

Effects of Different Material on the Stability of Soil Cadmium

Yongli Zhang¹, Xiaowen Liu², Shuangjin Ma¹, Yingxin Wu², Zhongren Nan^{1*}

¹College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou Gansu

²South China Institute of Environmental Science, MEP, Guangzhou Guangdong

Email: ylzhang16@lzu.edu.cn, *zhongrennan@126.com

Received: Aug. 1st, 2018; accepted: Aug. 9th, 2018; published: Aug. 16th, 2018

Abstract

Agricultural soil was the basis of the food resource. It has been contaminated by heavy metals of different degrees, especially cadmium (0.4 - 1.4 mg/kg), due to sewage irrigation and fertilizers input. Cadmium inactivation was difficult to stabilize in farmland soils: 1) Cadmium was of activity and high biological toxicity; 2) Complex and variable farmland in soil environment; 3) Different research methods (different extractants) make soil passivation agent choice difficult. This paper is based on the previous research. The effect and mechanism of different passivation materials on stabilizing soil cadmium in farmland were discussed, and the problems of cadmium passivation in farmland soil are identified. The soil cadmium passivation materials are mainly composted organic fertilizers, industrial bulk materials and new experimental or synthetic materials. Animal manure organic composted returning fertilizer is superior to plant straw composted; hydroxyapatite, red mud, and lime are the preferred soil passivators in industrial bulk materials; new test and synthetic materials are various bacterial preparations, reducing materials, and polymer complexes. At the present stage, scholars pay more attention to the passivation stability of soil cadmium by various bacterial preparations, reducing materials and macromolecule complexes.

Keywords

Soil, Cadmium, Material, Passivation, Mechanism

不同钝化剂对农田土壤镉钝化稳定影响

张永利¹, 刘晓文², 马双进¹, 吴颖欣², 南忠仁^{1*}

¹兰州大学, 资源环境学院, 甘肃 兰州

²环境保护部华南科学研究所, 广东 广州

Email: ylzhang16@lzu.edu.cn, *zhongrennan@126.com

收稿日期: 2018年8月1日; 录用日期: 2018年8月9日; 发布日期: 2018年8月16日

*通讯作者。

文章引用: 张永利, 刘晓文, 马双进, 吴颖欣, 南忠仁. 不同钝化剂对农田土壤镉钝化稳定影响[J]. 农业科学, 2018, 8(8): 918-925. DOI: 10.12677/hjas.2018.88135

摘要

农业土壤作为民食之基,随着多年污水灌溉和肥料的不合理使用,受到不同程度重金属污染,尤以镉(0.4~1.4 mg/kg)危害最大。农田土壤镉钝化稳定困难原因:1) 镉因其活性强,生物毒害大;2) 复杂多变的农田土壤环境;3) 不同的研究方法(不同提取剂)使得土壤钝化剂的筛选困难。本文在国内外众多学者研究的基础上,探讨不同钝化材料稳定农田土壤镉效果和机理,并找出农田土壤镉钝化存在问题。土壤镉钝化材料主要为有机还田肥料、工业大宗材料和新型试验及合成材料。动物粪便有机堆肥还田肥料效果优于植物秸秆类堆肥;工业大宗材料中羟基磷灰石、赤泥、石灰是首选土壤钝化剂;新型试验及合成材料为各种菌制剂、还原性材料以及高分子络合物。现阶段学者多关注各种菌制剂、还原性材料以及高分子络合物对土壤镉的钝化稳定。

关键词

土壤, 镉, 钝化剂, 稳定, 机理

Copyright © 2018 by authors 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

改革开放以来,随着我国工业化和城市化的快速发展,产业布局的不合理和工业固体废弃物管理、利用技术的落后,工业污染物大量排放至水体和土壤。城郊传统高负荷农作与污水灌溉生产模式,致使我国大面积农田重金属积累含量超出国家农田土壤标准要求[1],造成农作物生产潜在安全风险。全国污染源调查公告显示,我国耕地无机污染超标率为19.48%,镉污染农田土壤占7% [2],部分工矿业地区属严重复合污染。十八大召开以后,我国政府加强了涉及广大人民利益的农田污染土壤防治工作,农田土壤污染防治成为重点工作对象。2016年5月28日,我国政府印发了《土壤污染防治行动计划》(《土十条》),相继启动土壤污染状况详查工作,计划于2020年完成并向社会公开详查结果。我国土壤污染防治安全工作进入新时期。

重金属污染农田具有长期性、稳定性、潜在危害性。重金属可通过食物链迁移和富集作用间接富集于人体内,产生潜在健康风险。目前,重金属污染土壤修复主要分为原位修复和异位修复,即通过物理、化学、生物方法对土壤重金属进行原位钝化、淋洗和植物提取或通过异位客土、固化和淋洗进行安全处置,对于我国低浓度重金属污染农田土壤,通过农田施加钝化剂修复进行安全生产。我国土壤以镉、铅、砷污染较为突出,尤以镉高生物有效性、植物体高富集,对我国粮食安全生产潜在风险最大,本文主要对镉污染农田土壤钝化进行探讨。我国酸性和中性($\text{pH} < 7.5$)农田土壤镉限值为0.30 mg/kg,碱性($\text{pH} > 7.5$)土壤为0.60 mg/kg。由于涉重肥料和污水灌溉等原因,我国部分酸性和中性重金属污染农田镉含量为0.4~1.4 mg/kg,矿区以及冶炼废渣堆放厂周边农田镉含量更高(5~200 mg/kg),不再适合农业生产。镉污染农田土壤严重影响叶菜类和水稻等作物安全生产,原位钝化稳定修复镉污染农田不仅效率高、成本低,还可保证农田土壤正常生产,具有广阔发展前景。

2. 钝化剂种类

土壤钝化剂因其成本低廉,操作简单,可对污染农田土壤进行原位的钝化稳定,修复效果明显,应

用前景广阔。目前，土壤钝化剂主要为有机还田肥料、工业大宗材料和新型试验及合成材料。农用废物堆肥钝化剂主要是将动物粪便(鸡粪、猪粪和牛粪等)与秸秆(水稻秸秆、玉米秸秆)、菜梗、蘑菇渣等按一定比例混合，控制堆肥温度和湿度发酵腐熟而制得，其农具有培肥、改善土壤理化性质，提升土壤肥力的农用价值。

工业大宗材料主要有部分工业大宗废弃物、粘土矿物、石灰、生物炭、磷矿石、磷酸盐和钙镁磷肥等。应用于土壤钝化稳定研究的工业大宗废弃物主要有赤泥、钢铁渣、粉煤灰、石膏。工业吸附剂和固化剂主要为蒙脱石、膨润土、海泡石、蛭石等。石灰是经石灰石煅烧而来，传统农具有缓减土壤板结，消毒杀菌作用。应用于农田土壤镉钝化实验生物炭种类繁多，田间试验鲜见。生物炭主要为家畜粪便生物炭，多以作物秸秆生物炭以及各种木炭实验为主。磷矿石、磷酸盐和钙镁磷肥常作为植物营养素添加，其中速效磷对重金属钝化起主要作用，磷矿石处理镉污染土壤种植马铃薯块茎镉含量降低 17.4% [3]。

新型试验及合成材料为各种菌类、还原性铁和锌等金属单质以及高分子络合物。生物菌类主要通过生物化学作用，产生碳酸根离子、硫离子以及高分子络合物，对镉矿化或络合稳定，可能与巯基类有机性重金属络合官能团有关。铁和铁盐作为一种新型无机钝化剂，通过调节土壤氧化还原电位和吸附络合反应，对土壤镉砷具有同步钝化作用。

3. 不同钝化剂钝化稳定镉污染农田土壤效果

3.1. 农业有机物堆肥还田

农业有机物产量大，重金属含量低，碳源丰富，富含钾、磷等植物营养元素。有机物堆肥农具有改土、培肥作用，可有效促进作物生长和提高种植产量。土壤有机质是土壤肥力的重要指标，土壤中农用废弃物堆肥施加量通常为 1%~10%，土壤有机质可有效抑制红壤和黑土外源性镉有效性[4]，显著提高植物生物量抑制镉的吸收富集，动物粪便堆肥较植物秸秆类堆肥对镉有更好钝化稳定效果(表 1)。研究表明施加有机堆肥材料的红壤可显著降低可交换态和碳酸盐结合态镉含量而增加铁锰氧化态和硫化物及有机结合态镉含量[5]，残渣态含量尚无明显变化[6]。也有学者认为农用烟草废弃物堆肥过程中铁锰氧化态和残渣态增加[7]，猪粪添加木屑炭后农田土壤镉钝化效果可达 90%以上[8]。有机堆肥材料添加木醋酸不仅可提高堆肥质量，还可钝化稳定重金属，具有较大资源化利用优势[9]。镉污染褐潮土在添加油菜、大葱、蒜苗等富含有机硫素材料后，可实现 20%~50%有效态镉钝化[10]，农用废弃物发酵还田对镉具有钝化稳定作用。但也有研究发现其可增加土壤锌、镉活性[10] [11]，这主要是因堆肥有机碳和有机酸对重金属活化所致，考虑堆肥产品尚未完全腐熟。石灰性土壤施加有机肥可提高部分重金属的活性，降低土壤对锌、锰固化能力[12]，有研究使用生活垃圾液体肥料制备溶解有机碳溶液，用于锌污染土壤的淋洗治理[13]。镉污染土壤选择合适有机堆肥是关键。

Table 1. Effect of different composted materials on available cadmium
表 1. 不同堆肥原料对农田土壤有效态镉含量影响

堆肥原料	供试土壤镉浓度 (mg/kg)	钝化前土样 pH	钝化剂施加含量 /%	有效态下降(提取剂) /%	钝化后土样 pH	参考文献
鸡粪	0.70	6.42	2.00	44.44 (DTPA)		[14]
泥炭			0.50			
鸡粪稻壳	2.00	5.5	3	23.08 (KNO ₃)	6.65	[5]
猪粪	50.00	5.03	2.00	7.69 (CaCl ₂)	5.41	[15]
稻草				3.85 (CaCl ₂)	5.30	
麦秆				0.00 (CaCl ₂)		

3.2. 工业大宗材料

工业大宗材料是指工业生产过程中产生的固废,具有数量大、难以资源化利用特点,主要包括工业大宗固体废弃物、工业吸附剂和固化剂及石灰等。钝化材料种类、粒径、使用量是影响钝化效果的主要因素,但钝化剂施加量普遍过多,羟基磷灰石、赤泥、石灰是首选土壤钝化剂。

工业大宗固体废弃物:赤泥、钢渣因其碱性较高,可通过调节土壤 pH 和化学专性吸附以及晶格固定作用,减少南方酸性红壤农田有效态镉 17%~48%,增加微生物土壤活性和农作物产量,糙米镉含量分别可减少 20%~40%、66%~77%,达到食品安全标准[16][17],研究认为减小赤泥粒径可显著提高镉钝化稳定效果[10]。2%施加量粉煤灰可减少交换态镉 35% [18]。

工业吸附剂和固化剂:蒙脱石、沸石为硅铝酸盐粘土矿物,具有优良的物理化学性能,如吸水膨胀性、吸附性、分散悬浮性、阳离子交换性等,较其他粘土矿物对镉有更好的吸附钝化效果[19][20]。蒙脱石因其较大的比表面积和短时间提高土壤 pH,对镉的钝化效果强于活性炭,其可降低酸性红壤有效态镉 10%~20% [21]。巯基硅烷试剂改性蒙脱石可使低浓度镉污染红壤可交换态下降 64% [22],也有研究认为蒙脱石可用于镉砷复合污染,其可有效降低砷溶出[23]。

石灰:石灰作为传统农业土壤改良剂具有悠久的农耕历史,石灰不仅具有消毒杀菌作用,同时可有效缓解土壤板结、增加土壤氮磷有效性[24]。石灰主要通过改变农田土壤 pH 达到土壤有效态镉钝化[25][26]。在土壤 pH 为 5.5~6.5,随土壤酸化碳酸盐结合态镉溶出增大,故石灰修复镉污染酸性农田需保持土壤 pH 大于 6.5 [27]。农业生产实践中,石灰主要与其他中性土壤改良剂(如海泡石、膨润土、生物炭等)混施降低黑土交换态镉 15%~25% [28],且效果优于石灰单一处理[29],石灰对酸性红壤有效态镉的稳定效果优于黑土[14],其有效镉降幅均与 pH 呈负相关。有报道称红壤添加腐植酸后有效态镉含量会有所增加,但混施石灰后以钝化为主且效果优于石灰单一施加[30]。

生物炭:生物炭具有发达的孔隙和丰富的比表面积,研究认为随热解温度升高,生物炭表面结构越趋复杂,对重金属镉稳定效果随炭化温度升高而增强[31]。生物炭热解温度到达 500℃时,表面化学官能团由简单的烷基基、羧基、羟基、酯基转为芳香类[32]。生物炭表面大量的化学吸附位点和较高负电势是对镉吸附关键。土壤中生物炭添加量为 3%~5%,水稻秸秆生物炭可减少土壤有效态镉 18% [33][34][35]。家禽垃圾和桉树生物炭减少场地酸提取态镉 8%~10% [36]。也有研究认为好氧环境下,稻壳生物炭可增加土壤镉的溶出[37]。生物炭配施其他土壤钝化剂,可降低有效态镉提取量 10% [38]。生物炭和铁混施还可显著增加土壤脲酶和过氧化氢酶活性。总体来说,生物炭钝化农田土壤镉不甚理想,需配施其他钝化剂,不同性质污染土壤选择对应活性炭方面存在较大困难,没有规律可循。

钙镁磷肥:钙镁磷肥是作物生长必需元素,镁元素是植物体内合成叶绿素的重要物质,磷元素是核酸组成的主要成分。在重金属调控解毒过程中,钙镁磷肥起着至关重要的作用,羟基磷灰石为首选磷酸盐类钝化剂,对有效态镉的钝化效率可达 30%~60%以上[39]。配施其他钝化剂可减少磷酸盐的施加量,添加蒙脱石后,磷酸二氢钙的用量可减少一半[23]。磷肥中速效磷含量是控制镉活性的主要因素[40]。随时间和种植次数的增加,需适当对钙镁磷肥钝化剂进行补施[41]。磷矿石因其植物可利用磷含量低,限制其农用推广和镉钝化效果。有研究认为有机酸改性磷矿石可提高有效磷含量,减少土壤水溶性镉含量 12%~60% [42],而单施氮磷钾复合肥可促进稻米对镉的富集[24]。

3.3. 新型试验材料

生物菌类:硫酸盐还原细菌处理沉积物镉,可使沉积物介质水中镉含量较对照组减少 77%以上[43]。在镉污染胁迫下,硫酸盐还原菌和解磷菌表现为互利共生性和镉的同步钝化性,钝化潮褐土有效态镉 28%~41% [44]。球形红细菌生物修复镉污染土壤后,镉的铁锰氧化态增加[45],碳酸盐矿化菌在尿素基

质中对镉钝化稳定,红壤交换态含量明显减少[46]。生物菌类钝化稳定镉污染土壤大都处于试验阶段,小区、农田工程应用鲜见。鉴于其环境友好性,研究生物修复镉污染土壤具有广阔应用前景。

还原性材料:还原性铁可以降低土壤氧化还原电位,抑制土壤有效态镉的释放。铁修复镉污染土壤修复剂用量是关键,高浓度铁对镉具有洗脱作用[47],也有研究认为水溶液中不含铁氧化物的英石较天然英石对镉有更好吸附效果[48]。硫酸高铁对土壤砷钝化稳定效果明显,可达60%以上[39],对于镉砷复合污染土壤,铁及铁盐具有广阔的应用前景[49]。

高分子络合物:多孔、高吸附性高分子材料现多应用于水体有机性污染物和部分水体无机性重金属治理[50],土壤修复治理应用鲜见。有学者发现胡敏酸对镉有较好的稳定效果,其可减少镉胁迫小麦 H_2O_2 含量和脂质过氧化作用[51],但其活性随时间增加显著降低[52],未有实际工程应用。

4. 镉污染土壤钝化修复机理探讨

4.1. pH 钝化镉机理

土壤钝化剂多呈碱性,可改变土壤的酸碱性,使土壤 pH 升高,主要通过三个原理降低土壤重金属有效态浓度:1) pH 升高 H^+ 减少,土壤负电荷胶体增多,土壤阳离子竞争吸附减弱,土壤有机质、铁锰氧化物对镉吸附更牢固[15]。当土壤 pH 大于 7.5 时,可加强土壤铁锰氧化物对重金属阳离子的吸附络合作用,减少土壤水溶态镉 90% 以上[15][53]。2) 土壤 zeta 电位减小,土壤胶体带正电粒子发生团聚络合。pH 大于 7 时,水溶液中磁性磷酸铁吸附剂对镉的去除效率可达到 95% 以上[54]。3) pH 增加,土壤 OH^- 增加,土壤羟基化镉含量增加,加强土壤胶体离子对镉的吸附稳定。同时, pH 增加是形成土壤碳酸盐结合态镉的主要因素[53]。

4.2. 有机质与微生物钝化镉机理

土壤有机质含量升高和微生物作用可使土壤水溶态与可交换态镉向有机态转化[5],大量研究表明,堆肥腐熟后重金属向稳定性高的有机结合态转化,30% 重金属可与腐植酸稳定络合[55]。也有研究表明植物体内有机性巯基化合物可与镉产生螯合作用,诱导其合成植物络合素及类金属硫蛋白,然后运输到液泡,对镉在生物细胞组织体内起到分室作用,达到镉解毒作用[10]。土壤中微生物种类丰富,镉污染土壤碳酸盐矿化菌可通过表面静电吸附作用吸附,然后通过代谢产生碳酸根离子与吸附镉形成碳酸镉晶体,进一步通过表面分泌物促进碳酸镉晶体沉淀[46]。

4.3. 无机矿物钝化镉机理

无机矿物主要通过如下机理钝化镉:1) 通过孔道内大量 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与土壤阳离子进行交换,导致土壤水解性和代替性酸减少, pH 增加而间接达到镉的钝化[26]。2) 无机矿物较大的比表面积,通过表面吸附、表面沉淀、晶格固定钝化重金属,且主要以后两种作用为主[10][40]。研究表明,过磷酸钙通过离子交换作用与重金属形成难溶性钙-重金属混合磷酸盐,从而达到镉钝化效果[40]。高岭石、针铁矿、三水铝石对镉以共价键吸附为主[20]。土壤矿物中钙、锌与镉发生同晶置换对镉矿化稳定[56]。

生物炭吸附镉原理为化学专性吸附、电吸附和物理吸附为主[57]。化学专性吸附以 $-OH$ 、 $-CH_3$ 、 $-CH_2-$ 、 $-C=O$ 、 $R-C-O$ 等官能团为主[58]。电吸附主要通过生物炭表面负电势,通过静电场作用使重金属附着于生物炭表面。重金属镉也通过生物炭表面其他金属离子形成稳定三元 B 型配合物[57],从而降低土壤镉活性,达到土壤、植物解毒作用。

4.4. 其他离子钝化镉机理

土壤中锌、钙、镁、铅、硫、铁及其化合物等对土壤镉有效性影响较大。土壤中无定形水合氧化铁

和晶度较低的氧化铁对镉有较强的吸附能力。淹水条件下, 土壤铁氧化物在还原性环境中活化, 结晶态铁氧化物向无定形铁氧化物转化, 可强化铁氧化物对镉的吸附[59]。硫化镉水解系数 7.1×10^{-27} , 可形成硫化镉晶体沉淀, 达到钝化稳定镉效果。碱性金属离子与重金属离子在土壤中主要通过静电吸附和共价键吸附矿化, 主要表现为拮抗与竞争作用。锌、铅、铁离子在土壤中对镉表现为拮抗作用, 铅对有效态镉钝化起抑制作用, 这可能与其水解常数和竞争吸附位点有关[4], 增大介质中离子强度, 可增加可交换态镉的溶出[7]。适当浓度矿质营养元素锌、铁、钙可抑制植物对重金属镉的吸收积累。

5. 展望

农业废弃物因其重金属含量较低, 堆肥发酵后有环保、培土、增产等农用优势, 动物粪便堆肥可作为农田土壤重金属钝化稳定首选材料。生物菌类、硫及硫化物、铁及铁化物在土壤镉化学形态转化过程中起重要作用, 根据不同土壤耕作模式特点, 合理使用新型试验材料具有较大社会、科学研究意义。工业大宗材料赤泥可在不增加土壤重金属总量情况下, 科学添加。目前土壤钝化稳定存在较大问题为: 1) 钝化剂部分涉重; 我国部分畜禽粪便重金属含量较高, 磷矿石和磷肥镉含量普遍较高。2) 土壤性质、种植模式多样; 我国土壤从南到北, 由东向西性质存在较大差异, 耕作模式多样, 土壤钝化剂选择需根据特定土壤、特定耕作模式选择。3) 钝化剂选择困难; DTPA 提取剂对土壤有效态重金属提取效果稳定, 便于不同领域研究者对土壤钝化材料进行统一评价, 建议使用 DTPA 提取土壤重金属有效态。4) 堆肥还田农用可使提高土壤锌、铁等营养元素有效态; 今后研究应加强堆肥还田土壤营养元素的监测, 调控土壤营养元素, 保持土壤健康可持续生产。

基金项目

国家重点研发计划项目(SQ2017YFNC060046); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2015-214, lzujbky-2015-138)。

参考文献

- [1] Huang, Q., Yu, Y., Wan, Y., *et al.* (2018) Effects of Continuous Fertilization on Bioavailability and Fractionation of Cadmium in Soil and Its Uptake by Rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Environmental Management*, **215**, 13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.036>
- [2] Chen, J., Shafi, M., Wang, Y., *et al.* (2016) Organic Acid Compounds in Root Exudation of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and Its Bioactivity as Affected by Heavy Metals. *Environmental Science & Pollution Research*, **23**, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7323-8>
- [3] Liu, C., Wang, L., Yin, J., *et al.* (2018) Combined Amendments of Nano-Hydroxyapatite Immobilized Cadmium in Contaminated Soil-Potato (*Solanum tuberosum* L.) System. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, **100**, 1-7. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2299-3>
- [4] 吴曼, 徐明岗, 徐绍辉, 等. 有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 461-467.
- [5] 陈寒松. 堆肥对镉污染的棕红壤——小白菜系统的修复[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [6] 吴飞龙, 苏德纯. 油菜连作及施用堆肥对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 658-662.
- [7] 周雯婧, 伏林军, 彭丽婧. 烟草废弃物快速堆肥过程中重金属 Cd 形态变化特征[J]. 环境保护科学, 2017, 43(5): 120-123.
- [8] 候月卿, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭和腐植酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 205-215.
- [9] Liu, L., Guo, X., Wang, S., *et al.* (2018) Effects of Wood Vinegar on Properties and Mechanism of Heavy Metal Competitive Adsorption on Secondary Fermentation Based Composts. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, **150**, 270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.037>

- [10] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 不同钝化剂和培养时间对 Cd 污染土壤中可交换态 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1098-1105.
- [11] Gondek, K., Mierzwa-Hersztek, M. And Kopeć, M. (2018) Mobility of Heavy Metals in Sandy Soil after Application of Composts Produced from Maize Straw, Sewage Sludge and Biochar. *Journal of Environmental Management*, **210**, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.023>
- [12] 郭胜利, 余存祖, 戴鸣钧. 有机肥对石灰性土壤中锌、锰生物有效性的影响[J]. 华北农学报, 1996, 11(4): 63-68.
- [13] Chiang, P.N., Tong, O.Y., Chiou, C.S., *et al.* (2016) Reclamation of Zinc-Contaminated Soil Using a Dissolved Organic Carbon Solution Prepared Using Liquid Fertilizer from Food-Waste Composting. *Journal of Hazardous Materials*, **301**, 100-105. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.015>
- [14] 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.
- [15] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 212-218.
- [16] Li, H., Liu, L., Luo, L., *et al.* (2018) Response of Soil Microbial Communities to Red Mud-Based Stabilizer Remediation of Cadmium-Contaminated Farmland. *Environmental Science & Pollution Research*, No. 10, 1-9.
- [17] He, H., Nfy, T., Yao, A., *et al.* (2017) Growth and Cd Uptake by Rice (*Oryza sativa*) in Acidic and Cd-Contaminated Paddy Soils Amended with Steel Slag. *Chemosphere*, **189**, 247.
- [18] 崔红标, 吴求刚, 张雪, 等. 粉煤灰对污染土壤中铜镉的稳定化[J]. 土壤, 2016, 48(5): 971-977.
- [19] 李雪梅, 王延利. 蒙脱石提纯研究进展[J]. 岩矿测试, 2006, 25(3): 252-258.
- [20] 李丽, 刘中, 宁阳, 等. 不同类型粘土矿物对镉吸附与解吸行为的研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 60-66.
- [21] 高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 等. 生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 361-367.
- [22] 赵秋香, 黄晓纯, 李媛媛, 等. 蒙脱石-OR-SH 复合体修复剂对重金属污染土壤中 Cd 的钝化效果[J]. 环境化学, 2014(11): 1871-1877.
- [23] 李雅贞, 罗琳, 晏洪铃, 等. 含磷材料对矿区铅镉污染土壤重金属形态转化的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2469-2472.
- [24] 方克明, 钟国民, 周丽芳, 等. 石灰在酸性稻田的施用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5).
- [25] 王浩朴, 胡丽, 冯莲莲, 等. 石灰、硅酸钠和羟基磷灰石对烟草吸收镉的影响[J]. 热带作物学报, 2017(8): 1434-1440.
- [26] 谢飞, 梁成华, 孟庆欢, 等. 添加天然沸石和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 环境工程学报, 2014(8): 3505-3510.
- [27] Du, Y., Wang, X., Ji, X., *et al.* (2018) Effectiveness and Potential Risk of CaO Application in Cd-Contaminated Paddy Soil. *Chemosphere*, **204**, 130-139.
- [28] 高译丹, 梁成华, 裴中健, 等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 258-261.
- [29] 罗婷, 喻华, 秦鱼生, 等. 石灰及配合施用镁和硅对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1826-1832.
- [30] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015(1): 309-313.
- [31] Li, G., Khan, S., *et al.* (2018) Biochars Induced Modification of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soil and Its Impact on Mobility and Bioaccumulation of Arsenic and Cadmium. *Journal of Hazardous Materials*, **348**, 100-108.
- [32] Le, T.-H., Alassane-Kpembi, I., Oswald, I.P., *et al.* (2017) Analysis of the Interactions between Environmental and Food Contaminants, Cadmium and Deoxynivalenol, in Different Target Organs. *Science of the Total Environment*, **622-623**, 841-848.
- [33] 陈昱, 钱云, 梁媛, 等. 生物炭对 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.
- [34] 张华伟, 甄华杨, 岳士忠, 等. 水稻秸秆生物炭对污染土壤中镉生物有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1068-1074.
- [35] 周金波, 汪峰, 金树权, 等. 不同材料生物炭对镉污染土壤修复和青菜镉吸收的影响[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(9): 1559-1560.
- [36] Lu, H.P., Li, Z.A., Gascó, G., *et al.* (2018) Use of Magnetic Biochars for the Immobilization of Heavy Metals in a Multi-Contaminated Soil. *Science of the Total Environment*, **622-623**, 892-899.

- [37] Elnaggar, A., Shaheen, S.M., Ok, Y.S., *et al.* (2018) Biochar Affects the Dissolved and Colloidal Concentrations of Cd, Cu, Ni, and Zn and Their Phytoavailability and Potential Mobility in a Mining Soil under Dynamic Redox-Conditions. *Science of the Total Environment*, **624**, 1059-1071.
- [38] 田正, 李朝晖. 生物炭在土壤重金属镉污染治理中的应用分析[J]. 中国农业信息, 2017(10): 68-69.
- [39] 吴宝麟, 杨志辉, 柴立元, 等. 磷基及铁基钝化剂对 Pb、Cd、As 复合污染土壤的修复效果及其工艺条件优化[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 314-319.
- [40] 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 等. 磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤[J]. 环境科学, 2018, 39(1).
- [41] 姜洋, 罗远恒, 顾雪元. 农田土壤镉污染的原位钝化修复及持久性研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017, 53(2): 265-274.
- [42] Zhang, Z., Guo, G., Wang, M., *et al.* (2017) Enhanced Stabilization of Pb, Zn, and Cd in Contaminated Soils Using Oxalic Acid-Activated Phosphate Rocks. *Environmental Science & Pollution Research*, 1-8.
- [43] Peng, W., Li, X., Tong, L., *et al.* (2018) Biostabilization of Cadmium Contaminated Sediments Using Indigenous Sulfate Reducing Bacteria: Efficiency and Process. *Chemosphere*, **201**, 697.
- [44] 安毅夫, 杜蕾, 朱晓丽. 响应面优化微生物钝化 Cd 污染[J]. 化学工程, 2017, 45(9): 1-6.
- [45] Peng, W., Li, X., Song, J., *et al.* (2018) Bioremediation of Cadmium- and Zinc-Contaminated Soil Using Rhodobacter Sphaeroides. *Chemosphere*, **197**, 33.
- [46] 赵越, 姚俊, 王天齐, 等. 碳酸盐矿化菌的筛选与其吸附和矿化 Cd^{2+} 的特性[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3800-3806.
- [47] 卢明, 屠乃美, 胡华勇. 氯化铁和硫酸铁对酸性土壤中有效态镉和铅污染的修复作用[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 469-476.
- [48] Silva-Yumi, J., Escudey, M., Gacitua, M., *et al.* (2018) Kinetics, Adsorption and Desorption of Cd(II) and Cu(II) on Natural Allophane: Effect of Iron Oxide Coating. *Geoderma*, **319**, 70-79.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.038>
- [49] 刘小诗. 砷镉超标农田钝化剂的筛选及调控效应研究[D]: [硕士学位论文]. 中国农业科学院, 2015.
- [50] Shao, Z.J., Huang, X.L., Yang, F., *et al.* (2018) Engineering Sodium Alginate-Based Cross-Linked Beads with High Removal Ability of Toxic Metal Ions and Cationic Dyes. *Carbohydrate Polymers*, **187**, 85-93.
- [51] Ozfidankonakci, C., Yildiztugay, E., Bahtiyar, M., *et al.* (2018) The Humic Acid-Induced Changes in the Water Status, Chlorophyll Fluorescence and Antioxidant Defense Systems of Wheat Leaves with Cadmium Stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **155**, 66-75.
- [52] Yu, Y., Wan, Y., Camara, A.Y., *et al.* (2018) Effects of the Addition and Aging of Humic Acid-Based Amendments on the Solubility of Cd in Soil Solution and Its Accumulation in Rice. *Chemosphere*, **196**, 303-310.
- [53] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. 施加石灰降低不同母质土壤中镉毒性机理研究[J]. 农业环境科学学报, 1998(3): 101-103.
- [54] Zhang, X., Sun, C., Zhang, L., *et al.* (2018) Adsorption Studies of Cadmium onto Magnetic Fe_3O_4 @ FePO_4 and Its Preconcentration with Detection by Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry. *Talanta*, **181**, 352-358.
- [55] 熊雄, 李艳霞, 韩杰, 等. 堆肥腐殖质的形成和变化及其对重金属有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2137-2142.
- [56] 金睿, 刘可星, 艾绍英, 等. 生物炭复配调理剂对镉污染土壤性状和小白菜镉吸收及其生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(9): 1480-1487.
- [57] Wu, J., Huang, D., Liu, X., *et al.* (2018) Remediation of As(III) and Cd(II) Co-Contamination and Its Mechanism in Aqueous Systems by a Novel Calcium-Based Magnetic Biochar. *Journal of Hazardous Materials*, **348**, 10.
- [58] 姜成名. 不同生物质制备的生物炭及其在红壤铅镉稳定化中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [59] 黄崇玲. 不同铁氧化物对土壤镉有效性及水稻累积镉的影响[D]: [硕士学位论文]. 南宁市: 广西大学, 2013.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5507，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjas@hanspub.org