

施肥与填闲种植籽粒苋对油麦菜Cd和土壤Cd的影响

谷佳林, 苏世鸣, 陈延华, 赵同科, 魏丹, 杜连凤, 邹国元

引用本文:

谷佳林, 苏世鸣, 陈延华, 等. 施肥与填闲种植籽粒苋对油麦菜Cd和土壤Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2198–2204.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0243>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究

李想, 龙振华, 朱彦谚, 杨朕, 李明堂

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2239–2248 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0315>

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李烨, 张子胥, 付春雨

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2371–2379 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

潮土设施油麦菜田灌施猪场肥液的适宜模式研究

石亚楠, 张克强, 薛长亮, 赵君怡, 乔斌, 王凤

农业环境科学学报. 2015(9): 1747–1753 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.017>

镉耐性固定细菌的筛选及其对不同品种小麦镉吸收的阻控效应

孙乐妮, 郭迎雪, 侯雪婷, 庄杰, 杨章泽, 陈兆进, 田伟

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1878–1887 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0291>

叶面喷施两种典型纳米材料对苋菜积累多环芳烃的影响

袁彬彬, 周东美, 马晓玥, 方国东, 高娟

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1908–1915 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0160>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谷佳林, 苏世鸣, 陈延华, 等. 施肥与填闲种植籽粒苋对油麦菜 Cd 和土壤 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2198–2204.

GU Jia-lin, SU Shi-ming, CHEN Yan-hua, et al. Effects of fertilizers and *Amaranthus hypochondriacus* as a catch crop on cadmium uptake of lettuce and soil cadmium content[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2198–2204.



开放科学 OSID

施肥与填闲种植籽粒苋对油麦菜 Cd 和土壤 Cd 的影响

谷佳林¹, 苏世鸣², 陈延华¹, 赵同科¹, 魏丹¹, 杜连凤¹, 邹国元^{1*}

(1.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:为了分析评价农艺措施在叶菜类蔬菜生产过程中对阻控 Cd 污染方面的作用,于 2017 年 3 月至 2018 年 10 月以油麦菜为试材,在高含量 Cd 设施土壤上,采用随机区组田间试验,连续 2 年研究不同施肥及填闲种植籽粒苋对油麦菜产量、Cd 吸收及土壤 Cd 的影响。结果表明:有机肥料和无机肥料按照 1:1 的比例配施,可以显著提高油麦菜的产量;单施化肥不会导致土壤中总 Cd 的增加,但可促进植株对 Cd 的吸收。有机肥的大量施入存在土壤 Cd 累积的风险,而填闲种植籽粒苋可以有效防控这种风险。通过连续 2 年种植籽粒苋,试验各处理土壤 Cd 被带出 11 668.81~15 800.39 mg·hm⁻²。各施肥处理,土壤 Cd 净减少量从高到低依次为:单施化肥处理(16 219.03 mg·hm⁻²)>鸡粪加化肥处理(10 800.72 mg·hm⁻²)>羊粪加化肥处理(8 684.25 mg·hm⁻²)>单施鸡粪处理(6 423.05 mg·hm⁻²)>单施羊粪处理(3 400.11 mg·hm⁻²)。研究表明,综合考量产量、植株 Cd 含量及土壤 Cd 累积等因素,在油麦菜种植过程中采用鸡粪与化肥按照 1:1 的比例配施并结合填闲种植籽粒苋是推荐的农艺种植措施,可实现土壤中的 Cd 负增长。

关键词:油麦菜;施肥;填闲;籽粒苋;镉

中图分类号:S636.9;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)10-2198-07 doi:10.11654/jaes.2020-0243

Effects of fertilizers and *Amaranthus hypochondriacus* as a catch crop on cadmium uptake of lettuce and soil cadmium content

GU Jia-lin¹, SU Shi-ming², CHEN Yan-hua¹, ZHAO Tong-ke¹, WEI Dan¹, DU Lian-feng¹, ZOU Guo-yuan^{1*}

(1. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This study aimed to analyze and evaluate the effect of agronomic measures on the prevention and control of cadmium (Cd) accumulation during the production of leafy vegetables. The effects of different fertilizers and *Amaranthus hypochondriacus*, as a catch crop, on the yield, Cd uptake of lettuce, and the soil Cd content were studied over 2 years (from March 2017 to October 2018) using a randomized block field trial in greenhouse soils with high Cd content. The lettuce yield was significantly increased when organic and inorganic fertilizers were mixed in a 1:1 ratio. The application of chemical fertilizer alone did not increase the total Cd content in soil but significantly promoted Cd absorption by plants. The risk of soil Cd accumulation during the application of high rates of organic fertilizer was effectively prevented by the use of *A. hypochondriacus* as a catch crop. The removal of soil Cd after 2 years of continuous planting of *A. hypochondriacus* ranged from 11 668.81~15 800.39 mg·hm⁻². The net decrease in soil Cd for each fertilization treatment, from highest to lowest, was shown as follows: single chemical fertilizer treatment(16 219.03 mg·hm⁻²), fowl dung plus chemical fertilizer treatment(10 800.72 mg·hm⁻²), sheep manure plus chemical fertilizer treatment(8 684.25 mg·hm⁻²), single fowl dung treatment(6 423.05 mg·hm⁻²), and single sheep manure treatment(3 400.11 mg·hm⁻²). Considering the yield, plant Cd content, and soil Cd accumulation, the combination of fowl dung and chemical fertilizer at a 1:1 ratio and *A. hypochondriacus* as catch crop were recommended for lettuce cultivation. These measures ultimately reduced the Cd accumulation in soil.

Keywords: lettuce; fertilization; catch cropping; *Amaranthus hypochondriacus*; cadmium

收稿日期:2020-03-04 录用日期:2020-07-27

作者简介:谷佳林(1979—),男,河北承德人,博士,副研究员,主要从事土壤环境研究及新型肥料的研发。E-mail:13681240815@163.com

*通信作者:邹国元 E-mail:gyzou@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0801003);中国与联合国开发计划署绿色发展项目(cpr/19/401)

Project supported: National Key R&D Program of China(2016YFD0801003); China and UNDP Green Development Project(cpr/19/401)

镉(Cd)是一种毒性较强的重金属,土壤中有有效态Cd可被作物吸收进而通过食物链进入人体,危害人类健康^[1-3]。近年来,由于污灌、粪肥、农用化学物质的不合理施用以及工业“三废”的排放,中国耕地土壤Cd污染形势日益严峻^[4],全国土壤污染状况调查公报显示,土壤Cd点位超标率达到7.0%^[5]。尤其菜地重金属污染问题日益凸显,曾希柏等^[6]研究结果表明,按照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的Ⅱ级标准来衡量,全国约24.1%的菜地样本Cd含量超标。大量的研究表明,肥料的施用是土壤中Cd的主要来源之一,而且不同肥料及不同的施肥措施对土壤和作物中Cd含量的影响也不相同^[7-8]。目前对于Cd污染土壤的调控、修复方面的研究多集中于利用改土、电化、淋溶^[9-11]、钝化络合^[12-13]等工程修复以及通过植物、微生物、动物等生物修复^[14-15],而关于利用农艺措施阻控Cd污染土壤方面的研究相对较少,仅有的报道也主要是研究施肥量对于Cd输入输出平衡的影响,针对肥料品种及其如何搭配的研究较少,研究对象也多集中于水稻、玉米^[16]等粮食作物。油麦菜是市场常见的叶类蔬菜,在我国广泛种植。但以油麦菜为代表的设施叶类蔬菜由于生长周期短,一年可重复种植多茬,而且施肥量普遍较高,相比其他蔬菜,叶菜对Cd的吸收和富集能力更强,不合理的施肥会造成其品质下降^[17]和Cd污染风险^[18-19]。有研究表明籽粒苋具有生物量大、生长速度快、对Cd吸收能力强的特点,可用于防控土壤Cd累积^[20]。本文通过在高含量Cd的设施土壤上连续进行2年4茬的油麦菜栽培试验,研究不同施肥并结合填闲种植籽粒苋对油麦菜产量、Cd吸收及土壤中Cd含量的影响,分析评价上述农艺措施对阻控Cd污染的作用,为轻度污染土壤上叶类蔬菜科学施肥及安全生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区情况

试验于2017年3月至2018年10月在河北省青县李营村北大棚(116°45'38.10" E, 38°31'53.11" N)进行,试验对象为油麦菜,土壤为潮土,试验开始前对试

验地土壤情况进行取样分析,理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验共设6个处理:羊粪处理、鸡粪处理、化肥处理、羊粪+化肥处理、鸡粪+化肥处理、不施肥处理。各处理施氮量均为144 kg·hm⁻²。羊粪处理、化肥处理、鸡粪+化肥处理、羊粪+化肥处理P₂O₅和K₂O的用量分别为90 kg·hm⁻²和90 kg·hm⁻²。试验所用羊粪含氮(N)0.8%、磷(P₂O₅)0.5%、钾(K₂O)0.5%,pH 9.22;鸡粪含氮(N)1.6%、磷(P₂O₅)1.5%、钾(K₂O)0.85%,pH 7.86。磷酸二铵Cd含量为0.59 mg·kg⁻¹,羊粪Cd含量为0.18 mg·kg⁻¹,鸡粪Cd含量为0.25 mg·kg⁻¹。化肥为尿素、磷酸氢二铵、硫酸钾。试验采用单因素随机区组设计,每个处理3次重复,小区面积为7.0 m×2.1 m。油麦菜每年种植两茬,2017年4月1日定植油麦菜小苗,5月8日采收,9月7日定植小苗,10月25日采收。2018年4月5日定植油麦菜小苗,5月18日采收,9月5日定植小苗,10月25日采收。2017年5月25日至8月25日,2018年5月25日至8月30日种植籽粒苋,种植方式为种子条播,采收时将地上植株移出试验地。籽粒苋种植期间不施肥,每茬油麦菜定植前肥料采用表面撒施然后旋耕15 cm。表2为各处理代号及每茬施肥量。

1.3 测定项目与方法

产量测定:收获时,按小区收割测产量。

植株样品测定: Cd含量采用HNO₃-HClO₄消解,石墨炉原子吸收光谱法(GB 5009.15—2014)测定。

土样测定: pH采用电位法(水:土=2.5:1);有机质含量采用重铬酸钾法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用乙酸铵提取-火焰分光光度法^[21]测定。土壤有效态Cd采用DTPA浸提石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 23739—2009)测定;土壤全Cd采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸全消解石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141—1997)测定。

1.4 数据处理

试验数据应用Microsoft Excel 2016计算和作图,应用SPSS 17.0进行数据分析。

表1 试验地土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of studied soil

土层深度 Soil Layer/cm	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/%	碱解氮 Available N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	pH	总Cd Total Cd/(mg·kg ⁻¹)	有效态Cd Available Cd/(mg·kg ⁻¹)
0~30	30.10	0.21	125.00	155.70	691.00	7.90	0.55	0.17

表2 施肥量及处理代号(kg·hm⁻²)
Table 2 Schemes of nitrogen, phosphorus and potassium application of the treatments(kg·hm⁻²)

处理代号 Treatment code	处理 Treatments	鸡粪 Fowl dung	羊粪 Sheep manure	尿素 Urea	磷酸氢二铵 Ammonium dibasic phosphate	硫酸钾 Potassium sulfate
CK	不施肥					
JF	单施鸡粪	9 000				
YF	单施羊粪		18 000			
HF	化肥			244.5	214.5	180
JF+HF	鸡粪+化肥	4 500		139.5	52.5	103.5
YF+HF	羊粪+化肥		9 000	121.5	106.5	90

2 结果与讨论

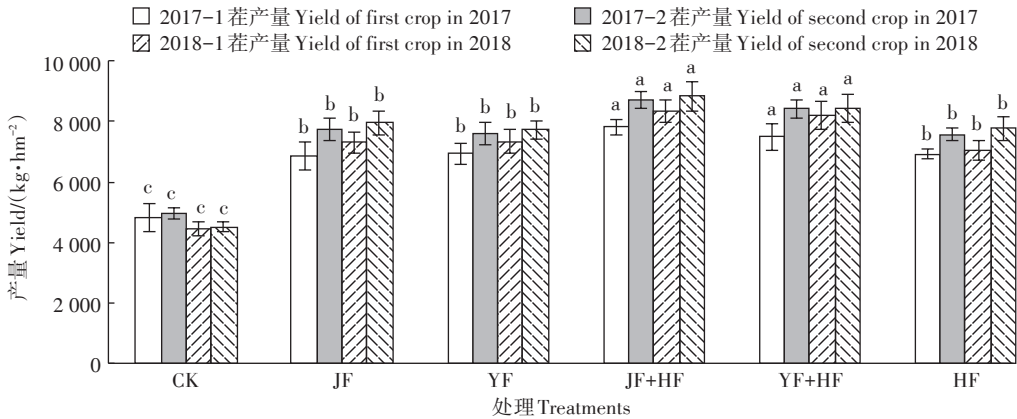
2.1 不同施肥对油麦菜产量的影响

连续2年4茬的试验数据表明,各施肥处理的油麦菜产量均显著高于CK处理(图1),说明试验地施肥可以提高油麦菜的产量,而且各处理产量差异表现出一致的规律性。CK、JF、YF、JF+HF、YF+HF和HF处理4茬油麦菜的平均产量分别为:4 690.97、7 461.94、7 398.65、8 413.14、8 133.40 kg·hm⁻²和7 321.27 kg·hm⁻²。JF+HF处理和YF+HF处理每茬的产量均显著高于其他施肥处理,表明采用有机肥料和无机肥料配合施用的方式有利于油麦菜植株的生长,能显著提高产量。JF、YF和HF处理间产量无显著性差异。

2.2 不同施肥对油麦菜植株Cd含量的影响

各处理的油麦菜植株中Cd的含量范围在0.018~0.035 mg·kg⁻¹(表3),均未超过《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)对叶菜限定的标准值0.2 mg·kg⁻¹,表明试验所采用施肥量及施肥模

式可以满足油麦菜的安全质量。但连续4茬各处理间植株中的Cd含量存在差异,其中2017年第2茬至2018年第2茬,连续3茬CK处理和HF处理的植株Cd含量显著高于其他处理,这与CK处理生物量显著低于其他处理,植株吸收重金属元素的生物稀释作用不足导致单位质量Cd浓度相对增加有关,进而表明合理施肥可以增加生物量,降低植株Cd的含量。这与前人研究结果^[22-25]类似。本试验中所施用的肥料中鸡粪、羊粪和磷酸二铵含有Cd, JF、YF、HF、JF+HF、YF+HF处理每茬Cd输入量分别是2 250.00、3 240.00、126.56、1 155.98 mg·hm⁻²和1 682.84 mg·hm⁻²。从Cd输入量来看, HF处理最少,但第2茬至第4茬HF处理植株中Cd含量均显著高于其他处理,表明化肥的施用可促进植株对Cd吸收,这与化肥的施入对Cd形态转化特征产生了影响有关^[26-28],而且有研究表明有机肥的施入可以降低植株Cd含量^[29]。值得注意的是各处理植株Cd含量均呈现小幅度下降的趋势。



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$)

图1 不同施肥对油麦菜的产量的影响

Figure 1 The yield of lettuce under different fertilization treatments

表3 不同施肥处理油麦菜植株Cd含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Effect of different fertilizer treatment on the Cd content of lettuce($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	2017-1 茬油麦菜 Cd 含量 Cd content of first crop lettuce in 2017	2017-2 茬油麦菜 Cd 含量 Cd content of second crop lettuce in 2017	2018-1 茬油麦菜 Cd 含量 Cd content of first crop lettuce in 2018	2018-2 茬油麦菜 Cd 含量 Cd content of second crop lettuce in 2018
CK	0.035±0.016a	0.030±0.006a	0.029±0.003a	0.028±0.004a
JF	0.021±0.003bc	0.023±0.003b	0.022±0.003b	0.020±0.002b
YF	0.019±0.004c	0.020±0.003b	0.020±0.002b	0.018±0.002b
JF+HF	0.021±0.002bc	0.020±0.002b	0.019±0.001b	0.019±0.002b
YF+HF	0.024±0.003b	0.022±0.003b	0.021±0.002b	0.021±0.004b
HF	0.035±0.011ab	0.031±0.006a	0.031±0.005a	0.030±0.003a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.3 各处理籽粒苋Cd吸收情况

由表4数据可以看出,同一茬籽粒苋各施肥处理生物产量无显著差异,但均显著高于CK处理。由于2017年各处理籽粒苋生物产量均高于其2018年的生物产量,且两茬籽粒苋植株Cd含量变化不大,导致2017年籽粒苋植株吸收Cd的量均高于2018年。两茬籽粒苋植株吸收Cd最多的均为YF处理。由于是大棚内种植,栽培前未施用肥料,只进行灌溉,因此本试验中籽粒苋的生物产量不高,植株Cd含量在 $0.10\sim 0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于较低水平,均符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)要求,可作为饲料加以利用。各处理累计吸收Cd量为 $11\ 668.81\sim 15\ 800.39\text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.4 不同施肥对土壤全Cd和有效态Cd含量的影响

表5为2018年第2茬油麦菜采收后0~30 cm土壤Cd的含量。数据表明,各处理土壤中的总Cd含量为 $0.50\sim 0.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且各处理间未达到显著性差异。但HF处理土壤的有效态Cd含量显著高于其他处理。虽然有研究表明pH与土壤有效态Cd呈负相关性^[6,30-31],但本试验中,HF处理的pH显著低于其他处

理,与试验开始前土壤pH 7.90相比,并不是因为化肥的施用导致土壤pH的降低,而是因为有机肥的施用导致了土壤pH的升高,从而降低了土壤有效态Cd含量,进而减少了植株的吸收量,这与表3数据也相吻合。从第2茬开始,HF处理油麦菜植株Cd含量显著高于其他施肥处理,再次表明植株Cd含量与土壤有效态Cd含量的相关性。本研究数据表明,施肥会对土壤中有有效态Cd的含量产生影响。

土壤Cd的输入和累积主要是由化肥(磷肥)和有

表5 土壤总Cd和有效态Cd含量

Table 5 The total Cd and available Cd of soil in different treatments

处理 Treatments	pH	总Cd Total Cd/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效态Cd Available Cd/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	8.18±0.14b	0.50±0.05a	0.08±0.01b
JF	8.33±0.10ab	0.51±0.02a	0.11±0.01b
YF	8.42±0.13a	0.53±0.08a	0.10±0.03b
JF+HF	8.19±0.15b	0.50±0.04a	0.09±0.01b
YF+HF	8.15±0.20b	0.50±0.05a	0.09±0.01b
HF	7.98±0.12c	0.51±0.08a	0.15±0.02a

表4 各处理籽粒苋产量及Cd吸收量

Table 4 Yield and cadmium uptake of *Amaranthus hypochondriacus* in different treatments

处理 Treatments	2017年生物产量 Yield in 2017/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	2017年植株Cd含量 Cd content in 2017/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	2017年植株Cd吸收量 Cadmium uptake in 2017/ ($\text{mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	2018年生物产量 Yield in 2018/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	2018年植株Cd含量 Cd content in 2018/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	2018年植株Cd吸收量 Cadmium uptake in 2018/ ($\text{mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	累计Cd吸收量 Total Cd uptake/ ($\text{mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
CK	51 014.98±1 992.52b	0.12±0.011 0a	6 121.80	46 225.11±2 095.98b	0.12±0.011a	5 547.01	11 668.81
JF	72 102.21±2 133.89a	0.11±0.009 0a	7 931.24	68 531.32±3 500.12a	0.10±0.010a	6 853.13	14 784.37
YF	69 083.51±2 864.54a	0.12±0.008 9a	8 290.02	68 213.36±2 640.35a	0.11±0.011a	7 503.47	15 793.49
JF+HF	71 284.65±2 501.36a	0.11±0.010 0a	7 841.31	69 185.54±2 979.54a	0.10±0.015a	6 918.55	14 759.86
YF+HF	70 975.36±2 991.87a	0.11±0.009 6a	7 807.29	68 977.21±1 891.65a	0.10±0.012a	6 897.72	14 705.01
HF	71 116.87±2 689.54a	0.12±0.009 9a	8 534.02	67 057.87±2 232.12a	0.11±0.010a	7 266.37	15 800.39

机肥(粪肥)引起,但进入土壤的Cd能否进入食物链主要取决于有效态Cd的量。有机肥可通过提升土壤有机质或有效磷从而降低金属活性^[32]。但也有研究认为有机肥中的酸性物质会通过改变土壤表面电荷性质从而活化Cd离子,甚至会活化过氧化物(Fe、Al),使其固定的Cd释放出来,从而提高Cd在土壤中有效态的比例。化肥也可通过产生结合位点或改变金属形态的方式降低Cd的有效性^[33],但其过量使用也会导致土壤酸化,增加Cd活性^[30]。本研究中,有机肥的施入导致了土壤的pH升高,与HF处理相比,其土壤中有有效态Cd含量显著降低,但HF处理土壤中的有效态Cd含量与基础土样中数据相比并无增加。因此,不能片面地强调有机肥或化肥对土壤有效态Cd的单一影响,应寻求将两者有机结合的施肥模式,确定最佳的配比,发挥不同肥料的优点,最低限度地降低土壤有效态Cd含量和植物对其的吸收,这方面的研究还需深入进行。

2.5 不同施肥及填闲种植籽粒苋对土壤Cd输入输出的影响

由于肥料Cd含量及施用量的不同,各处理因肥料的施用所带入土壤中的Cd含量相差较大,其中YF处理最高,4次施肥累计达到12 960 mg·hm⁻²,而HF处理施用的磷肥(磷酸二铵)Cd含量为0.59 mg·kg⁻¹,高于鸡粪和羊粪的0.25 mg·kg⁻¹和0.18 mg·kg⁻¹,但其施用量低,因此随肥料带入土壤中的Cd量显著低于施用了鸡粪或羊粪的处理,仅为506.22 mg·hm⁻²。由于化肥的施入,土壤pH低于其他处理,土壤中有有效态Cd含量相对较高(表5),油麦菜植株中Cd含量较高(表3),因此HF处理随油麦菜植株带出的Cd含量最高,为924.86 mg·hm⁻²。本试验过程中如果不进行填闲种植籽粒苋,各施肥处理中只有HF处理Cd的输入输出呈负增长,其他施肥处理都会随着肥料的逐年施用而导致土壤中的Cd逐年累积增加。从土壤中Cd

的净增长量数据看(表6),由于进行了填闲籽粒苋种植,被籽粒苋植株带出的Cd量较高,导致各施肥处理均呈现出Cd净减少,表明填闲种植籽粒苋可以有效防控因肥料施用而导致土壤Cd累积的风险。由于试验地为大棚,灌溉用水为地下水,因此土壤中Cd的来源主要是肥料的带入,本试验所得数据表明,化肥的施用不会导致土壤中Cd的增加,而有机肥料的施入会导致土壤Cd增加,这与李本银等^[34]和李传哲等^[35]的研究结论一致。虽然试验过程中连续两年种植籽粒苋各施肥处理土壤Cd均呈负增长(减少量为3 400.11~16 219.03 mg·hm⁻²),但与土壤耕层中Cd的总量(0~20 cm耕层Cd总量约为2 311 155 mg·hm⁻²)相比数量较小。如果按照试验中的速率,需要86.36~411.96年才能使土壤中Cd的含量降到0.3 mg·kg⁻¹以下,因此利用填闲种植籽粒苋并不适用于Cd污染土壤的修复治理,其更大的作用是确保随着连年的耕种,土壤中的Cd不会逐年增加累积,甚至降低。本试验所在地块的土壤Cd含量为0.55 mg·kg⁻¹,在pH>7.5的情况下虽然没有超过《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0.6 mg·kg⁻¹的限定标准,但已经超过了《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ 333—2006)中0.4 mg·kg⁻¹的限定标准,因此该土壤属于高危土壤。在我国,这种处于超标边缘的菜地数量可观,如果长期采取不合理的施肥和种植措施,随着连年的Cd输入正增长,土壤Cd存在超标的风险。本试验通过填闲种植籽粒苋来吸收土壤中的Cd,实现了各处理土壤Cd的负增长。因此,对于处于超标边缘的土壤,虽然不能用填闲种植籽粒苋的方式短时间降低土壤中的Cd含量,但可以通过合理施肥、填闲种植等简单的农艺措施,既保证经济效益的同时又不因肥料的投入而导致土壤中的Cd含量增加。连续两年4茬的试验虽然已经显现方法可行,但仍需要长期的定位试验研究加以验证,尤其是对

表6 不同施肥处理对土壤Cd输入输出的影响(mg·hm⁻²)

Table 6 Effects of different fertilization treatments on input and output of total Cd in soil(mg·hm⁻²)

处理 Treatments	肥料施用带入的Cd Amount of Cd brought by fertilizer application	4茬油麦菜植株带出的Cd Cd uptake by lettuce	两茬籽粒苋带出的Cd Cd uptake by <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	净增长的Cd Net increase of Cd
CK	0	573.67	11 668.81	-12 242.48
JF	9 000	638.67	14 784.38	-6 423.05
YF	12 960	566.62	15 793.49	-3 400.11
JF+HF	4 623.9	664.75	14 759.87	-10 800.72
YF+HF	6 731.34	710.58	14 705.01	-8 684.25
HF	506.22	924.86	15 800.39	-16 219.03

土壤中总Cd含量及有效态Cd变化的跟踪监测。

3 结论

(1)本试验条件下,有机和无机肥料按照质量比1:1配施,可以显著提高油麦菜的产量。采用鸡粪与化肥按照1:1的比例配施是推荐的施肥方案。

(2)施用化肥不会导致土壤中总Cd的增加,而有机肥料的合理施用是土壤Cd增加的主要因素。

(3)在油麦菜种植过程中,填闲种植籽粒苋可有效防控因肥料施用而导致的土壤Cd累积风险。油麦菜植株和籽粒苋植株的Cd含量均未超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中对叶菜限定的标准值,是一种可行的种植模式。

参考文献:

- [1] Duan G L, Zhang H M, Liu Y X, et al. Long-term fertilization with pig-biogas residues results in heavy metal accumulation in paddy field and rice grains in Jiaying of China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(5):637-646.
- [2] Fan J L, Ding W X, Ziadi N. Thirty-years manuring and fertilization effects on heavy metals in black soil and soil aggregates in northeastern China[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(7):1224-1241.
- [3] Zhao Y C, Yan Z B, Qin J H, et al. Effects of long-term cattle manure application on soil properties and soil heavy metals in corn seed production in northwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(12):7586-7595.
- [4] 张水勤,王峰源,姜慧敏,等.设施菜地土壤中速效磷是镉生物有效性的关键调控因子[J].农业环境科学学报,2014,33(9):1721-1727. ZHANG Shui-qin, WANG Feng-yuan, JIANG Hui-min, et al. Available phosphorus is a key regulator of cadmium phytoavailability in greenhouse soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9):1721-1727.
- [5] 闫翠侠,贾宏涛,孙涛,等.鸡粪生物炭表征及其对水和土壤镉铅的修复效果[J].农业工程学报,2019,35(13):225-233. YAN Cui-xia, JIA Hong-tao, SUN Tao, et al. Characteristics of chicken manure biochars and its effect on Cd and Pb remediation in water and soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13):225-233.
- [6] 曾希柏,李莲芳,梅旭荣,等.中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J].中国农业科学,2007,40(11):2507-2517. ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, MEI Xu-rong, et al. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11):2507-2517.
- [7] 何其辉,谭长银,曹雪莹,等.肥料对土壤重金属有效态及水稻幼苗重金属积累的影响[J].环境科学研究,2018,31(5):942-951. HE Qi-hui, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of fertilizer on the availability of heavy metals in soil and its accumulation in rice seedling[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(5):942-951.
- [8] 王美,李书田,马义兵,等.长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(1):63-74. WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, et al. Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):63-74.
- [9] Navarro A, Martinez F. The use of soil-flushing to remediate metal contamination in a smelting slag dumping area: Column and pilot-scale experiments[J]. *Engineering Geology*, 2010, 115(1/2):16-27.
- [10] Moutsatsou A, Gregou M, Matsas D, et al. Washing as a remediation technology applicable in soils heavily polluted by mining-metallurgical activities[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(10):1632-1640.
- [11] Torres L G, Lopez R B, Beltran M. Removal of As, Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from a highly contaminated industrial soil using surfactant enhanced soil washing[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2012(37/38/39):30-36.
- [12] Cao X D, Ma L Q, Chen M, et al. Phosphate-induced metal immobilization in a contaminated site[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122(1):19-28.
- [13] Cao A, Carucci A, Lai T, et al. Effect of biodegradable chelating agents on heavy metals phytoextraction with *Mirabilis jalapa* and on its associated bacteria[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43:200-206.
- [14] 李鹏.农田土壤重金属Cd、Cu、和As污染评价及修复技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2011:4-7. LI Peng. Assessment and remediation technology research on farmland soil polluted by Cd, Cu and As[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011:4-7.
- [15] 张春慧.污灌农田Cd、Cr及其强化修复技术研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014:4-9. ZHANG Chun-hui. Research on bioremediation technology of cadmium and chromium polluted farmland soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014:4-9.
- [16] 孙洪欣,薛培英,赵全利,等.配施硫酸基肥对夏玉米镉铅累积的阻控效应[J].农业工程学报,2017,33(1):182-189. SUN Hong-xin, XUE Pei-ying, ZHAO Quan-li, et al. Inhibiting Cd and Pb accumulation in summer maize by sulphate-based fertilizers application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1):182-189.
- [17] 宋波,张云霞,田美玲,等.应用籽粒苋修复镉污染农田土壤的潜力[J].环境工程学报,2019,13(7):1711-1719. SONG Bo, ZHANG Yun-xia, TIAN Mei-ling, et al. Potential for cadmium contaminated farmland remediation with *Amaranthus hypochondriacus* L.[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(7):1711-1719.
- [18] 王美,李书田.肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):466-480. WANG Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2):466-480.
- [19] Jiao W T, Chen W P, Chang A C, et al. Environmental risks of trace

- elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 168:44-53.
- [20] 石亚楠, 刘鸣达, 张克强, 等. 猪场厌氧肥水灌溉对设施油麦菜产量及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):190-195.
- SHI Ya-nan, LIU Ming-da, ZHANG Ke-qiang, et al. Yield and quality of leafy lettuce irrigated with anaerobic effluent from swine farms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):190-195.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- LU Ru-kun. The analytic method of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [22] 姚建武, 王艳红, 李盟军, 等. 施肥对铅镉污染土壤上芥菜铅镉含量及生理的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3):659-662.
- YAO Jian-wu, WANG Yan-hong, LI Meng-jun, et al. Effect of fertilization on Pb and Cd content, and on physiological property of mustard growing in soil polluted by Pb and Cd[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3):659-662.
- [23] 赵明, 蔡葵, 孙永红, 等. 不同施肥处理对番茄产量品质及土壤有效态重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6):1072-1078.
- ZHAO Ming, CAI Kui, SUN Yong-hong, et al. Influence of organic and chemical fertilizers on tomato yield, quality, and the content of available heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1072-1078.
- [24] 艾绍英, 王艳红, 罗英健, 等. 不同施肥对城郊菜地土壤质量、叶菜镉及养分含量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):85-88.
- AI Shao-ying, WANG Yan-hong, LUO Ying-jian, et al. Effect of fertilization on soil quality, leafy vegetable cadmium and nutrient contents in suburban farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2):85-88.
- [25] 谷佳林, 梁丽娜, 苏世鸣, 等. 不同施肥对油麦菜镉吸收、硝酸盐含量及产量的影响[J]. 北方园艺, 2018(4):117-120.
- GU Jia-lin, LIANG Li-na, SU Shi-ming, et al. Effects of different fertilizers on yield, nitrate and Cd of lettuce[J]. *Northern Horticulture*, 2018(4):117-120.
- [26] Kashem M A, Kawai S, Kikuchi N, et al. Effect of lherzolitic on chemical fractions of Cd and Zn and their uptake by plants in contaminated soil[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, 207(1/2/3/4):241-251.
- [27] 陈辉, 郑刘根, 程桦, 等. 淮南顾桥采煤沉陷区土壤中镉的赋存特征及其生物有效性[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(5):388-396.
- CHEN Hui, ZHENG Liu-gen, CHENG Hua, et al. Occurrences and bioavailability of cadmium in soils of Guqiao mine subsidence area Huainan[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2015, 45(5):388-396.
- [28] 谢飞, 梁成华, 孟庆欢, 等. 添加天然沸石和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(8):3505-3510.
- XIE Fei, LIANG Cheng-hua, MENG Qing-huan, et al. Effects of natural zeolite and lime on form transformation of cadmium in soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(8):3505-3510.
- [29] 张晓萍, 宗良纲, 郑建伟, 等. 不同施肥措施对镉污染土壤上菊花生长及其品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1617-1622.
- ZHANG Xiao-ping, ZONG Liang-gang, ZHENG Jian-wei, et al. Effects of different fertilizations on chrysanthemum growth and its quality on Cd polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1617-1622.
- [30] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5):953-961.
- ZHAO Jing, FENG Wen-qiang, QIN Yu-sheng, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):953-961.
- [31] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [32] Karlsson T, Persson P, Skjellberg U. Complexation of copper(II) in organic soils and in dissolved organic matter-EXAFS evidence for chelate ring structures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(8):2623-2628.
- [33] Singh A, Agrawal M, Marshall F M. The role of organic vs. inorganic fertilizers in reducing phytoavailability of heavy metals in a wastewater-irrigated area[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(12):1733-1740.
- [34] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):129-135.
- LI Ben-yin, HUANG Shao-min, ZHANG Yu-ting, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):129-135.
- [35] 李传哲, 杨苏, 姚文静, 等. 有机物料输入对土壤及玉米籽粒重金属来源解析及风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6):1230-1239.
- LI Chuan-zhe, YANG Su, YAO Wen-jing, et al. Source analysis and pollution risk assessment of heavy metal in soil and corn seeds through the application of organic materials[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6):1230-1239.