

吴家梅, 谢运河, 田发祥, 等. 双季稻区镉污染稻田水稻改制玉米轮作对镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 502–509.

WU Jia-mei, XIE Yun-he, TIAN Fa-xiang, et al. Effects of rice and corn rotation on cadmium uptake in double-cropping cadmium-polluted paddy rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 502–509.

双季稻区镉污染稻田水稻改制玉米轮作对镉吸收的影响

吴家梅^{1,2,3}, 谢运河^{1,2}, 田发祥^{1,2}, 官迪^{1,2}, 朱坚^{1,2}, 陈锦^{1,2}, 纪雄辉^{1,2,3*}

(1. 湖南省农业环境生态研究所, 农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125; 2. 农田土壤重金属污染防控与修复湖南省重点实验室, 长沙 410125; 3. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410125)

摘要:为研究低镉(Cd)污染(Cd为 $0.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)稻田改制的农产品安全利用技术,通过双季稻区早-晚稻轮作,玉米-玉米轮作、水稻-玉米轮作和玉米-水稻轮作试验,研究不同轮作制度下土壤有效Cd、作物不同器官Cd含量,Cd富集系数、转移系数和土壤养分的变化。结果表明:不同轮作制度下,水稻根、茎叶和稻米中Cd的平均含量分别为 3.66 、 $1.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;玉米根、茎叶和籽粒中Cd的含量分别为 0.50 、 $0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;水稻根系、茎叶和籽粒的富集系数平均分别为 11.96 、 4.27 和 1.19 ,玉米的分别为 1.73 、 0.50 和 0.13 ;水稻的根系向茎叶和茎叶向籽粒转运的转运系数分别为 0.36 和 0.28 ,玉米的为 0.24 和 0.20 ;晚稻籽粒Cd含量高于早稻,秋玉米Cd含量高于春玉米;土壤中的碱解氮、有效磷和速效钾不影响作物对Cd的吸收;种植玉米比同季水稻略有增产。研究表明,在Cd轻度污染地区,晚稻改种玉米能保障粮食作物安全,是一种值得推荐的种植制度。

关键词:土壤镉污染;水旱轮作;富集;转运

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)03-0502-08 doi:10.11654/jaes.2018-0707

Effects of rice and corn rotation on cadmium uptake in double-cropping cadmium-polluted paddy rice fields

WU Jia-mei^{1,2,3}, XIE Yun-he^{1,2}, TIAN Fa-xiang^{1,2}, GUAN Di^{1,2}, ZHU Jian^{1,2}, CHEN Jin^{1,2}, JI Xiong-hui^{1,2,3*}

(1. Institute of Agro-Environment and Ecology, Hunan Province, Key Laboratory of Agro-Environment in Midstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Changsha 410125, China; 2. Key Lab of Prevention, Control and Remediation of Soil Heavy Metal Pollution in Hunan Province, Changsha 410125, China; 3. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410125, China)

Abstract: In this study, we examined the effects of rice and corn rotation on soil effective cadmium (Cd) levels, Cd levels in various parts of rice and corn, and coefficients of accumulation and transfer in lightly Cd-polluted ($0.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) double-cropping paddy rice fields. The results showed that the average content of Cd in rice roots, stems and leaves, and grains was 3.66 , $1.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and $0.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively; the content of Cd in corn roots, stems and leaves, and grains was 0.50 , $0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and $0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively; the average bio-accumulation coefficients corresponding to rice roots, stems and leaves, and grains were 11.96 , 4.27 , and 1.19 , and those in corn were 1.73 , 0.50 , and 0.13 , respectively; the transfer coefficients from rice roots to the stems and leaves and from the stems and leaves to grains were 0.36 and 0.28 , whereas those in corn were 0.24 and 0.20 , respectively; the content of Cd in late rice grains was higher than that in early rice grains, and the content of Cd in autumn corn grains was higher than that in spring corn grain; the alkali hydrolysable nitrogen, available phosphorus, and rapid-acting potassium in the soil had no effects on Cd uptake by crops; and the planted corn was slightly more productive than rice during the same season. In summary, planting corn instead of later rice replanting may ensure safer crop grains in lightly Cd-polluted double-cropping paddy rice fields. This rotation can be considered a recommendable planting system.

Keywords: soil cadmium pollution; water and drought rotation; bio-accumulation; translocation

收稿日期:2018-05-29 录用日期:2018-08-08

作者简介:吴家梅(1977—),女,湖南澧县人,博士,从事农田重金属风险评估及修复研究。E-mail:waloe@163.com

*通信作者:纪雄辉 E-mail:1546861600@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801504);湖南省自然科学基金项目(2017JJ2146)

Project supported: The National Key Research and Development Plan of China (2017YFD0801504); The Natural Science Foundation of Hunan Province (2017JJ2146)

近年来,我国的粮食作物遭大面积污染,重金属污染事件频发,农田污染对农产品质量造成严重隐患,我国每年因重金属污染而造成的粮食损失在200亿元以上^[1]。当前,我国土壤重金属污染点位超标以镉(Cd)最为严重,其Cd的点位超标率达7.0%。我国重金属Cd污染以中轻度污染为主,近几年统计Cd污染农田面积达 $2.80 \times 10^5 \text{ hm}^2$,Cd超标农产品数量每年超过150万t^[2]。因此,研究Cd污染农田的安全利用技术十分必要。

水稻是我国第一大粮食作物^[3],作为全国近三分之二人口主食的稻米,其质量安全直接关系到国民健康和社会安定,频发的农田Cd污染及稻米Cd超标问题,已经成为研究的热点。国内外对Cd污染的研究主要集中在土壤污染治理、Cd污染对植物的影响以及植物修复等方面。在中轻度污染地区,为保证粮食安全和不带入新的污染物,水稻生产一般采取选用低Cd吸收品种^[4-5]、水分管理^[6]和施用石灰提高酸性稻田土壤pH值等方法^[7-8]降低稻米Cd含量,但这在农业生产中具有一定的局限性,例如水稻品种对重金属的吸收和积累受基因型与环境因子共同影响^[5],田间的水分管理受降雨和田间水分现状影响,施石灰由于石灰粉末操作性不强,田间很难执行到位等因素的影响,致使降低稻米Cd的效果受到抑制。因此在污染农田上选用适合农业生产实际的安全利用技术尤为重要。

水旱轮作系统是我国主要的作物生产系统之一,主要分布在长江流域^[9]。稻田实行水旱轮作,土壤团粒结构和非毛管孔隙增加^[10-11],氧化还原电位提高^[12],病害发生减轻或者受到抑制^[13],杂草生长被抑制^[12]。湖南省双季稻田改制不仅能解决稻谷过剩、早粮短缺的结构性矛盾,同时也能提高稻田综合生产效应并增加农民收入^[14-15]。近几年,湖南省针对重度污染稻田进行农作物的结构调整,其中稻田改制玉米也是农业产业结构调整的一个重要内容^[15]。有研究表明Cd含量为 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的稻田种植的水稻籽粒存在Cd污染风险,但改制玉米后,玉米籽粒无Cd污染风险^[15],此稻田改制方式是否适合低Cd污染稻田还值得进一步探索。因此研究水旱轮作下的农产品质量安全,以期对双季稻田低Cd污染的安全利用耕作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验地位于湖南省长沙县黄花镇回龙湖的水稻

种植基地($28^{\circ}18'13.4''\text{N}$, $113^{\circ}07'23.6''\text{E}$),该地区年平均温度 17.1°C ,年降水量1500 mm,年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $5300\sim 6500^{\circ}\text{C}$,为南方典型的水稻生产区。土壤类型为第四纪红土发育的红黄泥(亚类:水稻土,土属:红黄泥)。土壤理化性质:土壤pH值5.1、有机质 $29.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $2.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $154.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $15.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、土壤全Cd $0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计和田间管理

试验于2015—2016年开展,共4个处理,每个处理3次重复,采用单因素随机区组设计。试验处理分别为:(1)早稻—晚稻(R-R),早晚两季均种植水稻;(2)早稻—秋玉米(R-C),早稻季种植早稻,晚稻季种植玉米;(3)春玉米—秋玉米(C-C),早晚两季均种植玉米;(4)春玉米—晚稻(C-R),早稻季种植玉米,晚稻季种植水稻。

水稻试验采用田间小区试验,每小区面积 32 m^2 。N、P、K施用量早稻分别为 $\text{N } 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,晚稻分别为 $\text{N } 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,N、P、K肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾。所有肥料全部作基肥于水稻移栽前1 d施入稻田。所有的玉米处理均施入 $15\text{--}15\text{--}15(\text{N--P}_2\text{O}_5\text{--K}_2\text{O})$ 的复合肥 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和尿素 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中复合肥于玉米移栽前1 d施入,尿素于苗期和大喇叭口期施入。

在作物生长季,为了避免小区相互串水,小区田埂采用薄膜覆盖。早晚稻品种分别为湘早籼45号和H优519,春播和夏播玉米品种均为洛玉1号。2015年早稻于4月15日移栽,7月9日收获,晚稻于7月18日移栽,10月26日收获。2015年春玉米于4月28日移栽,7月18日收获,秋玉米于8月7日移栽,10月26日收获。2016年早稻于4月13日移栽,7月20日收获,晚稻于7月26日移栽,10月26日收获。2016年春玉米于4月15日移栽,7月16日收获,秋玉米于7月26日移栽,10月26日收获。由于早晚稻与玉米混种,除降雨外,仅水稻移栽时灌溉,其他时期无灌溉水,整个水稻生产中小区的水分管理保持一致。水稻田在移栽至分蘖盛期有田面水,其他时期水稻田表面无水。玉米在出苗前和出苗后各浇灌一次,除降雨外,其他时期无灌溉,整个生育期间玉米地表面无水。生产中病虫害防治与当地习惯保持一致。2015—2016年作物生育期降雨变化趋势见图1。

1.3 样品采集与测定

土壤和植物样品于作物收获时取样。土壤取样

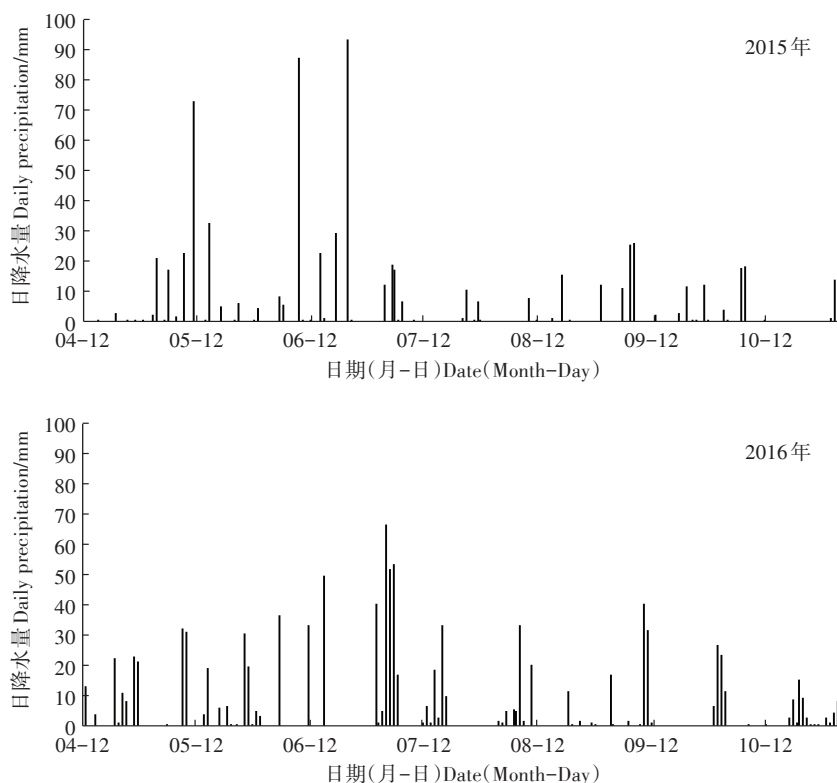


图1 2015—2016年作物生育期降水日变化

Figure 1 Daily variation of precipitation in 2015—2016 at research station

深度为0~15 cm,土样经自然风干,剔除杂物后,研磨,分别过2 mm和0.149 mm尼龙筛,充分混匀,备用。植物样品经过105℃杀青30 min,80℃烘干,分离根、茎叶和籽粒(舍去颖壳)。

土壤pH值采用电位法测定^[16],土壤碱解氮采用扩散法测定^[16],有效磷采用氟化铵盐酸浸提-分光光度法测定^[16],土壤速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定^[16],土壤有效Cd采用氯化钙浸提^[17],电感耦合等离子体质谱仪(Thermo Fisher有限公司)测定,植物Cd含量采用硝酸双氧水消解^[18],电感耦合等离子体质谱仪测定。

1.4 水稻Cd生物富集和转移系数

植物对重金属的生物富集系数(BCF)是指植物体某一重金属含量与相应的土壤重金属含量的比值,在一定程度上反映了沉积物或土壤中重金属向植物体内迁移的难易程度,表示重金属在植物体内的富集情况。植物对重金属的转移系数(TF)是指植物转移器官中后者重金属的含量与前者重金属含量的比值,是描述重金属在生物体内转移能力的重要指标。

作物对Cd的根系富集系数^[19] $BCF_{root}=C_{root}/C_{soil}$

作物对Cd的茎叶富集系数^[19] $BCF_{stem}=C_{stem}/C_{soil}$

作物对Cd的籽粒富集系数^[19] $BCF_{grain}=C_{grain}/C_{soil}$

茎叶对Cd的转移系数^[20] $TF_{stem}=C_{stem}/C_{root}$

籽粒对Cd的转移系数^[20] $TF_{grain}=C_{grain}/C_{stem}$

式中: C_{root} 、 C_{stem} 、 C_{grain} 和 C_{soil} 分别表示作物根、茎叶、籽粒和土壤的Cd含量, $mg \cdot kg^{-1}$ 。

1.5 数据处理与分析

所有试验数据采用Microsoft Excel 2010和SPSS 13.0软件进行处理和统计分析,多重比较的显著性检验均采用LSD法。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式土壤有效Cd含量

连续2年早稻季节(R-R和R-C处理中的早稻,下同)稻田土壤有效Cd平均含量分别为 $0.14 mg \cdot kg^{-1}$ 和 $0.15 mg \cdot kg^{-1}$,晚稻季节(R-R和C-R处理中的晚稻,下同)分别为 $0.15 mg \cdot kg^{-1}$ 和 $0.16 mg \cdot kg^{-1}$ 。连续2年春玉米(C-C和C-R处理中的春玉米,下同)土壤有效Cd平均含量均为 $0.16 mg \cdot kg^{-1}$,秋玉米(C-C和C-R处理中的秋玉米,下同)土壤均为 $0.18 mg \cdot kg^{-1}$ 。可见,种植晚稻和秋玉米土壤有效Cd平均含量分别比早稻季节种植相同作物的土壤高6.9%和12.5%。

早稻季节(表1):土壤有效Cd为0.13~0.17 mg·kg⁻¹;2015年春玉米土壤有效Cd含量明显高于水稻处理;2016年C-C的春玉米土壤有效Cd含量明显高于R-R处理,R-R处理的早稻土壤有效Cd含量最低。

晚稻季节(表1):土壤有效Cd为0.15~0.20 mg·kg⁻¹,2015年C-C处理的秋玉米土壤有效Cd含量明显高于同季种植水稻处理,晚稻土壤有效Cd含量低于秋玉米处理;2016年C-C处理秋玉米的土壤有效Cd含量明显高于其他处理。

同一年份的土壤有效Cd含量变化不大,不同年份同一处理的2015年土壤有效Cd含量比2016年略低。

2.2 不同种植模式的植株Cd含量

不同作物器官中的Cd含量不同(图2)。水稻不同器官中Cd含量高于玉米,早、晚季节的水稻根、茎叶和籽粒中Cd的平均含量分别为3.66、1.30 mg·kg⁻¹和0.36 mg·kg⁻¹,春、秋玉米的根、茎叶和籽粒中Cd平

均含量分别为0.50、0.12 mg·kg⁻¹和0.03 mg·kg⁻¹。水稻根、茎叶和籽粒中的Cd含量分别是玉米相同部位的7.3、10.8倍和12.0倍。水稻根系的Cd含量分别是茎叶和籽粒的2.8倍和10.2倍,玉米根系中的Cd含量分别是茎叶和籽粒的4.2倍和16.7倍。

不同季节,晚稻各器官的Cd含量高于早稻,晚稻根、茎叶和籽粒中的Cd含量分别比早稻相同器官平均增加7.5%、26.1%和4.9%。秋玉米各器官中Cd的含量也高于春玉米,秋玉米根、茎叶和籽粒中Cd含量分别比春玉米高9.3%、100.3%和417.6%。

同一季节,种植相同作物的植株根、茎叶和籽粒Cd含量差别不大。不同年份间,2016年的水稻根、茎叶和籽粒Cd含量分别比2015年高0.87、0.17 mg·kg⁻¹和0.04 mg·kg⁻¹,2016年玉米的根、茎叶和籽粒Cd含量分别比2015年玉米高0.02、0.09 mg·kg⁻¹和0.03 mg·kg⁻¹。

2.3 土壤养分状况

土壤的pH值在4.83~5.45之间(表2),其中R-R处理最高,C-C处理显著低于R-R处理。不同轮作处理碱解氮含量为131.24~147.12 mg·kg⁻¹,同一年不同处理间无显著性差异,同一年种植不同作物的碱解氮差异不大。土壤有效磷含量以C-C处理最高,其次为R-C和C-R处理,R-R处理最低,两年C-C处理的土壤有效磷分别比R-R处理高136.5%($P<0.05$)和380.9%($P<0.05$)。2015年和2016年土壤速效钾分别为130.62~135.45 mg·kg⁻¹和120.30~170.28 mg·kg⁻¹,2015年土壤速效钾间无显著性差异,2016年土壤速效钾R-C、C-C处理明显高于R-R和C-R处理($P<0.05$)。

表1 土壤有效Cd含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 The content of available cadmium in soil(mg·kg⁻¹)

处理 Treatments	2015		2016	
	早稻季节 Early rice season	晚稻季节 Late rice season	早稻季节 Early rice season	晚稻季节 Late rice season
R-R	0.13±0.00b	0.15±0.01b	0.14±0.01b	0.16±0.01b
R-C	0.14±0.01b	0.17±0.01ab	0.15±0.01ab	0.17±0.00b
C-C	0.16±0.01a	0.19±0.02a	0.17±0.00a	0.20±0.01a
C-R	0.17±0.01a	0.15±0.02b	0.16±0.01ab	0.16±0.01b

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Values followed by different small letters are significantly difference among different treatments at $P<0.05$. The same below.

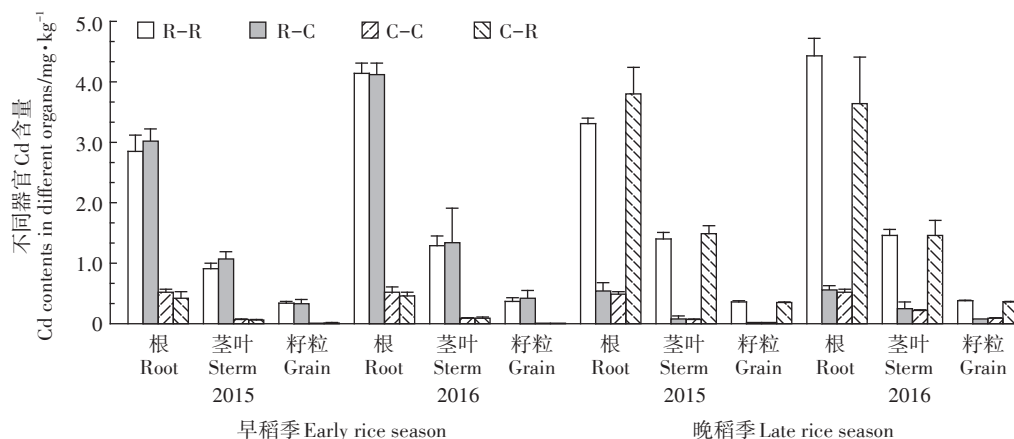


图2 不同器官Cd的含量

Figure 2 The content of cadmium in plant in different organs

2.4 富集系数和转移系数

由表3可见,水稻(R-R、R-C和C-R中的早稻、晚稻,下同) BCF_{root} 、 BCF_{stem} 和 BCF_{grain} 分别为9.83~14.56、3.14~5.18和1.08~1.33,玉米(R-C、C-C和C-R中的春玉米、秋玉米,下同) BCF_{root} 、 BCF_{stem} 和 BCF_{grain} 分别为1.31~1.78、0.18~0.79和0.03~0.26。同一年份,不同处理,水稻各器官的富集系数均明显高于玉米。水稻的 BCF_{root} 、 BCF_{stem} 和 BCF_{grain} 分别是玉米的5.5~11.1、4.0~28.8倍和4.1~44.3倍。同一处理,水稻和玉米的富集系数均表现为 $BCF_{root}>BCF_{stem}>BCF_{grain}$ 。

水稻和玉米的 TF_{stem} 为0.31~0.42和0.14~0.38(表4)。2016年早稻季节的早稻 TF_{stem} 显著高于春玉米处理。2015年早稻季节R-C的 TF_{stem} 比C-C高77.8%($P<0.05$),其他处理的 TF_{stem} 间无显著性差异。2015年晚稻季节C-R稻处理的 TF_{stem} 显著高于R-C处理,2016年晚稻季节种植水稻的 TF_{stem} 显著高于玉米。

水稻和玉米的 TF_{grain} 为0.23~0.38和0.10~0.37(表4)。2015、2016年早稻的 TF_{grain} 显著高于春玉米,晚稻季节不同处理的 TF_{grain} 无显著性差异。

不同季节同一处理均为 $TF_{stem}>TF_{grain}$ 。

2.5 养分与作物Cd的关系

水稻根、茎叶和籽粒与土壤有效Cd呈显著正相关关系,其相关系数分别为0.576($P<0.01$)、0.438($P<0.05$)和0.481($P<0.05$)。

农作物收获后土壤碱解氮、速效磷和有效钾与作物体内的Cd含量并无相关性,可见,水旱轮作中,同一种作物施肥量相同,土壤中的速效养分不影响作物对Cd的吸收。

2.6 作物产量

水稻和玉米的产量为5808~6682 kg·hm⁻²和6082~6875 kg·hm⁻²(表5)。2015年和2016年早稻季节不同作物的产量无显著性差异;2015年晚稻季节

表2 不同处理土壤养分状况

Table 2 Soil nutrients of different treatments

处理 Treatments	pH		碱解氮 The alkali hydrolysable nitrogen/mg·kg ⁻¹		有效磷 Available phosphorus/mg·kg ⁻¹		速效钾 Quick acting potassium/mg·kg ⁻¹	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
R-R	5.45±0.06a	5.45±0.11a	131.24±3.61a	143.30±17.14a	13.51±0.53b	10.76±0.62b	135.45±18.32a	130.12±16.99b
R-C	5.22±0.19ab	5.17±0.10b	134.87±8.87a	132.80±6.76a	20.00±3.29b	41.82±3.72a	130.62±4.07a	170.28±7.63a
C-C	5.14±0.10b	4.83±0.03c	142.53±20.93a	137.34±2.55a	31.95±9.65a	51.74±13.32a	134.78±21.26a	168.61±2.88a
C-R	5.30±0.15ab	5.27±0.07b	133.58±0.22a	147.12±8.95a	19.18±6.37b	19.13±3.00b	131.45±4.04a	120.30±19.29b

表3 不同处理Cd富集系数比较

Table 3 Compare of Cd bio-accumulation coefficient in different treatments

处理 Treatments	2015年早稻季节 Early rice season in 2015			2015年晚稻季节 Late rice season in 2015			2016年早稻季节 Early rice season in 2016			2016年晚稻季节 Late rice season in 2016		
	BCF_{root}	BCF_{stem}	BCF_{grain}	BCF_{root}	BCF_{stem}	BCF_{grain}	BCF_{root}	BCF_{stem}	BCF_{grain}	BCF_{root}	BCF_{stem}	BCF_{grain}
R-R	12.59±0.52a	3.92±0.48a	1.11±0.19a	14.56±0.96a	4.78±0.33a	1.24±0.04a	9.83±0.93a	3.14±0.31a	1.18±0.09a	12.24±0.33a	5.18±0.42a	1.33±0.06a
R-C	12.60±0.58a	4.10±1.75a	1.29±0.38a	1.74±0.22b	0.79±0.34b	0.26±0b	9.93±0.66a	3.51±0.38a	1.08±0.22a	1.78±0.45b	0.30±0.12b	0.08±0.01b
C-C	1.49±0.26b	0.27±0.02b	0.03±0b	1.51±0.15b	0.66±0.03b	0.25±0.02b	1.54±0.15b	0.22±0.02b	0.03±0.01b	1.46±0.11b	0.22±0.03b	0.04±0.01b
C-R	1.33±0.16b	0.27±0.04b	0.03±0b	11.24±2.38a	4.51±0.79a	1.12±0.02a	1.31±0.34b	0.18±0.03b	0.04±0.03b	12.71±1.47a	4.99±0.44a	1.16±0.04a

表4 不同处理Cd转移系数比较

Table 4 Compare of Cd transfer coefficient in different treatments

处理 Treatments	2015年早稻季节 Early rice season in 2015		2015年晚稻季节 Late rice season in 2015		2016年早稻季节 Early rice season in 2016		2016年晚稻季节 Late rice season in 2016	
	TF_{stem}	TF_{grain}	TF_{stem}	TF_{grain}	TF_{stem}	TF_{grain}	TF_{stem}	TF_{grain}
R-R	0.31±0.04ab	0.29±0.05a	0.33±0.02ab	0.26±0.01a	0.32±0.01a	0.38±0.04a	0.42±0.04a	0.26±0.02a
R-C	0.32±0.13a	0.23±0.01a	0.27±0.15b	0.26±0.21a	0.35±0.04a	0.31±0.03a	0.27±0.09b	0.26±0.06a
C-C	0.18±0.02b	0.11±0.02b	0.38±0.06ab	0.37±0.03a	0.14±0.03b	0.12±0.06b	0.15±0.03b	0.12±0.08a
C-R	0.21±0.06ab	0.10±0b	0.41±0.10a	0.25±0.04a	0.14±0.03b	0.11±0.06b	0.39±0.01a	0.23±0.01a

表5 不同处理的作物产量(kg·hm⁻²)Table 5 Crop yield of different treatments(kg·hm⁻²)

处理 Treatments	2015		2016	
	早稻季节 Early rice season	晚稻季节 Late rice season	早稻季节 Early rice season	晚稻季节 Late season rice
R-R	5808±591a	6240±203b	5781±596a	5922±199b
R-C	6145±301a	6705±294a	6240±226a	6625±869ab
C-C	6094±1094a	6564±270ab	6647±114a	6875±344a
C-R	6146±992a	6682±822ab	6082±589a	6315±688ab

以R-C最高,比R-R处理的产量增加7.4%($P<0.05$);2016年晚稻处理以C-C最高,比R-R处理产量增加16.1%。2年2季作物总产量均以R-R最低。

3 讨论

3.1 作物吸收的Cd

早晚稻中,晚稻各器官中Cd的含量均高于早稻。不同研究者^[18,21]发现晚稻籽粒中Cd含量高于早稻籽粒,可能的原因是一般早稻季节降雨量和降雨频次大于晚稻,本研究中,两年的降雨也如此(图1),这致使早稻季节土壤中的水分和淹水时间高于晚稻季节。土壤中的水分状况影响Cd的形态转化,主要是在淹水条件下,Cd与硫生成硫化镉而降低Cd的有效性^[22-23],致使早稻土壤的有效Cd减少,并减少了向籽粒的转移,因而早稻籽粒Cd含量低于晚稻。

水稻和玉米不同器官Cd含量均是根系高于茎叶高于稻米,与其他研究结果相同^[24-25]。水稻各器官中的Cd含量均高于玉米,其根、茎叶和稻米分别是玉米的7.3~12.0倍,早、晚稻根系的富集系数达12.0,是玉米富集系数的6.9倍,可见同一栽培和管理措施下,玉米对Cd的吸收能力小于水稻。水稻是相对高累积Cd的农作物^[26],相同的栽培条件和管理措施下,水稻吸Cd能力高于玉米,容易造成轻度污染土壤上的水稻稻米Cd含量超过食品安全国家标准^[27]的食品中污染物限量,而玉米籽粒Cd含量低于国家饲料卫生指标^[28]规定的最低限量和食品安全国家标准^[27]。由于晚稻籽粒Cd含量高于早稻,因此,为保障双季稻区低Cd污染农田的粮食安全,建议采用早稻-秋玉米的种植模式,但种植早稻需要采用Cd污染农田防控措施,以保证稻米安全生产。

富集系数越高,说明植物体内积累重金属的能力越强。转运系数越高,表示重金属从根转运到地上部位的能力越强^[29]。水稻根、茎叶和籽粒的富集系数均

>1,玉米根系的富集系数>1,说明水稻各器官和玉米根系富集Cd能力强。玉米与水稻富集Cd的能力均为根系>茎叶>籽粒^[30-32]。玉米和水稻的 $TF_{\text{stem}} > TF_{\text{grain}}$,可见水稻和玉米的Cd从根系转运到茎叶的能力大于茎叶转运到籽粒的能力。

3.2 土壤Cd含量、养分状况和作物产量

土壤有效Cd与玉米籽粒、水稻根、水稻茎叶和水稻籽粒呈显著正相关关系,与前人研究结果保持一致^[34-35]。不同养分与植物吸收Cd含量无显著性差异,可见在本实验条件下,土壤中的碱解氮、有效磷和速效钾不影响作物对Cd的吸收。

4 结论

水稻和玉米不同器官对Cd的累积规律为根系>茎叶>籽粒。水稻根、茎叶和籽粒吸收的Cd含量分别是玉米相同器官的7.3、10.8倍和12.0倍。水稻根系的富集吸收明显高于玉米。

水稻和玉米各器官的富集系数均为 $BCF_{\text{root}} > BCF_{\text{stem}} > BCF_{\text{grain}}$ 。水稻各器官的富集系数高于玉米。同一处理各器官的转移系数均为 $TF_{\text{stem}} > TF_{\text{grain}}$ 。

水旱轮作土壤中的稻田和玉米土壤有效Cd与作物籽粒呈显著相关关系。农田土壤中的碱解氮、有效磷和速效钾含量不影响作物对Cd的吸收。

早、晚稻季节种植玉米分别比种植水稻增产4.2%和6.4%。稻田改种玉米不同轮作制中,为保持一定的水稻面积和粮食作物产量,在双季稻区晚稻改种玉米,早稻采取措施降低稻米Cd的吸收,有利于粮食作物的安全生产。

致谢:感谢黄曦老师对文章英文摘要的修改。

参考文献:

- [1] 龚继明. 重金属污染的缓与急[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5):567-568.
GONG Ji-ming. Immediate and long-term concerns on heavy metal pollution[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5):567-568.
- [2] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 V. 镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全[J]. 土壤学报, 2010, 47(4):628-638.
ZHANG Hong-zhen, LUO Yong-ming, ZHANG Hai-bo, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards V. Modeling of cadmium uptake in soil-crop systems for human food safety in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4):628-638.
- [3] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7):1257-1263.

- ZHAN Jie, WEI Shu-he, NIU Rong-cheng. Advances of cadmium contaminated paddy soil research and new measure of its safe production in China: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1257-1263.
- [4] 腾振宁, 张玉烛, 方宝华, 等. 秩次分析法在低镉水稻品种筛选中的应用[J]. 中国稻米, 2017, 23(2): 21-26.
- TENG Zhen-ning, ZHANG Yu-zhu, FANG Bao-hua, et al. Rank analysis method utilization on screening low cadmium rice varieties[J]. *China Rice*, 2017, 23(2): 21-26.
- [5] 张玉烛, 方宝华, 腾振宁, 等. 应急性镉低积累水稻品种筛选与验证[J]. 湖南农业科学, 2017(12): 19-25.
- ZHANG Yu-zhu, FANG Bao-hua, TENG Zhen-ning, et al. Screening and verification of rice varieties with low cadmium accumulation[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(12): 19-25.
- [6] Honma T, Ohba H, Kaneko A, et al. Effects of soil amendments on arsenic and cadmium uptake by rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Koshihikari) under different water management practices[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 62(4): 349-356.
- [7] Tang X, Li Q, Wu M, et al. Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 646-662.
- [8] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 514-519.
- DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, CAO Ying-fei, et al. Effects of lime and organic amendments on Cd availability in Cd-contaminated soils with different properties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 514-519.
- [9] 范明生, 江荣凤, 张福锁, 等. 水旱轮作系统作物养分管理策略[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 424-432.
- FAN Ming-sheng, JIANG Rong-feng, ZHANG Fu-suo, et al. Nutrient management strategy of paddy rice upland crop rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 424-432.
- [10] Mousavi S F, Yousefi-Moghadam S, Mostafazadeh-Fard B, et al. Effect of puddling intensity on physical properties of a silty clay soil under laboratory and field conditions[J]. *Paddy & Water Environment*, 2009, 7(1): 45-54.
- [11] Motschenbacher J, Brye K R, Anders M M. Long-term rice-based cropping system effects on near-surface soil compaction[J]. *Agricultural Sciences*, 2011, 2(2): 117-124.
- [12] Zheng H, Huang H, Zhang C, et al. National-scale paddy-upland rotation in northern China promotes sustainable development of cultivated land[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 170: 20-25.
- [13] Fujisaka S, Harrington L, Hobbs P. Rice-wheat in south Asia: Systems and long-term priorities established through diagnostic research[J]. *Agricultural Systems*, 1994, 46(2): 169-187.
- [14] 钟武云. 湖南稻田耕作制度改革的形式与对策[J]. 作物研究, 2003, 17(3): 114-116.
- ZHONG Wu-yun. The situation and countermeasures of the reform of the rice field farming system in Hunan Province[J]. *Crop Research*, 2003, 17(3): 114-116.
- [15] 谢运河, 纪雄辉, 彭 华, 等. 镉污染稻田改制玉米的农产品质量安全研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 658-662.
- XIE Yun-he, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Agricultural product quality safety of conversion from double rice to rice/maize in a Cd polluted paddy field[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(5): 658-662.
- [16] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] 熊 婕, 朱奇宏, 黄道友, 等. 南方稻田土壤有效态镉提取方法研究[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(1): 170-177.
- XIONG Jie, ZHU Qi-hong, HUANG Dao-you, et al. Comparison of single extraction methods for assessing Cd availability in paddy soils in south China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(1): 170-177.
- [18] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品中镉的测定方法 GB/T 5009.15—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health Commission of the PRC, Standardization Administration of the PRC. Determination of cadmium in foods GB/T 5009.15—2003[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [19] Varalakshmi L R, Ganeshamoorthy A N. Phytotoxicity of cadmium in radish and its effects on growth, yield, and cadmium uptake[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(9): 1444-1563.
- [20] Zheng R L, Li H F, Jiang R F, et al. Cadmium accumulation in the edible parts of different cultivars of radish, *Raphanus sativus* L., and carrot, *Daucus carota* var. sativa, grown in a Cd-contaminated soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 81(1): 75-79.
- [21] Liu Z, Liu Y, Zhang C, et al. Effects of growing seasons and genotypes on the accumulation of cadmium and mineral nutrients in rice grown in cadmium contaminated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1282-1288.
- [22] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 水分管理模式对水稻吸收累积镉的影响及其作用机理[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 908-914.
- LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects and action mechanisms of different water management modes on rice Cd absorption and accumulation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 908-914.
- [23] Hu P, Ouyang Y, Wu L, et al. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 27: 225-231.
- [24] 封文利, 郭朝晖, 石 磊, 等. 控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉积累的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 399-405.
- FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, et al. Distribution and accumulation of cadmium in paddy soil and rice affected by pollutant sources control and improvement measures[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 399-405.
- [25] 任秀娟, 朱东海, 吴海卿, 等. 镉铅单一及复合胁迫对玉米干物质及镉铅吸收的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(12): 29-32.
- REN Xiu-juan, ZHU Dong-hai, WU Hai-qing, et al. Effects of cad-

- mium, lead and their combination pollution on biological yield and absorption characteristics of maize[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(12):29-32.
- [26] 邵国胜, Muhammad Jaffar Hassan, 章秀福, 等. 镉胁迫对不同水稻基因型植株生长和抗氧化酶系统的影响[J]. *中国水稻科学*, 2004, 18(3):239-244.
- SHAO Guo-sheng, Muhammad Jaffar Hassan, ZHANG Xiu-fu, et al. Effects of cadmium stress on plant growth and antioxidative enzyme system in different rice genotypes[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(3):239-244.
- [27] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品中污染物限量 GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- China National Health and Family Planning Commission, China Food and Drug Administration. The limit of pollutants in food safety national standard food GB 2762—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [28] 中华人民共和国国家质量检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 饲料卫生标准 GB 13078—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of the PRC. Hygienical standard for feeds GB 13078—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [29] 吴传星. 不同玉米品种对重金属吸收累积特性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2010.
- WU Chuan-xing. Study on characteristics of heavy metal absorption and accumulation in the different maize varieties[D]. Chengdu: Si Chuan Agricultural University, 2010.
- [30] 蔡秋玲, 林大松, 王 果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(6):1028-1033.
- CAI Qiu-ling, LIN Da-song, WANG Guo, et al. Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1028-1033.
- [31] 辛艳卫. 不同玉米品种对镉的吸收和转运差异性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- XIN Yan-wei. Uptake and translocation of cadmium in different maize cultivars[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [32] 梁彦秋, 关 杨, 张显龙. 玉米对镉的累积特性及镉的存在形态研究[J]. *安徽农业科学*, 2011(30):18569-18570.
- LIANG Yan-qiu, GUAN Yang, ZHANG Xian-long. Cd absorption and speciation in different parts of maize[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011(30):18569-18570.
- [33] 周金林, 郭望模, 许 萍, 等. 稻米硒、镉元素含量的影响因素及调控技术研究[J]. *湖南农业科学*, 2010(5):59-61.
- ZHOU Jin-Lin, GUO Wang-mo, XU Ping, et al. Affecting factors and regulating techniques for contents of selenium and cadmium in rice [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010(5):59-61.
- [34] 秦鱼生, 詹绍军, 喻 华, 等. 镉在不同质地水稻土剖面中的分布特征及与作物吸收的关系[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(2):476-480.
- QIN Yu-sheng, ZHAN Shao-jun, YU Hua, et al. Distribution characteristics of soil cadmium in different textured paddy soil profiles and its relevance with cadmium uptake by crops[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(2):476-480.
- [35] 黄 宇, 廖 敏, 叶照金, 等. 两种低镉积累水稻镉含量与土壤镉的剂量-效应关系及调控[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(8):748-754.
- HUANG Yu, LIAO Min, YE Zhao-jin, et al. Cd concentrations in two low Cd accumulation varieties of rice and their relationships with soil Cd content and their regulation under field conditions[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(8):748-754.