

李富荣, 李敏, 朱娜, 等. 水作和旱作施用改良剂对蔬菜-土壤系统中铅镉生物有效性的影响差异[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1477-1483.

LI Fu-rong, LI Min, ZHU Na, et al. Comparing the effects of soil amendments on Pb and Cd bioavailability in water spinach under water submersion cultivation and dry farming conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1477-1483.

水作和旱作施用改良剂对蔬菜-土壤系统中铅镉生物有效性的影响差异

李富荣, 李敏, 朱娜, 杜应琼, 王富华*, 李嘉琳, 陈永坚

(1.广东省农业科学院农产品公共监测中心, 广州 510640; 2.农业部农产品质量安全检测与评价重点实验室, 广州 510640; 3.农业部农产品质量安全风险评估实验室(广州), 广州 510640)

摘要:为探讨不同农艺调控措施组合对蔬菜-土壤系统重金属生物有效性的影响,以能同时适应水作和旱作两种栽培方式的蔬菜为研究对象,探讨了在人为添加铅镉复合污染情况下,不同栽培方式和施用改良剂(石灰或生物炭)的农艺调控措施组合对蔬菜中铅镉累积规律的影响差异,并从不同处理情况下的土壤理化性质和重金属有效态含量变化特征等方面分析其作用机理。结果发现,旱作和水作两种栽培方式下,蔬菜中重金属累积及土壤重金属有效态等方面出现了不同的变化规律:在水作条件下施用石灰比旱作能更有效地降低土壤铅镉有效态含量,而水作条件下施用石灰和生物炭均能在提高蔬菜产量的情况下降低蔬菜中铅镉含量,且施用 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭的效果最优。总的来说,与旱作模式相比,水作条件下施用改良剂往往对蔬菜-土壤系统中铅镉累积特性的影响效果更明显。

关键词:栽培方式;重金属污染;生物炭;石灰

中图分类号:S156.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)08-1477-07 doi:10.11654/jaes.2017-0021

Comparing the effects of soil amendments on Pb and Cd bioavailability in water spinach under water submersion cultivation and dry farming conditions

LI Fu-rong, LI Min, ZHU Na, DU Ying-qiong, WANG Fu-hua*, LI Jia-lin, CHEN Yong-jian

(1.Public Monitoring Center for Agro-product of Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 501640, China; 2.Key Laboratory of Testing and Evaluation for Agro-product Safety and Quality, Ministry of Agriculture, P R China, Guangzhou 510640, China; 3.Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-product(Guangzhou), Ministry of Agriculture, P R China, Guangzhou 510640, China)

Abstract:To study the effects of different agronomic measures on heavy metal bioavailability in vegetable-soil systems, in this study, water spinach, which can adapt to both water submersion cultivation and dry farming conditions, was chosen as the research subject. The aim of the study was to compare the effects of applying soil amendments(lime or biochar) on Pb and Cd accumulation by water spinach using different cultivation methods in the soil artificially polluted with a combination of high concentrations of Pb and Cd. In addition, the changes in soil physical and chemical properties and available heavy metal contents under different agronomic measures were analyzed to reveal the influential mechanisms. It turned out that under the two cultivation methods, water spinach showed different accumulation effects of heavy metals and soil heavy metal availabilities. Applying lime under water submersion cultivation conditions could reduce the available contents

收稿日期:2017-01-04

作者简介:李富荣(1984—),女,湖北仙桃人,博士,副研究员,主要从事农产品产地环境重金属监测与污染修复研究。E-mail: lifr0314@163.com

*通信作者:王富华 E-mail: wfhwqs@163.com

基金项目:广东省自然科学基金项目(2015A030313571);广东省科技计划项目(2014A020208069, 2013B020204001, 2014A020208067);广东省现代农业科技创新团队项目(2017LM2149)

Project supported: The Natural Science Foundation of Guangdong Province(2015A030313571); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province(2014A020208069, 2013B020204001, 2014A020208067); The Innovation Team Program of Modern Agricultural Science and Technology of Guangdong Province(2017LM2149)

of Pb and Cd in soil more effectively than that under dry farming conditions. Additionally, under water submersion cultivation conditions, applying both lime and biochar could reduce the Pb and Cd contents in vegetables as the yield increased, but the effect of applying 6 g biochar·kg⁻¹ soil was the best. In summary, compared with dry farming, applying soil amendments under water submersion cultivation conditions could affect Pb and Cd accumulation characteristics in the soil-plant system more.

Keywords: cultivation method; heavy metal pollution; biochar; lime

随着工农业的发展,矿产资源的持续开采利用以及污水灌溉和农药化肥的大量使用,给农田土壤环境带来日趋严重的重金属污染问题^[1-2]。在诸多重金属元素中,铅和镉是环境中备受关注的有毒重金属,其所带来的污染问题尤为突出^[3-4]。农田土壤中的铅镉可通过食物链进入人体,从而严重危害人类健康。因此,控制农田土壤中的铅、镉生物有效性,最大程度减少其向农作物可食部分转移是一个亟待解决的问题^[5-6],同时也是一个世界性的难题,虽然很多方法如物理法、化学法和生物法相继问世,但每种方法都有各自的优缺点^[7-8]。

对于我国大部分地区耕地资源紧缺、污染程度相对较轻的农田环境,农艺调控措施因其简单易行、经济成本低且不中断农业生产等优越性而备受关注^[9-10]。越来越多的实践证明,采取适宜的农艺调控措施,如农田水分调控、低积累品种种植、土壤 pH 调节、叶面喷施拮抗物质和合理施用化肥等单项农艺措施均能有效降低土壤重金属有效性,可减少重金属通过食物链进入人体的机会,是在重金属中轻度污染土壤上持续进行蔬菜安全生产最经济有效的途径^[11-12]。然而,在实际生产过程中,单一的农艺调控措施往往难以达到安全生产的要求,探讨不同农艺调控措施结合对控制蔬菜等农作物重金属吸收、累积的效果具有重要的实践意义。本研究以能同时适应水作和旱作两种栽培方式的蕹菜(*Ipomoea aquatica* Forsk)为研究对象,探讨了不同栽培方式和施用改良剂(石灰或生物炭)的组合对蕹菜中铅镉累积规律的影响差异,并从不同农艺调控措施组合下土壤理化性质和重金属有效态含量变化特征方面分析其作用机理。旨在为发展蔬菜安全生产控制技术,提高耕地资源利用率,保证农产品质量安全提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试蔬菜为市售常见的泰国柳叶蕹菜,产自泰国蔡荣成种子有限公司。盆栽试验土壤采自广州市天河区大丰路某菜地耕层土壤(0~20 cm),其土壤类型、

pH、有机质和重金属含量等信息见表 1,土壤铅镉含量均符合 GB 15618—1995 土壤环境质量二级标准(pH 6.5~7.5 时,铅总量≤300 mg·kg⁻¹,镉总量≤0.3 mg·kg⁻¹)。采集的土壤经风干、磨碎后,过 10 mm 孔径筛,混匀备用。

表 1 盆栽土壤理化性质及土壤铅镉本底值

Table 1 Soil physical and chemical properties and Pb and Cd contents in the pot experiment

土壤类型	pH 值	有机质 含量/%	全量/mg·kg ⁻¹		有效态含量/mg·kg ⁻¹	
			Pb	Cd	Pb	Cd
砂壤土	6.92	1.70	68.22	0.25	13.45	0.12

试验所用改良剂为石灰和生物炭。石灰为分析纯氢氧化钙,天津市福晨化学试剂厂生产;生物炭采用无氧慢速升温炭化法制得,将干燥的水稻秆剪成 10~20 cm 的小段后,放在真空箱式气氛炉内,通入氮气作为保护气,以 10 °C·min⁻¹ 速度升温至 600 °C 后恒温炭化 2 h,冷却至室温后取出,研磨粒径为通过 20 目筛孔的生物炭颗粒备用^[13]。石灰中铅镉含量分别为 4.88 mg·kg⁻¹ 和 0.01 mg·kg⁻¹,生物炭中铅镉含量分别为 6.27 mg·kg⁻¹ 和 0.96 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用水作(W)和旱作(D)两种栽培方式,分别施用石灰(L)和生物炭(B)两种改良剂。旱作处理:在蔬菜生长期间,将土壤水分控制在饱和持水量的 75% 左右;水作处理:在蔬菜生长期间,土面始终保持 1~2 cm 水层^[14]。两种改良剂各设 2 个用量水平(3 g·kg⁻¹ 和 6 g·kg⁻¹ 风干土^[15]),2 个石灰处理用 L1 和 L2 表示;2 个生物炭处理用 B1 和 B2 表示,对照 CK 共用),共 10 个处理,每个处理 3 次重复。

试验于 2015 年 7 月上旬起在广东省农科院监测中心盆栽试验场进行,盆栽所用盆钵为直径 35 cm、高 28 cm 的塑料桶,每桶装土 6.5 kg(干质量)。以每盆 2 L Pb(NO₃)₂+Cd(NO₃)₂ 溶液的形式分别额外施加 400 mg·kg⁻¹ 铅、5 mg·kg⁻¹ 镉来人工模拟铅镉复合污染土壤,使土壤淹水陈化,在此期间充分搅拌保证土

壤铅镉浓度均匀,后期不再加水,盆中积水自然蒸发。20 d 后土壤全铅为 $484.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态铅为 $261.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全镉为 $5.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态镉为 $2.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。然后依相关试验处理分别加入两个施用量的石灰和生物炭,充分搅拌摇匀、平衡 5 d 后,每桶再添加尿素 2.83 g 、 KH_2PO_4 1 g 、 K_2CO_3 1.03 g 作为基肥。每盆播种 25 粒,待幼苗长出 2 片真叶时每盆定苗 10 株,并分别开始旱作和水作的不同水分处理。播种 35 d 后地上可食部分和根部分别收获,并采集土壤(水作处理下的土壤待盆中积水蒸发后采集),测定土壤、蔬菜相关指标。除水分管理措施外,试验期间各处理的病虫害防治等栽培管理措施一致。

1.3 样品制备及测定

土壤样品:蔬菜收获后用不锈钢土钻采集盆内土样,经自然风干后锤碎并去除异物,研磨后取部分土样依次过 20 目和 100 目尼龙筛,进行 pH、有机质、有效态重金属含量测定。土壤 pH 值参照 NY/T 1121.2—2006,采用 1:2.5 水浸提法测定;土壤有机质含量参照 GB 9834—1988,采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法测定;土壤重金属有效态含量用 DTPA 提取剂($0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTPA+ $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ TEA+ $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2)浸提,采用原子吸收法测定有效态铅和有效态镉含量。

蔬菜样品:采集后取可食用部分,用自来水将样品上的泥土洗净再以去离子水冲洗,用滤纸吸去表面水分,将鲜样捣碎成匀浆后于 -20°C 低温贮存待测。其重金属镉含量依据国家标准《食品中铅的测定》(GB 5009.12—2010)和《食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014),用石墨炉原子吸收光谱仪测定。检测质量控制采用国家标准物质 GSB-5 圆白菜(GBW10014),购于国家标准物质中心,每批次标准物质结果均在允许范围内。

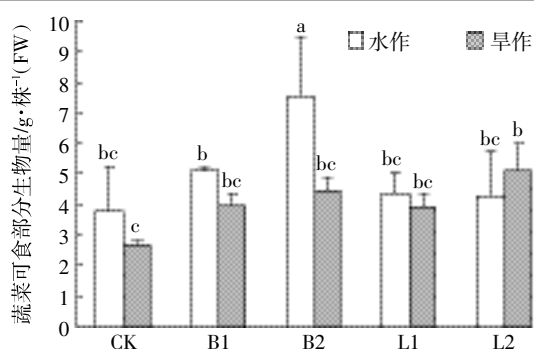
1.4 数据处理

所有试验数据采用 Microsoft Excel 软件进行预处理,用 SPSS 19.0 软件进行统计分析。运用 t -检验进行差异显著性检验,显著性水平设定 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 蔬菜可食部分生物量变化

由图 1 可见,水作和旱作两种栽培方式下施用石灰和生物炭均使新鲜蔬菜可食部分生物量增加。相同改良剂处理下,总体上水作条件下蔬菜生物量比旱作高,但除 B2 处理外,两种栽培方式的差异并不显著。在水作情况下,施用生物炭对蔬菜生物量增加的效果



数据后相同小写字母者表示在 0.05 水平上差异不显著。下同
The same lower case letters after the data showed no significant difference at the 0.05 level. The same below

图 1 不同栽培方式下添加改良剂后蔬菜可食部分生物量变化

Figure 1 Changes of edible part biomass of water spinach with applying soil amendments under different cultivation methods

优于石灰,B2 处理效果最好,能使蔬菜生物量明显增加 98.6%。在旱作情况下,随改良剂使用量加大蔬菜生物量相比对照的增量也升高,其中 L2 处理效果最好,能使蔬菜生物量明显增加 89.2%。

2.2 蔬菜可食部分铅镉含量变化

由图 2 可见,在水作情况下,除 B1 处理外,其他改良剂处理均使蔬菜可食用部分铅含量下降,且与对照相比,B2、L1 处理使蔬菜可食用部分铅含量降低幅度分别达 52.3%和 37.9%。在旱作情况下,仅 B2 施用 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理使蔬菜可食用部分铅含量下降,与对照相比其降幅为 13.9%。而同样是 L1 处理,对蔬菜铅而言,旱作情况下其含量远高于水作;对蔬菜镉而言,则正好相反。

在水作情况下,施用两种改良剂均可降低蔬菜可食用部分的镉含量,其中 B2、L2 处理与对照相比降低效果明显,降低幅度分别达 56.4%和 40.0%。在旱作情况下,除 L2 处理外,其他改良剂处理均使蔬菜可食用部分镉含量下降,且与对照相比,L1 处理的降低效果明显,下降幅度达 51.3%。

2.3 土壤有效态铅镉含量变化

由图 3 可见,在水作情况下,施用两种改良剂均可降低土壤有效态铅含量,其中 L1、L2 处理与对照相比降低效果明显,降低幅度分别达 14.1%和 13.1%。在旱作情况下,除 B1 处理外,其他改良剂处理均使土壤有效态铅含量下降,但效果不显著。

在水作情况下,施用两种改良剂均可降低土壤有效态镉含量,其中 L1、L2 处理与对照相比降低效果明显,降低幅度分别达 19.4%和 19.7%。而在旱作情况

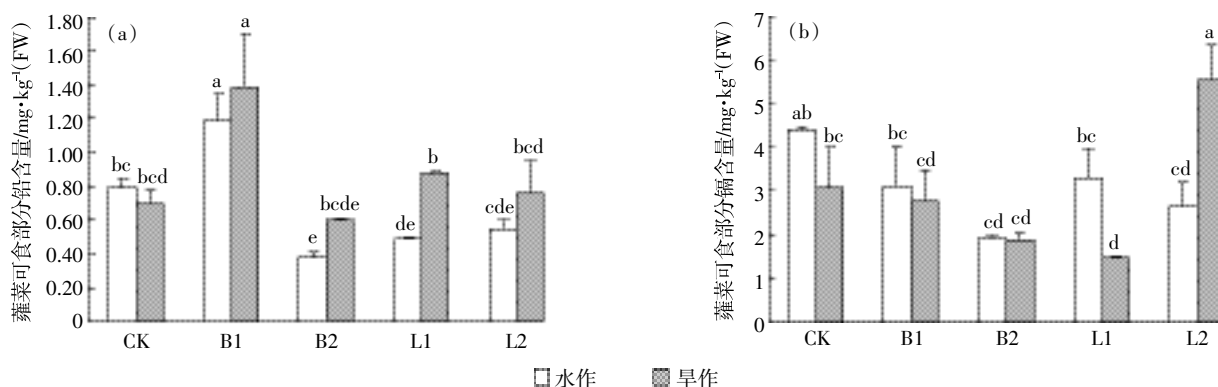


图2 水作和旱作下添加改良剂后蕹菜可食部分铅(a)和镉(b)含量变化

Figure 2 Changes of Pb(a) and Cd(b) contents in edible parts of water spinach with applying soil amendments under different cultivation methods

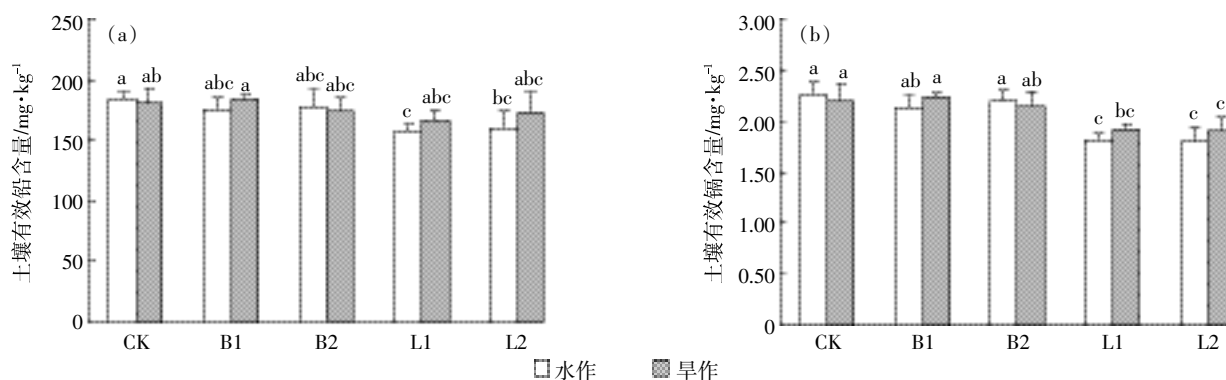


图3 不同栽培方式下添加改良剂后土壤铅(a)和镉(b)有效态含量变化

Figure 3 Changes of available Pb(a) and Cd(b) contents in soil with applying soil amendments under different cultivation methods

下,除 B1 处理外,其他改良剂处理均使土壤有效态镉含量下降,但仅 L1、L2 处理降低效果明显,降低幅度分别达 12.4%和 12.8%。

2.4 土壤理化性质变化

由图 4 可见,两种栽培方式下施用两种改良剂大多能使土壤 pH 值升高。水作条件下,各改良剂处理均使土壤 pH 值增加明显,在 L2 处理下增幅最高,达 11.8%。旱作条件下,除 B1 处理外,其他处理均使土壤 pH 值增加,且施用石灰处理 L1 和 L2 与对照相比增加效果显著,增幅分别达 9.6%和 7.5%。

在对土壤有机质的影响方面,两种栽培方式下施用不同量的生物炭均使其有所增加,且在 B2 处理下与对照相比增加明显,旱作和水作情况下有机质增幅分别达 68.9%和 45.9%;而两种栽培方式下施用石灰对土壤有机质几乎均无影响。

3 讨论

在不同的栽培方式下,土壤中水分含量和状态、

pH 值、有机质、氧化还原状况等均发生变化,从而影响重金属的生物有效性和迁移转化规律^[16]。很多研究表明,水分可以显著影响植物体内重金属含量。土壤的水分状况可严重影响土壤中重金属的再分配^[17]。淹水处理土壤中重金属倾向于从交换态和碳酸盐结合态等易提取态转变为铁锰结合态和有机质结合态等更稳定的形态^[18]。在有机质和含硫化物较丰富的土壤中,淹水可使铁等金属离子与镉的竞争吸附作用以及硫和镉的共沉淀作用加强,使土壤中镉的生物有效性明显降低^[19-20]。而当排水造成氧化淋溶环境时,硫化物易氧化成硫酸引起 pH 降低,使镉等重金属元素释放出来,从而易被植物根系吸收^[21-22]。本研究中,旱作和水作两种栽培方式下,蕹菜重金属累积及土壤重金属有效性等方面出现了不同的变化规律,进一步证明水分管理对调控重金属在土壤-植物系统中的迁移存在一定的影响^[23]。王艳红等^[14]发现水作能降低蕹菜中镉含量,但本研究中水作情况下除 L2 处理外,蕹菜可食用部分镉含量均高于旱作,表明不同水分管理的具

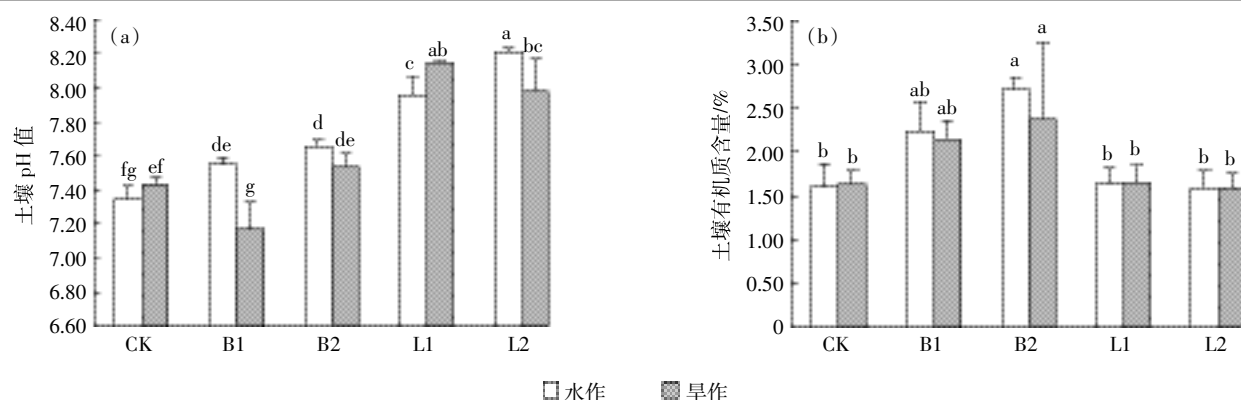


图4 不同栽培方式下添加改良剂后土壤 pH 值(a)和有机质含量(b)变化

Figure 4 Changes of soil pH(a) and organic matter content(b) with applying soil amendments under different cultivation methods

体影响效果与土壤重金属的种类和浓度,以及同时施用的其他重金属调控措施有关。

施用化学改良剂作为一种经济高效的面源污染治理的原位修复技术,因其成本低廉、易于实施,符合我国可持续农业发展的需要,近年来发展较快^[24-25]。石灰作为一种有效的改良剂,施用石灰一方面可提高土壤 pH 值,促进重金属生成碳酸盐结合态或硫化物结合态沉淀来降低其生物有效性,减少重金属对植物的伤害;另一方面,pH 调节至中性有利于植物吸收其他养分元素,促进植物生长^[26-27]。在两种栽培方式下,施用石灰的各处理均使土壤 pH 值明显升高,且一定程度上降低了土壤重金属的有效态含量。生物炭作为一种含碳量丰富的新型环境功能材料^[28-29],能够促进土壤有机质水平的提高,一方面生物炭能吸附土壤有机分子,通过表面催化活性促进小的有机分子聚合形成土壤有机物质(SOM),另一方面生物炭本身极为缓慢的分解过程有助于腐殖质的形成,通过长期作用促进土壤肥力的提高^[30-31]。本研究中两种栽培方式下,施用生物炭均增加了土壤有机质含量,特别是施用 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物炭处理作用效果明显,在旱作和水作情况下有机质增幅分别达 68.94%和 45.90%,证实了施用改良剂能有效地提高土壤肥力,促进蔬菜生长从而降低重金属对植物的毒害^[32]。

在不同栽培方式下,进行土壤改良剂添加的不同农艺调控措施组合对蔬菜重金属累积量的影响不同^[10,33]。本研究中水作情况下,施用改良剂对降低蔬菜重金属铅含量的影响大于旱作。水作时添加 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 石灰和 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物炭分别使蔬菜铅含量明显下降 52.30%和 37.87%,而旱作时仅添加 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物炭处理使蔬菜铅含量下降了 13.88%。对蔬菜镉含量而言,水作时添加 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物炭可使其下降最多,达

56.35%,而旱作时添加 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 石灰使其下降量最多达 51.31%。不同重金属元素,其被蔬菜吸收的能力受水分影响的效果也有所区别。如同样是添加 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 石灰处理,蔬菜铅含量在旱作情况下远高于水作;而蔬菜镉含量在旱作情况下远低于水作。这可能与每种元素在植物体内的转运机制不同有关^[34]。不同栽培方式下,添加改良剂对不同土壤重金属元素的有效性影响也有所差异。水作情况下,不同施用量的石灰添加均能显著降低土壤有效态铅和镉的含量;而旱作情况下,仅施用石灰的处理使土壤有效态镉含量降低,有效态铅尽管有所降低但效果不显著。可见土壤铅的有效性受土壤水分的影响较大。这可能与土壤吸附铅和镉的机理不同有关,土壤吸附铅过程中化学沉淀、沉积还原等化学吸附占优势(80%),而吸附镉的机理主要是以离子交换为主的物理吸附(50%),其次才是化学吸附(30%~40%)^[35]。在水作模式和改良剂互作效应下,土壤氧化还原电位等发生改变,弱化了改良剂的作用^[33]。

本研究采用农艺调控措施对蔬菜中铅镉含量的降低效果未达到食品安全标准(GB 2762—2012)Pb $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 Cd $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,可能由于外源铅镉以无机盐形式添加,其有效性较高^[36]。尽管其适用阈值有待进一步研究确定,但本研究对中小程度重金属铅镉污染土壤中蔬菜的安全种植仍具有切实的指导意义。

4 结论

与旱作模式相比,水作条件下施用改良剂对蔬菜-土壤系统中铅镉迁移的影响效果往往更大。在水作情况下施用石灰比旱作下能更有效地降低土壤铅镉有效态含量,而水作下施用石灰和生物炭均能在

提高蔬菜产量的情况下降低蔬菜中铅镉含量,且施6 g·kg⁻¹生物炭的效果最优。

参考文献:

- [1] Khan S, Hesham A E, Qiao M, et al. Effects of Cd and Pb on soil microbial community structure and activities[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, 17(2):288-296.
- [2] Shao D W, Zhan Y, Zhou W J, et al. Current status and temporal trend of heavy metals in farmland soil of the Yangtze River Delta Region: Field survey and meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219:329-336.
- [3] Khan S, Cao Q, Hesham A E, et al. Soil enzymatic activities and microbial community structure with different application rates of Cd and Pb[J]. *Journal of Environment Science*, 2007, 19(7):834-840.
- [4] Li S Y, Zhang S R, Ding X D, et al. Spraying silicon and/or cerium sols favorably mediated enhancement of Cd/Pb tolerance in Lettuce grown in combined Cd/Pb contaminated soil[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, 18:68-77.
- [5] Hu J L, Wu F Y, Wu S C, et al. Phytoavailability and phytovariety code-terminate the bioaccumulation risk of heavy metal from soils, focusing on Cd-contaminated vegetable farms around the Pearl River Delta, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 91(2):18-24.
- [6] 杜乔娣, 黄占斌, 沈 忱, 等. 环境材料对铅、镉、砷胁迫下玉米种子萌发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):874-879.
DU Qiao-di, HUANG Zhan-bin, SHEN Chen, et al. Effect of environmental materials on germination of maize seed under stress of lead, cadmium and arsenic[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):874-879.
- [7] Al-Hamdan A Z, Reddy K R. Transient behavior of heavy metals in soils during electrokinetic remediation[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(5):860-871.
- [8] Peng C, Wang M E, Chen W P. Modelling cadmium contamination in paddy soils under long-term remediation measures: Model development and stochastic simulations[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216:146-155.
- [9] Nóvoa-Muñoz J C, Simal-Gándara J, Fernández-Calviño D, et al. Changes in soil properties and in the growth of *Lolium multiflorum* in an acid soil amended with a solid waste from wineries[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(15):6771-6779.
- [10] 沈 欣, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8):1449-1454.
SHEN Xin, ZHU Qi-hong, XU Han-hua, et al. Effects of agronomic measures on accumulation of Cd in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1449-1454.
- [11] Darvishi S, Ardakani M R, Vazan S, et al. Feasibility study on reducing lead and cadmium absorption by spinach (*Spinacia oleracea* L.) in a contaminated soil using nanoporous activated carbon[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2012, 293(1):167-173.
- [12] 彭世彰, 乔振芳, 徐俊增, 等. 控制灌溉模式对稻田土壤-植物系统镉和铬累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6):94-99.
PENG Shi-zhang, QIAO Zhen-fang, XU Jun-zeng, et al. Effect of controlled irrigation on accumulation of heavy metal Cd, Cr in soil-plant system in rice paddy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6):94-99.
- [13] 何飞飞, 梁运珊, 吴爱平, 等. 不同生物炭用量对酸性菜地土硝化作用的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9):2376-2383.
HE Fei-fei, LIANG Yun-shan, WU Ai-ping, et al. Effect of biochar on nitrification from vegetable-planting acid soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9):2376-2383.
- [14] 王艳红, 李盟军, 唐明灯, 等. 水作和旱作对叶菜吸收镉的影响差异研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4):770-774.
WANG Yan-hong, LI Meng-jun, TANG Ming-deng, et al. Comparison between water-submerging-cultivation and dry farming in reducing Cd concentration in water spinach[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(4):770-774.
- [15] 郭利敏, 艾绍英, 唐明灯, 等. 不同改良剂对土壤-叶菜系统 Cd 迁移累积的调控作用[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8):1520-1525.
GUO Li-min, AI Shao-ying, TANG Ming-deng, et al. Effect of different amendments on translocation and accumulation of cadmium in the soil-*Brassica chinesis* system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8):1520-1525.
- [16] Li P, Wang X X, Zhang T L, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(4):449-455.
- [17] Han F X, Banin A, Triplett G B. Redistribution of heavy metals in arid-zone soils under a wetting-drying cycle soil moisture regime[J]. *Soil Science*, 2001, 166(1):18-28.
- [18] Zheng S A, Zhang M K, Dai T, et al. Effects of incubation time and moisture on the redistribution of heavy metals in a loessial soil of China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2010, 19(11):2719-2726.
- [19] Arao T, Kawasaki A, Baba K, et al. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(24):9361-9367.
- [20] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9):3930-3939.
JI Xiong-hui, LIANG Yong-chao, LU Yan-hong, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):3930-3939.
- [21] 徐加宽, 杨连新, 王余龙, 等. 水稻对重金属元素的吸收与分配机理的研究进展[J]. 植物学通报, 2005, 22(5):614-622.
XU Jia-kuan, YANG Lian-xin, WANG Yu-long, et al. Advances in the study uptake and accumulation of heavy metal in rice (*Oryza sativa*) and its mechanisms[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 22(5):614-622.
- [22] 王昌全, 代天飞, 李 冰, 等. 稻麦轮作下水稻土重金属形态特征及其生物有效性[J]. 生态学报, 2007, 27(3):889-897.
WANG Chang-quan, DAI Tian-fei, LI Bing, et al. The speciation and bioavailability of heavy metals in paddy soils under the rice-wheat cultivation rotation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):889-897.
- [23] 张丽娜, 宗良纲, 付世景, 等. 水分管理方式对水稻在 Cd 污染土壤上生长及其吸收 Cd 的影响[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5):49-

- 52.
- ZHANG Li-na, ZONG Liang-gang, FU Shi-jing, et al. Effects of water control on rice growth and its in take of cadmium on Cd contaminated soil[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5):49-52.
- [24] Bian R J, Joseph S, Cui L Q, et al. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 272(4): 121-128.
- [25] Wu Z C, Wang F H, Liu S, et al. Comparative responses to silicon and selenium in relation to cadmium uptake, compartmentation in roots, and xylem transport in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 131: 173-180.
- [26] Barakat M A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2010, 4(4):361-377.
- [27] Hale B, Evans L, Lambert R. Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility in field-contaminated and aged soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 199/200: 119-127.
- [28] Shackley S, Carter S, Knowles T, et al. Sustainable gasification-biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues[J]. *Energy Policy*, 2012, 42:49-58.
- [29] Bargmann I, Rillig M C, Buss W, et al. Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2013, 199(5):360-373.
- [30] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(6/7):577-585.
- [31] Lu H L, Zhang W H, Yang Y X, et al. Relative distribution of Pb^{2+} sorption mechanisms by sludge-derived biochar[J]. *Water Research*, 2012, 46(3):854-862.
- [32] Mendez A, Gomez A, Paz-Ferreiro J. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11):1354-1359.
- [33] 赵洁, 李富荣, 文典, 等. 不同作物栽培模式下施用改良剂对重金属铅、镉的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(7):1110-1116.
- ZHAO Jie, LI Fu-rong, WEN Dian, et al. Effects of soil amendment on heavy metals lead and cadmium under different crop cultivation patterns[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(7):1110-1116.
- [34] 段德超, 于明革, 施积炎. 植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1):287-296.
- DUAN De-chao, YU Ming-ge, SHI Ji-yan. Research advances in uptake, translocation, accumulation and detoxification of Pb in plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1):287-296.
- [35] 杨崇洁. 几种金属元素进入土壤后的迁移转化规律及吸附机理的研究[J]. 环境科学, 1989, 10(3):2-8.
- YANG Chong-jie. Transport and transformation of some heavy metals in soil and research of their adsorption mechanism[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1989, 10(3):2-8.
- [36] 邢维芹, 王亚利, Kirk G Scheckel, 等. 不同阴离子对水溶性磷酸盐稳定污染土壤中重金属的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10):2814-2820.
- XING Wei-qin, WANG Ya-li, Kirk G Scheckel, et al. Effects of anions on the immobilization of heavy metals in a polluted soil with soluble phosphate[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(10):2814-2820.