

葛赞,杨威,王宇航,等.连续施用有机肥的田间土壤和果蔬重金属风险评估[J].华中农业大学学报,2023,42(1):188-196.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.01.023

连续施用有机肥的田间土壤和果蔬重金属风险评估

葛赞¹,杨威¹,王宇航¹,谭启玲¹,田有国²,胡承孝¹,孙学成¹

1. 华中农业大学资源与环境学院/新型肥料湖北省工程实验室,武汉430070;

2. 全国农业技术推广服务中心,北京100125

摘要 为比较施用有机肥替代化肥对果蔬产量品质及果蔬和土壤中重金属含量的影响,采用田间小区试验,连续三季蔬菜(小白菜、萝卜、辣椒)和多年柑橘(马家柚)施用有机肥。以不施肥(CK)和施用化肥(CF)为对照,设置2种有机肥的化肥等氮量施用处理(OF1、OF2)。结果显示:与CF处理相比,OF1、OF2处理均能保证前两季蔬菜以及马家柚的产量不下降,并显著提高马家柚可溶性固形物以及蔬菜土壤有机质的含量。前两季蔬菜不同处理间重金属含量差异不显著,但OF1、OF2处理的萝卜可食部Pb含量已临近限量标准;在第三季蔬菜中,OF1、OF2处理的辣椒可食部Cr、As、Cu、Zn含量较CF处理均出现显著积累。OF1处理的马家柚果肉与果皮Pb含量已超出限量标准,OF2处理也已接近限量标准。蔬菜土壤各项重金属含量远低于风险管控值,但Pb、Cd、Hg较CF处理均出现了显著性积累,其中Hg含量积累速度最快。结果表明,2种等氮有机肥施用均能在短期内提高果蔬的产量及品质,改善土壤理化性质,但同时也会增加土壤重金属的积累。因此,连续施用有机肥,将存在果蔬重金属含量超标的风险。

关键词 有机肥连续施用;重金属;土壤评价;风险评估;化肥减量增效;农业污染;食品安全

中图分类号 S141; X825 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)01-0188-09

耕地质量是我国农业绿色、可持续发展、经济发展和社会稳定的基础核心^[1]。由于化肥施用过量或者施用方法不当,造成土壤贫瘠、盐碱化、资源浪费、环境污染等一系列问题,导致我国耕地质量逐年下降。2021年中央一号文件提出鼓励农民施用有机肥替代化肥。科学合理施用有机肥,可以使土壤养分的有效性及土壤保水保肥能力得到显著提高,从而改善由于过度施用化肥造成的土壤板结等问题^[2]。我国有机肥资源丰富,每年生产约7 500万t有机肥,但据报道其施用量仅占肥料施用总量的25%,实际利用率却不足40%^[3],造成巨大的资源浪费。

畜禽粪便制成的有机肥是增加土壤有机质、改善农产品品质的重要肥料来源。由于畜禽对饲料中的重金属利用率偏低,大部分会随粪便排出,致使畜禽粪便富含重金属,成为商品有机肥中重金属污染的主要来源^[4-5]。对浙江省和海南省商品有机肥的调查发现,浙江省猪粪、牛粪、鸡粪、混合粪便Cu、Zn、

As等超标现象较为普遍^[6],海南省抽检样品近一半商品有机肥存在Pb、Cr、Cd、Cu、Zn、As、Hg 7种重金属超标^[7]。长期大量施用重金属超标的有机肥会造成重金属在土壤、作物中的累积,进而影响在土壤、农产品迁移转化。长期定位试验发现,施用中、高量有机肥显著提高了土壤Cr、As和Fe有效态含量^[8]。此外,猪粪的施用使土壤和花生籽粒中Cd和Zn的含量显著提高^[9]。可见,施用有机肥容易造成土壤及作物重金属累积已达成共识。

施用有机肥虽可提升土壤养分,但长期施用则会加大土壤及生物重金属污染的风险。因此,有机肥的选择、管理、施用方式等安全控制至关重要。本试验通过探究有机肥连续施用对土壤和果蔬重金属含量的影响,明确有机肥料中重金属对土壤和果蔬存在的污染风险,以期合理施用并推广有机肥,降低农业污染风险,保障农产品质量安全,维护农田生态系统健康提供理论参考。

收稿日期: 2022-09-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD1001400,2016YFD0201306);国家现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项(CARS-26)

葛赞, E-mail: 953018372@qq.com

通信作者: 谭启玲, E-mail: qltan@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究均采用田间试验,其中蔬菜试验点位于华中农业大学田间试验基地(114.54°E,30.28°N),土壤为黄棕壤,基本理化性状为pH 5.05、有机质21.45 g/kg、碱解氮82.37 mg/kg、速效磷30.53 mg/kg、速效钾133.52 mg/kg;马家柚试验点位于江西上饶广丰区(118.19°E,28.27°N),土壤为山地黄红壤,基本理化性状为:pH 5.82、有机质23.97 g/kg、碱解氮120.86 mg/kg、速效磷14.75 mg/kg、速效钾183.89 mg/kg。蔬菜为三季蔬菜连作,分别是:小白菜(上海青)、萝卜(广州南畔洲晚萝卜)以及辣椒(鼎萝一号

辣椒);马家柚为12年树龄的枳砧红肉马家柚。蔬菜习惯施肥处理用的常规化肥尿素(46%)、过磷酸钙(12%)和氯化钾(60%),所用有机肥为部分超过中华南地区调查有机肥样品重金属平均值含量的2种有机肥^[10-11],分别用OF1和OF2表示;马家柚所用常规化肥为复合肥(15:15:15),有机肥为牛粪有机肥和当地常用的商品有机肥,分别用OF1和OF2表示(表1)。4种商品有机肥均为前期调查样品,其有机质、总养分、酸碱度及含水量均符合现行有机肥质量行业标准(NY 525—2021《有机肥料》),其中蔬菜所用OF2有机肥As含量接近现行有机肥质量行业标准。

表1 供试有机肥养分及重金属含量状况

Table 1 Nutrient contents and heavy metals contents in tested organic fertilizers

试验作物 Test crop	处理 Treatment	pH	有机质/% Organic matter	N/ (mg/ kg)	P ₂ O ₅ / (mg/ kg)	K ₂ O/ (mg/ kg)	Cr/ (mg/ kg)	Cu/ (mg/ kg)	Zn/ (mg/ kg)	As/ (mg/ kg)	Cd/ (mg/ kg)	Hg/ (mg/ kg)	Pb/ (mg/ kg)
蔬菜 Vegetables	OF1	5.5	48.99	3.19	1.05	1.12	10.90	9.78	27.28	0.85	0.28	0.22	13.96
	OF2	6.8	53.08	1.18	3.41	0.93	10.35	33.11	128.92	10.35	0.13	0.61	26.12
马家柚 Majia pomelo	OF1	6.1	48.77	1.52	1.22	2.82	30.31	17.09	53.12	8.61	0.45	0.12	21.25
	OF2	5.8	45.65	1.34	1.41	2.63	21.96	9.72	84.93	1.67	0.60	0.06	9.81

1.2 试验设计与方法

试验设4个处理:不施肥对照(CK)、习惯施肥(化肥CF)、等氮有机肥处理1(OF1)、等氮有机肥处理2(OF2)。蔬菜为完全随机区组的田间试验,每个处理重复3次,共12个试验小区,每个小区面积5.4 m²。马家柚每个处理重复3次,每3株果树为1次重复,共36株果树。CK处理为不施肥,CF处理为施用化肥,OF1和OF2处理均通过与CF处理等氮养分施用计算施肥量,具体施肥情况见表2。

蔬菜种植3季不同品种蔬菜。(1)小白菜组于2020年9月1日进行田间施肥,所有肥料均作为基肥一次性施入土壤,2 d后进行小白菜种子的播种,7 d

后选取长势一致的幼苗进行定植(20 cm×20 cm),于2020年10月22日收获,期间实施正常的田间管理。(2)萝卜组于2020年10月31日进行田间施肥,氮肥分作2次追肥,其他肥料均作为基肥一次性施入土壤,2 d后进行萝卜种子的播种,14 d后选取长势一致的幼苗进行定植(25 cm×25 cm),于2021年2月24日收获,期间实施正常的田间管理。(3)辣椒于2021年4月1日进行田间施肥,氮肥分作2次追肥,其他肥料均作为基肥一次性施入土壤,2 d后进行辣椒种子的播种,14 d后选取长势一致的幼苗进行定植(25 cm×25 cm),于2021年7月1日收获。蔬菜种植期间均实施正常的除草浇水等田间管理。

表2 两季蔬菜及马家柚各处理施肥的纯养分含量

Table 2 Pure nutrient content in fertilization of two season vegetables and Majia pomelo

试验作物 Test crop	CK			CF			OF1			OF2		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
小白菜 Cabbage	0	0	0	12	6	6	12	3.9	4.2	12	34.7	9.5
萝卜 Radish	0	0	0	12	4.8	8	0.5	12	3.9	12	34.7	9.5
辣椒 Pepper	0	0	0	12	6	6	12	3.9	4.2	12	34.7	9.5
马家柚 Majia pomelo	0	0	0	20.9	20.9	20.9	20.9	16.5	38.5	20.9	21.45	40.7

选取长期施用有机肥及不施用有机肥的马家柚果园,于2020年3月5日对果树进行不同施肥处理,习惯处理期间作一次追肥,其他肥料均作为基肥一次性施入土壤,于2020年11月4日进行果实与土壤采样,期间实施正常的田间管理。

1.3 测定项目与方法

果蔬质量采用百分之一天平测定,蔬菜产量=单株蔬菜质量×单位面积内蔬菜株数,马家柚产量=挂果数×单果质量;果蔬纵径、横径、果长、果肩宽均采用30 cm直尺测量,果皮厚、叶片厚采用游标卡尺测量;蔬菜叶面积采用Image J分析;果实可溶性固形物(TSS)采用手持数显糖量计(日本, PAL-1)测定;果实可滴定酸(TA,用柠檬酸表示)采用氢氧化钠中和滴定法测定;果实维生素C(Vc)采用2,6-二氯酚氧化还原滴定法测定;固酸比=可溶性固形物(TSS)/可滴定酸(TA);果形指数=果实纵径/横径,出汁率=(果汁质量/果肉质量)×100%。

果蔬重金属含量测定采用硝酸/高氯酸4:1消解-ICP-MS法;土壤重金属含量测定采用王水消解-ICP-MS法,有机质含量测定采用外加热重铬酸钾容量法,碱解氮采用碱解扩散法,速效磷采用0.5 mol/L碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用NH₄OAc浸提-火焰光度法,EC值采用电极法(HJ 802-2016),pH值采用pH计法(土水比1:2.5)(NY/T 1121.2-2006)。分别采用果蔬重金属含量限量国家标准(GB 2762-2005《食品中污染物限量》)、农用地土壤(pH≤5.5)重金属含量限量国家标准(GB 15618-2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》),作为分析试验作物与土壤的重金属含量是否超标的依据。

1.4 数据处理

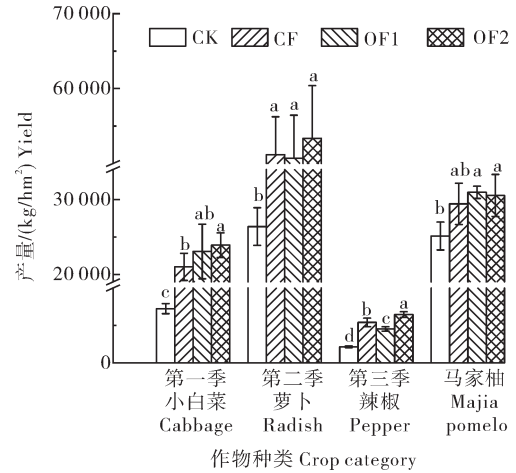
利用Microsoft Excel 2016、SPSS 19.0及Origin 2018进行数据统计、分析和作图。运用Duncan's法进行多重比较($\alpha=0.05$),图表中所有数据均为 $\bar{x} \pm SE$ 。

2 结果与分析

2.1 有机肥连续施用对果蔬产量及品质的影响

等氮有机肥完全替代化肥,能够在短期内满足果蔬的生长和产量要求,同时相较单施化肥还能提高果蔬的品质。与CF相比,OF1和OF2处理均能保证第一季和第二季蔬菜以及马家柚的产量不下降。同时,OF2显著提高了小白菜和辣椒的产量,分别增

产13.8%和19.2%(图1)。但OF1处理的第三季蔬菜较CF处理有显著的下降,说明等氮有机肥替代化肥在短时间内不会减少蔬菜和马家柚的产量,但随着两季不施用化肥,会导致第三季作物产量的下降。由表3、表4可知,较CF处理,等氮有机肥处理显著增加小白菜叶面积、辣椒以及马家柚单果质量,说明等氮有机肥替代化肥不仅能促进果蔬的生长而且较化肥处理明显更优;较CF处理,CK处理及OF1、OF2处理均显著增加马家柚可溶性固形物的含量,可能与该果园连年施用化肥导致果实品质下降有关,而通过施用有机肥可改善状况。OF1、OF2处理的果形指数、固酸比、可滴定酸、维生素C、出汁率较CK以及CF处理虽然差异不显著,但均有增加的趋势,说明施用有机肥对马家柚果实的内外品质均有一定的提高作用。



同一品种不同处理组的不同字母表示各组之间具有显著差异($P<0.05$)。下同。Data marked with different letters in the same column is significantly different from each other ($P<0.05$). The same as below.

图1 不同施肥处理对果蔬产量的影响

Fig.1 Effects of different types of fertilizers on yield of vegetables and fruits

2.2 有机肥连续施用对土壤理化性质的影响

由图2和表5可知,在三季蔬菜连作后的土壤中,较CF处理,土壤速效磷、速效钾以及有机质的含量显著增加,其中有机质分别增加了42.4%、25.6%。在果园土壤中,OF1、OF2处理的土壤碱解氮、速效磷、速效钾较CF处理虽然差异不显著,但含量均高于CF处理。EC值各处理间未有显著差异;CF处理的蔬菜土壤pH显著下降,而OF1、OF2处理的pH显著提升,说明施用有机肥还能显著改善土壤酸化问题。

表 3 不同施肥处理对蔬菜外在品质的影响

Table 3 Effects of different types of fertilizers on growth of vegetables

试验作物 Test crop	指标 Indicators	CK	CF	OF1	OF2
小白菜 Cabbage	株高/cm Plant height	16.27±0.49b	20.40±0.62a	22.00±0.95a	22.19±0.56a
	叶片数 Leaf number	8.67±0.38b	11.78±0.29a	12.11±0.40a	11.08±0.47a
	叶片厚度/cm Blade thickness	0.55±0.01b	0.60±0.01a	0.63±0.17a	0.64±0.23a
	叶面积/cm ² Leaf area	39.59±0.44c	58.40±0.78b	61.44±0.24a	61.61±0.64a
萝卜 Radish	横径/mm Transverse diameter	2.40±0.23b	3.40±0.20a	3.35±0.24a	3.94±0.25a
	纵径/mm Longitudinal diameter	11.97±0.60b	15.94±0.74a	15.90±0.18a	16.56±0.20a
辣椒 Pepper	单果质量/g Fruit quality	14.28±0.72d	21.62±2.27b	18.14±1.15c	25.77±1.54a
	果长/cm Fruit long	17.17±3.29a	17.20±1.77a	17.90±1.06a	20.73±0.49a
	果肩宽/cm Fruit shoulder breadth	2.20±0.36bc	2.93±0.38a	2.17±0.25c	2.77±0.31abc

注：同一列中不同字母表示数据间具有显著差异(P<0.05)。下同。Note: Data marked with different letters in the same column is significantly different from each other(P<0.05). The same as below.

表 4 不同施肥处理对马家柚内外在品质的影响

Table 4 Effects of different types of fertilizers on external quality of Majia pomelo

指标 Indicators	CK	CF	OF1	OF2
单果质量/kg Fruit quality	1.55±0.04c	1.73±0.03b	1.83±0.02a	1.81±0.01a
横径/mm Transverse diameter	172.63±1.90b	186.47±1.57a	186.03±2.23a	183.93±1.47a
纵径/mm Longitudinal diameter	172.80±2.27b	187.38±1.54a	192.38±1.89a	191.63±1.01a
果形指数 Fruit shape index	1.00±0.02a	1.01±0.01a	1.03±0.01a	1.04±0.01a
可溶性固形物/% TSS	8.31±0.21a	8.03±0.19b	8.38±0.31a	8.37±0.27a
可滴定酸/% TA	0.59±0.07a	0.68±0.04a	0.62±0.06a	0.61±0.03a
固酸比 TSS/TA	14.60±1.84a	11.86±0.55a	13.70±0.87a	13.72±0.56a
维生素C/ (mg/100 g) V _C	47.94±2.70a	49.91±1.45a	51.67±1.77a	50.53±1.61a
出汁率/% Juice yield	53.55±2.13a	56.16±3.68a	57.62±3.01a	56.44±1.01a

2.3 有机肥连续施用对果蔬重金属含量的影响

有机肥连续施用会增加果蔬重金属含量超标的风险。由表6可见,三季蔬菜可食部重金属含量均未出现超标现象,但OF1、OF2处理的萝卜可食部Pb含量分别为92.32、92.78 μg/kg,已临近限量标准

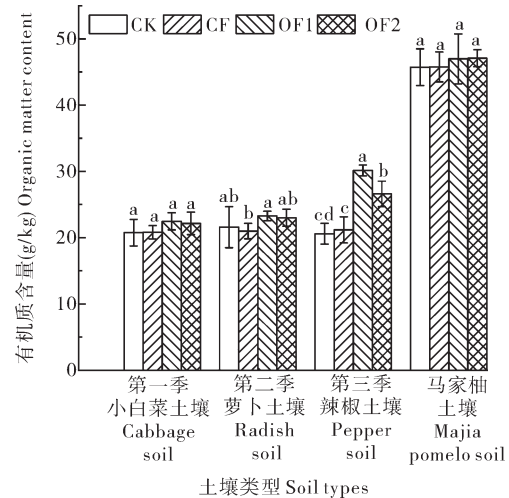


图 2 不同施肥处理对土壤有机质含量的影响

Fig.2 Effects of different types of fertilizers on organic matter content of soil

(100 μg/kg),其他重金属含量均远低于蔬菜限量标准;前两季蔬菜不同处理间重金属含量差异不显著,但在第三季蔬菜中,OF1、OF2处理的辣椒可食部Cr、As、Cu、Zn含量较CF处理出现显著增加,尤其是OF2有机肥处理增加最快,而Pb含量较CF处理却出现显著下降。马家柚OF1处理的果肉、果皮Pb含量分别为205.02、203.93 μg/kg,已超出限量标准(200 μg/kg),OF2处理的果肉、果皮Pb含量分别为196.92、194.99 μg/kg也已临近限量值,其中果肉重金属含量均略高于果皮,其余重金属均未出现超标现象;OF1、OF2处理各重金属含量较CF处理均出现了一定程度的积累,其中Pb、Cd、Hg、Cu、Zn含量出现显著差异。

表 5 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

Table 5 Effects of different types of fertilizers on physical and chemical properties of soil

试验作物 Test crop	处理 Treatment	碱解氮/ (mg/kg) Alkali-N	速效磷/ (mg/kg) Olsen-P	速效钾/ (mg/kg) Avail-K	pH	EC/ (μ S/cm)
小白菜 Cabbage	CK	78.54 \pm 1.25b	27.38 \pm 2.44b	123.10 \pm 6.50b	5.04 \pm 0.02a	215.65 \pm 2.37a
	CF	87.82 \pm 1.52a	34.83 \pm 1.20a	153.10 \pm 8.41ab	4.85 \pm 0.03b	212.60 \pm 3.61a
	OF1	87.27 \pm 2.77a	34.28 \pm 1.32a	151.60 \pm 15.98ab	5.07 \pm 0.03a	225.60 \pm 10.61a
	OF2	85.91 \pm 1.89a	35.45 \pm 2.45a	157.10 \pm 3.61a	5.15 \pm 0.07a	207.10 \pm 9.01a
萝卜 Radish	CK	77.02 \pm 0.92c	25.94 \pm 0.82c	120.16 \pm 4.35c	5.07 \pm 0.03a	215.67 \pm 8.29a
	CF	87.87 \pm 0.95ab	35.69 \pm 0.44b	157.65 \pm 2.96ab	4.84 \pm 0.04b	209.50 \pm 11.21a
	OF1	84.96 \pm 0.92b	32.58 \pm 1.30b	146.18 \pm 2.31b	5.06 \pm 0.03a	220.57 \pm 7.03a
	OF2	88.66 \pm 1.06a	54.10 \pm 1.05a	169.64 \pm 5.69a	5.10 \pm 0.02a	228.63 \pm 8.30a
辣椒 Pepper	CK	70.09 \pm 0.16c	24.81 \pm 0.92d	85.33 \pm 0.58c	4.80 \pm 0.02c	215.63 \pm 4.13a
	CF	123.20 \pm 4.85a	40.12 \pm 0.60c	179.67 \pm 0.58b	4.31 \pm 0.01d	208.60 \pm 6.13a
	OF1	126.93 \pm 9.01a	80.94 \pm 2.84a	219.10 \pm 4.36a	5.20 \pm 0.01b	224.30 \pm 8.04a
	OF2	93.33 \pm 1.62b	76.03 \pm 4.09b	222.10 \pm 7.55a	6.67 \pm 0.03a	226.45 \pm 4.17a
马家柚 Majia pomelo	CK	97.09 \pm 0.72b	33.04 \pm 1.27a	194.60 \pm 10.04b	4.46 \pm 0.02b	250.52 \pm 12.77a
	CF	102.27 \pm 0.94a	34.49 \pm 1.51a	202.60 \pm 4.77ab	4.47 \pm 0.02b	255.53 \pm 2.91a
	OF1	104.18 \pm 1.19a	35.59 \pm 1.76a	222.10 \pm 10.15a	4.56 \pm 0.01a	261.17 \pm 3.49a
	OF2	103.91 \pm 0.82a	34.55 \pm 2.15a	225.10 \pm 3.04a	4.51 \pm 0.01b	255.15 \pm 4.22a

表 6 不同施肥处理对果蔬重金属含量(干基)的影响

Table 6 Effects of different types of fertilizers on heavy metals contents (DW) of vegetables

试验作物 Test crop	部位 Part	处理 Treatment	Pb/ (μ g/kg)	Cd/ (μ g/kg)	Cr/ (μ g/kg)	As/ (μ g/kg)	Hg/ (μ g/kg)	Cu/ (μ g/kg)	Zn/ (mg/kg)
小白菜 Cabbage	可食部 Edible part	CK	40.07 \pm 0.43a	10.97 \pm 0.38a	12.66 \pm 1.62a	5.70 \pm 0.49a	1.42 \pm 0.02a	118.18 \pm 3.46a	1.08 \pm 0.05a
		CF	41.73 \pm 0.83a	10.89 \pm 0.23a	12.47 \pm 0.72a	5.73 \pm 0.47a	1.38 \pm 0.06a	114.42 \pm 4.47a	1.07 \pm 0.08a
		OF1	44.27 \pm 3.85a	11.41 \pm 0.72a	14.12 \pm 2.78a	5.99 \pm 0.41a	1.46 \pm 0.13a	123.89 \pm 3.33a	1.09 \pm 0.06a
		OF2	44.65 \pm 3.07a	12.05 \pm 0.56a	14.76 \pm 1.87a	5.84 \pm 0.43a	1.39 \pm 0.09a	125.07 \pm 5.26a	1.14 \pm 0.03a
萝卜 Radish	可食部 Edible part	CK	84.52 \pm 2.96a	12.70 \pm 1.09a	257.01 \pm 27.58a	27.22 \pm 2.41a	2.95 \pm 0.48a	341.24 \pm 11.59a	4.40 \pm 0.11a
		CF	83.65 \pm 5.43a	12.56 \pm 0.83a	255.30 \pm 13.23a	28.07 \pm 0.29a	3.31 \pm 0.47a	341.83 \pm 18.76a	4.42 \pm 0.18a
		OF1	92.32 \pm 4.10a	14.71 \pm 1.08a	273.63 \pm 13.09a	31.85 \pm 3.28a	3.48 \pm 0.40a	359.75 \pm 20.81a	4.39 \pm 0.27a
		OF2	92.78 \pm 4.08a	14.72 \pm 0.83a	272.23 \pm 8.28a	33.14 \pm 3.55a	2.83 \pm 0.31a	367.33 \pm 13.10a	4.44 \pm 0.13a
辣椒 Pepper	可食部 Edible part	CK	35.07 \pm 0.97c	4.51 \pm 0.73a	24.99 \pm 2.92c	6.54 \pm 0.21d	未检出 ND	42.40 \pm 3.75d	3.06 \pm 0.44c
		CF	45.44 \pm 1.37a	3.35 \pm 0.31b	31.66 \pm 3.61bc	7.14 \pm .68bcd	未检出 ND	50.17 \pm 3.29c	3.50 \pm 0.09bc
		OF1	28.67 \pm 0.32d	2.55 \pm 0.34bc	39.00 \pm 10.42ab	7.99 \pm 0.65b	未检出 ND	57.69 \pm 2.67a	4.79 \pm 0.34a
		OF2	38.47 \pm 0.78bc	2.67 \pm 0.13bd	48.95 \pm 5.31a	10.61 \pm 0.74a	未检出 ND	51.57 \pm 1.62bc	4.94 \pm 0.59a
马家柚 Majia pomelo	果肉 Pulp	CK	156.58 \pm 0.89d	9.36 \pm 2.41b	46.74 \pm 8.14a	28.57 \pm 2.22a	3.93 \pm 0.11b	1 555.89 \pm 164.85c	3.36 \pm 0.09b
		CF	162.12 \pm 0.47c	11.42 \pm 1.24ab	44.81 \pm 11.24a	30.77 \pm 2.26a	4.59 \pm 0.58ab	1 617.28 \pm 15.06bc	3.52 \pm 0.14b
	果皮 Skin	OF1	205.02 \pm 0.38a	14.93 \pm 1.08ab	61.89 \pm 6.60a	41.04 \pm 9.94a	6.59 \pm 1.29a	1 944.82 \pm 75.41ab	4.42 \pm 0.05a
		OF2	196.92 \pm 0.44b	16.88 \pm 1.70a	69.21 \pm 30.43a	34.88 \pm 5.80a	4.92 \pm 0.38ab	2 047.81 \pm 5.39a	4.20 \pm 0.23a
		CK	159.26 \pm 0.22c	9.52 \pm 2.55a	40.18 \pm 16.17a	30.33 \pm 0.38a	3.99 \pm 0.01b	936.53 \pm 22.56c	2.41 \pm 0.10a
		CF	158.53 \pm 0.22c	10.54 \pm 2.90a	39.99 \pm 20.02a	28.69 \pm 3.98a	4.34 \pm 0.18b	1 030.84 \pm 8.06b	2.40 \pm 0.12a
		OF1	203.93 \pm 0.41a	12.89 \pm 4.46a	50.86 \pm 9.89a	34.93 \pm 1.76a	5.23 \pm 0.19a	1 264.57 \pm 6.79a	3.07 \pm 0.31a
		OF2	194.99 \pm 0.13b	10.03 \pm 2.74a	42.13 \pm 11.69a	34.64 \pm 2.95a	5.16 \pm 0.16a	1 295.14 \pm 4.49a	3.05 \pm 0.43a

2.4 有机肥连续施用对土壤重金属含量的影响

有机肥连续施用会造成土壤重金属含量的积累。由图 3 可见, 经过三季蔬菜连作后, 较 CF 处理, 土壤 Pb、Cd、Hg 含量均出现显著性增加, 其中 Hg 含量积累最多, 其次分别为 Cd、Pb, OF1 处理的土壤 Hg

含量显著增加 42.89%, OF2 处理则显著增加 90.36%, 但各项指标均在风险筛选值以内, 远低于风险管控值。由表 7 可见, 在果园土壤中, 虽然 OF1、OF2 较 CF 处理之间差异不显著, 但 Pb、Cd、Cr、As、Cu、Zn、Hg 均有不同程度的增加。

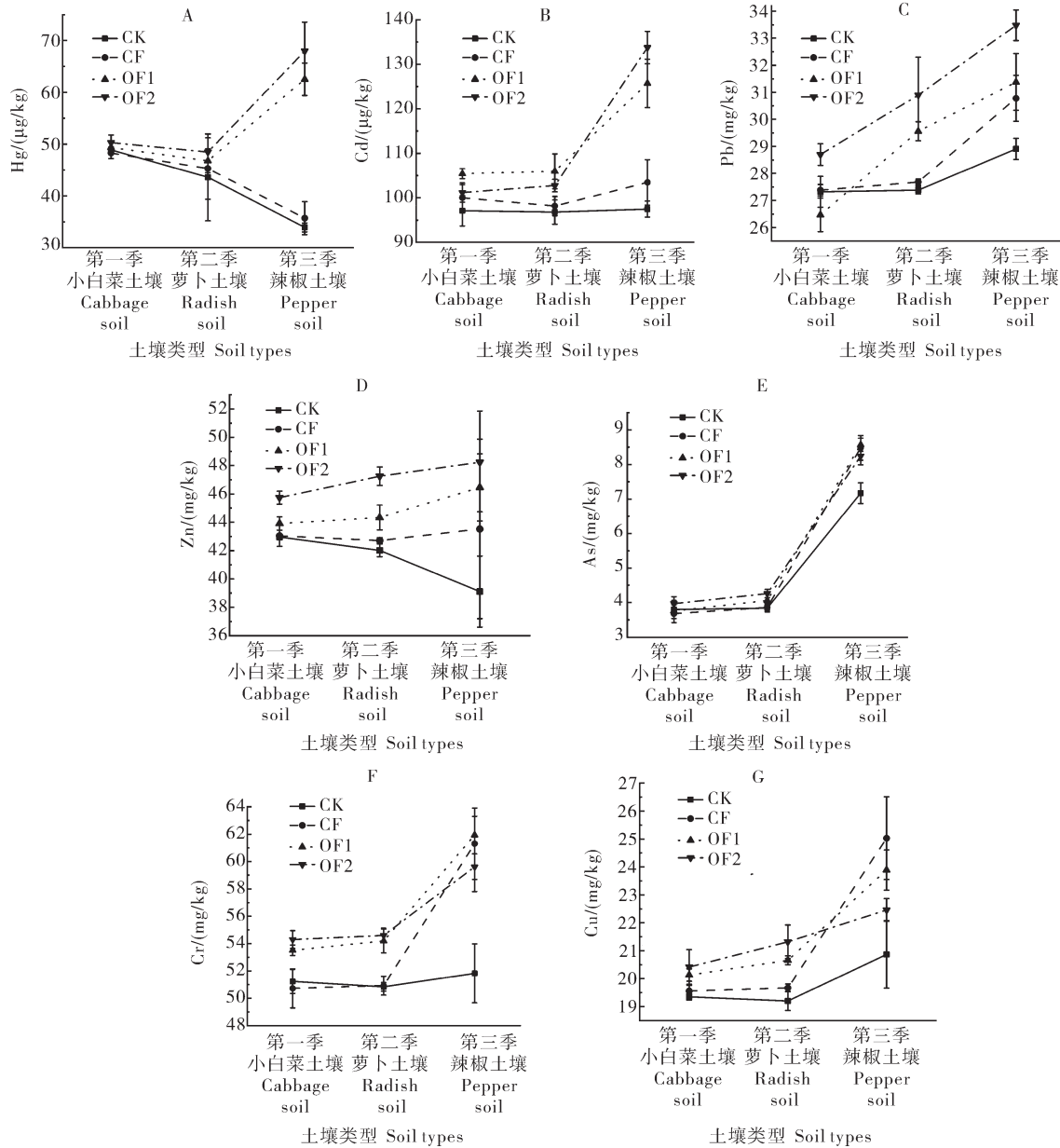


图 3 不同施肥处理对蔬菜土壤重金属含量的影响

Fig.3 Effects of different types of fertilizers on heavy metals contents of vegetable soil

3 讨论

3.1 有机肥可以短期完全替代化肥

在兼顾作物产量和改善土壤理化性状的双重考虑下, 有机肥替代部分化肥是当前农业生产中一种很好的施肥方式, 但由于替代比例不明确, 使有机肥

的应用受到一定限制。有机肥部分替代化肥较单施化肥相比能提高生菜、甜瓜等作物产量和品质^[12-13]。蔬菜种植中有机肥氮替代 25%~50% 化肥氮时, 产量和质量较好, 并减少因硝态氮造成的环境污染^[14]。但当有机肥氮替代化肥氮的比例超过 75% 时, 作物的产量会降低^[15]。例如当有机肥完全或部分替代化

表7 不同施肥处理对马家柚果园土壤重金属含量的影响
Table 7 Effects of different types of fertilizers on heavy metals contents of soil

处理 Treatment	Pb/ (mg/kg)	Cd/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Cr/ (mg/kg)	As/ (mg/kg)	Hg/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Cu/ (mg/kg)	Zn/ (mg/kg)
CK	36.73 \pm 1.27a	170.36 \pm 13.38a	65.34 \pm 0.54a	9.91 \pm 1.12b	67.04 \pm 1.00a	26.23 \pm 1.38a	92.57 \pm 2.18a
CF	36.61 \pm 1.46a	171.61 \pm 15.72a	65.18 \pm 1.47a	11.15 \pm 0.19ab	66.14 \pm 1.14a	26.80 \pm 0.39a	93.19 \pm 1.64a
OF1	38.08 \pm 1.36a	191.04 \pm 24.91a	67.44 \pm 0.74a	12.34 \pm 0.24a	67.85 \pm 2.68a	27.79 \pm 0.69a	95.41 \pm 1.79a
OF2	37.53 \pm 0.61a	179.55 \pm 6.75a	67.88 \pm 1.17a	11.75 \pm 0.33ab	68.72 \pm 5.01a	28.81 \pm 0.20a	96.78 \pm 2.52a

肥比例过高时,水稻产量会随着替代比例的提高而下降^[16]。然而,这些研究并没有充分考虑土壤、作物以及有机肥的特定变量以及完全替代和试验持续时间的影响。例如研究发现,长期连续施用化学氮肥,如尿素和其他铵基肥料,会降低土壤pH值,并可能恶化土壤结构和土壤的供氮能力^[17],相比之下,有机肥具有酸中和能力,会提高土壤pH值。此外,酸性土壤可能会相对缺乏容易淋失的钙、镁和微量养分,而这些养分可以从有机肥中获取,所以有机肥部分替代化肥的增产作用在酸性土壤中比较明显^[18]。本试验在充分考虑以上因素的情况下,进行了2种有机肥完全替代化肥进行试验处理。从结果来看,等氮量有机肥全部替代化肥,不仅改善了土壤理化性质,同时在两季蔬菜中与单施化肥一样能够满足果蔬的生长、品质及产量要求,马家柚的可溶性固形物、维生素C、出汁率较施用化肥相比均有所增加,这与董盼盼等^[19]施用有机肥改善库尔勒香梨品质的研究结果相一致。但随着第三季有机肥继续完全替代化肥则出现蔬菜产量下降现象。说明在短期内有机肥完全替代化肥是可行的,但连续施用有机肥会有减产的风险。

3.2 有机肥完全替代化肥要注意重金属污染风险

目前许多研究对于有机肥施用会带来土壤重金属积累问题已达成共识,特别是Pb、As、Hg元素,我们在施用等氮量有机肥后发现其在土壤、果蔬中均表现出较强的积累性,有增加蔬菜Pb含量超标的风险,并直接导致马家柚果实Pb含量超标,这与施用有机肥显著增加番茄、茴香中Cr、Pb、As含量的结果一致^[20-21]。此外,顾思婷等^[21]研究发现有机肥部分替代氮肥比例为30%时,也会导致生菜根上部Pb显著积累。以上可能与有机肥中Pb、As含量较高,而在果蔬中限定值较低有关,因此对于这类有机肥有必要在使用时减少用量和避免连续施用。土壤Cd、Zn、Cu的含量会随着有机肥施入量的增加而增加^[22-23],

该发现与我们的研究相一致。综上,我们认为有机肥完全替代化肥时会存在重金属污染风险,同时针对有机肥完全替代化肥引起的重金属污染风险问题,需要针对不同的农田土壤以及所用有机肥进行综合分析与评价。有机肥企业应针对不同种类的有机肥,做相对应的长期定位大田试验,通过试验结果对产品的风险进行评估,对有机肥的生产工艺进行革新,并从源头上进行质量把控,确保有机肥质量的安全性。

参考文献References

- [1] 李传林,吴家华,王永邦,等.改善耕地质量,促农业绿色升级[J].农业工程技术,2016,36(5):41.LI C L, WU J H, WANG Y B, et al. Improve the quality of cultivated land and promote the green upgrading of agriculture [J]. Agricultural engineering technology, 2016, 36(5): 41 (in Chinese).
- [2] 温延臣,李燕青,袁亮,等.长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J].农业工程学报,2015,31(7):91-99.WEN Y C, LI Y Q, YUAN L, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 91-99 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李书田,金继运.中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J].中国农业科学,2011,44(20):4207-4229.LI S T, JIN J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. Scientia agricultura sinica, 2011, 44(20): 4207-4229 (in Chinese with English abstract).
- [4] 倪治华,孙万春,林辉,等.浙江省畜禽粪源有机肥质量安全风险与控制对策[J].浙江农业学报,2020,32(2):299-307.NI Z H, SUN W C, LIN H, et al. Quality risk assessment and management of manure based organic fertilizers in Zhejiang [J]. Acta agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(2): 299-307 (in Chinese with English abstract).
- [5] 何梦媛,董同喜,茹淑华,等.畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异[J].环境科学,2017,38(4):1576-1586.HE M Y, DONG T X, RU S H, et al. Accumulation and migration characteristics in soil profiles and bioavail-

- ability of heavy metals from livestock manure[J]. *Environmental science*, 2017, 38(4): 1576-1586 (in Chinese with English abstract).
- [6] 覃丽霞, 马军伟, 孙万春, 等. 浙江省畜禽有机肥重金属及养分含量特征研究[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(4): 604-610. QIN L X, MA J W, SUN W C, et al. Characteristics of heavy metal and nutrient contents in livestock manure in Zhejiang Province [J]. *Acta agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(4): 604-610 (in Chinese with English abstract).
- [7] 赵文, 潘运舟, 兰天, 等. 海南商品有机肥中重金属和抗生素含量状况与分析[J]. *环境化学*, 2017, 36(2): 408-419. ZHAO W, PAN Y Z, LAN T, et al. Analysis of heavy metals and antibiotics content in Hainan commercial organic fertilizers [J]. *Environmental chemistry*, 2017, 36(2): 408-419 (in Chinese with English abstract).
- [8] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2469-2479. XIA W J, ZHANG L F, LIU Z B, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil [J]. *Environmental science*, 2021, 42(5): 2469-2479 (in Chinese with English abstract).
- [9] WANG X B, LIU W X, LI Z G, et al. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation [J]. *Pedosphere*, 2020, 30(4): 555-562.
- [10] 王甲辰, 田有国, 李季, 等. 全国7个区域商品有机肥质量现状分析及启示[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(2): 175-180. WANG J C, TIAN Y G, LI J, et al. The seven areas commodity organic fertilizer quality present situation analysis and enlightenment [J]. *Journal of soil and fertilizer in China*, 2022(2): 175-180 (in Chinese with English abstract).
- [11] 杨威, 狄彩霞, 李季, 等. 我国有机肥原料及商品有机肥中四环素类抗生素的检出率及含量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(9): 1487-1495. YANG W, DI C X, LI J, et al. The organic raw materials and goods tetracycline antibiotics detection rate and content in the organic fertilizer [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2021, 27(9): 1487-1495 (in Chinese with English abstract).
- [12] 谢育利, 王吉平, 苏天明, 等. 有机肥部分替代化肥对生菜生长及土壤环境的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(5): 41-49. XIE Y L, WANG J P, SU T M, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizers by organic fertilizers on lettuce growth and soil environment [J]. *Journal of Southwest University (natural science edition)*, 2022, 44(5): 41-49 (in Chinese with English abstract).
- [13] 胡国智, 闫森, 熊韬, 等. 适宜有机肥氮替代化肥氮比例提高甜瓜养分吸收、产量和品质[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 260-268. HU G Z, YAN M, XIONG T, et al. Optimum chemical fertilizer N substitution with organic manure N improves nutrient uptake, yield, and quality of muskmelon in Xinjiang [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2022, 28(2): 260-268 (in Chinese with English abstract).
- [14] 徐大兵, 赵书军, 袁家富, 等. 有机肥替代氮肥对叶菜产量品质和土壤氮淋失的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(S1): 13-18. XU D B, ZHAO S J, YUAN J F, et al. Chemical N fertilizer replaced with organic fertilizer affecting yield and quality of leaf vegetable and N leaching in soils [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(S1): 13-18 (in Chinese with English abstract).
- [15] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 758-765. HOU H Q, JI J H, LIU X M, et al. Effects of different proportions of organic fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. *Soil science*, 2020, 52(4): 758-765 (in Chinese with English abstract).
- [16] DING W, XU C, PING H, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: a Meta-analysis [J]. *Field crops research*, 2018, 227: 11-18.
- [17] XIE Z J, et al. Substitution of fertilizer-N by green manure improves the sustainability of yield in double-rice cropping system in South China [J]. *Field crops research*, 2016, 188: 142-149.
- [18] ZHANG X Y, FANG Q C, ZHANG T, et al. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: a Meta-analysis [J]. *Global change biology*, 2020, 26(2): 888-900.
- [19] 童盼盼, 王龙, 张亚若, 等. 有机肥和菌肥对库尔勒香梨果实品质及香气的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(4): 114-122. TONG P P, WANG L, ZHANG Y R, et al. Effects of organic fertilizer and bacterial fertilizer on fruit quality and aroma of Korla Pear [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(4): 114-122 (in Chinese with English abstract).
- [20] ZHEN H Y, JIA L, HUANG C D, et al. Long-term effects of intensive application of manure on heavy metal pollution risk in protected-field vegetable production [J/OL]. *Environmental pollution*, 2020, 263: 114552 [2022-09-15]. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114552>.
- [21] 顾思婷, 陈睿, 李志洋, 等. 有机肥部分替代化学氮肥的安全施用比例及环境容量研究——以典型土壤生菜种植为例[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, 48(2): 191-206. GU S T, CHEN J, LI Z Y, et al. Safety application ratio and environmental capacity of partial substitution of chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizer: a case study of cultivation of lettuce in typical soils [J]. *Journal of Zhejiang University (agriculture and life sciences)*, 2022, 48(2): 191-206 (in Chinese with English abstract).
- [22] 宋琳琳, 铁梅, 张朝红, 等. 施用污泥对土壤重金属形态分布和生物有效性的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2701-2707. SONG L L, TIE M, ZHANG Z H, et al. Effects of applying sewage sludge on chemical form distribution and bioavailability

- ty of heavy metals in soil[J]. Chinese journal of applied ecology, 2012, 23(10): 2701-2707 (in Chinese with English abstract).
- [23] 董文, 张青, 罗涛, 等. 不同有机肥连续施用对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(28): 106-110. DONG W, ZHANG Q, LUO T, et al. Effects of continuous application of different organic fertilizers on soil quality [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2020, 36(28): 106-110 (in Chinese with English abstract).

Evaluating risk of heavy metals in fruits, vegetables and soils under continuous application of organic fertilizers in field

GE Zan¹, YANG Wei¹, WANG Yuhang¹, TAN Qiling¹, TIAN Youguo², HU Chengxiao¹, SUN Xuecheng¹

1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Hubei Provincial Engineering Laboratory for New-Type Fertilizers, Wuhan 430070, China;

2. The National Agricultural Technology Extension Service Center, Beijing 100125, China

Abstract The field plot experiments were conducted to apply organic fertilizer to vegetables including cabbage, radish, pepper for three consecutive seasons and citrus (Majia pomelo) for many years to compare the effects of applying organic fertilizer instead of chemical fertilizer on the yield, quality of fruits and vegetables and the content of heavy metals in soil. Using no fertilization (CK) and fertilizer application (CF) as the control, two organic fertilizer treatments with equal nitrogen fertilizer application including OF1, OF2 were set up. The results showed that both OF1 and OF2 treatments ensured that the yield of vegetables in the first two seasons and Majia pomelo do not decrease, and significantly increase the contents of soluble solids in Majia pomelo and the content of organic matter in vegetable soil compared with CF treatment. There was no significant difference in the content of heavy metals between vegetables under different treatments in the first two seasons, but the content of Pb in the edible part of radish treated with OF1 and OF2 was close to the limit standard. In the vegetables of third season, the contents of Cr, As, Cu and Zn in edible parts of pepper treated with OF1 and OF2 were significantly higher than those treated with CF. The content of Pb in the pulp and peel of Majia pomelo fruit treated with OF1 exceeded the limit standard, and that with OF2 treatment was close to the limit standard. The content of various heavy metals in vegetable soil was far lower than the value of risk control, but the content of Pb, Cd, Hg had significantly accumulated compared with CF treatment, among which the content of Hg was the fastest. It is indicated that the application of two organic fertilizer with equal nitrogen fertilizer can increase the yield and quality of fruits and vegetables, improve the physical and chemical properties of soil in a short time, but increase the accumulation of heavy metals in soil as well. Therefore, continuous application of organic fertilizer will lead to the risk that the content of heavy metals in fruits and vegetables exceeds the limit standard.

Keywords continuous application of organic fertilizer; heavy metal; evaluation of soil; risk assessment; fertilizer reduction and efficiency increase; agricultural pollution; food safety

(责任编辑:赵琳琳)