

土壤调理剂对生姜硒镉积累和品质安全的影响

窠昂洋, 程艳, 杨倩, 涂书新

引用本文:

窠昂洋, 程艳, 杨倩, 涂书新. 土壤调理剂对生姜硒镉积累和品质安全的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(6): 1239-1249.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0656>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究

李心, 林大松, 刘岩, 焦位雄, 张丽

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1511-1520 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0802>

不同粒径贝壳粉对水稻吸收镉与硒的影响

潘丽萍, 谭骏, 刘斌, 邢颖, 黄雁飞, 陈锦平, 刘永贤

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2134-2140 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0244>

改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响

李松, 孙向阳, 李素艳, 马其雪, 刘源鑫, 周文洁

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1229-1235 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1182>

矿物-有机质复合调理剂对Pb污染土壤的改良效果

蔡如梦, 石林

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2438-2444 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0887>

外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响

王波, 张然然, 杨如意, 石晓菁, 苏楠楠, 朱濛, 咎树婷

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2710-2718 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0437>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

窦昂洋, 程艳, 杨倩, 等. 土壤调理剂对生姜硒镉积累和品质安全的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(6): 1239-1249.

DOU A Y, CHENG Y, YANG Q, et al. Effects of soil conditioner application on selenium and cadmium accumulation and quality safety of ginger[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(6): 1239-1249.



开放科学 OSID

土壤调理剂对生姜硒镉积累和品质安全的影响

窦昂洋¹, 程艳², 杨倩³, 涂书新^{1*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 武汉沃农肥业有限公司, 湖北 潜江 433133; 3. 湖北工业大学, 武汉 430064)

摘要:为明确土壤调理剂对重金属污染土壤上生姜的营养品质和安全性影响及作用机制,采用生姜土壤盆栽试验,比较研究了3种土壤调理剂(硅酸钾、麦饭石、贝壳粉)对土壤硒镉有效性以及生姜硒镉积累、生长发育和营养品质的影响。试验结果表明:3种土壤调理剂均能显著提高生姜硒含量,同时显著降低镉含量。与对照(不添加土壤调理剂)相比,施用0.2%硅酸钾调理剂效果最佳,分别使生姜地上部位和姜块硒含量提高了165.01%和111.36%,镉含量降低了71.96%和65.15%;另外,施用3种土壤调理剂可显著提高姜块产量、品质及养分吸收。与对照相比,产量提高了23.93%~67.67%,可溶性糖、可溶性蛋白和姜黄素含量分别提高了2.34%~6.00%、154.72%~602.83%和11.05%~33.43%,氮、磷、钾养分含量分别提高了10.28%~14.42%、24.62%~34.87%、28.81%~29.01%;施用3种土壤调理剂还可提高姜块过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性,降低丙二醛(MDA)含量;与对照相比,3种土壤调理剂增加土壤pH 0.35~0.53个单位,土壤有效态镉含量降低了16.92%~22.76%,有效态硒含量增加了3.60%~10.99%。研究表明,施用土壤调理剂能够降低土壤有效态镉含量、活化土壤有效态硒,从而降低生姜镉含量并提高硒含量和姜块营养品质,可实现镉污染土壤安全利用,保障生姜优质安全生产。

关键词:生姜;土壤调理剂;硒;镉;营养品质

中图分类号:S632.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)06-1239-11 doi:10.11654/jaes.2023-0656

Effects of soil conditioner application on selenium and cadmium accumulation and quality safety of ginger

DOU Angyang¹, CHENG Yan², YANG Qian³, TU Shuxin^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan Wonong Fertilizer Industry Ltd., Qianjiang 433133, China; 3. Hubei University of Technology, Wuhan 430064, China)

Abstract: To investigate the effects and mechanisms of soil conditioning agents on the nutritional quality and safety of ginger grown in heavy metal-contaminated soil, a ginger pot experiment was conducted. The effects of three soil conditioning agents (potassium silicate, maifanite, and shell powder) on the soil selenium and cadmium availability, as well as the accumulation, growth, and nutritional quality of ginger, were compared. The results showed that all three soil conditioning agents significantly increased the selenium content in ginger and effectively reduced the cadmium content. Specifically, compared to the control group, the application of 0.2% potassium silicate conditioning agent resulted in a 165.01% and 111.36% increase in selenium content in the aboveground part and rhizome of ginger, respectively. Cadmium content decreased by 71.96% and 65.15% in the aboveground part and rhizome, respectively. In addition, the application of the three soil conditioners significantly increased ginger yield, quality, and nutrient uptake. Compared to the control, the yield increased by 23.93% to 67.67%, whereas the levels of soluble sugar, soluble protein, and curcumin increased by 2.34% to 6.00%, 154.72% to 602.83%, and 11.05% to 33.43%, respectively. The nutrient levels of nitrogen, phosphorus, and potassium also increased by

收稿日期:2023-08-13 录用日期:2023-12-05

作者简介:窦昂洋(1996—),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事农业环境科学与工程研究。E-mail:844139966@qq.com

*通信作者:涂书新 E-mail:stu@mail.hzau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42277392);国家重点研发计划项目(2018YFC180030);湖北省技术创新专项重大项目(2017ABA154)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(42277392); National Key Research and Development Program of China(2018YFC180030); Technical Innovation Special Major Program of Hubei Province, China(2017ABA154)

10.28% to 14.42%, 24.62% to 34.87%, and 28.81% to 29.01%, respectively. Furthermore, the application of the three soil conditioners agents increased the activities of peroxidase and catalase in ginger, whereas reduced malondialdehyde content. Additionally, compared to the control group, the three soil conditioning agents increased soil pH by 0.35 to 0.53 and reduced the available cadmium content by 16.92% to 22.76%, and increased the available selenium content by 3.60% to 10.99%. In summary, the application of soil conditioning agents can reduce the availability of cadmium in soil and enhance the availability of selenium, thereby reducing cadmium content and increasing selenium content and nutritional quality in ginger. This approach can achieve safe utilization of cadmium-contaminated soil and ensure high-quality and safe ginger production.

Keywords: ginger; soil conditioner; selenium; cadmium; nutrient quality

生姜 (*Zingiber officinale* Roscoe) 是一种多功能的经济作物, 其富含优质的营养成分和功能物质, 是我国重要的种植、生产和出口农产品^[1]。适宜的土壤环境是优质生姜生产的必要条件。然而, 生姜种植规模和生产需求扩大、农药及化肥滥用、不合理施肥以及姜地连作引发的姜区土壤理化性质退化、矿物质养分力下降及重金属污染加重等一系列生态环境问题, 直接影响生姜生长和养分吸收, 降低姜块品质及产量, 加重重金属胁迫, 严重阻碍了生姜产业发展。当前, 土壤重金属污染已成为最严峻的环境问题之一。重金属污染物有不降解、毒性大、隐蔽性强等特点, 能够通过食物链在动植物体内蓄积, 从而威胁人类健康和农产品质量安全^[2]。据统计, 我国受重金属污染的耕地面积约 2×10^7 hm², 土壤污染点位超标率为 19.4%, 其中镉超标率为 7.00%, 致使粮食年损失量和污染量分别达到 1×10^7 t 和 1.2×10^7 t, 经济亏损 2×10^{10} 元以上^[3-4]。随着“镉米”“砷毒”“血铅”等一系列毒害事件频发, 重金属污染已成为土壤污染中备受关注的热点话题, 其修复技术也一直是国内外研究的热点和难点。

镉是环境中最典型的重金属污染物之一, 经土壤-植物系统转移和食物链富集威胁人类健康^[5-6]。目前, 治理土壤镉污染主要有两种途径: 一是将土壤中的镉去除或转移, 减少土壤总镉量; 二是将土壤镉原位固定在土壤中, 改变土壤镉赋存形态, 降低其迁移性和有效性^[7]。原位钝化是成本低、收效好、效率高的土壤镉污染治理修复技术, 其中, 土壤调理剂钝化修复措施受到广泛关注^[8]。大量研究表明, 土壤调理剂不仅能调节土壤 pH, 提高土壤有机质和营养元素含量, 降低土壤重金属迁移性和有效性从而减少作物的吸收, 还能改善作物农艺性状, 提高作物营养品质和产量, 增强作物抗性。例如: 李龙等^[9]向复合污染土壤中施用“润邦牌”土壤调理剂后发现, 土壤 pH 增加 0.90~1.10 个单位, 有效态镉含量减少了 23.7%~44.8%, 稻米镉含量降低了 35.6%~51.1%, 水稻增产了 2.00%~5.00%; 田中学等^[10]向镉污染土壤中分别施用

牡蛎壳、钾长石和白云石 3 种土壤调理剂后发现, 土壤 pH 增加, 有机质含量提高了 15.0%~55.9%, 土壤交换态镉含量显著降低了 63.6%~81.1%, 小油菜地上部分镉含量降低了 78.9%~83.9%, 生物量提高了 6.90~9.90 倍; 文典等^[11]向稻田重金属污染土壤中施用 4 种商用土壤调理剂后发现, 稻米镉含量降低了 18.0%~48.0%, 蛋白质含量提高了 6.90%~10.80%, 同时增强了稻米对矿质营养元素的吸收, 水稻增产 2.00%~6.00%; 孙瑶等^[12]的研究发现, 施用腐植酸类调理剂和化学调理剂均能增加土壤 pH、阳离子交换量及土壤碱解氮和速效钾含量, 促进苹果对矿质营养元素吸收, 从而提升苹果内在品质和产量。

硒是人和动物体内必需的营养元素之一, 具有抗癌解毒、抗氧化、增强免疫力等多种功能。硒与镉等重金属有拮抗作用, 能有效降低土壤重金属活性, 从而减少作物对重金属的吸收积累^[13-14]。相关研究表明, 摄入适量富硒农产品可增强人体自身免疫力和抗氧化性, 是一种安全、有效、健康的补硒方法^[15]。然而, 常年不科学及不合理的工、农业生产活动不仅造成严重的土壤重金属污染, 还致使土壤有效态硒大量流失, 加之富硒土壤稀缺且伴生镉等重金属污染^[5], 严重阻碍了富硒农业可持续发展。因此, 如何在达到农产品富硒的同时, 降低其对重金属的吸收已是富硒农业发展中急需解决的重要问题。

由于硒和一般阳离子重金属的土壤化学性质完全不同, 通过施用土壤调理剂改变土壤酸碱环境, 可以提高土壤硒活性而降低重金属生物有效性, 从而达到农作物硒含量增加而重金属吸收降低(富硒降镉)的良好效果。目前, 关于土壤调理剂的研究大多集中在对土壤硒或镉单方面生物有效性的影响, 鲜见报道同时对硒、镉有效性双重效应的研究, 特别是针对块茎作物生姜。综上, 本试验以镉污染土壤和生姜为研究对象, 通过盆栽开展 3 种土壤调理剂(硅酸钾、麦饭石、贝壳粉)对生姜硒镉积累、生长发育和营养品质影响的研究, 筛选生姜活硒降镉效果最佳的土壤调理

剂,旨在为生姜优质安全生产和土壤重金属污染修复提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2021年5—10月在华中农业大学盆栽场(30°46'35"N,114°36'23"E)进行。供试土壤选用湖北省大冶市某重金属镉污染农田土壤,为红灰泥土,属红色石灰土亚类红灰泥土土属。试验开始前,测定原始土壤基本理化性质为:pH 8.19,碱解氮84.00 mg·kg⁻¹,速效磷5.90 mg·kg⁻¹,速效钾42.48 mg·kg⁻¹,有机质41.53 g·kg⁻¹,总镉3.87 mg·kg⁻¹,有效态镉1.12 mg·kg⁻¹,总硒1.05 mg·kg⁻¹,有效态硒0.074 mg·kg⁻¹。

供试生姜(*Zingiber officinale* Roscoe)选用山东莱芜大姜,品种为山农一号,由湖北盈亮农业科技有限公司提供。

供试3种土壤调理剂分别为硅酸钾、麦饭石和贝壳粉,由华中农业大学环境污染与修复课题组配制。技术指标分别为:硅酸钾型土壤调理剂pH 9.0~11.0,主要成分SiO₂≥52.0%,未检测出镉和硒;麦饭石型土壤调理剂pH 8.0~10.0,主要成分SiO₂≥22.0%、CaO≥23.0%、MgO≥9.0%、K₂O≥6.0%、Cd≤0.20 mg·kg⁻¹,未检测出硒;贝壳粉型土壤调理剂pH 9.0~11.0,主要成分CaO≥40.0%、Cd≤0.30 mg·kg⁻¹,未检测出硒。3种土壤调理剂均添加了5%的黄腐酸。

1.2 试验设计

本试验为盆栽试验,设计3种土壤调理剂和空白对照共4种处理。具体试验处理和土壤调理剂用量如下:空白对照组(CK),不添加土壤调理剂;硅酸钾组(0.2%K),按土壤质量添加0.2%的硅酸钾型土壤调理剂;麦饭石组(1%M),按土壤质量添加1%的麦饭石型土壤调理剂;贝壳粉组(1%S),按土壤质量添加1%的贝壳粉型土壤调理剂。3种土壤调理剂的添加量依据课题组前期大田试验和盆栽试验的结果^[16-18]。

将供试土壤平铺自然风干,磨细过10目筛。2021年5月26日每盆装土5 kg。每千克土壤加入基肥0.20 g N、0.15 g P₂O₅、0.20 g K₂O,即每千克土壤中加入0.429 g 尿素(CH₄N₂O)、0.266 g Ca(H₂PO₄)₂·H₂O和0.370 g K₂SO₄,同时添加1 mL阿农微量元素储备液。调理剂处理按设计用量添加。将土壤调理剂和基肥与土壤分别混合均匀,浇自来水保持土壤水分(80%最大田间持水量),室温下放置一周。每个处理

重复3次,随机区组排列。

2021年6月3日上午采集大田生姜幼苗,挑选大小一致的幼苗,每盆栽种2株,当天完成移栽。保持温室遮阳通风,用自来水灌溉。半月后,姜苗出新苗。分别于6月28日、8月12日和9月26日进行3次追肥。每次追肥用量均为基肥施用量的10%,将肥料溶于水后等量施入各处理土壤中。

在2021年10月7日进行生姜成熟期取样。样品分为地上部和地下部两个部分,分别测定株高、根长、茎粗、叶绿素和鲜质量。每个部分再分为鲜样和干样。部分鲜样迅速用自来水和去离子水洗净,快速分装后放入盛有冰块的保温箱中,然后转存于-80℃超低温冰箱。剩余部分先用自来水将表面杂质清洗干净,再用去离子水润洗数次后擦干,105℃下杀青30 min,再于70℃下烘干至恒质量,称量各样品干质量,用粉碎机粉碎后备用。将盆钵土壤充分混匀后,取适量土壤样品,自然风干,磨细过筛,储存备用。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生姜生长参数测定

选取植株第三功能叶作为测量叶片,使用叶绿素仪(SPAD-502 Plus, Konica Minolta sensing, INC.)测定姜叶SPAD值,随后测定生姜株高、茎粗和根长,姜块洗净擦干后再测定鲜质量,以平均值作为每盆的实测值。

1.3.2 土壤化学元素测定

参照《土壤农化分析》^[19]中的方法进行土壤基本理化性质的测定。土壤pH测定采用水浸提-电位法,土水比为1:2.5;土壤碱解氮测定采用碱解-扩散法;土壤速效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;土壤速效钾测定采用乙酸铵交换-火焰光度法;土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法-外加热法。

参考《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997),准确称取0.5 g土壤样品,经HNO₃-HCl-HClO₄法消解后定容至25 mL,采用Agilent AA240Z石墨炉原子吸收分光光度计(安捷伦科技有限公司,美国)测定土壤全镉含量。参考《土壤中全硒的测定》(NY/T 1104—2006),准确称取0.5 g土壤样品,经HNO₃-HClO₄法消解冷却后加入50% HCl还原,采用AFS-9700原子荧光分光光度计(北京海光仪器公司,北京)测定土壤全硒含量。采用土壤标样黄红壤GBW07405(GSS-5a)进行分析质量控制。

于生姜成熟期取适量盆钵土壤样品,采用EDTA法(GB/T 23739—2009)提取土壤有效态镉,随后用Agilent AA240Z石墨炉原子吸收分光光度计测定其

含量;采用氢化物发生-无色散原子荧光光度法提取土壤有效态硒,随后用 AFS-9700 原子荧光分光光度计测定其含量^[20]。

1.3.3 生姜化学元素测定

参考《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014),准确称取 2 g 鲜姜,经 10 mL 混酸($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=9:1$)消化后定容至 25 mL,采用 Agilent AA240Z 石墨炉原子吸收分光光度计测定总镉含量,采用 200 Series AA 火焰原子吸收分光光度计(美国 Agilent 公司)测定总铁、锰、锌含量。参考《食品安全国家标准 食品中硒的测定》(GB 5009.93—2010),准确称取 2 g 鲜姜,经 10 mL 混酸($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=9:1$)消化冷却后加入 50% HCl 还原,随后定容至 25 mL,采用 AFS-9700 原子荧光分光光度计测定总硒含量。参考《植物中氮、磷、钾的测定》(NY/T 2017—2011),准确称取 0.2 g 姜粉,经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法消解后定容至 50 mL,采用 AA3 流动注射分析仪(德国 SEAL 公司)测定总氮和总磷含量,采用 M410 火焰光度计(英国 Sherwood 公司)测定总钾含量。采用植物标样杨树叶 GBW07604(GSS-3)进行分析质量控制。

1.3.4 生姜抗氧化性及品质指标测定

准确称取 0.5 g 新鲜姜叶于预冷的研钵中,加入 5 mL 预冷磷酸缓冲液,研磨样品呈匀浆,离心后取上清液即为抗氧化酶粗提液。姜叶样品中超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性测定采用氮蓝四唑光还原比色法^[21],过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚比色法^[22],过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性测定采用过氧化氢分解法^[23],丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸比色法^[24]。参考《植物生理生化实验原理和技术》^[25],准确称取 0.2 g 鲜姜,分别采用蒽酮比色法和考马斯亮蓝 G-250 法测定生姜可溶性糖和可溶性蛋白含量,采用紫外分光光度法分别测定生姜姜辣素^[26]和姜黄素含量^[27]。

1.4 数据统计分析

本试验所有数据均以 3 次平行试验的平均值作为最终结果,利用 Microsoft Excel 2019 和 Origin 2018 软件进行数据处理及制图,应用 SPSS 22 统计软件对试验数据进行统计分析,采用 Duncan 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。所有百分数数据作反正弦转换后再进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 生姜生长参数

为考察土壤调理剂对生姜生长发育的影响,于成熟期取样分析测定生姜各生长参数,结果如表 1 所示。在本试验条件下,施用 3 种土壤调理剂均促进生姜生长,各处理综合效果为 $0.2\%K > 1\%M > 1\%S$ 。与 CK 相比,3 种土壤调理剂处理使姜块鲜质量(产量)提高了 23.93%~67.67%,生姜株高、根长、茎粗和叶绿素含量分别提高了 22.22%~40.74%、20.48%~110.14%、11.51%~20.72% 和 25.64%~28.30%。

2.2 生姜镉含量

成熟期取样分析测定生姜镉含量的结果如图 1 所示。结果表明,施用 3 种土壤调理剂均显著降低生姜镉含量,综合比较各处理降镉效果为 $0.2\%K > 1\%M > 1\%S$ 。与 CK 相比,3 种土壤调理剂处理生姜地上部分镉含量降低 32.71%~71.96%;1%M、1%S 处理姜块镉含量分别降低了 59.98% 和 39.97%,0.2%K 处理为 65.15%,效果最佳。

2.3 生姜硒含量

试验结果表明,施用 3 种土壤调理剂均显著提高生姜硒含量,综合比较各处理增硒效果为 $0.2\%K > 1\%M > 1\%S$ (图 2)。与 CK 相比,在 3 种土壤调理剂处理下,姜块和地上部分硒含量分别提高了 0.005~0.012 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.038~0.087 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,提高比率分别为 43.10%~111.36% 和 71.19%~165.01%,其中以 0.2%K 处理效果最佳。

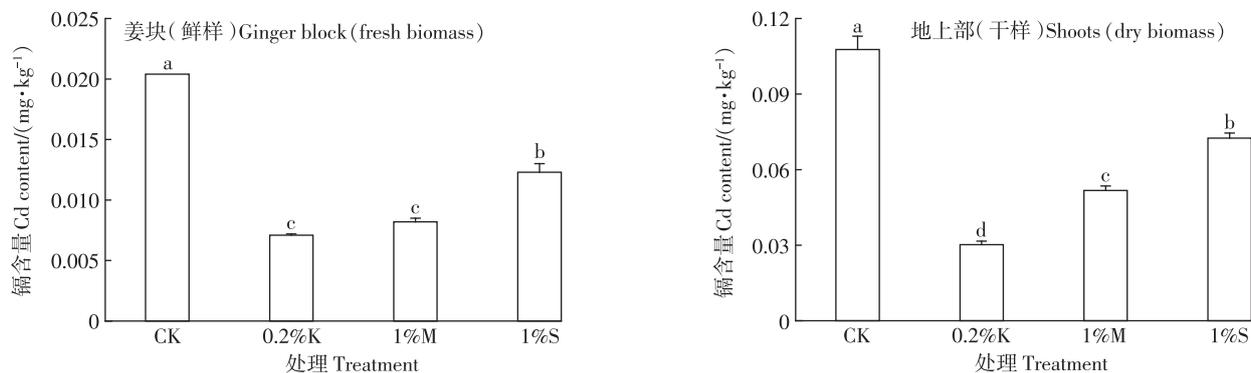
表 1 土壤调理剂对生姜生长和产量的影响

Table 1 Effects of soil conditioners on the growth and yield of ginger

处理 Treatment	株高 Height/m	叶绿素 SPAD	茎粗 Stem diameter/cm	根长 Root length/cm	鲜质量 Fresh weight/(g·株 ⁻¹)
CK	0.54±0.01c	37.67±0.58b	3.91±0.09d	9.57±0.68c	49.93±4.30d
0.2%K	0.76±0.01a	48.33±1.53a	4.72±0.04a	20.11±2.19a	83.72±4.65a
1%M	0.66±0.02b	47.67±1.15a	4.56±0.05b	13.27±1.39b	74.80±3.93b
1%S	0.76±0.02a	47.33±1.53a	4.36±0.04c	11.53±0.06bc	61.88±4.02c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level among treatments. The same below.



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level among treatments. The same below.

图1 土壤调理剂对生姜姜块和地上部镉含量的影响

Figure 1 Effects of soil conditioners on cadmium content in ginger block and shoots of ginger

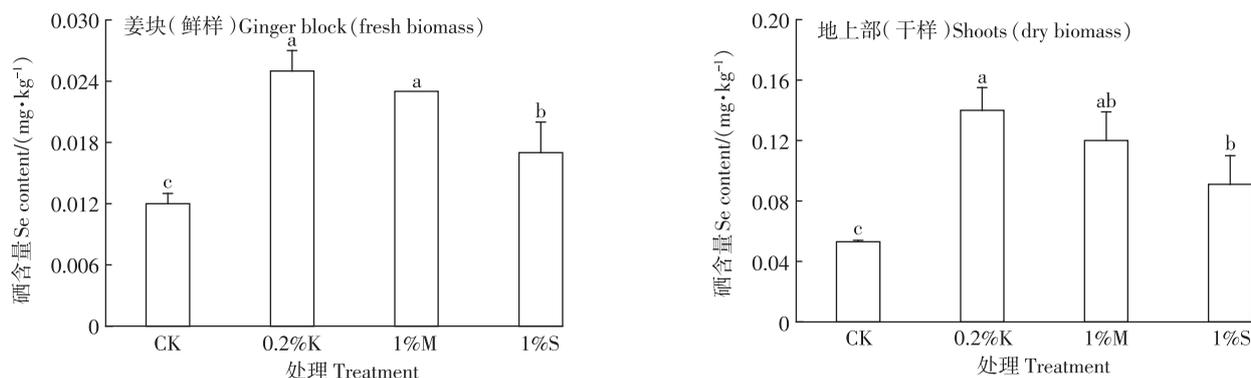


图2 土壤调理剂对生姜姜块和地上部硒含量的影响

Figure 2 Effects of soil conditioners on selenium content in ginger block and shoots of ginger

2.4 生姜养分含量

成熟期取样分析姜块养分元素含量的结果如表2所示。试验结果发现,施用3种土壤调理剂均能提高姜块氮、磷、钾、铁、锌含量,降低锰含量,各调理剂处理整体效果表现为0.2%K>1%M>1%S。3种土壤调理剂处理分别使姜块氮、磷、钾、锌含量较CK提高了10.28%~14.42%、24.62%~34.87%、28.81%~29.01%和22.97%~80.95%,锰含量降低了23.51%~32.83%,施用0.2%K处理还显著提高了姜块铁含量171.80%,总体效果以0.2%K处理最好。

2.5 生姜品质指标

为探究土壤调理剂提升生姜内在品质的效果,本试验测定分析了成熟期生姜各品质指标含量,结果如表3所示。与CK相比,0.2%K、1%M、1%S 3种土壤调理剂处理下,生姜可溶性糖、可溶性蛋白和姜黄素含量分别提高了2.34%~6.00%、154.72%~602.83%和11.05%~33.43%,同时对姜辣素含量也有一定的提

高,但影响不显著。各处理综合效果表现为0.2%K>1%M>1%S。

2.6 生姜抗氧化性

对姜叶抗氧化酶系统的分析结果表明,施用3种土壤调理剂均显著提升姜叶的抗氧化能力(图3)。与CK相比,姜叶SOD、POD、CAT活性,0.2%K处理分别提高了140.84%、66.63%和75.52%,1%M处理分别提高了56.56%、66.26%和57.67%。1%S处理使POD、CAT活性分别显著增加27.13%、13.64%,但不影响SOD活性。另外,0.2%K和1%M处理显著降低姜叶MDA含量,其中0.2%K是综合效果最好的处理。

2.7 土壤pH及有效态镉、硒含量

2.7.1 土壤pH

由图4分析可知,在本试验条件下,施用3种土壤调理剂均能提高土壤pH。与CK相比,3种土壤调理剂处理下土壤pH提高了0.35~0.53个单位,其中0.2%K处理提高土壤pH 0.53个单位,增幅效果最好。

表2 土壤调理剂对姜块养分元素含量的影响

Table 2 Effects of soil conditioners on nutrient element content of ginger

处理 Treatment	氮 N/(g·kg ⁻¹)	磷 P/(g·kg ⁻¹)	钾 K/(g·kg ⁻¹)	铁 Fe/(mg·kg ⁻¹)	锰 Mn/(mg·kg ⁻¹)	锌 Zn/(mg·kg ⁻¹)
CK	18.58±0.09b	1.95±0.06c	36.06±0.57b	13.51±0.63d	39.17±2.65a	3.57±0.29c
0.2%K	21.26±0.54a	2.63±0.07a	46.49±1.08a	36.72±0.35a	28.23±1.46b	6.46±0.02a
1%M	20.49±0.73a	2.43±0.13b	46.45±1.74a	14.92±0.03c	29.96±1.17b	4.39±0.36b
1%S	20.53±0.12a	2.59±0.10ab	46.52±1.73a	18.68±0.37b	26.31±1.09b	4.64±0.14b

表3 土壤调理剂对生姜品质的影响

Table 3 Effects of soil conditioners on the quality of ginger

处理 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar/%	可溶性蛋白 Soluble protein/(mg·g ⁻¹)	姜辣素 Gingerol/%	姜黄素 Ginger curcumin/(mg·g ⁻¹)
CK	5.22±0.24d	1.06±0.08d	3.14±0.06a	0.344±0.001d
0.2%K	11.22±0.02a	4.15±0.41b	3.17±0.04a	0.459±0.001a
1%M	9.84±0.17b	7.45±0.21a	3.26±0.09a	0.382±0.002c
1%S	7.56±0.06c	2.70±0.14c	3.25±0.11a	0.455±0.002b

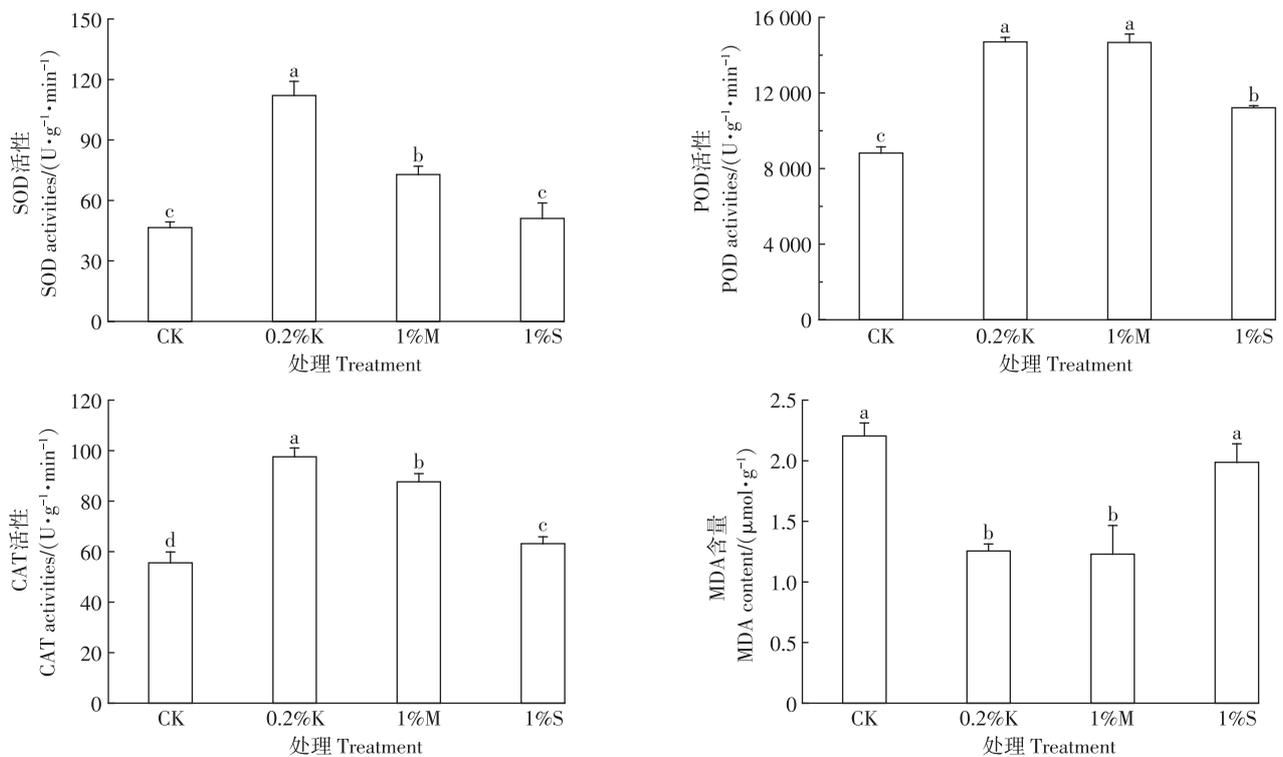


图3 土壤调理剂对姜叶抗氧化性的影响

Figure 3 Effects of soil conditioners on antioxidation of ginger leave

2.7.2 土壤有效态镉含量

为揭示土壤调理剂对土壤有效态镉含量的影响,取成熟期盆栽土壤样品,采用EDTA法测定土壤有效态镉含量,结果如图5所示。测定结果表明,施用3种土壤调理剂均显著降低土壤有效态镉含量。与CK相比,0.2%K、1%M、1%S处理分别使土壤有效态镉含量降低22.76%、18.31%和16.92%,结果说明3种土壤调理剂

均具有钝化土壤镉活性的作用,其中0.2%K处理效果最好。

2.7.3 土壤有效态硒含量

与土壤镉不同,施用3种土壤调理剂均提高土壤有效态硒含量(图6)。与CK相比,0.2%K、1%M、1%S处理下土壤有效态硒含量分别提高了7.00%、3.60%和10.99%,这说明本试验中的3种土壤调理剂均具有

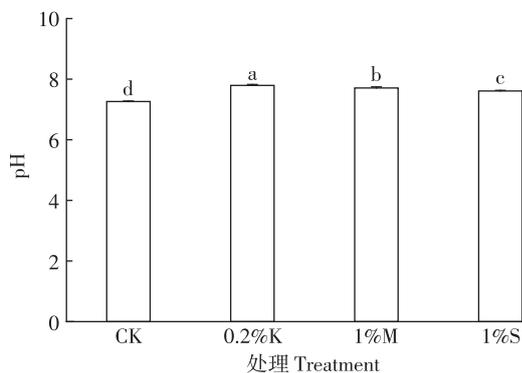


图4 土壤调理剂对土壤pH的影响

Figure 4 Effects of soil conditioners on soil pH

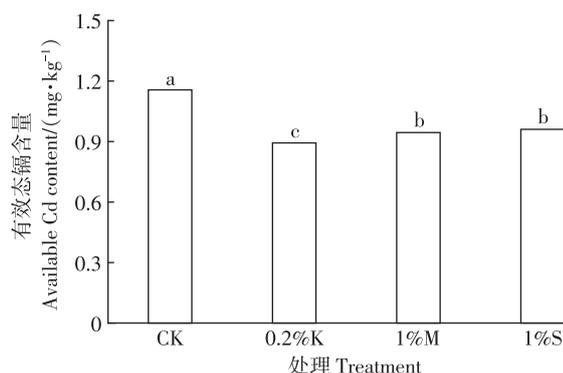


图5 土壤调理剂对土壤有效态镉含量的影响

Figure 5 Effects of soil conditioners on the content of available cadmium in soil

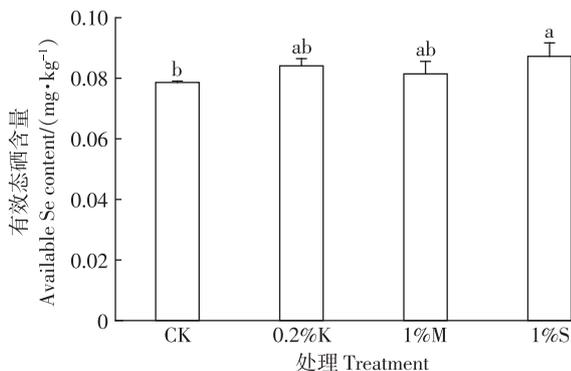


图6 土壤调理剂对土壤有效态硒含量的影响

Figure 6 Effects of soil conditioners on the content of available selenium in soil

活化土壤硒的作用。

3 讨论

3.1 土壤调理剂对土壤pH和镉、硒有效性的影响

本试验结果表明,与对照相比,施用3种土壤调理剂均可提高土壤pH(图4),降低土壤有效态镉含量(图5),而提高土壤有效态硒含量(图6),其中以硅酸

钾型的效果最好,其次是麦饭石型和贝壳粉型。本试验采用的3种土壤调理剂均为碱性,其中贝壳粉型以氧化钙为主,硅酸钾型和麦饭石型以硅酸盐为主,而麦饭石型还含有钙、镁氧化物等。此外,3种材料均添加了黄腐酸类有机物。显然,这3种材料提高土壤pH是预期的结果,这也与前人的研究结果相一致^[28-29]。

镉有效性受土壤pH、阳离子交换量以及有机质等诸多因素影响^[30]。因此,本试验结果的机理:一方面是土壤调理剂富含的 K_2SiO_3 、 $CaSiO_3$ 、 $MgSiO_3$ 和CaO等成分溶于水后在土壤中与水反应产生 OH^- 或聚合成硅酸凝胶与 H^+ 发生吸附置换反应,减少 H^+ 的浓度,导致土壤pH提高^[31-32];另一方面,硅酸盐与土壤 Al^{3+} 反应生成稳定的非晶形羟基铝硅酸盐,同时产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 置换出 H^+ ,从而提高土壤pH。

土壤pH提高致使阳离子重金属沉淀,降低重金属迁移性和生物活性,从而减少土壤重金属有效态含量^[32-36]。调理剂中的水合氧化物还能够加强土壤胶体对 Cd^{2+} 的吸附作用,硅、钙等功能元素也与镉存在拮抗作用,最终致使土壤溶液中 Cd^{2+} 浓度进一步降低。有研究报道,添加硅降低土壤重金属有效性最为明显^[37]。例如:韩超等^[38]向镉污染土壤中施用不同浓度的外源硅发现,在 $0\sim 0.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 用量范围内,施硅可改变土壤镉形态,降低土壤有效态镉含量,其中以 $0.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 用量效果最好;赵颖等^[39]通过水稻盆栽试验发现,施硅改变土壤中镉的形态,降低镉的生物有效性,其效果随硅用量的增加而提升。本研究也得到上述相似的研究结果,即3种土壤调理剂均可降低土壤有效态镉含量,钝化效果随硅用量的增加而提升,以硅酸钾型土壤调理剂处理效果最佳。

土壤硒酸盐是阴离子,与阳离子镉的土壤化学性质明显不同。本试验中,3种土壤调理剂均可提高土壤有效态硒含量,其中硅酸钾土壤调理剂的活化硒效果最佳。这是由于:一方面调理剂中的复合硅酸盐及活性有机质成分能使土壤pH升高,增加土壤表面负电荷,减弱土壤氧化物对硒的吸附、络合及沉淀,同时增强硒的甲基化,抑制硒酸盐的老化,促进土壤硒的迁移,进而提高土壤中硒的生物有效性^[40-41];另一方面,由于土壤水溶态硒含量与土壤pH呈极显著正相关,随着pH升高,水溶态硒含量显著增加,从而使土壤中有效态硒含量提高。此外,硅酸盐型土壤调理剂还可能会改善土壤结构和生物学性质,促进微生物的活性,使得土壤硒大量释放。同样麦饭石型、贝壳粉型两种土壤调理剂中的大量功能性元素及活性物质

也能提高土壤pH,降低土壤结合态硒的化学活性,促进土壤中硒酸盐化合物的溶解与释放,从而提高硒的有效性。

本试验结果显示硅酸钾型和麦饭石型两种土壤调理剂的活硒降镉效果最好,这可能与两种土壤调理剂主要功能物质是硅酸盐有关,其中硅酸钾型的有效硅含量最高,所以效果最佳,而贝壳粉型不含硅酸盐所以效果稍差。不同调理剂成分、含量及形态等差异可能导致不同的效果,其内在机制还有待进一步深入研究。

3.2 土壤调理剂对生姜镉、硒含量的影响

在本试验条件下,向镉污染土壤中施用3种含硅土壤调理剂均可降低生姜镉含量,其中以硅酸钾型调理剂降镉效果最佳。前已述及,通过施硅钙类物质改变土壤理化性质,使重金属沉积于土壤或根系周围以减少植物对其吸收,再者通过刺激植物产生酚类物质并螯合区隔重金属,降低植物对其吸收转移,提高抗氧化性清除活性氧,缓解重金属胁迫^[37]。本试验分析了主要原因:一是调理剂含有的硅酸盐及碱性氧化物材料降低了土壤镉的有效性,而提高了土壤硒的有效性,导致生姜镉含量下降而硒含量增加^[32,42-43];二是调理剂中的硅酸盐可在植物细胞壁上与镉形成沉淀,限制镉从根系向地上部的转运,进而降低镉对植物的毒害作用。相比之下,贝壳粉型调理剂主要依靠其钙功能氧化物,其效果表现略差。

3.3 土壤调理剂对生姜生长、营养品质和抗氧化性的影响

合理施用含多功能元素的土壤调理剂能有效改善土壤理化性质,增加土壤养分含量,提高肥料利用率,促进作物生长发育,提升作物营养品质和产量^[44-45]。例如:涂玉婷等^[46]向土壤中施用不同品种的硅钙钾镁肥后,土壤pH和养分含量增加,促进了香蕉生长,提高果肉维生素C、可溶性糖等品质含量,增加香蕉产量;谭青涛等^[47]通过大田试验发现施用硅钙钾镁肥可增加土壤pH,显著提高土壤养分含量,促进烟草生长和外观质量改善,提升烟叶营养品质。本试验施用富含硅、钙、钾、镁等营养元素的土壤调理剂在生姜上的应用效果与以上研究结果类似,表现为促进生姜生长(表1),提高生姜养分吸收能力(表2),改善生姜产量品质(表3)。

硅元素是促进生姜生长和养分吸收的关键元素。第一,硅可钝化土壤重金属,降低重金属有效含量,从而减少生姜对重金属的吸收并促进生长^[48];第二,硅

能改善土壤理化性质,增加土壤养分有效性,提升生姜根系活力,促进姜块对氮、磷、钾的吸收,提高生姜抗病、抗旱性,调节姜叶光合作用和蒸腾作用,增加生姜产量^[49];第三,硅与其他营养元素之间存在协同作用,这有利于姜块对中微量营养元素的吸收和转运。有关研究表明,在适量范围内,不同植株的生长及品质产量受硅肥水平的影响^[48]。杨淑清等^[50]对茶树喷施不同浓度的硅肥后发现,喷施 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硅肥有益于茶苗生长,显著提高夏茶游离氨基酸、可溶性糖等品质含量,增加茶叶产量。栗国栋等^[51]的研究表明,外源硅浓度在 $0\sim 2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,生菜叶宽和单株产量均随硅浓度的升高而增加,硅浓度在 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时生菜叶片还原性糖和维生素C含量分别达到极值。本试验设计的3种含硅土壤调理剂均取得与上述研究相似的结果,其中富含优质硅肥的硅酸钾型调理剂对生姜生长、养分吸收及品质产量提升最适宜。

植物受到重金属胁迫时会发生膜脂过氧化,致使产生 H_2O_2 、 $\text{O}_2\cdot^-$ 等活性氧自由基(Reactive oxygen species, ROS)对植物造成毒害作用,而植物体可利用SOD、POD、CAT等抗氧化酶系统来清除活性氧,缓解重金属毒害。达毒害水平的 Cd^{2+} 浓度可造成植物体受到氧化胁迫作用,抑制抗氧化酶活性,而提高MDA含量,导致细胞内酶保护系统发生抗氧化反应并使细胞发生膜脂过氧化^[52]。大量研究已经证实,硅可促进植株SOD、POD和CAT的协同作用,提高叶片SOD、CAT和POD活性,降低MDA含量,保证抗氧化酶活性维持在适宜水平,从而增强植株抗氧化性,清除体内活性氧,缓解重金属毒害^[33]。当植株受到重金属毒害较高时,适当提高硅的施用反而效果更佳。田露丹等^[53]通过盆栽试验得出,在不同浓度的镉胁迫下,施 $0\sim 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的硅均可提高水稻叶片SOD和CAT活性,降低MDA含量,缓解水稻受到的镉毒害作用,以 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硅处理效果最好;贾茜茹等^[54]对镉胁迫下黄瓜施用硅肥后发现,施 $0\sim 300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的硅可显著提高黄瓜叶片SOD、POD、CAT活性,降低MDA含量,明显改善黄瓜叶片的抗氧化酶系统,缓解重金属对黄瓜的毒害作用,以 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硅处理效果最好。本试验结果与上述研究结果一致,针对块茎作物生姜,3种含硅土壤调理剂均可提高姜叶SOD、POD、CAT活性,降低MDA含量(图3),减弱超氧化物对姜叶细胞的氧化性胁迫,缓解重金属对生姜的毒害,以适量的硅酸钾型调理剂防治生姜镉胁迫效果最佳,这在硅缓

解生姜镉胁迫的研究中也得到证实^[48]。

4 结论

(1)施用硅酸钾、麦饭石和贝壳粉3种土壤调理剂均可提高土壤pH,降低土壤镉生物有效性和姜块镉含量,同时激活土壤硒,促进其在生姜中积累,从而提高姜块硒含量。

(2)施用土壤调理剂可提高姜叶SOD、POD和CAT活性,降低MDA含量,减轻氧化应激,增强姜块抗性;同时促进姜对氮、磷、钾、铁和锌的吸收,提高可溶性糖、可溶性蛋白质和姜黄素的含量,从而提高姜产量和品质。

(3)硅酸钾型土壤调理剂有效硅含量最高,其降镉和增硒效果最好。

参考文献:

- [1] 吴曼,赵帮宏,宗义湘.世界生姜生产布局与贸易格局分析[J].北方园艺,2019(10):141-150. WU M, ZHAO B H, ZONG Y X. Analysis of world ginger production layout and trade pattern[J]. *Northern Horticulture*, 2019(10):141-150.
- [2] 周利军,武琳,林小兵,等.土壤调理剂对镉污染稻田修复效果[J].环境科学,2019,40(11):5098-5106. ZHOU L J, WU L, LIN X B, et al. Remediation of cadmium contaminated paddy fields using soil conditioners[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11):5098-5106.
- [3] WU G, KANG H B, ZHANG X Y, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1/2/3):1-8.
- [4] 庞荣丽,王瑞萍,谢汉忠,等.农业土壤中镉污染现状及污染途径分析[J].天津农业科学,2016,22(12):87-91. PANG R L, WANG R P, XIE H Z, et al. Analysis of cadmium pollution in agricultural soils and analysis of its way pollution[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2016, 22(12):87-91.
- [5] 王燕诗,李小峰,王征,等.胡敏素-赤铁矿复合物对外源添加镉污染富硒土壤的钝化[J].环境工程学报,2020,14(2):480-489. WANG Y S, LI X F, WANG Z, et al. Passivation effect of humin-hematite complexes on exogenous cadmium-contaminated selenium-enriched soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(2):480-489.
- [6] CHAIRAT T, PRAPAI D, GHOLAMREZA K, et al. Effect of microorganisms on reducing cadmium uptake and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 25(26):25690-25701.
- [7] 李心,林大松,刘岩,等.不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究[J].农业环境科学学报,2018,37(7):1511-1520. LI X, LIN D S, LIU Y, et al. Effects of different soil conditioners on cadmium control in cadmium-contaminated paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7):1511-1520.
- [8] 索琳娜,马杰,刘宝存,等.土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J].农业环境科学学报,2021,40(6):1141-1149. SUO L N, MA J, LIU B C, et al. Soil conditioner application status and application of risk research[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6):1141-1149.
- [9] 李龙,李咏梅,郭照辉,等.新型土壤调理剂对镉砷复合污染土壤修复效果的研究[J].湖南农业科学,2019,20(5):34-36. LI L, LI Y M, GUO Z H, et al. Remediation effects of a novel soil conditioner on cadmium and arsenic contaminated soil in early-season paddy field[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2019, 20(5):34-36.
- [10] 田中学,徐丽萍,王旭.土壤调理剂对小油菜镉吸收的影响[J].中国土壤与肥料,2018(1):94-100. TIAN Z X, XU L P, WANG X. Effects of soil amendments on the adsorption of Cd by small rape[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(1):94-100.
- [11] 文典,江棋,邓腾灏博,等.土壤调理剂对稻米中镉含量及其品质的影响[J].生态环境学报,2021,30(2):400-404. WEN D, JIANG Q, DENG T H B, et al. Effects of soil amendment on rice cadmium uptake and quality[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(2):400-404.
- [12] 孙瑶,马金昭,张培苹,等.土壤调理剂与灌溉互作对酸化苹果园产量、品质和土壤化学性质的影响[J].果树学报,2021,38(10):1681-1690. SUN Y, MA J Z, ZHANG P P, et al. Effects of soil conditioners and irrigation method on the yield, quality of fruit and soil chemical properties in apple orchards with acidified soils[J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(10):1681-1690.
- [13] WAN Y N, YU Y, WANG Q, et al. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: influence of different forms of selenium [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 133:127-134.
- [14] DING Y Z, WANG R G, GUO J K, et al. The effect of selenium on the subcellular distribution of antimony to regulate the toxicity of antimony in paddy rice[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(7):5111-5123.
- [15] ADADI P, BARAKOVA N V, MURAVYOV K Y, et al. Designing selenium functional foods and beverages: a review[J]. *Food Research International*, 2019, 120:708-725.
- [16] 窦昂洋,涂书新,熊双莲,等.两种含硒调理剂对生姜硒含量及营养品质的影响研究[J].核农学报,2023,37(6):1235-1243. DOU A Y, TU S X, XIONG S L, et al. Impact of two selenium-containing conditioners on the selenium content and nutritional quality of ginger [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(6):1235-1243.
- [17] 何纪强,程艳,蒋宏伟,等.硅酸钾及其与锰硫配施防控水稻复合重金属污染的效果[J].环境科学研究,2023,36(6):1199-1209. HE J Q, CHENG Y, JIANG H W, et al. Control effects of combined heavy metal pollution in rice by using silicate and its mixing of Mn/S [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(6):1199-1209.
- [18] 蒋宏伟,程艳,王章伟,等.含铁调理剂对花生抗砷镉污染胁迫能力的影响研究[J].核农学报,2023,37(8):1651-1659. JIANG H W, CHENG Y, WANG Z W, et al. Effect of iron modified conditioners on the Cd/As stressed antioxidant capability of peanuts[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(8):1651-1659.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.

- BAO S D. Agrochemical analysis of soil[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [20] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 上海不同地区土壤中硒的形态分布及其有效性研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 398-403. QU J G, XU B X, GONG S C. Study on speciation distribution and availability of selenium in different soils of Shanghai[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 398-403.
- [21] GE Y H, DUAN B, LI C Y, et al. Gamma-aminobutyric acid delays senescence of blueberry fruit by regulation of reactive oxygen species metabolism and phenylpropanoid pathway[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 240: 303-309.
- [22] LAGRIMINI L M. Wound-induced deposition of polyphenols in transgenic plants overexpressing peroxidase[J]. *Plant Physiology*, 1991, 96(2): 577-583.
- [23] REN Y F, HE J Y, LIU H Y, et al. Nitric oxide alleviates deterioration and preserves antioxidant properties in Tainong mango fruit during ripening[J]. *Environment and Biotechnology*, 2017, 58(1): 27-37.
- [24] GONZALEZ C M, CASANOVAS S S, PIGNATA M L. Biomonitoring of air pollutants from traffic and industries employing *Ramalina ecklonii* (Spreng.) Mey. and Flot. in Córdoba, Argentina[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 91(3): 269-277.
- [25] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [26] 张维勤. 姜辣素的测定方法[J]. 山东农业科学, 1991, 29(6): 11-14. ZHANG W Q. Determination of gingerol[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 1991, 29(6): 11-14.
- [27] 段雪芹. 姜黄属药用植物姜黄素的提取、含量测定及抗氧化活性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013: 20-28. DUAN X Q. Optimized extraction, quantitative evaluation and antioxidation in vitro of curcumins from herbal *Curcuma*[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2013: 20-28.
- [28] 陈海宁, 高文胜, 郑磊, 等. 硅钙钾镁肥与黄腐酸钾配施对酸化果园土壤化学性质及苹果产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(3): 82-87. CHEN H N, GAO W S, ZHENG L, et al. Effects of silicon-calcium-potassium-magnesium fertilizer combined with fulvic acid potassium on soil chemical properties, yield and quality of fruit in apple orchard with acidified soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(3): 82-87.
- [29] 赵首萍, 陈德, 叶雪珠, 等. 石灰、生物炭配施硅/多元素叶面肥对水稻Cd积累的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 361-368. ZHAO S P, CHEN D, YE X Z, et al. Effects of lime and biochar combined with silicon/multi-element foliar fertilizer on Cd accumulation in rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 361-368.
- [30] 高琳琳, DAOVE P, 鲍广灵, 等. 不同土壤调理剂对轻度镉污染稻田修复效果比较[J]. 中国土壤与肥料, 2022(2): 72-79. GAO L L, DAOVE P, BAO G L, et al. Comparison of remediation effects of different soil conditioners on paddy fields with mild cadmium pollution[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(2): 72-79.
- [31] 冀建华, 李絮花, 刘秀梅, 等. 硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸性和盐基离子动态变化的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 583-592. JI J H, LI X H, LIU X M, et al. Effects of fertilizers of calcium silicon magnesium potassium on the dynamics of soil acidity and exchangeable base cation in paddy field of southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 583-592.
- [32] 王宇霞, 郝秀珍, 苏玉红, 等. 不同钝化剂对Cu、Cr和Ni复合污染土壤的修复研究[J]. 土壤, 2016, 48(1): 123-130. WANG Y X, HAO X Z, SU Y H, et al. Remediation of heavy metal contaminated soil with different amendments[J]. *Soils*, 2016, 48(1): 123-130.
- [33] 黄衡亮. 有机硅缓解作物重金属毒害的效果和机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 6-8. HUANG H L. Effects and mechanisms of organosilicon in relieving heavy metal toxicity of crops[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 6-8.
- [34] CAPORAE A G, VIOLANTE A. Chemical processes affecting the mobility of heavy metals and metalloids in soil environments[J]. *Current Pollution Reports*, 2016, 2(1): 15-27.
- [35] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤pH对镉形态影响的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(3): 439-444. DOU W Q, AN Y, QIN L, et al. Advances in effects of soil pH on cadmium form[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 439-444.
- [36] HUANG H L, RIZWAN M, LI M, et al. Comparative efficacy of organic and inorganic silicon fertilizers on antioxidant response, Cd/Pb accumulation and health risk assessment in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255: 113146.
- [37] 王会方, 於朝广, 王涛, 等. 硅缓解植物重金属毒害机理的研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(3): 528-535. WANG H F, YU C G, WANG T, et al. The research progresses on the mitigative mechanism of silicon on heavy metal toxicity in plants[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science)*, 2016, 31(3): 528-535.
- [38] 韩超, 张浩, 申海玉, 等. 外源硅对土壤镉活性及小麦吸收镉的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(15): 38-41. HAN C, ZHANG H, SHEN H Y, et al. Influences of exogenous silicon on soil cadmium availability and cadmium uptake by wheat[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(15): 38-41.
- [39] 赵颖, 李军. 硅对水稻吸收镉的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(3): 59-64. ZHAO Y, LI J. Effect of silicon on cadmium uptake by rice[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(3): 59-64.
- [40] LI J, PENG Q, LIANG D, et al. Effects of aging on the fraction distribution and bioavailability of selenium in three different soils[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 2351-2359.
- [41] WANG D, ZHOU F, YANG W, et al. Selenate redistribution during aging in different chinese soils and the dominant influential factors[J]. *Chemosphere*, 2017, 182: 284-292.
- [42] 韩君, 梁学峰, 徐应明, 等. 黏土矿物原位修复镉污染稻田及其对土壤氮磷和酶活性的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(11): 2853-2860. HAN J, LIANG X F, XU Y M, et al. *In-situ* remediation of Cd-polluted paddy soil by clay minerals and their effects on nitrogen, phosphorus and enzymatic activities[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,

- 2014, 34(11):2853-2860.
- [43] 王兆双, 王典, 李洪亮, 等. 不同土壤调理剂对土壤硒的活化效应研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(4):953-958. WANG Z S, WANG D, LI H L, et al. Influence of different additives on selenium availability in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(4):953-958.
- [44] 李亚飞, 张翔, 常栋, 等. 不同土壤调理剂对土壤性质和烟叶产量、质量的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(6):1402-1410. LI Y F, ZHANG X, CHANG D, et al. Effects of different soil conditioners on soil properties and flue-cured tobacco yield and quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(6):1402-1410.
- [45] 陈士更, 张民, 丁方军, 等. 腐植酸土壤调理剂对酸化果园土壤理化性状及苹果产量和品质的影响[J]. 土壤, 2019, 51(1):83-89. CHEN S G, ZHANG M, DING F J, et al. Humic acid soil conditioner improved soil physicochemical properties, apple yield and quality in acidified orchard soil[J]. *Soils*, 2019, 51(1):83-89.
- [46] 涂玉婷, 彭智平, 黄继川, 等. 施用不同品种硅钙钾镁肥对香蕉产量、品质及土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(4):40-45. TU Y T, PENG Z P, HUANG J C, et al. Effects of different varieties of silicon-calcium-potassium-magnesium fertilizer on banana yield, quality and soil nutrients[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(4):40-45.
- [47] 谭青涛, 程云吉, 赵新峰, 等. 硅钙钾镁肥不同用量对土壤养分及烟叶品质的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10):25-29. TAN Q T, CHENG Y J, ZHAO X F, et al. Different dosages of silicon calcium potassium magnesium fertilizer affect soil nutrients and tobacco quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(10):25-29.
- [48] 张静. 硅肥对生姜镉汞胁迫的缓解效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019: 33-36. ZHANG J. Effect of silicon fertilizer on alleviating cadmium and mercury stress in ginger[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019: 33-36.
- [49] 张国芹. 硅对生姜生长及生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008: 9-13. ZHANG G Q. Effect of silicon on the growth and some physiological characteristics of ginger[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2008: 9-13.
- [50] 杨淑清, 张丽霞, 崔林海, 等. 喷施硅肥对茶树生长及硅素分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(4):712-721. YANG S Q, ZHANG L X, CUI L H, et al. Effects of silicon fertilizer on the growth and silicon partitioning in tea plant parts[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(4):712-721.
- [51] 栗国栋, 刘嘉兴, 石玉, 等. 外源硅对生菜生长、光合及品质特性的影响[J]. 北方园艺, 2021, 45(16):49-55. LI G D, LIU J X, SHI Y, et al. Effects of exogenous silicon on the growth, photosynthesis and quality characteristics of lettuce[J]. *Northern Horticulture*, 2021, 45(16):49-55.
- [52] ROMERO-PUERTAS M C, MCCARTHY I, SANDALIO L M, et al. Cadmium toxicity and oxidative metabolism of pea leaf peroxisomes[J]. *Free Radical Research*, 2016, 31:25-31.
- [53] 田露丹, 樊文华, 刘奋武, 等. 施硅对镉胁迫下生育前期水稻生长及其植株体内抗氧化酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(5):1176-1185. TIAN L D, FAN W H, LIU F W, et al. Effects of silicon application on growth and antioxidant system of rice in the pre-fertility period under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(5):1176-1185.
- [54] 贾茜茹, 刘奋武, 樊文华. 硅对Cd胁迫下黄瓜苗期光合及抗氧化酶系统的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4):321-326. JIA Q R, LIU F W, FAN W H. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidant enzymes of cucumber seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4):321-326.