

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd

汤民¹, 张进忠^{1, 2*}, 张丹¹, 陈舜¹, 张训¹, 刘万平³, 余建³

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境重点实验室, 重庆 400716; 3. 重庆市缙云山园艺发展有限公司, 重庆 400700)

摘要: 采用土壤改良剂及其组合, 研究了重庆市金果园 2 个园区土壤中 Pb、Cd 的原位钝化效果. 实验包括 8 种处理: 对照、生石灰、过磷酸钙、有机肥、生石灰 + 过磷酸钙、生石灰 + 有机肥、过磷酸钙 + 有机肥、生石灰 + 过磷酸钙 + 有机肥. 结果表明, 除单施过磷酸钙外, 其它改良剂处理都能降低枇杷园和桃园土壤酸度. 与对照比较, 单施生石灰可显著提高枇杷园和桃园土壤 pH, 处理 120 d 时土壤 pH 分别提高 0.93 和 0.79 个单位. 改良剂处理均能降低土壤中 Pb、Cd 的生物有效性, 进而降低果品中的 Pb、Cd 含量. 配施生石灰和过磷酸钙可显著降低枇杷园和桃园土壤有效态 Pb 含量, 处理 150 d 时分别下降 3.46% 和 3.56%, 枇杷和桃子中 Pb 含量分别下降 18.3% 和 14.44%. 单施生石灰可显著降低枇杷园土壤有效态 Cd 含量, 处理 150 d 时下降 10.95%; 配施生石灰、过磷酸钙和有机肥能显著降低桃园土壤有效态 Cd 含量, 处理 150 d 时下降 7.09%. 施加改良剂可进一步降低枇杷中的 Cd 含量, 单施生石灰使枇杷和桃子中的 Cd 含量分别下降 30.91% 和 24.62%.

关键词: 土壤改良剂; 果园土壤; 重金属; 原位钝化; 生物有效性

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3569-08

In Situ Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants

TANG Min¹, ZHANG Jin-zhong^{1, 2}, ZHANG Dan¹, CHEN Shun¹, ZHANG Xun¹, LIU Wan-ping³, YU Jian³

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 3. Jinyunshan Horticulture Development Corporation of Chongqing, Chongqing 400700, China)

Abstract: *In situ* immobilization of Pb and Cd in soil of two gardens in Golden Orchard of Chongqing was studied using soil ameliorants, which included eight treatments: control, quicklime, superphosphate, organic manure, quicklime + superphosphate, quicklime + organic manure, superphosphate + organic manure, and quicklime + superphosphate + organic manure. The results showed that all ameliorant treatments could decrease soil acidity in both the loquat garden and peach garden except the superphosphate treatment. Compared with the control, the soil pH in the two gardens increased by 0.93 and 0.79 with quicklime treatment for 120 d, respectively. Ameliorant treatments could decrease the bioavailability of Pb and Cd in the soil, and thus reduce the contents of Pb and Cd in the fruits. The available Pb contents in the soil of loquat garden and peach garden significantly decreased after the 150 d treatment with quicklime and superphosphate, by 3.46% and 3.56%, respectively, and the Pb contents in loquat and peach decreased by 18.3% and 14.44%, respectively. The available Cd content in the soil of loquat garden decreased by 10.95% after the 150 d treatment with quicklime. The available Cd content in the soil of peach garden decreased by 7.09% after the 150 d treatment with quicklime, superphosphate and organic manure. Ameliorant treatments could further decrease the Cd content in loquat, and the Cd contents in loquat and peach decreased by 30.91% and 24.62% with quicklime treatment, respectively.

Key words: soil ameliorant; orchard soil; heavy metals; *in situ* immobilization; bioavailability

随着我国工业的快速发展、人口的迅速增加和城市化进程的加快, 通过各种途径进入土壤中的有害重金属(如 Hg、Cd、Pb、Cr 和 As 等)不断增加, 严重威胁我国的农业生态环境. 近年来, 食品污染问题时有发生并日益突出, 引起了政府和消费者的广泛关注. 果园土壤环境质量直接影响果树的生长、结实、寿命和果品品质, 土壤重金属含量成为衡量果品产地环境质量的一项重要指标^[1]. 因此, 如何减轻和消除果园土壤重金属污染已成为环境科学工作者的研究热点之一^[2].

目前, 重金属污染土壤的修复技术主要有物理法^[3]、生物法^[4]、农艺和化学措施^[5]等. 现有方法存在治理费用高、修复时间长或治理效率低等缺点, 难以满足快速修复污染土壤的实际需要. 对于中轻度污染土壤的修复, 发展原位钝化技术是目前土壤修复的较好选择^[6]. 原位钝化修复是指向污染

收稿日期: 2011-12-03; 修订日期: 2012-03-16

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903056)

作者简介: 汤民(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染控制化学, E-mail: 314937840@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: jzhzhang@swu.edu.cn

土壤施加一种或多种活性物质(如磷酸盐、有机物料和微生物等),通过调节土壤理化性质,改变重金属在土壤中的赋存形态,降低其在土壤中的迁移性和生物有效性,以达到修复污染土壤的目的. 这种方法投入低、见效快,能够满足修复重金属污染土壤和保证农产品安全生产的迫切需要^[7,8].

前期研究发现,重庆市金果园中枇杷园和桃园土壤酸化严重,Pb、Cd 达到轻度污染水平^[9],需采取措施控制污染和修复被 Pb、Cd 污染的土壤. 为此,本研究采用土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd,抑制果树吸收和降低果品中的 Pb、Cd 含量,以期控制果园土壤重金属污染、保证果品安全生产提供科学依据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

重庆市北碚区金果园生态旅游区位于缙云山麓、嘉陵江畔,与著名风景区北温泉毗邻,自然环境良好,交通方便,园区总占地面积 92.3 hm²,其中果园面积约 66.7 hm²,是全市唯一获得国家 AA 级景区认证的农业生态观光园区. 该区海拔高度 600 ~ 700 m,气候温和湿润,属亚热带季风气候,年均气温 17.2℃,无霜期 323 d,年均降雨量 1 004 mm.

1.2 供试材料及处理

表 1 枇杷园和桃园土壤的基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil in loquat garden and peach garden

位置	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	全 Pb /mg·kg ⁻¹	全 Cd /mg·kg ⁻¹	有效态 Pb /mg·kg ⁻¹	有效态 Cd /mg·kg ⁻¹
枇杷园	3.89	25.71	106.12	100.32	42.08	34.63	0.39	2.67	0.08
桃园	4.01	29.63	131.49	131.49	35.26	36.12	0.36	2.49	0.07

表 2 改良剂的基本性状¹⁾

Table 2 Basic properties of the ameliorants

改良剂	pH	Pb/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹
生石灰	12.31	0.56	0.14
过磷酸钙	2.53	0.45	0.08
鸡粪	7.59	0.63	0.16
黄豆饼	4.41	ND	ND

1) ND 表示未检出

1.3 样品的采集与处理

根据园区果树品种和果树根系的分布特点,用多点混合采样法在桃园中采集 20 ~ 40 cm 的亚表层土壤,枇杷园中采集 40 ~ 60 cm 土层土壤样品. 在施加改良剂第 0、30、60、90、120 和 150 d 分别采集 2 个园区土样,每个处理设置 3 个采样点,土样装袋后充分混匀. 土样取回后均匀摊放在塑料布上,

研究在金果园中的枇杷园和桃园进行,2 个园区的土壤基本理化性质和 Pb、Cd 含量见表 1. 采用的改良剂有生石灰、过磷酸钙和有机肥(将发酵腐熟的黄豆饼和鸡粪按质量比 1:1 混合),其基本性状见表 2.

供试桃树为 3 年生甜油桃,桃园株行距 1 m × 1.5 m; 供试枇杷为成年“大五星”,枇杷园株行距 4 m × 3 m.

实验设置 8 个处理:① 对照(CK):不施加改良剂;② 施加生石灰(SH):株施 1.5 kg;③ 施加过磷酸钙(SSP):株施 0.5 kg;④ 施加有机肥(OM):株施 2.0 kg;⑤ 施加生石灰和过磷酸钙(SH + SSP):株施生石灰 1.5 kg 和过磷酸钙 0.5 kg;⑥ 施加生石灰和有机肥(SH + OM):株施生石灰 1.5 kg 和有机肥 2.0 kg;⑦ 施加过磷酸钙和有机肥(SSP + OM):株施过磷酸钙 0.5 kg 和有机肥 2.0 kg;⑧ 施加生石灰、过磷酸钙和有机肥(SH + SSP + OM):株施生石灰 1.5 kg、过磷酸钙 0.5 kg 和有机肥 2.0 kg,每个处理重复 3 次. 生石灰、过磷酸钙采用翻施方式,使改良剂均匀分布在果树根系着生的整个土壤剖面;在果树两侧(离根茎约 30 cm 处)各挖一条长 40 cm、宽 20 cm、深 30 cm 的土坑,将有机肥均匀施入坑内并覆土;施加改良剂后混匀和平整土壤,用山泉灌溉.

去除砾石、植物残体等杂物,自然风干 1 周,压碎、研磨、过 1 mm 和 0.25 mm 尼龙筛后,备测.

待果品成熟时,于 2011 年 5 月 12 日采集枇杷、7 月 14 日采集桃子,每株分别从东、南、西、北 4 个方向取生长正常、无病虫害、无损伤的中等大小果实组成混合样,用自来水清洗、去离子水洗净,去皮、去核,在 70℃ 烘干至恒重,粉碎,装入封口塑料袋,置干燥器中备测. 在采果的同时,每株分别从东、南、西、北 4 个方向采集生长正常、无病虫害、无损伤的新梢中部成熟叶片组成混合样,用自来水清洗、去离子水洗净,吸干叶片表面残留的水分,置于 105℃ 鼓风烘箱中烘 20 min 杀青,70℃ 烘干、粉碎后,保存备测.

1.4 样品测定方法

采用常规分析方法测定土壤样品^[10]: 土壤 pH 采用 1:2.5 的土水比, 酸度计 (PHSJ-4A 型, 温州瑞听仪器有限公司) 测定; 土壤 Pb、Cd 全量测定用王水-高氯酸消解样品, 有效态 Pb、Cd 含量测定用 0.1 mol·L⁻¹ HCl 提取样品, 取上清液过滤, 采用火焰原子化, 原子吸收分光光度计 (TAS-990 型, 北京普析通用仪器有限责任公司) 测定, Pb 和 Cd 的检测限分别为 100 μg·kg⁻¹ 和 5 μg·kg⁻¹; 植物样品中 Pb、Cd 含量的测定: 准确称取处理后的 1 g 叶片样品和 1.5 g 果实样品, 加入 10 mL 浓 HNO₃ 和 2 mL 浓 HClO₄ 浸泡过夜, 在消煮炉内消解, 低温蒸发至约 10 mL, 再加入 4 mL 浓 HClO₄, 继续加热至冒白烟, 消煮液呈清亮色, 至近干时停止加热, 用去离子水冲洗烧杯壁和小漏斗多次, 合并洗涤液与残液, 分别定容至 50 mL 和 25 mL, 采用石墨炉原子化, 原子吸收分光光度计 (TAS-990 型, 北京普析通用仪器有限责任公司) 测定, Pb 和 Cd 的检测限分别为 5 μg·kg⁻¹ 和 0.1 μg·kg⁻¹.

2 结果与分析

2.1 改良剂对果园土壤酸度的影响

不同处理下枇杷园、桃园土壤 pH 的变化分别见图 1 和图 2。从图 1 和图 2 可以看出, 与 CK 比较, 添加有生石灰的处理均能显著提高土壤 pH, 其它处理对土壤 pH 的影响不大。生石灰处理 30、60、90 d 时, 2 个园区土壤 pH 均有较大的增加, 这与重庆 3~5 月的气候有关, 此时雨水充沛, 生石灰溶解速度加快, 释放更多的 OH⁻, 中和土壤酸度的能力得以加强, 使土壤 pH 在这一时段出现较大的增加。单施生石灰 120 d 时, 2 个园区土壤 pH 均达到最大值, 150 d 时 2 个园区土壤 pH 略微下降, 这可能由土壤

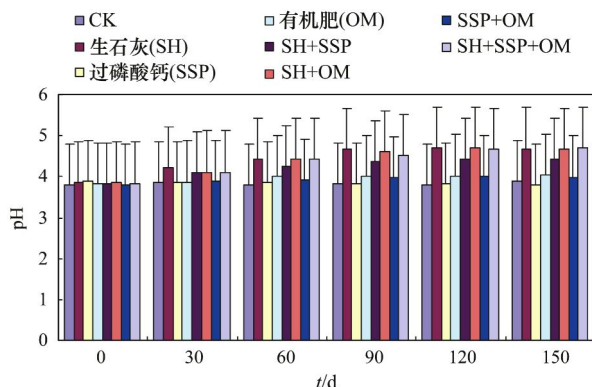


图 1 施加改良剂后枇杷园土壤 pH 的变化

Fig. 1 Variations of soil pH in the loquat garden with ameliorants treatment

的缓冲作用造成^[11]. 生石灰为强碱性物质, 能与土壤黏粒中的交换性 Al³⁺ 或有机质中的羧基官能团作用, 发生中和反应, 降低土壤酸度^[12]. 单施过磷酸钙时土壤 pH 略有下降, 可能是过磷酸钙中的磷酸—钙吸收部分土壤水分, 通过异成分溶解生成 H₃PO₄, 从而降低了土壤 pH^[13].

以枇杷园土壤为例, 施加改良剂 30 d 时, 以单施生石灰对土壤的 pH 增加最大; 施加改良剂 60 d 时, 配施生石灰、过磷酸钙和有机肥对土壤 pH 提高最显著; 施加改良剂 90 d 和 120 d 时, 均以单施生石灰的土壤 pH 达到最大, 分别为 4.68 和 4.71. 总体来看, 单施生石灰对提高枇杷园土壤 pH 的效果最好.

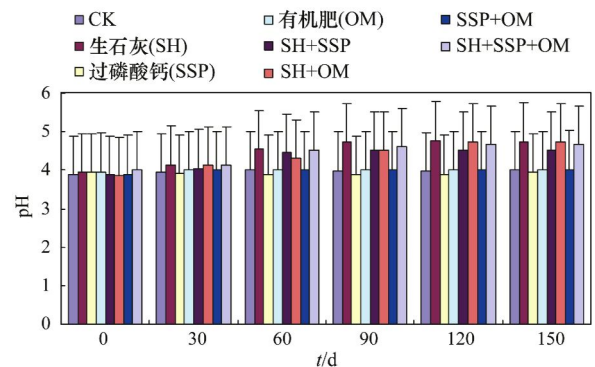


图 2 施加改良剂后桃园土壤 pH 的变化

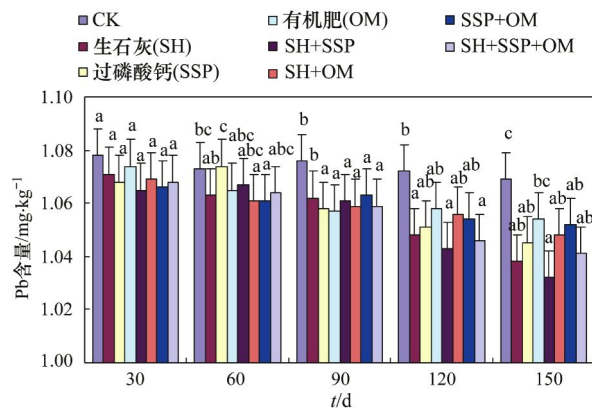
Fig. 2 Variations of soil pH in the peach garden with ameliorants treatment

从图 2 可以看出, 单施生石灰、配施生石灰和有机肥 120 d 时, 桃园土壤 pH 分别达到最大值 4.78、4.74, 分别增加了 0.79、0.75 个单位. 单施过磷酸钙时, 土壤 pH 均低于同一时期的对照值; 单施有机肥对提高土壤 pH 的效果不明显, 这与有机肥在腐解过程中产生有机酸类物质有关^[14]; 总体来看, 配施生石灰和过磷酸钙、配施生石灰、过磷酸钙和有机肥时, 土壤 pH 均随时间的推移呈现增加的趋势, 处理 150 d 时分别达到 4.53 和 4.68. 从提高桃园土壤 pH 的效果来看, 仍以单施生石灰最好.

2.2 改良剂对果园土壤有效态 Pb、Cd 含量的影响

果树吸收土壤中重金属与其形态有关, 减少土壤重金属有效态含量是降低果树吸收、控制重金属污染的关键. 不同处理下枇杷园和桃园土壤有效态 Pb、Cd 的含量变化见图 3~6. 从图 3 可以看出, 与对照比较, 改良剂处理 30 d 时, 枇杷园土壤中有效态 Pb 含量的差异不明显; 配施生石灰与有机肥、配施过磷酸钙和有机肥 60 d 时, 土壤中有有效态 Pb

含量的差异达到显著水平,降幅均为 1.12%; 改良剂处理 90 d 时土壤有效态 Pb 含量都达到显著差异,其中以单施有机肥降低最为显著,为 1.77%; 单施生石灰、配施生石灰和过磷酸钙、配施生石灰、过磷酸钙和有机肥 120 d 均可降低土壤有效态 Pb 的含量,且差异达到显著水平,降幅分别为 2.24%、2.71%、2.43%; 除单施有机肥、配施过磷酸钙与有机肥外,其余处理 150 d 时土壤有效态 Pb 含量差异均达到显著水平. 从降低枇杷园土壤有效态 Pb 含量的效果来看,以配施生石灰和过磷酸钙最好.



采用 Duncan 法进行统计,小写字母 a、b、c、d、e 表示在 $P < 0.05$ 水平上的差异显著,下同

图 3 施加改良剂后枇杷园土壤有效态 Pb 含量的变化
Fig. 3 Variations of the available Pb content in the loquat garden soil with ameliorants treatment

由图 4 可知,与对照比较,施加改良剂 90 d 后均能降低枇杷园土壤有效态 Cd 的含量. 单施生石灰、配施生石灰和过磷酸钙、配施生石灰、过磷酸钙和有机肥 120 d 时,土壤有效态 Cd 含量的差异性显著,降幅分别达到 8.04%、7.34%、6.29%; 施加改良剂 150 d 时,除单施有机肥、配施过磷酸钙和有机肥外,其它处理的土壤有效态 Cd 含量均呈显著性差异,其中以单施生石灰的效果最显著,降幅达到 10.95%. 从降低枇杷园土壤有效态 Cd 含量的效果来看,以单施生石灰最好.

从图 5 可知,与对照比较,施加改良剂 60 d 后均能降低桃园土壤有效态 Pb 的含量. 单施过磷酸钙、配施生石灰和过磷酸钙、配施生石灰、过磷酸钙和有机肥处理 60 d 时,土壤有效态 Pb 含量差异达到显著性水平,降幅分别达到 1.59%、1.23%、1.09%; 单施过磷酸钙、配施生石灰和过磷酸钙、配施生石灰、过磷酸钙和有机肥 90 d 和 120 d 时,土壤有效态 Pb 含量差异性显著; 改良剂处理 150 d 时,土壤有效态 Pb 含量差异均达到显著水平,如配

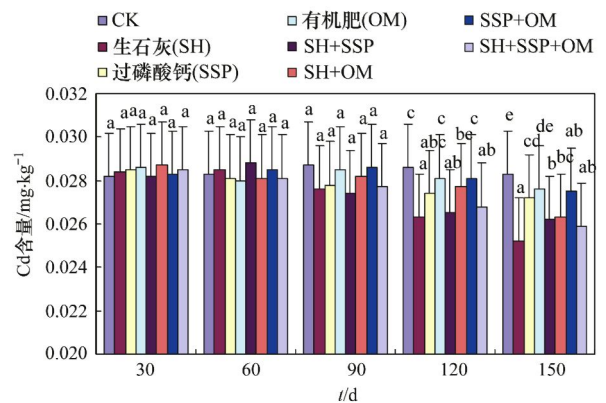


图 4 施加改良剂后枇杷园土壤有效态 Cd 含量的变化
Fig. 4 Variations of the available Cd content in the loquat garden soil with ameliorants treatment

施生石灰和过磷酸钙时有效态 Pb 含量的降幅为 3.56%. 从降低桃园土壤有效态 Pb 含量的效果来看,以配施生石灰和过磷酸钙最好.

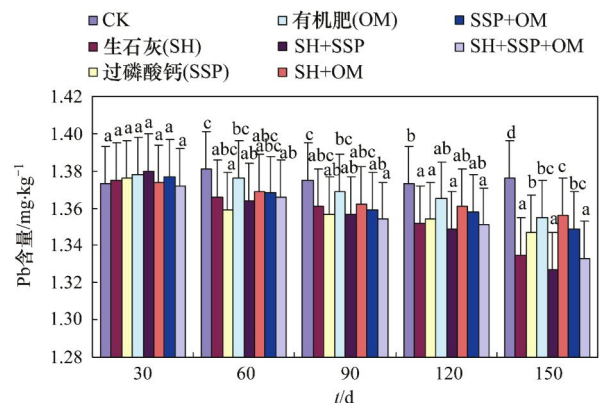


图 5 施加改良剂后桃园土壤有效态 Pb 含量的变化
Fig. 5 Variations of the available Pb content in the peach garden soil with ameliorants treatment

从图 6 可以看出,与对照比较,改良剂处理 90 d 后均能降低桃园土壤有效态 Cd 的含量. 单施生石灰、配施生石灰和过磷酸钙 90 d 时,桃园土壤有效态 Cd 含量的降幅分别为 4.35%、3.72%; 单施过磷酸钙、配施过磷酸钙和有机肥 120 d 时,土壤有效态 Cd 含量差异不显著; 施加改良剂 150 d 时,除配施过磷酸钙和有机肥外,其余处理的土壤有效态 Cd 含量均达到差异性显著,单施生石灰、配施生石灰和过磷酸钙、配施生石灰、过磷酸钙和有机肥的降幅分别达到 7.09%、6.68%、6.47%. 从降低桃园土壤有效态 Cd 含量的效果来看,以配施生石灰、过磷酸钙和有机肥最好.

植物对重金属的吸收受多种因素的影响,如土壤结构、pH、阳离子交换量(CEC)、土壤有效态重

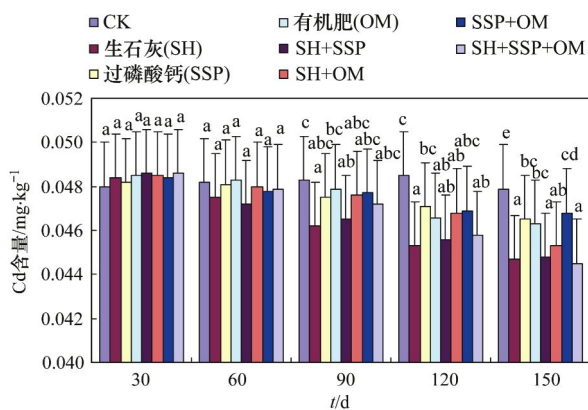


图6 施加改良剂后桃园土壤中有效态 Cd 含量的变化

Fig. 6 Variations of the available Cd content in the peach garden soil with ameliorants treatment

金属和离子间的相互作用等,施加改良剂可以改变这些因素,从而影响植物对重金属的吸收^[15]. 大量研究表明,pH 是影响土壤有效态重金属含量和植物吸收的主要因素^[16]. 施加生石灰可显著提高土壤 pH,增加土壤溶液中的 OH^- 浓度,增加土壤颗粒表面负电荷,进而增强对 Pb、Cd 的吸附;另一方面,土壤 pH 升高有利于重金属离子形成氢氧化物或碳酸盐沉淀,降低它们在土壤中的有效性和迁移能力^[17~19]. 施加生石灰可降低土壤有效态 Pb、Cd 含量,进而降低植物的吸收,如使籽粒苋吸收 Cd 下降 56%^[20]. 有机肥中的胡敏酸和胡敏素能与土壤中的重金属离子形成难溶性螯合物,降低 Pb、Cd 的生物有效性^[21]; 有机肥分解消耗大量氧气,使土壤处于还原状态,可能形成 PbS 、 CdS 等难溶物,也能降低 Pb、Cd 的活性^[22]. 施加过磷酸钙,过磷酸钙中的磷与土壤中的 Pb 反应形成难溶的 $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$,起到固定 Pb 的作用^[23]; Cd^{2+} 与土壤溶液中的 PO_4^{3-}

形成难溶的 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$,还可被吸附到难溶性磷酸盐表面,土壤负电荷增加可增强土壤对 Cd 的吸附强度^[24, 25]. 因此,本研究中施用过磷酸钙在一定程度上促进了土壤中 Pb、Cd 的钝化.

2.3 不同改良剂对果树积累 Pb、Cd 的影响

果树对 Pb、Cd 的吸收主要取决于土壤有效态 Pb、Cd 的含量,各处理下果树叶片和果实对 Pb、Cd 的积累如图 7 和图 8 所示. 对照食品(水果)中污染物限量标准 ($\text{Pb} \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cd} \leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[26],发现未施加改良剂时枇杷中 Pb 含量超标 14.7%,桃子中 Pb、Cd 含量分别超标 6.4% 和 4.8%. 从图 7 和图 8 可以看出,施加改良剂均能降低 2 种果树的叶片和果实中的 Pb、Cd 含量. 施加有机肥时,2 种果树的叶片和果实中的 Pb 含量均较高,这可能是鸡粪中 Pb 的生物有效性较高,且鸡粪腐解过程对土壤结合态重金属具有一定的活化效应,提高了重金属的有效性^[27]. 尽管生石灰中 Pb 含量 ($0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 仅次于鸡粪 ($0.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但生石灰中的 Pb 大多以难溶态形式存在(如 PbO),加之施入生石灰能显著提高土壤 pH,抑制了 Pb 的释放. 从图 7 可以看出,施加改良剂对降低 2 种果树叶片中的 Pb 含量不明显,单施生石灰、配施生石灰和有机肥均能降低 2 种果树叶片中的 Cd 含量,其中以单施生石灰的效果最好,枇杷叶和桃叶中 Cd 含量的降幅分别达到 18.31% 和 25.71%.

从图 8 可以看出,施加改良剂均能降低 2 种果品中的 Pb、Cd 含量(其中虚线指示食品安全限量标准,GB 2762-2005). 只有配施生石灰和过磷酸钙时,枇杷中 Pb 含量低于限量标准;除配施生石灰和有机肥外,改良剂处理都可使桃子中 Pb 含量低于限

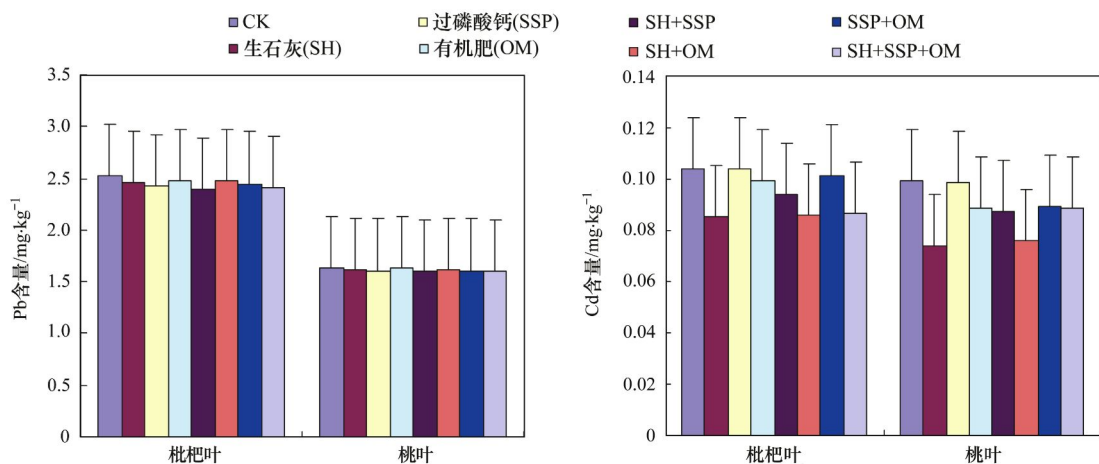


图7 枇杷叶和桃叶中的 Pb、Cd 含量

Fig. 7 Pb and Cd contents in loquat leaves and peach leaves

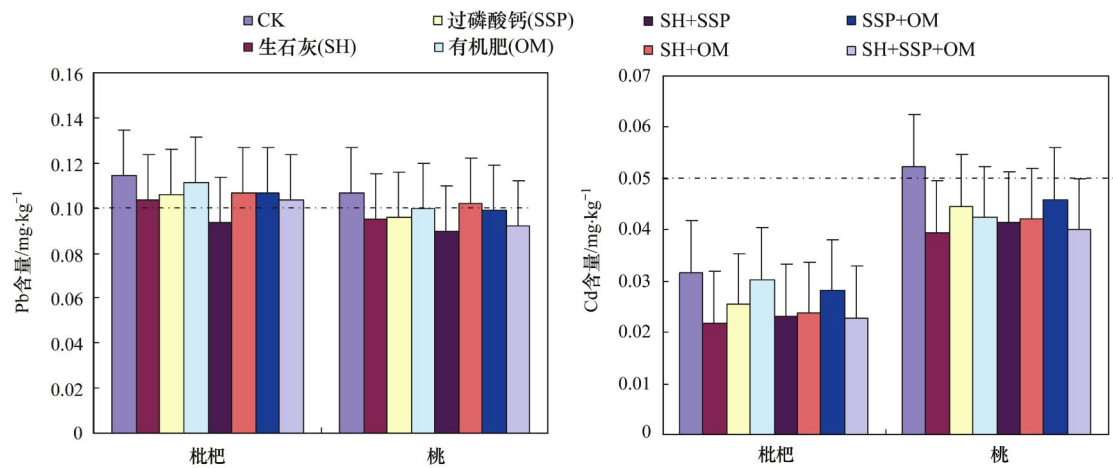


图 8 枇杷和桃子中的 Pb、Cd 含量
Fig. 8 Pb and Cd contents in loquat and peach

量标准,但以配施生石灰和过磷酸钙的处理效果最好. 土壤改良前枇杷中的 Cd 含量已经低于限量标准,施加改良剂可以进一步降低枇杷中的 Cd 含量;施加改良剂均可使桃子中的 Cd 含量低于限量标准. 从降低果品中 Cd 含量的效果来看,均以单施生石灰最好,枇杷和桃子中 Cd 的降幅分别达到 30. 91% 和 24. 62%. 王凯荣等^[28]认为,在污染土壤中施入石灰性改良剂,能够有效抑制水稻对 Pb、Cd 的吸收;施用生石灰能显著降低土壤有效态 Cd 含量,增加铁锰氧化态和残留态含量,进而降低植物体内的 Cd 含量^[29]. 有机肥在土壤中容易分解腐解,形成腐殖质,腐殖质中的羧基、羟基、酚羟基和羰基等活性基团与 Cd 发生配位或螯合作用,降低了 Cd 的生物有效性,如猪厩肥能减轻 Cd、Zn 及其复

合污染对小麦的毒害^[30].

2. 4 果实积累 Pb、Cd 与土壤 pH 和有效态 Pb、Cd 含量的关系

表 3 和表 4 给出了 2 种果品中 Pb、Cd 积累量与土壤 pH 和有效态 Pb、Cd 含量之间的关系. 从中可知,枇杷园和桃园土壤有效态 Pb、Cd 含量与土壤 pH 分别呈负相关、极显著负相关关系;枇杷中 Pb、Cd 含量均与土壤 pH 呈负相关关系,桃子中 Pb、Cd 含量分别与土壤 pH 呈负相关、显著负相关关系. 这是因为土壤 pH 是影响土壤有效态 Pb、Cd 含量的主要因素,土壤 pH 增加,土壤胶体可变电荷数量增加,增强对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附能力,还可提高形成的 Pb、Cd 配合物或螯合物的稳定性^[31],降低 Pb、Cd 在土壤中的迁移能力和有效性,进而降低果树对

表 3 枇杷积累 Pb、Cd 与土壤 pH 和有效态 Pb、Cd 含量的相关关系¹⁾

Table 3 Correlation between the contents of Pb and Cd in loquat and pH, available Pb and Cd contents in soil					
	土壤 pH	土壤有效态 Pb	土壤有效态 Cd	枇杷 Pb	枇杷 Cd
土壤 pH	1	-0. 622	-0. 894 **	-0. 526	-0. 674
土壤有效态 Pb		1	0. 845 **	0. 969 **	0. 869 **
土壤有效态 Cd			1	0. 737 *	0. 861 **
枇杷 Pb				1	0. 835 **
枇杷 Cd					1

1) * 表示 $P < 0. 05$, 显著相关; ** 表示 $P < 0. 01$, 极显著相关, 下同

表 4 桃子积累 Pb、Cd 与土壤 pH 和有效态 Pb、Cd 含量的相关关系

Table 4 Correlation between the contents of Pb and Cd in peach and pH, and available Pb and Cd contents in soil					
	土壤 pH	土壤有效态 Pb	土壤有效态 Cd	桃子 Pb	桃子 Cd
土壤 pH	1	-0. 572	-0. 879 **	-0. 426	-0. 735 *
土壤有效态 Pb		1	0. 853 **	0. 959 **	0. 827 *
土壤有效态 Cd			1	0. 741 *	0. 946 **
桃子 Pb				1	0. 689
桃子 Cd					1

Pb、Cd 的吸收累积. 2 种果品中的 Pb、Cd 含量均分别与对应园区土壤的有效态 Pb、Cd 含量呈极显著的正相关关系,说明土壤有效态 Pb、Cd 含量对果实吸收 Pb、Cd 影响显著.

2.5 不同改良剂对果树富集 Pb、Cd 的影响

植物对重金属的吸收具有选择性,对不同重金属表现出不同的吸收能力,可用植物对土壤重金属的富集系数表示重金属在土壤-植物间的迁移能力. 表 5 给出了改良剂对果树富集 Pb、Cd 的影响. 从中可以看出,2 种果树的叶片和果实对 Pb、Cd 的富集能力均表现为 $Cd > Pb$,但叶片对 Pb、Cd 的富集

能力强于果实. 与其它处理比较,配施生石灰和过磷酸钙时,2 种果树的叶片和果实对 Pb 的富集系数最小;单施生石灰时,2 种果树的叶片和果实中 Cd 的富集系数都最小,但此时桃园土壤的有效态 Cd 含量并非最低,这可能是桃树吸收 Cd 还与土壤 pH 有关. 单施生石灰时,桃园土壤 pH 的增幅最大,土壤 pH 越大,桃树吸收 Cd 的能力越弱^[32];土壤 pH 还影响植物的生长发育和矿质元素的吸收分配,单施生石灰处理更能促进果实生长,增加其生物量,对重金属积累起到稀释作用,进而减少单位质量果品中重金属的积累量^[33].

表 5 改良剂对果树富集 Pb、Cd 的影响¹⁾/%

Table 5 Effect of ameliorants on enrichment coefficient of fruit trees to Pb and Cd/%

处理	枇杷叶片		桃树叶片		枇杷		桃子	
	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
CK	7.27	26.95	4.52	27.63	0.33	8.13	0.29	14.23
SH	7.08	22.02	4.46	20.53	0.30	4.72	0.26	10.97
SSP	7.00	27.08	4.45	29.14	0.31	5.41	0.27	12.39
OM	7.13	25.71	4.51	24.62	0.32	7.77	0.28	11.81
SH + SSP	6.91	24.34	4.42	24.26	0.27	5.08	0.25	11.47
SH + OM	7.12	22.17	4.47	21.23	0.31	5.18	0.28	11.67
SSP + OM	7.07	26.15	4.45	24.87	0.31	5.92	0.27	12.75
SH + SSP + OM	6.97	22.38	4.44	24.62	0.30	5.00	0.26	11.14

1) 富集系数(%) = 果树中重金属含量/土壤重金属含量 × 100%

3 结论

(1)除单施过磷酸钙外,改良剂处理均能提高枇杷园和桃园土壤 pH,以单施生石灰的效果最好.

(2)土壤有效态 Pb、Cd 含量与土壤 pH 分别呈负相关、极显著负相关关系;果实中 Pb、Cd 含量均与土壤有效态 Pb、Cd 含量呈极显著正相关关系. 说明土壤 pH 和有效态 Pb、Cd 含量对果实吸收 Pb、Cd 的影响显著.

(3)改良剂处理都能降低土壤有效态 Pb、Cd 含量. 配施生石灰和过磷酸钙对降低 2 个园区土壤有效态 Pb 含量的效果最好;单施生石灰、配施生石灰、过磷酸钙和有机肥分别对降低枇杷园、桃园土壤有效态 Cd 含量的效果最好.

(4)配施生石灰和过磷酸钙对降低 2 种果品中 Pb 含量的效果最好;施加改良剂可进一步降低枇杷中的 Cd 含量,单施生石灰对降低 2 种果品中 Cd 含量的效果最好.

参考文献:

- [1] 张林森,梁俊,武春林,等. 陕西苹果园土壤重金属含量水平及其评价[J]. 果树学报, 2004, **21**(2): 103-105.
- [2] Hamon R E, McLaughlin M J, Cozens G. Mechanisms of

attenuation of metal availability in *in situ* remediation treatments [J]. Environmental Science and Technology, 2002, **36**(18): 3991-3996.

- [3] 夏星辉,陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展[J]. 环境科学, 1997, **18**(3): 72-76.
- [4] 郭观林,周启星,李秀颖. 重金属污染土壤原位化学固定修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(10): 1990-1996.
- [5] 徐明岗,刘平,宋正国,等. 施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(1): 328-333.
- [6] 王立群,罗磊,马义兵,等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(5): 1214-1222.
- [7] 王晓蓉,郭红岩,林仁漳,等. 污染土壤修复中应关注的几个问题[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(2): 277-280.
- [8] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 71-102.
- [9] 汤民,张进忠,张丹,等. 果园土壤重金属污染调查与评价——以重庆市金果园为例[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(14): 244-249.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 140-141.
- [11] 徐明岗,张青,王伯仁,等. 改良剂对重金属污染红壤的修复效果及评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15**(1): 121-126.
- [12] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, *et al.* Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils

- [J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, **45**(4): 419-429.
- [13] 陈世宝, 朱永官, 马义兵. 不同磷处理对污染土壤中有效态铅及磷迁移的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(7): 1140-1144.
- [14] 王林权, 周春菊, 王俊儒, 等. 鸡粪中的有机酸及其对土壤速效养分的影响[J]. *土壤学报*, 2002, **39**(2): 268-275.
- [15] 刘维涛, 周启星. 不同土壤改良剂及其组合对降低大白菜镉和铅含量的作用[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(9): 1846-1853.
- [16] Eriksson J E. The influence of pH, soil type and time on adsorption and uptake by plants of Cd added to the soil[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1989, **48**(3-4): 317-335.
- [17] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(7): 1441-1453.
- [18] Lombi E, Hamon R E, McGrath S P, *et al.* Lability of Cd, Cu, and Zn in polluted soils treated with lime, beringite, and red mud and identification of a non-labile colloidal fraction of metals using isotopic techniques [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(5): 979-984.
- [19] 华璐, 白铃玉, 韦东普, 等. 有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉锌形态和小麦生长的影响[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(4): 346-350.
- [20] 邱静, 李凝玉, 胡群群, 等. 石灰与磷肥对籽粒苋吸收镉的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(1): 187-192.
- [21] Cabrera D, Young S D, Rowell D L. The toxicity of cadmium to barley plants as affected by complex formations with humic acid [J]. *Plant and Soil*, 1988, **105**(2): 195-204.
- [22] 李瑞美, 王果, 方玲. 钙镁磷肥与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果[J]. *土壤与环境*, 2002, **11**(4): 348-351.
- [23] 陈世宝, 朱永官. 不同含磷化合物对中国芥菜 (*Brassica Oleracea*) 铅吸收特性的影响[J]. *环境科学学报*, 2004, **20**(4): 707-712.
- [24] Cotter-Howells J, Caporn S. Remediation of contaminated land by formation of heavy metal phosphates [J]. *Applied Geochemistry*, 1996, **11**(1-2): 335-342.
- [25] 周世伟, 徐明岗. 磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展[J]. *生态学报*, 2007, **27**(7): 3043-3050.
- [26] GB 2762-2005, 食品中污染物限量标准[S].
- [27] 吴清清, 马军伟, 姜丽娜, 等. 鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(7): 1302-1309.
- [28] 王凯荣, 张玉烛, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(2): 476-481.
- [29] 陈宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg、Cd、Pb 的植物可利用性的调控研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(5): 549-552.
- [30] 华璐, 白铃玉, 韦东普, 等. 土壤镉锌复合污染的植物效应与有机肥的调控作用[J]. *中国农业科学*, 2002, **35**(3): 291-296.
- [31] Naidu R, Kookana R S, Sumner M E, *et al.* Cadmium sorption and transport in variable charge soils: a review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26**(3): 602-617.
- [32] 陈燕, 谢正生, 郑小林, 等. 杨桃对土壤重金属元素的吸收与富集[J]. *云南植物研究*, 2009, **31**(4): 369-373.
- [33] 李波, 青长乐, 周正宾, 等. 肥料中氮磷和有机质对土壤重金属行为的影响及在土壤治污中的应用[J]. *农业环境保护*, 2000, **19**(6): 375-377.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行