

不同磷肥对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响

——以石灰岩黄壤性水稻土为例

赵婷婷^{1,2}, 王春丽³, 赵秀兰^{1,2*} (1.西南大学资源环境学院, 重庆 北碚 400716; 2.重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 北碚 400716; 3.重庆市农业生态与资源保护站, 重庆 渝北 401120)

摘要: 为寻求砷(As) 镉(Cd)复合污染稻田安全利用的有效措施,以贵州石灰岩区 As、Cd 复合污染黄壤性水稻土为材料,采用盆栽试验,研究了 6 种磷肥对土壤 As、Cd 有效性、水稻根表铁膜及 As、Cd 吸收的影响.结果表明:与对照相比,羟基磷灰石(HAP)、生物酶活性磷肥(BCP)、钙镁磷肥(CMP)处理使土壤 pH 值显著提高,磷酸二氢钙(MCP)、磷酸二氢钾(MKP)、过磷酸钙(SSP)处理使土壤 pH 值显著降低.所有磷肥处理均降低了土壤有效 Fe 含量,其中 HAP、MCP、CMP 的降低效果显著.HAP 显著降低了土壤有效 Cd 和有效 As 含量;MCP 和 BCP 显著提高土壤有效 Cd 含量,但对土壤有效 As 无显著影响;SSP 显著降低了土壤有效 Cd 含量,但显著提高土壤有效 As 含量.不同磷肥使水稻根表铁膜数量提升 0.6%~27.1%,铁膜数量与铁膜中 Cd、As 含量分别呈极显著($R^2=0.555^{**}$)和显著($R^2=0.525^*$)正相关关系.MCP、MKP、BCP 显著降低了糙米 Cd、As 含量,HAP、SSP、CMP 显著降低了糙米 Cd 含量,但对糙米 As 含量无显著影响.磷肥均使 Cd 叶→颖壳的转运系数下降,MKP、MCP 能抑制 As 从根到茎的转运,BCP 能抑制 As 从叶到颖壳的转运.磷肥降低水稻糙米 Cd、As 含量与铁膜数量增加、水稻体内 Cd、As 转运变化有关.

关键词: 磷肥; As/Cd; 土壤; 水稻; 铁膜

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)01-0297-10

Effects of different phosphate fertilizers on iron plaque amount on root surface and arsenic and cadmium uptake by rice grown in a limestone yellow loamy paddy soil. ZHAO Ting-ting^{1,2}, WANG Chun-li³, ZHAO Xiu-lan^{1,2*} (1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 3.Chongqing Agricultural Ecology and Resource Protection Station, Chongqing 401120, China). *China Environmental Science*, 2021,41(1): 297~306

Abstract: To find effective measures for safe utilization of arsenic (As) and cadmium (Cd) co-contaminated paddy soils, the effects of six phosphate fertilizers on the availability of As and Cd in a limestone yellow loamy paddy soil, the amounts of iron plaque on root surface and the uptake of As and Cd by rice were investigated using a pot experiment. The results showed that the values of soil pH increased significantly in the treatments of hydroxyapatite (HAP), bioenzyme active phosphate fertilizer (BCP) and calcium magnesium phosphate fertilizer (CMP), while they decreased significantly in the treatments of calcium dihydrogen phosphate (MCP), potassium dihydrogen phosphate (MKP) and calcium superphosphate (SSP), as compared with that of control. The application of HAP, MCP and CMP significantly reduced the availability of soil iron while the other three phosphate fertilizers had slight influence on it. The effect of phosphate fertilizers on the availability of As and Cd varied with fertilizers. HAP significantly decreased the contents of soil available Cd and As, while MCP and BCP significantly increased the content of soil available Cd but had no significant effect on soil available As, and SSP decreased the content of available Cd but increased the content of available As significantly. The amount of iron plaque in the root surface was increased by 0.6%~27.1% due to phosphate fertilizer application and was positively correlated with Cd and As in it ($R^2=0.555^{**}$ and $R^2=0.525^*$, respectively). MCP, MKP and BCP significantly decreased the content of Cd and As, while HAP, SSP and CMP significantly reduced the content of Cd, but had no significant effect on the content of As in brown rice. Application of all phosphate fertilizers decreased the transfer coefficient of Cd from leaf to glume, MKP and MCP inhibited the transportation of As from root to stem, while BCP suppressed the transport of As from leaf to glume. It is concluded that the decrease of Cd and As in brown rice caused by phosphate fertilizers application was related to the increased iron plaque amount and the inhibition of Cd and As transportation within rice plant.

Key words: phosphate fertilizer; As/Cd; soil; rice; iron plaque

当前,受高地地质背景及污水灌溉、畜禽粪便的过量施用等人类活动的影响,Cd、As 易在稻田中积累,形成 As、Cd 复合污染^[1].由于 Cd、As 性质差异大,

收稿日期: 2020-05-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600)

* 责任作者, 教授, zxl@swu.edu.cn

其迁移转化行为及生物有效性对土壤性质变化的反应不同,如 pH 值升高,土壤胶体负电荷增强, Cd 的有效性降低而 As 的有效性增大^[2];当淹水 Eh 降低时, Cd²⁺ 易生成沉淀而降低有效性, As(V) 会转化为 As(III) 而提高有效性^[3]. 因而, 现有修复技术难以同时修复 As、Cd 复合污染土壤^[4].

目前, Cd、As 污染农田修复和安全利用的方法主要包括作物筛选、施用钝化剂、水分管理、施肥等^[5-6]. 其中施肥是一种重要的农田安全利用措施, 科学合理施肥能在修复土壤重金属污染的同时实现农作物保产增产^[7-8]. 磷肥是一种重要的化学肥料^[9], 也常作为 Cd 污染土壤修复与安全利用的改良剂. 研究表明, 施用 CMP、SSP 能显著降低水稻对 Cd 的吸收累积^[10-11]. 在元素周期表中, P 与 As 是同族元素, 物理化学性质相似, 关于磷肥施用对水稻 As 吸收的影响存在两种不同的结果. 一种结果表明, 施磷肥会使水稻 As 吸收增加, 这是因为 P 与 As 能竞争土壤颗粒表面的吸附位点^[12]; 另一种结果却表明, 由于水稻对 P 和 As 的吸收是在同一系统进行的, 施磷肥会抑制 As 的吸收和积累^[13-15]. 这可能与不同类型磷肥的性质不同, 导致其对土壤 As、Cd 迁移转化行为影响不同有关. 但目前关于不同磷肥对水稻 As、Cd 吸收的影响研究所采用的磷肥类型较少, 且大多以单一污染土壤为研究对象^[16-17], 因此有必要进一步对不同磷肥进行比较, 以筛选出能同时降低水稻 As、Cd 吸收的磷肥类型.

土壤 pH 值是影响 As、Cd 有效性与水稻 As、Cd 吸收的重要因素^[18], 不同磷肥对水稻 As、Cd 吸收的影响可能与磷肥引起的土壤 pH 值改变有关^[19]. 此外, 由于水稻根系具有特殊的泌氧功能, 在水稻根表容易形成铁膜^[20], 这种铁膜可作为水稻 As、Cd 的源促进水稻 As、Cd 的吸收, 也可能作为屏障阻止水稻 As、Cd 的吸收^[21]. 研究表明, 磷肥能使水稻根表铁膜数量显著增加^[22], 但不同磷肥对水稻根表铁膜形成的影响及其与水稻 As、Cd 吸收的关系报道很少.

石灰岩黄壤具有 As、Cd 背景值高^[23-24], Fe、Mn 含量高^[25], 环境承载力弱^[26], 生物富集能力强^[27]等特点, 对农产品质量安全已构成严重威胁. 研究表明^[28-29], 土壤中 Fe、Mn 元素含量越高, 根表铁膜数量越大, 铁膜对植物生理生化过程的影响越突出. 关于施磷对高 Fe、Mn 水稻土中水稻根表铁膜的形成及其对水稻 As、Cd 吸收的影响未见报道. 本文以贵州石灰岩分布区 As、Cd 复合污染黄壤性水稻土为材料, 采用盆栽试验, 研究了 MCP、MKP、CMP、SSP 等 4 种常用磷肥和 BCP、HAP 对土壤 As、Cd 有效性、根表铁膜及水稻 As、Cd 吸收的影响, 以期为该区域 As、Cd 复合污染水稻田安全利用中磷肥类型的选择提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

表 1 磷肥基本性质
Table 1 Some properties of tested phosphate fertilizers

肥料名称	主要成分	P ₂ O ₅ 含量(%)	pH 值	Cd 含量 (mg/kg)	As 含量 (mg/kg)	生产厂家	缩写
羟基磷灰石	Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂	41.0	9.25	1.62	8.92	武汉远城科技发展有限公司	HAP
磷酸二氢钾	KH ₂ PO ₄	52.2	4.24	1.62	4.45	国药集团化学试剂有限公司	MKP
磷酸二氢钙	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	60.7	2.24	1.63	3.71	天津市科密欧化学试剂有限公司	MCP
生物酶活性磷肥	Ca ₃ (PO ₄) ₂ 、CaSiO ₃ 、MgSiO ₃ 、生物酶活化剂	16.5	6.51	1.56	6.15	湖北农乐化肥有限公司	BCP
钙镁磷肥	Ca ₃ (PO ₄) ₂ 、CaSiO ₃ 、MgSiO ₃	12.5	10.26	1.92	4.72	湖北金明珠化工有限公司	CMP
过磷酸钙	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·CaSO ₄ ·2H ₂ O	16.0	2.46	2.57	5.58	天津市大茂化学试剂厂	SSP

供试土壤于 2019 年 4 月采自贵州省贵阳市开阳县某村 As、Cd 复合污染稻田耕作层, 采样深度 0~20cm. 该地区气候温暖湿润, 属亚热带季风气候, 年平均气温 14.8℃, 年平均降水量 1129.5mm. 土样采回后, 将其掰成小块, 挑去细根和砂砾, 磨细过 2mm 筛, 混合均匀后用于盆栽试验. 土壤基本理化性质如

下; pH 值 6.68, 有机质 51.84g/kg, 土壤总 As、总 Cd 分别为 52.88 和 1.78mg/kg, 均超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018) 所规定 6.5<pH≤7.5 的水田中 As 和 Cd 的风险筛选值(25 和 0.6mg/kg), 未达到其风险管控值(120 和 3.0mg/kg), 说明该土壤可能存在一定的 Cd、As 污染

风险.供试水稻品种为丰优 210(*Oryza sativa* L. var. Fengyou 210).供试磷肥包括羟基磷灰石、磷酸二氢钙、磷酸二氢钾、生物酶活性磷肥、钙镁磷肥、过磷酸钙共 6 种,其性质见表 1.

1.2 试验设计

盆栽试验在西南大学温室进行,于 2019 年 5 月 7 日装盆,选用直径为 15cm,高为 20cm 的圆底塑料桶,每桶装土 4kg,以 100mg P_2O_5 /kg 土的等磷量添加 HAP、MKP、MCP、BCP、CMP、SSP 6 种磷肥,以不施磷肥为对照(CK),共 7 个处理,每处理 3 个重复.以尿素作氮肥,氯化钾作钾肥,添加量分别为 0.15gN/kg 和 0.10gK₂O/kg.所有肥料均以底肥形式一次性施入,与土壤混匀,淹水一周待水层稳定后于 2019 年 5 月 14 日移栽水稻,每盆 1 株,全生育期淹水深度在 3~5cm.

水稻成熟后,于 2019 年 9 月 20 日收获,将整个植株从塑料桶中取出,用自来水洗净后,再用去离子水洗净.取一部分新鲜根测定根表铁膜及其 As、Cd 含量,其余部分于 70℃ 烘至恒重.将水稻根、茎、叶和谷粒分开,用脱壳机对谷粒脱壳,获得糙米和颖壳,测定各部位生物量.用粉碎机将植株各部位粉碎供 Cd、As 含量测定.采集土壤样品,风干后,过 2mm 筛,用于测定土壤 pH 值和有效 Fe、Cd 和 As 含量.

1.3 分析测试与质量控制

土壤 pH 值用电位法测定;植株生物量采用烘干称重法测定;根表铁膜用 0.03mol/L 柠檬酸三钠-0.125mol/L $NaHCO_3$ -0.16mol/L 保险粉(DCB 浸提液)提取^[30];土壤有效 Cd、Fe 用 0.005mol/L 二乙烯三胺五乙酸(DTPA)-0.1mol/L 三乙醇胺(TEA)-0.01mol/L $CaCl_2$ (pH 7.3)浸提,原子吸收分光光度法测定^[31];土壤有效 As 用 0.5mol/L $NaHCO_3$ 浸提,原子荧光分光光度法测定^[32];植株全 Cd 采用 HNO_3 - $HClO_4$ 消解,石墨炉原子吸收分光光度法测定^[33];植株全 As 采用反王水消解,原子荧光分光光度法测定^[34].

分析过程中设置空白样和平行样,并采用标准土壤样品[GBW07428(GSS-14)]和标准植物样品[GBW10046(GSB-24)]进行质量控制.

1.4 数据处理

采用 Excel 2010、SPSS 25.0 和 Origin 12.0.0 进行有关数据的计算、分析和图形制作,采用柱状图和

三线表作为数据的表达方式,显著水平设为 0.05.

2 结果与分析

2.1 不同磷肥对土壤 pH 值和有效 Fe 的影响

由图 1(a)可知,不同磷肥处理土壤 pH 值差异显著.与对照相比,施用 HAP、BCP、CMP 土壤 pH 值分别提高 0.16、0.20、0.15 个单位,均达显著水平($P<0.05$);MCP、MKP、SSP 处理土壤 pH 值分别降低 0.53、0.43、0.25 个单位,也达显著水平.与对照相比,所有磷肥处理均降低了土壤有效铁(Fe)含量,其中 HAP、MCP 和 CMP 的降低效果达到显著(图 1(b)).

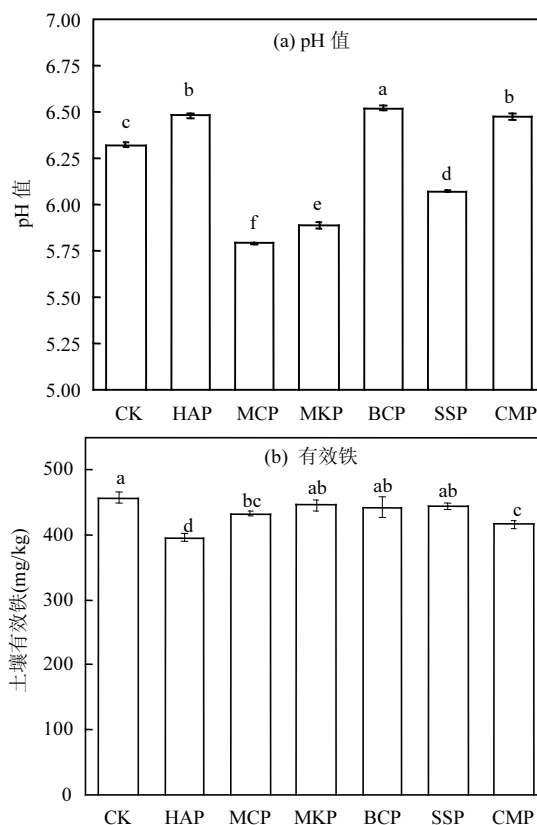


图 1 不同磷肥对土壤 pH 值和有效 Fe 的影响

Fig.1 Effects of different phosphate fertilizers on pH and available Fe content of the paddy soil

图中数据为 3 次重复的平均值±标准差,不同字母表示它们之间达到显著性差异($P<0.05$),下同

2.2 不同磷肥对土壤有效 As、Cd 的影响

图 2(a)显示,与对照相比,MCP、BCP 处理土壤有效 Cd 含量分别提高 22.9%和 30.1%,均达显著水平;HAP、SSP 分别使土壤有效 Cd 含量降低 8.6%和 12.0%,也达显著水平;MKP 和 CMP 处理土壤有效 Cd 含量与对照差异不显著.图 2(b)显示,SSP 处理

土壤有效 As 含量显著高于对照;HAP 和 MKP 处理比对照分别降低 8.88%和 18.6%,达显著水平;MCP、BCP、CMP 处理土壤有效 As 含量与对照差异不显著.

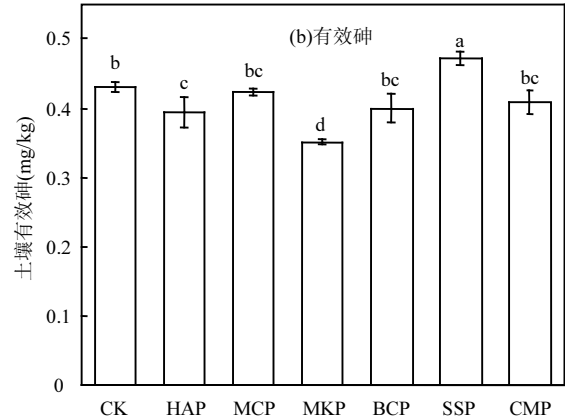
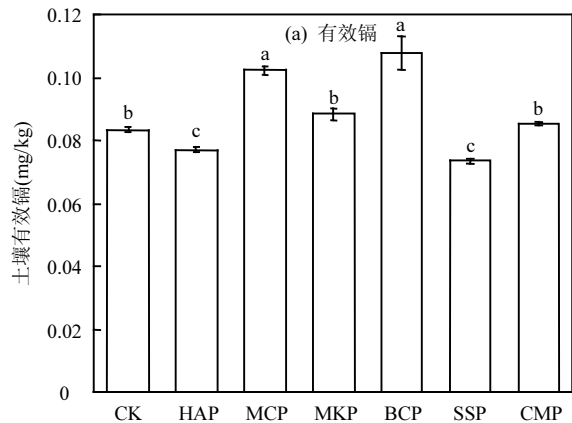


图 2 不同磷肥对土壤有效 Cd 和 As 的影响
Fig.2 Effects of different phosphate fertilizers on the contents of available Cd and As in soil

2.3 不同磷肥对水稻农艺性状的影响

表 2 不同磷肥对水稻农艺性状的影响
Table 2 Effects of different phosphate fertilizers on agronomic traits of rice at harvest stage

肥料名称	分蘖数(个)	株高(cm)	有效穗数(个)	根干重(g/盆)	秸秆干重(g/盆)	稻谷干重(g/盆)
CK	13±2b	107.57±0.63a	10±1d	19.54±2.40a	55.59±0.91b	41.02±0.60c
HAP	22±3a	106.57±2.62a	19±1a	11.11±1.40bc	66.32±2.64a	53.37±1.78a
MCP	14±1b	105.50±0.96a	12±1c	14.56±1.61b	61.79±3.23a	47.49±1.99b
MKP	14±3b	107.13±1.31a	14±1c	18.40±0.82a	63.05±2.87a	45.66±2.60bc
BCP	17±2ab	109.13±2.82a	18±0a	14.43±1.46b	56.68±2.28b	52.08±1.93a
SSP	16±2ab	110.40±3.63a	16±0b	9.95±1.60c	54.52±1.12b	42.31±1.08c
CMP	13±3b	107.13±0.48a	13±1c	14.06±1.68b	53.75±0.92b	39.44±2.54c

注:表格中数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间差异在P<0.05水平显著,下同.

由表 2 可知,不同磷肥处理水稻总体长势优于对照,说明施磷肥有利于水稻生长.与对照相比,只有 HAP 显著增加了分蘖数,增幅为 69.2%;所有施磷肥处理有效穗数增加 20.0%~90.0%,对水稻株高的影响不显著.除 MKP 外,其余处理水稻根系干重均显著降低,降低幅度为 25.5%~49.1%;HAP、MKP、MCP 显著提高了水稻茎叶生长,其余处理的影响不显著.除 CMP,其余处理水稻籽粒产量均有不同程度的增长,这可能与土壤有效磷的含量有关.CMP 为难溶性肥料,施磷肥后土壤有效磷含量较低,植物难以吸收利用.

2.4 不同磷肥对水稻根表铁膜的影响

如表 3,不同磷肥处理均不同程度提高水稻根表铁膜数量,提升幅度为 0.6%~27.1%,以 MKP 处理提升效果最佳,说明磷肥的施入能够促进水稻根表铁膜的形成.不同处理下,根表铁膜中 Cd 含量范围为

1.22~2.12mg/kg, As 含量范围为 4.32~6.51mg/kg.其中 MKP、MCP、SSP 显著提高了铁膜 Cd 含量,CMP 显著降低了铁膜 Cd 含量;MKP 处理铁膜 As 含量最高,较对照高 28.4%,BCP 处理铁膜 As 含量最低,较对照低 14.7%,但其效果不显著.

表 3 不同磷肥对水稻根表铁膜数量及其 As、Cd 含量的影响
Table 3 Effects of different phosphate fertilizers on the amount of iron plaque on root surface and the contents of Cd and As in it

处理	铁膜数量(g/kg)	镉含量(mg/kg)	砷含量(mg/kg)
CK	3.31±0.25b	1.52±0.02c	5.07±0.44ab
HAP	3.79±0.34ab	1.43±0.14cd	5.22±0.68ab
MCP	3.83±0.15ab	2.12±0.20a	4.82±0.63ab
MKP	4.54±0.71a	1.88±0.02b	6.51±1.44a
BCP	3.33±0.29b	1.40±0.07cd	4.32±0.35b
SSP	3.81±0.61ab	1.82±0.13b	5.67±0.72ab
CMP	3.91±0.14ab	1.22±0.05d	5.26±0.55ab

2.5 不同磷肥对水稻 As、Cd 含量的影响

如表 4,水稻 Cd 含量为根>茎叶>壳米,各器官中 Cd 含量在不同磷肥处理下差异显著.与对照相比,SSP 水稻根系 Cd 含量降低 17.3%;BCP、SSP、CMP 使水稻茎 Cd 含量提升 25.0%~63.3%;MCP 和 BCP 使水稻叶 Cd 含量提升 28.8%~49.2%;除 BCP 以外,其他处理均显著降低颖壳 Cd 含量.对照糙米 Cd 含量接近《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)(0.2mg/kg)的规定值^[35],但磷肥均使水稻糙米中的 Cd 含量显著下降,下降幅度为 21.1%~

62.5%,以 BCP 处理效果最好,以 SSP 处理效果最弱.

水稻各器官 As 含量顺序为根>叶>茎>壳>糙米,水稻各器官 As 含量在不同磷肥处理下也存在显著差异.与对照相比,HAP、MKP、BCP 处理水稻根 As 含量下降 6.6%~12.5%;MCP、MKP 处理水稻茎 As 含量分别降低 19.0%和 18.7%;CMP 使水稻叶 As 含量提高 19.8%;所有磷肥使水稻颖壳 As 含量降低 5.6%~52.2%;SSP、CMP 使糙米 As 含量略升高,HAP 处理略有下降,MCP、MKP 和 BCP 分别使糙米 As 含量显著降低,降幅以 BCP 最大.

表 4 不同磷肥对水稻 Cd、As 含量的影响
Table 4 Effects of different phosphate fertilizers on the contents of Cd and As in different rice tissues

磷肥 类型	Cd 含量(mg/kg)					As 含量(mg/kg)				
	根	茎	叶	颖壳	糙米	根	茎	叶	颖壳	糙米
CK	5.38±0.03b	0.44±0.03c	0.59±0.01cd	0.17±0.01b	0.19±0.00a	610.65±20.33b	6.89±0.04ab	12.51±0.15b	2.69±0.01a	0.61±0.03a
HAP	6.72±0.04a	0.41±0.02c	0.65±0.00c	0.10±0.01d	0.14±0.00b	534.05±14.04d	6.65±0.33b	11.59±0.36c	1.15±0.05e	0.56±0.05ab
MCP	5.55±0.06b	0.52±0.01bc	0.88±0.02a	0.05±0.01e	0.09±0.00cd	678.32±21.83a	5.58±0.22c	11.57±0.17c	2.40±0.04c	0.49±0.06bc
MKP	5.57±0.06b	0.47±0.02bc	0.62±0.01c	0.04±0.00f	0.10±0.00c	550.34±7.80cd	5.60±0.17c	11.66±0.35c	2.54±0.04b	0.49±0.02bc
BCP	5.68±0.02b	0.57±0.00b	0.76±0.01b	0.20±0.01a	0.07±0.00d	570.38±11.50cd	7.43±0.08a	12.57±0.23b	2.33±0.05c	0.47±0.02c
SSP	4.45±0.04c	0.55±0.03b	0.54±0.02d	0.11±0.01d	0.15±0.00b	589.33±11.91bc	7.41±0.51a	11.33±0.26c	1.58±0.09d	0.62±0.03a
CMP	7.30±0.03a	0.72±0.02a	0.54±0.02d	0.15±0.00c	0.10±0.00c	616.05±12.36b	7.51±0.27a	14.99±0.25a	1.47±0.08d	0.64±0.05a

2.6 不同磷肥对水稻 As、Cd 转运的影响

表 5 不同磷肥对水稻 As、Cd 转运的影响
Table 5 Effects of different phosphate fertilizers on transfer factors of Cd and As within rice

指标	处理	转运系数			
		TF _{茎/根}	TF _{叶/茎}	TF _{颖壳/叶}	TF _{籽粒/颖壳}
Cd	CK	0.08±0.01bc	1.36±0.15b	0.29±0.02a	1.12±0.12d
	HAP	0.06±0.00c	1.61±0.16ab	0.15±0.03c	1.36±0.08cd
	MCP	0.09±0.01b	1.70±0.12a	0.06±0.01d	1.68±0.12b
	MKP	0.08±0.00bc	1.34±0.11b	0.06±0.02d	2.80±0.24a
	BCP	0.10±0.00ab	1.33±0.03b	0.26±0.01a	0.36±0.04f
	SSP	0.12±0.03a	1.00±0.20c	0.20±0.04b	1.44±0.08bc
	CMP	0.10±0.01b	0.75±0.09c	0.28±0.05a	0.68±0.04e
As	CK	0.01±0.00a	1.79±0.01b	0.22±0.00a	0.27±0.01c
	HAP	0.01±0.00a	1.75±0.05b	0.10±0.01d	0.59±0.04a
	MCP	0.01±0.00c	2.08±0.06a	0.21±0.01a	0.25±0.03c
	MKP	0.01±0.00b	2.09±0.13a	0.22±0.00a	0.23±0.01c
	BCP	0.01±0.00a	1.69±0.03bc	0.19±0.01b	0.25±0.01c
	SSP	0.01±0.00a	1.54±0.11c	0.14±0.01c	0.48±0.04b
	CMP	0.01±0.00a	2.00±0.04a	0.10±0.01d	0.53±0.02b

注:转运系数TF_{茎/根}、TF_{叶/茎}、TF_{颖壳/叶}、TF_{糙米/颖壳}分别为水稻茎与根、叶与茎、颖壳与叶、糙米与颖壳As、Cd含量之比.

通常使用转运系数(TF)对植物各部位转运重金

属的能力进行评价,TF 越大,说明转运能力越强^[36],不同处理下,Cd 在水稻各部位的转运系数大致为:茎→叶、颖壳→糙米>叶→颖壳>根→茎,说明水稻各部位对 Cd 的转运能力为颖壳、茎>叶>根;As 在水稻各部位的转运系数大致为:茎→叶>颖壳→糙米>叶→糙米>根→茎,说明水稻各部位对 As 的转运能力为茎>颖壳>叶>根.Cd、As 在水稻各部位的转运系数存在一定差别,可能与水稻对 Cd、As 的转运机制不同有关.

对 Cd 而言,与对照相比,SSP 显著提高了根→茎的转运系数;SSP 和 CMP 显著降低了茎→叶的转运系数;不同磷肥均抑制了 Cd 叶→颖壳的转运,其中 HAP、MCP、MKP 和 SSP 的效果达到显著;MCP、MKP 和 SSP 显著促进了 Cd 颖壳→糙米的转运.

对 As 而言,与对照相比,MCP 和 MKP 显著降低了根→茎的 TF;MCP、MKP 和 CMP 显著增大了茎→叶的 TF;HAP、BCP、SSP 和 CMP 显著抑制了叶→颖壳的转运;HAP、SSP 和 CMP 显著促进了 As 从颖壳→糙米的转运,以 HAP 效果最好;MCP、MKP、BCP 抑制了 As 从颖壳→糙米的转运,但其效

果均不显著。

3 讨论

3.1 磷肥对土壤 pH 值的影响

由于化学性质的差异,不同磷肥对土壤 pH 值的影响不同.相关分析结果表明,土壤 pH 值与磷肥 pH 值呈显著正相关($R^2=0.853^*$),说明磷肥 pH 值是影响土壤 pH 值的一个重要因素.此外,一些磷肥的特殊成分也能影响土壤 pH 值,如 CMP、BCP 中含 CaO 和 MgO,施入土壤后会逐步溶解产生大量 OH⁻,以中和土壤中的 H⁺,使土壤 pH 升高^[37];SSP 施入土壤后会发生异成分溶解效应^[38],即 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{PO}_4$,使土壤 pH 值降低.

3.2 磷肥对土壤有效 Fe 的影响

pH 值是影响土壤有效 Fe 的因素之一.一般情况下,土壤 Fe 有效性随土壤 pH 值升高而降低^[39].本文中,施磷肥使土壤有效 Fe 含量均不同程度下降,但土壤 pH 值与土壤有效 Fe 间无显著相关关系,这是由于土壤有效 Fe 与 pH 值间并非呈简单线性关系,随着土壤 pH 值升高,土壤有效 Fe 含量的降低幅度越来越小^[40].此外,影响土壤 Fe 有效性的因素除 pH 值外,还有土壤磷含量、HCO₃⁻、水分、温度、有机质、重金属等.与对照(不施磷肥)相比,施磷肥条件下,土壤磷含量对土壤 Fe 有效性的影响占主导地位,其他因素的影响被削弱或抵消.早在 1972 年,Olsen 等^[41]就发现了施磷肥使土壤有效 Fe 含量降低主要是由于形成了铁磷酸盐,Dhaliwal 等^[42]和 Ji 等^[43]也得出了相似的结论,说明施磷确实能够通过磷铁结合而降低土壤中 Fe 的有效性.

3.3 磷肥对土壤有效 As、Cd 的影响

磷肥主要通过改变土壤理化性质来影响土壤 As、Cd 有效性.研究表明,土壤 pH 值越高,土壤胶体表面负电荷越强,对 Cd 的吸附能力越强^[44],对 As 的吸附能力越弱^[45],Cd 的有效性减弱而 As 的有效性增强;另一方面,土壤中的 Fe 离子可通过形成羟基化合物等为 As、Cd 等离子提供吸附位点,或发生共沉淀反应,进而影响 As、Cd 的有效性^[46].本文中,不同磷肥处理下,土壤有效 As、Cd 含量与土壤 pH 值及土壤有效 Fe 含量均无显著相关性,说明土壤 pH 值和有效 Fe 含量并非影响土壤 As、Cd 活性的决定性因素.磷肥的施入还可通过提供磷酸盐、伴随离

子^[47]、吸附位点^[48]等影响土壤 As、Cd 的活性.如 SSP 有抑制土壤 Cd 活性的作用,这是由于 SSP 中含有一定量的硫酸钙等含硫化合物(本试验中,SSP 的含硫量为 12%),S 在还原条件下可与 Cd 发生共沉淀作用^[49];HAP 同时降低了土壤 As、Cd 有效性,这可能是由于 HAP 对 Cd、As 的吸附作用,研究表明,离子吸附是 HAP 降低 Cd、As 活性的主要机制^[50-51].MCP 和 MKP 性质相似,但只有 MCP 显著提高了土壤有效 Cd 含量,这是由于 MCP 中的 Ca²⁺能与 Cd²⁺竞争土壤颗粒表面的吸附位点^[52],增大土壤溶液中 Cd²⁺浓度,提高 Cd 的有效性;MCP 和 MKP 均有降低土壤有效 As 含量的效果,这是由于二者均为酸性肥料,土壤 As 在酸性条件下活性降低^[53].

3.4 磷肥对根表铁膜的影响

铁膜是淹水环境下水稻根表形成的一层铁氧化物胶膜^[54].本文发现,施磷能诱导水稻根表铁膜形成,与 Yan 等^[55]的报道一致.研究表明,根表铁膜的形成必须具备 2 个条件,一是植物根际处于局部氧化状态,二是生长介质中存在足够的有效 Fe^[56].本文中,各磷肥处理下土壤有效 Fe 含量下降,水稻根表铁膜数量却上升,根表铁膜数量并未呈现随土壤有效 Fe 含量的提高而增加的趋势,这是由于本文所采用的土壤富含 Fe、Mn,土壤本身的有效 Fe 含量很高,植物根表铁膜数量对有效 Fe 的变化不敏感,施磷肥后土壤有效 Fe 含量的减小对根表铁膜数量的影响不明显所致^[56].此时,根表铁膜数量主要受磷的影响而增大.研究还表明,水稻根表铁膜的形成主要受土壤氧化、还原体系变化下 Fe、Mn 在水稻根表的还原溶解和氧化成矿所决定,磷能够显著抑制铁膜中水铁矿的还原转化,从而促进铁膜的形成和稳定^[57].Zhao 等^[22]发现,CMP 可使水稻根表铁膜厚度显著增加;Peng 等^[58]报道,MKP 也能增加根表铁膜数量.本文中,不同磷肥均能促进根表铁膜的形成,其中以 MKP 的效果最显著,这可能是由于 MKP 溶解度最大,相同磷用量下能释放最多的磷引起.

铁膜能通过吸附、共沉淀等作用对 Cd、As 等重金属进行富集^[59].Li 等研究表明,水稻根表铁膜中 DCB 可提取态铁与铁膜 As 含量呈极显著正相关^[60];Fu 等通过水培试验发现,铁膜对 Cd 具有一定的截留作用,能抑制水稻对 Cd 的吸收和积累^[54].本文中,不同磷肥处理下,铁膜数量与铁膜中 Cd、As 分别呈

极显著($R^2=0.555^{**}$)和显著($R^2=0.525^*$)正相关关系,说明水稻根表铁膜对 Cd、As 具有一定的富集作用。由前文可知,磷肥均促进根表铁膜的形成,但 BCP、SSP、CMP 使水稻茎 Cd 含量提升 25.0%~63.3%;MCP 和 BCP 使水稻叶 Cd 含量提升 28.8%~49.2%,这是因为水稻地上部分除了受到铁膜富集作用的影响,还会受到水稻体内 As、Cd 转运的影响。磷肥中的 Ca^{2+} 与 Cd^{2+} 性质相似,在水稻体内由茎叶→籽粒的转运过程中,二者可能存在一定的竞争作用。

表 6 水稻 As、Cd 含量与土壤 As、Cd 有效量及根表铁膜 As、Cd 含量的关系

Table 6 The relationship between the contents of As/Cd in rice and their availability in soil and contents in iron plaque

指标	土壤有效 Cd	土壤有效 As	铁膜数量	铁膜 Cd	铁膜 As
根 Cd	0.302		-0.235	-0.544*	
茎 Cd	-0.212		-0.089	-0.357	
叶 Cd	0.653		-0.104	0.452*	
颖壳 Cd	0.020		-0.696**	-0.721**	
糙米 Cd	-0.542		-0.068	-0.092	
根 As		0.375	-0.163		-0.259
茎 As		0.376	-0.489*		-0.337
叶 As		-0.087	-0.208		-0.201
颖壳 As		-0.177	-0.102		-0.028
糙米 As		0.424	-0.042		-0.097

注:*在0.05水平(双侧)上显著相关;**在0.01水平(双侧)上显著相关。

3.5 磷肥对水稻 As、Cd 吸收转运的影响

刘昭兵^[49]等的研究表明,CMP 和 SSP 能显著降低水稻糙米 Cd 含量,MKP 对糙米 Cd 含量无显著影响;雷鸣^[61]等通过盆栽试验发现磷酸二氢钠和 HAP 能显著降低水稻籽粒 As 含量。本文中,所有磷肥均能显著降低水稻籽粒 Cd 含量,只有 MCP、MKP、BCP 能显著降低籽粒 As 含量,造成这种差异的原因可能是施磷水平、水稻品种及土壤性质等的不同。对水稻各部位 Cd、As 含量与土壤有效 Cd、As 含量进行相关性分析,发现其相关性均不显著,说明用土壤有效 Cd、As 含量不能表征水稻 Cd、As 吸收情况,这可能是由不同磷肥化学性质的差异带来的多因子互作效应所导致。如 MCP 和 BCP 显著提高了土壤有效 Cd 含量,但均显著降低了糙米 Cd 含量,这是因为 BCP 处理下的 Cd 更多地积累于水稻茎叶和颖壳,MCP 处理下的 Cd 更多地积累在茎和叶。Liu 等报道,铁膜可显著降低水稻对 Cd 的吸收^[62];胡莹等的

试验证实,铁膜数量与水稻各器官 Cd 含量呈极显著负相关^[63];也有研究表明,铁膜具有降低水稻 As 吸收的效果^[64]。本文中,铁膜数量与水稻各部位 Cd、As 含量均呈负相关关系,且与颖壳 Cd 含量、茎 As 含量的相关性达到显著水平,说明铁膜具有减少水稻吸收 Cd、As 的作用。分别对铁膜中的 Cd、As 含量与水稻各部位 Cd、As 含量进行相关性分析,发现铁膜 Cd 含量与水稻根 Cd 和颖壳 Cd 含量呈显著($R^2=0.544^*$)和极显著($R^2=0.721^{**}$)负相关关系,与水稻叶 Cd 含量呈极显著正相关关系,铁膜 As 含量与水稻各部位 As 含量均呈负相关关系,说明 Cd、As 在水稻体内存在不同的转运规律。本文中,不同磷肥均使水稻糙米 Cd 含量显著降低,而使 Cd 在叶→颖壳的 TF 下降,颖壳→籽粒的 TF 上升,说明磷肥是通过抑制 Cd 从叶到颖壳的转运来降低糙米 Cd 含量。MKP、MCP、BCP 显著降低了糙米 As 含量,主要是因为 MKP、MCP 抑制 As 从根到茎的转运,BCP 抑制 As 从叶到颖壳的转运,说明不同磷肥对水稻 Cd、As 转运具有不同的调控机制。

4 结论

4.1 6 种磷肥中,只有 MCP、MKP 和 BCP 能够同时降低水稻糙米 Cd、As 含量,并使 Cd 含量低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中的限量值(0.2mg/kg)。

4.2 BCP、MCP 显著提高了土壤有效 Cd 含量,HAP、SSP 显著降低了土壤有效 Cd 含量;SSP 显著提高了土壤有效 As 含量,HAP 和 MKP 显著降低了土壤有效 As 含量。

4.3 施磷促进水稻根表铁膜形成,其对 Cd 和 As 具有富集作用,从而降低水稻对 Cd 和 As 的吸收。

4.4 磷肥主要通过抑制 Cd 从叶到颖壳的转运来降低糙米 Cd 含量;MKP、MCP 能抑制 As 从根到茎的转运,BCP 则能抑制 As 从叶到颖壳的转运,从而降低糙米 As 含量。

参考文献:

- [1] Wang F Z P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies [J]. Plant Soil, 2020,44(6):1-21.
- [2] 王永壮,彭文凤,陈荣英,等.磷肥类型及其对土壤植物磷镉交互作用的影响 [J]. 土壤与作物, 2019,8(2):139-149.

Wang Y S, Peng W F, Chen R Y, et al. Types of phosphorus fertilizers

- and their influences on cadmium and phosphorus interactions in soil [J]. *Soil and Plant*, 2019,8(2):139-149.
- [3] Shen B, Wang X, Zhang Y, et al. The optimum pH and Eh for simultaneously minimizing bioavailable cadmium and arsenic contents in soils under the organic fertilizer application [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,7(11):135-229.
- [4] Noh Y D, Park H J, Kim K R, et al. Contrasting effect of phosphate on phytoavailability of arsenic and cadmium in soils supporting medicinal plants [J]. *Applied Biological Chemistry*, 2017,60(2):119-128.
- [5] 李小方. 重金属污染农田安全利用: 目标、可选技术与可推广技术 [J]. *中国生态农业学报*, 2020,28(6):860-866.
- Li X F. Safe utilization of heavy metal-contaminated farmland: Goals, technical options, and extendable technology [J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2020,28(6):860-866.
- [6] 孟 龙, 黄涂海, 陈 睿, 等. 镉污染农田土壤安全利用策略及其思考 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2019,45(3):263-271.
- Meng L, Hang T H, Chen Q, et al. Safe utilization of farmland soil with cadmium pollution: strategies and deliberations [J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2019,45(3):263-271.
- [7] Li Q, Gao Y. Remediation of Cd-, Pb- and Cu-contaminated agricultural soils by phosphate fertilization and applying biochar [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019,28(4):2697-2705.
- [8] Li J, Zhang P, Ye J, et al. Simultaneous in-situ remediation and fertilization of Cd-contaminated weak-alkaline farmland for wheat production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019,250(11):528-536.
- [9] 余 垚, 朱丽娜, 郭天亮, 等. 我国含磷肥料中镉和砷土壤累积风险分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2018,37(7):1326-1331.
- Yu Y, Zhu L N, Guo T L, et al. Risk assessment of cadmium and arsenic in phosphate fertilizer [J]. *Journal of Agriculture & Environment Sciences*, 2018,37(7):1326-1331.
- [10] 佟 倩, 张秀双, 魏晓敏, 等. 硅肥磷肥配合施入对水稻产量及植株体内镉含量的影响 [J]. *北方水稻*, 2011,41(6):6-9.
- Tong Q, Zhang L S, Wei X M, et al. Effects of slag mucks and FCMP combined application on rice yield and Cd content in planting [J]. *North Rice*, 2011,41(6):6-9.
- [11] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理 [J]. *应用生态学报*, 2012,23(6):1585-1590.
- Liu Z B, Ji X H, Peng H, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012,23(6):1585-1590.
- [12] 张 秀, 郭再华, 杜爽爽, 等. 砷胁迫下水磷耦合对不同磷效率水稻根表铁膜及其各部位砷含量的影响 [J]. *生态毒理学报*, 2013,8(2):172-177.
- Zhang X, Guo Z H, Du S S, et al. Couple effect of water and phosphorus on iron plaque and As concentration in different organs of different P efficiency rices under As-stress conditions [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013,8(2):172-177.
- [13] Srivastava S, Srivastava S, Bist V, et al. *Chlorella vulgaris* and *Pseudomonas putida* interaction modulates phosphate trafficking for reduced arsenic uptake in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018,35(1):177-187.
- [14] 张 琳, 卢 瑛. 磷硅肥配施抑制华南地区水稻籽粒砷积累的效果 [J]. *农业环境科学学报*, 2016,35(6):1042-1047.
- Zhang L, Lu Y. Effects of phosphorus and silicon applications on arsenic accumulation in rice grains in South China [J]. *Journal of Agriculture & Environment Sciences*, 2016,35(6):1042-1047.
- [15] 张 秀, 郭再华, 杜爽爽, 等. 砷胁迫下水磷耦合对不同磷效率水稻根表铁膜及其各部位砷含量的影响 [J]. *生态毒理学报*, 2013,8(2):172-177.
- Zhang X, Guo Z H, Du S S, et al. Couple effect of water and phosphorus on iron plaque and As concentration in different organs of different P efficiency rices under As-stress conditions [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013,8(2):172-177.
- [16] 陈青云, 张 晶, 谭启玲, 等. 4 种磷肥对土壤-叶菜类蔬菜系统中镉生物有效性的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2013,32(1):78-82.
- Chen Q Y, Zhang J, Tan Q L, et al. Effects of four phosphorus fertilizers on cadmium bioavailability in soil-leaf vegetables systems [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*. 2013,32(1):78-82.
- [17] 耿志席, 刘小虎, 李莲芳, 等. 磷肥施用对土壤中砷生物有效性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2009,28(11):2338-2342.
- Geng Z X, Liu X H, Li L F, et al. Effects of phosphorus fertilization on the bioavailability of arsenic in soils [J]. *Journal of Agriculture & Environment Sciences*, 2009,28(11):2338-2342.
- [18] Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, et al. Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(8):4178-4185.
- [19] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理 [J]. *应用生态学报*, 2012,23(6):1585-1590.
- Liu Z B, Ji X H, Peng H, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012,23(6):1585-1590.
- [20] Peng C, Chen S, Shen C, et al. Iron plaque: A barrier layer to the uptake and translocation of copper oxide nanoparticles by rice plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018,52(21):12244-12254.
- [21] 于金崑. 油菜素内酯对水稻根表铁膜形成和水稻砷镉吸收的影响 [D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- Yu J Y. Effects of brassinolide on iron plaque and its influence about the absorbion of arsenic and cadmium [D]. Fuzhou: Province: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.
- [22] Zhao Y, Zhang C, Wang C, et al. Increasing phosphate inhibits cadmium uptake in plants and promotes synthesis of amino acids in grains of rice [J]. *Environmental Pollution*, 2020,257(2):496-504.
- [23] 田茂苑. 贵州喀斯特地区不同水稻土镉污染风险格局划分 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- Tian M Y. Classification of cadmium pollution risk patterns of different paddy soils in karst area of Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [24] 汪 花, 刘秀明, 刘 方, 等. 喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 [J]. *环境科学*, 2019,40(6):2895-2903.
- Wang H, Liu X M, Liu F, et al. Spatial distribution and pollution assessment of As at a small scale in agricultural soils of the karst

- region [J]. *Environmental Science*, 2019,40(6):2895-2903.
- [25] 邓廷飞. 贵州黄壤性水稻土主要发生特征与诊断特性 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- Deng T F. The major genetic character and diagnostic characteristic of yellow paddy soil in Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.
- [26] 夏吉成. 典型喀斯特高砷背景地区土壤风化过程中砷形态转化的 XANES 研究 [C]. 南京: 中国土壤学会, 2019.
- Xia J C. XANES study on morphological transformation of arsenic during soil weathering in typical karst areas with high arsenic content [C]. Nanjing: Soil Science Society of China, 2019.
- [27] 吕贻忠. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006:254-255.
- Lv Y Z. Soil science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 254-255.
- [28] Xu D, Xu J, He Y, et al. Effect of iron plaque formation on phosphorus accumulation and availability in the rhizosphere of wetland plants [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009,200(1-4): 79-87.
- [29] 姚海兴. 湿地植物根表铁膜研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(11):2374-2380.
- Yao H X. Iron plaques on wetland plant root surface: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009,28(11):2374-2380.
- [30] 雷 鸣. 两种含磷物质对土壤重金属和砷向水稻迁移的影响 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- Lei M. Effects of two phosphorus-containing substances on migration of heavy metals and arsenic in soil to rice [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [31] GB/T23739-2009 土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法 [S].
- GB/T23739-2009 Soil quality-Analysis of available lead and cadmium contents in soils-Atomic absorption spectrometry [S].
- [32] 谢 伟, 谭向平, 田海霞, 等. 土壤水分对稻田土壤有效砷及碱性磷酸酶活性影响 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(8):2418-2424.
- Xie W, Tan X P, Tian H X, et al. Effects of soil moisture on available arsenic and alkaline phosphatase activity in paddy soil [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(8):2418-2424.
- [33] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 477-479.
- Lu R K. Methods of Soil Agricultural Chemical Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999:477-479.
- [34] 耿志席, 刘小虎, 李莲芳, 等. 磷肥施用对土壤中砷生物有效性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2009,28(11):2338-2342.
- Geng Z X, Liu X H, Li L F, et al. Effects of phosphorus fertilization on the bioavailability of arsenic in soils [J]. *Journal of Agriculture & Environment Sciences*, 2009,28(11):2338-2342.
- [35] 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-Contaminant limits in food [S].
- [36] Yang L, Huang B, Hu W, et al. The impact of greenhouse vegetable farming duration and soil types on phytoavailability of heavy metals and their health risk in eastern China [J]. *Chemosphere*, 2014,10(3): 121-130.
- [37] Hong C O, Owens V N, Kim Y G, et al. Soil pH effect on phosphate induced cadmium precipitation in arable soil [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2014,93(1):101-105.
- [38] 金 亮, 周健民, 王火焰, 等. 石灰性土壤肥际磷酸一钙的转化及肥料磷的迁移 [J]. *土壤*, 2009,41(1):72-78.
- Jin L, Zhou J M, Wang H Y, et al. Transformation and translocation of fertilizer-P with monocalcium phosphate monohydrate application in fertilosphere of calcareous soil [J]. *Soil*, 2009,41(1):72-78.
- [39] 地里拜尔. 苏里坦, 艾尼瓦尔. 买买提, 娟娟. 土壤中铁锰的形态分布及其有效性研究 [J]. *生态学杂志*, 2006,25(2):155-160.
- Di L B E, Ai N W E, Lin J. Soil iron-and manganese forms and their availability to plants [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006,25(2):155-160.
- [40] 刘 铮. 微量元素的农业化学 [M]. 北京: 农业出版社, 1991:261-262.
- Liu Z. Agricultural chemistry of microelements [M]. Beijing: Agricultural Press, 1991:261-262.
- [41] Olsen S R. Micronutrient interactions [M]. Micronutrients in agriculture, Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 1972:243-264.
- [42] Dhaliwal S S, Mandal A. Transformations and availability of iron to wheat as influenced by phosphorus and manganese fertilization in a typic haplusteptic soil [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019,50(9):1081-1092.
- [43] Ji Y, Luo W, Lu G, et al. Effect of phosphate on amorphous iron mineral generation and arsenic behavior in paddy soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,65(7):644-656.
- [44] Du Y, Wang X, Ji X, et al. Effectiveness and potential risk of CaO application in Cd-contaminated paddy soil [J]. *Chemosphere*, 2018,20(4):130-139.
- [45] Singh S B, Srivastava P K. Bioavailability of arsenic in agricultural soils under the influence of different soil properties [J]. *SN Applied Sciences*, 2020,2(2):15-32.
- [46] 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 等. 组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 [J]. *环境科学*, 2016,37(10):4004-4010.
- Wang Y J, Zou J L, Yang W B, et al. Coordinated regulation of compound improver to the bio-availability of Pb, Cd and As in paddy field system [J]. *Environmental Science*, 2016,37(10):4004-4010.
- [47] Goh K H, Lim T T. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: effect of reaction time, pH, and competitive anions on arsenic and selenium adsorption [J]. *Chemosphere*, 2004,55(6):849-859.
- [48] 徐明岗. 磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展 [J]. *生态学报*, 2007,27(7):3043-3050.
- Xu M G. Research progress of phosphate remediation of soil contaminated by heavy metals [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(7): 3043-3050.
- [49] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理 [J]. *应用生态学报*, 2012,23(6):1585-1590.
- Liu Z B, Ji X H, Peng H, et al. Effects of phosphate fertilizer on plant availability of cadmium in soil and its mechanism [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012,23(6):1585-1590.
- [50] Ahmad M, Hashimoto Y, Moon D H, et al. Immobilization of lead in a Korean military shooting range soil using eggshell waste: An

- integrated mechanistic approach [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012,20(9):392-401.
- [51] 梁美娜,王敦球,朱义年,等.羟基磷灰石/蔗渣炭复合吸附剂的制备及其对 As(V)的吸附机理 [J]. 环境科学研究, 2017,30(4):607-614.
Liang M N, Wang D Q, Zhu Y N, et al. Preparation of composite absorbent of hydroxyapatite and bagasse carbon and its adsorption mechanism for arsenic [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(4):607-614.
- [52] Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants [J]. Biochimie, 2006,88(11):1707-1719.
- [53] 薛喜枚,朱永官.土壤中砷的生物转化及砷与抗生素抗性的关联 [J]. 土壤学报, 2019,56(4):763-772.
Xue X M, Zhu Y G. Biotransformation of arsenic in soil and its association with antibiotic resistance [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019,56(4):763-772.
- [54] Khan N S B B N. Root iron plaque on wetland plants as a dynamic pool of nutrients and contaminants [J]. Advances in Agronomy, 2016, 13(8):1-96.
- [55] Ding Y, Wang Z, Ren M, et al. Iron and callose homeostatic regulation in rice roots under low phosphorus [J]. BMC Plant Biology, 2018, 18(4):326-340.
- [56] 刘春英.湿地植物根表铁膜研究进展 [J]. 生态学报, 2014,34(10): 2470-2480.
Liu C Y. Advances in the study of iron plaque in the roots of wetland plants [J]. Acta Ecological Sinica, 2014,34(10):2470-2480.
- [57] Zhao Y, Zhang C, Wang C, et al. Increasing phosphate inhibits cadmium uptake in plants and promotes synthesis of amino acids in grains of rice [J]. Environmental Pollution, 2020,25(7):113-496.
- [58] Mao P, Zhuang P, Li F, et al. Phosphate addition diminishes the efficacy of wollastonite in decreasing Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) in paddy soil [J]. Science of the Total Environment, 2019, 68(7):441-450.
- [59] 王智怡,李文静,邢承华,等.铁膜和磷作用对水稻根尖细胞壁耐铝性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019,38(12):2681-2688.
Wang Z Y, Li W J, Xing C H, et al. Effects of iron plaque and phosphorus on Al resistance of rice root tip cell wall [J]. Journal of Agriculture & Environment Science, 2019,38(12):2681-2688.
- [60] Li R, Zhou Z, Zhang Y, et al. Uptake and accumulation characteristics of arsenic and iron plaque in rice at different growth stages [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2015,46(19): 2509-2522.
- [61] 雷鸣,曾敏,廖柏寒,等.含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 [J]. 环境科学, 2014,35(8):3149-3154.
Lei M, Zeng M, Liao B H, et al. Effects of phosphorus content on arsenic uptake by rice [J]. Environmental Science, 2014,35(8):3149-3154.
- [62] Liu H, Zhang J L, Zhang F. Role of iron plaque in Cd uptake by and translocation within rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in solution culture [J]. Environmental and Experimental Botany, 2007,59(3):314-320.
- [63] 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 Y, Huang Y Z, Huang Y C, et al. Formation of iron plaque on rice root at different growth stages and its effect on absorption and transportation of Cd in rice [J]. Journal of Agriculture & Environment Science, 2013,32(3):432-437.
- [64] 李家兴.不同品种水稻根部铁膜形成及其对铁磷与砷吸收之影响 [C]. 南京:中国土壤学会, 2012.
Li J X. Formation of iron plaque of different rice varieties and its effect on absorption of iron, phosphorus and arsenic [C]. Nanjing: Soil Science Society of China, 2012.

作者简介: 赵婷婷(1997-),女,湖北黄冈人,西南大学硕士研究生,主要从事土壤重金属污染防治研究。