

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄烨, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α-FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Shevanelia oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾炜铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)

改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用

曾炜铨¹, 宋波^{1,2*}, 袁立竹¹, 黄宇妃¹, 伏凤艳¹

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 广西环江沿岸农田土壤具有强酸、多重金属污染等特点, 失去了农业生产能力, 为此, 本研究试用了土壤淋溶实验探究不同类型改良剂(生石灰、钙镁磷肥、有机肥、聚丙烯酰胺)组合对广西环江沿岸污染土壤的修复效果, 土壤重金属迁移规律及对农田适耕性的影响。结果表明, 对照组 T1 土壤酸化严重, 降低清洁接触土壤层 pH 值, 而处理方式 T2、T3、T4、T5 均能显著提高污染土壤 pH 值($P < 0.05$), 对供试土壤 pH 变化大小分别为 2.7 ~ 3.2、1.6 ~ 2.7, 均能达到南方农业生产土壤 pH 值范围。较对照组 T1, 在污染土壤 0 ~ 20 cm 处, 处理方式 T2、T3、T4、T5 能有效地活化 Pb, 钝化 Zn 的作用; 在清洁土壤 20 ~ 60 cm 处, 各个处理方式对 DTPA-Pb、DTPA-Zn 的作用不存在显著差异($P < 0.05$)。较对照组 T1, 处理方式 T4、T5 能为植物提供良好的种植营养物质, 以期能为今后结合生物修复等措施提供技术支撑。

关键词: 改良剂; 土壤; 修复; 铅; 锌; 酸化; 广西环江

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2306-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.052

Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi

ZENG Wei-quan¹, SONG Bo^{1,2*}, YUAN Li-zhu¹, HUANG Yu-fei¹, FU Feng-yan¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Due to the collapse of the Pb/Zn tailing dam of Huanjiang, Guangxi, the farmland along Huanjiang River are strongly acidic and heavy metal-contaminated, resulting in the loss of agricultural production. To explore some remedies and the migration of heavy metals in heavy metal contaminated-soil of Huanjiang, this study investigated the effects of different types of amendments (lime, calcium magnesium phosphate, organic fertilizer, polypropylene amide) on tested soils through soil leaching test. The results showed that T1 soil was severely acidified, reducing the pH of the soil layer to clean contact, while T2, T3, T4, T5 could significantly improve the contaminated soil pH, ranging from 2.7 to 3.2, 1.6 to 2.7 respectively. Compared with T1, in the contaminated soil at 0-20 cm, T2, T3, T4, T5 could effectively activate Pb and immobilize Zn. Compared with T1, in 20-60 cm clean soil, there was no significant differences in the effect of different treatments on DTPA-Pb and DTPA-Zn ($P < 0.05$). Compared with T1, T4 and T5 could provide good growing conditions for plants, which might provide technical support for future measurements such as bioremediation.

Key words: amendments; soil; remediation; lead; zinc; acidification; Huanjiang, Guangxi

中国是矿业大国,年采矿量约为 50 亿 t^[1],尾矿堆积量达到了 80 亿 t,其中只有少部分的尾矿作为矿山填充物或者综合利用,大部分的尾矿都堆积在尾砂库中^[2]。我国现有尾砂库 12 655 座^[3],美国有近 25 280 处尾砂库,仅有 20% 的尾砂处于计划处理或正在治理中^[4],大部分尾砂库存在规模小、安全度水平低等问题,这些尾砂库的下游大都为生活区或者重要城镇^[5]。因此尾砂库是一个重大的危险源,据统计,我国尾砂库的安全现状不容乐观,不时发生尾矿库溃堤等重大事故^[6]。尾砂库溃堤事件时有发生,国内外对污染地区的重金属总量或肥力特性等方面的风险评价越来越多^[7]。随着对土壤重金属元素深入研究,发现重金属生态毒理学的主要决定因素是水溶态、离子交换态等可迁移性较大的赋存形态,是对环境危害较大的部分^[8,9],而不是土壤

中污染重金属的总量。

2001 年特大洪水引发了广西环江上游铅锌黄铁矿尾砂库溃坝事件,大量铅锌矿渣倾入环江流域。铅锌矿渣污染物随洪水沉降、堆积、淹没了沿岸农田,造成大面积农田欠收,甚至绝收^[10]。该尾矿含有大量硫化矿物,经过一系列雨水淋滤、氧化及细菌催化等作用^[11],造成了下游沿岸土地的土壤酸化及板结现象;同时,强酸性环境提高了土壤重金属的生物有效性,加剧了重金属污染^[12]。重金属污染

收稿日期: 2014-12-06; 修订日期: 2014-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161056); 广西“八桂学者”建设工程专项; 广西自然科学基金重大项目(2013GXNSFEA053002)

作者简介: 曾炜铨(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染土壤修复与区域环境质量评价, E-mail: weiquanzeng123@163.com

* 通讯联系人, E-mail: Songbo@glut.edu.cn

土壤的原位化学修复技术可影响土壤重金属的生物有效性,虽其总量没有减少,但可通过改变生物有效态,结合生物修复等措施实现土壤修复的目的. 在重金属污染土壤原位化学修复中,使用范围较为广泛的是无机改良材料,如生石灰、含磷材料及工业副产品^[13, 14]等,有机肥、结构改良剂^[15~17]也因其修复效果良好、经济高效等优点得到广泛应用. 本研究主要以广西环江沿岸污染土壤作为供试土壤,采用不同改良材料(生石灰、钙镁磷肥、有机肥、聚丙烯酰胺)组合,通过土壤淋溶实验来探究改良材

料组合对供试土壤的重金属有效性的影响,及探究重金属在淋溶柱纵向的迁移规律,以期为今后大面积工程修复提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 供试土壤理化特性

供试土壤理化性质如表 1 所示. 环江污染土壤中铅、锌含量分别为1 716 mg·kg⁻¹、998 mg·kg⁻¹,分别高过了国家三级土壤标准、广西环江土壤背景值的 3.4 倍、2.0 倍和 78 倍、14 倍.

表 1 供试土壤的理化性质¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties of the test soil											
测定项目	经纬度	pH	<0.002 mm 粒径/g·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	DTPA-Pb /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹	DTPA-Zn /mg·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	碱解氮 /g·kg ⁻¹	
环江污染土壤	N24°48' E108°14'	3.21	170±0.6	1 716±10	2.32±3.7	998±8	11.8±0.6	21±0	0.718±0.002	0.335±0.004	
桂林清洁土壤	N24°59' E110°33'	5.53	41±1	35±3	6.05±4.3	115±3	6.8±3.2	0.7±0.1	0.323±0.001	0.202±0.003	
广西环江县土壤背景值	—	5.20	—	22	—	69	—	—	—	—	
国家三级土壤质量标准	—	6.50	—	500	—	500	—	—	—	—	

1) 平均值±标准差,n=3; “—”表示无数据

1.2 修复剂制备

改良剂组合以 0.1% 尿素(U)和 0.1% 磷酸二氢钾(MKP)为基肥,分别以生石灰(CaO 工业生石灰)、钙镁磷肥(FMP 农用钙镁磷肥)、有机肥(POM 农用有机肥)、聚丙烯酰胺(PAM 化学纯)这 4 种不同类型为主要改良修复材料. 淋溶实验共 5 种处理方式:对照组 T1:不添加修复剂;处理 T2:0.8% CaO;处理 T3:0.8% CaO+0.2% FMP;处理 T4:0.8% CaO+0.2% FMP+2% POM;处理 T5:0.8% CaO+0.2% FMP+2% POM+0.05% PAM. 每个处理方式均进行 3 次平行实验,按上述不同处理方式配合比例进行.

1.3 柱淋溶实验

淋溶实验是评价污染物质在土-地下水路线长期作用的基本工具^[18]. 实验土柱淋溶装置为圆柱形 PVC 柱,土柱的上方设加水装置,下方用1 000 mL 塑料瓶收集淋滤液. PVC 柱内径 10 cm,高 70 cm,底部用多孔板固定,在多孔板上铺一层尼龙布,加 1 cm 厚的石英砂后再铺一层尼龙布. 先在每个土柱底部装上 40 cm 的清洁土壤,压实后,再在上方填入 20 cm 污染土壤后再压实,最终在污染土壤上方再铺两层尼龙布及 1 cm 厚的石英砂,避免淋溶时水流过快扰乱土层. 土壤培养在室温条件下进行,使用超纯水淋溶到土壤中,使土壤达到最大田间持

水量后持续培养 2 周,待土壤水分充分落干后进行第一次模拟降雨,最大程度地模拟大气降雨的土壤干湿交替状态. 环江地区年降雨量为1 389 mm,以 1 500 mm 计,扣除总量 30% 地表径流流失,对受污土壤起淋溶作用的降雨量为年平均降雨量的 70%,本土柱淋溶实验模拟环江地区全年降雨量为 8.0 L,分为 10 次(每次 800 mL)用超纯水经输液管均匀滴加入土柱中,没过上层污染土壤 1~3 cm,控制淋溶速度为 14.4~18 mL·h⁻¹. 实验中所用到的一切器皿均用 10% HNO₃ 浸泡 24 h 以上,以去除表面吸附的重金属,并用超纯水清洗干净.

淋溶实验结束后,拆开土柱将土壤缓缓推出,每个柱子按污染土壤(0~5、5~10、10~15、15~20 cm)、清洁土壤(20~30、30~40、40~50、50~60 cm)两部分的深度分为 8 个阶层. 样品经过自然风干后进行过筛研磨处理. 淋溶土壤的 pH 值:电位法;土壤重金属消解按美国环保局 USEPA 方法消解,ICP-AES 测定^[19](Optima 7000DV,美国铂金埃尔默仪器有限公司,下同). 土壤重金属有效态采用 DTPA 浸提方法提取^[2],ICP-AES 测定;土壤有机质采用重铬酸钾氧化法-硫酸亚铁滴定方法;速效磷采用盐酸-硫酸浸取法;碱解氮使用速测法测定^[20](TresCon Uno A111,德国 WTW 公司). 实验数据采用 SPSS 18.0 在 95% 的置信水平下,进行单因素方

差 LSD 检验, Origin 8.0 进行插值作图. 实验过程中每批实验都有 3~4 个空白样品, 3~4 个平行实验 (20%), 每 20 个样品使用标准样品进行校核.

2 结果与分析

2.1 改良剂组合对土壤 pH 的影响

土壤重金属赋存形态和溶解度^[12]会随着 pH 的大小变化而改变. pH 值降低会增大重金属离子在土壤中的溶解度^[21], 促进了重金属在土壤中的释放能力, 影响重金属的活性和生物有效性, 引发土壤重金属污染^[22, 23], 随着 pH 值的增加, 重金属的赋存形态会朝着活性较低的赋存形态转变^[24~26].

从图 1 看出, 不同处理方式处理土壤 pH 的变化各不相同. 在 5 个处理方式下, 土柱 0~20 cm 处土壤 pH 在 0.05 检验水平下存在显著性差异 ($P < 0.05$), 可分为 3 类: 未变化 (处理 T1, 均值 pH = 3.11)、显著变化 (处理 T4, 均值 pH = 5.01; 处理 T5, 均值 pH = 5.21)、极显著变化 (处理 T2, 均值 pH = 6.23; 处理 T3, 均值 pH = 6.23). 对照组 T1 污染土层 pH 在模拟人工降雨下未发生显著变化 ($P < 0.05$), 影响和降低 20~30 cm 处清洁土壤 pH, 与其它处理方式存在显著性差异 ($P < 0.05$). 与对照组 T1 相比, 处理方式 T2、T3、T4、T5 显著提高了土柱污染土壤 pH 值 ($P < 0.05$). 与对照组 T1 相比, 处理方式 T4、T5 的土壤 pH 值变化范围为 1.6~2.7, 处理方式 T2、T3 的土壤 pH 值变化范围为 2.7~3.2, 该 4 个处理方式对 20~60 cm 清洁土壤 pH 变化趋势基本一致, 均未影响清洁土壤 pH 变化. 土壤 pH 是植物重要影响因素^[27], 除对照组 T1 外, 其

它处理方式均能较好改善土壤 pH, 满足农作物种植 pH 环境. 与广西环江土壤 pH 相比, 处理方式 T3、T4 基本恢复至广西环江地区农用土壤 pH.

2.2 改良剂组合对土柱土壤总 Pb、DTPA-Pb 的影响

2.2.1 改良剂组合对污染土壤总 Pb、DTPA-Pb 的径向分布 (0~20 cm)

图 2 为淋溶土柱污染土壤总 Pb 及 DTPA-Pb 含量在径向 (0~20 cm) 处的分布.

各个处理方式对模拟人工降雨后污染土壤总 Pb 含量变化趋势基本一致, 呈先下降后上升的趋势. 与对照组 T1 相比, 处理方式 T2、T3、T4、T5 污染土壤总 Pb 检验水平下存在显著性差异 ($P < 0.05$) (图 2), 表明污染土壤在淋溶作用下土壤 Pb 均有淋失. 从图 2 中看出各个处理方式对污染土壤 DTPA-Pb 浸取量影响各不相同. 对各个土柱土壤 DTPA-Pb 进行方差分析 (LSD) 检验, 得出 5 个处理方式下 DTPA 浸取量存在显著性差异 ($P < 0.05$). 由于供试土壤为尾矿受淹农田, DTPA-Pb 浸取量较低, 基本不受淋溶作用影响; 与对照组 T1 相比, 处理方式 T2、T3、T4、T5 均显著地提高了 DTPA-Pb 浸取量 ($P < 0.05$), 分别为 4%~8%、4%~9%、12%~23%、16%~24%; 与对照组 T1 相比, 处理方式 T2、T3 对 DTPA-Pb 浸取量变化趋势基本一致, 分别提高了 20~30 倍, 处理方式 T4、T5 分别提高了 100~105 倍. 表明在淋溶条件, 较对照组 T1, 处理方式 T2、T3、T4、T5 能有效地提高供试污染土壤 Pb 有效性.

2.2.2 改良剂组合对清洁土壤总 Pb、DTPA-Pb 的径向分布 (20~60 cm)

在 20~60 cm 处的清洁土壤中, 对照组 T1 清洁土壤 20~40 cm 处清洁土壤中的 Pb 含量均有增加, 是原清洁土壤的 5~6 倍, 表明 0~20 cm 处的污染土壤中的重金属经过淋溶作用逐渐向下迁移, 可能是由于土壤中具有较高的砂粒 (见表 1) 及供试土壤酸化作用的影响; 在 30~60 cm 处土壤总 Pb 含量与背景值相近, 表明在淋溶条件下供试土壤由于自身性质的作用能够有效地稳定固化 Pb, 抑制了 Pb 的向下迁移能力. 较对照组 T1, 其它处理方式对总 Pb 具有明显增加 (见图 3), 表明了 0~20 cm 处的污染土壤中的重金属经过淋溶作用逐渐向下迁移, 修复剂在一定程度上促进了 Pb 在土壤中的迁移能力.

在 20~60 cm 处的清洁土壤中, 对照组 T1 清洁土壤 20~40 cm 处清洁土壤中 DTPA-Pb 含量均有

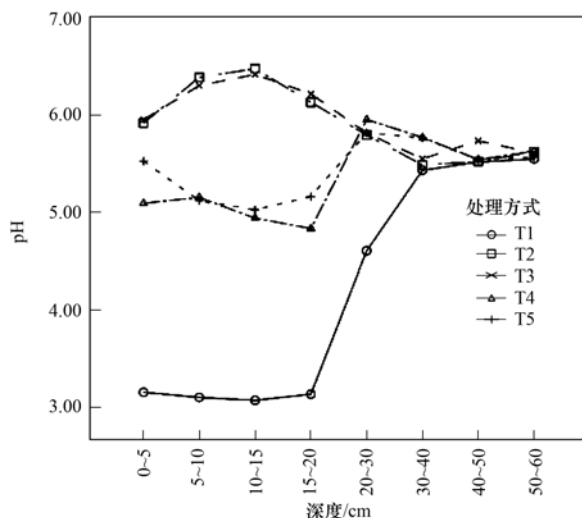


图 1 土壤 pH 径向分布

Fig. 1 Vertical distribution of pH in column soils

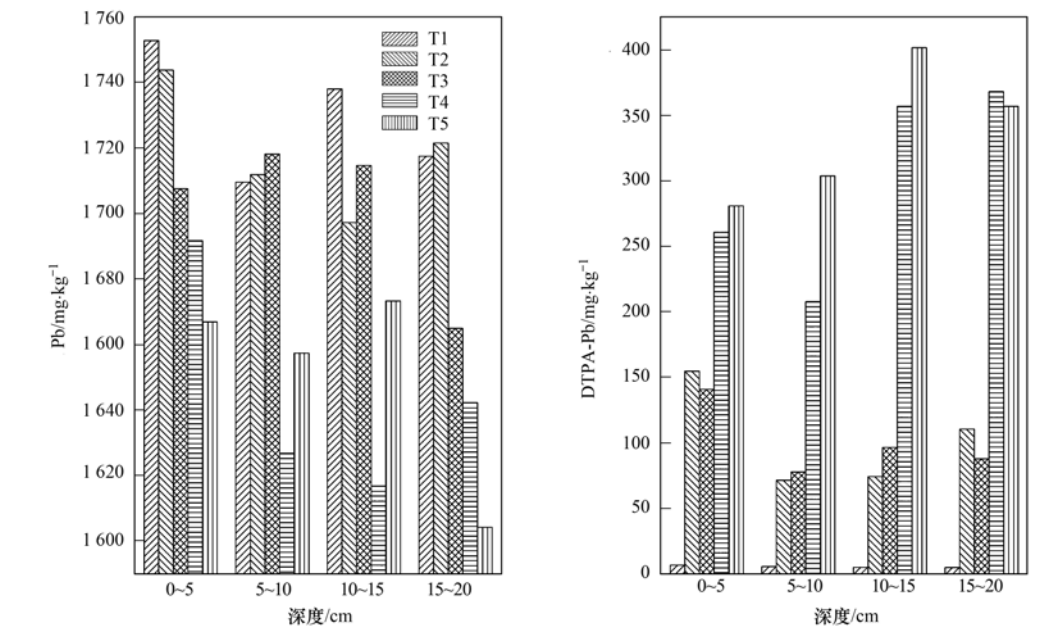


图2 土柱0~20 cm处土壤中总Pb、DTPA-Pb浓度

Fig. 2 Concentrations of total Pb and DTPA-Pb in column soils with a depth of 0-20 cm

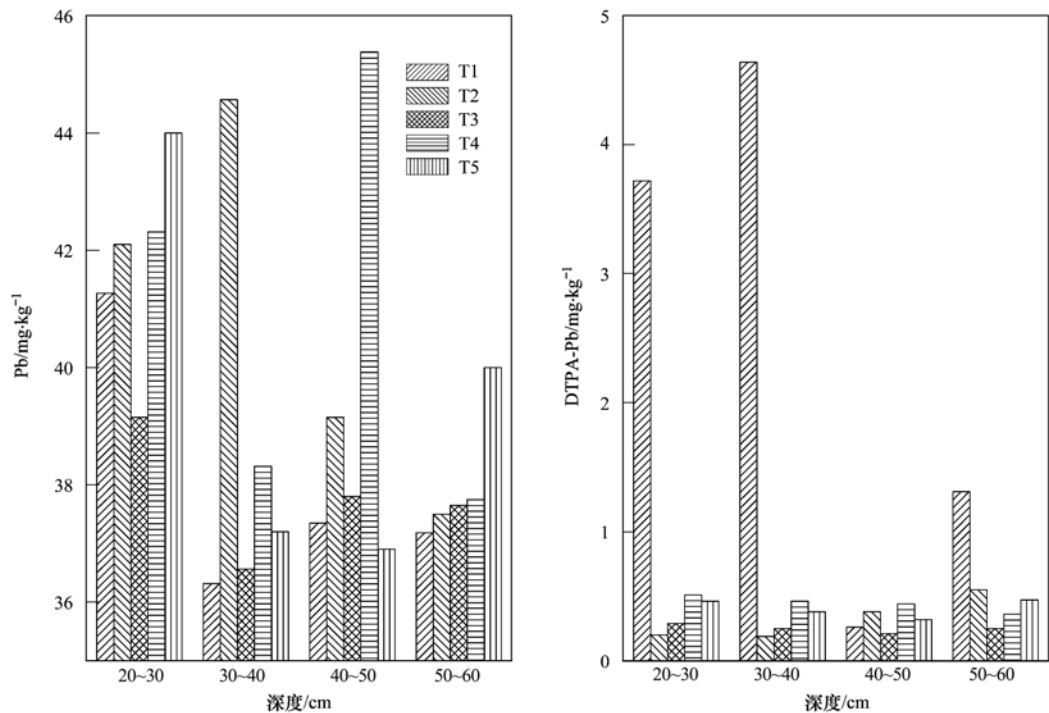


图3 土柱20~60 cm处土壤中总Pb、DTPA-Pb浓度

Fig. 3 Concentrations of total Pb and DTPA-Pb in column soils with a depth of 20~60 cm

增加,其它处理方式下的 DTPA-Pb 浸取量变化趋势基本一致,均有效地降低了清洁土壤重金属有效性.在清洁土壤 40~60 cm 中,5 个处理方式对 DTPA-Pb 浸取量的作用趋势基本一致,表明供试土壤由于自身性质的作用能够有效地稳定固化 Pb,降低土壤 DTPA-Pb 含量.虽然 5 个处理方式能够降低 DTPA-

Pb 浸取率,但是 Pb 有向下迁移的趋势.

2.2.3 土壤重金属全 Pb 与 DTPA-Pb 的关系

重金属总量及其有效态含量间存在着一定的伴生规律^[28],各个处理下对重金属与 DTPA 浸取态含量作用进行相关性分析,结果在各个处理方式下 ($P < 0.01$),土壤总 Pb 与 DTPA-Pb 呈极显著正相关

(处理 T1: $r = 0.864$, $y = 0.003x + 1.076$; 处理 T2: $r = 0.761$, $y = 0.06x - 1.042$; 处理 T3: $r = 0.704$, $y = 0.06x - 1.470$; 处理 T4: $r = 0.937$, $y = 0.185x - 6.344$; 处理 T5: $r = 0.966$, $y = 0.208x - 6.744$). 当重金属 DTPA 浸取态含量增加时, 重金属的总量将会随着淋溶作用而淋失.

2.3 改良剂组合对土柱土壤总 Zn、DTPA-Zn 的影响

2.3.1 改良剂组合对污染土壤总 Zn、DTPA-Zn 的径向分布(0~20 cm)

见图 4, 较对照组 T1, 其它处理方式都体现出较

好地钝化锌的作用, 总 Zn 浓度基本不变, DTPA-Zn 浸取量有所降低, 对 DTPA-Zn 浸取量进行一元方差分析(LSD)检验, 得出 5 个处理方式之间 DTPA 浸取量存在显著性差异($P < 0.05$). 较对照组 T1 污染土壤 0~20 cm 处的 DTPA-Zn 浸取量, 处理方式 T4、T5 的 DTPA-Zn 浸取率变化趋势基本一致, 而处理方式 T2、T3 在污染土壤中 DTPA-Zn 浸取量显著降低($P < 0.05$), 表明处理方式 T2、T3 在一定程度上能够钝化供试污染土壤中 Zn 的潜力, 而处理方式 T4、T5 的 DTPA-Zn 浸取量与对照组 T1 基本一致.

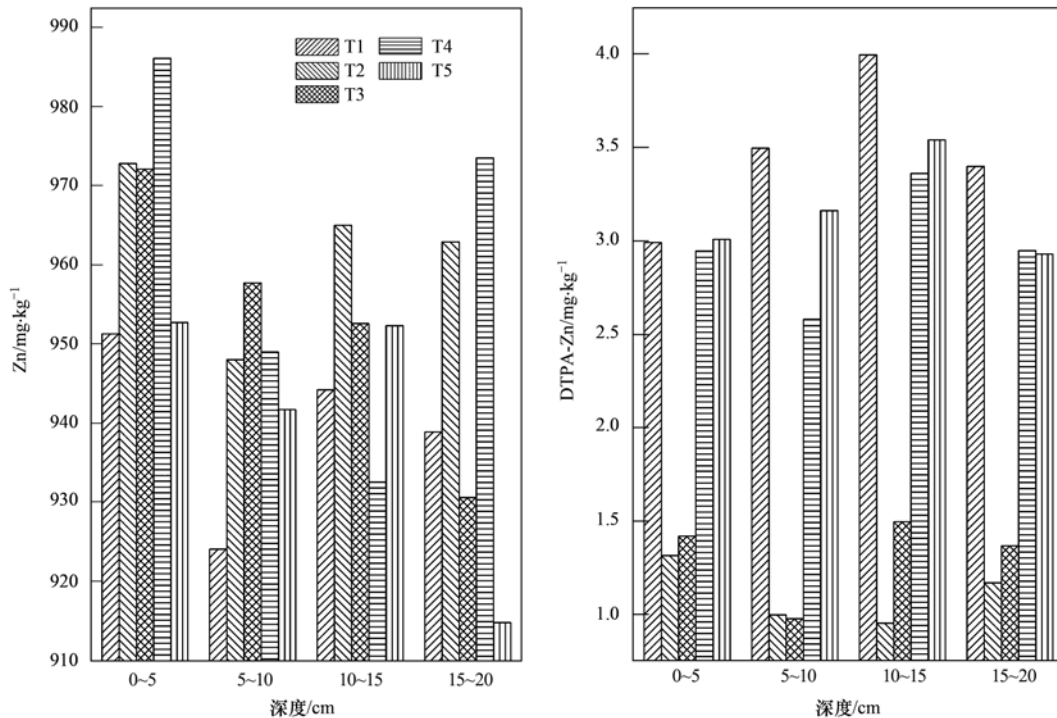


图 4 土柱 0~20 cm 处土壤中总 Zn、DTPA-Zn 浓度

Fig. 4 Concentrations of total Zn and DTPA-Zn in column soils with a depth of 0-20 cm

2.3.2 改良剂组合对清洁土壤总 Zn、DTPA-Zn 的径向分布(20~60 cm)

在 20~60 cm 处清洁土壤, 对照组 T1 在淋溶条件下, 显著地增加了 20~40 cm 处总 Zn 和 DTPA-Zn 浸取量(图 5), 40~60 cm 处总 Zn 与背景值相近, 表明在淋溶条件下供试土壤由于自身性质的作用能够有效地稳定固化 Zn, 抑制了 Zn 的向下迁移能力. 较对照组 T1, 处理方式 T2、T3、T4、T5 对清洁土壤处总 Zn 作用基本一致, 能有效地降低 DTPA-Zn 浸取量, 达到钝化 Zn 的目的. 虽然 5 个处理方式能够降低 DTPA-Zn 浸取率, 但是 Zn 还是有向下迁移的趋势.

2.3.3 土壤重金属全 Zn 与 DTPA-Zn 的关系

土壤总 Zn 与 DTPA-Zn 之间存在显著相关性

(处理 T1: $r = 0.302$, $y = 0.001x + 2.261$; 处理 T2: $r = 0.938$, $y = 0.01x + 0.211$; 处理 T3: $r = 0.965$, $y = 0.001x + 0.088$; 处理 T4: $r = 0.985$, $y = 0.003x + 0.057$; 处理 T5: $r = 0.994$, $y = 0.003x - 0.032$).

2.4 改良剂组合对土柱土壤营养物质的影响

2.4.1 土壤速效磷含量的径向分布

添加修复剂处理均引起了土壤速效磷含量的变化, 如图 6 所示. 在对照组 T1 中, 污染土层速效磷基本与背景速效磷一致, 增加 20~30 cm 处清洁土壤层速效磷含量, 造成土壤速效磷的淋失. 上述 5 种处理方式下, 在 0~20 cm 处, 5 个处理方式下对速效磷含量的径向提高效果顺序为 T4、T5 > T2、T3 > T1, 其中处理方式 T4、T5 速效磷含量均超过 20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较好地提高了速效磷含量, 达到作物的耕

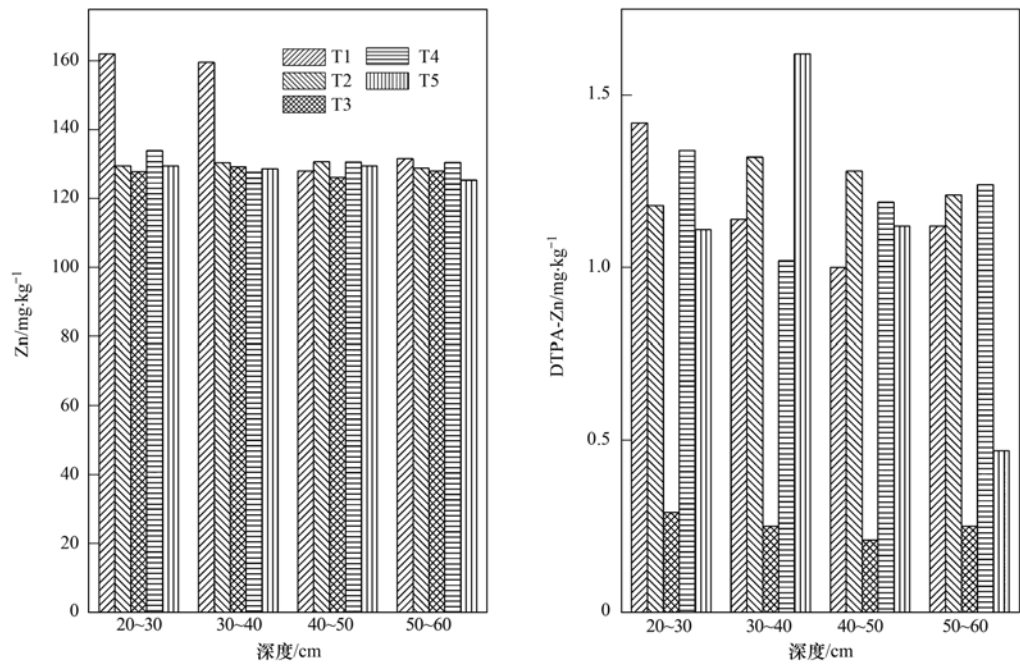


图5 土柱 20~60 cm 处土壤中总 Zn、DTPA-Zn 浓度

Fig. 5 Concentrations of total Zn and DTPA-Zn in column soils with a depth of 20-60 cm

作对速效磷的需求; 在处理方式 T2、T3 处理下,速效磷含量范围为 5 ~ 10 mg·kg⁻¹,能够满足特定作物对速效磷的需求. 除对照组 T1 外,其它的处理方式均未对 20 ~ 60 cm 处清洁土壤速效磷含量造成影响,可初步表明所加入的修复剂均能够较好地将土壤速效磷稳定在土壤层中,降低速效磷向深层土壤迁移,造成二次污染.

2.4.2 土壤有机质含量的径向分布

从图 6 可以看出,较对照组 T1,其它 4 种处理

方式均能提高了土壤有机质的含量,5 个处理方式下对土壤有机质含量的提高效果的排序为:T5 > T2 > T4 > T3 > T1. 较土壤背景有机质,处理方式 T1、T2、T3、T4 显著降低了土壤有机质含量,造成 15 ~ 20 cm 处有机质含量显著增加 (0.01 < P < 0.05),而 T5 处理的土壤有机质含量基本不变,达到 21.7 g·kg⁻¹. 表明处理方式 T5 能够有效地将土壤有机质稳定在土壤中,防止土壤有机质的淋失.

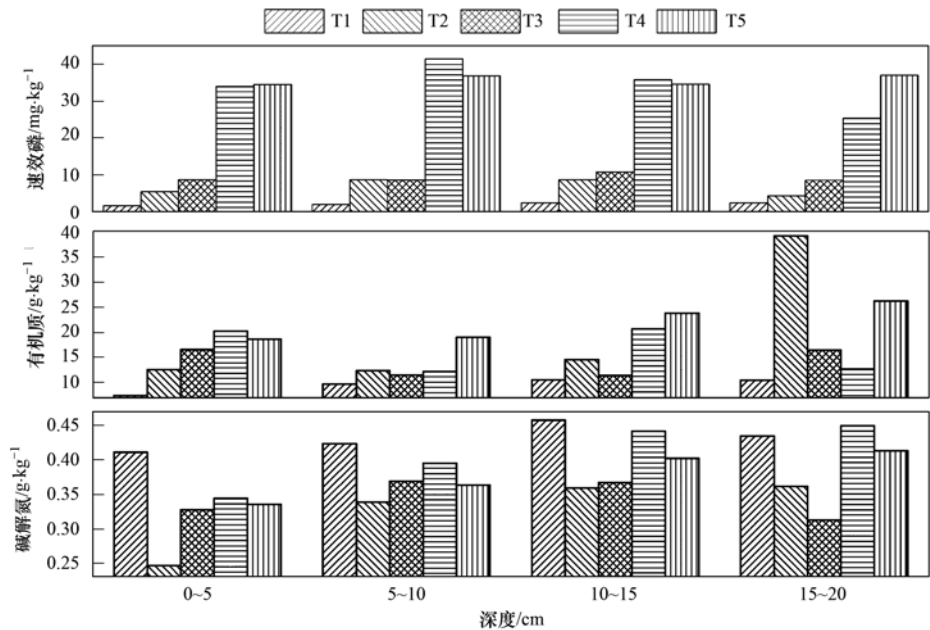


图6 土壤速效磷、有机质、碱解氮径向分布

Fig. 6 Vertical distribution of Olsen-P, organic matter and alkali-hydrolyzable nitrogen in column soils

2.4.3 土壤碱解氮含量的径向分布

从图6可以看出,较对照组T1,处理方式T2、T3处理方式均降低了土壤碱解氮的含量,处理方式T4、T5未发生显著变化($0.01 < P < 0.05$)。较土壤背景有机质,处理方式T2、T3均为发生显著变化,而处理方式T1、T4、T5提高了土壤碱解氮的含量($0.01 < P < 0.05$),表明处理方式T4、T5能够有效地将土壤碱解氮稳定在土壤中,防止土壤碱解氮的淋失。

3 讨论

土壤铅、锌污染主要来源于矿业冶金,铅、锌主要富集在土壤表层,而铅在土壤中多为化学吸附,仅有30%的铅能够被释放出来^[29]。一般情况下,有机重金属螯合物稳定性会随pH值的增加而增加。通过调节土壤pH值大小来调控有机金属络合物的形成,调节重金属在土壤中的行为。重金属的有效性会随着碱度的增加而降低。当 $pH \leq 5$ 时, H^+ 与有机质中的络合点位有较大亲和力,降低重金属离子与有机质形成稳定的有机重金属螯合物,降低重金属的生物有效性。土柱土壤pH值径向分布如图1所示,不同修复剂(生石灰、钙镁磷肥、有机肥、聚丙烯酰胺)能有效地提高环江地区重金属污染土壤pH值。与对照组T1相比较,处理方式T2、T3、T4、T5中的钙镁磷肥、生石灰组合能提高土壤pH值,改善供试土壤酸化特性,对pH值影响变化大小范围分别为2.7~3.2、1.6~2.7,降低了铅的可迁移性,均能达到南方作物种植pH条件,对20~60 cm处清洁土壤pH影响较小。

不同处理方式对土壤铅、锌的淋溶效果变化趋势如图2~图5所示。在土壤总Pb及其DTPA-Pb浸取态方面,在土壤0~20 cm处,较对照组T1,处理方式T2、T3、T4、T5能够有效地活化Pb的能力,对土壤的DTPA-Pb浸取率大小分别为4%~8%、4%~9%、12%~23%、16%~24%,均提高土壤Pb的生物有效性;在20~60 cm处,各个处理方式对DTPA-Pb的处理效果不存在显著差异($P < 0.05$)。较对照组T1,处理方式T4、T5表现为具有活化污染土壤铅、钝化污染土壤锌的作用,对清洁土壤层的有效态铅、锌影响较小,而处理方式T2、T3表现为对土壤铅、锌均具有抑制作用。出现上述现象一方面可能是受到修复剂中纯有机肥的影响,土壤有机质主要通过表面络合、沉淀及离子交换作用增加土壤对重金属离子的吸附^[30],通过腐殖酸与重金属离子形成螯合物,促进土壤对重金属离子的

吸附作用^[31],或促进有机碳、CEC含量变化来改变土壤性质^[32, 33],对重金属离子的吸附形成稳定的重金属-颗粒态有机质复合体,降低重金属在土壤中的生物有效性;另一方面可能是纯有机肥受到土壤pH变化的影响,pH变化过大会导致有机质对重金属吸附能力下降^[34],有机质在pH为6~7的范围内能达到较高吸附重金属的水平^[35],可能是在供试土壤酸性条件下,土壤有机质溶解后与土壤中重金属离子产生竞争,打破了铅、锌在土壤中的沉淀-溶解平衡,分解了土壤中的矿物,解析出重金属离子,减少土壤对重金属离子的吸附点位数量,降低土壤对重金属的吸附,促进了重金属在土壤中随土壤溶液运动,再者是因为在添加有机肥的处理方式中,添加石灰石等碱性物质,会导致土壤溶液中可溶性有机碳升高,可溶性的重金属有机质络合物增大,促使土壤中重金属的淋溶性加强。而施用钙镁磷肥后由于供试土壤 $pH < 4$,在纯有机肥存在条件下严重阻碍了氯磷铅石的形成,削弱了晶体的生长。而T4、T5的土壤pH处于5~6范围内,对Pb的吸附作用较小,导致了土壤对土壤Pb的解吸,对污染土壤DTPA-Pb浸取率分别为2%~23%、3~24%。较对照组T1,处理方式T4、T5能够促进对Zn的稳定,对土壤养分有效性的作用极为显著($P < 0.05$),对速效磷处理含量均超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较好地提高了速效磷含量,达到作物的耕作对速效磷的需求,能够较好地稳定土壤有机质含量及碱解氮,恢复强酸铅锌污染土壤的农业生产。

4 结论

供试土壤中Pb、Zn是主要修复目标元素,在本次淋溶实验中通过施用不同类型改良剂组合对供试污染土壤的作用得出,处理方式T2、T3处理中的生石灰、钙镁磷肥能作为基础修复剂,处理方式T4、T5中的有机肥、聚丙烯酰胺作为优势修复剂使用,能为作物提供适宜的种植条件所需的营养物质,可为后期建立化学钝化-植物修复联用技术提供新的思路和可行性。在今后将进一步探究纯有机肥和生石灰、钙镁磷肥之间存在的作用机制,了解纯有机肥的有效pH值范围,以提高纯有机肥对重金属的吸附能力。

参考文献:

- [1] 朱光旭,郭庆军,杨俊兴,等.淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究[J].环境科学,2013,34(9):3690-3696.
- [2] 朱佳文,邹冬生,向言词,等.钝化剂对铅锌尾矿砂中重金

- 属的固化作用[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(5): 920-925.
- [3] 彭康, 李夕兵, 王世鸣, 等. 基于未确知测度模型的尾矿库溃坝风险评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(4): 1447-1452.
- [4] Cidu R, Dadea C, Desogus P, *et al.* Assessment of environmental hazards at abandoned mining sites: A case study in Sardinia, Italy [J]. Applied Geochemistry, 2012, **27**(9): 1795-1806.
- [5] 李全明, 陈仙, 王云海, 等. 基于模糊理论的尾矿库溃坝风险评价模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, **4**(6): 57-61.
- [6] 邓中华, 朱旭波, 彭康. 尾矿库安全的可拓综合评价研究[J]. 矿业研究与开发, 2011, **31**(5): 99-102.
- [7] Kalbe U, Berger W, Eckardt J, *et al.* Evaluation of leaching and extraction procedures for soil and waste[J]. Waste Management, 2008, **28**(6): 1027-1038.
- [8] Malandrino M, Abollino O, Buoso S, *et al.* Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite [J]. Chemosphere, 2011, **82**(2): 169-178.
- [9] Beesley L, Marmiroli M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(2): 474-480.
- [10] 翟丽梅, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 广西环江铅锌矿尾砂坝坍塌对农田土壤的污染及其特征[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(6): 1206-1211.
- [11] 雷良奇, 宋慈安, 王飞, 等. 桂北及邻区碳酸盐型尾矿的酸中和能力及酸化潜力[J]. 矿物岩石, 2010, **30**(4): 106-113.
- [12] 钱建平, 江文莹, 牛云飞. 矿山-河流系统中重金属污染的地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, **29**(1): 74-82.
- [13] 李翔, 宋云, 刘永兵. 石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1946-1954.
- [14] 孙约兵, 王朋超, 徐应明, 等. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4720-4726.
- [15] 汤民, 张进忠, 张丹, 等. 土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd [J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3569-3576.
- [16] 杨勇, 江荣凤, 李花粉, 等. 土壤容重改变对镉/镉超累积植物遏兰菜根系特征及吸镉的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 3043-3049.
- [17] Lan J C, Zhang S R, Lin H C, *et al.* Efficiency of biodegradable EDDS, NTA and APAM on enhancing the phytoextraction of cadmium by *Siegesbeckia orientalis* L. grown in Cd-contaminated soils[J]. Chemosphere, 2013, **91**(9): 1362-1367.
- [18] Krüger O, Kalbe U, Berger W, *et al.* Leaching experiments on the release of heavy metals and PAH from soil and waste materials [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **207-208**(6): 51-55.
- [19] 宋波, 张学洪, 蒙冬柳, 等. 桂林市菜地土壤和蔬菜铅含量调查与污染评价[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(10): 1155-1160.
- [20] 夏栋, 潘家荣, 张博, 等. 土壤速效氮两种测定方法的测定值相关性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010, **32**(2): 95-97, 102.
- [21] Merrington G, Alloway B J. The transfer and fate of Cd, Cu, Pb and Zn from two historic metalliferous mine sites in the U. K [J]. Applied Geochemistry, 1994, **9**(6): 677-687.
- [22] 王浩, 章明奎. 有机质积累和酸化对污染土壤重金属释放潜力的影响[J]. 土壤通报, 2009, **40**(3): 538-541.
- [23] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(1): 84-91.
- [24] Rangel-Porras G, García-Magno J B, González-Muñoz M P. Lead and cadmium immobilization on calcitic limestone materials [J]. Desalination, 2010, **262**(1-3): 1-10.
- [25] Baker L R, White P M, Pierzynski G M. Changes in microbial properties after manure, lime, and bentonite application to a heavy metal-contaminated mine waste[J]. Applied Soil Ecology, 2011, **48**(1): 1-10.
- [26] Houben D, Pircar J, Sonnet P. Heavy metal immobilization by cost-effective amendments in a contaminated soil: Effects on metal leaching and phytoavailability[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, **123**: 87-94.
- [27] Cao X D, Ma L Q, Singh S P, *et al.* Phosphate-induced lead immobilization from different lead minerals in soils under varying pH conditions [J]. Environmental Pollution, 2008, **152**(1): 184-192.
- [28] 周秀艳, 王恩德, 王宏志. 辽西滨海矿集区重金属污染与评价[J]. 土壤, 2004, **36**(4): 387-391.
- [29] 彭丽成, 黄占斌, 石宇, 等. 不同环境材料对 Pb、Cd 污染土壤的淋溶效应[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 1033-1038.
- [30] Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter[J]. Science of The Total Environment, 1998, **209**(1): 27-39.
- [31] Janoš P, Vávrová J, Herzogová L, *et al.* Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: A sequential extraction study[J]. Geoderma, 2010, **159**(3-4): 335-341.
- [32] Liu C C, Lin Y C. Reclamation of copper-contaminated soil using EDTA or citric acid coupled with dissolved organic matter solution extracted from distillery sludge [J]. Environmental Pollution, 2013, **178**: 97-101.
- [33] Tan K H, Dowling P S. Effect of organic matter on CEC due to permanent and variable charges in selected temperate region soils [J]. Geoderma, 1984, **32**(2): 89-101.
- [34] Gardea-Torresdey J L, Tang L, Salvador J M. Copper adsorption by esterified and unesterified fractions of Sphagnum peat moss and its different humic substances [J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, **48**(1-3): 191-206.
- [35] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 土壤中颗粒状有机质对重金属的吸附作用[J]. 土壤通报, 2007, **38**(6): 1100-1104.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行