

Study on the Remediation Effects of Rice Straw Ash on Cadmium Contaminated Paddy Soil

Chunxiang Liu¹, Zhaohua Hu², Dongyun Qiao³, Lina Wu¹, Yi An¹, Lili Huo^{1*}

¹Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin

²Agricultural Commission of Xiangtan in Hunan Province, Xiangtan Hunan

³Agricultural Environmental Protection and Rural Energy Management Station in Jilin Province, Changchun Jilin

Email: 1652279029@qq.com, *huoliliforgood@163.com

Received: Oct. 29th, 2019; accepted: Nov. 14th, 2019; published: Nov. 21st, 2019

Abstract

In order to better understand the remediation effects of rice straw ash on cadmium (Cd) contaminated paddy soil, a pot culture experiment was conducted to study the effects of applying different amounts of rice straw ash (low dosage: H1, medium dosage: H2, high dosage) to paddy soil on Cd availability in paddy soil and Cd content in rice. The results showed that, there was no significant difference in pH values between the two types of soils with different Cd contents and the control soils ($P > 0.05$). The available Cd content in two different Cd content paddy soils decreased by 27.5%~49.6% due to adding rice straw ash. As the same dosage of rice straw ash was added, the decrease ranges of available Cd content in paddy soils were ordered from high to low as follows: paddy soil with high Cd content > paddy soil with low Cd content. Due to the addition of rice straw ash, Cd content in rice decreased in paddy soil with low Cd content, but there was no significant difference in Cd content in rice between paddy soils with high Cd content and the control soils ($P > 0.05$). The results indicated that the effect of rice straw ash on Cd content in rice was affected by the Cd content of the soil itself, and only when the Cd content in soil is within a certain range and an appropriate amount of ash is applied, the repair effect of Cd pollution can be guaranteed.

Keywords

Plant Ash, Paddy, Cadmium, Remediation

水稻秸秆草木灰对镉污染水稻土修复效果研究

刘春湘¹, 胡召华², 乔冬云³, 武丽娜¹, 安毅¹, 霍莉莉^{1*}

¹农业农村部环境保护科研监测所, 天津

*通讯作者。

²湖南省湘潭市农业委员会, 湖南 湘潭

³吉林省农业环境保护与农村能源管理总站, 吉林 长春

Email: 1652279029@qq.com, huoliliforgood@163.com

收稿日期: 2019年10月29日; 录用日期: 2019年11月14日; 发布日期: 2019年11月21日

摘要

为探讨水稻秸秆草木灰对镉(Cd)污染水稻土的修复效果, 在低、高两种镉含量水稻土中分别添加不同量(低H1、中H2、高H3)水稻秸秆制成的草木灰, 通过盆栽试验, 研究添加草木灰后土壤中有效态Cd含量及稻米中Cd含量的变化。结果表明: 添加草木灰后, 两种Cd含量水稻土pH值与对照相比无显著差异($P > 0.05$)。添加草木灰使两种镉含量水稻土有效态Cd含量降低, 相对对照降幅在27.5%~49.6%之间; 相同草木灰添加量, 高Cd含量水稻土土壤有效态Cd含量降幅较大, 低Cd含量水稻土次之。低Cd含量水稻土中添加草木灰后, 稻米Cd含量降低, 且添加量为H3时降幅最大; 高Cd含量水稻土添加草木灰后, 稻米Cd含量与对照相比无显著差异($P > 0.05$)。研究表明: 草木灰降低稻米Cd含量的效果受到土壤本身Cd含量的影响, 在一定土壤Cd含量范围内施用合适的量才能保证其修复效果。

关键词

草木灰, 水稻, 镉, 修复

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

最近的全国性调查显示, 依据我国土壤环境质量标准, 16%样本的土壤, 19%样本的农业土壤受到污染, 其中重金属污染占污染土壤样本总数的 82.4%, 而在重金属中, 镉(Cd)污染占第一位[1]。人体在长时间高剂量摄入镉的情况下, 会引发心脑血管疾病、高血压, 还会引起肾衰竭、腰痛、脆化骨质疏松和脊柱畸形等病症, 因此土壤镉污染防治问题引起了广泛关注, 镉污染土壤的修复也成为人们关注的热点问题。

有研究表明, 土壤中的部分重金属可被作物吸收利用, 这些能被作物吸收的重金属为生物有效态重金属。重金属的生物有效性取决于土壤中重金属有效态含量的多少[2], 土壤改良剂或修复剂的施用可以改变土壤环境, 促进土壤中重金属交换态(活跃态)向可氧化态的转化, 减少重金属有效态的含量, 从而减少进入作物体内的重金属的量, 降低其生物有效性[3] [4]。研究表明, 生物炭、草木灰、海泡石、钢渣、沸石、污泥等多种材料对土壤 Cd 污染具有修复和改良作用[5] [6] [7] [8], 其中生物炭因具有较大的孔隙度、比表面积, 表面带有大量的负电荷, 且含有丰富的含氧、含氮、含硫官能团, 可增加土壤的阳离子交换量、pH 等, 广泛应用于 Cd 污染土壤的改良与修复中, 且相关研究较多[9] [10] [11]。

生物炭是农作物秸秆等生物质材料在无氧或缺氧条件下高温裂解的产物[12] [13], 草木灰是农作物秸秆等生物质材料燃烧后的残灰, 与生物炭来源相同。我国农作物秸秆年产量在 7 亿吨左右, 约占全世界

秸秆总量的 30%，每年农作物秸秆资源量约占生物质资源量的近一半[14]。由于生物质能源丰富，国家已将生物质直燃发电列为可再生能源产业发展的重要方面，生物质发电得到迅速发展，随之带来大量的废弃物——草木灰[15] [16] [17]。草木灰含有丰富的植物营养元素和微量元素，可做肥料；含碳多孔，是很好的吸附剂，对重金属污染物等具有良好的吸附作用；属碱性，可提高土壤 pH 值；含磷素较多，对土壤 Cd 污染修复具有潜力[5] [8] [9] [18]。相比生物炭，草木灰广泛易得，不需要额外的制备能量。

因此，研究草木灰对 Cd 污染水稻土的修复效果对 Cd 污染土壤修复剂和改良剂的选择以及秸秆等生物质资源化利用具有重要意义。本研究采用盆栽试验，在低、高两种 Cd 含量水稻土中加入低、中、高(H1、H2、H3)三种添加量的由水稻秸秆制成的草木灰，通过对比添加前后土壤中有效态 Cd 含量以及稻米中 Cd 含量的变化，研究草木灰对水稻土 Cd 有效性及稻米 Cd 含量的影响，探讨水稻秸秆草木灰对 Cd 污染水稻土的修复效果。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

试验所用土壤采自湖南省某镇，按照相对 Cd 含量分为低、高两种 Cd 污染水稻土，耕层深度为 0~20 cm。土壤采集后除去其中草根、石砾等杂物，置于阴凉处自然风干，备用，供试土壤基本理化性质见表 1。供试水稻品种为当地农民常年主栽品种，湘早籼 17 号，试验用草木灰由无污染水稻秸秆放置于露天旷地有氧燃烧殆尽后获得[19]，将残灰磨碎并过 0.2 mm 筛，3.759 kg 水稻秸秆烧出 500 g 草木灰，草木灰 pH 值为 10.85，有机碳含量为 44.86 g·kg⁻¹，Cd 含量为 1.62 mg·kg⁻¹，比表面积为 5.51 m²·g⁻¹。

Table 1. Basic physical and chemical properties of the paddy soil for experiment

表 1. 供试土壤基本理化性质

土壤类型 Soil property	Cd 含量 Cd content (mg·kg ⁻¹)	有效态 Cd 含量 Available Cd content (mg·kg ⁻¹)	pH 值 pH value	CEC (cmol·kg ⁻¹)	有机碳含量 Content of organic carbon (mg·kg ⁻¹)
低 Cd 含量(L)	3.98	0.92	6.75	15.43	22.93
高 Cd 含量(H)	95.31	16.56	6.68	13.82	23.94

2.2. 试验设计与样品采集

采用土培盆栽试验，用高 30 cm，内径 25 cm 的花盆，每盆装土 5 kg (干土重)。根据 1 m²空间和 20 cm 深土层的田间残留秸秆量与土壤质量，计算获得每盆 5 kg 土中添加草木灰 10 g (H1)，并另设两个添加量梯度 20 g (H2)，40 g (H3)，同时设置对照 CK 不添加草木灰，每种处理设置三个重复。水稻秸秆来自无污染大田，且相比盆栽用土添加的草木灰极微量，添加的草木灰内 Cd 总量可忽略不计。

将草木灰分别与土壤充分混匀，装盆，加水浸泡一个月。播种前将水稻种子放入双氧水中静置 15 min，用清水洗净，再将其置于托盘中，用蒸馏水淹没，静置 3~4 天。待种子出芽后取出，均匀撒在放有蛭石与土混合物的大托盘中，放置于温室内，待水稻苗长高至约 20 cm 后，移入盆中，每盆以三角形顶点分布状移入 3 株。水稻生长期间浇灌自来水，保持淹水深度为 2 cm 左右，移栽 90 天后即水稻成熟后采集水稻籽粒和土壤样品。将水稻籽粒风干脱壳加工成精米后再用籽粒粉碎机研磨，放入自封袋中保存待测；将采集的土壤样品放置于阴凉通风处自然风干，四分法取部分样品研磨过 100 目筛，用于测定土壤 Cd 有效态含量，取部分样品研磨过 20 目筛，用于测定土壤 pH 值。

2.3. 分析方法

土壤有机质、pH、CEC 等土壤基本理化性质采用《土壤农化分析(第三版)》中常规分析方法[20]。采用 $0.025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 浸提法提取土壤有效态 Cd [21], 用 ICP-MS 测定, 采用土壤标准样品 GBW07423(GSS-9)做质量控制。草木灰 Cd 含量测定方法: 采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 浸提法处理草木灰, 再用 ICP-MS 测定, 采用大米粉标准样品 GBW(E)100358 做质量控制。草木灰比表面积使用全自动比表面积与孔径分析仪(Autosorb-1-MP) (美国康塔)测定;pH 值测定则是草木灰与蒸馏水为按 1:5 (质量比)充分混匀, 振荡 30 min 后静置 30 min, 用 pH 计测定。

2.4. 数据处理

采用 SPSS19.0 数据分析; 采用 OriginPro8.6 绘图。

3. 结果与讨论

3.1. 添加草木灰对水稻土 pH 值及有效态 Cd 含量的影响

3.1.1. 添加草木灰对水稻土 pH 值的影响

低、高两种 Cd 含量水稻土添加草木灰后, 土壤 pH 值与对照相比差异不显著($P > 0.05$) (表 2)。低、高两种 Cd 含量水稻土添加草木灰后, 土壤 pH 值与对照相比差异不显著($P > 0.05$) (表 2)。草木灰本身呈碱性, 其主要成分是碳酸钾, 属强碱弱酸盐, 在一定条件的土壤中会发生水解反应, 释放出 OH^- , 从而使土壤 pH 值升高[22]。陈杰等将自制的稻秆燃烧后的草木灰加入供试土壤中, 发现草木灰添加量为 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时会造成土壤 pH 值大幅度上升[23]; 陈钊等在红壤与黄壤土中以 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的添加量加入 pH 为 12.55 的草木灰, 发现红壤和黄壤的 pH 分别提高了 1.6 和 0.9 个单位[7]; 朱雅兰等在染 Cd 的棕红壤中以 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的添加量添加电厂草木灰后, 土壤 pH 值提高了 1.8 和 2.2 个单位[24]。本研究中原草木灰 pH 值为 10.85, 添加量分别为 $2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (H1)、 $4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (H2)和 $8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (H3), 相比上述研究, 草木灰添加量较小, 加之供试土壤本身 pH 较高, pH 值与对照相比差异不显著。

Table 2. Soil pH value of low and high Cd content paddy soil before and after adding rice straw ash

表 2. 低、高 Cd 含量水稻土添加草木灰前后土壤 pH 值

土壤类型 Soil property	pH 值 pH value			
	对照(CK)	添加量 10 g (H1)	添加量 20 g (H2)	添加量 40 g (H3)
低 Cd 含量(L)	6.75 (a)	6.76 (a)	6.78 (a)	6.77 (a)
高 Cd 含量(H)	6.68 (a)	6.70 (a)	6.84 (a)	6.69 (a)

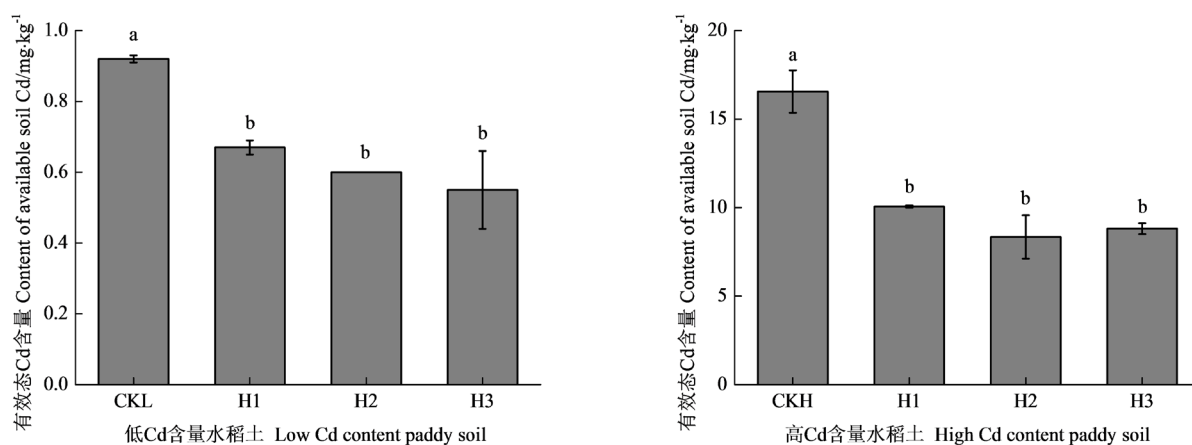
3.1.2. 添加草木灰对水稻土有效态 Cd 含量的影响

如图 1 所示, 低、高 Cd 含量水稻土中添加草木灰后, 土壤有效态 Cd 含量均显著降低($P < 0.05$)。低 Cd 含量水稻土中添加草木灰 H1、H2、H3 后, 土壤有效态 Cd 含量相对对照分别降低了 27.5%、35.1%、40.2%; 高 Cd 含量水稻土中添加草木灰 H1、H2、H3 后, 土壤有效态 Cd 含量相对对照分别降低了 39.3%、49.6%、46.8%。

草木灰含碳, 具有较高的比表面积和孔容, 对重金属有较高的吸附能力和表面络合能力[15] [23]。Singh 等发现芥菜废灰可以做吸附剂[25] [26]; Trivedi 等的研究表明芥菜草木灰除了可以为土壤提供营养元素外, 还能吸附土壤中的污染物质[27], Deokar、吴敏涓等亦有类似发现[19] [28]。稻壳灰对 Cu^{2+} 和 Fe^{2+} 具有显著的吸附作用, 对 Fe^{2+} 的最大吸附量可达 $4.19 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 且吸附效果稳定[29] [30]。草木灰的吸附功

能不仅与其比表面积有关,复杂的孔洞结构、碳及其化学组成也是其吸附功能的重要因素[16]。李旭东等研究发现草木灰通过其活性区位和孔隙对 Cd^{2+} 进行吸附,且反应动力学过程符合 Langmuir 等温模型,表现为有利吸附[31]。侯晓龙等发现草木灰对废水中 Cd 的吸附率最大达到 99.93% [6]。草木灰表面带有羟基和羧基等官能团,这些基团的水化使草木灰带有弱的负电,添加草木灰后,可以增加土壤表面负电荷,促进土壤胶体对 Cd 的吸附,尤其是铁、锰羟基化合物的形成,为 Cd^{2+} 提供更多的吸附位点,从而增加 Cd 的吸附量[18] [32]。草木灰的比表面积与燃烧程度有关,本研究中草木灰的比表面积为 $5.51 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,与周岩梅等的研究中燃烧程度较高的生物质电厂灰相近,该生物质电厂灰因其比表面积及较多的微孔和中孔,具有良好的吸附功能[16]。添加草木灰后,水稻土中有效态 Cd 含量显著降低与草木灰自身吸附功能有关。

陈杰等认为草木灰对重金属的钝化作用除了与其吸附性能有关外,还通过提高土壤 pH 值来实现,草木灰碳酸钾含量较高,本身呈碱性,可提高土壤 pH 值,碱性条件下,土壤环境中的重金属形成难溶氢氧化物,促进重金属的沉淀和稳定[15] [23],但本研究中由于草木灰添加量较小,土壤 pH 值与对照相比无显著差异,可能不是降低土壤有效态 Cd 含量的主要因素。草木灰钾含量最多,多是水溶性,以碳酸盐形式存在;其次是磷;还含有钙、镁、硅、硫、铁、锰、铜、锌、硼、钼等微量元素[15],添加到土壤后,通过生成 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 CdCO_3 沉淀,从而固定 Cd 离子,降低 Cd 的有效性;此外,磷和有机质矿化过程中形成的其他盐,比如碳酸盐可能和重金属结合形成不溶的复合物[23] [24] [33],由此可见,草木灰的矿物质组成也是其降低水稻土中有效态 Cd 含量的重要原因。



注: 添加草木灰 10 g (H1); 添加草木灰 20 g (H2); 添加草木灰 40 g (H3); 对照 CK 不添加草木灰

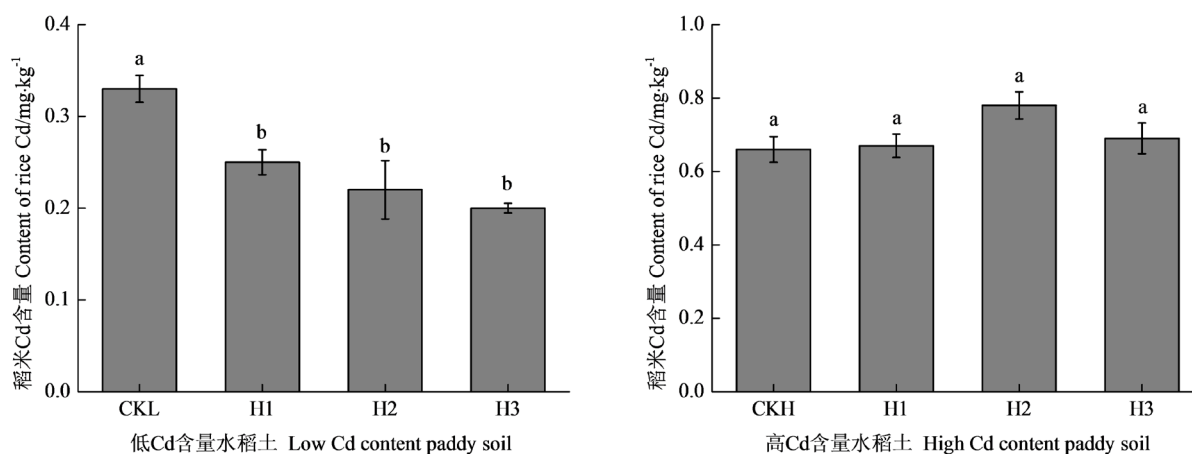
Figure 1. Content of available soil Cd in low and high Cd content paddy soil before and after adding rice straw ash

图 1. 低、高 Cd 含量水稻土添加草木灰前后土壤有效态 Cd 含量

3.2. 添加草木灰对稻米 Cd 含量的影响

低 Cd 含量水稻土添加草木灰后,稻米中 Cd 含量显著降低($P < 0.05$)。添加草木灰 H1、H2、H3 后,稻米 Cd 含量相比对照分别降低 23.8%、34.2%、39.9%。随草木灰添加量增加,稻米 Cd 含量逐渐降低,降幅逐渐增大(图 2)。高 Cd 含量水稻土添加草木灰后,稻米 Cd 含量与对照相比无显著差异($P > 0.05$) (图 2)。

低 Cd 含量水稻土中,随着草木灰添加量的增加,稻米 Cd 含量相比对照降幅增大,与土壤中 Cd 有效态变化趋势相符,这与土壤有效态 Cd 含量与作物中 Cd 含量呈显著相关性的研究结论一致[34] [35]。



注: 添加草木灰 10 g (H1); 添加草木灰 20 g (H2); 添加草木灰 40 g (H3); 对照 CK 不添加草木灰

Figure 2. Content of rice Cd in low and high Cd content paddy soil before and after adding rice straw ash

图 2. 低、高 Cd 含量水稻土添加草木灰前后水稻 Cd 含量

土壤重金属污染风险存在一定的阈值, 即土壤中重金属含量超过阈值, 其生产的农产品有超标风险 [36]。对于重金属污染土壤安全利用来讲, 土壤重金属含量也存在临界值或者阈值, 根据临界值或阈值将污染程度进行分级分类, 据此采用相应修复措施, 以保障农产品质量安全。例如“土十条”和《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)指出轻度污染可采取农艺措施进行修复, 中度污染可采用物理、化学或者生物修复, 重度污染可进行种植结构调整 [37] [38]。本研究结果表明, 在一定土壤 Cd 含量范围内(低 Cd 含量水稻土中), 添加草木灰能够降低土壤有效态 Cd 和稻米中 Cd 含量。一方面, 草木灰对重金属有较高的吸附能力和表面络合能力; 另一方面, 草木灰的矿物质组成通过生成沉淀, 磷和有机质矿化过程中形成不溶的复合物, 从而固定 Cd 离子, 降低水稻土中有效态 Cd 含量, 阻控土壤中镉向水稻运移富集, 从而降低稻米镉含量。但是当土壤 Cd 含量高到一定程度时(高 Cd 含量水稻土中), 虽然添加草木灰能够降低土壤有效态 Cd 含量, 但是并不能使稻米中 Cd 含量降低。探索修复剂适用的土壤 Cd 含量阈值对于 Cd 污染土壤安全利用实践和农产品质量安全至关重要。

4. 结论

- 1) 添加草木灰 H1、H2、H3 后, 低、高 Cd 含量水稻土 pH 值与对照相比差异不显著。
- 2) 添加草木灰后, 低、高 Cd 含量水稻土中有效态 Cd 含量均显著降低。
- 3) 水稻土 Cd 含量高低会影响草木灰的修复效果。水稻土 Cd 含量过高时(高 Cd 含量), 添加草木灰虽能降低水稻土有效态 Cd 含量, 但并不能降低稻米 Cd 含量。因此在一定土壤 Cd 含量范围内施用草木灰才能保证修复效果良好。

基金项目

国家自然科学基金青年项目(41501102); 中国农业科学院创新工程(2019-cxgc-lyj)。

参考文献

- [1] Zhao, F.-J., Ma, Y.-B., Zhu, Y.-G., *et al.* (2015) Soil Contamination in China: Current Status and Mitigation Strategies. *Environmental Science & Technology*, **49**, 750-759. <https://doi.org/10.1021/es5047099>
- [2] Impellitteri, C.A., Saxe, J.K., Cochran, M., *et al.* (2003) Predicting the Bioavailability of Copper and Zinc in Soils: Modeling the Partitioning of Potentially Bioavailable Copper and Zinc from Soil Solid to Soil Solution. *Environmental*

- Toxicology & Chemistry*, **22**, 1380-1386. <https://doi.org/10.1002/etc.5620220626>
- [3] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 251-256.
- [4] Knox, A.S., Seaman, J.C., Mench, M.J., *et al.* (2007) Remediation of Metal- and Radionuclides-Contaminated Soils by *in Situ* Stabilization Techniques. *Lecture Notes in Computer Science*, **17**, 548-562.
- [5] 殷飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 438-448.
- [6] 侯晓龙, 刘爱琴, 蔡丽平. 5 种物理吸附剂对模拟废水中重金属的吸附效果[J]. 亚热带农业研究, 2012, 8(2): 105-112.
- [7] 陈钊, 高远, 张艳玲, 等. 不同土壤改良剂对烟草吸收镉的影响[J]. 烟草科技, 2013, 34(3): 72-76.
- [8] 李新颖, 朱雅兰, 陈泉源. 改良剂对 Cd 污染土壤中小白菜品质的影响[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(5): 63-67.
- [9] 陈昱, 钱云, 梁媛, 等. 生物炭 Cd 污染土壤的修复效果与机理[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2528-2534.
- [10] Jiang, J., Xu, R.K., Jiang, T.Y., *et al.* (2012) Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the Addition of Rice Straw Derived Biochar to a Simulated Polluted Ultisol. *Journal of Hazardous Materials*, **229-230**, 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.086>
- [11] 杨惟薇, 张超兰, 曹美珠, 等. 4 种生物炭对镉污染潮土钝化修复效果研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 239-243.
- [12] 梁媛, 李飞跃, 杨帆, 等. 含磷材料及生物炭对复合重金属污染土壤修复效果与修复机理[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2377-2383.
- [13] 吴丹萍, 李芳芳, 赵婧, 等. 生物炭在制备及土壤应用中的潜在环境风险[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(1): 98-103.
- [14] 李海亮, 汪春, 孙海天, 等. 农作物秸秆的综合利用与可持续发展[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 256-262.
- [15] 郭墅, 王晓莉, 李玲玲, 等. 生物质热电厂废弃物草木灰颗粒的成型加工工艺[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(6): 738-742.
- [16] 周岩梅, 张琼, 孙素霞, 等. 敌草隆在市售草木灰及生物质电厂灰上的吸附特性研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1612-1619.
- [17] 石炎, 薛聪, 邱宇平. 农林生物质直燃电厂灰渣资源化技术与展望[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 127-139.
- [18] 张琼, 周岩梅, 孙素霞, 等. 农药西维因及敌草隆在草木灰上的吸附行为研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(3): 529-534.
- [19] 吴敏渭. 草木灰影响下西维因在土壤中的吸附/解吸行为及生物有效性[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Udovic, M. and Lestan, D. (2012) EDTA and HCL Leaching of Calcareous and Acidic Soils Polluted with Potentially Toxic Metals: Remediation Efficiency and Soil Impact. *Chemosphere*, **88**, 718-724. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.040>
- [22] 刘福英. 草木灰在农林上的应用[J]. 农技服务, 2016, 33(11): 88.
- [23] 陈杰, 宋靖珂, 张晶, 等. 不同钝化剂对铜污染土壤原位钝化修复[J]. 土壤, 2016, 48(4): 742-747.
- [24] 朱雅兰, 李明, 黄巧云. 草木灰污泥联合施用对 Cd 污染土壤中 Cd 形态变化的影响[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(4): 447-451.
- [25] Singh, H. and Roohi, S. (2013) Removal of Basic Dyes from Aqueous Solutions Using Mustard Waste Ash and Buffalo Dung Ash. *International Journal of Environmental Sciences*, **3**, 1711-1725.
- [26] Gupta, V.K., Jain, R., Siddiqui, M.N., *et al.* (2010) Equilibrium and Thermodynamic Studies on the Adsorption of the Dye Rhodamine-B onto Mustard Cake and Activated Carbon. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **55**, 5225-5229. <https://doi.org/10.1021/je1007857>
- [27] Trivedi, N.S., Mandavgane, S.A. and Kulkarni, B.D. (2016) Mustard Plant Ash a Source of Micronutrient and an Adsorbent for Removal of 2, 4 Dichlorophenoxyacetic Acid. *Environmental Science and Pollution Research*, **20**, 20087-20099. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6202-7>
- [28] Deokar, S.K. and Mandavgane, S.A. (2015) Estimation of Packed-Bed Parameters and Prediction of Breakthrough Curves for Adsorptive Removal of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid Using Rice Husk Ash. *Journal of Environmental*

Chemical Engineering, **3**, 1827-1836. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.06.025>

- [29] 左海强, 刘艳, 张彦博, 等. 稻壳灰吸附剂对重金属铜离子的吸附性能研究[J]. 工业用水与废水, 2012, 43(4): 58-61.
- [30] 张颖, 鲁岩, 赵佳英, 等. 稻壳灰对地下水中铁离子动态吸附研究[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(10): 68-73.
- [31] 李旭东, 毛志成, 谢翼飞, 等. 草木灰对 Cd^{2+} 废水吸附性能和动力学特征研究[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(8): 39-42.
- [32] 袁林. 铁锰复合氧化物对重金属铅镉吸附解吸特征及其影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [33] Bolann, S. and Duraisamy, V.P. (2003) Role of Inorganic and Organic Soil Amendments on Immobilization and Phytoavailability of Heavy Metals: A Review Involving Specific Case Studies. *Australian Journal of Soil Research*, **41**, 533-555. <https://doi.org/10.1071/SR02122>
- [34] 赵勇, 李红娟, 孙治强. 土壤、蔬菜 Cd 污染相关性分析与土壤污染阈限值研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 149-153.
- [35] Huo, L.-L., Li, Y.-J. and An, Y. (2016) Relationship between Cadmium Content in Acid Paddy Soil and That in Rice with Different Varieties. *Fresenius Environmental Bulletin*, **25**, 6005-6011.
- [36] 薛强, 赵元艺, 张佳文, 等. 基于农作物食用安全的土壤重金属风险阈值[J]. 地质通报, 2014, 33(8): 1132-1139.
- [37] 国发 2016[2016]31 号. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知[Z]. 2016.
- [38] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行) GB15618-2018 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.