

苏南地区汞污染农田土壤植物套作修复模式的筛选

焦龙进, 程剑, 姜德民, 朱家辉, 杨倩, 徐双圆, 葛鹏, 占新华

引用本文:

焦龙进, 程剑, 姜德民, 朱家辉, 杨倩, 徐双圆, 葛鹏, 占新华. 苏南地区汞污染农田土壤植物套作修复模式的筛选[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 553–563.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0518>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玉米套作蜈蚣草修复砷污染农田土壤的效应研究

邱丹, 杜芮萍, 孟德凯, 顾明华, 何冰, 韦燕燕, 王学礼

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 101–107 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0920>

不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究

熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 马义兵

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 36–44 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0811>

基于典型污灌区土壤筛选耐盐、Cd低吸收小麦品种

孟楠, 安平, 王萌, 陈莉, 郑涵, 陈世宝

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 409–414 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1237>

小麦秸秆生物质炭对旱地土壤铅镉有效性及小麦、玉米吸收的影响

左静, 陈德, 郭虎, 王静波, 隋凤凤, 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1133–1140 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1655>

绿肥作物对云南旱地土壤镉有效性的影响

王赞, 付利波, 梁海, 章子含, 杨伟, 何正海, 高嵩涓, 曹卫东

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2124–2133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0457>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

焦龙进, 程剑, 姜德民, 等. 苏南地区汞污染农田土壤植物套作修复模式的筛选[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 553–563.

JIAO L J, CHENG J, JIANG D M, et al. Screening the suitable plant intercropping model for remediation of mercury-contaminated farmland soil in the southern Jiangsu Province area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 553–563.



开放科学 OSID

苏南地区汞污染农田土壤植物套作修复模式的筛选

焦龙进¹, 程剑², 姜德民¹, 朱家辉², 杨倩², 徐双圆², 葛鹏¹, 占新华^{2*}

(1. 江苏省地质矿产局第三地质大队, 江苏 镇江 212021; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:为探究不同作物-超富集植物套作模式对修复汞污染农田土壤的效果,本研究通过盆栽试验,以小麦、大豆、油菜等作物为研究对象,将其分别与野艾蒿、乳浆大戟、悬钩子等汞富集植物搭配套作,研究不同套种体系修复汞污染农田土壤的效果。结果表明:与富集植物进行套作时,作物根、茎、叶和籽粒的汞含量有不同程度的下降,其中根部汞含量下降最明显,作物与富集植物套作可以降低作物体内汞含量。与小麦单作相比,野艾蒿、悬钩子与小麦套作可以增加小麦地上部生物量,增加幅度分别为49.37%和42.45%。小麦/野艾蒿套作和小麦/悬钩子套作富集植物中汞的转移系数(Transfer factors, TF)接近,但野艾蒿汞的生物富集系数(Bioconcentration factor, BCF)显著高于悬钩子,是其的2.59倍;大豆的两种套作模式下,乳浆大戟的TF、BCF值皆高于野艾蒿,分别是其的1.41倍和1.50倍;油菜的两种套作模式下,悬钩子和野艾蒿的TF值接近。结果分析显示野艾蒿适合与小麦套作,乳浆大戟适合与大豆套作。综上所述,小麦/野艾蒿、大豆/乳浆大戟套作模式可以降低作物体内汞含量,并在一定程度上提高小麦和大豆产量。

关键词:植物修复;套作;汞;富集植物;农田土壤

中图分类号:S156;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)03-0553-11 doi:10.11654/jaes.2023-0518

Screening the suitable plant intercropping model for remediation of mercury-contaminated farmland soil in the southern Jiangsu Province area

JIAO Longjin¹, CHENG Jian², JIANG Demin¹, ZHU Jiahui², YANG Qian², XU Shuangyuan², GE Peng¹, ZHAN Xinhua^{2*}

(1.No.3 Brigade of Jiangsu Geology & Mineral Resources Bureau, Zhenjiang 212021, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To explore the effects of crops and hyperaccumulators intercropping on remediation of mercury (Hg) contaminated farmland soil with pot experiments, wheat (*Triticum aestivum* L.), soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] and rape (*Brassica napus* L.) were used as the subjects, intercropped with the hyperaccumulating plants, wild mugwort (*Artemisia lavandulaefolia* DC.), leafy spurge (*Euphorbia esula* L.), and rubus (*Rubus corchorifolius* L.), to investigate the effects of different interplanting systems on the remediation of Hg-contaminated farmland soil. When intercropping with enriched plants, the Hg concentrations in the roots, stems, leaves, and grains of crops decreased to varying degrees, and the Hg concentrations in the roots had the most pronounced decrease. Intercropping of crops and enriched plants could reduce Hg concentrations in crops. Compared with single cropping of wheat, the intercropping of wild-mugwort/rubus and wheat could increase the aboveground biomass of wheat by 49.37% and 42.45%, respectively. The plant transfer factors (TF) of Hg in enriched plants in wheat/wild mugwort and wheat/rubus were similar. However, the Hg bioconcentration factor (BCF) of wild mugwort was substantially higher than that of rubus, with a ratio of 2.59 times. Under the two intercropping modes of soybean, the TF and BCF values of leafy spurge were higher than those of wild mugwort, with ratios of 1.41 times and 1.50 times, respectively. Under the two intercropping

收稿日期:2023-06-30 录用日期:2023-09-18

作者简介:焦龙进(1987—),江苏泰兴人,硕士,高级工程师,主要研究方向为地质灾害调查、防治和土壤污染调查、防治等。E-mail:646163972@qq.com

*通信作者:占新华 E-mail:xhzhan@njau.edu.cn

基金项目:江苏省地质局科研项目(2021KY04)

Project supported: The Scientific Research Project of Jiangsu Geological Bureau (2021KY04)

modes of rape, the TF values of rubus and wild mugwort were similar. The results of this study displayed that wild mugwort was suitable for intercropping with wheat, and leafy spurge was suitable for intercropping with soybean. In summary, the intercropping patterns of wheat/wild mugwort and soybean/leafy spurge can reduce Hg concentrations in crops and increase wheat and soybean yield to a certain extent. The results can provide not only a scientific theoretical basis for the sustainable utilization of Hg-contaminated farmland soil in the southern Jiangsu area and the safe production of agricultural products, but also technical support for phytoremediation of Hg-contaminated farmland soil.

Keywords: phytoremediation; intercropping; mercury; hyperaccumulator; farmland soil

随着我国工业化和城镇化迅猛推进,化石燃料燃烧的排放物会随着大气传播并沉降,这加剧了土壤的重金属污染。苏南地区农田土壤超标重金属种类主要是汞(Hg)和镉(Cd)^[1]。农田土壤重金属污染会危及农产品质量安全,进而威胁人类健康。因此,农田土壤重金属污染问题亟待解决。

重金属污染农田土壤的修复方法主要有物理、化学、生物及物理化学法等,其中,生物法中的植物修复技术因具有环境友好、不破坏土壤可耕性、无二次污染、成本低廉等优点而备受青睐。植物修复是指利用植物及其根际微生物系统的吸收、挥发、转化等来清除环境中的污染物^[2],通常是通过种植超富集植物以降低或消除环境中的污染物。结合我国人多地少的基本国情和人地矛盾问题突出等因素,边修复边生产的植物套作修复技术应运而生。植物套作是一种传统的种植模式,通过选择适宜的植物组合来构建多功能套种体系,以达到在提高农业生态系统质量的同时实现时间和空间的集约化生产^[3]。超积累植物/农作物套作修复技术在对受污染的土壤进行有效治理的同时,还能提高农产品产量和品质,可生产与修复同时进行,获得经济与环境的双重效益。因此,这种套作修复技术受到研究者的广泛关注。先前研究发现,小麦与伴矿景天套作时,小麦和土壤中铅、锌含量随着伴矿景天种植密度的增加而降低^[4]。此外,与单一种植相比,毛竹/景天套作系统中植物的生物量和体内重金属的含量都会增加;另外,套作系统中土壤pH下降,有利于土壤中重金属的去除^[5]。茄子与景天套作会对两种植物的生长造成不利影响;与茄子单作相比,套作处理使茄子可食用部分的镉含量从 $1.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $1.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但套作处理土壤中的速效氮、磷、钾含量显著增加^[6]。与单作相比,套作最显著的优势是其可以提高植物的生物量或产量,尤其是在贫氮、贫磷的土壤上^[7]。不同植物种类的组合可以提高微量元素的有效性,促进植物对土壤中微量元素的吸收,其中植物根系形态、土壤pH、酶活性以及微

生物等都会对植物吸收微量元素产生影响^[8]。卫泽斌等^[9]将重金属超积累植物与低积累玉米套作进行污染土壤重金属修复,既能达到重金属的稳定化,又能修复重金属污染土壤。也有研究表明,通过设置景天单种、油菜单种和景天/油菜套作3种植植模式,发现套作模式对镉轻度污染农田土壤的修复效果较好^[10]。Kang等^[11]的研究表明,水稻/大戟套作会产生较低的根瘤有机酸和较高的铁斑,可以降低水稻对镉的吸收。

由于各地气候和土壤理化性质不同,同一植物套作修复模式不可能在全国各地均适用,因此必须因地制宜建立适合当地条件的植物套作修复模式。为此,通过室内盆栽试验,将适合苏南地区生长的汞超富集植物野艾蒿、乳浆大戟和悬钩子与当地的主要作物小麦、大豆、油菜进行套作搭配修复,通过对作物生长情况、作物体内汞含量及汞污染土壤修复效果的研究,筛选出适宜苏南地区汞污染农田土壤的植物套作修复模式,以为苏南地区汞污染农田的安全生产和修复提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻土采自苏南某村农田(31.57°N , 119.40°E)表层0~50 cm。在室温下将土壤风干、磨细、过10目筛备用。供试土壤基本理化性质如表1所示。

结合当地的农作物种植制度,本试验选取当地常种植的小麦(*Triticum aestivum* L.)、大豆[*Glycine max* (L.) Merr.]、油菜(*Brassica napus* L.)为试验作物。其中,供试小麦品种为镇麦10号,大豆品种为中黄37,油菜品种为沔油737,上述种子均购自江苏省农科院种子站,均是苏南地区的主要栽培品种。

根据当地气候特征,结合供试作物的生长特点,本试验选取野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia* DC.)、乳浆大戟(*Euphorbia esula* L.)和悬钩子(*Rubus corchorifolius* L.)为供试超富集植物,上述植物购自江苏省宿

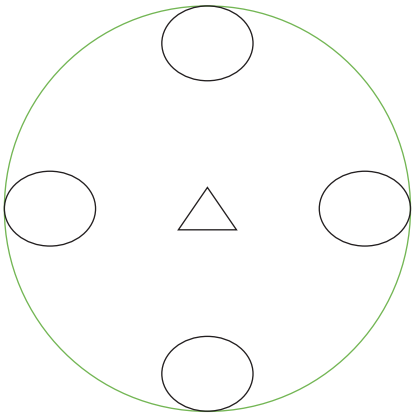
表1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 The physicochemical properties of the tested soil

土壤类型 Soil type	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全 N Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全 P Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	全 K Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	总汞 Total mercury/ (mg·kg ⁻¹)
水稻土 Rice soil	4.92	24.2	1.10	0.74	1.18	95.98	5.76	0.069

迁市沐阳县花卉基地。其中,野艾蒿为常见于汞矿区的植物^[12-13],乳浆大戟为一种汞富集植物^[14],悬钩子是一种在废弃汞矿堆和矿山附近广泛分布的具有很强汞耐受能力的植物^[15]。

1.2 试验设计

在磨细的土壤 中人为拌入基肥 和外源汞 (Hg₂SO₄),最终土壤汞含量为 0.6 mg·kg⁻¹,对应《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中 2 倍的农用地土壤环境质量标准含量限值,养分 N、P(以 P₂O₅计)和 K(以 K₂O 计)的施入量分别为 180、90 mg·kg⁻¹和 180 mg·kg⁻¹。采用逐级混匀的方法,将原土按比例添加汞。首先将汞与少量土壤混匀,再将污染土壤与原土混合,暗处老化 30 d(预试验结果表明:30 d 后污染土壤汞老化趋于稳定)。野艾蒿是菊科艾属多年生草本植物,其生物量较大,且能在铅锌矿区正常生长,在我国有广泛的分布。野艾蒿一年四季均可生长,因此,可分别与小麦、大豆、油菜套种。乳浆大戟属大戟科,多年生草本植物,野生于山坡或路旁,我国华东、东北到西南各省区都有分布。乳浆大戟不耐高温和寒冷,栽培时期 12~15℃为宜,且不耐涝,所以可与大豆套种。悬钩子生于山地杂木林边、灌丛或荒野,适应性强,根系浅,不耐旱,水分不足会抑制生长和结果。悬钩子春季、秋季均可栽培。悬钩子须种植在持水能力好的土壤上,因此可与小麦、油菜套种^[12,16]。采用规格为上口径 25.5 cm、底径 23.0 cm、高 28.5 cm 的塑料盆,盆底有 4 孔,孔径为 1.0 cm,每盆装入上述稳定后的污染土壤 5 kg,并加水至田间最大持水量的 60%。首先,将经 5% 双氧水消毒并萌发的小麦、大豆、油菜、悬钩子和乳浆大戟种子及野艾蒿根状茎按照套种设计图(图 1)播入盆中,经过间苗后,盆内最终共保留 3~4 株作物及 4 株超富集植物。盆栽试验在温室中进行,生长期间每 2 d 浇水 1 次,称量补水以维持土壤水分田间最大持水量 60%,整个试验持续 90 d(从 2022 年 8 月 5 日至 2022 年 11 月 5 日),90 d 后分别收获各植株的地上部分和根。植物种植模式具体见表 2,另设不



三角形代表作物,椭圆形代表汞超富集植物。
Triangle represent crops, and ovals represent mercury hyperaccumulators.

图1 套种试验设计图

Figure 1 Interplanting experiment design

表2 植物种植模式
Table 2 Planting patterns

编码 Coding	种植模式 Cropping pattern
M	小麦单作
D	大豆单作
Y	油菜单作
A	野艾蒿单作
X	悬钩子单作
R	乳浆大戟单作
MA	小麦/野艾蒿套作
MX	小麦/悬钩子套作
DA	大豆/野艾蒿套作
DR	大豆/乳浆大戟套作
YA	油菜/野艾蒿套作
YX	油菜/悬钩子套作

种植植物的空白(CK),共 13 种处理,每种处理 3 次重复,随机排列,共 39 盆。

1.3 样品分析

参照鲍士旦^[17]的方法对土壤的 pH、有机质、氮、磷和钾的含量进行测定;采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MS,iCAP Q,德国)分析汞含量。

植物样品的处理方式如下:首先,用剪刀将植物

地上部的茎与叶分开,用自来水将植物各部位冲洗干净后,再用去离子水将各部位冲洗3遍备用。将植物放入烘箱中,先在 105 ℃ 下杀青 30 min,再用 75 ℃ 烘干至恒质量。烘干后,用电子天平称植物各部位干质量,然后,再将植物彻底粉碎、过筛(100 目)并装入自封袋中保存备用。准确称取植物样品 0.2 g 于消煮管中,加 5 mL 浓 HNO_3 和 2 mL H_2O_2 ,置于消煮炉中,升温至 120~140 ℃ 后保持 2~3 h,直至完全消解,自然冷却至室温,将消解液用硝酸溶液(1+9)定量转移并定容至 50 mL,摇匀待测^[18],同时做试剂空白。土壤总汞采用王水消煮,有效态汞按照 DTPA 法提取^[19-20]。

生物富集系数(Bioconcentration factor, BCF)=植物汞含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)/土壤汞含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

转移系数(Transfer factors, TF)=植物地上部汞含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)/植物根部汞含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

1.4 数据统计分析

数据采用 IBM SPSS 24.0 进行统计分析,结果用平均值 $\pm$ 标准差(SD)表示。采用单因素方差分析(ANOVA)和邓肯检验(Duncan's test)评价各处理组间的统计学差异。采用 Origin 8.0 软件对试验数据进行分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 植物生长情况

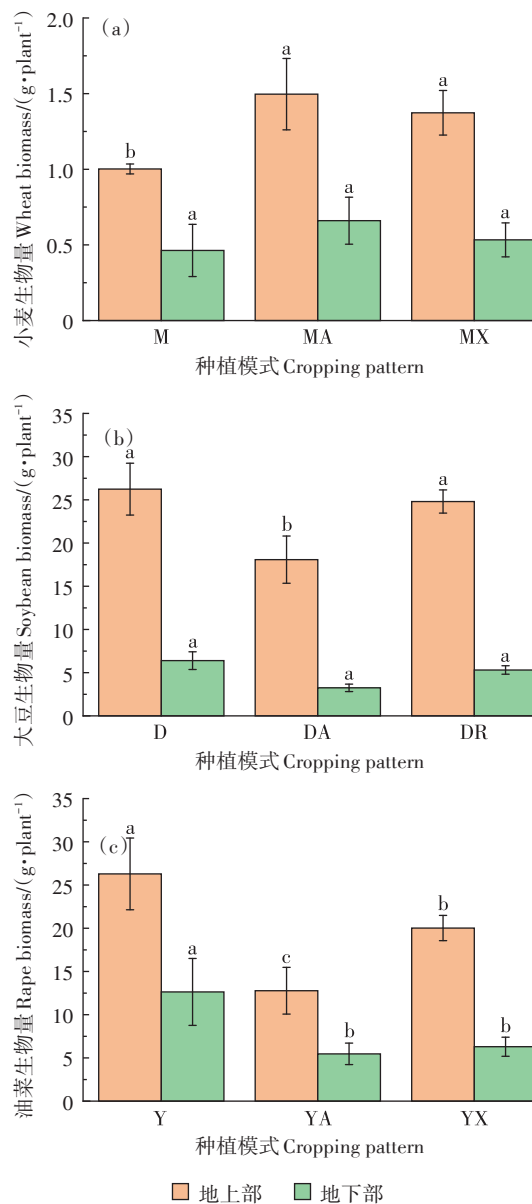
2.1.1 不同套作模式对小麦、大豆和油菜生物量的影响

植物生物量是反映植物生长情况的重要指标。不同套作模式下小麦地上和地下部的生物量如图 2a 所示。与小麦单作模式相比,小麦/野艾蒿套作和小麦/悬钩子套作模式中的小麦地上部生物量显著增加,增加幅度分别为 49.37% 和 42.45%,地下部生物量也有所增加,增加幅度分别为 37.06% 和 15.11%。两种套作模式下小麦地上部生物量与单作相比有显著性差异,但地下部生物量差异不显著。分析可知,两种不同超富集植物套作增大了小麦地上部和地下部生物量,且套作对小麦地上部生物量的影响大于地下部。

不同套作模式下大豆地上和根部的生物量如图 2b 所示。大豆/野艾蒿套作和大豆/乳浆大戟套作模式中大豆根部生物量无显著性差异,但相比于大豆/乳浆大戟套作模式,大豆/野艾蒿套作模式中的大豆地上部生物量显著下降。与大豆单作模式相比,大豆/野艾蒿套作和大豆/乳浆大戟套作模式中大豆地上部生物量分别下降了 31.09%、5.45%,根部生物量

分别下降了 49.27%、16.94%。两种超富集植物与大豆套作都会影响大豆的生长,但对大豆地上部生物量的影响大于根部,且对大豆/野艾蒿套作模式中大豆地上部生物量的影响更大。

油菜的生物量情况见图 2c。油菜/野艾蒿套作模式中油菜地上部生物量下降幅度大,较油菜单作模式下降 51.43%。地下部分生物量,相比于油菜单作模式,油菜/野艾蒿套作和油菜/悬钩子套作两种套作模



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图2 不同套作模式下小麦、大豆和油菜的生物量
Figure 2 Wheat, soybean, and rape biomass in different intercropping models

式均对油菜的生长有负面影响,下降幅度为56.70%和50.18%。此外,发现在植物生长过程中,野艾蒿生长速度快于油菜,会影响油菜叶片的展开,导致油菜向盆栽的四周缝隙处生长,影响油菜进行光合作用,造成油菜生物量下降,悬钩子与油菜生长过程中也出现类似情况。

2.1.2 不同套作模式中野艾蒿、悬钩子和乳浆大戟生物量的变化

由图3a分析可知,小麦/野艾蒿套作和油菜/野艾蒿套作模式下的野艾蒿与野艾蒿单作模式中的相比,地上部生物量分别下降了13.92%和3.84%;大豆/野艾蒿套作模式下的野艾蒿与野艾蒿单作模式相比,地上部生物量下降了30.59%。小麦/野艾蒿套作、大豆/野艾蒿套作和油菜/野艾蒿套作模式下的野艾蒿与野艾蒿单作模式相比,根部生物量分别下降了62.54%、60.52%和26.62%。除此之外,在野艾蒿单作的生长过程中,根部生物量比地上部生物量高,这可能与其增殖方式有关。但在不同套作模式中,野艾蒿出现地上部比根部生物量高的现象,可能原因是野艾蒿与小麦、大豆套作的过程中,根系间相互作用影响,导致野艾蒿地下部生物量减少。图3b分析表明:小麦/悬钩子套作和油菜/悬钩子套作模式中的悬钩子与悬钩子单作模式中的相比,地上部生物量增加更显著,增幅分别为23.99%和13.65%,但根部生物量的变化不显著。小麦/悬钩子套作比悬钩子单作模式中的悬钩子根部生物量增加了9.86%,油菜/悬钩子套作比悬钩子单作模式中的悬钩子根部生物量下降了3.29%。由图3c分析可知,大豆/乳浆大戟套作与乳浆大戟单作中的乳浆大戟相比,地上部与地下部的生物量均无显著变化。

2.2 植物不同部位汞含量

2.2.1 不同套作模式对小麦各部位汞含量的影响

从图4分析可知,小麦不同部位汞含量的大小为根>茎>叶>籽粒,两种套作模式均使小麦不同部位汞含量显著下降,但汞在小麦各部分的分布特点与单作相同。与小麦单作模式相比,小麦/野艾蒿套作模式下小麦根、茎、叶和籽粒的汞含量分别下降27.17%、23.53%、80.05%和78.12%;而小麦/悬钩子套作模式下小麦根、茎、叶和籽粒的汞含量则分别下降28.43%、26.76%、54.55%和53.11%。我国国家食品安全污染物限量标准(GB 2762—2022)中规定小麦汞含量的限量标准为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,本试验中小麦/野艾蒿套作和小麦/悬钩子套作模式中籽粒的汞含量分别

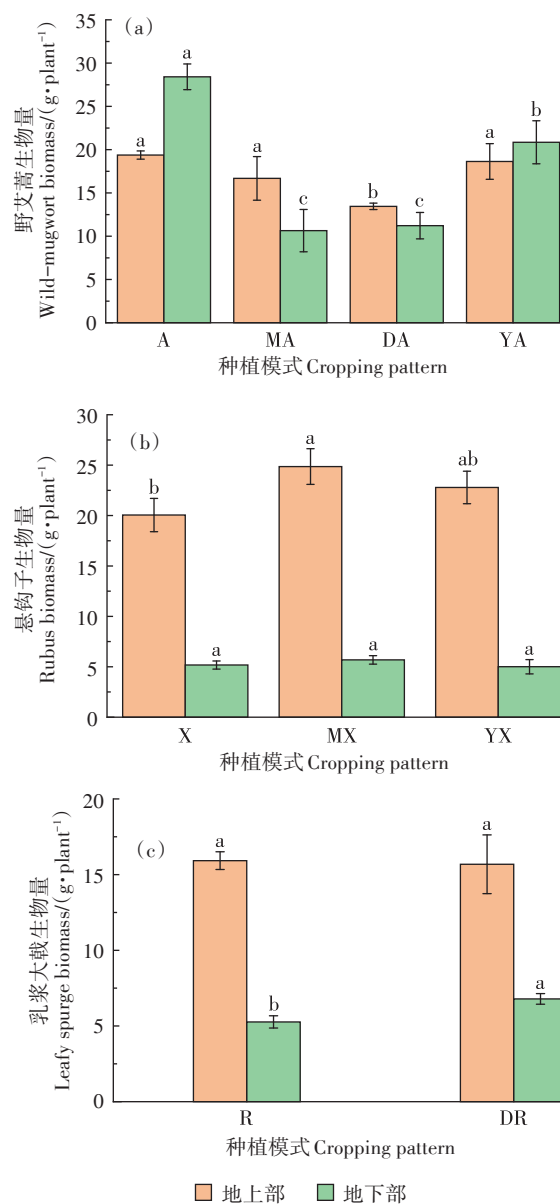


图3 不同套作模式下汞超富集植物野艾蒿、悬钩子和乳浆大戟的生物量

Figure 3 Mercury hyperaccumulator biomass of wild-mugwort, rubus, and leafy spurge under different intercropping modes

为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.011 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均低于国家标准;单作小麦籽粒的汞含量为 $0.023 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,略高于国家标准,说明在本试验条件下,小麦单作存在一定的汞污染风险,但若和野艾蒿、悬钩子等富集植物进行套作则可有效降低小麦汞污染风险。综上,套作系统能有效降低小麦体内汞含量,且籽粒的品质符合国家相关食品中污染物限量标准。

2.2.2 不同套作模式对大豆各部位汞含量的影响

由图5分析可知,大豆各部位汞含量与小麦相似,也表现为根>茎>叶>籽粒。与大豆单作模式相

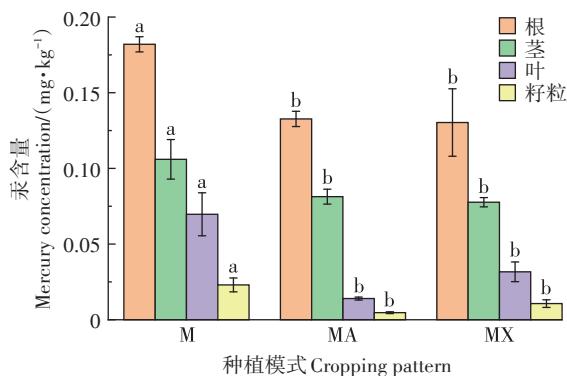


图4 不同套作模式小麦各部位汞含量

Figure 4 Mercury concentration in different tissues of wheat under different intercropping modes

比,大豆/野艾蒿套作模式下大豆根和茎中汞含量分别下降了25.60%和25.50%,但叶和籽粒中汞含量分别增加了20.77%、14.65%。大豆/乳浆大戟套作模式下大豆根、茎、叶和籽粒的汞含量分别下降了36.23%、5.46%、0.69%和12.94%。根据国家食品安全污染物限量标准(GB 2762—2022),大豆籽粒汞限量为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,本试验大豆单作、大豆/野艾蒿套作和大豆/乳浆大戟套作模式中大豆籽粒汞含量分别为 0.027 、 $0.031 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.024 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为国家标准的1.36、1.56倍和1.18倍。

2.2.3 不同套作模式对油菜各部位汞含量的影响

与小麦和大豆不同部位汞含量情况相似,油菜不同部位汞含量大小为根>茎>叶(图6)。与油菜单作模式相比,油菜/野艾蒿套作和油菜/悬钩子套作模式中油菜根部汞含量分别下降26.94%和40.06%,但油菜/野艾蒿套作与油菜/悬钩子套作模式油菜茎中汞含量反而升高,升高幅度分别为22.39%、37.63%;而

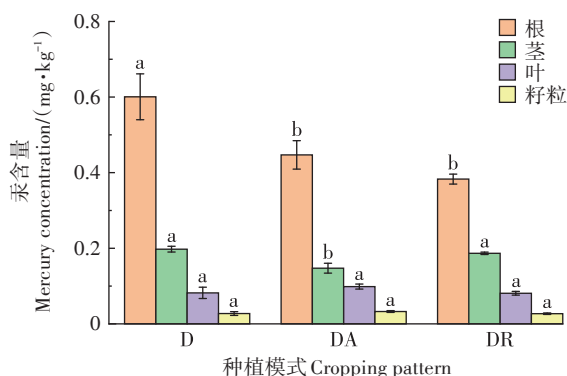


图5 不同套作模式大豆各部位汞含量

Figure 5 Mercury concentration in different tissues of soybean under different intercropping modes

在叶片中,与油菜单作模式相比,油菜/野艾蒿套作模式油菜叶中汞含量增加了226.14%,油菜/悬钩子套作模式叶片汞含量降低了10.76%。根据国家食品安全国家标准污染物限量标准(GB 2762—2022),油菜汞限量为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,油菜单作、油菜/野艾蒿套作和油菜/悬钩子套作模式中油菜叶片汞含量分别为 0.022 、 $0.071 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.019 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为国家标准的2.17、7.08倍和1.94倍。

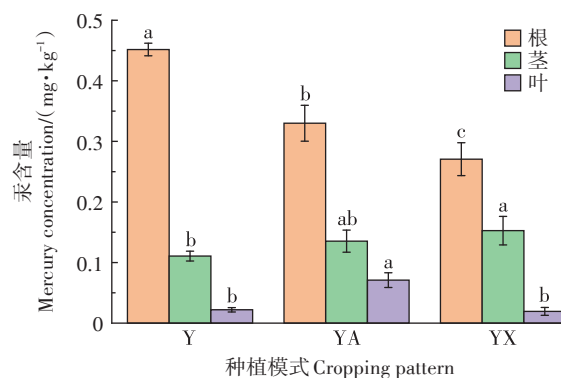


图6 不同套作模式油菜各部位汞含量

Figure 6 Mercury concentration in different tissues of rape under different intercropping modes

2.2.4 不同套作模式野艾蒿、悬钩子和乳浆大戟各部位的汞含量

由图7分析可知,野艾蒿不同部位汞含量大小为地上部>地下部,与上述作物不同部位汞含量情况相反,但悬钩子和乳浆大戟不同部位汞含量接近,且部分套作模式地上部汞含量大于地下部。由图7a分析可知,与野艾蒿单作模式相比,小麦/野艾蒿套作、大豆/野艾蒿套作和油菜/野艾蒿套作模式中的野艾蒿地下部汞含量分别降低了23.33%、63.03%和51.43%,地上部汞含量降低了24.04%、41.21%和32.48%。由图7b分析可知,与悬钩子单作模式相比,小麦/悬钩子套作和油菜/悬钩子套作模式中悬钩子地上部汞含量分别降低34.31%、43.90%,根部汞含量则降低22.16%、33.52%。由图7c分析可知,与乳浆大戟单作模式相比,大豆/乳浆大戟套作地下部和地上部汞含量增加了5.77%、10.90%。

2.3 生物富集系数和转移系数

由表3可知,3种富集植物对土壤汞的累积能力不同,单作野艾蒿地上部汞累积量高达 $47.50 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$,分别是悬钩子、乳浆大戟单作模式下其地上部汞累积量的2.77倍和1.96倍;与小麦套作的野艾蒿地

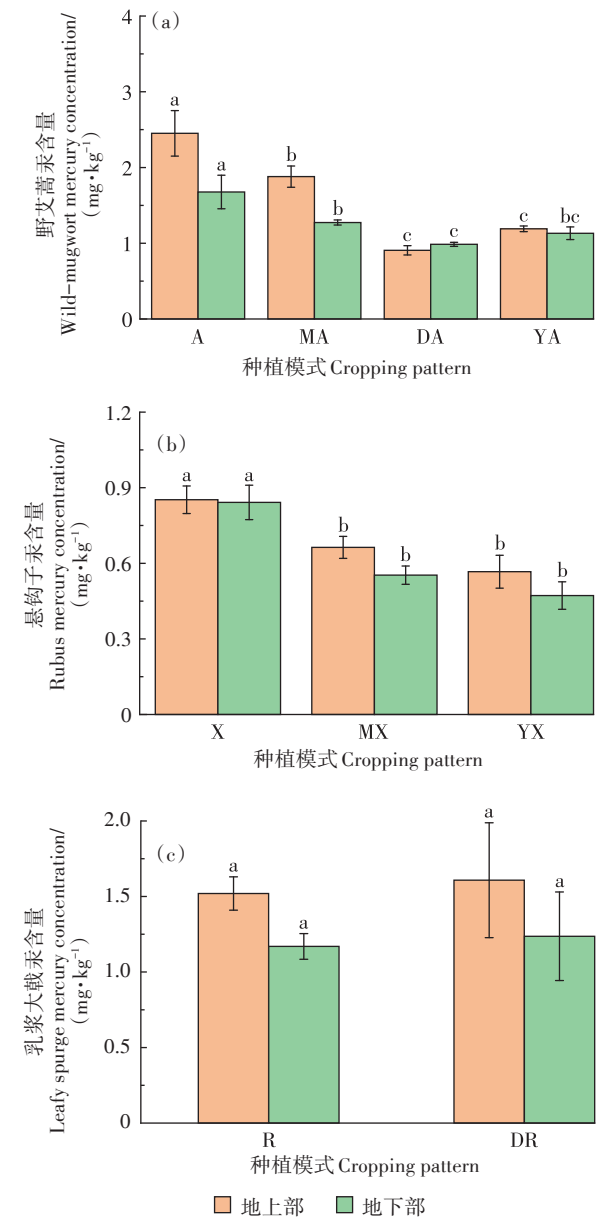


图7 不同套作模式下富集植物野艾蒿、悬钩子和乳浆大戟各部位汞含量

Figure 7 Mercury concentration in different tissues of hyperaccumulators of wild-mugwort, rubus and leafy spurge under different intercropping modes

上部汞累积量高达 31.13 $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$,是套作悬钩子的 1.88 倍,与大豆套作中,野艾蒿地上部汞累积量高达 12.17 $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$,是套作乳浆大戟的 0.47 倍,与油菜套作中,野艾蒿地上部汞累积量高达 22.13 $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$,是套作悬钩子的 1.73 倍。3 种单作植物根部汞累积量大小为野艾蒿>乳浆大戟>悬钩子,套作富集植物根部汞累积量大小野艾蒿>乳浆大戟>悬钩子。与单作小麦相比,与野艾蒿、悬钩子套作的小麦地上部汞累

表3 不同套作模式下植物的汞转运累积特征					
Table 3 Mercury transport and accumulation in plants under different plant intercropping modes					
种植模式 Cropping pattern	植物 Plant	汞累积量 Mercury accumulation/ ($\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)		转移 系数 Transfer factor	生物富集 系数 Bioconcentration factor
		地上部 Overground part	根部 Root		
M	M	0.199±0.022a	0.084±0.031a	1.092	0.634
MA	M	0.145±0.026b	0.087±0.021a	0.754	0.388
MX	M	0.166±0.021ab	0.068±0.007a	0.921	0.417
D	D	7.999±0.440a	3.862±0.097a	0.511	1.513
DA	D	5.007±0.838b	1.461±0.341b	0.623	1.209
DR	D	7.232±0.487a	2.030±0.137b	0.769	1.129
Y	Y	3.468±0.481a	5.734±2.137a	0.294	0.974
YA	Y	2.685±0.981a	1.825±0.493b	0.625	0.894
YX	Y	3.425±0.297a	1.723±0.521b	0.635	0.738
A	A	47.50±5.72a	47.48±5.53a	1.462	6.879
MA	A	31.13±3.05b	13.58±3.55c	1.476	5.256
DA	A	12.17±0.56d	11.04±1.22c	0.920	3.153
YA	A	22.13±1.09c	23.57±3.38b	1.052	3.871
X	X	17.13±1.34a	4.35±0.56a	1.013	2.823
MX	X	16.49±1.73a	3.14±0.32b	1.200	2.027
YX	X	12.86±1.17b	2.38±0.60b	1.201	1.731
R	R	24.18±1.67a	6.18±1.01b	1.297	4.482
DR	R	25.82±0.85a	8.45±2.76a	1.300	4.741

注:同列的不同小写字母表示同组内差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences within the same group at $P<0.05$.

积量分别降低 27.14% 和 16.58%。与单作大豆相比,与野艾蒿、乳浆大戟套作的大豆地上部汞累积量分别降低 37.40% 和 9.59%。与单作油菜相比,与野艾蒿、悬钩子套作的油菜地上部汞累积量分别降低 22.58% 和 1.24%。

转移系数用来评价植物将重金属从根部向地上部运输的能力。由结果分析可知,小麦套作模式中小麦汞转移系数低于小麦单作模式;大豆/野艾蒿套作和大豆/乳浆大戟套作模式中大豆汞转移系数略高于大豆单作模式;油菜/野艾蒿套作和油菜/悬钩子套作模式中汞转移系数分别是油菜单作处理的 2.13 倍和 2.16 倍;小麦/野艾蒿套作、大豆/野艾蒿套作和油菜/野艾蒿套作模式中野艾蒿汞转移系数分别是野艾蒿单作处理的 1.01、0.63 倍和 0.72 倍;小麦/悬钩子套作和油菜/悬钩子套作模式中悬钩子转移系数分别是悬钩子单作处理的 1.18 倍和 1.19 倍;大豆/乳浆大戟套作模式中乳浆大戟转移系数是乳浆大戟单作处理的

1.00倍。

生物富集系数可用于衡量植物提取重金属的潜力。小麦套作模式中小麦汞生物富集系数低于小麦单作模式,大豆套作模式中大豆汞生物富集系数低于大豆单作模式,油菜套作模式中油菜汞生物富集系数低于油菜单作模式,小麦/野艾蒿套作、大豆/野艾蒿套作和油菜/野艾蒿套作模式中野艾蒿地上部汞生物富集系数分别是野艾蒿单作模式的0.76、0.46倍和0.56倍;小麦/悬钩子套作和油菜/悬钩子套作模式中悬钩子地上部汞生物富集系数分别是悬钩子单作模式的0.72倍和0.61倍;大豆/乳浆大戟套作处理中乳浆大戟地上部汞生物富集系数是乳浆大戟单作模式的1.06倍。

相对于同一单作富集植物,与小麦套作的野艾蒿TF值增加,但BCF值降低。与小麦、油菜套作的悬钩子比单作悬钩子TF值有所增加,增幅分别为18.46%和18.55%,而其BCF值与单作悬钩子相比有所下降。与小麦套作的野艾蒿的TF、BCF值皆高于与大豆、油菜套作模式下的野艾蒿,与小麦套作的悬钩子的BCF值高于与油菜套作的悬钩子,表明小麦适合与富集植物进行套作。与乳浆大戟单作相比,套作大豆的乳浆大戟的TF和BCF值无明显变化。与小麦套作的野艾蒿的TF值略高于悬钩子,但野艾蒿的BCF值远大于悬钩子;大豆的两种套作模式下,乳浆大戟的TF、BCF值皆高于野艾蒿。油菜两种套作模式下,悬钩子和野艾蒿的TF值接近,野艾蒿的BCF值高于悬钩子,但考虑到野艾蒿会影响油菜的生长(图4),油菜与悬钩子进行套作效果更好。因此,野艾蒿适合与小麦套作,乳浆大戟适合与大豆套作,油菜适合与悬钩子套作。

2.4 汞污染土壤植物套作修复效果及有效态汞含量变化

有研究表明,植物进行套作时,不同植物的根系会相互交错,富集植物根系产生大量的有机酸类物质

可降低土壤pH值,并可与汞/镉形成络合物,增加其在土壤中的有效性,进而促进富集植物对汞/镉的吸收和富集^[21-22]。与CK组相比,套作处理土壤总汞含量均有一定程度的下降,且套作处理下降幅度大于单作处理;另外,富集植物进行套作均可降低土壤中汞的生物有效性(表4)。与小麦单作相比,小麦/野艾蒿套作和小麦/悬钩子套作处理的有效态汞含量相近,可能是由于小麦与富集植物仅有少部分根系交叉,根系相互作用较弱,未能提高土壤有效态汞含量。与大豆单作相比,大豆/野艾蒿套作和大豆/乳浆大戟套作处理土壤有效态汞差异不显著,但与富集植物套作会降低大豆地上部生物量,这可能是大豆在生长过程中与富集植物相互竞争营养物质,从而影响了其生长。与油菜单作相比,油菜/野艾蒿套作和油菜/悬钩子套作处理土壤有效态汞含量降低。此外,本研究还发现,不同富集植物与作物套作对土壤有效态汞含量影响不同。与野艾蒿单作相比,小麦/野艾蒿套作和油菜/野艾蒿套作两种套作模式降低了土壤有效态汞含量;与单作悬钩子相比,小麦/悬钩子套作和油菜/悬钩子套作两种套作模式显著降低土壤有效态汞含量。与单作乳浆大戟相比,大豆/乳浆大戟套作模式土壤有效态汞含量升高。这表明不同富集植物与作物进行套作时,对土壤有效态汞的影响不同,油菜与野艾蒿和悬钩子套作可以进一步降低土壤有效态汞含量,但富集作物单作时可以提高土壤有效态汞含量,这其中的机理值得进一步深入研究。

3 讨论

套作作为一种传统的农业种植模式,其目的是通过调节植物生长、有机酸的分泌和根际微生物群落等来影响土壤重金属的活性,进而影响植物对土壤重金属的吸收^[23]。在套作系统中,植物种类、种植密度、空间布局、养分供应和环境因素都会影响植物的生长,

表4 土壤总汞及有效态汞含量
Table 4 Soil total mercury and available mercury concentrations

处理 Treatment	CK	M	MA	MX	D	DA	DR	Y	YA	YX	A	X	R
总汞 Total mercury/ (mg·kg ⁻¹)	0.600± 0.050a	0.586± 0.004ab	0.535± 0.053ab	0.543± 0.046ab	0.581± 0.017ab	0.557± 0.022ab	0.534± 0.011ab	0.577± 0.005ab	0.556± 0.003ab	0.561± 0.022ab	0.506± 0.025b	0.564± 0.013ab	0.530± 0.016ab
有效态汞 Available mercury/ (μg·kg ⁻¹)	70.25± 3.52a	22.82± 4.63c	23.21± 1.37c	22.54± 7.32c	36.40± 4.35bc	38.49± 6.63bc	36.99± 4.10bc	49.30± 7.43b	35.81± 6.20bc	31.19± 3.74bc	37.12± 5.15bc	35.19± 3.38bc	30.28± 0.94bc

注:同行的不同小写字母表示同组间差异显著(P<0.05)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences within the same group at P<0.05.

植物相互套作会促进或抑制植物的生长。根据所选用的富集植物类型的不同,套作作物的生物量可能会升高或下降,从而影响对重金属的吸收。从试验结果来看,小麦与野艾蒿套作模式下野艾蒿的地下部生物量显著下降,说明这种套作模式下,作物与超富集植物根系生长产生拮抗且小麦根系具有更强的生长优势。而小麦与悬钩子套作模式下,悬钩子的地上部分生物量显著提高,说明小麦与悬钩子具有协同生长关系。大豆与野艾蒿套作模式下,相比分别单作,两种植物的生物量均显著下降,表明两种植物套作过程中会互相产生负面影响。而大豆与乳浆大戟套作模式下,两种植物相比单作生物量均没有显著变化,这与前人的研究情况类似^[24],表明大豆与乳浆大戟互相不影响生长。野艾蒿与油菜套作和悬钩子与油菜套作模式下,野艾蒿与悬钩子的生物量相比于各自单作模式均无显著性差异,而油菜生物量均显著下降,表明这两种超富集植物与油菜存在生长拮抗,且油菜均为生长弱势植物。推测产生这一现象的原因可能是作物与不同的超富集植物之间根系形态、根系分泌物以及不同生长期植物对养分的需求等存在差异,这些差异导致作物与超富集植物间的生长关系不同,进而影响作物的生物量。综上,从对作物生物量影响的角度分析,小麦与野艾蒿或悬钩子的套作模式以及大豆与乳浆大戟的套作模式较为合适。

作物部位不同,汞含量也各异,但均表现为根>茎>叶>籽粒,汞可通过植物细胞质膜中的转运蛋白实现从土壤到根部的运输^[25]。富集植物对重金属的超积累是一个复杂的现象,它涉及几个步骤,例如:(1)金属穿过根细胞质膜的运输;(2)木质部装载和易位;(3)金属在整个植物和细胞水平的解毒和隔离。重金属离子可以穿透质外体,通过共质体途径进入木质部,并可以通过木质部从根部运输到地上部^[26]。在此过程中,不同植物根系对重金属的吸收能力、跨膜转运能力和木质部转运能力不同,对重金属的积累水平也不同^[27]。通常情况下,超富集植物根系对重金属的吸收效率和耐受程度高于普通作物^[28]。此外,部分研究者就富集植物积累重金属水平的机制提出了一些假说:金属耐受性、抗旱性、对邻近植物的干扰和防御天敌^[29,30]。例如,艾草具有杀菌驱虫作用,本试验中野艾蒿具有较好富集汞的能力,可能与其对环境适应能力较强和驱虫功效有关^[30]。干扰假说(也称为“元素化感作用”)表明,多年生超积累植物可能通过在其冠层下的表层土壤中富集金属来干扰邻近植物。

这会产生高金属含量的落叶层,从而阻止金属耐受性较低的物种的建立。近期一些研究证实了镍、镉、锌、砷和硒的防御功能^[31-33],尽管关于这个流行假说的报道很多,但很少有试验验证,因此需要更多试验进行证实。此外,防御效应主要是在实验室条件下分析的,并且只考虑一种或几种选定的食草动物,而不是在超积累植物必须面对的田间条件下进行^[34]。有研究表明^[15],乳浆大戟对汞污染的敏感性低,对汞富集量是常规植物的几百倍,但在本试验中其对汞的富集能力表现一般,这可能与土壤理化性质、气候条件,以及污染土壤汞含量高低有关。乳浆大戟在生长过程中如果被掐断则会流出对生物表皮具有伤害性的白色乳浆,其富集汞的能力也有可能是出于防御天敌和邻近植物的干扰,符合干扰假说。在土壤中汞含量很高的情况下,悬钩子体内汞的含量可达到 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16],但其在本试验低浓度汞污染土壤上富集汞的能力表现一般,这可能与生长环境有关。植物可以通过利用重金属毒性来对抗食草动物,但这并不能保护植物在毒害敌人之前免受伤害。有研究表明,一些食草动物在低锌和高金属浓度的植物中,更喜欢食用低锌的和低镍的植物^[35-37]。根系分泌物是导致套作体系中植物对重金属积累差异的另一可能假说^[28]。本试验发现,与作物单作相比,套作普遍降低作物食用部分和土壤汞含量,这可能是由于套作促进了植物根系有机酸的分泌,从而增加汞的生物有效性,增强了富集植物对汞的吸收所致^[28,38]。但关于本试验中的富集植物野艾蒿、悬钩子和乳浆大戟的富集机理还需进一步研究。结合TF值和BCF值,本研究发现,野艾蒿与小麦套作的模式及大豆与乳浆大戟套作的模式,有利于超富集植物对汞的积累,降低汞对作物的影响和土壤中汞的含量。综合作物生物量和超富集植物对汞积累方面的结果,小麦与野艾蒿套作模式以及大豆与乳浆大戟套作模式可以降低经济作物体内汞含量,促进污染土壤中汞向超富集植物的积累,更适用于修复苏南地区汞污染土壤。

4 结论

(1)小麦/野艾蒿套作和小麦/悬钩子套作模式下小麦地上部生物量显著增加49.37%和42.45%,根部生物量增加幅度分别为37.06%和15.11%,其他套作模式作物生物量出现降低现象。

(2)不同套作模式主要作物的根、茎、叶和籽粒汞含量均呈现出不同程度的下降,其中根部汞含量下降

最显著。

(3) 小麦/野艾蒿套作和小麦/悬钩子套作模式中野艾蒿和悬钩子的转移系数相近,但超富集植物野艾蒿的生物富集系数远高于悬钩子;大豆/乳浆大戟套作和大豆/野艾蒿套作模式中乳浆大戟的转移系数、生物富集系数皆高于野艾蒿。综合所有情况来看,野艾蒿适合与小麦套作,乳浆大戟适合与大豆套作。

(4) 超富集植物与作物套作可降低污染土壤的总汞含量,其中小麦/野艾蒿套作、大豆/乳浆大戟套作模式效果最好。

参考文献:

- [1] 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 等. 基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5169–5179. LIU X Y, FAN Y N, LIU P, et al. Characteristics of heavy metal pollution in farmland soil of the Yangtze River Economic Belt based on bibliometric analysis[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5169–5179.
- [2] 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 等. 混合螯合剂的不同施加方式对重金属污染土壤套种修复效果的影响[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(1): 29–34. WEI Z B, GUO X F, WU Q T, et al. Effects of different application methods of mixed chelators on remediation of heavy metal contaminated soil in interplanting system[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2016, 37(1): 29–34.
- [3] MAITRA S, HOSSAIN A, BRESTIC M, et al. Intercropping: a low input agricultural strategy for food and environmental security[J]. *Agronomy*, 2021, 11(2): 343.
- [4] ZOU J, SONG F, LU Y, et al. Phytoremediation potential of wheat intercropped with different densities of *Sedum plumbizincicola* in soil contaminated with cadmium and zinc[J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130223.
- [5] BIAN F, ZHONG Z, LI C, et al. Intercropping improves heavy metal phytoremediation efficiency through changing properties of rhizosphere soil in bamboo plantation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125898.
- [6] MA L, HUANG L, LIU Q, et al. Positive effects of applying endophytic bacteria in eggplant-*Sedum* intercropping system on Cd phytoremediation and vegetable production in cadmium polluted greenhouse[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 115: 383–391.
- [7] NING C, GAO P, WANG B, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(8): 1819–1831.
- [8] CAO X, WANG X, LU M, et al. The Cd phytoextraction potential of hyperaccumulator *Sedum alfredii*-oilseed rape intercropping system under different soil types and comprehensive benefits evaluation under field conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285: 117504.
- [9] 卫泽斌, 郭晓方, 丘锦荣, 等. 间套作体系在污染土壤修复中的应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 267–272. WEI Z B, GUO X F, QIU J R, et al. Innovative technologies for soil remediation: intercropping or co-cropping[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl): 267–272.
- [10] ZHANG J, CAO X, YAO Z, et al. Phytoremediation of Cd-contaminated farmland soil via various *Sedum alfredii*-oilseed rape cropping systems: efficiency comparison and cost-benefit analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 419: 126489.
- [11] KANG Z, GONG M, LI Y, et al. Low Cd-accumulating rice intercropping with *Sesbania cannabina* L. reduces grain Cd while promoting phytoremediation of Cd-contaminated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 800: 149600.
- [12] 樊政, 王新伟, 喻小刚, 等. 中低汞污染下2种汞富集植物的发现[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(19): 62–65. FAN Z, WANG X W, YU X G, et al. The discovery of 2 kinds of mercury enrichment plants under low and middle mercury pollution[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2017, 45(19): 62–65.
- [13] XU L, SHI Q, TANG B C, et al. A new plant indicator (*Artemisia lavandulaefolia* DC.) of mercury in soil developed by fourier-transform near-infrared spectroscopy coupled with least squares support vector machine[J]. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2019: 1–6.
- [14] 王明勇, 乙引. 一种新发现的汞富集植物: 乳浆大戟[J]. 江苏农业科学, 2010, 274(2): 354–356. WANG M Y, YI Y. A newly discovered mercury-enriched plant: *Euphorbia esula* Linn.[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010, 274(2): 354–356.
- [15] 赵甲亭, 李云云, 高愈希, 等. 贵州万山汞矿地区耐汞野生植物研究[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(5): 881–887. ZHAO J T, LI Y Y, GAO Y X, et al. Study of mercury resistant wild plants growing in the mercury mine area of Wanshan district, Guizhou Province[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, 9(5): 881–887.
- [16] 王明勇, 乙引, 张习敏, 等. 汞矿废弃地草本植物对汞污染土壤的适应性特征[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(1): 29–32. WANG M Y, YI Y, ZHANG X M, et al. Adaptation of herbaceous plants in the waste mercury mining area to the mercury-polluted soil[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2010, 38(1): 29–32.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3th Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 马生凤, 孙德忠, 巩爱华, 等. 大管回流消解 ICP-MS 测定植物样品中的 Hg 及其他痕量元素[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(2): 136–140. MA S F, SUN D Z, GONG A H, et al. Determination of mercury and other trace elements in plant samples by ICP-MS with furnace digestion[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2007, 26(2): 136–140.
- [19] 化玉瑾, 张敏英, 陈明, 等. 炼金区土壤中汞形态分布及其生物有效性[J]. 环境化学, 2015, 34(2): 234–240. HUA Y J, ZHANG M Y, CHEN M, et al. Distribution and bioavailability of mercury in the soil of gold mine zone[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(2): 234–240.
- [20] 胡焱鑫, 梁星雨, 安燕, 等. 万山汞矿区稻田土壤生物有效性汞的提取方法[J]. 矿物学报, 2022, 42(1): 106–112. HU Y X, LIANG X Y, AN Y, et al. A study on the extraction method of bioavailable mercury in the contaminated paddy soil in the Wanshan area, Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2022, 42(1): 106–

- 112.
- [21] QIN L, LI Z, LI B, et al. Organic acid excretion in root exudates as a mechanism of cadmium uptake in a *Sonchus asper*-*Zea mays* intercropping system[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 107(6):1059-1064.
- [22] PIRZADAH T B, MALIK B, TAHIR I, et al. Characterization of mercury-induced stress biomarkers in *Fagopyrum tataricum* plants[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(3):225-236.
- [23] LIN H, WANG Z, LIU C, et al. Technologies for removing heavy metal from contaminated soils on farmland: a review[J]. *Chemosphere*, 2022, 305:135457.
- [24] HU R, ZHANG Z, LIN L, et al. Intercropping with hyperaccumulator plants decreases the cadmium accumulation in grape seedlings[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 2019, 69(4):304-310.
- [25] SINGH S, PARIHAR P, SINGH R, et al. Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 6:1143.
- [26] GHORI N H, GHORI T, HAYAT M Q, et al. Heavy metal stress and responses in plants[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16:1807-1828.
- [27] YAASHIKAA P R, KUMAR P S, JEEVANANTHAM S, et al. A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 301:119035.
- [28] 刘小平, 高润霞, 吕发生, 等. 小白菜间作对苎麻地上部分汞吸收富集的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(24):29-33. LIU X P, GAO R X, LÜ F S, et al. Effect of pakchoi intercropping on Hg absorption and accumulation in remie overground part[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(24):29-33.
- [29] JIANG R F, MA D Y, ZHAO F J, et al. Cadmium hyperaccumulation protects *Thlaspi caerulescens* from leaf feeding damage by thrips (*Frankliniella occidentalis*)[J]. *New Phytologist*, 2005, 167(3):805-814.
- [30] 肖乃川, 张云霞, 宋波, 等. 广东省典型富镉铅锌矿区中优势植物重金属富集特性与应用潜力[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(3):343-347. XIAO N C, ZHANG Y X, SONG B, et al. Enrichment characteristics and application potential of dominant plants for heavy metals in typical cadmium-rich lead-zinc mining areas of Guangdong [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(3):343-347.
- [31] BEHMER S T, LLOYD C M, RAUBENHEIMER D, et al. Metal hyperaccumulation in plants: mechanisms of defence against insect herbivores[J]. *Functional Ecology*, 2005, 19(1):55-66.
- [32] HUITSON S B, MACNAIR M R. Does zinc protect the zinc hyperaccumulator *Arabidopsis halleri* from herbivory by snails?[J]. *New Phytologist*, 2003, 159(2):453-459.
- [33] RATHINASABAPATHI B, RANGASAMY M, FROEBA J, et al. Arsenic hyperaccumulation in the Chinese brake fern (*Pteris vittata*) deters grasshopper (*Schistocerca americana*) herbivory[J]. *New Phytologist*, 2007, 175(2):363-369.
- [34] GALEAS M L, KLAMPER E M, BENNETT L E, et al. Selenium hyperaccumulation reduces plant arthropod loads in the field[J]. *New Phytologist*, 2008, 177(3):715-724.
- [35] BOYD R S. The defense hypothesis of elemental hyperaccumulation: status, challenges and new directions[J]. *Plant and Soil*, 2007, 293:153-176.
- [36] BOYD R S, DAVIS M A, WALL M A, et al. Nickel defends the south African hyperaccumulator *Senecio coronatus* (Asteraceae) against *Helix aspersa* (Mollusca: Pulmonidae)[J]. *Chemoecology*, 2002, 12:91-97.
- [37] POLLARD A J, BAKER A J M. Deterrence of herbivory by zinc hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae)[J]. *The New Phytologist*, 1997, 135(4):655-658.
- [38] 李非里, 邵鲁泽, 吴兴飞, 等. 植物修复重金属强化技术和间套种研究进展[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(3):345-354. LI F L, SHAO L Z, WU X F, et al. Research progress of enhanced phytoremediation for heavy metals and intercropping technique[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2021, 49(3):345-354.