

不同生育期施加超细磷矿粉对水稻吸收和转运Pb、Cd的影响

张青, 王煌平, 孔庆波, 栗方亮, 罗涛

引用本文:

张青, 王煌平, 孔庆波, 等. 不同生育期施加超细磷矿粉对水稻吸收和转运Pb、Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 45-54.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0607>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究

殷飞, 王海娟, 李燕燕, 李勤椿, 和淑娟, 王宏镔

农业环境科学学报. 2015(3): 438-448 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.005>

钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 563-572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>

水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响

张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 官迪, 彭华, 朱坚, 田发祥

农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1867-1872 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0432>

硅酸钠对重金属污染土壤性质和水稻吸收 Cd Pb Zn 的影响

赵明柳, 唐守寅, 董海霞, 李荭荭, 吴竹麟, 黄俊星, 王果

农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1653-1659 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0288>

坡缕石钝化与喷施叶面硅肥联合对水稻吸收累积镉效应影响研究

徐奕, 李剑睿, 黄青青, 梁学峰, 彭亮, 徐应明

农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1633-1641 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0838>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张青, 王煌平, 孔庆波, 等. 不同生育期施加超细磷矿粉对水稻吸收和转运 Pb、Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 45–54.

ZHANG Qing, WANG Huang-ping, KONG Qing-bo, et al. Effects of superfine phosphate rock powders on Pb and Cd uptake and transportation in rice at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 45–54.

不同生育期施加超细磷矿粉对水稻吸收和转运 Pb、Cd 的影响

张青¹, 王煌平¹, 孔庆波¹, 栗方亮¹, 罗涛^{2*}

(1. 福建省农业科学院土壤肥料研究所/福建省地力培育工程技术研究中心, 福州 350013; 2. 福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013)

摘要:为了探究水稻不同生育期施加超细磷矿粉(100 nm)对 Pb–Cd 污染土壤 Pb、Cd 吸收和转运的影响,采用盆栽试验,研究了插秧前、分蘖期和扬花期施加不同用量的超细磷矿粉对水稻稻谷产量,植株 Pb、Cd 的吸收转运及对土壤中 Pb、Cd 形态的影响。结果表明,不同生育期施加超细磷矿粉的水稻稻谷产量增加了 9.70%~26.60%,显著高于对照和普通磷矿粉处理。水稻根、茎叶、稻壳和稻米中 Pb、Cd 含量均随超细磷矿粉用量的增加而降低。插秧前施加超细磷矿粉稻米中 Pb 含量显著低于对照(75.7%~79.1%)和普通磷矿粉处理(73.5%~77.3%),降低效果好于分蘖期(51.4%~69.1%)和扬花期(51.9%~61.5%);而扬花期施加稻米中 Cd 含量显著低于对照处理(44.3%~71.9%)和普通磷矿粉处理(44.1%~71.8%),降低效果好于插秧前(32.7%~45.8%)和分蘖期(28.2%~39.9%)。施加超细磷矿粉后稻米中 Pb、Cd 含量大部分低于国家食品的限量卫生标准 GB 2762—2017($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。扬花期施加超细磷矿粉降低土壤交换态 Cd 的效果(16.8%~33.4%)好于插秧前(18.0%~27.8%)和分蘖期(11.8%~27.9%),插秧前施加超细磷矿粉降低土壤交换态 Pb 的效果(143.8%~193.3%)好于分蘖期(103.2%~183.4%)和扬花期(56.0%~160.6%)。土壤中交换态 Cd、Pb 含量与稻米中 Cd、Pb 含量呈显著正相关,相关系数分别达 0.856 和 0.946。水稻 Cd、Pb 的吸收系数和初级转运系数均随超细磷矿粉用量的增加而降低,与对照差异显著。因此,超细磷矿粉可通过钝化土壤中交换态 Pb、Cd,降低水稻对 Pb、Cd 的吸收转运,并提高稻谷产量。建议超细磷矿粉用量为 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,单独 Pb 污染或 Cd 污染的土壤可分别在种植前或生长旺期施用,而复合污染的土壤在种植前施用综合效果较佳且操作方便。

关键词:水稻;生育期;超细磷矿粉;铅;镉

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)01-0045-10 doi:10.11654/jaes.2019-0607

Effects of superfine phosphate rock powders on Pb and Cd uptake and transportation in rice at different growth stages

ZHANG Qing¹, WANG Huang-ping¹, KONG Qing-bo¹, LI Fang-liang¹, LUO Tao^{2*}

(1. Institute of Soil and Fertilizer/Land Cultivation Engineering Technology Research Center, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2. Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: This study investigates the effects of the application of superfine phosphate rock powders (SPRP) on the absorption and transfer of lead (Pb) and cadmium (Cd) in soils contaminated with these elements during different growth periods of rice. Pot experiments were car-

收稿日期:2019-05-30 录用日期:2019-09-26

作者简介:张青(1977—),女,山东齐河人,硕士,助理研究员,主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:zhangqing202@163.com

*通信作者:罗涛 E-mail:luotao@fjz@188.com

基金项目:福建省科技重大专项(2017NZ0001-4);福建省省属公益类科研院所基本科研专项(2017R1022-1);福建省农业科学院科技创新团队项目(STIT2017-2-10);福建省自然科学基金项目(2018J01057)

Project supported: The Special Found for Key Program of Science and Technology of Fujian Province, China(2017NZ0001-4); Special Funds Projects for Basic Scientific Research of Public Welfare in Fujian Province(2017R1022-1); Science and Technology Innovation Team Project of Fujian Academy of Agricultural Sciences(STIT2017-2-10); The Natural Science Foundation of Fujian Province(2018J01057)

ried out to analyze the effects of i) different amount of SPRP on rice yields, ii) the absorption and transportation of Pb and Cd in plants, and iii) the forms of Pb and Cd in soils, when SPRP were applied at the pre-transplanting, tillering, and flowering stages of rice. The results showed that the yields of rice increased by between 9.70% to 26.60% with SPRP application, which were significantly higher than of rice yields with unground powders or without powder treatment. The concentrations of Pb and Cd decreased with increased levels of SPRP in all parts of the rice, including the root, stem, hull, and grain. When SPRP were applied at the pre-transplanting stage, the Pb concentrations of rice grains were between 75.7% to 79.1% lower than of those without any powder, and from between 73.5% to 77.3% lower than of those treated with unground powder. The reduction effects of grain Pb concentrations were better than of those at the tillering stage (55.4%~69.1%) and flowering stage (55.9%~61.5%). The application of SPRP at the flowering stage resulted in the grain Cd concentrations being between 44.3%~71.9% and 44.1%~71.8% lower than of those in the control and unground treatments, respectively. The reduction effects at the flowering stage were better than of those at the pre-transplanting stage (33.0%~45.8%) and tillering stage (28.6%~39.9%). With the application of superfine powders, the Pb and Cd concentrations in grain were mostly lower than the limit of $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ defined in the National Food Health Standard (GB 2762—2017). The application stage of SPRP also had a notable influence on exchangeable heavy metals in soils. The concentrations of soil exchangeable Cd were decreased by between 16.8% to 33.4% at flowering stage, which were better than of those at the pre-transplanting stage (18.0%~27.8%) and tillering stage (11.8%~27.9%). Meanwhile, the reductions in concentrations of soil exchangeable Pb ranged from 143.8% to 193.3% at the pre-transplanting stage, which was better than of those at the tillering stage (103.2%~183.4%) and flowering stage (56.0%~160.6%). The concentrations of exchangeable Cd and Pb in soils were positively correlated with their concentrations in rice grains, with correlation coefficients of 0.856 and 0.946, respectively. The absorption and primary transport coefficients of Cd and Pb decreased with increased dosage of SPRP, and were significantly different from those in the control. Therefore, the application of SPRP led to the passivation of the concentrations of exchangeable Pb and Cd in contaminated soils, a gradual reduction in the uptake and transport of heavy metals by rice, and an increase in rice yields. We conclude that the suggested optimum amount of SPRP is $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ of polluted soils, which can be applied to soils polluted by Pb or Cd at pre-planting stage or growth boom stage, respectively. For complex soil pollution, we suggest that it is better to apply SPRP before planting in order to achieve improved comprehensive effects and easy operation.

Keywords: rice; growth period; superfine phosphate rock powder; lead; cadmium

土壤重金属污染引起的农产品质量安全问题越来越引起社会广泛关注,通过降低农田重金属的生物有效性来达到降低农产品中重金属浓度的方法简便易行。水稻是最主要的粮食作物之一^[1],我国水稻产量占粮食总产量的一半以上。但水稻被认为是吸收Cd、Pb能力最强的大宗作物之一^[2],稻米中Cd和Pb超标率分别达到28.4%和10.3%,是超标最为严重的两种重金属^[3]。研究表明,Cd在土壤中迁移性强且毒性高,被钝化剂吸附固定后容易解吸重新进入土壤,Pb在土壤中移动性较弱,被钝化剂固定后不容易释放。水稻不同生育期对水分、营养元素和重金属元素的吸收都不同,对不同生育期水稻的Cd、Pb吸收累积特征的研究结果也不尽一致^[4-5]。针对Cd、Pb污染的土壤,根据水稻不同生育期的吸收特性,选择在水稻养分吸收旺期之前的合适时间加入钝化剂,就可能尽量降低土壤中Cd、Pb有效性,达到降低水稻吸收及向籽粒运输的目的。

磷矿粉是一种磷酸盐重金属钝化剂,既能固定重金属,又可以提供植物生长所需的磷素^[6],磷矿粉钝化土壤重金属的研究开展较多^[7-11],主要通过磷矿粉

所含的钙在一定程度上能与重金属产生拮抗作用,以及磷矿粉释放出的磷酸根与重金属形成难溶的磷酸盐沉淀,从而降低土壤中重金属的有效态含量^[12]。但普通磷矿粉由于活性较低,钝化土壤重金属的效果不是很明显,因此有研究者用草酸来活化磷矿粉并取得了一定的效果^[8-9],将磷矿粉加工成超细颗粒用于修复土壤重金属污染的研究较少^[7,13],在水稻不同生育期施加超细磷矿粉对土壤重金属的影响未见报道。以往的研究大多将钝化剂在播前一次性施入,但在水稻不同生育期施入钝化剂对Cd、Pb吸收的影响并不一定相同。因此,研究在水稻不同生育期施加钝化剂对Cd、Pb的吸收转运规律,对有效降低水稻籽粒中的重金属累积,保障粮食安全生产具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自福建省福州市闽侯县白沙镇溪头村农业部福建耕地保育科学观察实验站(东经 $119^{\circ}04'52''$,北纬 $26^{\circ}12'33''$),中亚热带气候区,年均温 19.5°C ,年均降雨量 $1\,350.9 \text{ mm}$ 。土壤类型为黄泥

土,土壤基本理化性质为:碱解氮 $117.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $9.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $86.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $16.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 4.96,总Pb $5.869 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总Cd $0.077 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试水稻品种为新占优。

磷矿粉购自贵州宏福实业开发总公司,超细磷矿粉于秦皇岛市太极环纳米制品有限公司磨制而成,普通磷矿粉粒径为 $2 \times 10^{-4} \text{ m}$,超细磷矿粉粒径为 $1 \times 10^{-7} \text{ m}$,普通磷矿粉全磷含量 27.8%,有效磷 3.76%,pH 8.85,总Pb $2.658 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总Cd $0.045 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验设 11 个处理:(1)CK(对照,不加磷矿粉);(2)CK1(插秧前,施普通磷矿粉 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土);(3)P1(插秧前,施超细磷矿粉 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土);(4)P2(插秧前,施超细磷矿粉 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土);(5)P3(插秧前,施超细磷矿粉 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土);(6)T1(分蘖期,施超细磷矿粉 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土);(7)T2(分蘖期,施超细磷矿粉 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土);(8)T3(分蘖期,施超细磷矿粉 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土);(9)F1(扬花期,施超细磷矿粉 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土);(10)F2(扬花期,施超细磷矿粉 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土);(11)F3(扬花期,施超细磷矿粉 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土)。每个处理重复 4 次,随机排列,试验在福建省农业科学院土壤肥料研究所网室内进行。

试验盆钵为 $20 \text{ cm} \times 19.5 \text{ cm}$ 的聚乙烯桶,每盆装土 6 kg。重金属 Cd 和 Pb 以硝酸镉和硝酸铅的形式加入,Cd 添加量为 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,Pb 添加量为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,以溶液的形式均匀喷入,边喷边搅拌,混合均匀,然后加入尿素 $0.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土、过磷酸钙 $0.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土、氯化钾 $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,充分搅拌均匀,加纯水至淹水,放置 20 d。于 2017 年 8 月 3 日插秧(秧龄 35 d),每盆插 3 株。插秧前、分蘖期和扬花期施加超细磷矿粉的时间为秧龄 35、70 d 和 105 d,分蘖期追施尿素 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土。分蘖期和扬花期施加超细磷矿粉时,将磷矿粉先与少量的土壤充分混匀,然后均匀撒入水稻周围,用木片搅动稻根以外的泥浆,使磷矿粉尽量与泥浆充分混匀,其他没有施加磷矿粉的处理也同样用木片充分搅动。浇灌纯水保持水稻处于淹水状态,收割前 10 d 进行晒田。11 月 18 日收获水稻地上部与地下部,纯水洗净,晾干,于烘箱中 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min,然后 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,测定其干质量,并磨碎备用;土壤经风干磨碎备用。

1.3 测试指标及方法

土壤 pH 采用酸度计(pHs-3C)测定,土水比值为 1:5;有机质含量采用水合热重铬酸钾氧化-容量法;植株 Cd、Pb 用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 微波消解法、土壤用 $\text{HNO}_3\text{-}$

HF 微波消解法(CEM MARS),Cd、Pb 用石墨炉原子吸收分光光度计(PinAAcle 900Z)测定;重金属形态采用 Tessier^[14]连续提取法;速效磷测定采用钼锑抗比色法^[15]。

1.4 重金属的吸收系数和转运系数

吸收系数(RAI)和转运系数(TI)值用以表征水稻富集和转运重金属的能力^[16]。根系吸收系数(RAI)为根系中重金属浓度与土壤重金属浓度之比;初级转运系数(PTI)为茎叶中重金属浓度与根系中重金属浓度之比;次级转运系数(STI)为籽粒中重金属浓度与茎叶中重金属浓度之比,反映作物由营养器官向生殖器官转运重金属的能力^[17-18]。RAI 值越高代表植物吸收重金属能力越强,TI 值越高代表植物根系吸收的重金属转运到地上部分的能力越强。

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行数据分析,用 Duncan 新复极差法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同生育期施加超细磷矿粉对水稻长势和产量的影响

水稻不同生育期施加不同用量的超细磷矿粉均能增加水稻的株高,与对照和普通磷矿粉处理差异显著,比对照增加 11.59%~19.27%,但各处理之间无显著差异,插秧前处理稍高于其他处理(表 1)。施加超细磷矿粉后水稻稻秆产量、稻谷产量和千粒重均有不同程度的增加,比对照分别增加 7.36%~31.38%、9.70%~26.60% 和 6.31%~26.34%,并且随超细磷矿粉用量的增加而升高,不同时期高用量超细磷矿粉处理(P3、T3、F3)与 CK 和 CK1 处理差异均达显著差异。不同时期相同用量的超细磷矿粉处理(P1、T1 和 F1, P2、T2 和 F2, P3、T3 和 F3)其水稻株高、稻秆产量、稻谷产量和千粒重均以插秧前施用稍高于分蘖期和扬花期施用,但差异均不显著。

2.2 不同生育期施加超细磷矿粉对水稻各部位吸收 Cd、Pb 的影响

由表 2 可知,水稻各部位 Cd、Pb 含量的分布均为根>茎叶>壳>米。在水稻同一生育期加入超细磷矿粉后,水稻各部位重金属 Cd、Pb 含量有随着磷矿粉用量的增加而降低的趋势,与对照和普通磷矿粉处理差异均显著;普通磷矿粉处理水稻各部位 Cd、Pb 含量稍低于对照,与对照差异不显著。

稻米中 Cd、Pb 含量随超细磷矿粉用量的增加而

表1 不同生育期施加超细磷矿粉水稻的长势和产量

Table 1 Growth and yield of rice with superfine phosphate rocks at different growth stages

处理 Treatments	株高 Height/cm	稻秆产量 Straw biomass/g·pot ⁻¹	稻谷产量 Grain yield/g·pot ⁻¹	千粒重 1000-seed weight/g·1000粒 ⁻¹
CK	68.33±5.36b	18.07±1.36c	21.13±0.74c	17.92±1.16c
CK1	70.41±6.97b	18.54±2.47c	21.35±2.13c	18.05±1.00c
P1	79.00±4.06a	20.82±3.68ab	25.01±1.86ab	19.45±0.99c
P2	80.75±5.95a	22.06±2.59a	25.69±1.32ab	20.24±1.44bc
P3	81.50±6.57a	23.74±3.69a	26.75±2.70a	22.64±1.16a
T1	77.50±6.35a	19.93±0.98b	24.01±1.85abc	19.02±1.04c
T2	78.40±5.57a	20.27±3.02ab	24.14±1.70abc	19.95±0.88bc
T3	79.80±5.81a	21.36±1.81ab	25.22±1.44ab	21.96±1.28ab
F1	76.25±6.71a	19.40±1.03b	23.18±1.36bc	19.05±1.40c
F2	78.00±5.69a	19.55±1.54b	23.41±1.47bc	20.06±1.33bc
F3	79.75±6.02a	22.48±3.18a	24.99±1.27ab	22.12±1.72ab

注:同列中不同小写字母代表处理之间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different letters after each column of date indicate that there is significantly different at the 0.05 level. The same as below.

表2 不同生育期施加超细磷矿粉对水稻各部位吸收Cd、Pb的影响(mg·kg⁻¹)Table 2 Effects of superfine phosphate rocks on the uptake of Cd and Pb in rice at different growth stages(mg·kg⁻¹)

处理 Treatments	Cd				Pb			
	稻米 Rice	稻壳 Hull	茎叶 Straw	根 Root	稻米 Rice	稻壳 Hull	茎叶 Straw	根 Root
CK	0.203±0.031a	0.252±0.026a	1.683±0.268a	7.06±1.25a	0.460±0.051a	2.606±0.314a	51.41±4.67a	941.0±85.3a
CK1	0.202±0.018a	0.247±0.031a	1.562±0.302a	6.90±0.86a	0.422±0.036a	2.256±0.254a	47.62±5.22a	846.0±56.9a
P1	0.136±0.025b	0.149±0.024b	0.877±0.103b	5.71±0.68abc	0.112±0.009c	0.448±0.062c	6.10±1.02b	562.6±68.2bc
P2	0.121±0.016bc	0.127±0.009bc	0.836±0.098b	5.25±1.04abc	0.109±0.008c	0.433±0.051c	3.53±0.62b	468.9±51.3bcd
P3	0.110±0.008c	0.109±0.008c	0.738±0.067bc	4.96±0.68bc	0.096±0.005c	0.308±0.035c	3.01±0.29b	408.7±78.6d
T1	0.145±0.021b	0.140±0.021b	0.997±0.096b	6.43±0.99ab	0.205±0.012b	0.587±0.047bc	6.55±0.75b	478.7±100.3bcd
T2	0.123±0.017bc	0.138±0.026b	0.681±0.054bc	6.17±1.04ab	0.187±0.018b	0.513±0.059bc	4.72±0.37b	463.2±69.8bcd
T3	0.122±0.022bc	0.126±0.018bc	0.629±0.096bc	4.35±1.15bc	0.142±0.010bc	0.436±0.052c	4.67±0.46b	458.9±66.8bcd
F1	0.113±0.009c	0.124±0.014bc	0.654±0.085bc	6.07±0.62ab	0.203±0.018b	1.065±0.126b	5.33±0.63b	575.6±87.8b
F2	0.062±0.008d	0.113±0.008c	0.606±0.113c	5.41±0.42abc	0.192±0.017b	0.854±0.068b	5.00±0.49b	495.6±69.3bcd
F3	0.057±0.007d	0.097±0.006c	0.313±0.035d	3.99±0.37c	0.177±0.021bc	0.602±0.059bc	4.13±0.56b	426.3±78.5cd

降低,插秧前不同量超细磷矿粉处理稻米中Cd、Pb含量分别比对照降低33.0%~45.8%、75.7%~79.1%,分蘖期处理稻米中Cd、Pb含量分别比对照降低28.6%~39.9%、55.4%~69.1%,扬花期处理稻米中Cd、Pb含量分别比对照降低44.3%~71.9%、55.9%~61.5%,对照和普通磷矿粉处理稻米中Cd、Pb含量均超过了食品中污染物限量标准GB 2762—2017^[9]($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),施加超细磷矿粉后稻米中Cd含量均降至食品限量标准以下,Pb含量除了T1和F1处理外,其他处理均降至食品限量标准以下,均与对照处理差异显著。可见,超细磷矿粉能显著降低稻米中Cd、Pb含量,在扬花期施入降低稻米中Cd含量的效果较好,而在插秧前施入降低稻米Pb含量的效果较好。

水稻稻壳、茎叶和根中Cd、Pb含量也是随着超细磷矿粉用量的增加而降低,其规律与稻米中相似。插秧前不同量超细磷矿粉处理稻壳中Cd、Pb含量分别比对照降低40.9%~56.7%、82.8%~88.2%,分蘖期处理稻壳中Cd、Pb含量分别比对照降低44.40%~50.0%、77.5%~83.3%,扬花期处理稻米中Cd、Pb含量分别比对照降低50.8%~61.5%、59.1%~76.9%。

插秧前不同量超细磷矿粉处理水稻茎叶中Cd、Pb含量分别比对照降低47.9%~56.1%、88.1%~94.1%,分蘖期处理水稻茎叶中Cd、Pb含量分别比对照降低40.8%~62.6%、87.3%~90.9%,扬花期处理水稻茎叶中Cd、Pb含量分别比对照降低61.1%~81.4%、89.6%~92.0%。

插秧前不同量超细磷矿粉处理稻根中Cd、Pb含量分别比对照降低19.1%~29.7%、40.2%~56.6%,分蘖期处理稻根中Cd、Pb含量分别比对照降低9.0%~38.4%、49.1%~51.2%,扬花期处理稻根中Cd、Pb含量分别比对照降低14.1%~43.5%、38.8%~54.7%。

综上可知,超细磷矿粉降低水稻各部位Cd、Pb含量效果好于普通磷矿粉,在扬花期施加超细磷矿粉可以有效降低重金属Cd含量,插秧前施加可以有效降低重金属Pb含量,这可能是因为Pb被超细磷矿粉吸附后不容易解吸出来进入土壤被植物吸收,而Cd被磷矿粉吸附后解吸率高于Pb,更容易进入土壤。

2.3 磷矿粉不同处理对水稻各部位Cd、Pb吸收系数的影响

一般来说,作物对重金属的吸收系数越小,表明其吸收重金属的能力越差,抗土壤重金属污染的能力越强^[20]。由表3可知,水稻对Cd的吸收系数为3.701~6.554,大于对Pb的吸收系数,是Pb的1.99~8.11倍,表明水稻根部吸收Cd的能力大于Pb。水稻对Cd的初级转运系数和次级转运系数为0.079~0.238和0.102~0.181,均高于水稻对Pb的转运系数,是Pb的1.40~32.37倍和2.39~21.68倍,表明Cd从根系向地上部的转运能力和从茎叶向籽粒的转运能力均高于Pb。水稻对Cd的吸收系数以CK处理最高,加入超细磷矿粉后,吸收系数有不同程度的降低,降低幅度为8.95%~43.53%,F3处理降低最多,与CK差异显著,并且随着超细磷矿粉用量的增加,吸收系数逐渐降低。水稻对Pb的吸收系数也以CK处理最高,加入超细磷矿粉后,吸收系数降低幅度达38.83%~56.57%,均与

CK达显著差异,P3处理吸收系数最低,随超细磷矿粉用量的增加,吸收系数逐渐降低。不同处理水稻对Cd、Pb的初级转运系数的影响与吸收系数相似,水稻对Cd的初级转运系数在扬花期较低,而对Pb的初级转运系数在插秧前最低。水稻对Cd、Pb的次级转运系数与吸收系数和初级转运系数有所不同,施加超细磷矿粉后次级转运系数有所升高,即超细磷矿粉促进茎叶中的Cd、Pb向籽粒中转移,具体原因有待进一步研究。

2.4 不同生育期施加超细磷矿粉对土壤重金属Cd、Pb形态的影响

从图1中Cd、Pb各形态变化看,与CK相比,施加普通磷矿粉后,土壤交换态Cd、Pb含量分别降低5.2%和26.8%,残渣态Cd、Pb含量分别增加85.8%和79.6%。在水稻同一生育期施入超细磷矿粉,随着用量的增加,土壤中可交换态Cd、Pb的比例逐渐下降,残渣态比例逐渐增加。在插秧前、分蘖期、扬花期加入超细磷矿粉后,可交换态Cd的比例比对照降低幅度分别为18.0%~27.8%、11.8%~27.9%、16.8%~33.4%,残渣态Cd的比例比对照增加幅度分别为143.8%~193.3%、103.2%~183.4%、56.0%~160.6%;在插秧前、分蘖期、扬花期加入磷矿粉后,可交换态Pb的比例比对照降低幅度分别为75.5%~86.6%、67.9%~81.1%、66.9%~81.3%,残渣态Pb的比例比对照增加幅度分别为164.8%~271.9%、91.0%~238.0%、105.4%~193.9%。重金属Cd、Pb的其他3种形态变化不显著。可交换态Pb的比例在水稻插秧前降低幅度最大,与表2中在插秧前施入超细磷矿粉可有效降低

表3 水稻不同生长期施加磷矿粉对Cd、Pb的吸收和转运系数

Table 3 Cd and Pb absorption and transport coefficients of rice with different growth period treatments

处理 Treatments	Cd			Pb		
	吸收系数 Absorption index	初级转运系数 Primary transport index	次级转运系数 Secondary transport index	吸收系数 Absorption index	初级转运系数 Primary transport index	次级转运系数 Secondary transport index
CK	6.554±0.706a	0.238±0.016a	0.121±0.023de	1.860±0.039a	0.055±0.009a	0.009±0.001c
CK1	6.402±0.433a	0.227±0.010a	0.129±0.012cd	1.672±0.049b	0.056±0.010a	0.009±0.002c
P1	5.303±0.264bcd	0.154±0.013b	0.155±0.004bc	1.112±0.013c	0.011±0.002b	0.018±0.005bc
P2	4.870±0.474d	0.159±0.011b	0.145±0.009cd	0.927±0.013e	0.008±0.001b	0.031±0.004a
P3	4.608±0.430de	0.149±0.016b	0.149±0.018bc	0.808±0.041f	0.007±0.001b	0.032±0.006a
T1	5.968±0.176ab	0.155±0.011b	0.145±0.012cd	0.946±0.016de	0.014±0.002b	0.031±0.005a
T2	5.73±0.362bc	0.110±0.009c	0.181±0.011a	0.916±0.013e	0.010±0.002b	0.040±0.015a
T3	4.037±0.431ef	0.145±0.010b	0.194±0.021a	0.907±0.015e	0.010±0.002b	0.030±0.004ab
F1	5.631±0.355bc	0.108±0.015c	0.173±0.001ab	1.138±0.019c	0.009±0.001b	0.038±0.004a
F2	5.020±0.157cd	0.112±0.011c	0.102±0.021e	0.980±0.017d	0.010±0.001b	0.038±0.005a
F3	3.701±0.176f	0.079±0.014d	0.182±0.009a	0.843±0.013f	0.010±0.002b	0.043±0.015a

水稻体内 Pb 含量的结论相一致。

2.5 水稻各部位 Cd、Pb 含量与土壤可交换态 Cd、Pb 含量的相关性

由表4可知,水稻各部位 Cd、Pb 含量与土壤中可交换态 Cd、Pb 含量呈显著正相关,稻米、稻壳、茎叶和稻根中 Cd 含量与土壤中可交换态 Cd 含量相关系数分别为 0.856、0.885、0.904 和 0.971,稻米、稻壳、茎叶和稻根中 Pb 含量与土壤中可交换态 Pb 含量相关系数分别为 0.946、0.962、0.960 和 0.977,即土壤中可交换态 Cd、Pb 的含量升高,水稻中 Cd、Pb 含量也随之升高。其中水稻根中 Cd、Pb 含量与土壤中可交换态 Cd、Pb 含量的相关性大于稻米,水稻各部位 Pb 含量与可交换态 Pb 的相关性大于 Cd。因此,降低土壤中可交换态 Pb、Cd 的浓度就能间接降低水稻各部位 Pb、Cd 含量。

2.6 不同生育期施加超细磷矿粉对土壤 pH 和速效磷含量的影响

施入磷矿粉能显著地提高土壤 pH(图2),普通磷矿粉处理比对照提高 0.78 个单位,与对照差异显著。插秧前、分蘖期、扬花期施入超细磷矿粉的处理土壤 pH 分别比对照提高 1.42~1.86、1.54~1.88、1.49~1.86 个单位,均与对照差异显著,且随超细磷矿粉施用量的增加而增加,并且高用量处理与低用量处理均达到显著差异。

施入超细磷矿粉能显著提高土壤速效磷含量(图3),并且随着超细磷矿粉用量的增加土壤速效磷呈现增加的趋势,插秧前、分蘖期和扬花期施入超细磷矿粉土壤速效磷分别比对照增加 97.9%~320.0%、

108.8%~247.4%、101.7%~307.1%。

可见,超细磷矿粉对土壤 pH 和速效磷含量的影

表4 水稻不同部位中 Pb、Cd 含量与土壤交换态 Pb、Cd 含量的相关性

Table 4 Correlation between Pb and Cd content in different parts of rice and soil exchangeable Pb and Cd content

重金属 Heavy metals	部位 Parts	回归方程 Regression equation	r
Pb	稻米 Rice	$y=0.001\ 8x+0.042\ 1$	0.946**
	稻壳 Hull	$y=0.011\ 6x-0.178\ 2$	0.962**
	茎叶 Straw	$y=0.267\ 8x-12.322$	0.960**
	稻根 Root	$y=2.632\ 4x+307.53$	0.977**
Cd	稻米 Rice	$y=0.355\ 9x-0.081\ 7$	0.856**
	稻壳 Hull	$y=0.417x-0.096\ 8$	0.885**
	茎叶 Straw	$y=3.336\ 7x-1.083\ 6$	0.904**
	稻根 Root	$y=8.590\ 2x+0.630\ 8$	0.971**

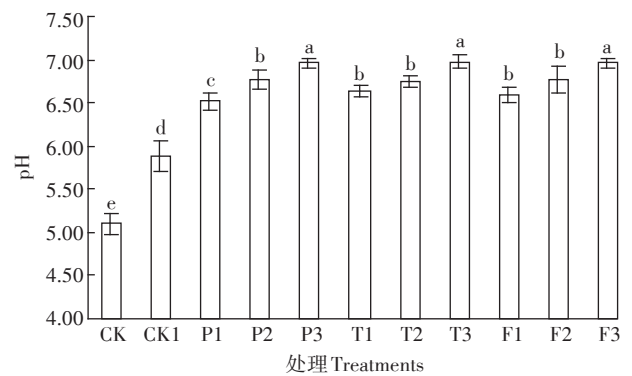
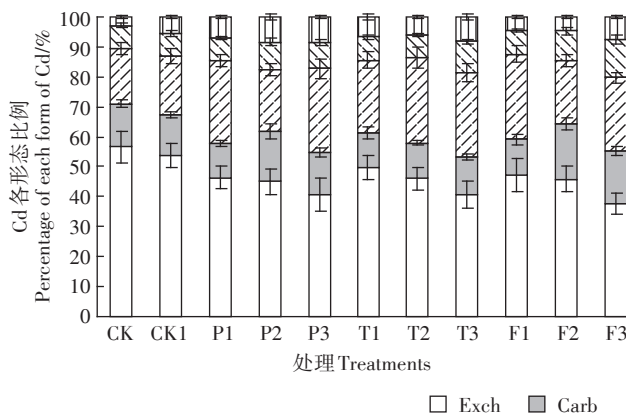


图2 不同用量磷矿粉对土壤 pH 的影响

Figure 2 Effect of different amount of superfine phosphate rocks on soil pH

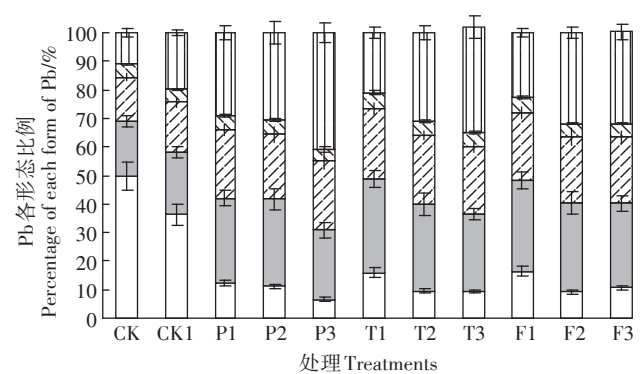


Exch: 可交换态; Carb: 碳酸盐结合态; FeMnOX: 铁锰氧化态; OM: 有机结合态; Res: 残渣态

Exch: Exchangeable fractions; Carb: Carbonate fractions; FeMnOX: Fe-Mn oxide fractions; OM: Organic fractions; RES: Residual fractions

图1 不同生育期施加超细磷矿粉对土壤中 Cd、Pb 形态的影响

Figure 1 Effects of superfine phosphate rocks on the forms of Cd and Pb in soil at different growth stages



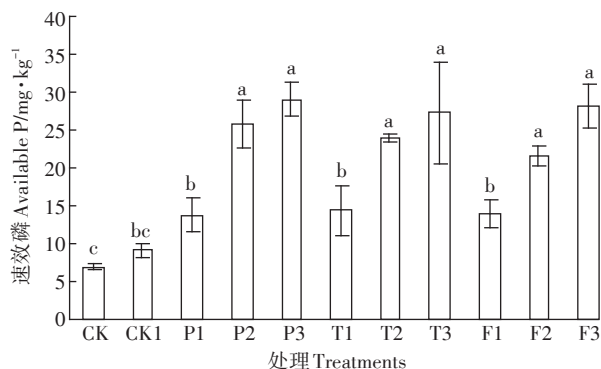


图3 不同用量磷矿粉对速效磷含量的影响

Figure 3 Effect of different amount of superfine phosphate rocks on available phosphorus

响与用量有关,而与磷矿粉加入的时期无关。

3 讨论

3.1 磷矿粉降低土壤 Pb、Cd 可交换态及降低水稻吸收重金属的机制

植物对重金属的吸收不仅与土壤中重金属的总量有关,而且与其在土壤中存在的形态有关。重金属在土壤中以多种形态存在,其存在形态及所占比例直接影响它们在土壤中的迁移能力和生物有效性^[21]。一般地,重金属形态可以分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态,不同形态的生物有效性差异较大,形态之间在一定条件下可以相互转化。一般来说,可交换态和碳酸盐结合态有效性最高,是植物容易吸收的形态,铁锰氧化物结合态次之,有机结合态有效性较低,而残渣态几乎对植物无效^[22]。

本研究中,对照处理对植物有效性最高的可交换态 Cd 含量占总量的 56.6%,加入普通磷矿粉后可交换态 Cd 含量仅降低了 5.2%,加入超细磷矿粉可交换态 Cd 含量降低了 11.8%~33.4%,而残渣态 Cd 含量比对照增加 56.0%~193.3%。加入超细磷矿粉后可交换态 Pb 含量比对照降低 66.9%~86.6%,残渣态 Pb 含量比对照增加 91.1%~271.9%。可见,超细磷矿粉的加入使对植物有效性高的可交换态向对植物无效的残渣态转化,是超细磷矿粉修复污染土壤的一个原因,并且磷矿粉的粒径越小降低土壤可交换态 Cd、Pb 含量的效果越好^[7]。

另外,磷矿粉施入土壤后,会释放出磷酸根离子,磷酸根离子与重金属形成难溶的磷酸盐沉淀,从而降低重金属的有效态含量,减少了植物的吸收^[23-25]。磷

矿粉在正常环境下溶解度较小,但加工成较细粒径时其释磷量明显增加(图 3),从而增加了磷酸根与重金属的沉淀。将磷矿粉加工成不同粒径来修复土壤重金属污染的研究较少^[7,13,26],但结果都表现为随着磷矿粉用量的增加和粒径的减小,土壤重金属的钝化效果越好,与本研究的结果一致。

研究还表明,提高土壤 pH 是抑制植物吸收 Pb、Cd 的重要途径^[27],磷矿粉属于碱性物质,施加磷矿粉使土壤 pH 值升高 0.78~1.88 个单位,土壤颗粒表面负电荷增加,促使土壤中 Cd、Pb 等元素形成氢氧化物沉淀或磷酸盐沉淀,从而达到钝化的目的,本研究中土壤 pH 值升高是土壤交换态 Cd、Pb 含量降低的一个重要原因。但王云丽等^[28]的研究表明,钝化剂对土壤 pH 的影响与植株中 Cd 含量相关性并不明显,这可能是因为供试土壤本身为碱性,而本研究中供试土壤为酸性土壤,所以钝化剂的钝化作用机制不同。此外,超细磷矿粉具有大的比表面积,能吸附土壤中的 Cd、Pb 等离子,降低 Cd、Pb 的有效性。

为了解决重金属轻中度污染面积较大的问题,需进一步研究钝化剂修复机理,根据修复机理研究寻求更有效的修复方法,如对现有钝化剂进行改性,增加其修复性能等。在选择钝化剂时,也要根据土壤的性质进行,针对南方的酸性土壤,可以选择碱性较大的修复物质,而对北方的偏碱性土壤,可以选择比表面积较大、容易与重金属离子形成沉淀的物质等。

3.2 不同时期施加磷矿粉对水稻吸收 Cd、Pb 的影响

本研究结果显示,施加超细磷矿粉后,水稻各部位 Cd、Pb 含量都有不同程度的降低,并且随施用量的增加降低越多,这与许多研究结果一致^[18,29-30],其原因之一是超细磷矿粉的施用降低了土壤中 Pb、Cd 的有效性(图 1),减少了水稻可吸收 Pb、Cd 的来源;另外,超细磷矿粉的施用可以降低土壤中 Pb、Cd 向根部的转移和根部向地上部的转移,而超细磷矿粉促进了 Pb、Cd 由茎叶向籽粒的转移(表 2~表 3)。钝化剂如果只降低土壤中重金属的有效态含量,而促进重金属向植物体的转运,那么重金属在植物体内的累积量有可能降低,也有可能升高。本研究中,超细磷矿粉不仅降低了土壤中有效态 Pb、Cd 的含量,也抑制了 Pb、Cd 从根部向茎叶中的转运,虽然有促进茎叶中 Pb、Cd 向籽粒中的转运,但是转运系数较低,整体表现为降低籽粒中 Pb、Cd 含量,稻米中 Cd 含量均降至我国食品中污染物限值以下, Pb 含量大部分处理降至污染物限值以下(除 T1 和 F1 处理),与唐守寅等^[31]的研究

有所不同,唐守寅的研究表明,羟基磷灰石的施用糙米中Cd含量比对照增加,可能与所选用土壤中Zn含量不同有关,Zn与Cd可能会竞争转运通道^[32-33],表现为拮抗效应^[34]。

本研究表明,超细磷矿粉在水稻插秧前施加降低稻米Pb含量的效果好于扬花期,这主要是因为磷矿粉与Pb形成磷铅矿类沉淀,这类沉淀物的溶解度低,在较大pH范围内保持稳定。磷矿粉对Pb以外的重金属主要以表面配位、离子交换或生成非晶体物质激励为主,并且pH是主要的影响因素^[34-38]。因此,插秧前施入超细磷矿粉土壤中的Pb生成稳定的沉淀,减少了土壤中水稻对Pb的吸收来源,达到比后期施用更好的效果。

而在水稻扬花期施加超细磷矿粉降低稻米Cd含量的效果好于前期施加,许多研究表明,水稻在扬花期对Cd的积累能力相对较高。Rodda等^[39]研究表明,在扬花期水稻对Cd的耐受能力较强且植株体内Cd含量相对较高。胡莹等^[40]研究发现,水稻对Cd的吸收能力表现为中期>后期>前期。王凯荣等^[41]的研究结果表明:供试水稻在前期(幼穗分化之前)吸收的Cd不到全生育期吸收总量的10%,后期(抽穗后)吸收的Cd占51%以上。以上研究均表明,水稻生育中期对Cd的吸收能力高于其他时期。因为Cd与超细磷矿粉结合后的物质不稳定,会随着pH等外界环境的变化重新进入土壤被植物吸收,因此在植物接近大量吸收之前加入超细磷矿粉,比其他时期加入可起到更好的效果,本研究中扬花期施加效果较好。但也有许多研究表明,水稻对Cd的吸收量为分蘖期>灌浆成熟期^[42]。史静等^[43]的研究表明,水稻分蘖期和成熟期是Cd吸收的主要时期。刘昭兵等^[5]的研究表明,8个水稻品种各器官Cd、Pb含量均表现为分蘖期>成熟期>抽穗期。各研究结果不尽相同,可能与试验方法、试验材料及土壤类型等不同有关。

因此,在采用钝化剂修复重金属污染土壤时,不但要选择合适的钝化剂,还要根据不同种类的重金属选择合适的施加时间。针对Pb污染的土壤一般在种植前期施加,而对Cd污染的土壤尤其要注重作物生殖生长期的保护和管理。

4 结论

(1)超细磷矿粉能够增加稻谷产量和千粒重,插秧前施加效果稍好。

(2)水稻插秧前施加超细磷矿粉降低土壤中交换

态Pb含量,降低稻米中Pb含量的效果较好,而在扬花期施加降低土壤中交换态Cd含量,降低稻米中Cd含量的效果较好,并且随超细磷矿粉用量的增加效果逐渐增强。

(3)针对Pb污染的土壤钝化剂一般在种植前期施加,而对Cd污染的土壤钝化剂在作物生长旺盛之前使用钝化效果较好。

参考文献:

- [1] Huang J H, Hsu S H, Wang S L. Effects of rice straw ash amendment on Cu solubility and distribution in flooded rice paddy soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2): 1801-1807.
- [2] 史 静, 潘根兴, 夏运生, 等. 镉胁迫对两品种水稻生长及抗氧化酶系统的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(5): 832-837.
SHI Jing, PAN Gen-xing, XIA Yun-sheng, et al. Effects of Cd on different rice growth and antioxidant enzyme system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5): 832-837.
- [3] 马 彦. 土壤重金属污染及其植物修复研究综述[J]. *甘肃农业科技*, 2016(2): 69-75.
MA Yan. Research review on soil heavy metal pollution and its phytoremediation[J]. *Gansu Agriculture Science and Technology*, 2016(2): 69-75.
- [4] 唐 皓, 李廷轩, 张锡洲, 等. 水稻镉高积累材料不同生育期镉积累变化特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 471-477.
TANG Hao, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, et al. Cadmium accumulation in high cadmium-accumulating rice cultivars at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2015, 34(3): 471-477.
- [5] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 不同生育期水稻对Cd、Pb的吸收累积特征及品种差异[J]. *土壤通报*, 2011, 42(5): 1125-1129.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Characteristics of Cd and Pb absorption and accumulation by rice at different growth stages and the differences between varieties[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1125-1129.
- [6] 王庆仁, 李继云, 李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(3): 417-421.
WANG Qing-ren, LI Ji-yun, LI Zhen-sheng. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 417-421.
- [7] 扈亲怀, 张 青, 王煌平, 等. 不同粒径磷矿粉钝化土壤重金属Cd、Pb的机制研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(2): 164-168.
HU Qin-huai, ZHANG Qing, WANG Huang-ping, et al. Passivation mechanisms of soil heavy metals Cd and Pb with different sizes of phosphate powder[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(2): 164-168.
- [8] 许学慧, 姜冠杰, 胡红青, 等. 草酸活化磷矿粉对矿区污染土壤中Cd的钝化效果[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2005-2011.
XU Xue-hui, JIANG Guan-jie, HU Hong-qing, et al. The immobilization effect of oxalic acid activated phosphate powders applied to the Cd

- contaminated farmland soil in mining area[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(10):2005-2011.
- [9] 姜冠杰, 胡红青, 张峻清. 草酸活化磷矿粉对砖红壤中外源铅的钝化效果[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(24):205-213.
- JIANG Guan-jie, HU Hong-qing, ZHANG Jun-qing, et al. Immobilization effects of phosphate powder activated by oxalic acid on exogenous lead in latosol[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(24):205-213.
- [10] 王碧玲, 谢正苗, 孙叶芳, 等. 磷肥对铅锌矿污染土壤中铅毒的修复作用[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(9):1189-1194.
- WANG Bi-ling, XIE Zheng-miao, SUN Ye-fang, et al. Effects of phosphorus fertilizers on remediation of lead toxicity in a soil contaminated by lead and zinc mining[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9):1189-1194.
- [11] 陈世宝, 李娜, 王萌, 等. 利用磷进行铅污染土壤原位修复中需要考虑的几个问题[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1):203-209.
- CHEN Shi-bao, LI Na, WANG Meng, et al. Factors needed to be reconsidered during in-situ remediation practices of Pb-polluted soils with P[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1):203-209.
- [12] Xie Z M, Wang B L, Sun Y F, et al. Field demonstration of reduction of lead availability in soil and cabbage (*Brassica Chinensis* L.) contaminated by mining tailings using phosphorus fertilizers[J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2006, 7(1):43-50.
- [13] 陈志霞, 黄益宗, 赵中秋, 等. 不同粒径磷矿粉对玉米吸收积累重金属的影响[J]. *安全与环境学报*, 2012, 12(6):1-4.
- CHEN Zhi-xia, HUANG Yi-zong, ZHAO Zhong-qiu, et al. Effects of different size phosphate powder on the uptake of the accumulated heavy metal pollutants by corn[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(6):1-4.
- [14] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7):844-850.
- [15] 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, 1999:147-190.
- LU Ru-kun. Analysis method of soil agrochemistry[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 1999:147-190.
- [16] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14:277-282.
- [17] Carbonell-Barrachina A A, Burló-Carbonella F, Mataix-Beneyto J. Arsenic uptake, distribution, and accumulation in bean plants: Effect of arsenite and salinity on plant growth and yield[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20:1419-1430.
- [18] 胡钟胜, 章钢娅, 王广志, 等. 修复剂对烟草吸收污染土壤中砷的改良[J]. *土壤*, 2006, 38(2):200-205.
- HU Zhong-sheng, ZHANG Gang-ya, WANG Guang-zhi, et al. Effect of remediators on As uptake by tobacco in contaminated soil[J]. *Soils*, 2006, 38(2):200-205.
- [19] GB2762—2017. 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- GB2762—2017. National standards for food safety limit of pollutants in food[S].
- [20] Azplazu M N, Romero F. Metal distribution and interaction in plant cultures on artificial soil[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1986, 28(1/2):1-26.
- [21] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京:科学出版社, 2002:79-134.
- CHEN Huai-man. Behavior of chemicals in soils and its relation to environmental quality[M]. Beijing:Science Press, 2002:79-134.
- [22] 许超, 夏北成, 吴海宁. 尾矿库尾砂及周边农田土壤重金属形态分布及其生物有效性[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11):2293-2296.
- XU Chao, XIA Bei-cheng, WU Hai-ning. Speciation and bioavailability of heavy metals in tailings and agricultural soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11):2293-2296.
- [23] Nriagu J O. Lead Orthophosphates—IV formation and stability in the environment[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1974, 38(6):887-898.
- [24] Nriagu J O. A silent epidemic of environmental metal poisoning[J]. *Environmental Pollution*, 1988, 50(1):139-161.
- [25] 李瑞, 赵中秋, 张鹏飞, 等. 磷矿粉修复重金属污染土壤的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(4):426-431.
- LI Rui, ZHAO Zhong-qiu, ZHANG Peng-fei, et al. Research progress of remediation of heavy metal-contaminated soils by phosphate rock[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2017, 39(4):426-431.
- [26] Liu R Q, Zhao D Y. In situ immobilization of Cu(II) in soil using a new class of iron phosphate nanoparticles[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(10):1867-1876.
- [27] 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.
- ZHAO Qiu-xiang, HUANG Xiao-chun, LI Yuan-yuan, et al. A smectite-OR-SH compound for reducing cadmium uptake by pakchoi in contaminated soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2014(11):1871-1877.
- [28] 王云丽, 石耀鹏, 赵文浩, 等. 设施菜地土壤镉钝化剂筛选及应用效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(7):1503-1510.
- WANG Yun-li, SHI Yao-peng, ZHAO Wen-hao, et al. Screening of amendments for the remediation of cadmium-polluted protected agriculture soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7):1503-1510.
- [29] 雷鸣, 曾敏, 胡立琼, 等. 不同含磷物质对重金属污染土壤-水稻系统中重金属迁移的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(6):1527-1533.
- LEI Ming, ZENG Min, HU Li-qiong, et al. Effects of different phosphorus-containing substances on heavy metals migration in soil-rice system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6):1527-1533.
- [30] 周航, 周歆, 曾敏, 等. 2种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(2):437-444.
- ZHOU Hang, ZHOU Xin, ZENG Min, et al. Effects of two combined amendments on heavy metal bioaccumulation in paddy soil[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(2):437-444.

- [31] 唐守寅, 董海霞, 赵明柳, 等. 羟基磷灰石对铅、镉在土壤-水稻体系中吸收和转移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2):266-273.
- TANG Shou-yin, DONG Hai-xia, ZHAO Ming-liu, et al. Effects of hydroxyapatite on absorption and transfer of Pb and Cd in soil-rice system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):266-273.
- [32] Hart J J, Norvell W A, Welch R M, et al. Characterization of zinc uptake, binding, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars[J]. *Plant Physiol*, 1998, 118(1):219-226.
- [33] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings [J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, 116(1):73-78.
- [34] 杨志敏, 郑绍建, 胡霁堂. 植物体内磷与重金属元素锌、镉交互作用的研究进展[J]. 植物营养与肥科学报, 1999, 5(4):366-376.
- YANG Zhi-min, ZHENG Shao-jian, HU Ai-tang. Advances on the study of interactions of phosphorus with zinc and cadmium in plants [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4):366-376.
- [35] Cao X D, Ma L Q, Rhue D R, et al. Mechanisms of lead, copper, and zinc retention by phosphate rock[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131(3):435-444.
- [36] Thawornchaisit U, Polprasert C. Evaluation of phosphate fertilizers for the stabilization of cadmium in highly contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165:1109-1113.
- [37] Miretzky P, Fernandez C A. Phosphates for Pb immobilization in soils: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2008, 6(3):121-133.
- [38] Chrysochoou M, Dermatas D, Grubb D G. Phosphate application to firing range soils for Pb immobilization: The unclear role of phosphate [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 144:1-14.
- [39] Rodda M S, Li G, Reid R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: The relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2):105-114.
- [40] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):432-437.
- HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, et al. Formation of iron plaque on root surface and its effect on Cd uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):432-437.
- [41] 王凯荣, 龚惠群. 不同生育期镉胁迫对两种水稻的生长、镉吸收及糙米镉含量的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(6):1197-1203.
- WANG Kai-rong, GONG Hui-qun. Effects of cadmium exposures in different stages on plant growth, Cd uptake and Cd concentrations in brown rice of a hybrid and conventional rice variety[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6):1197-1203.
- [42] 丁园, 宗良纲, 徐晓炎, 等. 镉污染对水稻不同生育期生长和品质的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1):183-186.
- DING Yuan, ZONG Liang-gang, XU Xiao-yan, et al. Effect of cadmium on the growth and quality of rice (*Oryza sativa* L.) in different growth period[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1):183-186.
- [43] 史静, 李正文, 龚伟群, 等. 2种常规水稻 Cd、Zn 吸收与器官分配的生育期变化: 品种、土壤和 Cd 处理的影响[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1):32-40.
- SHI Jing, LI Zheng-wen, GONG Wei-qun, et al. Uptake and partitioning of Cd and Zn by two non-hybrid rice cultivars in different growth stages: Effect of cultivars, soil type and Cd spike[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1):32-40.