

陈泽雄, 朱凰榕, 周志军, 等. 改性蒙脱石修复镉污染对水稻根际土壤酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 528-533.

CHEN Ze-xiong, ZHU Huang-rong, ZHOU Zhi-jun, et al. Effects of functionalized montmorillonite on rhizospheric enzyme activities in Cd contaminated soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 528-533.

改性蒙脱石修复镉污染对水稻根际土壤酶活性的影响

陈泽雄¹, 朱凰榕², 周志军^{1*}, 赵秋香²

(1.广州市环境监测中心站, 广州 510006; 2.广东省地质实验测试中心, 广州 510080)

摘要:为探讨钝化修复重金属Cd污染土壤中改性蒙脱石的使用对水稻根际与非根际土壤Cd活性、酶活性等的影响,采用盆栽试验通过袋式根际箱装置种植水稻,并对土壤施加巯基-蒙脱石复合材料、蒙脱复合调理剂材料及巯基复合材料。结果表明:3种材料以0.5%的量施入后,糙米Cd浓度分别降低43.6%、25.9%和36.0%;Cd有效态浓度在根际土壤中分别降低55.3%、12.0%和35.2%,在非根际土壤中分别降低54.9%、9.76%和35.4%。蒙脱复合调理剂材料能提高土壤中过氧化氢酶、脲酶活性,巯基复合材料能提高土壤中脲酶活性,巯基-蒙脱石复合材料能提高非根际土壤中蔗糖酶活性。施加修复材料后,水稻根际土壤磷酸酶活性显著高于非根际土壤。研究表明,这3种改性蒙脱石钝化材料降低了Cd在根际土壤中的活性,有效地固定了土壤中的Cd,降低了水稻对镉的吸收,同时提高了土壤酶的活性,改善了Cd污染的水稻根际土壤环境质量。

关键词:土壤; 镉; 改性蒙脱石; 土壤酶活性

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)04-0528-06

doi: 10.13254/j.jare.2019.0269

Effects of functionalized montmorillonite on rhizospheric enzyme activities in Cd contaminated soil

CHEN Ze-xiong¹, ZHU Huang-rong², ZHOU Zhi-jun^{1*}, ZHAO Qiu-xiang²

(1. Guangzhou Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Research Center for Geoanalysis, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to clarify the effect of functionalized montmorillonite on the activity of Cd and rhizospheric enzyme activities in Cd contaminated paddy soil, pot experiments were conducted in the rhizosphere of rice with different application amounts of thiol-functionalized montmorillonite, montmorillonite complex conditioner and thiol-functionalized mixed material. Results showed that: when the addition dose of the functionalized montmorillonite respectively at 0.5%, comparing with the control, the cadmium content of the brown rice reduced 43.6%, 25.9%, 36.0%, the available cadmium content in the rhizosphere of rice reduced 55.3%, 12.0%, 35.2%, and the available cadmium content in the non-rhizosphere soil reduced 54.9%, 9.76%, 35.4%, respectively. The treatment of montmorillonite complex conditioner increased soil catalase and urease, the treatment of thiol-functionalized mixed material increased soil urease, and the treatment of thiol-functionalized montmorillonite increased soil sucrose. After Cd contaminated soil being added functionalized montmorillonite, the activity of phosphatase in rhizosphere of rice was significantly higher than that of non-rhizosphere soil. Hence, these materials reduced the activity of Cd in the soil and inhibited the uptake and accumulation of Cd by rice. At the same time, the activities of soil enzyme was increased. Accordingly, the soil environmental quality of Cd polluted rice rhizosphere was improved.

Keywords: soil; cadmium; functionalized montmorillonite; soil enzyme activities

土壤是人类赖以生存的自然资源。近年来,随着中国经济社会的快速发展,对资源的大量消耗和不合理开发利用给土壤生态环境带来了严重的影响。

2014年环境保护部和国土资源部公布的《全国土壤污染状况调查公报》^[1]指出,耕地土壤抽样超标率为19.4%,无机污染物超标点位占全部超标点位的

收稿日期:2019-04-22 录用日期:2019-05-22

作者简介:陈泽雄(1969—),男,广东普宁人,高级工程师,从事环境监测研究。E-mail:zzjzjycy@163.com

*通信作者:周志军 E-mail:914564526@qq.com

基金项目:广州市2016年污染防治新技术新工艺示范和应用项目

Project supported: Demonstration and Application Projects of New Technologies for Pollution Prevention and Control of Guangzhou in 2016

82.8%,其中镉点位超标率为7.0%。不同种类的作物对土壤中Cd的吸收及Cd在可食部分的积累存在较大差异,水稻被认为是Cd吸收能力最强的大宗谷类作物^[2]。有研究表明,土壤-品种交互作用可以使常规水稻对Cd的吸收累积达到严重安全风险程度^[3],而杂交稻、超级稻具有更高的Cd累积风险^[4]。

目前,原位修复中的土壤重金属钝化固定技术是一种行之有效且适合我国国情的重金属污染土壤治理方法^[5]。一些通过多种材料合成得到的钝化修复剂在修复重金属污染土壤中具有显著的钝化效果^[6]。膨润土具有较大的比表面积且对重金属有良好的吸附性能^[7],其主要成分蒙脱石是一种层状硅酸盐矿物,许多研究者在蒙脱石改性及其对重金属固定等方面做了大量研究工作,并取得了较好的成果^[8-9]。

土壤酶是土壤中一切生物化学过程的主要参与者,是生态系统物质循环和能量流动等过程中的生物活性物质^[10]。土壤酶主要来源于土壤微生物、动物和植物分泌物,与环境因子具有统一性,土壤肥力水平、土壤污染状况以及土壤对环境变化的响应都会影响土壤酶活性^[11]。在进行土壤重金属钝化固定修复时,土壤酶的活性会受到重金属和所添加钝化剂的影响。本研究在Cd污染土壤中采用根际箱装置种植水稻,利用改性钝化材料修复Cd污染土壤,探讨改性钝化材料钝化修复Cd污染土壤效果,及其对水稻根际与非根际土壤中酶活性的影响,以期改性钝化材料对水稻根际土壤环境质量的影

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试作物

水稻(*Oryza sativa*)品种为天优390,购于广东省金稻种业有限公司。

1.1.2 钝化材料

巯基-蒙脱石复合材料(QJ):天然钙基蒙脱石经酸活化,同时用水溶性溶剂将巯基试剂高度分散,再将处理好的巯基试剂加入酸化好的蒙脱石中,加热至80℃反应6h,制备出性能优良的巯基-蒙脱石复合材料^[12]。

蒙脱复合调理剂材料(MT):将粉煤灰、硅藻土、蒙脱石按一定比例混合均匀后,以生石灰为合成促进剂,经马弗炉350℃热复合反应3h,制备出蒙脱复合调理剂材料。

巯基复合材料(QH):将巯基-蒙脱石复合材料、膨润土、硅灰石按1:1:1混合均匀,得到巯基混合材料。

1.1.3 供试土壤

东莞某地农田取回的Cd污染表层土壤,自然风干磨细,过200目筛,备用。土壤基本理化性质见表1。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)^[13],所取土壤属于Cd轻度污染土壤。

1.2 试验设计

试验采用袋式根际箱装置(图1),每盆装入10kg供试土壤,分别添加QJ、MT和QH修复材料,修复材料添加量均为0.5%,每个处理做3组重复试验,同时设置不添加修复材料的空白对照(CK)。根际与非根际土壤之间用300目尼龙袋隔开。每盆种植1株水稻,每株水稻4棵苗。

1.3 样品采集与处理

水稻样品:稻谷晒干后脱壳,将糙米、谷壳分别用搅拌机粉碎;水稻茎叶用自来水洗净,再用蒸馏水漂洗3遍,晾干表面水分,切碎烘干后用搅拌机粉碎,贮存于封口袋中待测。

土壤样品:用竹制采样器分别于水稻根际土壤、非根际土壤中均匀分布的5个点位采集,采样深度为整个土层厚度。采集的土壤风干后,分别过20、200

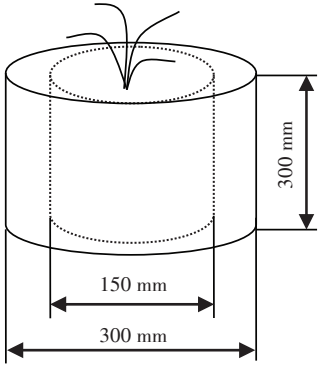


图1 袋式根际箱试验装置

Figure 1 Pot experiment device of rhizosphere box

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

镉 Cd/mg·kg ⁻¹	阳离子交换量 CEC/cmole·kg ⁻¹	pH	有机质 OM/g·kg ⁻¹	速效氮 Available N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹
0.551	12.4	6.38	25.6	87.5	293	103

目筛,贮存于封口袋中待测。

1.4 测定方法与数据分析

土壤的分析方法参考《土壤农化分析》^[14]:采用HF、HCl、HNO₃和HClO₄体积比为10:4:4:2的混合酸于250℃消解土样,以Rh作内标,采用NexION 300X型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定Cd浓度;采用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)浸提法测定土壤Cd有效态浓度(ICP-MS);采用玻璃电极法测定土壤pH(Sartorius PB-10型pH计);采用氯化钡法测定阳离子交换量(Optima 8000型电感耦合等离子体发射光谱仪,ICP-OES);采用重铬酸钾-外加加热法测定有机物浓度;采用碱解扩散法测定碱解氮浓度;采用0.05 mol·L⁻¹ HCl、0.025 mol·L⁻¹ H₂SO₄浸提法测定有效磷浓度(Spectrumb S22PC可见分光光度计);采用醋酸铵浸提法测定速效钾浓度(Optima 8000型ICP-OES)。

水稻样品经微波消解后,采用ICP-MS测定样品中Cd浓度。

磷酸酶、蔗糖酶、脲酶活性测定参照《土壤酶及其研究法》^[15];过氧化氢酶活性采用紫外分光光度法测定^[16]。

数据处理采用Excel和SAS 9.0分析软件,SAS软件中多重比较显著性分析基于0.05水平。

2 结果与分析

2.1 修复材料对水稻吸收Cd的影响

不同修复材料对水稻吸收Cd的影响见图2。从图2可以看出,污染土壤在QJ、MT和QH修复材料处理下,与空白对照组CK相比,糙米中Cd浓度(以干质量计,下同)分别降低了43.6%、25.9%和36.0%,低于《食品安全国家标准》(GB 2762—2012)中Cd限值(0.2 mg·kg⁻¹);谷壳中Cd浓度分别降低了53.7%、53.7%和57.7%;茎叶中Cd浓度分别降低了52.0%、33.8%和50.9%。3种修复材料均能有效钝化修复土壤中Cd污染,且修复效果为QJ>QH>MT。

2.2 修复材料对土壤Cd有效态浓度的影响

修复材料对土壤Cd有效态浓度的影响见图3。从图3可以看出,与CK相比,添加QJ、MT和QH修复材料后土壤Cd有效态浓度均有不同程度的降低,水稻根际土壤中Cd有效态浓度分别降低了55.3%、12.0%和35.2%;非根际土壤中Cd有效态浓度分别降低了54.9%、9.76%和35.4%。其中,QJ修复材料处理后土壤Cd有效态浓度降低最为显著。水稻根际土壤

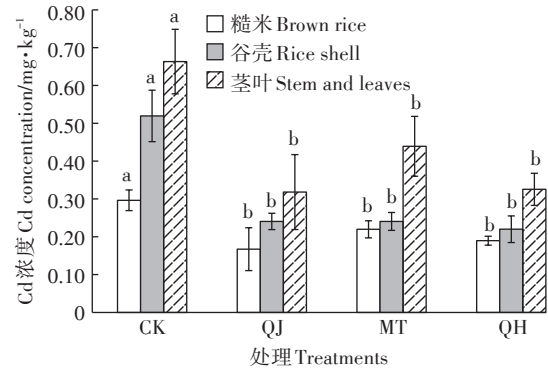


图2 不同修复材料对水稻植株吸收Cd的影响
Figure 2 The effect of the functionalized montmorillonite on cadmium accumulation by the rice

中Cd有效态浓度均低于非根际土壤。综上,3种修复材料均能有效钝化修复土壤中Cd污染,且修复效果为QJ>QH>MT。

2.3 修复材料对土壤酶活性的影响

2.3.1 土壤过氧化氢酶

过氧化氢酶广泛存在于土壤和生物体内。过氧化氢可以氧化蛋白质分子中的巯基(-SH)而损害细胞,土壤中的过氧化氢酶能催化过氧化氢(H₂O₂)分解成氧气和水,可防止过氧化氢对生物体的毒害作用。对根际与非根际土壤分别进行过氧化氢酶活性测定,试验结果见图4。从图4可以看出,只有MT修复材料处理下根际与非根际土壤中分解的过氧化氢浓度均高于CK,分别提高了12.1%和19.6%,说明MT修复材料增强了过氧化氢酶活性。QJ和QH修复材料处理下根际与非根际土壤中分解的过氧化氢浓度与CK无显著差异。此外,根际土壤中分解的过氧化氢浓度均高于非根际土壤,说明水稻根系能提高过氧化氢酶活性。

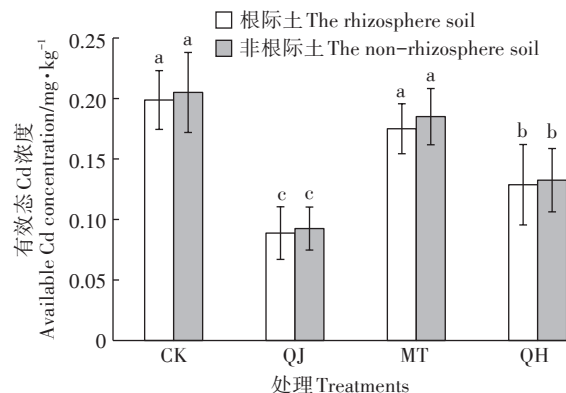


图3 修复材料对土壤Cd有效态浓度的影响
Figure 3 The effect of the functionalized montmorillonite on the available cadmium content in the soil

2.3.2 土壤脲酶

脲酶广泛存在于土壤中,土壤脲酶能酶促尿素生产氨、二氧化碳和水,氨是植物氮源之一。尿素氮肥水解与脲酶密切相关。对根际与非根际土壤分别进行脲酶活性测定,试验结果见图5。从图5可以看出,只有MT修复材料处理下根际土壤中分解产生的氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度显著高于CK,增幅为37.1%,其他处理下根际与非根际土壤中分解产生的氨氮浓度均与CK无显著差异。

2.3.3 土壤蔗糖酶

蔗糖酶催化蔗糖水解为D-葡萄糖和D-果糖,广泛存在于微生物、动物和植物体内,其对增加土壤中易溶性营养物质起着重要的作用。对根际与非根际土壤分别进行蔗糖酶活性测定,试验结果见图6。从图6可以看出,根际土壤中添加修复材料处理后,土壤中分解产生的葡萄糖浓度与CK均无显著差异;在非根际土壤中,QJ修复材料处理下分解产生的葡萄糖浓度显著高于CK,增幅为84.0%,而MT和QH修复材料对土壤中蔗糖酶活性无显著影响。

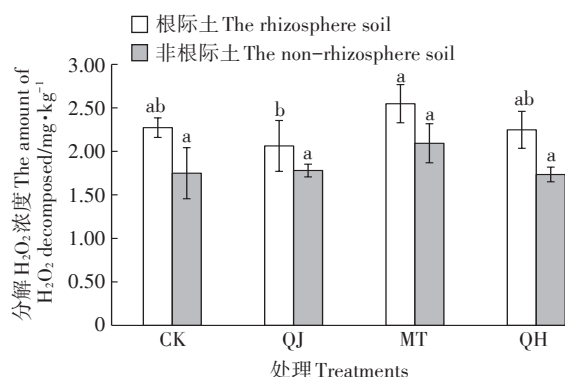


图4 修复材料对土壤过氧化氢酶活性的影响

Figure 4 The effect of the functionalized montmorillonite on the soil catalase

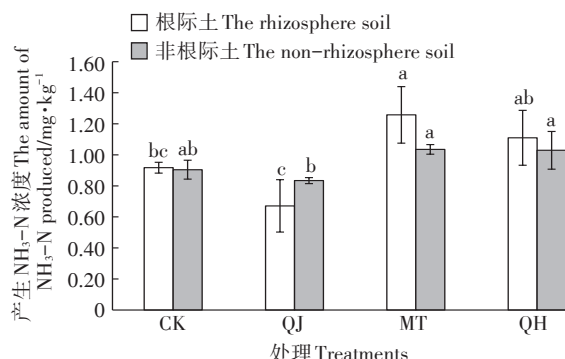


图5 修复材料对土壤脲酶活性的影响

Figure 5 The effect of the functionalized montmorillonite on the soil urease

2.3.4 土壤磷酸酶

土壤磷酸酶包括酸性、碱性和中性磷酸酶,它们在不同pH介质条件下水解磷酸一酯(甘油磷酸酯、糖磷酸酯等)生成正磷酸盐。磷酸酶对土壤磷的有效性具有重要作用。对根际与非根际土壤分别进行磷酸酶活性测定,试验结果见图7。从图7可以看出,在水稻根际与非根际土壤环境下,添加修复材料处理后,土壤中分解产生的酚浓度与CK均无显著差异,说明修复材料对土壤磷酸酶无显著影响。此外,在添加修复材料后,根际土壤中分解产生的酚浓度均高于非根际土壤,说明修复材料对污染土壤进行解毒修复后水稻根系能提高磷酸酶活性。

3 讨论

有研究表明,QJ修复材料能增加土壤中的胶体总量^[9],土壤对Cd的吸附作用除了静电吸附、离子交换吸附和羟基配位吸附外,还存在巯基配位吸附,反应机理见图8和图9^[17]。QJ修复材料将土壤中的Cd由活性较强的活性态转化为较稳定的专性结合态,

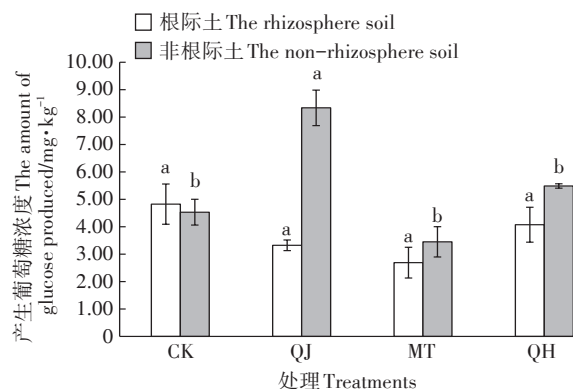


图6 修复材料对土壤蔗糖酶活性的影响

Figure 6 The effect of the functionalized montmorillonite on the soil sucrose

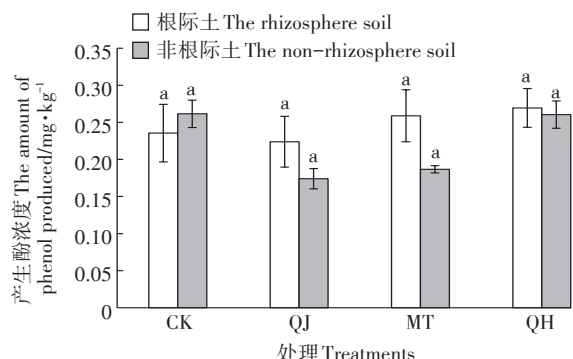
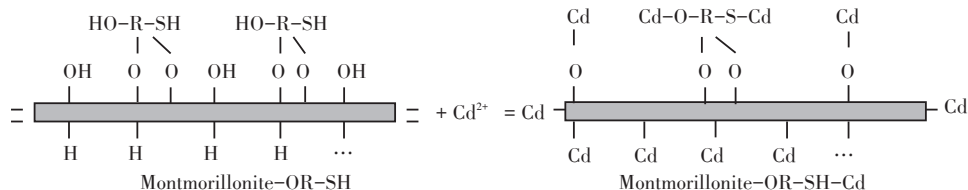
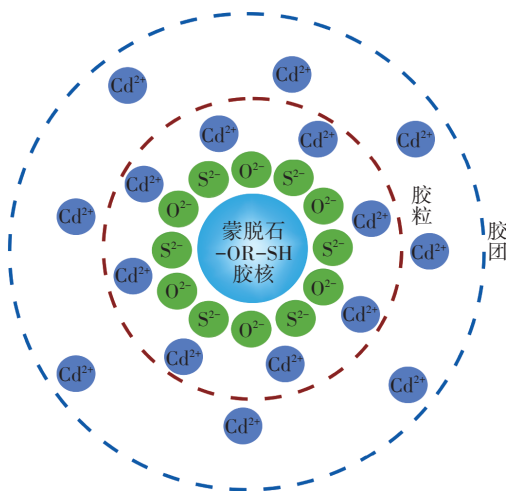


图7 修复材料对土壤磷酸酶活性的影响

Figure 7 The effect of the functionalized montmorillonite on the soil phosphatase

图8 巯基-蒙脱石复合材料与土壤中 Cd^{2+} 的反应机理示意^[17]Figure 8 Schematic diagram of reactions between thiol-functionalized montmorillonite and Cd^{2+} ^[17]图9 巯基-蒙脱石复合材料胶体与土壤中 Cd^{2+} 的主要作用示意^[17]Figure 9 Schematic diagram of the action between thiol-functionalized montmorillonite and Cd^{2+} ^[17]

从而使植物可利用态的Cd浓度降低。本研究表明,修复材料能有效钝化土壤中的Cd,显著降低水稻植株对土壤Cd的吸收,这与朱凰榕等^[18]的研究结果相一致。

修复材料在钝化重金属的同时,也可能会对土壤酶活性产生影响。李江遐等^[19]研究表明,氨基酸生态肥、饼肥、鸡粪肥、钙镁磷肥改良剂可不同程度提高土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶和脱氢酶活性。尚艺婕等^[20]通过研究不同量的生物质炭与重金属Cd共同作用下水稻根际及非根际土壤碳循环酶和氧化还原酶活性的变化得出,施入10%生物质炭时,不同浓度的Cd添加下水稻根际及非根际土壤的酶活性均最高。黎秋君^[21]研究不同钝化剂对土壤酶活性的影响表明:蚕沙及其复合材料钝化处理对土壤脲酶活性起到显著激活作用;单施椰糠钝化剂使得土壤蔗糖酶活性恢复得最好;土壤过氧化氢酶活性在钝化剂的钝化修复下均有明显提高。本研究中,在Cd污染土壤中施加0.5%蒙脱复合调理剂材料后,土壤中过氧化氢酶、脲酶活性均明显提高,施加0.5%巯基复合材料能有效提高土壤中脲酶活性。

根际与非根际土壤在物理、化学、生物学性质等方面存在极大差异,会影响根际土壤重金属的存在形态、分布、迁移和生物有效性^[22],并影响土壤酶活性^[23]。研究表明,根际土壤磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、水解酶的活性较非根际土壤均有增强^[24],水稻根际土壤酶活性普遍高于非根际土壤^[20]。本研究表明,无论污染土壤中是否添加钝化修复材料,水稻根际土壤中Cd有效态浓度均明显低于非根际土壤,且在不添加修复材料的空白对照处理下,水稻根际土壤中过氧化氢酶活性高于非根际土壤。

4 结论

(1)3种改性蒙脱石修复材料能显著降低水稻植株对土壤Cd的吸收,亦能降低土壤Cd有效态浓度。3种材料修复效果为 $\text{QJ} > \text{QH} > \text{MT}$ 。

(2)MT修复材料能有效提高土壤中过氧化氢酶、脲酶活性,QH修复材料能有效提高土壤中脲酶活性,QJ修复材料能有效提高非根际土壤中蔗糖酶活性。

(3)修复材料可有效降低土壤重金属Cd的活性,对污染土壤进行解毒修复后,根际土壤磷酸酶活性高于非根际土壤。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm. Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Report on the national general survey of soil contamination[EB/OL]. (2014-04-17). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [2] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biomaterials*, 2004, 17: 549-553.
- [3] 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: 165-173.
- [4] 龚伟群,李恋卿,潘根兴.杂交水稻对Cd的吸收与籽粒积累:土壤

- 和品种交互影响[J]. 环境科学, 2006, 27(8):1647-1653.
- GONG Wei-qun, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. Cd uptake and accumulation in grains by hybrid rice in two paddy soils: Interactive effect of soil type and cultivars[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(8):1647-1653.
- [5] 袁兴超, 李 博, 朱仁凤, 等. 不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4):807-817.
- YUAN Xing-chao, LI Bo, ZHU Ren-feng, et al. Immobilization of Cd and Pb using different amendments of cultivated soils around lead-zinc mines[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4):807-817.
- [6] Madrid F, Diaz-Barrientos E, Florido M C. Inorganic amendments to decrease metal availability in soils of recreational urban areas: Limitations to their efficiency and possible drawbacks[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, 192:117-125.
- [7] Yuan P, Fan M D, Yang D, et al. Montmorillonite-supported magnetite nanoparticles for the removal of hexavalent chromium[Cr(VI)] from aqueous solutions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 166:821-829.
- [8] 蒋婷婷. 不同改性蒙脱土的制备及其对土壤中重金属的稳定化作用研究[D]. 上海:华东理工大学, 2016.
- JIANG Ting-ting. Synthesis of differently modified montmorillonites and application in stabilization of soil heavy metals[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016.
- [9] 刘 慧. 巯基化蒙脱石的制备及其对镉的吸附/解吸机理研究[D]. 成都:成都理工大学, 2013.
- LIU Hui. Preparation of thiol-modified montmorillonite and mechanism study of cadmium(II) adsorption/desorption[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [10] Zornoza R, Guerrero C, Mataix-Solera J, et al. Assessing air-drying and rewetting pretreatment effect on some soil enzyme activities under Mediterranean conditions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38:2125-2134.
- [11] Trasar-Cepeda C, Leir S M C, Seoand S, et al. Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution[J]. *Soil Biol and Biochem*, 2000, 32:1867-1875.
- [12] 刘文华, 冯 超, 赵秋香, 等. 一种治理土壤重金属污染的巯基-蒙脱石复合体材料及其制备方法:201210139593.0[P]. 2014-12-03.
- LIU Wen-hua, FENG Chao, ZHAO Qiu-xiang, et al. A thiol-montmorillonite composite material for controlling soil heavy metal pollution and its preparation method:201210139593.0[P]. 2014-12-03.
- [13] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 GB 15618—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality: Risk control standard for soil contamination of agricultural land GB 15618—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Analysis of agrochemical soil[M]. Third Edition. Beijing: China Agricultural Press. 2000.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986:274-340.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986:274-340.
- [16] 杨兰芳, 曾 巧, 李海波, 等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, 42(1):207-210.
- YANG Lan-fang, ZENG Qiao, LI Hai-bo, et al. Measurement of catalase activity in soil by ultraviolet spectrophotometry[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1):207-210.
- [17] 曾燕君, 周志军, 赵秋香. 蒙脱石-OR-SH复合体材料对土壤镉的钝化及机制[J]. 环境科学, 2015, 36(6):2314-2319.
- ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang. Mechanism study of the smectite-OR-SH compound for reducing cadmium uptake by plants in contaminated soils[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(6):2314-2319.
- [18] 朱凤榕, 陈亚刚, 李媛媛, 等. 改性膨润土钝化土壤Cd对不同水稻品种安全生产研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(16):96-99.
- ZHU Huang-rong, CHEN Ya-gang, LI Yuan-yuan, et al. Study on thiol-functionalized bentonite for reducing cadmium uptake by rice in contaminated soils[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(16):96-99.
- [19] 李江遐, 关 强, 黄伏森, 等. 不同改良剂对矿区土壤重金属有效性及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6):211-215.
- LI Jiang-xia, GUAN Qiang, HUANG Fu-sen, et al. Impacts of different amendments of availability of heavy metals and soil enzyme activity in mining area soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6):211-215.
- [20] 尚艺婕, 张 秀, 王海波, 等. 秸秆生物炭对镉污染水稻土根际酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8):1532-1540.
- SHANG Yi-jie, ZHANG Xiu, WANG Hai-bo, et al. Effects of straw biochar on rhizospheric enzyme activities in Cd contaminated paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1532-1540.
- [21] 黎秋君. 铅锌复合污染土壤的钝化修复与土壤酶活性研究[D]. 南宁:广西大学, 2015.
- LI Qiu-jun. Study on immobilization remediation and soil enzyme activities of lead-zinc mine tailings[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [22] 方雅瑜, 邹慧玲, 尹晓辉, 等. 赤泥和有机肥对镉、铅在水稻中吸收分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5):466-476.
- FANG Ya-yu, ZOU Hui-ling, YIN Xiao-hui, et al. Effects of red-mud and organic fertilizer on cadmium and lead absorption and distribution in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5):466-476.
- [23] 高秀丽, 邢维芹, 冉永亮, 等. 重金属积累对土壤酶活性的影响[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(3):331-336.
- GAO Xiu-li, XING Wei-qin, RAN Yong-liang, et al. Effects of accumulation of heavy metals in soils on enzyme activities[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(3):331-336.
- [24] 刘 姣, 曹 靖, 南忠仁, 等. 白银市郊区重金属复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(5):38-42.
- LIU Jiao, CAO Jing, NAN Zhong-ren, et al. Impact of heavy metal combined pollution on soil enzyme activity in Baiyin region, Gansu Province[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2010, 46(5):38-42.