bean root return in the artificial Cd-contaminated soil.

Key words: cadmium; soil; crop root; speciation; availability

重金属污染农田土壤上种植的大部分农作物, 根系中重金属的含量高于茎叶中重金属含量, 茎叶中重金属含量又高于籽粒中重金属含量, 收获作物时人们一般只取走籽粒和部分秸秆而根茬存留归还给土壤, 因此, 每季作物以根残茬形式存留在土壤中的有机物量相当可观。研究表明, 农田细根碳年累积量平均可达 $1.07 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ [1]。赵步洪等 [2] 研究表明, 镉污染土壤上杂交水稻吸收的镉90%以上分布在根中, 且根中镉的含量一般为土壤中镉含量的5~10倍, 杂交水稻根干重一般都大于 $2.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [3], 这表明在镉污染水稻田中, 每茬水稻收获后相当于有 $2.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的含有高于土壤镉含量5~10倍的根茬赋存于土壤中。玉米吸收的镉在根中的比例也占其总吸收量的77%~90% [4]。姜丽娜等 [5]

研究表明, 土壤镉含量为 $1.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的麦田, 小麦根系中镉含量高达 $6.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。作物根系吸收的镉主要是土壤中无机盐结合的镉, 而归还给土壤的则是以根系残茬的形式。归还给农田土壤的作物根茬在土壤中周转速率相对较高, 是土壤轻组有机质的重要组成成分。土壤轻组有机质是指密度 $< 2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的非矿物结合态的有机质, 它们在土壤中具有较强的吸附性能 [6], 镉污染农田土壤上, 根茬初步分解后的轻组有机质不仅本身含镉, 轻组有机质

收稿日期: 2012-04-19; 修订日期: 2012-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971261); 公益性行业(农业)科研专项(200903015)

作者简介: 张晶(1983~), 女, 硕士, 主要研究方向为农田土壤污染防治, E-mail: jingzhang1004@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: dcsu@cau.edu.cn

还能吸附富集土壤中重金属镉. 存在于土壤轻组有机质中的镉量与土壤中镉总量的比值代表了轻组有机质对土壤镉的富集能力^[7], 在重金属污染的土壤上, 土壤轻组有机质对重金属的富集是土壤有机质矿化减弱和重金属相对稳定性增加的重要原因^[8], 土壤轻组有机质富集能力越高, 土壤中相对稳定性重金属含量越高, 可被作物快速吸收的土壤溶液中重金属含量则越低. 有研究表明, 在重金属镉污染土壤上植物残茬初步分解后的轻组有机质中的镉含量高于土壤中的镉含量的 3 ~ 15 倍^[9], 土壤污染程度越高, 此比例也越高. 但轻组有机质在土壤中周转也快, 其分解后所富集的重金属又会释放到土壤中.

在重金属镉污染农田土壤上, 含镉的作物根茬连续还田会影响土壤轻组有机质组成和含量. 根茬在土壤中的积累、分解和周转也会影响土壤中镉的赋存形态和下茬作物对土壤镉的吸收, 进而影响农产品的质量安全. 本研究选用采自多年前污灌区的镉污染农田土壤和人为添加水溶性镉溶液的模拟镉污染土壤, 分别代表被污染时间很长的和由于如溃坝等突发性事故新污染的 2 种不同类型的镉污染土壤. 在 2 种镉污染土壤上分别连续种植根茬分解速率不同的禾本科作物和豆科作物并进行根茬连续还田和不还田试验, 研究不同镉污染土壤上通过作物根茬形式还田的镉的比例, 根茬连续还田后对土壤轻组有机质和镉赋存形态的影响及对不同后茬作物吸收镉的影响, 探索安全利用重金属镉污染土壤的农作体系, 以期重金属镉污染农田土壤上降低农作物对镉的吸收, 提高农产品的质量提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤

镉污染土壤: 采自辽宁沈阳张士灌区土, 土壤为水稻土, 土壤全镉含量 $2.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效镉 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提) $0.190 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 为 5.55, 有机质含量为 $28.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤风干并过 4 mm 筛备用.

模拟镉污染土壤: 采自浙江嘉兴, 土壤为水稻土, 土壤全镉含量 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效镉 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提) $0.096 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 为 5.4, 有机质含量 $34.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤风干并过 4 mm 筛, 风干土壤 (水分含量 $32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 中添加 CdSO_4 溶液, 添加镉量为 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 添加 CdSO_4 溶液后把土壤反复混匀, 混匀后的土壤在温室中风干并平衡稳定 7

d. 此时土壤有效镉 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提) 含量为 $2.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

用以上 2 种土壤分别代表被污染时间很长的和由于如溃坝等突发性事故新污染的 2 种不同类型的镉污染土壤. 镉污染土壤被污染时间很长, 土壤中镉形态转化达到平衡, 土壤中有效态镉含量和有效态镉占土壤总镉的比例低. 模拟镉污染土壤是人为新添加的水溶性镉, 土壤中有效态镉含量和有效态镉占土壤总镉的比例高.

1.1.2 供试作物

连续种植 3 茬并做根茬连续还田和不还田处理的作物为根茬分解速率存在明显差异的禾本科作物玉米 (品种为 NE1) 和豆科作物菜豆 (品种为四季白玉 988 架豆).

根茬连续还田后的后茬作物分别种植吸收镉能力高的蔬菜大白菜 (品种为北京小杂 60) 和根系发达的须根系作物冬小麦 (品种为农大 2427).

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽试验

镉污染土壤和模拟镉污染土壤分别按 $\text{N}:0.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土, $\text{P}_2\text{O}_5:0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土, $\text{K}_2\text{O}:0.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土施入底肥, 施入肥料分别为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KH_2PO_4 和 K_2SO_4 .

用以上两种镉污染土壤做盆栽试验, 每盆装土 500 g, 分别种植玉米和菜豆. 玉米每盆 4 株, 菜豆每盆 6 株, 每个处理 8 次重复. 连续种 3 茬, 每茬作物生长时间为 45 d, 温室温度 $20 \sim 30^\circ\text{C}$. 每茬收获时将所有植物样品的地上部沿土表处剪下. 每个处理 8 个重复中的 4 个重复用 4 mm 筛筛出根茬, 将取出的根系首先放入装有少量自来水的器皿中清洗, 并将水倒入原来处理的盆土中, 使根上黏着的土粒回到原来盆中, 土壤风干后混匀做为根茬不还田处理. 另外 4 个重复的作物根茬不取出, 用不锈钢剪刀把根茬剪碎并与原土壤混匀, 做为根茬还田处理.

收获的植物地上部和根系, 用自来水冲洗干净, 再用去离子水清洗 3 遍, 擦干水分, 90°C 杀青 0.5 h, 55°C 下烘干, 称干重. 将植物样用不锈钢粉碎机进行粉碎. 样品中 Cd 含量的测定用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 微波消解炉 (MARS, 美国 CEM 公司) 中消解, 原子吸收光谱法测定 (TAS-990, 北京普析通用仪器有限公司), 仪器检出限 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 用国家标准物质 (GBW08510) 进行分析质量控制, 标样回收率 93% ~ 106%.

为比较不同镉污染土壤上不同作物根茬连续还

田与不还田对后茬作物吸收镉的影响. 后茬作物首先种植吸收镉能力强的蔬菜大白菜, 每盆 4 株, 生长 45 d 后收获, 收获后处理及植物样中镉含量的测定同上; 然后再种植根系发达的须根系作物冬小麦, 每盆 10 株, 42 d 后收获, 收获后处理及植物样中镉含量的测定同上.

表 1 改进 Tessier 法连续浸提方法

组分名称	提取剂	操作条件
I 交换态	1 mol·L ⁻¹ MgCl ₂	25℃振荡 1 h, 离心分离, 液: 土 = 20: 2
II 碳酸盐结合态	1 mol·L ⁻¹ NaOAc (pH 5.0)	25℃振荡 5 h, 离心分离, 液: 土 = 20: 2
III 铁锰氧化物结合态	0.04 mol·L ⁻¹ NH ₂ OH·HCl	96℃水浴 6 h, 离心分离, 液: 土 = 40: 2
IV 有机结合态	0.02 mol·L ⁻¹ HNO ₃ + 30% H ₂ O ₂	85℃水浴 2 h, 振荡 0.5 h, 离心分离

1.2.3 轻组有机质提取

连续 3 茬根茬还田与不还田处理并种植大白菜和小麦后, 取土样提取轻组有机质, 提取方法如下: 称 20 g 土并过 2 mm 筛, 加 80 mL NaI 溶液 (1.7 mg·L⁻¹ ± 0.02 mg·L⁻¹) 磁力搅拌 1 min, 室温静置 48 h 后上清液用 0.45 μm 滤膜抽滤, 用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液和蒸馏水洗涤滤得的轻组有机质, 将轻组有机质 70℃烘干称重^[11]. 轻组有机质中镉测定时消煮和测定方法同植物样品.

试验数据统计和差异显著性分析采用 Excel 2003 和 SAS V8.

2 结果与分析

2.1 连续种植 3 茬玉米和菜豆还田根茬数量和还田根茬中镉含量

2 种镉污染土壤上连续 3 次还田的根茬干重、根中镉含量和根茬还田的镉占土壤全镉的比例见表 2. 从中可以看出, 在镉污染土壤上, 连续种植 3 茬的玉米, 每茬还田的根干重为 1.40 ~ 2.47 g·pot⁻¹ 之间, 玉米根中镉含量随着种植茬数增加而减少, 从 6.21 mg·kg⁻¹ 减少至 1.67 mg·kg⁻¹. 3 茬玉米根茬还田总干重为 5.59 g·pot⁻¹, 约占土壤总重量的 1.1%, 通过根茬还田的镉总量占土壤中镉总量的 1.75%; 连续种植菜豆时每茬还田的根干重在 0.45 ~ 0.87 g·pot⁻¹ 之间, 菜豆根生物量明显低于玉米, 但菜豆根中镉含量是玉米根中镉含量的 2 倍, 3 茬菜豆根茬还田总干重为 1.97 g·pot⁻¹, 仅占土壤总重量的 0.4%, 不到玉米根茬还田生物量的 1/2, 但菜豆根茬还田的镉总量占土壤中镉总量的 1.29%, 与种植玉米根茬还田总镉量相当.

在模拟镉污染土壤上连续种植 3 茬玉米后, 共

1.2.2 土壤镉形态分析

连续 3 茬根茬还田与不还田处理并种植大白菜和小麦后, 把盆中土壤混匀并取土样, 土样风干并过 100 目筛, 用改进的 Tessier 法^[10] 进行土壤镉形态分析, 各形态浸提方法见表 1. 原子吸收光谱法测定提取液中镉含量.

向土壤中归还根茬干重为 5.77 g·pot⁻¹, 约占土壤总重量的 1.1%, 与自然镉污染土壤上相当. 而 3 茬玉米根中镉含量也随着种植茬数增加从 23.15 mg·kg⁻¹ 减少至 5.68 mg·kg⁻¹, 但各茬玉米根中镉含量显著高于镉污染土壤上各茬玉米根中镉含量. 3 茬玉米根茬还田的镉总量占土壤中镉总量的 3.5%, 是镉污染土壤上 3 茬玉米根茬还田的镉的 2 倍. 模拟镉污染土壤上种植菜豆时, 连续 3 茬菜豆根茬还田总干重为 2.18 g·pot⁻¹, 约占土壤总重量的 0.4%, 也与镉污染土壤上种植菜豆时相当, 不到玉米根茬还田生物量的 1/2. 菜豆根中的镉含量随种植茬数增加从 30.68 mg·kg⁻¹ 减少到 15.11 mg·kg⁻¹, 但仍高出镉污染土壤上菜豆根中镉含量的 2 倍以上. 3 茬根还田的镉总量占土壤中总镉含量的 2.76%, 是镉污染土壤 3 茬菜豆根茬还田的镉的 2 倍, 但低于 3 茬玉米根茬还田率 3.5%. 这表明, 土壤中重金属镉的有效性越高, 种植作物时以根茬形式还田的重金属镉的比例也越高.

2.2 根茬连续还田对后茬大白菜和冬小麦生长和吸收镉的影响

2.2.1 根茬连续还田对后茬大白菜生长和吸收镉的影响

还田的作物根茬会在土壤中分解, 半腐解的作物根茬是土壤轻组有机质的重要组成成分, 轻组有机质可以吸附土壤溶液中镉, 但根茬分解中其本身所含的镉也会部分释放到土壤中. 根茬在土壤中周转可能会影响后茬作物的生长和对土壤镉的吸收. 表 3 为玉米、菜豆连作 3 茬并根茬还田后对后茬大白菜地上部干重和吸收镉的影响. 从中可以看出, 2 种镉污染土壤上连续还田菜豆和玉米根茬对后茬大白菜的地上部干重无显著性影响, 表明本试验条

表 2 连续 3 次根茬还田的根茬干重、根镉含量及镉还田率¹⁾

Table 2 Root dry weights, Cd concentration and rate of Cd return to soil by roots for the three successive cropping of maize and kidney bean

土壤	作物	种植茬次	根干重 /g·pot ⁻¹	根镉含量 /mg·kg ⁻¹	根茬还田的镉占 土壤中镉含量的比例/%
镉污染土壤	玉米	1	1.72 ± 0.11	6.21 ± 1.37 a	0.76
		2	2.47 ± 0.61	4.37 ± 0.66 b	0.81
		3	1.40 ± 0.07	1.67 ± 0.33 c	0.18
		总和	5.59		1.75
	菜豆	1	0.45 ± 0.06	9.26 ± 1.04 a	0.31
		2	0.65 ± 0.08	10.94 ± 2.20 a	0.52
		3	0.87 ± 0.16	6.12 ± 2.43 b	0.46
		总和	1.97		1.29
模拟镉污染土壤	玉米	1	1.62 ± 0.26	23.15 ± 0.38 a	1.96
		2	2.15 ± 0.66	7.46 ± 0.59 b	0.96
		3	2.00 ± 0.99	5.68 ± 1.54 b	0.58
		总和	5.77		3.50
	菜豆	1	0.45 ± 0.08	30.68 ± 7.89 a	0.73
		2	1.08 ± 0.32	26.20 ± 11.16 a	1.51
		3	0.65 ± 0.07	15.11 ± 4.84 b	0.52
		总合	2.18		2.76

1) 相同土壤、相同作物比较,无共同字母表示差异达到显著性($P < 0.05$);“±”后数字为 3 个重复的标准差

件下根茬连续还田没有影响后茬大白菜生长.从表 3 还可以看出,模拟镉污染土壤上根茬连续还田对大白菜地上部镉含量也无显著影响,但镉污染土壤上根茬连续还田后显著增加了后茬大白菜地上部镉含量.这表明在镉污染土壤上根茬还田显著增加了下茬作物对镉的吸收,可能是因为根茬还田后分解,分解时释放出的有机酸和水溶性有机碳活化土壤中的镉,增加了土壤中有效态镉含量,从而导致下茬

作物对镉的吸收量增加,相关研究也证明了这一点^[12].而在模拟镉污染土壤上则不同,土壤中加入的是水溶性镉,有效态镉($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提)含量高达 $2.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是镉污染土壤的 11 倍,根茬还田后分解产生的有机酸的活化作用变的不明显,因而对大白菜吸收镉没有影响.这种条件下根茬半腐解后的有机物可能还会净吸附土壤溶液中镉,降低镉的生物有效性^[13].

表 3 玉米、菜豆连作 3 茬后根茬还田对大白菜地上部干重和镉含量的影响¹⁾

Table 3 Shoot dry weights and Cd concentration of Chinese cabbage after three cropping of maize and kidney bean with root return to soil

土壤	种植大白菜前的作物	根茬还田	地上部干重 /g·pot ⁻¹	地上部 Cd 含量 /mg·kg ⁻¹
镉污染土壤	玉米	否	1.83 a	1.87 b
		是	1.73 a	2.66 a
	菜豆	否	1.80 a	2.63 b
		是	1.61 a	3.16 a
模拟镉污染土壤	玉米	否	2.11 a	4.85 a
		是	1.89 a	4.81 a
	菜豆	否	2.25 a	4.02 a
		是	1.91 a	4.87 a

1) 相同土壤、相同作物根茬还田与不还田比较,无共同字母表示差异达到显著性($P < 0.05$),下同

2.2.2 根茬连续还田对后茬冬小麦生长和吸收镉的影响

图 1 为连作 3 茬作物根茬连续还田对后茬小麦地上部干重的影响.从中可以看出,和对后茬大白菜生长影响类似,2 种镉污染土壤上玉米和菜豆根茬连续还田对后茬冬小麦地上部干重也没有显著影响,表明玉米和菜豆根茬连续还田对根系发达的须

根作物冬小麦生长也没有影响.

图 2 为连作 3 茬作物根茬连续还田对后茬小麦地上部镉含量的影响.从中可以看出,两种镉污染土壤上根茬连续还田对小麦地上部镉含量无显著影响.冬小麦对土壤重金属镉吸收富集能力比大白菜低,对土壤镉及有效态镉变化的反应不如大白菜敏感^[14],因此,根茬连续还田对小麦吸收镉的影响没

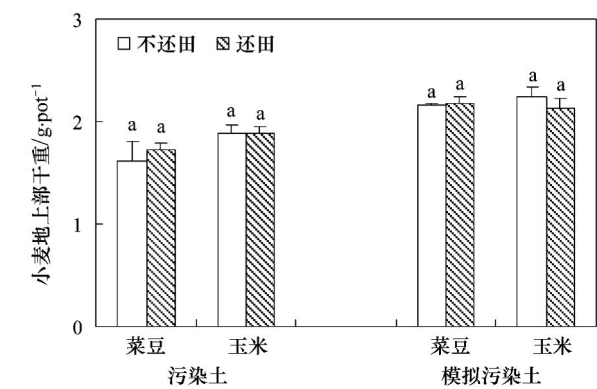


图1 玉米、菜豆连作3茬后根茬还田对小麦地上部干重的影响
Fig. 1 Shoot dry weights of wheat after three cropping of maize and kidney bean with root return to soil

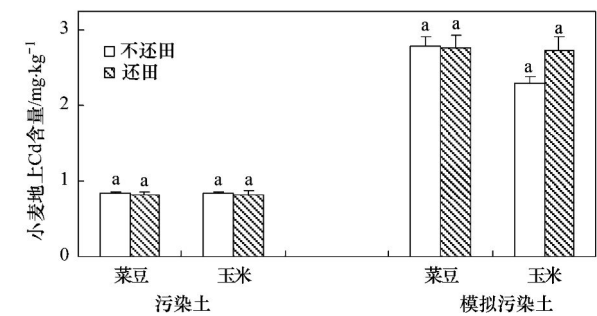


图2 玉米、菜豆连作3茬后根茬还田对小麦地上部镉含量的影响
Fig. 2 Cd concentration of wheat after three cropping of maize and kidney bean with root return to soil

表4 根茬连续还田后对土壤中轻组有机质数量和含镉量的影响

Table 4 Content and Cd concentration of light fraction SOM in the Cd-contaminated soil with root return					
处理	作物根	根茬还田	轻组占土壤质量比/%	轻组中镉含量/ mg·kg ⁻¹	轻组中镉占土壤总镉 的质量分数/%
镉污染土壤	菜豆根	否	0.32±0.012	8.32±0.067 a	1.37±0.46
		是	0.61±0.050	9.27±0.54 a	2.13±0.11
	玉米根	否	0.39±0.008	17.90±1.42 a	3.39±0.69
		是	0.75±0.076	5.94±1.29 b	1.68±0.23
模拟镉污染土壤	菜豆根	否	0.56±0.030	15.63±1.42 a	2.59±0.24
		是	1.06±0.080	13.26±1.30 a	4.01±0.04
	玉米根	否	0.31±0.053	17.25±1.59 a	1.87±0.32
		是	1.82±0.210	8.90±1.04 b	4.84±0.12

质中镉含量变化不显著。在模拟镉污染土壤上,根茬还田处理土壤轻组有机质中镉占土壤总镉的比例明显增加。表明在有效态镉含量高的镉污染土壤上,作物根茬还田能增加土壤轻组有机质对土壤镉的富集量。

2.4 根茬连续还田对土壤镉赋存形态的影响

表5为连作3茬作物根茬还田后土壤中镉赋存形态的变化,从中可以看出,两种镉污染土壤中镉均以交换态含量最高,含量为0.693~1.99

有出现差异。

2.3 根茬连续还田对土壤轻组有机质数量和轻组有机质镉含量的影响

表4是连续3茬玉米和菜豆根茬还田后土壤轻组有机质数量和轻组有机质中镉含量的变化,从中可以看出,2种镉污染土壤上2种作物根茬连续还田后土壤轻组有机质质量占土壤总质量的比例均增加,作物根茬还田处理约是不还田处理的2倍,以模拟镉污染土壤玉米根茬还田处理土壤轻组有机质含量最高,轻组有机质占土壤质量的1.82%,表明根茬还田后可以显著增加土壤轻组有机质的数量。从表4还可以看出,玉米根茬还田后土壤轻组有机质中镉含量低于根茬不还田处理,轻组有机质中镉含量降低约2倍。Besnard等^[15]研究发现在根茬还田的土壤上所测的颗粒有机质是种植的植物残根经腐烂分解后的残留物,而根茬未还田的土壤中的颗粒有机质多为土壤中原来存有的有机质及其半分解物,后者粒径小,在土壤中存留时间长,对土壤中镉的富集量大。Balabane等^[16]也发现,存在污染土壤中的颗粒有机质时间越长,粒径越小,其所含重金属的量越大。本研究结果中两种镉污染土壤上玉米根茬还田处理比不还田处理土壤轻组有机质中镉含量降低,与上述研究结果一致。菜豆根的C/N比玉米根低,其在土壤中周转比玉米根快^[1],还田处理轻组有机质中来自前茬根茬的比例低,土壤轻组有机

mg·kg⁻¹之间。镉污染土壤上作物根茬还田对土壤交换态镉、铁锰氧化物结合态镉和有机态镉含量无显著性影响,但还田玉米根茬降低了土壤碳酸盐结合态镉含量。在模拟镉污染土壤上,作物根茬还田对土壤碳酸盐结合态、有机态和残渣态镉含量无显著性影响,菜豆根茬还田后显著降低了土壤交换态镉含量,菜豆和玉米根茬还田显著增加了土壤铁锰氧化物态镉含量。有研究表明,重金属污染农田土壤上,施用有机物和秸秆堆肥可以降

低土壤中醋酸铵浸提的锌、铅和铜含量,原位钝化土壤中重金属,减少黑麦草对重金属的吸收^[13,17].但也有研究表明,土壤添加秸秆后短期内由于释放出可溶性有机质(DOM)而增加土壤铜、镉的溶出,从而促进小麦对铜、镉的吸收^[12].这种差异可能与重金属污染土壤的特点有关,在人为添加水

溶性镉的模拟镉污染土壤上,土壤中交换态镉含量很高,根茬还田增加了土壤轻组有机质含量,轻组有机质对交换态镉产生净吸附,从而降低了交换态镉含量.从表4中模拟镉污染土壤上根茬还田后轻组有机质中镉占土壤总镉质量分数增加也可说明这一点.

表5 根茬连续还田对土壤镉形态的影响/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 5 Cd speciation in soil with root return/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	作物	根茬还田	交换态	碳酸盐态	铁锰氧化物态	有机态
镉污染土壤	菜豆	否	$0.693 \pm 0.053 \text{ a}$	$0.315 \pm 0.029 \text{ a}$	$0.393 \pm 0.032 \text{ a}$	$0.031 \pm 0.003 \text{ a}$
		是	$0.733 \pm 0.124 \text{ a}$	$0.315 \pm 0.029 \text{ a}$	$0.336 \pm 0.051 \text{ a}$	$0.046 \pm 0.024 \text{ a}$
	玉米	否	$0.873 \pm 0.085 \text{ a}$	$0.290 \pm 0.041 \text{ a}$	$0.244 \pm 0.059 \text{ a}$	$0.033 \pm 0.005 \text{ a}$
		是	$0.798 \pm 0.025 \text{ a}$	$0.163 \pm 0.068 \text{ b}$	$0.264 \pm 0.027 \text{ a}$	$0.036 \pm 0.014 \text{ a}$
模拟镉污染土壤	菜豆	否	$1.990 \pm 0.180 \text{ a}$	$0.550 \pm 0.068 \text{ a}$	$0.523 \pm 0.075 \text{ b}$	$0.056 \pm 0.003 \text{ a}$
		是	$1.890 \pm 0.097 \text{ b}$	$0.650 \pm 0.089 \text{ a}$	$0.559 \pm 0.063 \text{ a}$	$0.059 \pm 0.001 \text{ a}$
	玉米	否	$1.773 \pm 0.041 \text{ a}$	$0.455 \pm 0.071 \text{ a}$	$0.445 \pm 0.047 \text{ b}$	$0.061 \pm 0.003 \text{ a}$
		是	$1.735 \pm 0.058 \text{ a}$	$0.535 \pm 0.108 \text{ a}$	$0.588 \pm 0.029 \text{ a}$	$0.062 \pm 0.003 \text{ a}$

3 讨论

重金属污染是影响农产品质量安全的重要因素之一,重金属一旦进入土壤,就很难从土壤中清除.镉是毒性最强的重金属污染物之一,且易被植物吸收,通常植物体内的镉含量与土壤中镉含量呈正相关.重金属镉污染土壤上,镉被植物吸收后大部分累积在根部,迁移至地上部的较少,当收获作物移走地上部时却把重金属含量较高的根系留在了土壤中.玉米根系的 C/N 为 42.9,显著低于其秸秆的 C/N^[18],菜豆根的 C/N 小于玉米根,根系残茬在土壤中更易分解,根茬存留时间一般只有 0.5~3 a^[1].镉污染土壤上的田间试验结果表明,小麦在羽扇豆后茬种植比在谷类后茬种植,籽粒中镉含量更高^[19],原因与羽扇豆根茬更易分解和根系活化土壤镉有关.镉污染农田小麦长期连作能吸收更多的镉^[20],这与根茬残留分解有密切关系.因此,通过农作物种植体系优化是安全利用重金属镉染土壤,提高农产品质量的有效途径之一.本试验条件下的研究结果表明,连作菜豆和玉米并根茬还田虽然对后茬作物的生长没有影响,但在镉污染土壤上根茬连续还田显著增加了后茬大白菜对镉的吸收.模拟镉污染土壤上根茬连续还田对后茬作物吸收镉则没有显著影响.在 2 种镉污染土壤上表现出不同结果与镉污染土壤中有效态镉含量高低有关系,根茬连续还田增加了土壤轻组有机质含量,土壤轻组有机质含量增加对有效态镉含量高低差异很大的镉污染土壤有不同的作用,有效态重金属含量高的土壤上添

加有机物料可以吸附土壤溶液中重金属,降低其生物有效性.有效态重金属含量低的土壤上添加有机物料则可活化土壤中重金属,增加其生物有效性.研究表明,在人为添加水溶性镉的模拟镉污染土壤上,施用有机碳物料可以显著降低土壤中醋酸铵提取态镉含量和 DTPA 提取态镉含量^[21].土壤中加入粪肥、秸秆和绿肥后土壤中可交换态重金属减少,有机结合态、还原态增加^[22,23].铜污染的土壤中加入猪粪,土壤重金属由可交换态向有效性低的无机还原态和有机结合态转化^[24].有机物料可以做为重金属污染土壤的改良剂^[13,17].但也有研究表明,有效态镉含量低的镉污染土壤上秸秆还田,由于秸秆分解产生有机酸活化土壤镉,显著提高了土壤中醋酸铵提取态镉含量和 DTPA 提取态镉含量^[25].以上这些相关研究,从不同角度支持了本研究不同类型的镉污染土壤,根茬连续还田对后茬作物吸收镉和土壤中镉形态的影响不同的结果.

4 结论

(1) 本试验条件下两种镉污染土壤上连作 3 茬菜豆和玉米并根茬还田,累计还田的根茬干重占土壤质量的 0.4%~1.1%.通过根茬累计还田的镉占土壤全镉的 1.3%~3.5%.模拟镉污染土壤上通过根茬还田的镉占土壤总镉量的比例高于镉污染土壤.

(2) 2 种镉污染土壤上玉米或菜豆根茬连续还田后,对后茬大白菜和小麦生长无显著影响,但显著增加了镉污染土壤上后茬大白菜地上部镉含量.根

茬连续还田对后茬小麦吸收镉无影响。

(3) 2 种镉污染土壤上根茬连续还田后土壤轻组有机质含量明显增加。模拟镉污染土壤上, 根茬连续还田后土壤轻组有机质中镉占土壤总镉的比例增加。

(4) 镉污染土壤中还田玉米根茬可以显著降低土壤碳酸盐结合态镉含量, 在模拟镉污染土壤中菜豆根茬连续还田降低了土壤交换态镉含量, 根茬连续还田增加了土壤铁锰氧化物态镉含量。

参考文献:

- [1] 吴建国, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳的影响——理论、方法和实践[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004. 30-40.
- [2] 赵步洪, 张洪熙, 奚岭林, 等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2006, **20**(3): 306-312.
- [3] 杨建昌, 王朋, 刘立军, 等. 中籼水稻品种产量与株型演进特征研究[J]. 作物学报, 2006, **32**(7): 949-955.
- [4] Wang M, Zou J H, Duan X H, *et al.* Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(1): 82-88.
- [5] 姜丽娜, 邵云, 李春喜, 等. 镉在小麦植株体内的吸收、分配和累积规律研究[J]. 河南农业科学, 2004, (7): 13-17.
- [6] Von Lützowa M, Kügel-Knabner I, Ekschmitt K, *et al.* SOM fractionation methods; relevance to functional pools and to stabilization mechanisms [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, **39**(9): 2183-2207.
- [7] 郑顺安, 王丽平, 章明奎. 非污染土壤中颗粒态有机质对重金属的富集作用[J]. 科技通报, 2008, **24**(4): 548-552.
- [8] 王浩, 章明奎. 污染土壤中有机质和重金属互相作用的模拟研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2009, **35**(4): 460-466.
- [9] 章明奎. 砂质土壤不同粒径颗粒中有机碳、养分和重金属状况[J]. 土壤学报, 2006, **43**(4): 584-591.
- [10] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [11] Strickland T C, Sollins P. Improved method for separating light- and heavy-fraction organic material from soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, **51**(5): 1390-1393.
- [12] 单玉华, 李昌贵, 陈晨, 等. 施用秸秆对淹水土壤镉、铜溶出的影响[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(8): 1362-1366.
- [13] Alvarenga P, Goncalves A P, Fernandes R M, *et al.* Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) Effects on soil chemical characteristics [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(10): 1292-1300.
- [14] 杨居荣, 贺建群, 黄翌, 等. 农作物 Cd 耐性的种内和种间差异 I. 种间差 [J]. 应用生态学报, 1994, **5**(2): 192-196.
- [15] Besnard E, Chenu C, Robert M. Influence of organic amendments on copper distribution among particle-size and density fractions in Champagne vineyard soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **112**(3): 329-337.
- [16] Balabane M, van Oort F. Metal enrichment of particulate organic matter in arable soils with low metal contamination [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(10): 1513-1516.
- [17] Tandy S, Healey J R, Nason M A, *et al.* Remediation of metal polluted mine soil with compost: Co-composting versus incorporation [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(2): 690-697.
- [18] 林而达, 李玉娥, 郭李萍, 等. 中国农业土壤固碳潜力与气候变化 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 114-115.
- [19] Oliver D P, Schultz J E, Tiller K G, *et al.* The effect of crop rotations and tillage practices on Cadmium concentration in wheat grain [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1993, **44**(6): 1221-1234.
- [20] Mench M J. Cadmium availability to plants in relation to major long-term changes in agronomy systems [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, **67**(2-3): 175-187.
- [21] 孟令阳, 辛术贞, 苏德纯. 不同惰性有机碳物料对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1531-1538.
- [22] Mohamed I, Ahamadou B, Li M, *et al.* Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(6): 973-982.
- [23] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应 [J]. 土壤学报, 2001, **38**(2): 212-218.
- [24] Guan T X, He H B, Zhang X D, *et al.* Cu fractions, mobility and bioavailability in soil-wheat system after Cu-enriched livestock manure applications [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(2): 215-222.
- [25] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(10): 1922-1998.

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-a Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiao, <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