

刘海涛, 陈一兵, 田 静, 等. 成都平原不同种植模式下重金属镉污染风险和经济效益评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 184-191.

LIU Hai-tao, CHEN Yi-bing, TIAN Jing, et al. Evaluation of economic benefits and cadmium pollution risk in different cropping system in Chengdu Plain, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2): 184-191.

成都平原不同种植模式下重金属镉污染风险和经济效益评价

刘海涛, 陈一兵, 田 静, 林超文*

(四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066)

摘要:为了评估成都平原常规粮油种植模式下的重金属镉污染风险和经济效益,寻求稳定、高产且利于推广的安全种植模式。选取成都平原最常见的6种粮油作物,设置了小麦-玉米轮作、油菜-玉米轮作、小麦-红苕轮作、油菜-红苕轮作、小麦-大豆轮作、油菜-大豆轮作、小麦-水稻轮作、油菜-水稻轮作8种植植模式,在轻中度污染农田开展了两年田间试验,对各个种植模式的产量、经济产出,以及收获物、秸秆和土壤的重金属镉含量进行测定。结果表明,当前试验区最广泛使用的小麦-水稻种植模式下的水稻和小麦籽粒镉含量均超标,存在极大的生产风险。玉米-油菜种植模式的籽粒镉含量最低,均未超标,能够实现安全生产,但经济产出较小麦-水稻轮作模式显著降低。油菜-水稻轮作模式的农田产出效益最大。相比种植小麦,种植油菜后,后茬水稻对应的重金属镉含量降低70.2%。综合生产和环境效益,将小麦-水稻种植模式更换为油菜-水稻模式是目前既能保证农民收益又能有效降低重金属镉污染风险的最佳措施。

关键词:种植模式;经济效益;镉污染;轮作

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)02-0184-08

doi: 10.13254/j.jare.2018.0164

Evaluation of economic benefits and cadmium pollution risk in different cropping system in Chengdu Plain, China

LIU Hai-tao, CHEN Yi-bing, TIAN Jing, LIN Chao-wen*

(Soil and Fertilizer Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Science, Chengdu 610066, China)

Abstract: The economic benefits and cadmium pollution risk in different cropping system in Chengdu Plain were evaluated, in order to obtain some stable, economical and farmer easily accepted and heavy metal cadmium security cropping system. Six common food and oil crops were selected, and eight rotation systems including wheat-maize rotation, oilseed rape-maize rotation, wheat-sweet potato rotation, oilseed rape-sweet potato rotation, wheat-soybean rotation, oilseed rape-soybean rotation, wheat-rice rotation and oilseed rape-rice rotation were set in this trial. The yield and economic benefit, the cadmium concentration of the kernel, straw and soil in each cropping system were measured. The results of two years field trial showed that both the wheat and rice kernel cadmium concentration were above the national standard in wheat-rice rotation system which was widely applied in experimental region. The kernel cadmium concentration was below the national standard in maize-oilseed rape rotation system; however, the economic benefit of this rotation system was greatly decreased compared with wheat-rice rotation system. The oilseed rape-rice rotation system had the highest economic benefit in all of eight rotation systems. The kernel cadmium concentration of the rice which was planted after oilseed rape was decreased by 70.2% compared with the kernel cadmium concentration of the rice which was planted after wheat. Generally, the oilseed rape-rice rotation was the best cropping sys-

收稿日期:2018-06-21 录用日期:2018-08-22

作者简介:刘海涛(1986—),男,浙江丽水人,助理研究员,从事土壤资源利用研究。E-mail:liuht1986@163.com

*通信作者:林超文 E-mail:lcw-11@163.com

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2015NZ0108);公益性行业(农业)科研专项(201503119-03-01)

Project supported: The Science and Technology Support Project of Sichuan Province (2015NZ0108); Special Fund for Public Welfare Industry (Agriculture) Research of China(201503119-03-01)

tem to alternate the wheat-rice rotation system which could ensure the income of the famers and decrease the cadmium pollution risk in agricultural production.

Keywords: cropping system; economic benefit; cadmium pollution; rotation

随着我国工业和城市化的不断发展,工业和生活废水排放、污水灌溉、汽车废气排放等造成的土壤重金属污染问题也日益严重。重金属能通过食物链迁移到动物和人体内,严重危害健康。我国重金属污染耕地占耕地总量的1/6左右,其中大部分污染耕地均为轻度污染,镉污染比例为25.20%,远超过其他几种土壤重金属元素^[1]。作为我国西南地区最大的粮油生产基地,成都平原的重金属镉污染形势较为严峻,大面积的农田土壤镉超标^[2],因此对成都平原重金属污染农田的安全生产技术开展研究具有重要意义。

鉴于土壤重金属污染的危害严重,国内外研究出了多种重金属污染综合治理技术。目前最为常见的技术包括:(1)施用土壤调理剂,包括有机肥、石灰、海泡石等物质来降低土壤重金属的活性^[3-6];(2)更换作物品种,由于不同作物不同品种对重金属富集能力各不相同,因此选择低累积品种能够一定程度缓解重金属污染^[7-10];(3)农田管理,通过灌溉或者翻耕等措施,改变土壤的氧化还原电位,能够大幅度降低土壤中镉的有效性,从而达到降低植物镉累积的效果^[11-13];(4)超累积植物修复,在镉污染较为严重的土壤中种植镉超富集植物,经过修复后土壤的总镉含量下降,从而减少粮食的重金属镉吸收^[14-15]。

施用调理剂、更换品种、灌溉等措施能够显著降低粮食收获物的籽粒镉含量,但幅度有限,在部分镉污染相对较为严重的农田中,该方法很难实现安全生产。超累积植物修复目前大多用于修复严重污染土壤,但其在生产中使用可能会发生超累积植物增强土壤中镉的活性而导致后茬粮食作物镉含量增加的现象^[16]。更换种植模式是一种用于修复介于轻度污染和重度污染之间农田的有效措施。大量研究表明作物之间的镉吸收差异是极其明显的,例如李铭红等^[17]在浙江红壤黄壤水稻土工业污水灌溉试验中,土壤的Cd含量介于0.5~3.5 mg·kg⁻¹时,各作物Cd的籽粒富集系数大小依次为紫云英>大麦>大豆>水稻>小麦>玉米。毛岭峰等^[18]研究重庆紫色土水稻发现,土壤Cd含量介于0.35~0.8 mg·kg⁻¹,各作物Cd的富集系数依次为土豆>水稻>空心菜>玉米>红苕>南瓜。更换

作物类型是实现镉污染区农田安全生产的有效途径,成都平原多为一年两季的轮作模式,前茬作物可通过影响土壤镉有效性等方式对后茬作物产生一定的影响^[15-16,19-21]。因此不同轮作作物对下茬作物镉累积的影响也需要进一步研究。

更改种植模式虽然在农田安全生产上行之有效,但也可能会大幅度降低农田的产出,同时需要改变农民的种植习惯,对应的配套设施也需更改,农民对此的接受认可度较低。基于此,本文对成都平原几种常见的粮油作物及其对应的种植模式下重金属镉累积规律和农田经济效益进行试验分析,以期获得一种环境与经济效益兼顾的种植模式。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本研究试验区位于四川省德阳市绵竹文凤村。试验区气候类型为亚热带季风气候,年均降雨量为1 053.2 mm,年最大降水量为1 421.4 mm,最少降水量为608.7 mm,降水的季节分配极不均匀,主要集中在7—9月。目前面积最大的种植制度为小麦-水稻轮作,机械化水平高。本研究选取两块相隔100 m左右的农田,一块为旱地(东经104°8′6.24″,北纬31°21′20.56″,海拔642 m)用于种植旱作植物;另一块为水田(东经104°8′8.61″,北纬31°21′18.95″,海拔高度为642 m)用来种植包含水稻的种植模式。该两块试验地的土壤基础理化性质如表1所示。试验地土壤类型为水稻土,其中旱地试验田土壤pH为6.77,总镉含量为0.68 mg·kg⁻¹,水田试验田土壤pH为6.49,总镉含量为0.61 mg·kg⁻¹,总镉含量超过了农业用地国家标准(GB 15618—2018)的限定值,旱田限定值为0.3 mg·kg⁻¹(6.5<pH≤7.5),属于中度污染农田,水田限定值为0.4 mg·kg⁻¹(5.5<pH≤6.5),属于轻度污染农田。

1.2 试验设计

两周年田间试验于2015年11月—2017年10月进行。包含8个种植模式处理:其中2015年11月—2016年10月对应6个处理,分别为处理1:小麦-玉米轮作;处理2:油菜-玉米轮作;处理3:小麦-红苕轮作;处理4:油菜-红苕轮作;处理5:小麦-水稻轮作;

表1 两块试验地的土壤基础性质

Table 1 Soil basic properties in two experimental fields

地块 Field	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Available N/ mg·kg ⁻¹	有效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	pH	总镉 Total Cd/ mg·kg ⁻¹	有效镉 Available Cd/ mg·kg ⁻¹
旱地 Dry land	36.7	2.06	169	23.6	60	6.77	0.68	0.32
水田 Paddy field	37.7	1.93	180	13.6	64	6.49	0.61	0.30

处理6:油菜-水稻轮作。处理1~处理4为旱作处理,在旱地试验地上进行;处理5和处理6在水田试验地上进行。每个处理设置3个重复,小区长7 m、宽3 m,按照随机区组试验排列进行。2016年试验收获红苕后,由于红苕收获消耗大量劳动力,且没有销售渠道,因此在2016年11月—2017年10月的田间试验中将小麦-红苕和油菜-红苕轮作种植模式更改为小麦-大豆,油菜-大豆轮作种植模式,即处理7和处理8。

冬小麦于11月初播种,次年5月初收获。旋耕后撒播,播种量为195 kg·hm⁻²。小麦品种为川麦104,化肥施用量根据当地习惯施肥量确定,小麦季在播种前施用基肥,施肥量为75 kg·hm⁻² N、75 kg·hm⁻² P₂O₅、75 kg·hm⁻² K₂O。在小麦三叶期追肥75 kg·hm⁻² N。

油菜于11月初播种,次年5月初收获。油菜品种为绿星油991,旋耕移栽。行距为33.3 cm,株距为33.3 cm。施肥量与小麦相同。在开薹期追肥。在小麦、油菜收获种植后5月初种植水稻、玉米、红苕和大豆。水稻种植前旋耕,水稻栽秧规格为25 cm×20 cm。水稻品种为川优6203。在播种前施肥90 kg·hm⁻² N、90 kg·hm⁻² P₂O₅、90 kg·hm⁻² K₂O。在7月初追施氮肥105 kg·hm⁻² N。红苕移栽前旋耕,红苕行距为60 cm,株距为40 cm。红苕品种为徐薯22,在播种前施肥90 kg·hm⁻² N、90 kg·hm⁻² P₂O₅、90 kg·hm⁻² K₂O。在7月初追施氮肥90 kg·hm⁻² N。玉米播前旋耕,玉米品种为福康玉609。玉米行距为75 cm,株距为30 cm。施肥量与水稻、红苕一致。大豆行距为50 cm,株距为25 cm,大豆品种为南夏豆25,在播种前施肥90 kg·hm⁻² N、90 kg·hm⁻² P₂O₅、90 kg·hm⁻² K₂O。不追肥。所有作物的底肥均施用15-15-15的复合肥,追肥施用尿素。水稻田在栽秧前灌水,在拔节期排水,扬花孕穗期遇到干旱则进行灌溉,灌溉过后立即排干稻田多余淹水。其余作物均为雨养,没有任何灌溉措施。

1.3 测定项目与数据处理

在所有作物成熟后,将小区内所有小麦、玉米、油菜、大豆籽粒部分及水稻的稻谷部分收获并风干测定质量,红苕收获物为地下部分块茎,并根据小区面积

换算出对应公顷产量。将小麦、玉米、油菜、大豆的风干籽粒及水稻的风干稻谷磨碎用于测定总镉含量。红苕块茎鲜样则直接用于总镉的测定。取所有小区表层土样,自然风干,过2 mm筛后测定土壤pH、总镉和有效镉。每个小区分别取3株作物的地上部分样品,去除籽粒部分,样品在80℃烘干后粉碎测定秸秆总镉含量。研究中各种种植模式的产出按照单位面积产量与粮食单价乘积来计算,2016—2017年粮食的平均市场收购价为水稻2.8元·kg⁻¹,小麦2.4元·kg⁻¹,油菜5元·kg⁻¹,红苕0.4元·kg⁻¹,玉米1.8元·kg⁻¹,大豆5元·kg⁻¹。

土壤总镉的测定方法为石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141—1997),有效镉的测定方法为DT-PA提取原子吸收法(GB/T 23739—2009)。土壤基础性质采用常规分析方法。籽粒和秸秆的总镉含量测定方法为石墨炉原子吸收光谱法(GB 5009.15—2014)。数据采用方差分析的LSD法进行差异显著性检验,当P<0.05时,表示处理间存在显著性差异。采用Excel 2010和SPSS 17.0进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 产量与收益

本研究中涉及的8个种植模式对应的总产量和各作物的产量如图1所示。各种作物的产量差异很大,按产量由小到大的顺序依次为油菜<大豆<小麦<玉米<水稻<红苕,平均产量分别为3610、3710、6393、9093、10 022、48 607 kg·hm⁻²。各种种植模式的年度总产量自小到大的依次为油菜-大豆<小麦-大豆<小麦-玉米<油菜-玉米<油菜-水稻<小麦-水稻<油菜-红苕<小麦-红苕,产量值依次为7245、10 113、13 669、13 731、14 085、16 882、49 404 kg·hm⁻²和57 747 kg·hm⁻²。

当前茬作物分别为小麦和油菜时,后茬作物的产量存在着差异。当前茬为油菜时,后茬的玉米、水稻和大豆产量分别较前茬为小麦时高出21.3%、8.4%和1.5%,其中玉米和水稻达到显著性水平。当前茬为

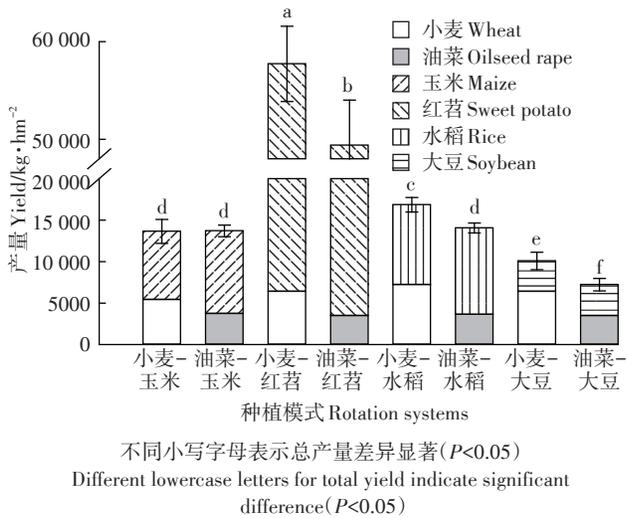


图1 不同种植模式的总产量和各作物产量
Figure 1 Yield of each crop and total yield in different rotation systems

油菜时,红苕的产量较前茬为小麦时低 11.6%, 差异达到显著水平。可见相比小麦,越冬作物油菜能够增加后茬籽粒作物的产量。当前茬作物分别为水稻、玉米和红苕时,后茬作物的产量也存在差异。当前茬种植水稻时,后茬的小麦和油菜产量高于前茬为玉米和红苕时小麦和油菜产量。

如图2所示,各种种植模式的收益按照由低到高的顺序依次为小麦-玉米<小麦-大豆<油菜-红苕<小麦-红苕<油菜-大豆<油菜-玉米<小麦-水稻<油菜-水稻,各模式产出依次为 27 875、33 845、35 896、35 958、36 225、36 757、44 363 元·hm⁻²和 47 493 元·hm⁻²。水稻在夏季作物中产量最高,单价也相对较

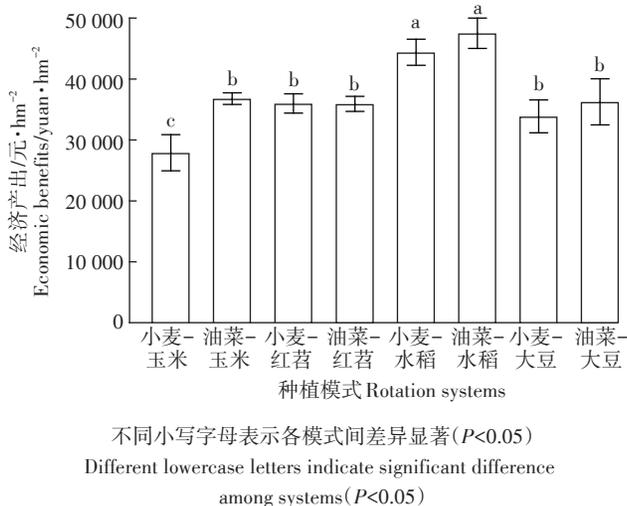


图2 不同种植模式的年际经济产出
Figure 2 Yearly economic benefits of different rotation systems

高,因此其产出在所有作物中最高。冬季作物油菜为经济作物,单价远高于小麦,因此产出高于冬小麦。然而冬小麦相比油菜要更容易实现机械化操作,因此试验区当地农户普遍采用小麦-水稻轮作模式。

2.2 不同作物的收获物镉含量

根据国家粮食重金属安全标准,小麦、玉米籽粒镉含量安全标准为 0.1 mg·kg⁻¹,稻谷、大豆、油菜为 0.2 mg·kg⁻¹。各种种植模式下各作物的收获部分的镉含量如表2所示,试验点水稻、小麦普遍存在重金属镉超标现象。其中 2016 年水稻籽粒镉含量为标准值的 3.75 倍。可见试验区当前的轮作模式具有极大的镉安全风险。油菜、玉米、红苕、大豆的镉在安全标准范围内,其中玉米的镉含量最低,为 0.01 mg·kg⁻¹,红苕的镉含量为 0.08~0.13 mg·kg⁻¹,油菜的 Cd 含量 0.09~0.14 mg·kg⁻¹,大豆的镉含量为 0.16 mg·kg⁻¹。

不仅不同的作物收获物的镉含量存在显著差异,不同年份之间相同作物的镉含量也存在差异。2016 年 10 月收获的水稻稻谷镉平均含量为 0.75 mg·kg⁻¹,显著高于 2017 年的 0.34 mg·kg⁻¹。另外 2016 年各模式下收获的油菜镉平均含量均显著高于 2017 年。2016 年收获小麦镉含量则低于 2017 年,但并未达到显著水平。玉米籽粒镉含量两年间没有显著差异。

2.3 前茬作物对后茬作物籽粒镉含量的影响

本研究中所有的种植模式均为一年内有两种作物轮作,前茬作物会对后茬作物的镉累积产生一定程度影响。前茬种植小麦和油菜下,当季作物玉米、红苕、水稻和大豆的镉含量如图3所示。前茬作物小麦和油菜的差异对后茬玉米、红苕和大豆的镉含量没有显著的影响。前茬作物小麦和油菜的差异对水稻有显著的影响,小麦后茬的水稻两年平均稻谷镉含量为 0.84 mg·kg⁻¹,种植油菜后两年的平均水稻稻谷镉含量为 0.25 mg·kg⁻¹,较前茬种植小麦下降了 70.2%。

当前茬作物为玉米、红苕和水稻时,如图4所示,对应的后茬小麦镉含量分别为 0.27、0.27 mg·kg⁻¹和 0.24 mg·kg⁻¹,对应的后茬作物油菜镉含量分别为 0.10、0.11 mg·kg⁻¹和 0.09 mg·kg⁻¹,相比红苕和玉米早作植物,种植水稻对应后茬的小麦和油菜的镉含量较低,但降低程度较小,未达到显著水平。

3 讨论

本研究试验点所在的德阳地区存在大范围镉等重金属污染现象^[22]。试验点的基础土壤镉含量超过

表 2 不同种植模式下各作物收获部分镉含量(mg·kg⁻¹)

Table 2 Cadmium concentration in harvest part of each crop at different rotation systems(mg·kg⁻¹)

种植模式 Cropping systems	2016-05		2016-10		
	小麦 Wheat	油菜 Oilseed rape	玉米 Maize	红苕 Sweet potato	水稻 Rice
小麦-玉米 Wheat-maize	0.20±0.07a		0.01±0.01a		
油菜-玉米 Oilseed rape-maize		0.14±0.03a	0.01±0.01a		
小麦-红苕 Wheat-sweet potato	0.19±0.04a			0.08±0.02a	
油菜-红苕 Oilseed rape-sweet potato		0.14±0.01a		0.13±0.06a	
小麦-水稻 Wheat-rice	0.15±0.01a				1.27±0.12a
油菜-水稻 Oilseed rape-rice		0.12±0.02a			0.23±0.05b
平均值 Average	0.18±0.05BC	0.13±0.01C	0.01±0.01F	0.11±0.05C	0.75±0.50A
种植模式 Cropping systems	2017-05		2017-10		
	小麦 Wheat	油菜 Oilseed rape	玉米 Maize	大豆 Soybean	水稻 Rice
小麦-玉米 Wheat-maize	0.27±0.05a		0.01±0.00a		
油菜-玉米 Oilseed rape-maize		0.10±0.02a	0.01±0.01a		
小麦-大豆 Wheat-soybean	0.27±0.08a			0.16±0.00a	
油菜-大豆 Oilseed rape-soybean		0.11±0.02a		0.16±0.02a	
小麦-水稻 Wheat-rice	0.24±0.01a				0.42±0.07a
油菜-水稻 Oilseed rape-rice		0.09±0.01a			0.27±0.04b
平均值 Average	0.26±0.05AB	0.10±0.02D	0.01±0.00F	0.16±0.01C	0.34±0.10A

注:同列不同小写字母表示存在显著性差异(P<0.05)。平均值行不同大写字母表示存在显著性差异(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column significant differences(P<0.05). Average followed by different uppercase letters indicate significant differences(P<0.05). The same below.

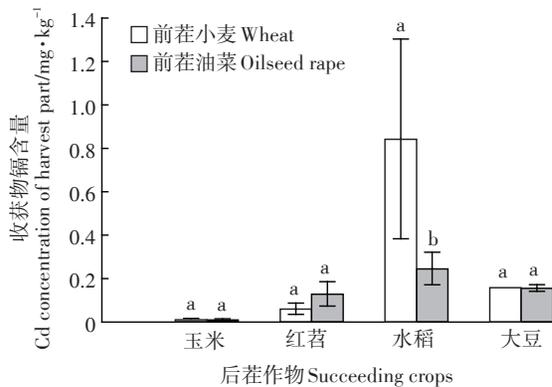


图 3 前茬为小麦、油菜时后茬作物收获物镉含量
Figure 3 Cadmium concentration of the harvest part for succeeding crops when previous crop is wheat or oilseed rape

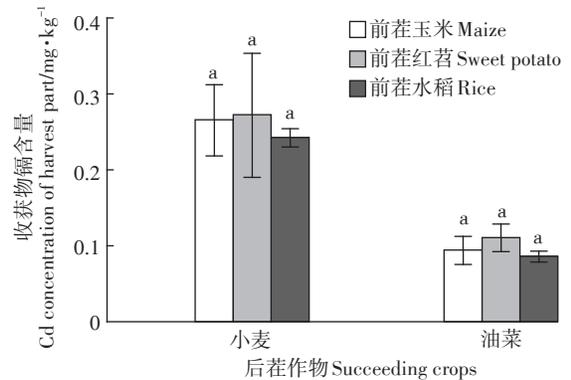


图 4 前茬为玉米、红苕和水稻时后茬作物籽粒镉含量
Figure 4 Kernel cadmium concentration of the succeeding crops when previous crop is maize, sweet potato and rice

图 3 前茬为小麦、油菜时后茬作物收获物镉含量
Figure 3 Cadmium concentration of the harvest part for succeeding crops when previous crop is wheat or oilseed rape

国家标准(GB 15618—2018)二级水平。农民最普遍采用的小麦-水稻轮作种植模式所收获的小麦和水稻籽粒均存在重金属镉超标的现象^[23]。更换种植模式是一种行之有效、安全低风险的降低重金属镉污染的措施,且不会带入新的污染源、影响土壤的理化性质^[24]。本研究中种植油菜、红苕、玉米和大豆对应的

籽粒镉含量均低于小麦和水稻,这与以往的研究一致^[17,13,18,25-26]。本研究中,油菜、红苕和玉米的籽粒镉含量均低于国家安全标准。可见在试验区通过更换种植模式来实现农产品安全生产是可行的。

重金属污染农田的粮食安全生产是一个长期的过程,因此必须关注各个作物年际间的镉含量差异,从而确保粮食安全生产和研究结果的可靠。在本研究结果中,水稻、小麦和油菜3种作物在两年间的籽粒镉含量存在较大差异,其中2016年的油菜和水稻

的收获物重金属镉含量高于2017年,2016年的小麦籽粒重金属镉含量低于2017年。这种不同年际间的作物籽粒镉含量差异的结果在许多研究中都出现^[27-28]。这可能是由于年际间的降雨量差异造成土壤含水量差异,进而影响土壤氧化还原电位,土壤氧化还原电位是影响重金属元素行为的关键因子,土壤中重金属的形态、化合价和离子浓度都会随土壤氧化还原状况的变化而变化^[29]。本研究中2016年水稻生长季的降雨量低于2017年,2017年的水稻长时间处于淹水的还原条件下,形成的S²⁻可使重金属以难溶硫化物的形式沉积,从而降低土壤中的有效镉含量,进而降低水稻籽粒镉的含量^[30-31]。

前茬作物的差异会对后茬作物重金属镉积累产生影响,在本研究中当前茬作物分别为小麦和油菜时,后茬的水稻镉累积差异很大。相比小麦,前茬种植油菜后能够显著降低后茬水稻籽粒中的镉含量。为进一步明确造成这一现象的原因,本研究对小麦、油菜秸秆的总镉和小麦、油菜收获后水稻种植前农田土壤样品的pH、有效镉和总镉进行了补充测定,如表3所示。种植小麦和油菜后的土壤pH和总镉差异不显著。小麦收获后的土壤有效镉含量高于油菜收获后,两年平均高出21.8%,其中2016年达到显著差异水平。小麦秸秆的镉含量高于油菜秸秆镉含量,结合籽粒中的镉含量可知,小麦季土壤中吸收的镉总量明显高于油菜。

研究表明植物根系及其分泌物通过形成镉螯合物^[6]、诱导改变土壤微生物活化固定态和结合态的镉^[32]等方式影响镉形态的转化。譬如水稻和油菜的根系分泌物均能够在一定程度上活化土壤中的难溶性镉^[33-34]。本研究小麦自身吸收的镉总量高于油菜,因此推断小麦根系分泌物对土壤镉的活化作用强于油菜,种植小麦后土壤中的有效镉含量增加。这种土壤有效镉的增加对后茬的水稻镉吸收造成了很大的影响。于玲玲等^[16]在研究中也发现高积累油菜品种

相比低累积品种能够提高根系的有效镉含量,从而造成种植高镉累积油菜品种后下茬水稻的镉含量偏高,即自身富集更多镉的作物能增加土壤中镉的活性,从而导致下茬作物吸收更多的镉。这与本研究小麦吸收更多的镉,下一茬水稻镉含量偏高的结果类似。种植玉米、红苕和水稻对后茬的小麦、油菜籽粒影响不大,可能有以下原因:首先油菜和小麦的生育期较长,前茬作物对土壤中镉活性产生的影响,在一个冬季过后已经减弱;其次本研究中前茬为玉米、红苕和水稻后茬为小麦、油菜只有一季的结果,代表性不强;当然玉米、红苕和水稻也可能对后茬作物的重金属积累影响较少,这在文献中很少查看到相关的结果,因此有必要通过实验进一步论证。

试验点所在德阳地区小麦-水稻轮作面积积极大,配套的机械、水利等生产设施完善。虽然单纯从农田的产出效益看,油菜-水稻高于小麦-油菜轮作,但是油菜在栽培管理上比小麦投入更多的劳动力成本,同时油菜的收获成本高于小麦,因此综合而言,油菜-水稻模式的最终经济收益略低于小麦-水稻模式。这也是当地农民乐于选用小麦-水稻轮作模式的原因,但两种模式差距不大。而将种植模式调整为玉米-油菜等旱作模式时,不仅粮食产出收益大幅度降低,也极大地浪费当地的生产配套设施。油菜-水稻轮作处理的油菜籽粒镉含量未超标,水稻籽粒镉平均含量为0.25 mg·kg⁻¹,大幅度低于小麦-水稻轮作处理,相比0.2 mg·kg⁻¹的标准,仅仅超出0.05 mg·kg⁻¹,再配合一些土壤调理剂的使用,有望控制在安全生产的范围内。因此,综合生产和环境效益,在本研究区将小麦-水稻种植模式更换为油菜-水稻模式是目前既能保证农民收益又能有效降低重金属镉风险的一种可借鉴措施。

4 结论

通过在中轻度镉污染农田中开展两年的田间试

表3 小麦、油菜秸秆总镉含量及收获后土壤中的pH、有效镉和总镉含量

Table 3 Cadmium concentration of wheat and oilseed rape straw, soil pH, available cadmium and total cadmium after wheat and oilseed rape harvest

前茬作物 Previous crops	收获时间 Harvest time	土样 Soil sample			秸秆 Straw
		pH	总镉 Total Cd/mg·kg ⁻¹	有效镉 Available Cd/mg·kg ⁻¹	总镉 Total Cd/mg·kg ⁻¹
小麦 Wheat	2016-05	6.29±0.15a	0.6±0.03a	0.34±0.02a	0.43±0.07a
油菜 Oilseed rape	2016-05	6.26±0.23a	0.59±0.07a	0.29±0.02b	0.16±0.01b
小麦 wheat	2017-05	6.33±0.17a	0.68±0.03a	0.33±0.04ab	0.48±0.09a
油菜 Oilseed rape	2017-05	6.44±0.10a	0.6±0.04a	0.26±0.03b	0.2±0.05b

验,研究了成都平原几种常见作物和种植模式下,重金属镉的积累和农田的产出效益,得出以下结论:

(1)当前最广泛使用小麦-水稻种植模式,小麦和水稻籽粒镉均超标,存在极大的重金属安全隐患。

(2)玉米-油菜种植模式的籽粒镉含量均未超标,能够实现安全生产。

(3)油菜-水稻处理的农田产出收益最高。

(4)相比前茬作物小麦,前茬作物为油菜时后茬水稻的重金属镉含量降低70.2%。综合生产和环境效益,将小麦-水稻种植模式更换为油菜-水稻模式是目前保证农民收益且有效降低重金属镉风险的最佳措施。

参考文献:

- [1] 宋伟,陈百明,刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].水土保持研究,2013,20(2):293-298.
SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2):293-298.
- [2] 李冰,王昌全,谭婷,等.成都平原土壤重金属区域分布特征及其污染评价[J].核农学报,2009,23(2):308-315.
LI Bing, WANG Chang-quan, TAN Ting, et al. Regional distribution and pollution evaluation of heavy metal pollution in topsoils of the Chengdu Plain[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2):308-315.
- [3] 谢运河,纪雄辉,吴家梅,等.不同有机肥对土壤镉锌生物有效性的影响[J].应用生态学报,2015,26(3):826-832.
XIE Yun-he, JI Xiong-hui, WU Jia-mei, et al. Effect of different organic fertilizers on bioavailability of soil Cd and Zn[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3):826-832.
- [4] 代允超,吕家珑,刁展,等.改良剂对不同性质镉污染土壤中有效镉和小白菜镉吸收的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(1):80-86.
DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, DIAO Zhan, et al. Effects of soil amendments on Cd bioavailability to and uptake by *Brassica chinensis* in different Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):80-86.
- [5] 李丹,李俊华,何婷,等.不同改良剂对石灰性镉污染土壤的镉形态和小白菜镉吸收的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(9):1679-1685.
LI Dan, LI Jun-hua, HE Ting, et al. Effects of different amendments on soil Cd forms and Cd uptake by Chinese cabbage in Cd-contaminated calcareous soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9):1679-1685.
- [6] Krishnamurti G S R, Cieslinski G, Huang P M, et al. Kinetics of cadmium release from soils as influenced by organic acids: Implication in cadmium availability[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(1):271-277.
- [7] 赵小蓉,杨谢,陈光辉,等.成都平原区不同蔬菜品种对重金属富集能力研究[J].西南农业学报,2010,23(4):1142-1146.
ZHAO Xiao-rong, YANG Xie, CHEN Guang-hui, et al. Assessment of heavy metal enrichment in vegetables of Chengdu Plain[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(4):1142-1146.
- [8] 田效琴,李卓,刘永红.成都平原农田镉污染情况及油菜镉吸收特征[J].农业环境科学学报,2017,36(3):496-506.
TIAN Xiao-qin, LI Zhuo, LIU Yong-hong. Characteristics of cadmium uptake by rape (*B. junica*) grown in cadmium contaminated farmland on Chengdu Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):496-506.
- [9] 向丹,焦卫平,苏德纯.不同吸镉能力油菜各器官累积镉的差异[J].中国油料作物学报,2009,31(1):29-33.
XIANG Dan, JIAO Wei-ping, SU De-chun. Cd accumulation characteristics in rapeseed varieties with different Cd uptake ability[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2009, 31(1):29-33.
- [10] 熊孜,李菊梅,赵会薇,等.不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究[J].农业环境科学学报,2018,37(1):36-44.
XIONG Zi, LI Ju-mei, ZHAO Hui-wei, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):36-44.
- [11] 陈江民,杨永杰,黄奇娜,等.持续淹水对水稻镉吸收的影响及其调控机理[J].中国农业科学,2017,50(17):3300-3310.
CHEN Jiang-min, YANG Yong-jie, HUANG Qi-na, et al. Effects of continuous flooding on cadmium absorption and its regulation mechanisms in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17):3300-3310.
- [12] 崔孝强,阮震,刘丹,等.耕作方式对稻-油轮作系统土壤理化性质及重金属有效性的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):73-77.
CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, LIU Dan, et al. Effects of tillage methods on physicochemical properties and heavy metal availability of soils in rice-rape rotation systems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5):73-77.
- [13] 常同举,崔孝强,阮震,等.长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响[J].环境科学,2014,35(6):2381-2391.
CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, et al. Long-term effects of tillage methods on heavy metal accumulation and availability in purple paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(6):2381-2391.
- [14] 赵冰,沈丽波,程苗苗,等.麦季间作伴矿景天对不同土壤小麦-水稻生长及镉吸收性的影响[J].应用生态学报,2011,22(10):2725-2731.
ZHAO Bing, SHEN Li-bo, CHENG Miao-miao, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* in wheat growth season under wheat-rice rotation on the crops growth and their heavy metals uptake from different soil types[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2725-2731.
- [15] 陈磷涵,曾红远,葛一陈,等.2种轮作模式对镉污染土壤修复潜力的比较[J].环境工程学报,2017,11(6):3873-3878.
CHEN Lin-han, ZENG Hong-yuan, GE Yi-chen, et al. Comparison

- of remediation potential for two crop rotation patterns on Cd contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(6):3873-3878.
- [16] 于玲玲,朱俊艳,黄青青,等.油菜-水稻轮作对作物吸收累积镉的影响[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(1):1-6.
YU Ling-ling, ZHU Jun-yan, HUANG Qing-qing, et al. Bioavailability of cadmium in the rotation system of oilseed rape and rice grown in Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(1):1-6.
- [17] 李铭红,李 侠,宋瑞生.受污农田中农作物对重金属镉的富集特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3):675-679.
LI Ming-hong, LI Xia, SONG Rui-sheng. Cadmium accumulation in crops grown in polluted farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3):675-679.
- [18] 毛岭峰,彭培好,陈文德.重庆地区主要作物重金属富集特征[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(6):1117-1122.
MAO Ling-feng, PENG Pei-hao, CHEN Wen-de. Enrichment characteristic of heavy metals in main crops in Chongqing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(6):1117-1122.
- [19] 吴飞龙,苏德纯.油菜连作及施用堆肥对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(4):658-662.
WU Fei-long, SU De-chun. Phytoavailability and speciation of Cd in contaminated soil after repeated croppings of oilseed rapes and amended with compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):658-662.
- [20] Su D C, Jiao W P, Man Z, et al. Can cadmium uptake by Chinese cabbage be reduced after growing Cd-accumulating rapeseed? [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(1):90-95.
- [21] Su D C, Lu X X, Wong J W C. Could cocropping or successive cropping with Cd accumulator oilseed rape reduce Cd uptake of sensitive Chinese cabbage? [J]. *Practice Periodical of Hazardous Toxic & Radioactive Waste Management*, 2008, 12(3):224-228.
- [22] 金立新,侯青叶,包雨函,等.德阳镉污染农田区生态安全性及居民健康风险评估[J]. *现代地质*, 2008, 22(6):984-989.
JIN Li-xin, HOU Qing-ye, BAO Yu-han, et al. Ecological security and residents health risk assessment on polluted farmland by cadmium in Deyang region[J]. *Geoscience*, 2008, 22(6):984-989.
- [23] 杨 兰,李 冰,王昌全,等.长期秸秆还田对德阳地区稻田土壤镉赋存形态的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(6):725-732.
YANG lan, LI Bing, WANG Chang-quan, et al. Effects of long-term straw incorporation on cadmium speciation and bioavailability in paddy soils in Deyang area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(6):725-732.
- [24] 樊 霆,叶文玲,陈海燕,等.农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(10):1727-1736.
FAN Ting, YE Wen-ling, CHEN Hai-yan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10):1727-1736.
- [25] 代天飞,王昌全,李 冰.油菜各部位对土壤中活性态重金属的累积特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊):471-475.
DAI Tian-fei, WANG Chang-quan, LI Bing. Accumulation characters of heavy metals at different parts of rape growing at various soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl):471-475.
- [26] 王吉秀,祖艳群,李 元,等.玉米和不同蔬菜间套模式对重金属Pb、Cu、Cd累积的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11):2168-2173.
WANG Ji-xiu, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Effects of maize and vegetable intercropping system on accumulation of Pb, Cu and Cd in plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2168-2173.
- [27] 江巧君,周 琴,韩亮亮,等.有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻镉吸收和分配的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1):9-14.
JIANG Qiao-jun, ZHOU Qin, HAN Liang-liang, et al. Effects of organic manure on uptake and distribution of cadmium in different rice genotypes under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):9-14.
- [28] 刘大镗,郭明选,高汉清,等.施用生石灰对镉污染酸性土壤中水稻镉积累的影响[J]. *湖南农业科学*, 2016(12):24-26.
LIU Da-er, GUO Ming-xuan, GAO Han-qing, et al. Effects of lime application on cadmium accumulation of rice in acidic Cd-contaminated paddy soils[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016(12):24-26.
- [29] 李俊莉,宋华明.土壤理化性质对重金属行为的影响分析[J]. *环境科学动态*, 2003(1):24-26.
LI Jun-li, SONG Hua-ming. Effect of soil physical and chemical properties on heavy metal pollution[J]. *Environmental Science Trends*, 2003(1):24-26.
- [30] Huang J H, Wang S L, Lin J H, et al. Dynamics of cadmium concentration in contaminated rice paddy soils with submerging time[J]. *Pad-dy & Water Environment*, 2013, 11(1/2/3/4):483-491.
- [31] 李义纯,葛 滢.淹水土壤中镉活性变化及其制约机理[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4):840-846.
LI Yi-chun, GE Ying. Variation of cadmium activity in flooded soils and its controlling mechanisms[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4):840-846.
- [32] Chanmugathas P, Bollag J M. Microbial mobilization of cadmium in soil under aerobic and anaerobic conditions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1987, 16(2):161-167.
- [33] 茹淑华,苏德纯,王激清,等.积累Cd油菜吸收Cd潜力及其根分泌物对土壤Cd的活化[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(1):17-21.
RU Shu-hua, SU De-chun, WANG Ji-qing, et al. Uptake of cadmium by oilseed rape Xikou Huazi (*Brassica juncea* L.) and bioavailability of the metal in rhizosphere[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):17-21.
- [34] Lin Q, Chen Y X, Chen H M, et al. Chemical behavior of Cd in rice rhizosphere[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(6):755-761.