

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.11
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国(4767)

中国水泥排放清单及分布特征 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞(4776)

环境空气 PM_{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立:以长三角地区为例 张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹(4786)

南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征 张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程(4803)

郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析 张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹(4813)

山西大学城 PM_{2.5} 中元素特征、来源及健康风险评估 李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇(4825)

2000~2019年中国 PM_{2.5} 时空演化特征 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富(4832)

北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军(4844)

基于天气背景天津大气污染输送特征分析 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐(4855)

基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠(4864)

基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源 孙佳宁, 谢绍东(4874)

芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜(4885)

密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应 张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双(4895)

北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探 陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫(4905)

2009~2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素 辛华荣, 朱广伟, 王雷松, 李骏, 陆隽(4914)

雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆(4924)

基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强(4936)

会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一(4948)

太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程(4958)

强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海(4970)

长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序 苏超, 崔严(4981)

嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价 杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷(4989)

污水处理厂对漓江桂林市河段淡水生物中微塑料累积的影响 谢元沅, 张清科, 张漓杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳(4999)

村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律 卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送(5008)

冬季小流域水体微生物多样性及影响因素 朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌(5016)

水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响 王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇(5027)

长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析 韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣(5037)

类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟(5050)

基于决策树的城市黑臭水体遥感分级 李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰(5060)

纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制 潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金山, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英(5073)

温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N₂O 释放的影响 王丝可, 于恒, 左剑恶(5082)

以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A²/O 污染物去除特性 荣懿, 邵劲博, 于优城, 石恒, 金鹏康(5089)

不同曝气比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清(5097)

中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响 田中科, 王芬, 闫钊(5106)

基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 韩琳, 徐夕博(5114)

再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 沈城, 刘霞雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛(5125)

有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因素 侯静雯, 施维林, 高娟(5133)

硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英(5143)

叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰(5151)

重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应 王晓宇, 韩辉(5160)

油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响 赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君(5168)

氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响 张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔(5176)

生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋(5185)

铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响 贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰(5193)

典型水环境微生物源异味物研究进展 张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥(5201)

广告:国家微生物科学数据中心 (前插)

《环境科学》征订启事(4785) 《环境科学》征稿简则(4947) 信息(5015, 5124, 5132)

油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响

赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥*, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要: 通过3 a持续的油菜-水稻轮作小区实验,其中前2a连续施用修复材料,后1a不施用修复材料,探究羟基磷灰石、生石灰、生物炭、生物有机肥和纳米材料对铜污染土壤的修复效果,及其对铜在油菜和水稻不同部位的富集情况.结果表明,羟基磷灰石、生石灰和纳米材料均能显著提高土壤pH值;不同修复材料均可有效地抑制土壤铜的移动,以生石灰修复土壤处理的有效铜降幅最大,连续施用修复材料的四季分别为38.9%、34.9%、27.88%和29.04%,且生石灰钝化有效铜的后续效果也较其他修复材料理想.修复材料的施用,促使油菜和水稻可食用部分中铜含量显著降低,修复材料施用的四季中,不同作物可食用部分铜含量最大值分别降低46.03%、22.2%、29.44%和31.71%,由于修复材料的施用效果,不施修复材料两季节作物可食用部分中铜含量均未超过国家食品安全限值.不同修复材料的使用,油菜和水稻产量均有所提高.本文可为铜污染地区土壤改良提供一定的理论依据和技术支撑.

关键词: 修复材料; 油菜-水稻轮作; 铜污染; 修复; 持续性

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-5168-08 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202004030

Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation

ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang*, XUE Zhong-jun, LIU Na, WU Meng-jun

(School of Resources and Environment, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China)

Abstract: In this study, a continuous rape-rice rotation plot experiment was conducted over three years. Repair materials were continuously applied in the first two years, and no repair materials were applied in the second year. The repair effects of hydroxyapatite, lime, biochar, bio-organic fertilizer, and nano-materials on copper contaminated soil and the enrichment of copper in different parts of rape and rice were investigated. The results show that hydroxyapatite, lime, and nanomaterials can significantly increase soil pH, and different restoration materials can effectively inhibit the movement of soil copper. The effective copper treatment with lime restoration soil had the largest decrease. The four seasons of continuous application of restoration materials were 38.9%, 34.9%, 27.88%, and 29.04%, respectively, and the subsequent effect of lime passivation of effective copper was better than other restoration materials. The application of the repair material significantly reduced the copper content in edible parts of rape and rice. In the four seasons of application of the repair material, the maximum copper content in edible parts of different crops decreased by 46.03%, 22.2%, 29.44%, and 31.71%, respectively. Due to the application effect of the repair material, the copper content in the edible part of the two season crops, without the repair material, did not exceed the national food safety limit. With the use of different repair materials, the yields of rapeseed and rice were improved. This test can provide some theoretical basis and technical support for soil improvement in copper-contaminated areas.

Key words: remediation materials; rape-rice rotation; copper pollution; remediation; sustainability

近年来,随着工业化和城市化的高速发展,造成的环境问题愈来愈严峻,土壤重金属污染对经济发展和人类生活造成了一定的影响^[1,2].重金属污染具有高毒性,隐蔽性,难降解性和生物体易积累性等特点^[3].铜污染物在我国耕地土壤中,点位超标率高达2.1%.铜是植物体内多种氧化酶的主要成分,是植物体必不可少的微量元素之一,参与植物的氧化还原反应,对植物的呼吸作用产生巨大的影响.此外,铜也参与植物的光合作用,确保叶绿素的稳定性^[4].铜元素的过量很容易对植物体造成毒害.并且遏制植物参与的光合作用,影响作物产量.过量的铜会在植物体内积累,通过生物链危害人类的健康^[5].

目前,原位钝化修复技术以其操作简单,成本低

廉,修复效果显著被广泛使用^[6~8],该技术是在土壤中添加一些能够改变土壤酸性或者与重金属离子发生化学反应的物质,使土壤中重金属离子的含量下降,减少对植物的毒害.常见的修复主要分为无机修复材料、有机修复材料、微生物修复材料和有机无机修复材料^[9].有研究发现生物炭能够显著降低水稻和油菜中铜含量^[10,11].田雪等^[12]的研究表明,凹凸棒石-石灰复混材料的比例为1:2时,对铜的钝化效果最好.磷灰石显著提高了土壤pH值,

收稿日期: 2020-04-03; 修订日期: 2020-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0801105, 2018YFD0800203)

作者简介: 赵颖颖(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: 1134809325@qq.com

* 通信作者, E-mail: hongxianghu@163.com

降低了植物对铜的吸收^[13].在土壤修复过程中,长期使用修复材料可能会对耕层土壤造成一定的问题,甚至会造成二次污染^[14].石灰有效地降低了土壤中重金属含量,但长期使用易造成土壤养分降低^[15].含磷材料对土壤中铜的固定效果较好,大量使用后,随着土壤中可溶性磷的流失,会造成水体富营养化^[16,17].

本研究选取羟基磷灰石、生石灰、生物炭、生物有机肥和纳米材料这 5 种修复材料,在中国铜都——铜陵地区田间开展持续实验,修复在全国具有代表性的铜污染土壤,具有重要的理论价值和适用价值,同时研究兼顾经济和环境效果分析,以及土

壤性状改善和农作物安全分析,具有综合系统性.

1 材料与方法

1.1 供试地区

本实验于 2016 ~ 2019 年在安徽省铜陵实验区进行,该地区为北亚热带季风气候,夏季温度较高且多雨,冬季气候温和,年平均气温 16.2℃,全年平均湿度在 75% ~ 81% 之间,种植模式为油菜-水稻轮作.该地区的污染源主要是附近的铜矿及污染水源的灌溉.供试土壤为水稻土.基本理化性质如表 1 所示,其中土壤铜含量超过国家《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018),属于铜污染土壤.

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

项目	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	有效铜 /mg·kg ⁻¹	全铜 /mg·kg ⁻¹
参数	5.04	23.90	112.00	50.12	219.36	100.50	230.06

1.2 供试材料

2016 年油菜季供试品种为泔油 737 (*Brassica napus* L.), 2017 年水稻季供试作物为镇稻 18 号 (*Oryza sativa* L.), 2017 年油菜季供试品种为皖油 7 号 (*Brassica napus* L.), 2018 年水稻季供试品种为徐稻 5 号 (*Oryza sativa* L.), 2018 年油菜

季供试品种为泔油 737 (*Brassica napus* L.), 2019 年水稻季供试品种为皖垦糯 1 号 (*Oryza sativa* L.).

供试修复材料 5 种,分别为:①羟基磷灰石;②生石灰;③生物炭;④生物有机肥和⑤纳米材料.供试材料性质见表 2.

表 2 供试修复材料基本性质

Table 2 Basic properties of test repair materials

修复材料	主要成分	pH	Cu/mg·kg ⁻¹
羟基磷灰石	化学组成 Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂ , Ca/P 为 1.67, 纯度为 96%	8.27	2.58
生石灰	化学组成 CaO, 纯度为 95%, 遇水生成碱性物质 Ca(OH) ₂	12.89	—
生物炭	比表面 8.9 m ² ·g ⁻¹ , 有机碳 ≥ 460 g·kg ⁻¹	8.17	9.72
生物有机肥	由鸡粪和麦麸等物质组成, N、P ₂ O ₅ 和 K ₂ O 的比例为 2:1:1, 有机质含量不低于 20%	8.17	5.80
纳米材料	主要成分是二氧化硅和硅酸盐, 比表面积 ≥ 80 m ² ·g ⁻¹	10.74	17.57

1.3 实验设计

本实验小区不施加修复材料的对照(CK)、羟基磷灰石(HAP)、生石灰(LM)、生物炭(BC)、生物有机肥(OM)和纳米材料(SI)这 6 个处理,均设 3 个重复,共 18 个小区,每个小区长 × 宽 = 6 m × 5 m, 面积为 30 m², 小区随机排列,各个小区田间管理方式一致. 2016 年油菜季 ~ 2018 年水稻季每季作物在 CK 处理下不施用修复材料, HAP 处理下施用羟基磷灰石 3 330 kg·hm⁻², LM 处理下施用生石灰 5 000 kg·hm⁻², BC 处理下施用生物炭 10 000 kg·hm⁻², OM 处理下施用生物有机肥 33 330 kg·hm⁻², SI 处理下施用纳米材料 6 670 kg·hm⁻². 2018 年油菜季 ~ 2019 年水稻季在 CK 处理下不施用修复材料, HAP 处理下施用羟基磷灰石 0 kg·hm⁻², LM 处理下施用生石灰 0 kg·hm⁻², BC 处

理下施用生物炭 0 kg·hm⁻², OM 处理下施用生物有机肥 0 kg·hm⁻², SI 处理下施用纳米材料 0 kg·hm⁻².

1.4 采样与分析

所种植的油菜和水稻均在作物成熟期采样.各实验小区沿对角线三点取样,每点随机选取 5 株作物先测株高,后采集地上部分和对应的根际土样,将样品带回实验室,土壤样品除去石块与植物根系,待自然风干后,土壤分别过 0.1 mm 筛和 1 mm 筛.土壤 pH 值用电位法,土壤有效铜采用 DTPA 法浸提,用原子分光光度计测定.采集的植株根据其清洁程度进行清洗,清洗完毕后,105℃ 杀青 30 min, 75℃ 烘至恒重,分别取不同部位的植物样品进行粉碎、保存.植株样品采用硝酸-高氯酸消解,用原子分光光度计测定不同部位中铜含量.

1.5 数据处理

本实验所测得数据用 Microsoft Excel 2019 处理, 运用 SPSS 20 进行显著性分析, Origin 2017 作图.

2 结果与讨论

2.1 修复材料对土壤理化性质的影响

由表 3 可知, 不同修复材料对土壤 pH 值的影响存在显著差异 ($P < 0.05$). 总体来说, 水稻季土壤 pH 值高于油菜季 pH 值. 前四季在施用过修复材料后, 土壤 pH 值较当季对照 (CK) 显著增加, 增加幅度分别 0.39 ~ 0.99、0.07 ~ 0.26、0.07 ~ 1.61 和 0.09 ~ 1.24. 未施用修复材料的两季土壤 pH 值也较对照有所增加, 分别增加 0.08 ~ 0.64 和 0.04 ~ 0.45, 其中, LM 处理下对土壤 pH 值增加幅度最大, OM 处理会造成土壤 pH 值有所下降, BC 处理对土壤 pH 值的影响较小. 就土壤有机质来说, 不同修复材料处理之间差异显著. BC 的使用, 显著增加了油菜季和水稻季土壤中有有机质的含量, 依次为 OM、HAP、SI 和 LM.

修复材料的使用对土壤速效养分含量的影响如表 4 和表 5 所示. 与当季对照相比, 修复材料的使用显著增加了土壤速效养分含量. 碱解氮的含量分别较对照增加 0.84% ~ 16.14%、0.41% ~ 4.92%、0.93% ~ 9.3%、2.03% ~ 14.76%、3.8% ~ 15% 和 0.4% ~ 13.08%. 不同修复材料对土壤速效磷含量的影响为 HAP > LM > BC > SI > OM. HAP 的使用显著增加了六季土壤中速效钾的含量.

由表 3 可知, 未施用修复材料的油菜季土壤 pH 值和有机质含量均高于施用修复材料的第一季油菜季 (即 2016 年油菜季) 土壤 pH 值和有机质含量; 2017 年的水稻季土壤 pH 值较未施用修复材料的水稻季土壤 pH 值有所下降, 有机质含量则有所上升. 就土壤速效养分来说, 2018 年油菜季土壤碱解氮和速效钾的含量低于 2016 年油菜季的碱解氮和速效钾的含量, 土壤有效磷含量则有所增加. 2018 年水稻季土壤中碱解氮含量较 2017 年水稻季中碱解氮含量有所下降, 而土壤有效磷和速效钾的含量则高于 2017 年水稻季中有效磷和速效钾的含量.

表 3 不同修复材料对土壤 pH 值和有机质的影响¹⁾

Table 3 Effects of different remediation materials on soil pH and organic matter

处理	2016 年油菜季		2017 年水稻季		2017 年油菜季		2018 年水稻季		2018 年油菜季		2019 年水稻季	
	pH	有机质 /g·kg ⁻¹										
CK	5.28c	21.98b	6.75abc	22.27d	5.14c	22.61b	5.97c	22.90bc	6.11bc	24.90b	6.36b	23.51b
HAP	5.81b	25.20ab	6.82ab	23.29cd	6.00b	21.45b	6.06c	22.63c	6.19bc	26.04ab	6.55ab	26.18ab
LM	6.27a	22.67b	7.01a	23.56bc	6.75a	20.54b	7.21a	22.41c	6.75a	23.05b	6.81a	25.81ab
BC	5.28c	26.77ab	6.53c	25.44a	5.34c	33.32a	5.93c	30.14a	6.09bc	28.06a	6.40b	27.24a
OM	5.22c	23.77ab	6.68bc	24.55ab	5.07c	22.56b	5.91c	25.85b	6.04c	27.05a	6.33b	26.14ab
SI	5.67b	25.16ab	6.98a	22.95cd	6.37ab	21.25b	6.81b	21.13c	6.62ab	23.41b	6.55ab	25.73ab

1) 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

表 4 不同修复材料对油菜季土壤速效养分的影响/mg·kg⁻¹

Table 4 Effects of different restoration materials on soil available nutrients in rape season/mg·kg⁻¹

处理	2016 年油菜季			2017 年油菜季			2018 年油菜季		
	碱解氮	有效磷	速效钾	碱解氮	有效磷	速效钾	碱解氮	有效磷	速效钾
CK	133.70c	22.04bc	219.36c	125.42a	21.59b	171.33bc	110.48b	22.20c	178.67c
HAP	148.58ab	37.20a	276.84a	133.00a	39.98a	213.50a	114.68b	39.57a	266.67a
LM	142.84b	25.08b	195.18d	126.58a	23.43b	146.00c	118.77ab	29.18b	191.00c
BC	149.94ab	24.94b	251.75b	125.42a	22.45b	178.25bc	127.05a	32.95b	224.33b
OM	155.28a	22.15bc	230.31bc	137.08a	21.28b	179.83b	124.25a	26.65c	225.67b
SI	148.77ab	18.75c	170.09e	126.58a	22.18b	181.83b	112.18b	20.78c	238.00b

表 5 不同修复材料对水稻季土壤速效养分的影响/mg·kg⁻¹

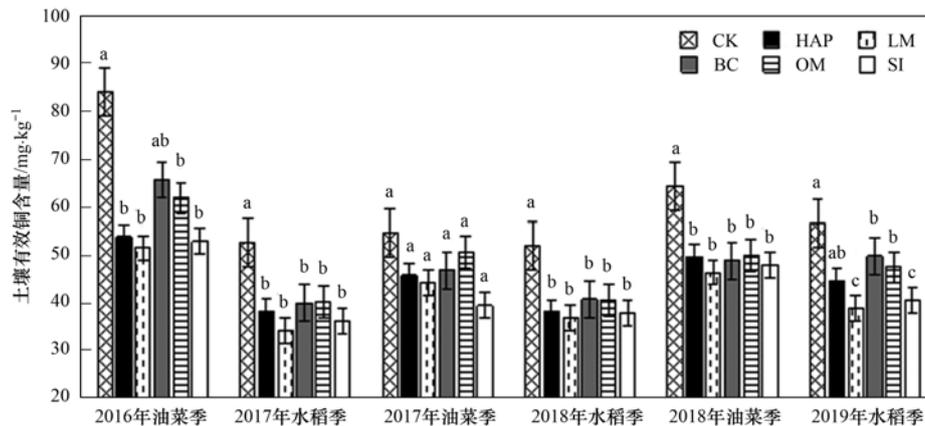
Table 5 Effects of different restoration materials on soil available nutrients in rice season/mg·kg⁻¹

处理	2017 年水稻季			2018 年水稻季			2019 年水稻季		
	碱解氮	有效磷	速效钾	碱解氮	有效磷	速效钾	碱解氮	有效磷	速效钾
CK	170.60ab	24.82c	67.66d	114.57a	21.71c	129.53b	132.13d	23.12c	216.67c
HAP	171.30ab	52.53a	150.68a	125.65a	47.84a	204.82a	138.13cd	38.31c	270.00a
LM	166.41ab	35.60b	87.83cd	116.90a	26.14bc	132.10b	147.29b	34.37ab	240.00bc
BC	176.89ab	27.08bc	90.11cd	131.48a	33.61b	196.27a	155.81a	33.23ab	243.33abc
OM	178.99a	30.87bc	95.07bc	127.40a	20.80c	165.47ab	142.57bc	32.44b	236.67bc
SI	163.61b	25.59c	116.76b	112.82a	22.44c	147.50b	147.12b	26.99c	253.33ab

2.2 修复材料对土壤有效铜的影响

如图 1 所示, 修复材料的施用促使土壤有效铜含量显著下降. 总的来说, 这 5 种修复材料钝化有效铜的能力大小为 LM > SI > HAP > OM > BC. 施用修复材料之后, 四季土壤有效铜的下降幅度分别为 22.12% ~ 38.9%、23.42% ~ 34.9%、7.26% ~ 27.88% 和 21.76% ~ 29.04%, 其中, 2017 年油菜季 SI 处理下, 土壤有效铜含量较当季对照下降最多,

其次为 LM 处理. 2016 年油菜季、2017 年水稻季和 2018 年水稻季都为 LM 处理下有效铜含量较当季对照下降最多. 未施用修复材料的两季在不同处理下的土壤有效铜含量较当季对照显著下降. 2018 年油菜季中有效铜的下降幅度为 22.23% ~ 27.75%, 其中, LM 处理下降幅度最大. 2019 年水稻季土壤有效铜的下降幅度为 12.09% ~ 31.18%, LM 处理下降幅度大, 其次依次为 SI、BC、HAP 和 OM.



图中小写字母标注不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同修复材料对土壤有效铜含量的影响

Fig. 1 Effects of different restoration materials on soil available copper content

2.3 修复材料对植株铜的影响

表 6 和表 7 为不同修复材料对油菜和水稻不同部位铜含量的影响. 油菜不同部位富集铜的大致规律为菜皮 > 籽粒 > 茎秆. 2016 年油菜季和 2017 年油菜季在施用修复材料后, 油菜籽粒中铜含量较当季对照籽粒中铜含量显著下降, 两季下降幅度分别为 33.84% ~ 46.03% 和 5.05% ~ 29.44%. 与油菜各

部位富集铜的规律不同, 水稻不同部位富集铜的规律为稻壳 > 茎秆 > 糙米. 与 2017 年和 2018 年对照相比, 施用修复材料后, 水稻糙米中铜含量显著下降, 降幅分别为 8.2% ~ 22.2% 和 11.82% ~ 31.71%. 与文献[18 ~ 20]的研究结果一致, 施用修复材料可有效地降低油菜籽粒和水稻糙米中铜含量. 2018 年油菜季和 2019 年水稻季中, 籽粒和糙米

表 6 修复材料对油菜不同部位铜含量的影响/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 6 Effect of repairing materials on copper content in different parts of rape/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	2016 年			2017 年			2018 年		
	茎秆	菜皮	籽粒	茎秆	菜皮	籽粒	茎秆	菜皮	籽粒
CK	4.23c	16.34bc	15.25a	4.74a	18.50a	8.95a	6.78a	5.50a	4.20a
HAP	3.88c	11.55d	8.23b	2.99b	11.20c	7.40cd	2.00d	5.34b	4.17b
LM	6.53ab	16.75b	8.23b	3.01b	12.56c	6.51de	2.80abc	4.39b	3.79b
BC	4.77c	13.42cd	8.37b	3.36ab	16.06b	7.70bc	2.23cd	4.79b	3.87b
OM	7.59a	21.22a	10.09b	3.57ab	11.44c	8.50ab	3.79b	5.26b	4.13b
SI	6.35b	14.50bcd	8.74b	3.39ab	7.83d	6.32e	3.21bc	4.66b	3.98b

表 7 修复材料对水稻不同部位铜含量的影响/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 7 Effects of repairing materials on copper content in different parts of rice/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	2017 年			2018 年			2019 年		
	茎秆	稻壳	糙米	茎秆	稻壳	糙米	茎秆	稻壳	糙米
CK	10.70a	11.56bc	9.96a	9.86ab	16.46a	9.61a	8.45a	9.24a	5.16a
HAP	11.68a	16.44a	9.14ab	8.26ab	12.86b	7.02bc	6.52bc	7.46b	4.49b
LM	12.22a	14.86ab	7.75b	9.38ab	11.40b	6.56c	5.79cd	6.91b	4.47b
BC	12.02a	12.47abc	8.15ab	8.10b	13.48b	7.93bc	5.25d	7.43b	4.45b
OM	11.67a	9.84c	8.73ab	9.16ab	13.18b	8.47ab	5.72cd	7.83ab	4.54b
SI	9.50a	12.81abc	8.60ab	10.23a	12.81b	6.95bc	7.11bc	6.30b	4.72ab

中铜含量均未超过国家食品安全限值,但不同处理下籽粒和糙米中铜含量与对照相比差异显著,LM处理油菜籽粒中铜含量最低,为 $3.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. BC处理糙米中铜含量最低,为 $4.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.4 修复材料对产量的影响

不同修复材料对油菜和水稻产量的影响如图2和图3所示.在2016年施用修复材料后,与对照相比,HAP和LM处理油菜产量均增加7.43%;2017年油菜季中,各钝化处理之间无显著差异,但油菜产量均有所提高,提高幅度为

0.9%~5.4%.2017年水稻季中,施用LM后,产量提高幅度最大,为1.77%,其后依次为BC和SI(1.53%和1.06%);2018年施用修复材料后,水稻不同处理之间无显著差异,但产量均较对照有所提升,提升幅度为0.59%~6.78%.HAP、BC和OM处理下,2018年油菜季产量较对照产量增加,分别增加了1.06%、8.47%和6.88%.2019年水稻季中,各修复材料处理间无显著差异,但水稻产量均较对照增加,增加幅度为0.11%~2.27%.

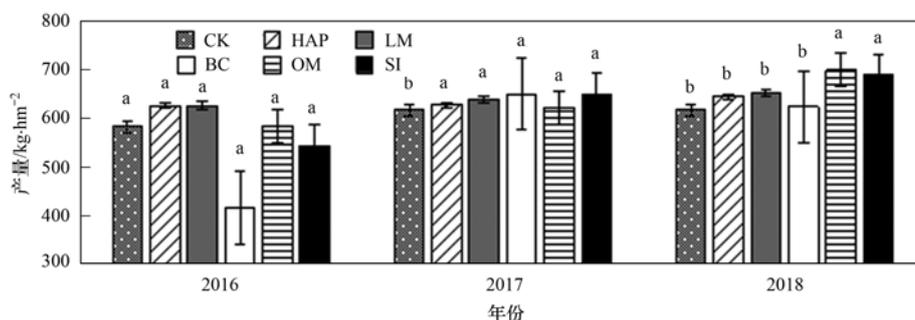


图2 不同修复材料对油菜产量的影响

Fig. 2 Effects of different repair materials on rape yield

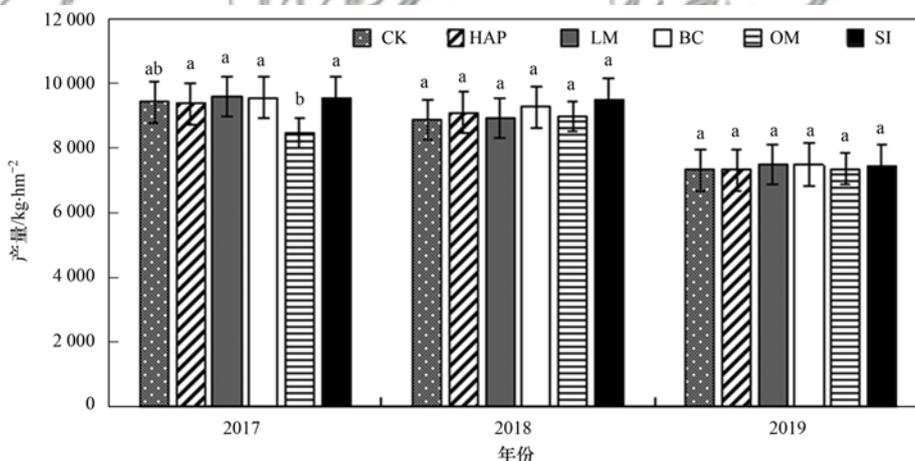


图3 不同修复材料对水稻产量的影响

Fig. 3 Effects of different repair materials on rice yield

2.5 修复材料的使用成本评估

表8为不同修复材料在修复铜污染土壤的使用成本.不同钝化材料对铜的修复效果以图1中有效铜含量下降幅度粗略地分为不同等级.LM处理下土壤有效铜含量下降最多,评为极好,HAP和SI下降幅度次之,评为较好,BC和OM下降幅度最小,评

为好.由表8可知,LM的廉价易得,并且对铜污染土壤的修复效果最好,HAP和SI由于自身较大的比表面积,从而对铜土壤快速修复效果较好,但在修复过程中使用成本过高,BC和OM在修复过程中的使用成本不高,能够提高土壤肥力,但没有其他3种修复材料的修复效果好.

表8 不同修复材料的使用成本评估

Table 8 Cost evaluation of different repair materials

修复材料	施用量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	单价/ $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$	合计/ $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$	修复效果
HAP	3.33	40 000	133 200	较好
LM	5	600	3 000	极好
BC	10	1 800	18 000	好
OM	33.33	1 500	49 995	好
SI	6.67	10 000	66 700	较好

3 讨论

本实验结果显示, 施入修复材料后, 不同处理之间土壤 pH 值差异显著, 土壤养分含量均得到不同程度地增加. 修复材料可以将可交换态的铜转换为其他形态, 使土壤中有效铜含量显著降低^[21].

磷灰石具有较大的比表面积, 可快速地吸附重金属离子^[22], 此外, 磷灰石中含有大量的 Ca^{2+} , 与重金属反应生成难溶性的磷酸盐沉淀^[23]. 石灰呈碱性, 施入土壤中可以提高土壤 pH 值. 石灰与土壤水作用产生 OH^- , 再与重金属离子反应生成氢氧化物或碳酸盐沉淀^[24,25]. 生物炭去除重金属的效果主要取决于生物炭原材料的比表面积大小、内部官能团等^[26]. 生物炭是碱性物质, 在土壤中进行中和反应, 导致土壤 pH 值上升^[11]; 生物炭通过表面吸附, 固定土壤中的铜离子, 导致土壤有效铜含量下降. 施用生物有机肥后, 有机肥在腐熟过程中产生的有机酸导致土壤 pH 值下降^[27], 生物有机肥内的多种官能团与重金属发生络合或螯合反应, 从而降低重金属的生物有效性^[28]. 铜离子被具有较大比表面积的纳米材料所吸附, 使其在土壤中的含量下降, 另一方面, 硅酸盐水解产生的 OH^- 与 Cu^{2+} 生成沉淀, 从而达到固定土壤中铜离子的目的^[29].

土壤中有效铜含量的高低是影响作物籽粒部分富集铜的一个重要因素^[30,31]. 韦小了等^[32]的研究表明, 单一修复材料和组合修复材料均显著降低了土壤中有效铜的含量, 从而降低了水稻籽粒中铜含量. 本研究表明, 修复材料的使用均能从不同程度上降低植物可食用部分中铜含量, 从而促进水稻和油菜产量的增加. 石灰和磷灰石通过自身的碱性性质, 提高了土壤 pH, 使带负电荷的土壤胶体吸附重金属离子^[33], 进而抑制了水稻和油菜对铜的吸收, 促使作物增产. 生物有机肥和生物炭一方面可以有效地降低铜含量, 另一方面促进了植物对养分的吸收. Gu 等^[34]的研究表明硅酸盐具有抑制土壤中重金属, 补充土壤中硅素, 促进作物增产的效果.

修复材料的加入只能暂时改变土壤中可交换态重金属的迁移能力, 但不能改变土壤中重金属总含量. 土壤 pH 值等变化情况可能会导致重金属形态发生变化, 引发二次污染. 此外, 若长期使用修复材料会导致土壤理化性状发生改变. 因此, 修复材料的合理使用至关重要.

4 结论

(1) LM 处理显著增加土壤 pH 值, OM 处理则降低了土壤 pH 值. 施用 LM 的四季和未施用的两季

后, 土壤 pH 值均呈升高的趋势. 修复材料使用后, 土壤养分含量均得到不同程度地增加.

(2) 修复材料的使用, 显著降低了土壤有效铜含量, 不同修复材料钝化铜的能力为 $\text{LM} > \text{SI} > \text{HAP} > \text{OM} > \text{BC}$, LM 处理下铜的最大降幅可达 38.9%.

(3) 各修复材料均可抑制油菜和水稻可食用部分对铜的吸收. 综合六季作物的数据结果, LM 抑制铜的效果最好.

(4) 修复材料的施用促进了油菜和水稻产量的增加. HAP 和 LM 处理促进油菜增产的效果最好, LM 和 BC 处理促进水稻增产的效果最好.

(5) 连续施用修复材料对土壤铜污染具有较好地修复效果, 未施用修复材料后土壤铜污染仍然保持较好地修复效果, 说明施用的修复材料后效明显.

参考文献:

- [1] 张迪, 吴晓霞, 丁爱芳, 等. 生物炭和熟石灰对土壤镉铅生物有效性和微生物活性的影响 [J]. 环境化学, 2019, **38**(11): 2526-2534.
Zhang D, Wu X X, Ding A F, et al. Effects of hydrated lime and biochar on the bioavailability of Cd and Pb and microbial activity in a contaminated soil [J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(11): 2526-2534.
- [2] 刘千钧, 李想, 周阳媚, 等. 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 [J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5623-5628.
Liu Q J, Li X, Zhou Y M, et al. Immobilization impact of goethite-fulvic acid composites on Pb-Cd contaminated soil [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5623-5628.
- [3] Wu H Y, Yang F, Li H P, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soil near a smelter in an industrial city in China [J]. International Journal of Environmental Health Research, 2020, **30**(2): 174-186.
- [4] 陆景陵. 植物营养学上册 [M]. (第二版). 北京: 中国农业大学出版社, 2003. 91-95.
- [5] 程凤, 杨可明, 王敏, 等. 玉米叶片铜污染的 EEMD-MA-FD 光谱诊断模型 [J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(4): 779-786.
Cheng F, Yang K M, Wang M, et al. An EEMD-MA-FD spectral diagnosis model of copper pollution in maize leaves [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(4): 779-786.
- [6] 迟荪琳, 徐卫红, 熊仕娟, 等. 不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 [J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1654-1666.
Chi X L, Xu W H, Xiong S J, et al. Effect of nano zeolites on pH, CEC in soil and Cd fractions in plant and soil at different cadmium levels [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1654-1666.
- [7] Li H, Liu Y, Zhou Y Y, et al. Effects of red mud based passivator on the transformation of Cd fraction in acidic Cd-polluted paddy soil and Cd absorption in rice [J]. Science of the Total Environment, 2018, **640-641**: 736-745.
- [8] 王帝伟, 刘祎丹, 易春辉, 等. 改性纳米二氧化硅对 Cd 污染农田土壤的钝化修复 [J]. 环境化学, 2019, **38**(5): 1106-1112.
Wang D W, Liu Y D, Yi C H, et al. Stabilization of Cd-contaminated agricultural soils by modified nano-silica [J].

- Environmental Chemistry, 2019, **38**(5): 1106-1112.
- [9] 曾晓舵, 王向琴, 涂新红, 等. 农田土壤重金属污染阻控技术研究进展 [J]. 生态环境学报, 2019, **28**(9): 1900-1906.
Zeng X D, Wang X Q, Tu X H, *et al.* Research progress on speciation and physiological control of heavy metal in soil-plant system [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(9): 1900-1906.
- [10] 侯艳伟, 池海峰, 毕丽君. 生物炭施用对矿区污染农田土壤上油菜生长和重金属富集的影响 [J]. 生态环境学报, 2014, **23**(6): 1057-1063.
Hou Y W, Chi H F, Bi L J. Effects of biochar application on growth and typical metal accumulation of rape in mining contaminated soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(6): 1057-1063.
- [11] 陈乐, 詹思维, 刘梦洁, 等. 生物炭对不同酸化水平稻田土壤性质和重金属 Cu、Cd 有效性影响 [J]. 水土保持学报, 2020, **34**(1): 358-364.
Chen L, Zhan S W, Liu M J, *et al.* Effects of biochar on the properties and the availability of Cu and Cd in paddy soil with different acidification levels [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(1): 358-364.
- [12] 田雪, 周文君, 张正蕊, 等. 不同时间下钝化剂对污染土壤中 Cd 和 Pb 的钝化效果 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(4): 522-528.
Tian X, Zhou W J, Zhang Z R, *et al.* Deactivation effects of deactivators on cadmium and plumbum polluted soil at different times [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(4): 522-528.
- [13] 杜志敏, 郭雪白, 甄静, 等. 磷灰石联合黑麦修复铜污染土壤研究 [J]. 土壤, 2019, **51**(2): 330-337.
Du Z M, Guo X B, Zhen J, *et al.* Study on apatite combined rye on remediation of Cu contaminated soil [J]. Soils, 2019, **51**(2): 330-337.
- [14] 吴霄霄, 曹榕彬, 米长虹, 等. 重金属污染农田原位钝化修复材料研究进展 [J]. 农业资源与环境学报, 2019, **36**(3): 253-263.
Wu X X, Cao R B, Mi C H, *et al.* Research progress of in-situ passivated remedial materials for heavy metal contaminated soil [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, **36**(3): 253-263.
- [15] 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 [J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1491-1497.
Yan D M, Guo Z H, Huang F L, *et al.* Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1491-1497.
- [16] 陈玉萍, 王雅辉, 杨子鹏, 等. 胡敏素和磷酸盐联用对土壤中铜的钝化 [J]. 环境化学, 2019, **38**(8): 1793-1800.
Chen Y P, Wang Y H, Yang Z P, *et al.* Passivation of Cu by humin combined with phosphate in soils [J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(8): 1793-1800.
- [17] Wang X K, Zheng G D, Chen T B, *et al.* Effect of phosphate amendments on improving the fertilizer efficiency and reducing the mobility of heavy metals during sewage sludge composting [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **235**: 124-132.
- [18] Ullah A, Ma Y B, Li J M, *et al.* Effective amendments on cadmium, arsenic, chromium and lead contaminated paddy soil for rice safety [J]. Agronomy, 2020, **10**(3): 359.
- [19] 张金秀, 何永美, 李博, 等. 三种黏土矿物对蚕豆生长和重金属含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(4): 845-854.
Zhang J X, He Y M, Li B, *et al.* Effects of three clay minerals on the growth and heavy metal content in *vicia faba* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(4): 845-854.
- [20] 周利军, 武琳, 林小兵, 等. 土壤调理剂对镉污染稻田修复效果 [J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5098-5106.
Zhou L J, Wu L, Lin X B, *et al.* Remediation of cadmium contaminated paddy fields using soil conditioners [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5098-5106.
- [21] Liu Y S, Tang Y Y, Zhong G S, *et al.* A comparison study on heavy metal/metalloid stabilization in Maozhou River sediment by five types of amendments [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(12): 3922-3933.
- [22] 宋承远, 夏建国, 李琳佳, 等. 羟基磷灰石对铅锌矿区土壤吸附 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, **33**(4): 349-356.
Song C Y, Xia J G, Li L J, *et al.* Effect of hydroxyapatite on adsorption of Zn^{2+} and Cd^{2+} in lead-zinc mine area soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(4): 349-356.
- [23] Xia W Y, Feng Y S, Jin F, *et al.* Stabilization and solidification of a heavy metal contaminated site soil using a hydroxyapatite based binder [J]. Construction and Building Materials, 2017, **156**: 199-207.
- [24] Hamid Y, Tango L, Yaseen M, *et al.* Comparative efficacy of organic and inorganic amendments for cadmium and lead immobilization in contaminated soil under rice-wheat cropping system [J]. Chemosphere, 2019, **214**: 259-268.
- [25] 于方明, 漆培艺, 刘可慧, 等. 锰污染土壤石灰改良对油茶生长及抗氧化酶系统的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(8): 1882-1890.
Yu F M, Qi P Y, Liu K H, *et al.* Effects of lime on the growth and antioxidant enzyme system of *Camellia oleifera* in manganese-contaminated soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(8): 1882-1890.
- [26] Zhao M, Dai Y, Zhang M Y, *et al.* Mechanisms of Pb and/or Zn adsorption by different biochars: biochar characteristics, stability, and binding energies [J]. Science of the Total Environment, 2020, **717**: 136894.
- [27] 汪涛, 高国龙, 王庆, 等. 无机有机复合材料对重金属污染土壤的修复效应 [J]. 环境科技, 2018, **31**(5): 29-34.
Wang T, Gao G L, Wang Q, *et al.* Inorganic-organic amendments for immobilization of heavy metal contaminants in soil [J]. Environmental Science and Technology, 2018, **31**(5): 29-34.
- [28] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 施用生物有机肥对红壤水稻土中重金属及微生物量的影响 [J]. 土壤通报, 2019, **50**(4): 952-957.
Guo B L, Chen X M, Jing F, *et al.* Effects of application of bio-organic fertilizer on heavy metals and microbial biomass in a red paddy soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(4): 952-957.
- [29] 武成辉, 李亮, 雷畅, 等. 硅酸盐钝化剂在土壤重金属污染修复中的研究与应用 [J]. 土壤, 2017, **49**(3): 446-452.
Wu C H, Li L, Lei C, *et al.* Research and application of silicate passivation agent in remediation of heavy metal-contaminated soil: a review [J]. Soils, 2017, **49**(3): 446-452.
- [30] Rehman M Z U, Khalid H, Akmal F, *et al.* Effect of limestone, lignite and biochar applied alone and combined on cadmium uptake in wheat and rice under rotation in an effluent irrigated field [J]. Environmental Pollution, 2017, **227**: 560-568.

- [31] 吴玉俊, 周航, 杨文晔, 等. 组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2791-2798.
Wu Y J, Zhou H, Yang W T, *et al.* Comparison of the persistence of a combined amendment stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in polluted paddy soil[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2791-2798.
- [32] 韦小了, 牟力, 付天岭, 等. 不同钝化剂组合对土壤铬铜赋存形态及在水稻中积累的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, **33**(5): 349-357.
Wei X L, Mou L, Fu T L, *et al.* Effects of different passivator combinations on chromium and copper speciation in soil and accumulation in rice[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(5): 349-357.
- [33] 范玉超, 吴求刚, 崔红标, 等. 磷灰石和石灰稳定化修复对污染土壤铜和镉垂直迁移的影响 [J]. 土壤, 2017, **49**(6): 1187-1194.
Fan Y C, Wu Q G, Cui H B, *et al.* Vertical migration of Cu and Cd in soils immobilized by lime and apatite[J]. Soils, 2017, **49**(6): 1187-1194.
- [34] Gu H H, Qiu H, Tian T, *et al.* Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil [J]. Chemosphere, 2011, **83**(9): 1234-1240.

环境科学

CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM _{2.5} : A Case Study of the Yangtze River Delta ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhengzhou	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM _{2.5} in Shanxi University Town	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM _{2.5} Concentration During 2000-2019 in China	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N ₂ O Release of ANAMMOX Process	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A ² /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)