

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



2019

Vol.40 No.11
第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征 沈吉, 曹念文(4743)

2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)

武汉市PM_{2.5}化学组分时空分布及聚类分析 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)

郑州市某生活区大气PM_{2.5}中重金属污染特征及生态、健康风险评估 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)

厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析 王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)

2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征 霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)

太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析 闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)

东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枫亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)

艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素 陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)

中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素 侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)

石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 刘水桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)

郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估 张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)

典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用 鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)

2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征 侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)

焦化厂建筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险 赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)

中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价 杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)

岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素 原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)

长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送 吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)

望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)

不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响 陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 笪文怡, 黄亚文(4924)

合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价 陈姗, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)

三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征 杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)

丹江口水库氮磷内源释放对比 王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)

不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性 李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王瑀(4962)

纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响 王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)

水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)

MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性 王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)

微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响 王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)

基于铁锰泥的除砷颗粒吸附剂制备及其比较 曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)

氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B 张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)

天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估 陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)

废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征 姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)

全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行 印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)

FeCl₃-生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀 魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)

污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响 李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)

厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征 宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)

基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响 陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文焯, 倪敏(5066)

太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)

土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例 王锐, 张凤雷, 徐姝姝, 张永文(5082)

半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)

土壤调理剂对镉污染稻田修复效果 周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)

改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复 韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)

铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应 梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)

温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤 徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)

重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)

双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响 郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)

不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响 崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)

黄土高原地区两种土地利用方式CO₂和N₂O排放特征 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)

生物质炭对华北平原4种典型土壤N₂O排放的影响 张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)

优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N₂O和CH₄排放的影响 胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)

《环境科学》征订启事(4995) 《环境科学》征稿简则(5039) 信息(4782, 4979, 5056)

土壤调理剂对镉污染稻田修复效果

周利军¹, 武琳¹, 林小兵¹, 王惠明², 刘晖², 张鸿燕², 胡敏³, 石利萍³, 张云⁴, 黄欠如^{1*}

(1. 江西省红壤研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 进贤 331717; 2. 江西省农业生态与资源保护站, 南昌 330046; 3. 萍乡市农业局, 萍乡 337000; 4. 天工方圆建设集团, 新余 338000)

摘要: 选用森美思、CCT01、矿物质和特贝钙这4种土壤调理剂, 在萍乡地区受镉(Cd)污染稻田开展大田控镉试验, 探讨4种调理剂对土壤pH、容重、有机质、速效养分、质地和微团聚体等理化性质及土壤有效态Cd和糙米Cd含量的影响. 研究结果表明与对照相比, 添加土壤调理剂提高了土壤pH值、容重和阳离子交换量; 其中森美思和CCT01土壤调理剂使土壤粉粒和黏粒增加, 砂粒减少, 而矿物质和特贝钙土壤调理剂使粉粒和黏粒减少, 砂粒增加; 除CCT01土壤调理剂外, 施用土壤调理剂增加了大粒级团聚体, 而减少小粒级微团聚体. 土壤调理剂对土壤理化性质的影响促进污染土壤中的Cd由活性高的形态向活性低的形态转化, 从而降低了土壤有效态Cd含量(5.21%~34.78%)和糙米中Cd含量(51.39%~68.06%). 相关性分析表明, 糙米Cd含量与土壤有效态Cd和有效磷呈显著的正相关关系, 而与土壤pH和容重呈显著的负相关关系. 从土壤和糙米降镉率及对理化性质的影响考虑, 特贝钙土壤调理剂修复效果最佳, 其次是森美思和矿物质土壤调理剂.

关键词: 土壤调理剂; 理化性质; 镉污染; 糙米; 修复效果

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-5098-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905053

Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners

ZHOU Li-jun¹, WU Lin¹, LIN Xiao-bing¹, WANG Hui-ming², LIU Hui², ZHANG Hong-yan², HU Min³, SHI Li-ping³, ZHANG Yun⁴, HUANG Qian-ru^{1*}

(1. National Red Soil Improvement Engineering Technology Research Center, Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian 331717, China; 2. Agricultural Ecology and Resource Protection Station of Jiangxi, Nanchang 330046, China; 3. Agricultural Bureau of Pingxiang, Pingxiang 337000, China; 4. Tiangong Fangyuan Construction Group, Xinyu 338000, China)

Abstract: Four soil conditioners, SAMMNS, CCT01, Mineral, and Tebeigai were selected for this study. The effects of the four conditioners on soil pH, bulk density, organic matter, available nutrients, texture, microaggregates, Cd available in soil, and Cd content in brown rice were investigated using field-controlled cadmium tests conducted in cadmium-contaminated paddy fields in Pingxiang. The results showed that compared to the control, soil conditioners could increase pH, bulk density, and cation exchange capacity in soil. SAMMNS and CCT01 soil conditioners increased the amount of silt and clay, but that of sand decreased, whereas the Mineral and Tebeigai soil conditioners decreased silt and clay, and sand increased. In addition to the CCT01 soil conditioner, the application of soil conditioners increased large-scale agglomerates and reduced small-scale microaggregates. The effects of soil conditioners on soil physical and chemical properties promoted the conversion of Cd from contaminated soil from high activity to low activity, which reduced available Cd content in soil (5.21% - 34.78%) and Cd content in brown rice (51.39% - 68.06%). Correlation analysis showed that Cd content in brown rice was significantly positively correlated with available Cd and available phosphorus in soil, whereas it was negatively correlated with pH and bulk density in soil. Considering the effects of soil and brown rice on cadmium reduction and physicochemical properties, Tebeigai soil conditioner exhibited the best repair effects, followed by SENMES and Mineral soil conditioner.

Key words: soil conditioner; physical and chemical properties; cadmium pollution; brown rice; remediation

随着城市化和工业化的快速发展, 导致土壤重金属污染问题日益严峻, 其中重金属镉(Cd)以其迁移性高、毒性高和隐蔽性强尤为突出^[1]. 根据文献^[2]的报道, 我国耕地土壤重金属的总超标率为19.4%, 其中重金属Cd超标最为严重达7.0%. 水稻是我国最主要的粮食作物之一, 而Cd具有很强的向水稻籽粒转运和积累的能力^[3], Cd通过根系吸收和体内转运在植物可食部分积累, 从而进入食物链被人体摄入^[4-6]. 因此, 对Cd污染农田土壤修复已成为迫切需求.

Cd污染土壤修复主要分为两类^[7,8]: 一是直接减少土壤中Cd含量; 二是改变Cd在土壤中存在形

态, 降低其活性和迁移性. 其中, 固化/稳定化技术是国内外普遍使用的Cd污染土壤治理方法之一^[9,10], 也是实现中轻度污染农田持续安全利用的有效途径之一^[11]. 该方法基于向污染土壤中添加土壤调理剂或钝化剂来改变土壤的物理化学性质, 使其产生吸附、沉淀、络合、离子交换和氧化还原

收稿日期: 2019-05-08; 修订日期: 2019-06-02

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20171ACG70022, 20171BBH80020); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300906)

作者简介: 周利军(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染修复及其评价, E-mail: huoe861200@163.com

* 通信作者, E-mail: qianruhuang@163.com

等一系列反应, 改变重金属在土壤中的存在形态, 使重金属向稳定态转化, 降低其在土壤环境中的生物有效性和可迁移性^[12~15], 从而达到修复重金属污染土壤的目的. 所以, 根据土壤理化性质及污染状况等选择调控效果好、持续性强的土壤调理剂是该方法得以实施的关键^[16,17].

目前, 大多数研究集中在土壤调理剂或钝化剂对 Cd 生物有效性影响^[18~20], 而忽视了调理剂的田间应用效果及在田间条件下对土壤理化性质的影响. 针对江西萍乡地区出现的稻田土壤和稻米 Cd 含量超标问题, 基于此选择国内从事土壤 Cd 污染修复的 4 家企业所提供的材料, 通过田间试验研究不同土壤调理剂对水稻吸收 Cd 及对土壤理化性质的影响, 进一步阐述调理剂降 Cd 相关机制, 以期为我国土壤调理剂的田间应用提供参考依据和理论基础.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验选择江西省萍乡市湘东区东桥镇厚田村, 地处湘赣边界, 属亚热带季风气候区, 光热充足, 雨量充沛, 气候温和, 无霜期长, 年平均气温为 17~18℃, 年平均降雨量约 1600 mm. 本试验田土壤为潜育型水稻土, 2016 年土壤检测结果表明: 0~20 cm 土层土壤有机质含量约为 32.16 g·kg⁻¹, pH 值约为 5.16, 土壤全 Cd 含量平均值为 0.46 mg·kg⁻¹, 超过国家二级标准 0.30 mg·kg⁻¹, 污染程度属于中度, 有效态 Cd 含量平均值为 0.24 mg·kg⁻¹, 灌溉水中重金属 Cd 含量未检出, 晚稻糙米 Cd 含量平均值为 0.60 mg·kg⁻¹, 严重超过国家标准 0.20 mg·kg⁻¹.

1.2 供试材料

企业 A 产品为森美思土壤调理剂^[20], 主要成分为 SiO₂, pH 9.5~10.5; 企业 B 产品为 CCT01 土壤调理剂^[21], 由以下质量比的成分组成, 磷酸盐或硫酸盐 15%~25%, 重金属整合剂 1%~5%, 胶凝材料 20%~40%, 黏土矿物 30%~60%, 其原料总和为 100%; 企业 C 产品为矿物质土壤调理剂, 主要成分为 K₂O≥5%, P₂O₅≥5%, SiO₂≥20%, CaO≥25%, SO₃≥5%, MgO≥15%, pH 8.5~10.5; 企业 D 产品为特贝钙土壤调理剂, 原料为牡蛎壳, 其主要成分为 CaO≥45%, pH 8.5~10.5.

1.3 试验设计

在江西萍乡选取 Cd 为中度污染程度且 Cd 分布相对均匀的水稻田开展大田试验, 为防止各处理间相互影响, 在原有田埂的基础上进行加固. 本试

验共设计 5 个处理: 对照、森美思、CCT01、矿物质和特贝钙土壤调理剂, 对应分别添加钝化材料 0、7 500、3 000、4 500 和 3 000 kg·hm⁻² (由生产厂家提供产品及确定最佳施用量), 种植前 5~10 d 结合整地翻耕一次性撒施, 使产品与土壤混合均匀, 每处理重复 3 次, 面积约为 120 m². 种植水稻品种为: 隆优 308 (晚稻品种). 田间管理: 进行统一的水肥及病虫害管理, 采用当地水稻栽培方法, 分蘖盛期至分蘖末期晒田, 稻田土壤开裂现白后覆水, 晒田 10 d 左右.

1.4 样品采集与分析

于 2017 年 10 月进行晚稻土壤和植株采样, 在试验田按 5 点取样法采集 0~20 cm 表层土壤, 用来检测土壤理化性质. 将收获的稻米, 用去离子水冲洗, 在 105℃ 杀青 10 min, 然后在 70℃ 下烘干至恒质量, 将植物样品粉碎备用, 采用 HNO₃-HClO₄ 法消化 (体积比为 3:1), 糙米 Cd 含量用石墨炉原子吸收分光光度计 (Perkin Elmer AA800) 测定, 所有样品分析过程按《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15-2014) 方法, 检出限 0.001 mg·kg⁻¹, Cd 的回收率在 96.6%~102.6%, 同时做空白试验. 土壤有效态 Cd 指能够被植物直接吸收利用的部分, 包括水溶态 Cd 和交换态 Cd^[22], 土壤有效态 Cd 含量采用二乙烯三胺五乙酸-氯化钙-三乙醇胺 (DTPA-CaCl₂-TEA) 缓冲溶液浸提法提取^[23], 后采用安捷伦原子吸收分光光度计 (Agilent 240FS) 测定, 所有样品分析过程按《土壤质量有效态铅和镉的测定》(GB/T 23739-2009) 方法, 检出限 0.005 mg·kg⁻¹, Cd 的回收率在 92.2%~99.2%, 同时做空白试验. 土壤常规理化性质参照文献^[24]中提到的方法测定, 土壤 pH 值测定采用电位法, 土水比为 1:2.5; 有机质测定采用高温外热重铬酸钾法; 容重采用环刀法; 阳离子交换量测定采用乙酸铵交换法; 速效钾测定采用 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提-火焰光度法 (火焰 FP640); 有效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法 (紫外 UV-1800PC); 碱解氮测定采用碱解扩散法; 土壤质地测定采用比重计速测法; 微团聚体测定采用吸管法.

1.5 数据处理

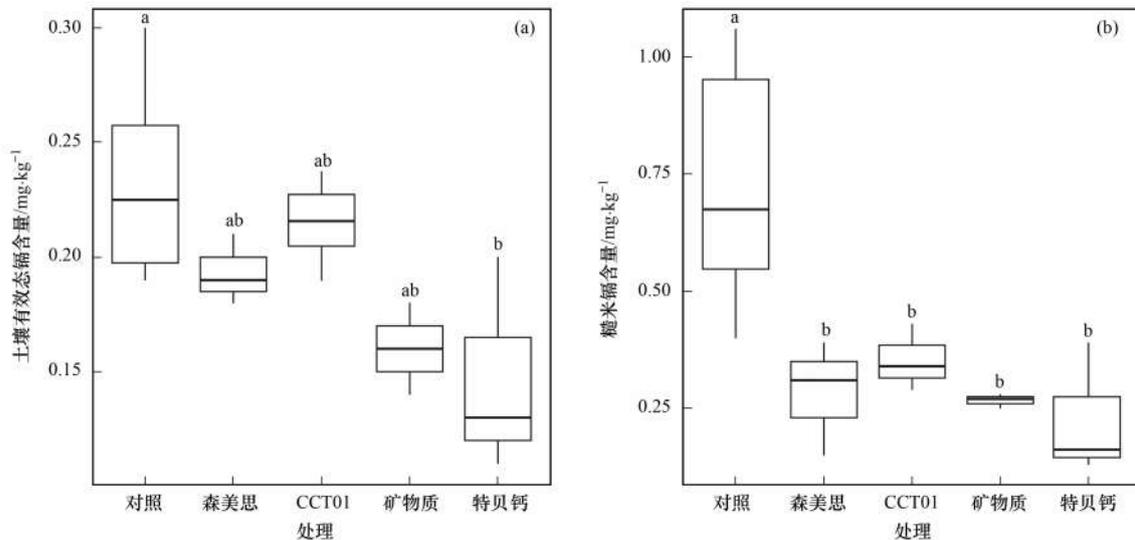
本试验所有数据计算和统计分析通过 R 语言 (www.r-project.org) 统计软件进行, 方差分析采用 R 语言程序包 vegan 完成, 并通过 Tukey HSD 检验法对各处理进行差异显著性检验, 相关性分析 (皮尔森相关系数) 采用 R 语言程序包 Hmisc、corrplot 和 Performance analytics 完成, 所有制图通过 R 语言软件程序包 ggplot2 完成.

2 结果与分析

2.1 不同土壤调理剂对土壤有效态 Cd 和糙米 Cd 含量的影响

土壤有效态 Cd, 指能被植物吸收利用的部分, 也是评价土壤 Cd 污染毒性的重要指标^[25]. 加入土壤调理剂后土壤有效态 Cd 含量均有不同程度降低, 与对照相比, CCT01、森美思和矿物质土壤调理剂处理下土壤有效态 Cd 含量无显著性差异 [$P > 0.05$, 图 1(a)], 土壤有效态 Cd 含量分

别降低了 5.21%、17.39% 和 30.43%. 而特贝钙土壤调理剂土壤有效态 Cd 含量显著低于对照 [$P < 0.05$, 图 1(a)], 其中土壤有效态 Cd 含量降低了 34.78%. 土壤有效态 Cd 含量, 将不同程度影响着水稻的吸收, 在本试验条件下, 施用土壤调理剂后糙米 Cd 含量与对照之间存在显著性差异 [$F = 6.68$, $P = 0.002$, 图 1(b)], 与对照相比, 森美思、CCT01、矿物质和特贝钙土壤调理剂糙米 Cd 含量分别显著性降低了 61.11%、51.39%、62.50% 和 68.06%.



不同小写字母表示各处理组间在 0.05 水平上存在显著差异, 下同
图 1 不同土壤调理剂对土壤有效态 Cd 和糙米 Cd 含量的影响

Fig. 1 Effect of different soil conditioners on available Cd content in soil and Cd content in brown rice

2.2 不同土壤调理剂对土壤理化性质的影响

从图 2(a) 可以看出, 不同土壤调理剂处理后土壤 pH 值均有不同程度提高. 森美思、CCT01、矿物质和特贝钙土壤调理剂土壤 pH 与对照之间存在显著性差异 [$F = 17.02$, $P < 0.001$, 图 2(a)], 均显著提高了土壤 pH 值, 与对照相比, 土壤 pH 值分别提高了 0.82、0.98、1.37 和 1.36. 除 CCT01 土壤调理剂外, 加入土壤调理剂后土壤容重均有不同程度提高, 与对照相比, 森美思、矿物质和特贝钙土壤调理剂的土壤容重, 分别提高了 0.94%、17.92% 和 16.98%, 其中矿物质和特贝钙土壤调理剂土壤容重显著高于对照 [$P < 0.05$, 图 2(b)]. 除特贝钙土壤调理剂阳离子交换量显著高于对照外 [$P < 0.05$, 图 2(d)], 与对照相比, 土壤阳离子交换量提高了 37.44%, 其他 3 种土壤调理剂阳离子交换量与对照之间无明显差异 ($P > 0.05$). 从图 2 可知, 不同土壤调理剂对土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾与对照均无显著影响 [$P > 0.05$, 图 2(c)、图 2(e)、图 2(f) 和图 2(g)].

2.3 不同土壤调理剂对土壤质地的影响

从图 3 可以看出, 不同土壤调理剂土壤质地与对照均存在一定程度的差异. 对照土壤质地的分布大致为: 粉粒 30.19% ~ 35.20%, 黏粒 16.55% ~ 19.65%, 砂粒 48.61% ~ 52.86%; 森美思土壤调理剂土壤质地的分布大致为: 粉粒 35.94% ~ 39.05%, 黏粒 16.94% ~ 19.94%, 砂粒 41.47% ~ 46.18%; CCT01 土壤调理剂土壤质地的分布大致为: 粉粒 42.21% ~ 44.90%, 黏粒 19.75% ~ 21.76%, 砂粒 33.85% ~ 36.03%; 矿物质土壤调理剂土壤质地的分布大致为: 粉粒 27.26% ~ 30.80%, 黏粒 13.19% ~ 13.76%, 砂粒 55.88% ~ 59.56%; 特贝钙土壤调理剂土壤质地的分布大致为: 粉粒 27.13% ~ 29.19%, 黏粒 12.62% ~ 13.38%, 砂粒 57.44% ~ 60.25%. 与对照相比, 森美思和 CCT01 土壤调理剂土壤质地中粉粒分别增加了 18.44% 和 37.60%, 黏粒分别增加了 1.26% 和 1.61%, 砂粒分别减少了 12.24% 和 29.82%; 矿物质和特贝钙土壤调理剂土壤质地中粉粒分别减少了 9.15% 和 11.39%, 黏粒分别减少了 25.54%

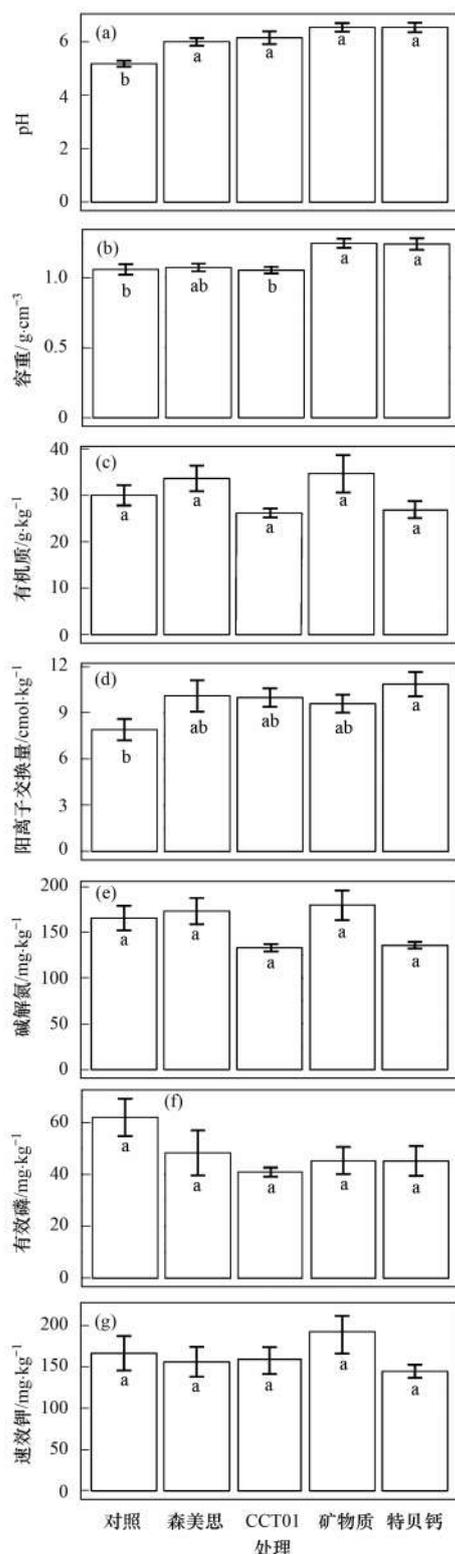


图2 不同土壤调理剂对土壤理化性质的影响

Fig. 2 Effects of different soil conditioners on physical and chemical properties in soil

和 27.40%，砂粒分别增加了 15.06% 和 17.16%。

2.4 不同土壤调理剂对土壤微团聚体的影响

不同土壤调理剂处理的土壤微团聚体颗粒组成所占比例不同。从图 4 可以看出，对于 2~0.25 mm 粒级，与对照相比，除 CCT01 土壤调理剂显著减少

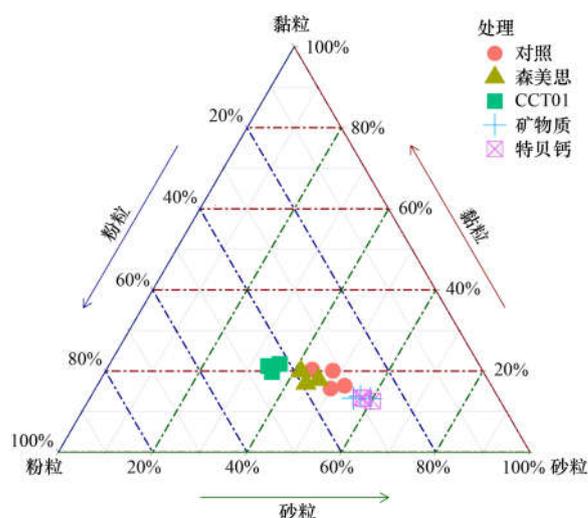


图3 不同土壤调理剂对土壤质地的影响

Fig. 3 Effects of different soil conditioners on soil texture

了 17.28% 外，森美思、矿物质和特贝钙土壤调理剂分别增加了 8.47%、16.49% 和 30.20%，其中特贝钙土壤调理剂显著高于对照 [$P < 0.05$, 图 4 (b)]。0.25~0.05 mm 粒级，与对照相比，除 CCT01 土壤调理剂增加了 10.55% 外，森美思、矿物质和特贝钙土壤调理剂分别减少了 5.17%、10.06% 和 18.44%，其中特贝钙土壤调理剂显著低于对照 [$P < 0.05$, 图 4 (b)]。0.05~0.01 mm 粒级，除 CCT01 土壤调理剂增加了 11.28% 外，森美思、矿物质和特贝钙土壤调理剂分别减少了 6.37%、10.46% 和 14.70%。0.01~0.005 mm 粒级，与对照相比，除 CCT01 土壤调理剂增加了 14.23% 外，森美思、矿物质和特贝钙土壤调理剂分别减少了 2.28%、11.39% 和 32.83%，其中特贝钙土壤调理剂显著低于对照 [$P < 0.05$, 图 4 (b)]。0.005~0.001 mm 粒级，与对照相比，除 CCT01 土壤调理剂增加了 1.18% 外，森美思、矿物质和特贝钙土壤调理剂分别减少了 4.85%、22.93% 和 29.16%，其中特贝钙土壤调理剂显著低于对照 [$P < 0.05$, 图 4 (b)]。<0.001 mm 粒级，与对照相比，CCT01、森美思、矿物质和特贝钙土壤调理剂分别增加了 17.2%、1.05%、112.63% 和 41.68%，其中矿物质土壤调理剂显著高于对照 [$P < 0.05$, 图 4 (b)]。

2.5 土壤有效态 Cd、糙米 Cd 含量与土壤理化性质的相关性分析

土壤有效态 Cd、糙米 Cd 含量与土壤理化性质的相关性分析表明(图 5)，它们之间具有较明显的相关性。土壤有效态 Cd 含量与糙米 Cd、土壤粉粒、黏粒、有机质和碱解氮呈显著的正相关关系，而与土壤 pH、容重和砂粒呈显著的负相关关系。糙米

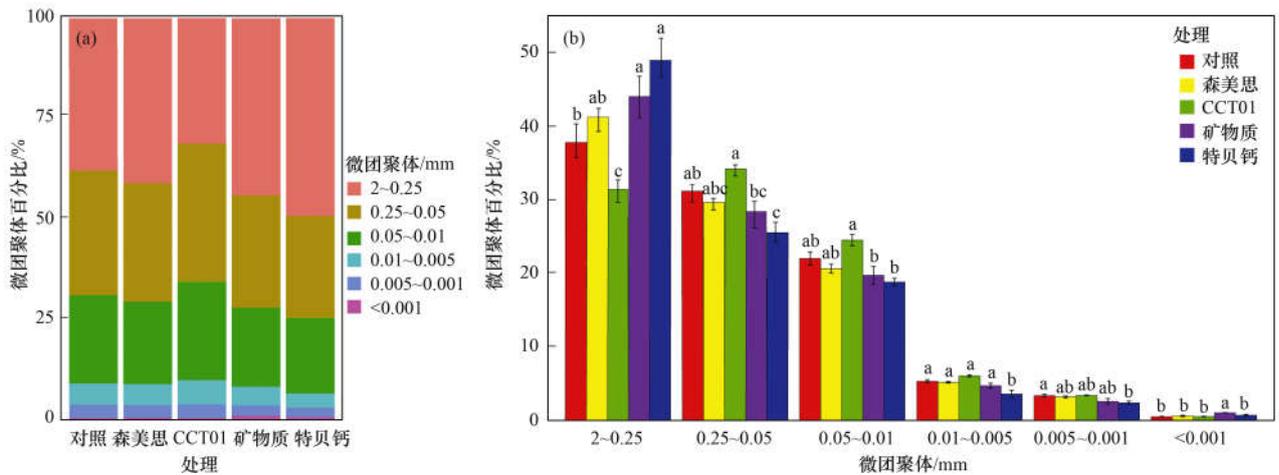


图 4 不同土壤调理剂对土壤微团聚体的影响

Fig. 4 Effects of different soil conditioners on soil microaggregates

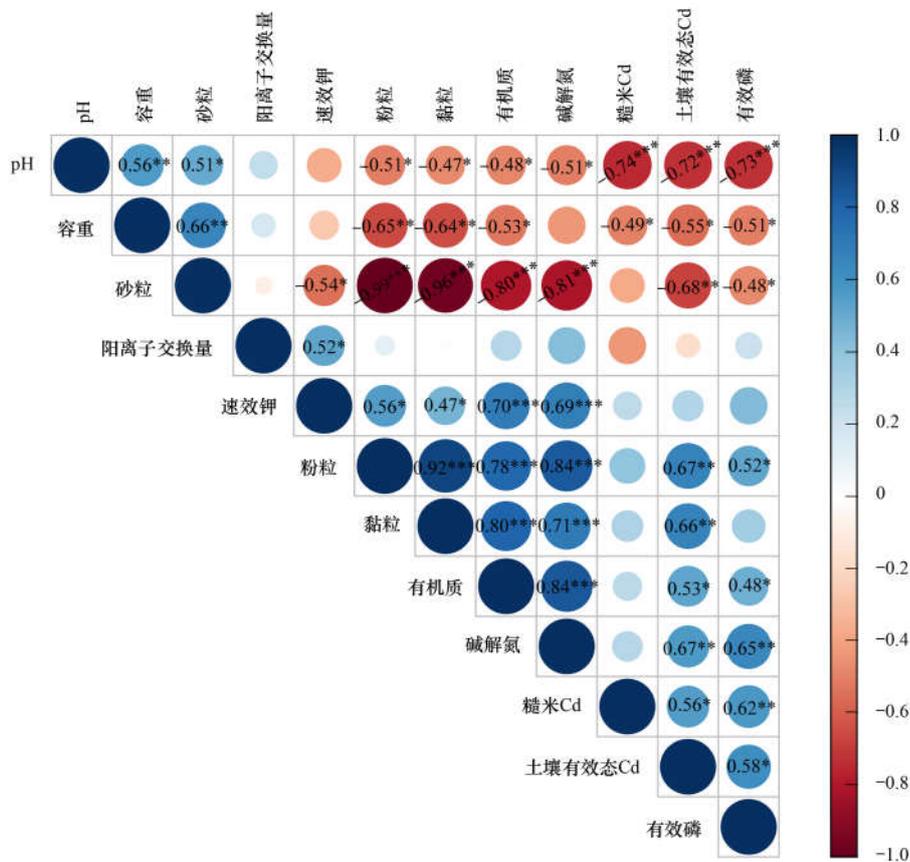
Cd 含量与土壤有效态 Cd 和有效磷呈显著的正相关关系, 而与土壤 pH 和容重呈显著的负相关关系, 同时也与土壤阳离子交换量和砂粒有较强的负相关关系. 土壤理化性质间的相关性表明: 土壤 pH、容重和砂粒与速效钾、粉粒、黏粒、有机质、碱解氮和有效磷有较强的负相关关系, 而土壤速效钾、粉

粒、黏粒、有机质、碱解氮和速效磷之间有较强的正相关关系.

3 讨论

3.1 不同土壤调理剂对土壤理化性质的影响

农作物对 Cd 的吸收主要取决于土壤有效态 Cd



用不同颜色表示了变量间相关性的强度, 根据最右边的颜色带来看, 越接近蓝色说明正相关性越高, 越接近红色说明负相关性越高, 其中圆形的大小也说明了相关性的大小; 右侧数字表示相关性大小, 正数表示正相关, 负数表示负相关; * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$, *** 为 $P < 0.001$

图 5 土壤有效态 Cd、糙米 Cd 与土壤理化性质相关系数矩阵

Fig. 5 Correlation coefficient matrix of soil available Cd, brown rice Cd, and soil physical and chemical properties

含量, 而有效态 Cd 含量又受到土壤环境中 pH、CEC、有机质和团粒结构等理化性质及所使用钝化剂的影响^[26,27]. 在本试验条件下, 施用土壤调理剂后土壤 pH、容重和阳离子交换量均有不同程度提高, 而对土壤有机质及土壤速效养分影响较小. 土壤质地中, 与对照相比, 森美思和 CCT01 土壤调理剂粉粒和黏粒增加, 砂粒减少; 而矿物质和特贝钙土壤调理剂粉粒和黏粒减少, 砂粒增加. 除 CCT01 土壤调理剂外, 施用土壤调理剂后 2 ~ 0.25 mm 粒级大团聚体增加, 而 0.25 ~ 0.001 mm 粒级微团聚体减少.

施用土壤调理剂能显著地提高土壤 pH 可能是试验材料本身 pH 值很高, 且含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ 等离子, 能与土壤溶液中 H^+ 和 Al^{3+} 离子发生交换反应, 从而使土壤 pH 提高^[28,29]. 土壤调理剂中 Ca^{2+} 迁移到黏土颗粒表面取代土壤中的 Na^+ 和 K^+ 等阳离子, 进行阳离子交换, 使土壤中阳离子交换量增加^[30]. 土壤调理剂含有一定量的 Mg、Fe 等金属离子, 具有阳离子交换性, 易与土壤中的 Cd 发生离子交换作用, 不仅降低了土壤中 Cd 浓度, 而且增加了土壤中的阳离子交换量^[19], 阳离子交换量的大小可能跟土壤调理剂材料金属离子大小相关. 栗婷等^[31]的研究结果表明, 吸附材料在砂壤土中对镉元素吸附效果明显高于在壤土中对镉元素吸附效果, 本试验材料森美思和 CCT01 土壤调理剂黏粒增加, 砂粒减少; 而矿物质和特贝钙土壤调理剂黏粒减少, 砂粒增加, 说明不同土壤调理剂对土壤质地影响不同, 可能原因是与土壤调理剂材料本身的颗粒大小有关. 李恋卿等^[32]对水稻土研究表明重金属 Cd 明显富集在粒径 $< 2 \mu\text{m}$ 的颗粒中. Zhang 等^[33]和 Quenea 等^[34]的研究显示随着土壤团聚体粒径的减小, 团聚体中 Cd 的含量显著提高, 通过施用森美思、矿物质和特贝钙土壤调理剂可能通过影响团聚体胶结物质的组成和含量使 2 ~ 0.25 mm 粒级大团聚体增加, 而 0.25 ~ 0.001 mm 粒级微团聚体减少, 减少了重金属 Cd 在微团聚体中的积累.

森美思土壤调理剂是一种孔径在 5 ~ 2 000 nm 的超高比表面积材料, 具有巨大的表面, 易在土壤中分解与土壤融合, 提高土壤容重和阳离子交换量; 颗粒较小, 吸附能力强, 将土壤中活性重金属转化为具有长期稳定性的矿物结构材料, 从而减少活性重金属向作物的迁移富集, 降低农产品重金属含量. CCT01 土壤调理剂由吸附介质、沉淀剂等组成, 为粉状药剂, 易于水融合, 通过 pH 控制技术、沉淀与共沉淀技术、吸附技术和离子交换技术将土

壤中的重金属失活, 可有效通过降低土壤中生物可利用态重金属含量来降低其健康风险. 矿物质土壤调理剂, 呈碱性调节土壤 pH 值, 使镉的毒性降低, 抑制镉的活性, 使土壤中的金属阳离子在介质发生改变形成的金属沉淀物 (OH^- 、 SO_4^{2-}) 而降低镉污染, 调理剂中的锰离子和钙离子等阳离子交换量对镉离子的拮抗作用, 可减少作物对镉的吸收, 调理剂的孔道构造可以大量吸附钝化土壤中的镉离子, 增强作物抗重金属毒害的能力. 特贝钙土壤调理剂具有微聚孔结构, 具有小尺度效应有较强的吸附能力, 易于被植物吸收, 能显著改善土壤的理化性状, 使土壤形成良好的团粒结构, 提高土壤 pH, 防治土壤板结, 改善土壤物理结构, 钝化土壤重金属活性, 降低重金属残留.

3.2 土壤理化性质与土壤有效态 Cd、糙米 Cd 含量相关性分析

土壤调理剂通过改变土壤理化性质, 进而影响土壤中 Cd 的迁移性. 本试验表明土壤有效态 Cd 含量与糙米 Cd、土壤粉粒、黏粒、有机质和碱解氮呈显著的正相关关系, 而与土壤 pH、容重和砂粒呈显著的负相关关系. 糙米 Cd 含量与土壤有效态 Cd 和有效磷呈显著的正相关关系, 而与土壤 pH 和容重呈显著的负相关关系, 同时也与土壤阳离子交换量和砂粒有较强的负相关关系. 土壤调理剂提高了土壤 pH, 显著降低了 Cd 含量, 两者呈现了很好的相关性, 土壤 pH 与其 Cd 含量呈极显著负相关关系. 闫家普等^[35]的研究表明, pH 是降低有效态 Cd 含量的主要影响因子, pH 升高会导致土壤有效态 Cd 含量显著降低, 并且使土壤中还还原态 Cd 显著降低, 非可利用态 Cd 含量显著增加. 大量研究显示提高土壤 pH 可以钝化土壤重金属, 土壤重金属生物有效性与土壤 pH 呈负相关关系^[36,37]. 柴世伟等^[38]的研究表明, 土壤 Cd 与土壤有机质含量和土壤黏粒含量呈极显著相关, 这与本试验研究相似. 赵雄等^[39]和郑春荣等^[40]的研究表明, 糙米 Cd 含量与土壤 Cd 含量均达到极显著相关性, 呈显著正相关关系, 且相关性系数达到 0.9 以上. 易亚科等^[41]的研究表明, 土壤 pH 对稻米 Cd 含量的影响达到极显著水平, 而王梦梦等^[42]的研究发现土壤 pH 与稻米 Cd 含量的关系呈现为: 当 pH 小于 6.5 时, 稻米 Cd 含量随着 pH 的升高而增加, 当 pH 大于 6.5 时, 稻米 Cd 含量随着 pH 的升高而降低.

3.3 不同土壤调理剂对土壤有效态 Cd 和糙米 Cd 含量的影响

添加土壤调理剂通过影响土壤理化性质, 进而影响重金属交换态组分在土壤环境中的移动和转

变. 在本试验中施用土壤调理剂后, 土壤有效态 Cd 和糙米 Cd 含量均降低, 且稻米中 Cd 含量随土壤有效态 Cd 含量降低而降低, 两者呈显著正相关关系. 本试验施用土壤调理剂主要途径之一是降低了土壤 pH 值, 这 4 种土壤调理剂中较高的钙含量也可能是影响作物吸收累积 Cd 的一个重要因素. 研究表明碱性物质如石灰等主要通过提高土壤 pH, 促使重金属生成碳酸盐、氢氧化物沉淀, 进而降低重金属在土壤中的有效性和迁移能力^[43]. 土壤理化性质中土壤容重、阳离子交换量、土壤质地和团聚体也是影响重金属 Cd 在土壤中的存在形态, 使重金属向稳定态转化, 从而降低水稻中 Cd 含量.

综上所述, 施用森美思、CCT01、矿物质和特贝钙土壤调理剂能够降低土壤和水稻体内 Cd 含量, 对重金属 Cd 在土壤-水稻系统的迁移与再分配具有阻控作用, 具有保障实现水稻安全生产的潜力. 但是, 本文研究只是在短期内评价了土壤调理剂修复重金属 Cd 污染土壤的效果, 未将土壤环境在时空上的复杂性和随变性因素考虑在内, 其实际应用成本(施用量)、效果持续性和风险等有待深入研究. 钝化修复技术一般用于中轻度重金属污染土壤修复, 在修复过程中还可以配合优化水稻品种、改变种植方式和灌溉方式等农艺措施以达到更好的修复效果.

4 结论

添加土壤调理剂可以提高土壤 pH、容重和阳离子交换量, 促进污染土壤中的 Cd 由活性高的形态向活性低的形态转化, 从而降低了土壤中 Cd 的有效态和糙米中 Cd 的含量. 其中森美思和 CCT01 土壤调理剂使土壤粉粒和黏粒增加, 砂粒减少; 而矿物质和特贝钙土壤调理剂使粉粒和黏粒减少, 砂粒增加. 除 CCT01 土壤调理剂外, 施用土壤调理剂增加了大粒级团聚体, 而减少小粒级微团聚体. 相关性分析表明: 糙米 Cd 含量与土壤有效态 Cd 和有效磷呈显著的正相关关系, 而与土壤 pH 和容重呈显著的负相关关系. 综合土壤调理剂对土壤、糙米降 Cd 效果及土壤理化性质的影响, 特贝钙土壤调理剂效果最佳, 其次是森美思和矿物质土壤调理剂, 最后是 CCT01 土壤调理剂. 本试验发现施用这 4 种土壤调理剂对土壤理化性质没有造成较大负面影响的前提下, 能有效降低土壤有效态 Cd 和糙米 Cd 含量, 这对重金属污染土壤的钝化修复具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] Zhang H J, Zhang X Z, Li T X, *et al.* Variation of cadmium uptake, translocation among rice lines and detecting for potential cadmium-safe cultivars [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(1): 277-286.
- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/ncj/zhd/201404/t20140418_607888.html, 2014-04-17.
- [3] 胡文友, 祖艳群, 李元. 无公害蔬菜生产中重金属含量的控制技术[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(S1): 353-357. Hu W Y, Zu Y Q, Li Y. Control technique of heavy metal content in production of pollution-free vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, **24**(S1): 353-357.
- [4] Meharg A A, Norton G, Deacon C, *et al.* Variation in rice cadmium related to human exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(11): 5613-5618.
- [5] Cai L M, Xu Z C, Qi J Y, *et al.* Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near Tonglushan mine in Hubei, China[J]. *Chemosphere*, 2015, **127**: 127-135.
- [6] Luo J S, Huang J, Zeng D L, *et al.* A defensin-like protein drives cadmium efflux and allocation in rice [J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1): 645.
- [7] 官迪, 纪雄辉. 镉污染土壤钝化修复机制及研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2016, (4): 119-122. Guan D, Ji X H. Mechanism and research progress of passivation remediation of cadmium contaminated soil [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016, (4): 119-122.
- [8] 秦勇, 师阿燕, 徐笠, 等. 基于发明专利的重金属钝化技术的文献计量分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, **35**(4): 283-291. Qin Y, Shi A Y, Xu L, *et al.* Bibliometric analysis of heavy metal passivation technology based on invention patents [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(4): 283-291.
- [9] Khalid S, Shahid M, Niazi N K, *et al.* A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **182**: 247-26.
- [10] Snn Y B, Sun G H, Xu Y M, *et al.* Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium-contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **166**: 204-210.
- [11] 王艳红, 李林峰, 唐明灯, 等. 不同钝化剂对降低水稻糙米 Cd 积累及土壤性状的影响[J]. *环境污染与防治*, 2018, **40**(9): 974-978. Wang Y H, Li L F, Tang M D, *et al.* Effects of different amendments on reducing Cd accumulation in brown rice and soil [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018, **40**(9): 974-978.
- [12] Guo G L, Zhou Q X, Ma L Q. Availability and assessment of fixing additives for the in situ remediation of heavy metal contaminated soils: a review[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **116**(1-3): 513-528.
- [13] 郭晓方, 卫泽斌, 周建利, 等. 废料碳酸钙对低累积作物玉米吸收重金属的影响: 田间实例研究[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(5): 888-895. Guo X F, Wei Z B, Zhou J L, *et al.* Effect of waste-CaCO₃ on heavy metals uptake of low-accumulating maize: Field study[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(5): 888-895.
- [14] 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. Cao X D, Wei X X, Dai G L, *et al.* Combined pollution of

- multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soils: a review [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(7): 1441-1453.
- [15] Nawab J, Khan S, Aamir M, *et al.* Organic amendments impact the availability of heavy metal(loid)s in mine-impacted soil and their phytoremediation by *Penistum americanum* and *Sorghum bicolor* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(3): 2381-2390.
- [16] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(3): 514-519.
- Dai Y C, Lü J L, Cao Y F, *et al.* Effects of lime and organic amendments on Cd availability in Cd-contaminated soils with different properties [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(3): 514-519.
- [17] Ramírez-Pérez A M, Paradelo M, Nóvoa-Muñoz J C, *et al.* Heavy metal retention in copper mine soil treated with mussel shells: batch and column experiments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **248-249**: 122-130.
- [18] 杜志敏, 郝建设, 周静, 等. 四种改良剂对铜和镉复合污染土壤的田间原位修复研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(3): 508-517.
- Du Z M, Hao J S, Zhou J, *et al.* Field in-situ remediation of Cu-Cd polluted soil by four amendments [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(3): 508-517.
- [19] 任静华, 廖启林, 范健, 等. 凹凸棒粘土对镉污染农田的原位钝化修复效果研究[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(12): 2161-2168.
- Ren J H, Liao Q L, Fan J, *et al.* Effect of in-situ stabilizing remediation of Cd-polluted soil by attapulgite [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(12): 2161-2168.
- [20] 李心, 林大松, 刘岩, 等. 不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(7): 1511-1520.
- Li X, Lin D S, Liu Y, *et al.* Effects of different soil conditioners on cadmium control in cadmium-contaminated paddy fields [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(7): 1511-1520.
- [21] 王湘徽, 郭中豪. 一种重金属污染晶化包封稳定化剂及其使用方法 [P]. 中国专利: CN102732259A, 2012-10-17.
- Wang X H, Guo Z H. Heavy metal polluted crystallization encapsulated stabilizing agent and its application method [P]. Chinese patent: CN102732259A, 2012-10-17.
- [22] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [23] HJ 804-2016, 土壤 8 种有效态元素的测定 二乙三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法[S].
- HJ 804-2016, Soil-Determination of bioavailable from eight elements-Extraction with buffered DTPA solution/inductively coupled plasma optical emission spectrometry[S].
- [24] 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.
- Lu R K. Soil agrochemistry analysis protocols [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [25] Onwu F K, Ogah S P I. Studies on the effect of pH on the sorption of cadmium (II), nickel (II), lead (II) and chromium (VI) from aqueous solutions by African white star apple (*Chrysophyllum albidum*) shell [J]. African Journal of Biotechnology, 2010, **9**(42): 7086-7093.
- [26] Li Z W, Li L Q, Pan G X, *et al.* Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: soil type versus genotype effects [J]. Plant and Soil, 2005, **271**(1-2): 165-173.
- [27] 胡钟胜, 章钢娅, 王广志, 等. 改良剂对烟草吸收土壤中镉铅影响的研究[J]. 土壤学报, 2006, **43**(2): 233-239.
- Hu Z S, Zhang G Y, Wang G Z, *et al.* Effects of soil amendments on cadmium and lead contents in tobacco [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, **43**(2): 233-239.
- [28] Gautam M, Agrawal M. Phytoremediation of metals using vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) grown under different levels of red mud in sludge amended soil [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, **182**: 218-227.
- [29] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar [J]. Chemosphere, 2013, **92**(11): 1450-1457.
- [30] 徐磊, 周静, 梁家妮, 等. 巨菌草对 Cu、Cd 污染土壤的修复潜力[J]. 生态学报, 2014, **34**(18): 5342-5348.
- Xu L, Zhou J, Liang J N, *et al.* The remediation potential of *Pennisetum* sp on Cu, Cd contaminated soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(18): 5342-5348.
- [31] 栗婷, 黄东亚, 闫金婷, 等. 土壤质地和酸碱度对重金属吸附材料效果的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2018, (7): 43-46.
- Li T, Huang D Y, Yan J T, *et al.* Effects of soil texture and alkali degree on adsorption of heavy metals [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018, (7): 43-46.
- [32] 李恋卿, 潘根兴, 张平究, 等. 太湖地区水稻土颗粒中重金属元素的分布及其对环境变化的响应[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(5): 607-612.
- Li L Q, Pan G X, Zhang P J, *et al.* Distribution of heavy metals in particle size fractions of major paddy soils in the Tai Lake region, China and the response to soil environmental change [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, **21**(5): 607-612.
- [33] Zhang M K, Ke Z X. Copper and Zinc enrichment in different size fractions of organic matter from polluted soils [J]. Pedosphere, 2004, **14**(1): 27-36.
- [34] Quenea K, Lamy I, Winterton P, *et al.* Interactions between metals and soil organic matter in various particle size fractions of soil contaminated with waste water [J]. Geoderma, 2009, **149**(3-4): 217-223.
- [35] 闫家普, 丁效东, 崔良, 等. 不同改良剂及其组合对土壤镉形态和理化性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9): 1842-1849.
- Yan J P, Ding X D, Cui L, *et al.* Effects of several modifiers and their combined application on cadmium forms and physicochemical properties of soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(9): 1842-1849.
- [36] Bang J S, Hesterberg D. Dissolution of trace element contaminants from two coastal plain soils as affected by pH [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(3): 891-901.
- [37] Wang A S, Angle J S, Chaney R L, *et al.* Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant and Soil, 2006, **281**(1-2): 325-337.
- [38] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 广州郊区农业土壤重金属含量与土壤性质的关系[J]. 农村生态环境, 2004, **20**(2): 55-58.
- Chai S W, Wen Y M, Zhang Y N, *et al.* Relationship between heavy metals and property of agricultural soil in Guangzhou suburb [J]. Rural Eco-Environment, 2004, **20**(2): 55-58.
- [39] 赵雄, 李福燕, 张冬明, 等. 水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(11): 2236-2240.

- Zhao X, Li F Y, Zhang D M, *et al.* Relationship between paddy soils cadmium pollution and cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(11): 2236-2240.
- [40] 郑春荣, 孙兆海, 周东美, 等. 土壤 Pb Cd 污染的植物效应 II——Cd 污染对水稻生长和 Cd 含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(5): 872-876.
- Zheng C R, Sun Z H, Zhou D M, *et al.* Plant responses to soil lead and cadmium pollution II. Effects of soil cadmium pollution on wetland rice growth and its uptake of cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(5): 872-876.
- [41] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(3): 428-436.
- Yi Y K, Zhou Z B, Chen G H. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(3): 428-436.
- [42] 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1918-1925.
- Wang M M, He M Y, Su D C. Quantitative relationship between paddy soil properties and cadmium content in rice grains[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1918-1925.
- [43] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(2): 510-515.
- Lin D S, Xu Y M, Sun G H, *et al.* Effects of pH, organic matter and hydrous oxides on competitive adsorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} by soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(2): 510-515.

环 境 科 学

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-ru, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)