磷肥施用与土壤中铜、镉元素相互作用的研究进展

邢安安，杨　昆，张雅洁，牛国庆，苗俊艳，侯翠红，谷守玉

（郑州大学 化工学院，河南 郑州　450001）

［摘　要］磷是植物生长所必需的三大营养元素之一，并且磷资源也是一种不可再生的矿产资源。近些年，土壤重金属污染问题受到密切关注。简要介绍土壤中铜、镉污染的现状，综述磷肥施用与铜、镉的交互作用研究进展，期望通过科学施用磷肥，利用磷元素的协同或拮抗作用机制，减轻重金属对土壤或农作物的影响。

［关键词］磷肥；铜；镉；交互作用

［中图分类号］TQ442.9　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）06-0106-05

Research progress on interaction between phosphate fertilizer application and copper and cadmium in soil

XING Anan, YANG Kun, ZHANG Yajie, NIU Guoqing, MIAO Junyan, HOU Cuihong, GU Shouyu

(*College of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract: Phosphorus is one of the three essential nutrients for plants, and it is also a non-renewable mineral resource. In recent years, the problem of heavy metal pollution in soil has been paid close attention. The present situation of copper and cadmium pollution in soil is briefly introduced, and the research progress on the interaction between the application of phosphate fertilizer and copper and cadmium is reviewed. It is expected that the influence of heavy metals on soil or crops can be reduced by scientific application of phosphate fertilizers, use the synergistic or antagonistic mechanism of phosphorus.

Key words: phosphate fertilizer ; copper; cadmium; interaction

2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》针对我国耕地土壤环境做出分析，耕地土壤总体点位超标率为19.4%，主要污染物为镉、镍、铜、砷、汞、铅等，耕地土壤镉污染点位超标率达7.0%，铜污染点位超标率为2%，且南部地区土壤污染程度比北方地区更加严重[1]。土壤重金属含量关乎粮食安全，降低土壤中镉、铜含量十分必要。利用含磷材料对重金属污染的土壤进行修复，因投入低、效率高、效果明显而成为发展趋势[2]。磷灰石、骨粉、磷肥等含磷钝化剂在土壤钝化修复研究中较为常见，其钝化的反应机制大致可以分为3个方面[3]：（1）磷酸根离子吸附重金属元素；（2）溶解状态下的磷酸根离子与重金属反应生成沉淀；（3）磷酸钙表面吸附重金属[4]。

笔者综述磷肥与镉、铜元素交互作用的研究现状，期望在铜、镉污染的土壤中通过科学施用磷肥，利用磷元素的协同或拮抗作用机制，减轻重金属对土壤或农作物的影响。

1　土壤重金属铜、镉污染现状

铜、镉超标均会对植物的生长造成影响，降低农作物产量和品质，破坏土壤生态，影响微生物的数量和多样性。在农业生产过程中，部分有机肥、化肥、农药的重金属含量超标，且存在不合理施用现象，个别地区因水资源匮乏而采用污水灌溉等，都是导致土壤重金属元素积累的原因[5]。

畜禽饲料添加剂中含有相当一部分的铜，我国每年通过畜禽粪便向农田土壤输入的铜约占总输入量的75%[6]。工业活动释放大量含铜废渣、废水和废气，将铜直接或间接带入农田土壤[7]。我国土壤w（全铜）为3～300 mg/kg，平均为22 mg/kg，且

收稿日期：2024-04-01；　修回日期：2025-09-10

作者简介：邢安安（1999—　），男，河南三门峡人，在读硕士研究生，从事脲酸分解磷矿工艺研究。

通信作者：谷守玉（1971—　），男，吉林磐石人，副教授，从事中低品位磷矿利用和复合肥料工艺研究。

大多数土壤w（铜）在20～40 mg/kg，一般土壤有效铜含量超过缺铜临界值（石灰性土壤w（铜）为0.2 mg/kg）[8]。在我国土壤分布中，黏土壤和有机质土壤对重金属铜有较强的吸附存储作用，且不易降解和释放，铜含量远超环境标准。

重金属镉具有较强的毒性、较快的迁移率，容易在生物体内积累，且在环境中不易被降解。我国农用土地在短短的数十年发展期间，积累了大量的镉。磷矿中含有大量的镉元素，在磷矿开采以及后续的磷肥生产过程中，无法有效去除，60%～80%的镉会转移到肥料中[3]。镉一旦进入植物体内，迁移性就会降低，且植物生长过程中也容易吸收镉元素，当镉元素累积到一定数值之后，会干扰植物的生长速度，并迅速致使叶片黄化，最终凋零。镉污染不仅会对土壤–植物生态系统安全产生危害，而且会通过食物链最终在人体内富集，严重威胁人体健康。

2　磷与铜、镉元素相互作用的研究现状

元素的相互作用是指元素在土壤中或植物中产生相互的影响，或者一种元素在与第二种元素以不同水平相混合施用时所产生的不同效应，即两种营养元素之间能够产生协同作用或拮抗作用。养分协同作用是指某一元素或离子的存在能促进另一元素或离子的吸收；拮抗作用是指一种元素或离子的存在能抑制另一元素或离子的吸收。磷易与多种微量元素发生相互作用，影响农作物的生长状况[9]。

2.1　磷与铜的相互作用

磷与铜的相互作用是一个十分复杂的过程，其中涉及溶解、化合物形成、电化学以及在生物体内发生二次作用等多种情况，但是最终磷与铜的相互作用表现为协同作用和拮抗作用。

2.1.1　磷与铜的协同作用

磷可以促进植物的根系生长，提高农作物产量；铜元素直接参与光合作用、呼吸作用、抗氧化过程，在农作物产量提高和品质提升方面与磷表现为协同作用。植物在缺磷状态下，根系养分吸收不足、叶片的净光合作用受到抑制，植株整体生物量下降[10]。磷可以促进不同植物的生长和产量，即使在重金属污染的土壤中，外部施磷也有这样的效果[11]。

目前，磷与铜的协同作用在植物生长、土壤肥力、环境保护等多个领域均得到了验证。李红英[8]研究表明，在土壤中每公顷施磷0、90、180 kg，施用Cu肥22.5 kg，对小麦产量增幅最大。郭光光[12]研究表明，蓖麻的铜含量与磷肥的施用量呈正相关。在中度铜污染土壤中，施用1 g/kg过磷酸钙（以P计）后，油菜的干物质量、籽粒油含量最高，植株茎叶和根系的铜累积量均最高[13]；在高度铜污染土壤中，施用0.5 g/kg过磷酸钙（以P计）后，油菜根冠铜累积量均最高，油菜体内丙二醛（MDA）含量降低，磷肥的施用改善了高度铜污染土壤油菜生长情况，修复了铜污染土壤。磷肥施用在某种程度上提升了植物在修护土壤时发挥的作用，植物地上、地下部分吸收铜的含量均得到提升，因此合理的磷肥用量对植物吸收铜元素起到了促进作用。

2.1.2　磷与铜的拮抗作用

当植物体内的铜含量超过临界值时会影响植物的生长，例如会导致叶片黄化，使细胞毒性增加，还会导致脂质过氧化，进而扰乱多种代谢途径，并对基本大分子造成伤害[14]。相对于协同作用，磷与铜元素之间的拮抗作用更加明显。磷的施用能缓解重金属对植物的毒害作用，同时能促进植物生长量的增长和生长速度的提高[15]。

相关研究发现，铜污染环境下，柑橘幼苗的养分吸收量会受到影响，幼苗中铁、硼、氮、磷、钾、钙、镁和硫的含量随着铜污染程度的增加而下降[16]。河北石灰性土壤10年长期定位试验中，与空白对照试验相比，施P_2O_5 916 kg/hm^{2}时，籽粒中w（铜）降低31%[17]。一定量的磷肥可以促进冬小麦对铜的吸收，但这部分铜只会存储在麦秆中，向籽粒的移动在磷的作用下受到抑制，过量的磷肥也会抑制小麦秸秆中铜的吸收[18]。这也有效地阻止了铜等重金属元素从小麦端直接进入食物链。铜污染土壤中随着磷肥施用量的增加，苎麻株高和茎粗出现上升的趋势，叶片叶绿素含量增加，间接提高了苎麻的光合作用，说明施磷肥可以缓解铜胁迫对苎麻的影响[19]。磷肥的施用会增强农作物的抗逆能力，铜污染土壤中施加磷肥能提高蓖麻的抗铜能力[20]。铜污染的土壤中，三叶草幼苗的缺磷症状十分显著[21]，随着Cu^{2+}浓度的提高，磷促进植物生长、养分吸收等作用均下降[22]。

磷与铜之间的拮抗作用原理，一方面可能是磷施用后，磷酸根与重金属元素结合，导致基质中重金属的有效含量降低，植物对重金属元素的吸收减少，重金属的毒害程度也因此下降；另一方面也可能由于植物在大量吸收营养元素时，重金属元素的浓度被稀释，从而减轻了重金属元素对植物的危

害[23]，具体的机制还需要进一步的研究。

2.2 磷与镉的相互作用

磷元素与重金属镉的交互作用主要表现是，磷含量会影响植物对镉的吸收，但是磷与镉之间的交互作用的具体关系，不同的研究者有不同的观点。有研究表明，施磷量的增加会降低植物对镉元素的吸收[24]；但也有研究表明施磷量的提高会增加植株体内镉的吸收[25]，也有研究认为植物体内的磷含量与镉的吸收没有明确关系[26]。

2.2.1 磷肥施用对土壤镉积累的影响

土壤镉含量除了自然循环中大气沉降提供39%～41%、污泥中提供2%～5%，剩余54%～58%来自磷肥的施用[27]。我国80%的磷矿用于磷肥生产，铜、镉等重金属元素会随着磷肥的施用进入土壤中，给生态环境带来较大的压力[28]。国外研究表明，长期施用含镉磷肥的土壤中，镉含量会迅速增加，两者间存在显著的剂量效应[29]。据估算，全球每1 t磷肥产品中，镉为7 mg，自磷肥行业兴起，施用磷肥累计带入全球土壤的镉高达660 t；统计数据显示，我国农业生产活动中，施用磷肥带入耕地土壤中的镉总量累积高达数百吨[30]。因此，长期施用含镉量较高的磷肥，土壤中镉累积不容忽视。

但也有研究表明，磷肥施用对土壤镉积累没有影响。并不会对土壤造成明显的镉累积。周南华[31]对四川省300多个农产品基地的环境质量监测表明，在30多年连续施用磷肥的土壤区域，不会造成大面积的镉超标，即长期施用磷肥不会对环境造成镉污染，且磷肥不是导致农产品中镉污染的原因。鲁如坤等[32]计算表明，每年施肥带入土壤的镉最多为0.336 g/hm^2，这个数值是十分微小的，按目前及未来土壤需用磷肥量，结合国内的施磷水平，大约施用1 000年才能达到土壤的负荷临界值，长期施用磷肥不会造成环境问题。区惠平等[33]研究表明，磷肥中虽然含有一定的镉元素，但并没有对玉米植株产生镉毒害，说明随磷肥进入土壤的镉元素是微量的。

2.2.2 磷肥施用对土壤镉有效性的影响

LEVI-MINZI等[34]研究磷肥对土壤中镉有效性的改变机制，发现土壤pH随磷肥类型的不同发生改变，而调整到偏酸性条件时，土壤对镉的吸附能力较弱，偏碱性环境下，土壤吸附镉的能力增加。施用过磷酸钙和钙镁磷肥可降低土壤中镉的有效性[35-36]；磷酸二氢钾和磷酸氢钙等可通过提高土壤pH，增强土壤吸附镉的能力，降低镉的有效性[37]；磷肥施用量增加，黄棕壤与赤红壤土壤中镉有效性不断降低[38]，进而致使植物吸收的镉含量减少。THAWORNCHAISIT等[39]研究发现，施用磷肥时，溶解在土壤中的磷酸根，大量增加了负电荷的数目，Cd^{2+}与磷酸根等离子产生静电吸附作用，聚集在土壤表面颗粒周围，土壤中镉因吸附固定无法被植物吸收，有效性降低。施用磷肥会直接与镉形成磷酸镉沉淀，或引起植物各营养元素之间的竞争关系（如含钙磷肥中钙与镉的竞争），最终降低土壤中镉被生物吸收的总量[37, 40]。HONG等[41]研究发现，土壤中磷酸盐的质量分数在400 mg/kg的临界值基础上，继续增加磷肥施用量，土壤镉有效性下降。区惠平等[33]在此基础上展开实验，在土壤中施用75～600 mg/kg的磷肥，对于植物的镉含量检测证实磷肥的施用量与土壤中镉的有效性呈负相关。通过离子交换、吸附和沉淀等方式，磷肥可以降低重金属镉污染土壤中的有效镉含量。

磷肥对土壤镉有效性的影响不是一成不变的，植物吸收镉会受到多种因素的影响，比如磷肥类型和施用量以及土壤类型。我国地域辽阔，不同环境的土壤情况复杂，不同类型磷肥在特定类型土壤施用后，磷与镉之间的交互作用会发生改变，未来应重点针对土壤的实际情况，把控磷肥的用量，而在磷肥调控土壤环境中的镉化学行为时，磷淋失问题也应考虑在内，挖掘出不同类型磷肥对土壤–植物系统镉化学行为的影响机制。

3 展望

磷资源具有耗竭性、不可再生性、不可被替代的属性。过量的磷肥施用会对环境带来一定的负面影响，但合理施用磷肥并不会造成土壤中重金属污染。在农业种植中，施用适量的磷肥可以增加产量，带入土壤的重金属元素是微量的。目前磷肥施用与重金属元素铜、镉之间的交互作用研究在土壤修复领域取得了一定的进展。未来磷肥的发展方向应坚持绿色发展，耦合协同，加强磷与重金属元素之间更深层次的研究，为土壤重金属污染修复提供理论支撑，提高我国耕地土壤质量。

[参考文献]

[1] 肖敏.磷肥对土壤—水稻系统镉迁移的影响研究[D].成都:四川师范大学,2022.
XIAO M. The effect of phosphorus fertilizer on cadmium transport in soil-rice system[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2022.

[2] 张涵.富磷生物炭对土壤重金属的固定及迁移转化的影响机制

研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
ZHANG H. Study on the effect of phosphorus-rich biochar on the passivation, migration, and transformation of heavy metals in soil[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[3] 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 Z X, HUANG Y Z, ZHAO Z Q, 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.

[4] 施尧.磷基材料钝化修复重金属Pb、Cu、Zn复合污染土壤[D].上海:上海交通大学,2011.
SHI Y. Phosphorus-induced immobilization of Pb, Cu, and Zn in a multi-metal contaminated soil [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2011.

[5] 景琪,许炜怡,曾锐,等.污水处理厂再生水回用于农田灌溉的影响与效果[J].环境工程,2023,41(S1):584-591.
JING Q, XU W Y, ZENG R, et al. Influence and efficiency of reclaimed water from wastewater treatment plants (wwtps) for agricultural irrigation [J]. Environmental Engineering, 2023, 41 (S1):584-591.

[6] 李伟迪.太湖运河流域农田土壤重金属污染及健康风险评价研究[D].南京:南京师范大学,2020.
LI W D. Study on Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Farmland Soil in the Taige Canal Basin [D]. Nanjing: Nanjing Normal University,2020.

[7] CAI L M, JIANG H H, LUO J. Metals in soils from a typical rapidly developing county, Southern China: levels, distribution, and source apportionment [J]. Environmental Science and Pollution Research International,2019,26(19):19282-19293.

[8] 李红英.铜与氮、磷、钾配施对冬小麦产量和品质影响[D].郑州:河南农业大学,2006.
LI H Y. Effects of Combined Application of Copper with Nitrogen, Phosphorus and Potassium on Yield and Quality of Winter Wheat [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006.

[9] 赵丽芳.氮、磷肥中锌的添加方式对肥料养分有效性的影响[D].北京:中国农业科学院,2021.
ZHAO L F. The Influence of Zinc Addition Methods in Nitrogen and Phosphorus Fertilizers on the Nutrient Availability of Fertilizers [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2021.

[10] SUN B R, GAO Y Z, WU X, et al. The relative contributions of pH, organic anions, and phosphatase to rhizosphere soil phosphorus mobilization and crop phosphorus uptake in maize/alfalfa polyculture [J]. Plant and Soil, 2019, 447 (1-2): 117-133.

[11] LESS J T, GUAN D X, SESSA E, et al. Transfer of arsenic and phosphorus from soils to the fronds and spores of arsenic hyperaccumulator Pteris vittata and three non-hyperaccumulators [J]. Plant and Soil,2015,390(1-2):49-60.

[12] 郭光光.氮磷施用对蓖麻吸收、转运铜的影响及机制[D].武汉:华中农业大学,2017.
GUO G G. Influence and mechanism of copper uptake and transfer by costor under nitrogen, phosphorus application [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2017.

[13] 崔蕊.磷肥用量对铜污染土壤种植油菜和红麻的影响[D].武汉:华中农业大学,2022.
CUI R. Effect of phosphorus fertilizer dosage on the cultivation of rapeseed kenaf in cu-contaminated soils [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2022.

[14] JUANG K W, LO Y C, CHEN T H, et al. Effects of Copper on Root Morphology, Cations Accumulation, and Oxidative Stress of Grapevine Seedlings.[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2019,102(6):873-879.

[15] 管仁水.钙镁磷肥添加对水稻与丁香蓼间作条件下Cd富集转运及影响因素[D].南昌:江西农业大学,2023.
GUAN R S. Cd enrichment transport and influencing factors of calcium magnesium phosphate fertilizer supplementation between rice and Ludwigia prostrata Roxb [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2023.

[16] 桑金盛.苹果根际土壤铜的形态及其对幼树养分吸收和分配的影响[D].泰安:山东农业大学,2021.
SANG J S. Copper Speciation in the Rhizosphere of Apple and Its Effect on Nutrient Uptake and Distri bution in Young Trees [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2021.

[17] CHEN X X, LIU Y M, ZHAO Q Y, et al. Health risk assessment associated with heavy metal accumulation in wheat after long-term phosphorus fertilizer application [J]. Environmental Pollution,2020,262:114348.

[18] 罗一诺,张慕欣,高玉,等.旱地石灰性土壤上长期施磷对小麦籽粒铁锰铜锌含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(11):1894-1904.
LUO Y N, ZHANG M X, GAO Y, et al. Wheat grain Fe, Mn, Cu and Zn contents as affected by long-term P application in dryland calcareous soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2021,27(11):1894-1904.

[19] 罗杰.苎麻对铜的吸收分布与磷肥对铜胁迫的缓解效应研究[D].武汉:华中农业大学,2021.
LUO J. Study on the Absorption Distribution of Copper by Ramie and the Mitigation Effect of Phosphate Fertilizer on Copper Stress [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.

[20] 姚诗源.磷铁肥配施对蓖麻(Ricinus communis L.)生长和富集铜的影响及机制[D].武汉:华中农业大学,2019.
YAO S Y. Effect and mechanism of phosphorus and iron fertilizers application on the growth and accumulation of copper by castor (Ricinus communis L.) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2019.

[21] 杨洪岭.铜对三叶草发芽率、抗氧化酶及产量的影响[J].天津科技,2015,42(2):9-11.
YANG H L. Influence of Copper on Clovers in terms of Germination Rate, Antioxidant Enzymes and Production [J]. Tianjin Science & Technology,2015,42(2):9-11.

[22] 陈雪梅,王友保,姚婧,等.磷、铜及其相互作用对三叶草种子萌发与幼苗生长的影响[J].生态学杂志,2008(6):956-961.
CHEN X M, WANG Y B, YAO J, et al. Effects of phosphorus, copper, and their interaction on seed germination and seedling growth of Trifolium repens L[J]. Chinese Journal of Ecology,

2008(6):956-961.

[23] 刘洋.氮素营养调控小麦对铜胁迫的生理响应[D].雅安:四川农业大学,2017.
LIU Y. Physiological response to copper stress in wheat supplied with varying nitrogen[D]. Ya'an:Sichuan Agricultural University,2017.

[24] 肖美娟,尧波,张桂华,等.大气CO_2浓度升高和氮添加对镉污染下两种树木叶片元素含量及回收率的影响[J].热带亚热带植物学报,2023,31(4):473-484.
XIAO M J, YAO B, ZHANG G H, et al. Effects of Elevated Atmospheric CO_2 Concentration and Nitrogen Addition on Element Concentration and Resorption in Leaves of Two Tree Species Under Cadmium Pollution[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2023,31(4):473-484.

[25] 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 S Y, DONG H X, ZHAO M L, 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.

[26] DE VILLARROEL J R,CHANG A C,AMRHEIN C. Cd and Zn phytoavailability of a field-stabilized sludge-treated soil[J]. Soil Science,1993,155(3):197-205.

[27] 何振立.污染及有益元素的土壤化学平衡[M].北京:中国环境科学出版社,1998.

[28] 王显.乌鲁木齐市米东工业区周边农田土壤重金属调查及源解析[D].乌鲁木齐:新疆大学,2018.
WANG X. Investigation and Source Apportionment on Heavy Metal of Soils in Farmland around Midong Industrial Park of Urumqi City[D]. Urumqi:Xinjiang University,2018.

[29] JAFARNEJADI A R, SAYYAD G H, HOMAEE M, et al. Spatial variability of soil total and DTPA-extractable cadmium caused by long-term application of phosphate fertilizers, crop rotation, and soil characteristics[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2013,185(5):4087-4096.

[30] 庄国泰.我国土壤污染现状与防控策略[J].中国科学院院刊,2015,30(4):477-483.
ZHUANG G T. Current Situation of National Soil Pollution and Strategies on Prevention and Control[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2015,30(4):477-483.

[31] 周南华.化肥施用与农产品质量安全[J].西南农业学报,2004,17(1):126-130.
ZHOU N H. Fertilizer application and quality security of farm products[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2004,17(1):126-130.

[32] 鲁如坤,时正元,熊礼明.我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价[J].土壤学报,1992(2):150-157.
LU R K, SHI Z Y, XIONG L M.Cadmium Contents of Rock Phosphates and Phosphate Fertilizers of China and Their Effects on Ecological Environment[J]. Acta Pedologica Sinica,1992(2):150-157.

[33] 区惠平,刘昔辉,黄金生,等.广西典型红壤旱地施用钙镁磷肥对玉米产量及其镉累积的影响[J].生态学报,2014,34(18):5300-5305.
QU H P, LIU X H, HUANG J S, et al. Effect of calcium-magnesia phosphate fertilizer on maize yield and its cadmium accumulation in upland red soil in Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(18):5300-5305.

[34] LEVI-MINZI R, PETRUZZELLI G. The influence of phosphate fertilizers on Cd solubility in soil[J]. Water, Air, and Soil Pollution,1984,23(4):423-429.

[35] 倪中应,谢炜,章明奎.不同降镉措施降低水稻籽粒中镉积累的效果[J].中国稻米,2022,28(2):56-59.
NI Z Y, XIE W, ZHANG M K. Effects of Different Cadmium Reducing Measures on Decreasing Cadmium Content in Brown Rice[J]. China Rice,2022,28(2):56-59.

[36] 王朋超,孙约兵,徐应明,等.施用磷肥对南方酸性红壤镉生物有效性及土壤酶活性影响[J].环境化学,2016,35(1):150-158.
WANG P C, SUN Y B, XU Y M, et al. Effects of phosphorous fertilizers on Cd bioavailability and soil enzyme activities in south acidic red soil[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(1):150-158.

[37] 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.

[38] MATUSIK J, BAJDA T, MANECKI M. Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates[J]. Journal of Hazardous Materials,2008,152(3):1332-1339.

[39] THAWORNCHAISIT U, POLPRASERT C. Evaluation of phosphate fertilizers for the stabilization of cadmium in highly contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1):1109-1113.

[40] 姚胜勋,张超兰,杨惟薇,等.水分与磷肥对土壤重金属有效态的影响研究[J].西南农业学报,2015,28(5):2194-2198.
YAO S X, ZHANG C L, YANG W W, et al. Effect of Phosphate and Water Content on Availability Heavy Metals in Contaminated Soil[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2015,28(5):2194-2198.

[41] HONG C O, LEE D K, KIM P J. Feasibility of phosphate fertilizer to immobilize cadmium in a field[J]. Chemosphere, 2008,70(11):2009-2015.