中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

伴矿景天间作方式对辣椒根围土壤镉迁移与有效性的影响

王高飞，周　鹏，王永平，王　岩，林　杉，邢　丹

Influence of intercropping *Sedum plumbizincicola* with *Capsicum annum* on the migration and availability of soil cadmium

WANG Gaofei, ZHOU Peng, WANG Yongping, WANG Yan, LIN Shan, and XING Dan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210038

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铜绿假单胞菌对镉胁迫水稻苗期生长与镉积累的影响

Effects of *Pseudomonas aeruginosa* on the growth and cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedling under Cd stress

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(6): 884–891

外源磷输入对农区湿地土壤碳库有效性及周转特性的影响

Effect of exogenous phosphorus input on the availability and turnover characteristics of soil carbon pool in agro–riparian wetlands

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(10): 1433–1443

黄河三角洲盐渍土有机氮组成及氮有效性对土壤含盐量的响应

The response of soil organic nitrogen fractions and nitrogen availability to salinity in saline soils of the Yellow River Delta

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(8): 1397–1404

重金属污染土壤间作修复的研究进展

Advances in the intercropping remediation of heavy metal polluted soil

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(5): 890–902

土著AMF与氮形态对辣椒|菜豆间作系统植株氮利用及其影响因素研究

Effects of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen forms on plant nitrogen utilization and the influencing factors in a pepper–common bean intercropping system

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 245–254

间作作物菌根菌丝对红壤磷形态的影响

Effects of intercropping and AMF inoculation on phosphorus forms in red soils

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(11): 1624–1633

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 9 月 第 29 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2021, 29(9): 1604−1614

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210038

王高飞, 周鹏, 王永平, 王岩, 林杉, 邢丹. 伴矿景天间作方式对辣椒根围土壤镉迁移与有效性的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(9): 1604−1614

WANG G F, ZHOU P, WANG Y P, WANG Y, LIN S, XING D. Influence of intercropping *Sedum plumbizincicola* with *Capsicum annum* on the migration and availability of soil cadmium[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1604−1614

伴矿景天间作方式对辣椒根围土壤镉迁移与有效性的影响*

王高飞[1,2], 周 鹏[1], 王永平[1], 王 岩[1], 林 杉[3], 邢 丹[1**]

(1. 贵州省农业科学院辣椒研究所 贵阳 550000; 2. 贵州大学农学院 贵阳 550000;
3. 华中农业大学资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育重点实验室 武汉 430070)

摘 要: 为明确伴矿景天间作模式对辣椒植物根系周围土壤镉 (Cd) 迁移与可利用风险的影响, 于 2019 年在贵州省遵义市新蒲新区进行田间试验, 设置伴矿景天或辣椒单作、伴矿景天条带式间作辣椒 (间作 1)、伴矿景天交叉式间作辣椒 (间作 2)、伴矿景天混合式间作辣椒 (间作 3) 等 5 种种植模式, 收获期采集辣椒根系周围土壤样品, 测定土壤各形态 Cd 含量和土壤 pH、有机质、全量和有效氮磷钾以及球囊霉素 (GRSP) 含量。结果表明, 与辣椒单作相比, 间作 2 和间作 3 使辣椒根系周围土壤酸溶态 Cd 显著降低 39.6% 和 41.5% (P<0.05), 可还原态 Cd 含量显著降低 23.9% 和 29.0% (P<0.05)。同时也降低了土壤 Cd 迁移和植物可利用风险, 其中间作 2 和间作 3 处理土壤 Cd 迁移性分别降低 25.8% 和 34.2%, 可利用性分别降低 11.6% 和 26.9%。3 种伴矿景天间作方式显著提高了土壤易提取球囊霉素含量, 分别提高 24.5%、39.9% 和 40.6% (P<0.05); 间作 2 和间作 3 处理显著增加土壤总球囊霉素含量, 分别增加 51.7% 和 86.7% (P<0.05)。冗余分析表明, 土壤环境因子对土壤 Cd 迁移和可利用风险影响重要性排序为总提取球囊霉素>速效钾>pH>易提取球囊霉素>全钾>全磷>全氮>碱解氮>有效磷>有机质, 土壤总提取球囊霉素、速效钾是影响土壤 Cd 迁移性和可利用性的关键调控因子。综上所述, 伴矿景天间作措施显著降低了辣椒根系周围土壤 Cd 迁移和可利用风险, 其中交叉式间作和混合式间作效果优于条带式间作。

关键词: 间作; 辣椒; 伴矿景天; 镉; 迁移性; 可利用性

中图分类号: S641.3 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Influence of intercropping *Sedum plumbizincicola* with *Capsicum annum* on the migration and availability of soil cadmium*

WANG Gaofei[1,2], ZHOU Peng[1], WANG Yongping[1], WANG Yan[1], LIN Shan[3], XING Dan[1**]

(1. Institute of Pepper Research, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550000, China; 2. Agricultural College of Guizhou University, Guiyang 550000, China; 3. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

Abstract: A field experiment was conducted in Xinpu New District, Zunyi City, Guizhou Province, in 2019 to explore the effects of different *Sedum plumbizincicola* intercropping patterns on the migration and availability of cadmium (Cd) in the soil around the roots

* 国家特色蔬菜产业技术体系项目 (CARS-24-G-19) 和贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2018]2329, 黔科合平台人才 [2017]5709) 资助
** 通信作者: 邢丹, 主要研究方向为辣椒栽培管理。E-mail: 2004xingdan@163.com
王高飞, 主要研究方向为农业资源高效利用。E-mail: 320852915@qq.com
收稿日期: 2021-01-17 接受日期: 2021-04-02

* This study was supported by the National Characteristic Vegetable Industry Technology System Project of China (CARS-24-G-19) and Guizhou Province Science and Technology Planning Project (Qiankehe Support [2018]2329, Qiankehe Platform Talent [2017]5709).
** Corresponding author, E-mail: 2004xingdan@163.com
Received Jan. 17, 2021; accepted Apr. 2, 2021

of *Capsicum annum*. Five planting patterns were established: monoculture *S. plumbizincicola*, monoculture *C. annum*, stripe intercropping of *C. annum* with *S. plumbizincicola* (JZ1), cross intercropping of *C. annum* with *S. plumbizincicola* (JZ2), and mixed intercropping of *C. annum* with *S. plumbizincicola* (JZ3). Soil samples were collected around the *C. annum* roots at harvest, and the Cd content, soil pH, organic matter content, and contents of total and available nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), and content of glomalin (GRSP) were measured and analyzed. The results showed that, compared to *C. annum* monoculture, the contents of acid-soluble Cd and reducible Cd in the soil around the *C. annum* roots effectively decreased by 39.6% and 23.9% in the cross intercropping system with *S. plumbizincicola*, and 41.5% and 29.0% in mixed intercropping system with *S. plumbizincicola*, respectively. The risks of soil Cd migration and availability were also reduced. Stripe intercropping *C. annum* with *S. plumbizincicola* had no effect on Cd mobility and availability in the soil around the *C. annum* root system. The Cd migration of the crossing intercropping and mixed intercropping systems decreased by 25.8% and 34.2%, respectively, and the Cd availability decreased by 11.6% and 26.9%, respectively. The stripe, cross and mixed intercropping systems did not affect the contents of Cd in oxidizable and residual states, but significantly increased the content of easily extracted GRSP in the soil by 24.5%, 39.9%, and 40.6%, respectively. Cross intercropping *C. annum* with *S. plumbizincicola* and mixed intercropping treatments also significantly increased the total soil GRSP content by 51.7% and 86.7%, respectively. Redundancy analysis showed that the importance of the soil environmental factors on soil Cd migration and availability followed the order: total extracted GRSP > available potassium > pH > easily extractable GRSP > total potassium > total phosphorus > total nitrogen > alkaline hydrolyzed nitrogen > available phosphorus > organic matter. The extractable GRSP and available potassium from the soil were the key regulatory factors affecting soil Cd migration and availability. In summary, intercropping with *S. plumbizincicola* significantly reduced the risks of Cd migration and availability in the soil around the *C. annum* roots, and the effects of cross and mixed intercropping were better than that of stripe intercropping. These results provide a theoretical basis for better usage of farmland with low to medium levels of Cd.

Keywords: Intercropping; *Capsicum annum*; *Sedum plumbizincicola*; Cadmium; Mobility; Availability

镉 (Cd) 是典型的有毒有害、人体非必需的微量元素, 也是我国土壤污染最为严重的重金属元素[1-2]。Cd 的迁移性、生物可利用性与其在土壤中存在形态密切关联[3-5]。利用改进的 BCR 连续提取技术分析 Cd 形态特征, 其中酸溶态和可还原态的 Cd 较易被植物利用; 可氧化态较为稳定, 在氧化条件下可发生转化对生物具有潜在危害; 而残渣态与土壤结合较牢固, 不易被植物吸收利用, 其所占比例越高意味着生物可利用部分越少[6-9]。基于 Cd 赋存形态所占比例, 将土壤中 Cd 生物有效性分为可利用态 (酸溶态和可还原态之和)、中等利用态 (可氧化态) 和难利用态 (残渣态)[10]。因而, 可通过掌握土壤 Cd 赋存形态评估土壤环境中 Cd 迁移和可利用风险。

通常认为, 土壤 pH、有机质等化学性质影响 Cd 的存在形态[4,11]。土壤 pH 是影响 Cd 形态的最重要因素之一, 随着土壤 pH 升高可交换态 Cd 含量下降, 残渣态 Cd 含量上升[12-17]。土壤有机质能与 Cd^{2+} 形成具有不同化学和生物学的稳定性物质, 但其对 Cd 形态影响较为复杂[18-19]。值得注意的是, 近来研究发现球囊霉素相关土壤蛋白 (GRSP) 是土壤有机质重要组分, 在有机碳含量中占比高达 25% 以上[20-21]。GRSP 是菌根植物根系菌丝进入土壤分泌产生的一种糖蛋白, 对土壤理化性质具有一定影响, 并对土壤中重金属具有固定作用, 能够降低重金属的生物有效性[22-24]。土壤 pH 及有机质和 GRSP 含量等与宿主植物类型密切相关, 受耕作方式、环境胁迫等因素影响[20]。然而, 有关间作体系土壤环境中 GRSP 与 Cd 形态转变关系的机制尚不明确。

超积累植物与经济作物的间套作是植物吸取修复 Cd 污染土壤的一种常见实施方式, 可在修复过程中维持一定的经济产出。能凤娇等[25] 研究表明, 芹菜 (*Apium graveolens*) 与超积累植物伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*) 间作, 伴矿景天生长更旺盛, 土壤 Cd 含量降低 50%, 显著高于单作处理, 芹菜中 Cd 含量 (0.015 $mg \cdot kg^{-1}$) 也明显低于国家蔬菜限量标准 (0.2 $mg \cdot kg^{-1}$)。连续 8 年的田间试验研究表明[26], 伴矿景天和玉米 (*Zea mays*) 间作, 土壤中的 Zn 和 Cd 总含量分别降低 18.8% 和 85.4%, 修复效率较单作显著提高。但也有研究表明, 苋菜 (*Amaranthus cruetus*) 与 Cd 超富集植物伴矿景天间作提高土壤乙酸铵-Cd 含量[27]。同时有研究表明, 间作方式会对作物间的并存效应产生一定的影响[28]。由此可见, 伴矿景天与作物间作对土壤 Cd 含量的影响不但与作物种类有关, 同时对土壤不同形态镉含量影响不同, 而且又受间作方式的影响。

辣椒 (*Capsicum annum*) 作为特色优势经济作物, 具有富集 Cd 习性, 辣椒与 Cd 超积累植物——伴矿景天间作, 可降低土壤 Cd 含量。但间作方式对土壤 Cd 不同形态含量变化的影响, 以及这种变化与土壤化学性质、GRSP 的关联尚鲜见系统报道。因而, 本

研究通过辣椒与伴矿景天进行带状、交叉、混合 3 种间作, 分析各间作体系辣椒根系周围土壤 Cd 的形态和 GRSP 变化, 阐明伴矿景天间作对辣椒根系周围土壤 Cd 的作用机制, 探究土壤 Cd 的迁移转化机制, 为中低程度 Cd 污染农田更好利用伴矿景天修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验选取辣椒品种为‘辣研 201’, 由贵州省农业科学院辣椒研究所胡明文研究员课题组提供, 漂浮盘中进行漂浮辣椒育苗, 随时补充水分和养分, 待辣椒长出 4~5 片真叶时, 选择长势一致的幼苗进行移栽; 伴矿景天由中国科学院南京土壤研究所吴龙华研究员课题组提供, 于 2019 年 3 月至 9 月进行试验。

1.2 试验设计

试验地点位于贵州省遵义市新蒲新区, 属亚热带季风性湿润气候, 雨量充沛, 年均降水量 1200 mm。土壤类型为黄壤, 土壤 pH 5.51, 有机质 11.4 g·kg^{-1}, 全氮 1.78 g·kg^{-1}, 有效磷 29.7 mg·kg^{-1}, 速效钾 110 mg·kg^{-1}, 全 Cd 含量 0.77 mg·kg^{-1}。

试验设置伴矿景天单作、辣椒单作、伴矿景天条带式间作辣椒 (间作 1)、伴矿景天交叉式间作辣椒 (间作 2)、伴矿景天混合式间作辣椒 (间作 3), 共 5 种种植模式 (图 1), 3 个重复, 共计 15 个小区, 小区面积 50 m^2 (5 m×10 m)。辣椒单作、间作株距均为 40 cm, 行距均为 50 cm; 伴矿景天单作株距 20 cm, 行距 50 cm (图 1)。所有种植模式肥料用量相同, 氮、磷、钾肥用量分别为 450 kg(N)·hm^{-2}、225 kg(P_2O_5)·hm^{-2} 和 450 kg(K_2O)·hm^{-2}, 氮、磷、钾肥种类分别为尿素、磷酸二铵和硫酸钾。于 2019 年 5 月整地, 起垄前将氮肥、磷肥和钾肥作为基肥一次均匀撒入各小区。

待辣椒果实成熟时, 于 2019 年 9 月采集伴矿景天和辣椒根系周围土壤样品。以植物茎秆为中心, 用不锈钢土钻垂直向下取半径 5 cm 范围内、0~20 cm 表层土壤。每个小区随机选取 5 株, 土样混合, 将样品除杂、风干, 用四分法分为两份后, 分别过 2 mm 和 0.149 mm 尼龙筛, 备用。

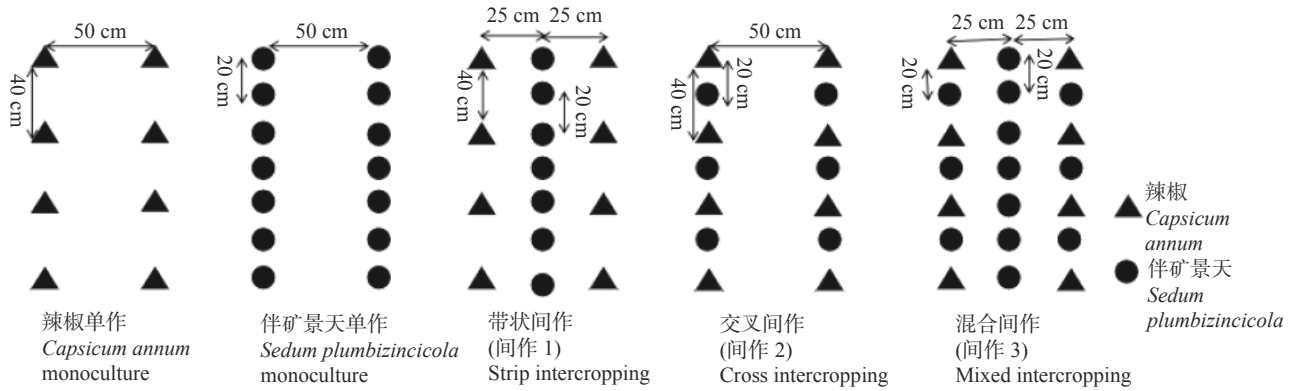

图 1 不同处理的矿伴景天与辣椒种植模式

Fig. 1 Intercropping patterns of *Capsicum annum* and *Sedum plumbizincicola* of different treatments

1.3 样品测定方法

土壤不同形态 Cd 含量: 参照改进的 BCR[29] 连续提取法, ICP-MS (上海赛默飞 iCAPQ 等离子体质谱仪) 测定各形态 Cd 含量。

土壤化学性质: 参照土壤农化分析方法[30], 土壤有机质含量采用重铬酸钾-外加热法 ($K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4 法) 测定, 全氮含量采用凯氏定氮法, 全磷采用钼锑抗比色法, 全钾采用火焰光度法, 碱解氮含量采用碱解扩散法测定, 有效磷采用钼锑抗比色法测定, 速效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定, pH 测定采用水浸提 (土水比 2.5∶1)、pH 计 (上海精密科学仪器有限公司, 雷磁 pHS 3C) 测定。

土壤 GRSP: 分 TE-GRSP (总提取球囊霉素)、EE-GRSP (易提取球囊霉素相关蛋白, 一种呈现活性和不稳定的球囊霉素相关蛋白), 含量根据 Wright 等[31] 描述方法提取测定。

1.4 土壤 Cd 迁移性和可利用性计算

$$\text{Cd可迁移性} = \text{酸溶态含量}/\text{总量} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Cd可利用性} = (\text{酸溶态含量} + \text{可还原态含量})/\text{总量} \times 100\%^{[32]} \quad (2)$$

1.5 数据处理与分析

采用 SPSS 24.0 软件对数据进行统计分析, LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。利用 Origin 9.1 绘制柱状图, Canoco 冗余分析。

2　结果与分析

2.1　间作对作物根系周围土壤不同形态 Cd 含量的影响

伴矿景天间作可降低辣椒根系周围土壤酸溶态和可还原态 Cd 含量, 但对可氧化态和残渣态 Cd 含量影响不显著 (图 2)。其中, 间作 1 对辣椒根系周围土壤酸溶态和可还原态 Cd 含量变化影响不显著, 而间作 2 和间作 3 显著降低了这两种形态 Cd 的含量。与辣椒单作相比, 间作 2 和间作 3 模式显著降低了土壤酸溶态 Cd 含量, 分别减少 39.6% 和 41.5%, 同时显著降低了土壤可还原态 Cd 含量, 分别减少 23.9% 和 29.0%。辣椒根系周围土壤酸溶态和可氧化态 Cd 含量 3 种间作模式之间无显著性差异, 可还原态 Cd 含量间作 1 显著高于间作 2 和间作 3, 残渣态 Cd 含量间作 3 显著高于间作 1 和间作 2。间作 2 和间作 3 也显著降低了伴矿景天根系周围土壤可还原态 Cd 含量, 但对可氧化态和残渣态 Cd 含量影响不显著。伴矿景天根系周围土壤酸溶态 Cd 含量间作 2 显著低于间作 1, 可还原态 Cd 含量间作 1 显著高于间作 2 和间作 3, 可氧化态和残渣态 Cd 含量 3 种间作模式之间无显著性差异。

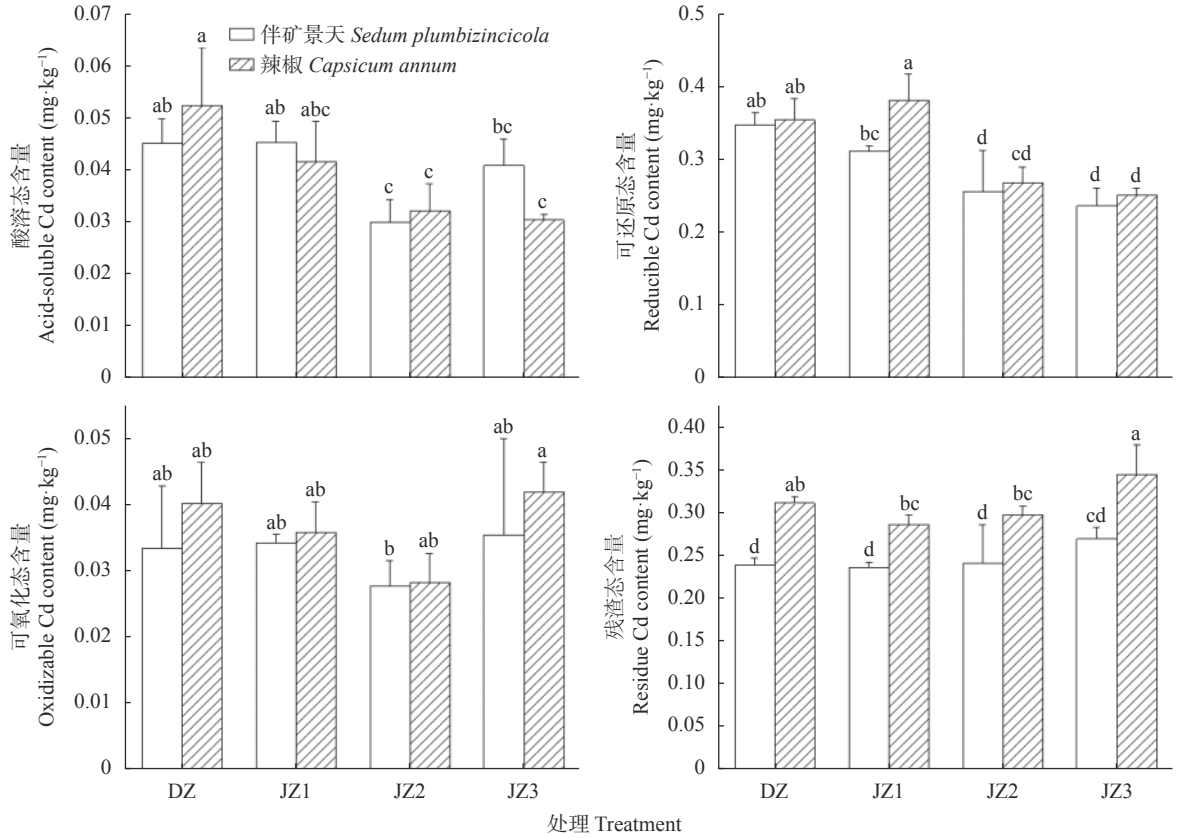

图 2　伴矿景天和辣椒不同种植方式下土壤 Cd 形态变化

Fig. 2　Changes of soil Cd forms under different planting patterns of *Capsicum annum* and *Sedum plumbizincicola*

DZ: 单作; JZ1: 带状间作 (间作 1); JZ2: 交叉间作 (间作 2); JZ3: 混合间作 (间作 3)。图中不同小写字母表示同一植物不同种植方式间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。DZ: monoculture; JZ1: stripe intercropping; JZ2: cross intercropping; JZ3: mixed intercropping. Different lowercase letters indicate significant differences among different planting patterns for the same plant at $P<0.05$ level.

2.2　间作对作物根系周围土壤 Cd 迁移和可利用风险影响评估

伴矿景天与辣椒的各种间作模式均降低了辣椒根系周围土壤 Cd 迁移和可利用风险 (图 3)。其中, 间作 1 对土壤 Cd 迁移和可利用风险影响不显著, 而间作 2 和间作 3 显著降低了这两种风险。与辣椒单作相比, 间作 2 和间作 3 模式使辣椒根系周围土壤 Cd 可迁移性分别显著降低 25.8% 和 34.2%, 使土壤 Cd 可利用性分别降低 11.6% 和 26.9% 。3 种间作模式间辣椒根系周围土壤 Cd 迁移性无显著性差异, 间作 2 和间作 3 的 Cd 可利用性均显著低于间作 1。间作对伴矿景天根系周围土壤 Cd 迁移性影响不显著, 而间作 2 和间作 3 显著降低了伴矿景天根系周围土壤 Cd 可利用性。

2.3　间作对作物根系周围土壤化学性质的影响

伴矿景天与辣椒各种间作模式显著增加土壤有

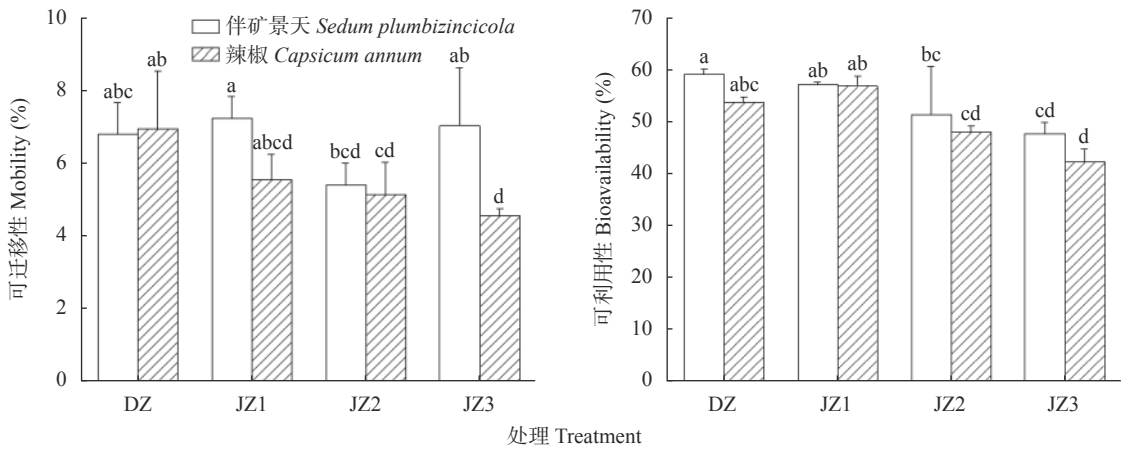

图 3 伴矿景天和辣椒不同种植方式对土壤 Cd 迁移和 Cd 可利用的影响

Fig. 3 Effects of planting patterns of *Capsicum annum* and *Sedum plumbizincicola* on the migration and bioavailability of soil Cd

DZ: 单作; JZ1: 带状间作 (间作 1); JZ2: 交叉间作 (间作 2); JZ3: 混合间作 (间作 3)。图中不同小写字母表示不同植物在不同处理间 $P<0.05$ 水平上差异显著。DZ: monoculture; JZ1: stripe intercropping; JZ2: cross intercropping; JZ3: mixed intercropping. Different lowercase letters indicate significant differences among different planting patterns of different plants at $P<0.05$ level.

机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾含量, 但显著降低全钾含量, pH 变化并无明显差异。与辣椒单作土壤中的有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾含量相比, 间作 1 分别增加 43.4%、79.6%、51.3%、45.2%、261.3% 和 107.7%, 间作 2 分别增加 85.1%、68.5%、23.1%、99.3%、146.8% 和 74.7%, 间作 3 分别增加 65.6%、57.4%、6.41%、111.6%、262.9% 和 112.3%。与辣椒单作土壤全钾相比, 间作 1、间作 2 和间作 3 分别降低 10.3%、20.6% 和 12.9%。辣椒根系周围土壤化学性质的变化 3 种间作方式之间相比无明显规律。间作显著提高了伴矿景天根系周围土壤 pH, 与伴矿景天单作相比, 间作对伴矿景天根系周围土壤有机质、全氮无显著性影响, 而全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾的变化无明显规律 (表 1)。

2.4 间作对作物根系周围土壤 GRSP 变化的影响

伴矿景天和辣椒的各间作模式有效增加辣椒根系周围土壤球囊霉素含量 (图 4)。与单作相比, 间作 1 显著降低 TE-GRSP 含量, 而间作 2 和间作 3 显著增加 TE-GRSP 含量, 间作 1 的 TE-GRSP 含量比单作显著降低 12.2%, 而间作 2 和间作 3 比单作显著增加 51.7% 和 86.7%。辣椒根系周围土壤 TE-GRSP 含量间作 2 和间作 3 显著高于间作 1。间作 1 和间作 2 对伴矿景天根系周围土壤 TE-GRSP 含量无显著影响, 间作 3 显著增加了伴矿景天根系周围土壤 TE-GRSP 含量。

间作 1、间作 2 和间作 3 显著增加 EE-GRSP 含量。与辣椒单作相比, 间作 1、间作 2 和间作 3 辣椒根系周围土壤 EE-GRSP 含量分别显著增加 24.5%、39.9% 和 40.6%。辣椒根系周围土壤 EE-GRSP 含量

表 1 伴矿景天和辣椒不同种植方式对土壤化学性质的影响

Table 1 Effects of planting patterns of *Capsicum annum* and *Sedum plumbizincicola* on soil chemical properties

处理 Treatment		pH	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($g\cdot kg^{-1}$)	全磷 Total phosphorus ($g\cdot kg^{-1}$)	全钾 Total potassium ($g\cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Available nitrogen ($mg\cdot kg^{-1}$)	有效磷 Olsen phosphorus ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($mg\cdot kg^{-1}$)
单作 Single	S	7.07±0.27a	13.7±1.8ab	0.82±0.01b	0.89±0.01cd	15.1±0.4ab	49.7±2.1c	10.1±0.2d	140±4.0d
	P	7.69±0.06b	7.7±0.84c	0.54±0.06c	0.78±0.01ef	15.5±1.3a	30.1±2.1d	6.2±0.6e	95±9.0e
间作1 Intercropping 1	S	7.66±0.36b	14.4±2.2a	0.76±0.02b	1.10±0.10b	13.7±0.1cd	66.3±9.5a	25.7±0.7a	163±16bcd
	P	7.63±0.08b	11.0±1.3b	0.97±0.19a	1.20±0.03a	13.9±0.5cd	43.7±5.3c	22.4±0.0b	197±12a
间作2 Intercropping 2	S	7.58±0.05b	11.2±0.58b	0.78±0.04b	0.73±0.09f	12.7±0.6de	53.4±5.3bc	10.0±0.0d	152±8.0cd
	P	7.71±0.06b	14.2±0.32a	0.91±0.09ab	0.96±0.02c	12.3±0.2e	60.0±3.0ab	15.3±0.6c	166±9.0bc
间作3 Intercropping 3	S	7.61±0.02b	12.0±0.86b	0.80±0.06b	0.73±0.01f	14.3±0.2bc	47.6±8.4c	14.0±0.6c	180±17ab
	P	7.71±0.03b	12.7±2.0ab	0.85±0.04ab	0.83±0.01de	13.5±0.8cde	63.7±0.7a	22.5±2.4b	201±20a

间作1: 条带式间作; 间作2: 交叉式间作; 间作3: 混合式间作。S为伴矿景天, P为辣椒。同列数据后不同字母表示在$P<0.05$水平差异显著。Intercropping 1: stripe intercropping; Intercropping 2: cross intercropping; Intercropping 3: mixed intercropping. S is *Sedum plumbizincicola* and P is *Capsicum annum*. Different letters after mean values in the same column indicate significant differences among different planting patterns of different plants at $P<0.05$ level.

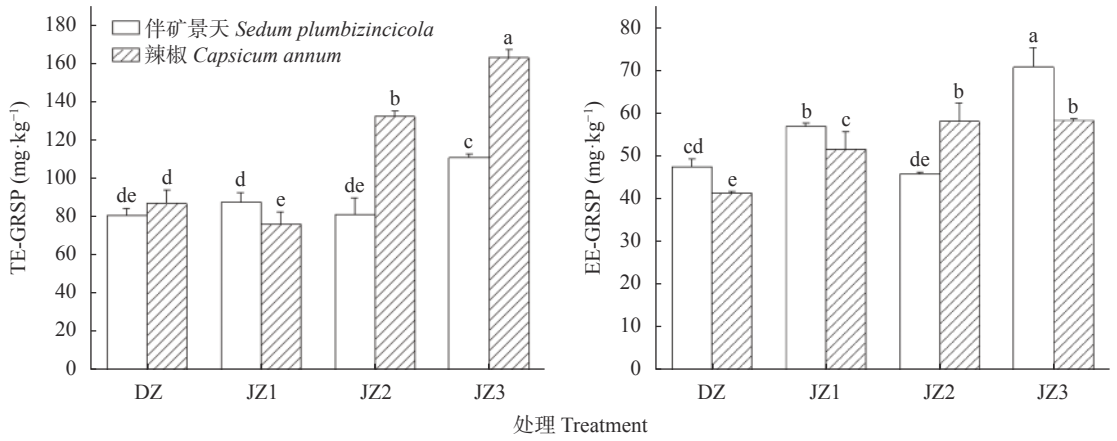

图 4　伴矿景天和辣椒不同种植方式对土壤总提取球囊霉素 (TE-GRSP)、易提取球囊霉素 (EE-GRSP) 相关蛋白含量影响

Fig. 4　Effects of planting patterns of *Capsicum annum* and *Sedum plumbizincicola* on contents of soil total extraction of globulin (TE-GRSP) and easily extracted globulin (EE-GRSP)

DZ: 单作; JZ1: 带状间作 (间作 1); JZ2: 交叉间作 (间作 2); JZ3: 混合间作 (间作 3)。图中不同小写字母表示不同植物在不同处理间 $P<0.05$ 水平上差异显著。DZ: monoculture; JZ1: stripe intercropping; JZ2: cross intercropping; JZ3: mixed intercropping. Different lowercase letters indicate significant differences among different planting patterns of different plants at $P<0.05$ level.

间作 2 和间作 3 均显著高于间作 1。间作 2 对伴矿景天根系周围土壤 EE-GRSP 含量无显著影响, 间作 1 和间作 3 均显著增加伴矿景天根系周围土壤 EE-GRSP 含量。

2.5　矿伴景天与辣椒间作下土壤 Cd 迁移和可利用性与土壤性质的关系

选取土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、总提取球囊霉素、易提取球囊霉素共计 10 个环境因子与土壤 Cd 迁移性、可利用性进行 RDA 分析, 得到环境因子对土壤 Cd 迁移性、可利用性差异的解释量, 结果如表 2 所示。排序轴第 1 轴和第 2 轴的特征值分别为 0.5471 和 0.1522, 即前两轴环境因子累计解释 Cd 迁移性和可利用性特征为 69.93%。土壤 Cd 迁移性、可利用性与环境因子前 2 个排序轴的相关性分别为 0.8735 和 0.7334, 对土壤 Cd 迁移性、可利用性与环境因子关系的累计解释量为 100.00%。表明前两轴能较好地反映土壤 Cd 迁移性、可利用性与环境因子关系, 且主要由第 1 轴决定。

通过第 1 轴和第 2 轴的解释量得到土壤 Cd 迁移性、可利用性与环境因子的 RDA 二维排序图, 如图 5 所示。实心箭头表示土壤 Cd 迁移性和可利用性, 空心箭头表示土壤环境因子。空心箭头连线的长度表示土壤 Cd 迁移、可利用性与环境因子间的相关程度, 箭头连线越长表示因子间关联性越强, 土壤环境因子箭头连线在土壤 Cd 迁移性、可利用性箭头连线上的垂直投影越长 (余弦值越大), 其对相应的土壤 Cd 迁移性或可利用性影响越大。箭头连线与排序轴的夹角代表该因子与排序轴相关性的大小, 夹角越小, 相关性越大。

由图 5 可知, pH、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、有效钾 (AK) 和总提取球囊霉素 (TE-GRSP)、易提取球囊霉素 (EE-GRSP) 箭头连线较长, 且 TP、TK 与 Cd 迁移性和可利用性箭头方向一致呈正相关关系, 其余方向相反呈负相关, 对土壤 Cd 迁移性和可利用性均有较强的影响作用。其中, TK 与 Cd 迁移性和可利用性方向一致且夹角较小, 呈显著正相关关系, 说明全钾对土壤 Cd 迁移性、可利用性存在显著的正效应。而 TE-GRSP、AK 分别与土壤 Cd 迁移性、可利用性呈高度负相关。

RDA 二维图仅反映出土壤环境因子与土壤 Cd 迁移性、可利用性间存在相关性, 难以量化土壤环境因子对土壤 Cd 迁移性、可利用性的贡献程度。为此, 对环境因子进行蒙特卡洛置换检验 (表 3), 各

表 2　土壤 Cd 迁移性和可利用性与土壤化学性质和球囊霉素含量的冗余分析

Table 2　RDA sequencing results of soil Cd mobility and availability and soil chemical properties and globulin contents

参数 Statistic	第1轴 Axis 1	第2轴 Axis 2	第3轴 Axis 3	第4轴 Axis 4
土壤特征值 Eigenvalues	0.5471	0.1522	0.1701	0.1307
变异的累积解释量 Explained variation (cumulative)	54.71	69.93	86.93	100.00
相关性 Pseudo-canonical correlation	0.8735	0.7334	0.0000	0.0000
累积解释量 Explained fitted variation (cumulative)	78.23	100.00		

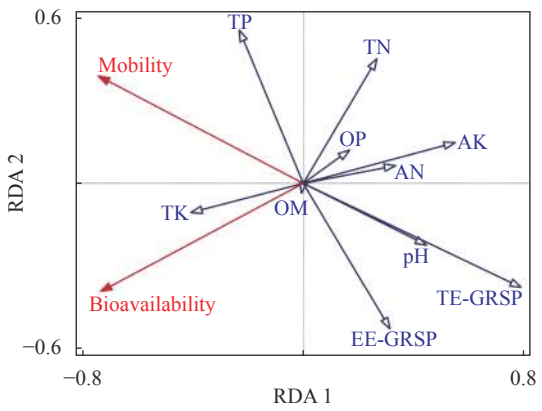

图 5 土壤化学性质、球囊霉素与 Cd 迁移性、可利用性的冗余度分析

Fig. 5 Redundancy analysis of soil chemical properties and glomalin content and the mobility and availability of Cd

OM: 有机质; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; AN: 碱解氮; OP: 有效磷; AK: 速效钾; TE-GRSP: 总提取球囊霉素; EE-GRSP: 易提取球囊霉素。OM: organic matter; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; TK: total potassium; AN: available nitrogen; OP: Olsen phosphorus; AK: available potassium; TE-GRSP: total extraction of globulin; EE-GRSP: easily extracted globulin.

表 3 土壤化学性质与球囊霉素的显著性检验结果和重要性排序

Table 3 Significance and importance of soil chemical properties and glomalin content

指标 Index	重要性排序 Order of importance	解释量 Explains (%)	*F*	*P*
TE-GRSP	1	36.3	12.6	0.002
AK	2	16.9	4.5	0.024
pH	3	11.7	2.9	0.076
EE-GRSP	4	9.6	2.3	0.12
TK	5	9.3	2.2	0.108
TP	6	7.6	1.8	0.162
TN	7	7.0	1.7	0.216
AN	8	6.2	1.4	0.224
OP	9	1.8	0.4	0.634
OM	10	<0.1	<0.1	0.994

TE-GRSP: 总提取球囊霉素; AK: 速效钾; EE-GRSP: 易提取球囊霉素; TK: 全钾; TP: 全磷; TN: 全氮; AN: 碱解氮; OP: 有效磷; OM: 有机质。TE-GRSP: total extraction of globulin; AK: available potassium; EE-GRSP: easily extracted globulin; TK: total potassium; TP: total phosphorus; TN: total nitrogen; AN: available nitrogen; OP: Olsen phosphorus; OM: organic matter.

指标对土壤 Cd 迁移性和可利用性重要性排序为 TE-GRSP>AK>pH>EE-GRSP>TK>TP>TN>AN (有效氮)>OP (有效磷)>OM (有机质), 其中 TE-GRSP 对土壤 Cd 迁移性和可利用性的影响达极显著水平 ($P<0.01$), AK 达显著水平 ($P<0.05$), 解释量分别为 36.3% 和 16.9%, 其余指标的影响不显著, 解释量也较小。说明土壤 TE-GRSP、AK 是影响土壤 Cd 迁移性和可利用性的较关键的因子。

3 讨论

3.1 重金属超积累植物间作方式对土壤 Cd 迁移性与可利用性的影响

我国土壤受 Cd 等重金属污染的耕地面积达 2000 hm^2[33]。伴矿景天是一种 Cd 的超积累植物[34], 与辣椒间作能够降低辣椒根系周围土壤酸溶态和可还原态 Cd 含量, 但对其可氧化态和残渣态 Cd 含量影响不显著。与单作相比, 交叉式间作 (间作 2)、混合式间作 (间作 3) 显著降低了酸溶态和可还原态 Cd 含量。Deng 等[26] 通过连续 8 年的田间试验研究表明, 伴矿景天和玉米间作, 土壤中的 Cd 总含量降低 85.4%, 修复效率较单作显著提高, 本研究结果与之相一致。本试验显示, 间作 2 和间作 3 模式显著降低了辣椒根系周围土壤酸溶态和可还原态 Cd 含量; 但间作 1 对辣椒根系周围土壤酸溶态和可还原态 Cd 含量变化影响不明显, 其可能原因在于本研究中交叉式和混合式间作, 植物间距为 20 cm, 条带式间作植物行间距为 25 cm。也即间作 1 与间作 2、间作 3 相比辣椒与伴矿景天根系相距较远, 这种间距差异可能导致伴矿景天植物根系没有对辣椒根系周围土壤的元素吸收产生大的影响。有研究表明, 不同间作方式对超积累植物生长和重金属吸收的影响各异[35]。也有研究表明, 间作试验中植物种植密度、不同植物根系的位置关系对于间作的效果有重要影响[36]。如但春凤等[37] 通过玉米与紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 间作研究了不同间作距离对土壤化学性质的影响, 发现不同的间作模式对土壤化学性质的影响存在一定差异。张艳等[38] 通过大田试验研究了甘薯 (*Dioscorea esculenta*)/玉米不同间作方式对土壤养分、酶活性的影响, 发现甘薯、玉米间作 4∶1 条带比栽培模式具有间作优势, 较单作显著提高了土壤全氮、有机质含量, 促进了作物对土壤养分的吸收以及土壤脲酶、过氧化氢酶的活性。姚远等[39] 的研究表明, 花生 (*Arachis hypogaea*) 与玉米 4∶1、4∶2 间作模式下土壤硝酸还原酶活性、根系活力在各个时期均高于 5∶3 间作模式。本研究结果也表明, 伴矿景天与辣椒间作对辣椒根系周围土壤不同形态 Cd 含量产生明显影响, 同时对不同形态 Cd 含量的影响还与间作方式有关。

Cd 在土壤-植物系统中的迁移转化能力主要取决于土壤对 Cd 的吸附性能[40]。土壤 Cd 迁移性与可利用性越高说明越易被植物所吸收。本研究表明, 伴矿景天与辣椒间作有效降低辣椒根系周围土壤 Cd 迁移性和可利用性。其原因可能在于伴矿景天根

际的内生细菌对于促进土壤 Cd 等重金属有效性的增加及伴矿景天促进土壤对 Cd 的吸附作用[41]。间作 1 对辣椒根系周围土壤 Cd 迁移性和可利用性影响不明显, 但间作 1、间作 2、间作 3 下辣椒根系周围土壤 Cd 迁移性和可利用性表现出下降的趋势, 也即间作 1>间作 2>间作 3。这可能是由于伴矿景天根系较浅[42], 大田条件下, 伴矿景天根系对辣椒根系生长区域的重金属有效性的影响及辣椒-伴矿景天根系吸收重金属的影响可能较小, 而间作 2、间作 3 模式下, 辣椒与景天根系相距较近且景天数量较多。这种差异表明伴矿景天与辣椒间作距离和伴矿景天数量会对辣椒根系周围土壤 Cd 迁移性和可利用性产生影响, 未来可侧重于适宜的间作距离的探索。

3.2 间作方式下土壤化学性质与 GRSP 变化对土壤 Cd 迁移和可利用风险的影响

间作条件下, 植物既有种内相互作用又有种间相互作用, 是改善土壤养分有效性, 提高植物对养分利用率的一种有效措施[43]。本研究表明, 伴矿景天与辣椒间作能有效增加根系周围土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾以及球囊霉素含量, 这可能是由于间作模式下辣椒以及伴矿景天根系相互影响, 使根系分泌物种类、数量有所变化, 能分泌一些对微生物有益的酶和生物调节剂等物质来吸引微生物, 进而对土壤结构的形成、有机质的分解及土壤养分循环产生影响[44]。蒙秋霞等[45] 通过大樱桃 (*Cerasus* spp.) 幼树与不同瓜菜作物间作, 研究了间作对土壤理化性质、微生物区系的影响, 结果表明: 不同间作处理土壤全氮、硝态氮、全磷、有效磷含量和 pH、CEC 呈上升趋势, 土壤真菌含量也均有不同程度提高, 这与本研究结果相似。伴矿景天与辣椒间作降低了根系周围土壤全钾含量, 而 pH 无明显变化。其原因可能在于伴矿景天与辣椒间作时, 可能因竞争养分, 产生更多的有机分泌物来活化土壤中的养分, 而低分子有机酸是根系分泌物的主要成分, 低分子有机酸与 Cd 形成螯合物[46], 使得土壤中酸溶态和可还原态 Cd 更易被伴矿景天吸收, 从而使土壤中残留的 Cd 含量降低。其中间作 2、间作 3 显著增加了辣椒根系周围土壤 TE-GRSP 含量和 EE-GRSP 含量, 间作 1 显著增加了辣椒根系周围土壤 EE-GRSP 含量。而球囊霉素相关土壤蛋白 (GRSP) 是土壤有机质的重要组成部分, 可以提高土壤团聚体的水稳定性, 对调节土壤中生物化学转换以及保持土壤碳、氮、磷循环起到重要作用[47]。不少研究表明, GRSP 能够吸附土壤中的重金属离子, 螯合土壤中的有毒元素, 从而有效固定土壤中的重金属[48-49]。因此, 在伴矿景天与辣椒间作条件下, 间作植物可通过影响土壤化学性质进而影响土壤 Cd 迁移性和可利用性, 其中机理有待进一步研究。

4 结论

1) 伴矿景天交叉式间作辣椒以及混合式间作辣椒能显著降低辣椒根系周围土壤酸溶态和可还原态 Cd 含量, 而间作方式对可氧化态和残渣态 Cd 含量影响都不显著。

2) 伴矿景天条带式间作辣椒对辣椒根系周围土壤 Cd 迁移性和可利用性影响不明显, 而伴矿景天交叉式间作辣椒以及混合式间作辣椒显著降低了辣椒根系周围土壤 Cd 迁移性和可利用性。从降低土壤 Cd 迁移和可利用风险的角度看, 伴矿景天交叉式间作辣椒和混合式间作辣椒要优于伴矿景天条带式间作辣椒。

3) 冗余分析表明, 土壤 Cd 迁移性、可利用性差异主要受 TE-GRSP 和 AK 的负调控, 在生产上可适当通过调节土壤总提取球囊霉素含量以及速效钾含量进而影响土壤 Cd 迁移性和可利用性风险。

参考文献　References

[1] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822−2833
CHEN W X, LI Q, WANG Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2822−2833

[2] HU B F, SHAO S, NI H, et al. Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level[J]. Environmental Pollution, 2020, 266: 114961

[3] 刘清, 王子健, 汤鸿霄. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展[J]. 环境科学, 1996, 17(1): 89−92
LIU Q, WANG Z J, TANG H X. Research progress in heavy metal speciation and toxicity and bioavailability of heavy metals[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1996, 17(1): 89−92

[4] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499−1502
HAN C M, WANG L S, GONG Z Q, et al. Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12): 1499−1502

[5] 王蕊, 陈明, 陈楠, 等. 基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比: 以龙岩市适中镇为例[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4348−4359
WANG R, CHEN M, CHEN N, et al. Comparison of soil heavy metal ecological risk assessment based on total and form: A case study of Shizhong Town, Longyan City[J]. Environmental

Science, 2017, 38(10): 4348−4359

[6] 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 等. 典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1067−1075
LI R Z, JIANG Y M, PAN C R, et al. Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in stream sediments from a typical nonferrous metals mining city[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1067−1075

[7] 郭鹏然, 雷永乾, 蔡大川, 等. 广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 684−691
GUO P R, LEI Y Q, CAI D C, et al. Characteristics of speciation and evaluation of ecological risk of heavy metals in sewage sludge of Guangzhou[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 684−691

[8] 王利军, 卢新卫, 雷凯. 宝鸡城市街尘、土壤及河流沉积物重金属形态迁移特征[J]. 城市环境与城市生态, 2011, 24(1): 22−26
WANG L J, LU X W, LEI K. Speciation and transfer of heavy metals in street dust, soil and river sediment of Baoji City[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2011, 24(1): 22−26

[9] 杨新明, 庄涛, 韩磊, 等. 小清河污灌区农田土壤重金属形态分析及风险评价[J]. 环境化学, 2019, 38(3): 644−652
YANG X M, ZHUANG T, HAN L, et al. Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the farmland soil from the sewage irrigated area of Xiaoqing River[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(3): 644−652

[10] 麻冰涓, 王海邻, 李小超, 等. 河南省武陟县大田土壤重金属形态分布及潜在生态风险评价[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 363−367
MA B J, WANG H L, LI X C, et al. Fractional distribution and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soil, Wuzhi, Henan[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(4): 363−367

[11] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析方法及形态分布的影响因素[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 503−512
GUAN T X, HE H B, ZHANG X D, et al. The methodology of fractionation analysis and the factors affecting the species of heavy metals in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(2): 503−512

[12] 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 等. 土壤pH值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(6): 79−83
YANG X M, REN G M, LI L X, et al. Effect of pH value on heavy metals form of soil and their relationship[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(6): 79−83

[13] 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

[14] 刘佳丽, 王祖伟, 张辉. 模拟降水对碱性盐化土壤中镉的淋滤及形态变化的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1974−1978
LIU J L, WANG Z W, ZHANG H. Simulated rainfall leaching cadmium and cadmium fraction changes in soils[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1974−1978

[15] 罗文贱, 张政勤, 陈勇, 等. 连续解吸中离子强度对可变电荷土壤和高岭石体系pH的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 146−154
LUO W J, ZHANG Z Q, CHEN Y, et al. Effect of ionic-strength change on the system pH of variable charge soils and kaolinite during successive desorption[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 146−154

[16] CAPORALE 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

[17] YU H Y, LIU C P, ZHU J S, et al. Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: The effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value[J]. Environmental Pollution, 2016, 209: 38−45

[18] 王浩, 章明奎. 有机质积累和酸化对污染土壤重金属释放潜力的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(3): 538−541
WANG H, ZHANG M K. Effects of organic matter accumulation and acidification on release potential of heavy metals from polluted soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(3): 538−541

[19] 宋波, 曾炜铨. 土壤有机质对镉污染土壤修复的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 1018−1024
SONG B, ZENG W Q. Effects of organic matter on the remediation of cadmium-contaminated soil — A review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(4): 1018−1024

[20] 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 634−642
WANG J, ZHOU Z Y, LING W T. Distribution and environmental function of glomalin-related soil protein: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 634−642

[21] 肖玖军, 邢丹, 毛明明, 等. AM真菌对桑树根围土壤团聚体的影响机制[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 773−782
XIAO J J, XING D, MAO M M, et al. Mechanism of arbuscular mycorrhizal fungal affecting soil aggregates in rhizosphere of mulberry (*Morus alba*)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 773−782

[22] GILLESPIE A W, FARRELL R E, WALLEY F L, et al. Glomalin-related soil protein contains non-mycorrhizal-related heat-stable proteins, lipids and humic materials[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(4): 766−777

[23] WU Z P, MCGROUTHER K, HUANG J D, et al. Decomposition and the contribution of glomalin-related soil protein (GRSP) in heavy metal sequestration: Field experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: 283−290

[24] 仲召亮, 王文杰, 王琼, 等. 松嫩平原农业区土壤理化性质与真菌代谢产物——球囊霉素相关土壤蛋白的关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2274−2280
ZHONG Z L, WANG W J, WANG Q, et al. Correlation between soil physicochemical properties and fungi-derived glomalin-related soil proteins in agricultural region of Songnen Plain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(8): 2274−2280

[25] 能凤娇, 吴龙华, 刘鸿雁, 等. 芹菜与伴矿景天间作对污泥农用锌镉污染土壤化学与微生物性质的影响[J]. 应用生态学

报, 2013, 24(5): 1428−1434
NENG F J, WU L H, LIU H Y, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* and *Apium graceolens* on the soil chemical and microbiological properties under the contamination of zinc and cadmium from sewage sludge application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1428−1434

[26] DENG L, LI Z, WANG J, et al. Long-term field phytoextraction of zinc/cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies[J]. International Journal of Phytoremediation, 2016, 18(2): 134−140

[27] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 轮间作对伴矿景天和苋菜生物量及Cd含量的影响[J]. 广东农业科学, 2012, 39(13): 35−37
TANG M D, AI S Y, LI M J, et al. Effects of interplanting-rotation on growth and Cd concentration of *Sedum plumbizincicola* and *Amaranthus cruetus*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(13): 35−37

[28] 蔡倩, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西半干旱区玉米大豆间作模式对作物干物质积累分配、产量及土地生产力的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(5): 909−920
CAI Q, SUN Z X, ZHENG J M, et al. Effects of corn and soybean intercropping patterns on dry matter accumulation and distribution, yield and land productivity in semiarid areas of western Liaoning[J]. Chinese Agricultural Sciences, 2021, 54(5): 909−920

[29] 邓晓霞, 米艳华, 黎其万, 等. 利用改进的BCR法和Tessier法提取稻田土壤中Pb、Cd的对比研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(9): 64−68
DENG X X, MI Y H, LI Q W, et al. Comparative study on extraction of Pb and Cd from paddy soils by modified BCR method and tessier method[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(9): 64−68

[30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
BAO S D. Agronomic Analysis of Soil[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000

[31] WRIGHT S F, UPADHYAYA A, BUYER J S. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(13): 1853−1857

[32] TIWARI K K, SINGH N K, PATEL M P, et al. Metal contamination of soil and translocation in vegetables growing under industrial wastewater irrigated agricultural field of Vadodara, Gujarat, India[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, 74(6): 1670−1677

[33] 张云, 王丹媚, 王孝源, 等. 外源茉莉酸对菊芋镉胁迫下光合特性及镉积累的影响[J]. 作物学报, 2015, 17(4): 1−15
ZHANG Y, WANG D M, WANG X Y, et al. Effects of exogenous jasmonic acid on photosynthetic characteristics and cadmium accumulation of *Jerusalem artichoke* under cadmium stress[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 17(4): 1−15

[34] 卢一富, 李真理, 阮心玲, 等. 铅冶炼污染石灰性土壤上冬小麦间作伴矿景天的探讨[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1686−1692
LU Y F, LI Z L, RUAN X L, et al. Preliminary investigation of intercropping of wheat with Cd hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* on calcareous, lead smelting contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(9): 1686−1692

[35] LIANG H M, LIN T H, CHOU J M, et al. Model evaluation of the phytoextraction potential of heavy metal hyperaccumulators and non-hyperaccumulators[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(6): 1945−1952

[36] GOVE B, HUTCHINSON J J, YOUNG S D, et al. Uptake of metals by plants sharing a rhizosphere with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. International Journal of Phytoremediation, 2002, 4(4): 267−281

[37] 但春凤, 王家豪, 黄莉娟, 等. 玉米/紫花苜蓿间作对土壤化学性质的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020, (14): 97−102
DAN C F, WANG J H, HUANG L J, et al. Effects of corn/alfalfa intercropping on soil chemical properties[J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary, 2020, (14): 97−102

[38] 张艳, 郭书亚, 尚赏, 等. 甘薯/玉米不同间作方式对土壤养分、酶活性及作物产量的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(8): 1234−1238
ZHANG Y, GUO S Y, SHANG S, et al. Effects of different intercropping methods of sweet potato/corn on soil nutrients, enzyme activity and crop yield[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(8): 1234−1238

[39] 姚远, 刘兆新, 刘妍, 等. 花生、玉米不同间作方式对花生生理性状以及产量的影响[J]. 花生学报, 2017, 46(1): 1−7
YAO Y, LIU Z X, LIU Y, et al. Effect of different peanut-maize intercropping patterns on peanut growth and yield[J]. Journal of Peanut Science, 2017, 46(1): 1−7

[40] 逄雅萍, 黄爽, 杨金忠, 等. 生物碳促进水稻土镉吸附并阻滞水分运移[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 107−114
PANG Y P, HUANG S, YANG J Z, et al. Promotion of biochar on adsorption of cadmium and retardation on water transport in paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(11): 107−114

[41] MA Y, OLIVEIRA R S, NAI F J, et al. The hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* harbors metal-resistant endophytic bacteria that improve its phytoextraction capacity in multi-metal contaminated soil[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 156: 62−69

[42] 骆永明, 吴龙华, 胡鹏杰, 等. 镉锌污染土壤的超积累植物修复研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 9–10
LUO Y M, WU L H, HU P J, et al. Phytoremediation of Hyperaccumulation in Soil Contaminated by Cadmium and Zinc Research[M]. Beijing: Science Press, 2015: 9–10

[43] 闫仁俊, 韩磊, 赵亚萍, 等. 玉米与龙葵间作模式对植物生长及Cd富集特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2162−2171
YAN R J, HAN L, ZHAO Y P, et al. Effects of intercropping modes of *Zea mays* L. and *Solanum nigrum* L. on plant growth and Cd enrichment characteristics[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2162−2171

[44] 焦念元, 宁堂原, 杨萌珂, 等. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4324−4330

JIAO N Y, NING T Y, YANG M K, et al. Effects of maize‖peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4324−4330

[45] 蒙秋霞, 邢虹娟, 白光洁, 等. 瓜菜间作对大樱桃生长和土壤理化性质、微生物区系的影响[J]. 北方园艺, 2021, (3): 91−98

MENG Q X, XING H J, BAI G J, et al. Intercropping of different vegetables and melons affects sapling growth, soil properties and soil microbial population in cherry orchard[J]. Northern Horticulture, 2021, (3): 91−98

[46] 陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 等. 钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2103−2110

CHEN G H, ZU Y Q, ZHAN F D, et al. Effects of passivators on the growth and cadmium accumulation of intercropped maize and *Sedum plumbizincicola*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(9): 2103−2110

[47] 李善家, 王军强, 施志国, 等. 不同基肥处理对玉米土壤酶活性和球囊霉素相关土壤蛋白的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 357−363

LI S J, WANG J Q, SHI Z G, et al. Effect of different base fertilizer treatments on maize soil enzyme activity and glomalin-related protein[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(2): 357−363

[48] NICHOLS K A, WRIGHT S F. Comparison of glomalin and humic acid in eight native us soils[J]. Soil Science, 2005, 170(12): 985−997

[49] CHERN E C, TSAI D W, OGUNSEITAN O A. Deposition of glomalin-related soil protein and sequestered toxic metals into watersheds[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(10): 3566−3572