

长期秸秆还田和地下水位对土壤镉积累及有效性的影响

吴佳琪, 黄运湘, 尹力初, 梁玉文, 黄玲, 向艳艳, 施强

引用本文:

吴佳琪, 黄运湘, 尹力初, 等. 长期秸秆还田和地下水位对土壤镉积累及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1957–1963.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0486>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

植物修复重金属和抗生素复合污染 土壤微生物数量和酶活性的变化

周显勇, 刘鸿雁, 刘艳萍, 刘青栋, 涂宇, 顾小凤, 吴龙华

农业环境科学学报. 2019, 38(6): 1248–1255 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0029>

典型养鸡场及其周边土壤中抗生素的污染特征和风险评估

涂棋, 徐艳, 李二虎, 师荣光, 郑向群, 耿以工

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 97–107 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0823>

重金属协同选择环境细菌抗生素抗性及其机制研究进展

张佳奇, 徐艳, 罗义, 毛大庆

农业环境科学学报. 2016, 35(3): 409–418 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.03.001>

重金属Pb与抗生素对发光菌的联合毒性研究

李孟涵, 贺子琪, 苗家赫, 王凤贺

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1925–1936 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0103>

陕南茶园产地环境现状及其潜在生态风险评价

赵佐平, 付静, 岳思羽, 王蒙, 宋凤敏, 刘智峰, 汤波, 同延安

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1983–1992 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0266>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴佳琪, 黄运湘, 尹力初, 等. 长期秸秆还田和地下水位对土壤镉积累及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1957–1963.

WU Jia-qi, HUANG Yun-xiang, YIN Li-chu, et al. Effect of long-term straw returning and groundwater level on cadmium accumulation and availability in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 1957–1963.



开放科学 OSID

长期秸秆还田和地下水位对土壤镉积累及有效性的影响

吴佳琪¹, 黄运湘^{1*}, 尹力初¹, 梁玉文¹, 黄玲¹, 向艳艳², 施强¹

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湘西州土壤肥料工作站, 湖南 吉首 416000)

摘要:以1982年开始的长期定位试验为对象,研究了2个地下水位(高水位-20 cm和低水位-80 cm)下3种施肥方式(高量秸秆还田HS、常量秸秆还田MS、化肥CF)对水稻土镉积累及有效性的影响。结果表明:高水位条件下,长期秸秆还田可增加土壤总镉及有效态镉含量,HS和MS处理分别较CF处理提高21.8%、59.9%和9.8%、49.2%。低水位条件下,HS处理土壤总镉及有效态镉含量高于CF处理,较CF处理分别提高11.2%和31.6%;MS处理土壤总镉及有效态镉含量低于CF处理,较CF处理分别下降8.8%和14.3%。2012年,在保证原定位试验有足够重复的前提下,变更高水位条件下的部分试验处理。当HS处理变更为CF处理5 a后,土壤总镉和有效态镉含量分别较变更前下降2.5%和5.7%;CF处理变更为MS处理后,土壤总镉和有效态镉含量分别较变更前增加16.5%和58.9%。相同施肥处理,高水位土壤总镉含量高于低水位土壤。在MS处理下,高水位土壤有效态镉含量也高于低水位土壤,而在HS和CF处理下,低水位土壤有效态镉含量高于高水位土壤。土壤镉含量和土壤基本理化性质的相关分析表明,土壤总镉与土壤有机质、络合态铁含量极显著正相关,与pH显著负相关;土壤有效态镉与土壤pH、游离氧化铁极显著负相关。研究表明,施肥方式和地下水位是通过改变土壤的基本性质影响土壤镉的积累及其有效形态。

关键词:秸秆还田;地下水位;总镉;有效态镉;水稻土

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2020)09-1957-07 **doi:**10.11654/jaes.2020-0486

Effect of long-term straw returning and groundwater level on cadmium accumulation and availability in soils

WU Jia-qi¹, HUANG Yun-xiang^{1*}, YIN Li-chu¹, LIANG Yu-wen¹, HUANG Ling¹, XIANG Yan-yan², SHI Qiang¹

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Xiangxi Station of Soil and Fertilizer, Jishou 416000, China)

Abstract: This study was carried out to better understand the effects of fertilization methods on Cd accumulation and availability in paddy soil in a long-term experiment that began in 1982. Three fertilization methods were investigated—high amount of straw returning (HS), normal amount of straw returning (MS), and chemical fertilizer (CF)—at two groundwater levels—high water level (–20 cm) and low water level (–80 cm). The results showed that, under high water level, long-term straw returning increased the content of total and available Cd in soils. In comparison to CF treatment, HS and MS treatments increased the content of total and available Cd in soils by 21.8% and 59.9%, and 9.8% and 49.2%, respectively. Under low water level, HS treatment had a higher content of total and available Cd than CF treatment and increased them by 11.2% and 31.6%, respectively. MS treatment had a lower content of total and available Cd than CF treatment and decreased them by 8.8% and 14.3%, respectively. In 2012, given the premise of sufficient repetition of the original positioning test, part of the test treatment under the high water level condition was changed. After 5 years of changing HS treatment to CF

收稿日期:2020-04-29 录用日期:2020-07-17

作者简介:吴佳琪(1996—),女,湖南娄底人,硕士研究生,主要从事土壤环境质量评价与调控研究。E-mail: 760805217@qq.com

*通信作者:黄运湘 E-mail: yxhuang63@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41371250)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41371250)

treatment, the content of total and available Cd in soil decreased by 2.5% and 5.7%, respectively; CF treatment was then changed to MS treatment, resulting in an increase in the content of total and available Cd in the soil by 16.5% and 58.9%, respectively. Under the same fertilization treatment, the total Cd content in the high water level was higher than that in the low water level condition. MS treatment caused the available Cd content in the high water level to be higher than that in the low water level condition, while HS and CF treatments caused the available Cd content in the low water level to be higher than that in the high water level condition. Correlation analysis of soil Cd content and the basic physical and chemical properties of the soil showed that the total Cd content in the soil had a significant positive correlation with soil organic matter, while complex iron content had a significant negative correlation with pH value. The available Cd in the soil had a significant negative correlation with soil pH value and free iron oxide. Fertilization and water levels affected the accumulation and chemical speciation of Cd in soil by changing the basic properties of the soil.

Keywords: straw returning; groundwater level; total cadmium; available cadmium; paddy soil

土壤镉来源包括自然源及人为源。由于工业的发展和人类活动的影响,人为源已成为农田土壤镉输入的主要途径,并在一定程度上危害农田生态环境,影响农产品质量安全^[1]。施肥对农田土壤镉含量的影响最早被报道的是含镉化学磷肥^[2-3],随着养殖业饲料中微量营养元素的添加,家畜粪肥、厩肥等对农田土壤重金属含量的影响引起了广泛的关注^[4-6]。茹淑华等^[7]研究表明,连续7 a施用猪粪显著增加0~15 cm土层砷、镉含量,增幅分别在41.74%~46.19%和14.53%~22.09%。近年来,关于秸秆还田对增加土壤镉污染的风险有较多报道^[8-9]。郑顺安等^[10]研究表明,对镉污染农田实施秸秆还田,土壤镉含量较秸秆不还田土壤增加16.25%。潘逸等^[11]研究表明,秸秆还田处理耕层土壤中交换性镉含量较无机肥处理高出43.2%。但也有与之相反的研究结论,即施用秸秆等有机物料可以原位钝化土壤中重金属并降低其在土壤中的活性^[12-14]。水分是影响土壤镉有效性的一个重要因素,有关水管理对土壤镉有效性的影响目前也有较多报道,淹水还原环境可促进土壤有机质的积累和铁的活化,增加有机质和游离氧化铁对镉的吸附,同时导致硫的还原和CdS沉淀的生成,降低镉的有效性,减少作物中镉的积累^[15-16]。我国南方水田土壤因地形部位和排水条件的差异常处于不同的地下水位,高、低地下水位水分状况的差异会影响土壤的基本理化性质,从而影响土壤镉的有效性。目前有关水管理的研究大多以灌溉方式为主要对象^[17],而涉及地下水位的报道甚少。本文依托湖南农业大学资源环境学院37 a的长期定位试验,选取3种施肥方式(高量秸秆还田HS、常量秸秆还田MS、化肥CF)和2个地下水位(-20 cm和-80 cm)的红壤性水稻土,研究长期秸秆还田和不同地下水位对土壤镉积累及有效性的影响,并通过施肥方式的变更进一步探明秸秆

还田对土壤镉积累的响应机制,为农田土壤的施肥管理和安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 长期定位试验概况

1.1.1 试验设计

湖南农业大学资源环境学院长期定位试验始建于1982年,供试土壤为第四纪红色黏土发育的水稻土(定位试验开始前1年将耕型第四纪红土红壤分层填入,然后淹水种稻)。试验占地面积128 m²,由3组双排平行的水泥池组成,半地下式,每排设6个小区,每小区1.44 m²,共计36个小区。组内中间设有水槽控制地下水位在-20 cm(高水位)和-80 cm(低水位),组间及四周设有2 m深的排水沟,试验区四周及顶部围有永久性不锈钢围网。试验设3种施肥方式:高量秸秆还田(HS)、常量秸秆还田(MS)、化肥(CF),各处理重复3~12次。在保证地下水位不变和原有定位试验有足够重复的前提下,2012年变更部分试验处理,将-20 cm地下水位中的12个MS处理变更3个为CF处理(即:常改化),3个为HS处理(即:常改高),6个HS处理中的3个变更为CF处理(即:高改化),6个CF处理中的3个变更成MS处理(即:化改常)。变更施肥方式旨在探讨有机肥对土壤碳固定及团聚体形成的响应机制^[18]。定位试验设计、变更及其分布见图1。

1.1.2 田间管理与施肥方案

每小区施肥量以CF处理为标准,每季施N 150 kg·hm⁻², N:P:K=1:0.5:0.67,化肥N、P、K分别以尿素、氯化钾、过磷酸钙为肥源。试验变更前,所施用秸秆早稻为紫云英,晚稻为水稻秸秆;MS处理有机N为总N量的1/3,HS处理有机N为总N量的2/3。为保持各处理间施肥水平的基本一致,秸秆还田处理N、P、K不足部分用化肥补足^[19]。2012年定位试验变更后,早



图1 长期定位试验设计及分布图

Figure 1 Design and distribution of long-term positioning experiment

稻和晚稻施用的秸秆均变更为玉米秸秆(粉碎并过 10 mm 筛),玉米秸秆的 N、P、K 含量分别为 10.4、5.9、12.6 g·kg⁻¹,MS、HS 处理下每年的秸秆用量分别为 9 600 kg·hm⁻²和 19 200 kg·hm⁻²。近 5 a 来种植的早稻、晚稻品种分别为湘早籼 15 和 VY46。

本文选择 3 种施肥方式(HS、MS、CF)和 2 个地下水位深度(-20、-80 cm),建立二因素多水平试验方案,每处理重复 3 次,共计 18 个处理。变更后的 4 个处理(即:常改高、常改化、高改化、化改常),每处理重复 3 次,共计 12 个处理。

1.2 样品采集与测定方法

1.2.1 样品采集

2018 年晚稻收获后,按五点法采集供试小区耕作层混合土壤样品,采样深度 0~20 cm。土样采回后于室内自然风干,除去砂砾及动、植物残体,分别磨碎过 10 目和 100 目筛,混合均匀后装袋保存。

1.2.2 测定项目与分析方法

土壤总镉含量采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸四酸消化,有效态镉采用 DTPA 溶液浸提,ICP-MS 测定。同时采用空白试验和 GBW08303 国家标准土样进行质量控制。土壤 pH 采用蒸馏水提取(液:土=2.5:1)-电位法测定;阳离子交换量(CEC)采用中性乙酸铵提取-蒸馏定氮法测定;土壤全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定;土壤有机质采用硫酸重铬酸钾外加热-容量法测定;土壤颗粒组成(或<0.002 mm 黏粒含量)采用吸管法测定。土壤游离氧化铁采用 DCB 提取-邻啡罗啉比色法测定;土壤络合态铁采用焦磷酸钠提取-邻啡罗啉比色法测定;土壤非晶质氧化铁采用草酸-草酸铵缓冲液提取-邻啡罗啉比色法^[20]测定。土壤基本理化性状测定参照《土壤农业化学分析方法》^[21]。

1.3 数据处理与统计分析

采用 Excel 2007 对数据进行统计分析,采用 SPSS Statistics 22.0 进行方差分析和 Duncan 多重

比较,检验不同处理间的差异显著性($P<0.05$ 为差异显著)。

2 结果与分析

2.1 长期秸秆还田和地下水位管理土壤总镉及有效态镉含量

由表 1 可知,高水位条件下,连续 37 a 秸秆还田处理土壤总镉及有效态镉含量均高于 CF 处理,分别高出 9.8%~21.8% 和 49.2%~59.9%。其中 HS 处理显著高于 CF 处理,HS 与 MS 处理之间差异不显著。低水位条件下,HS 处理土壤总镉及有效态镉含量分别较 CF 处理升高 11.2% 和 31.6%,其中有效态镉含量差异达显著水平;MS 处理土壤总镉及有效态镉含量分别较 CF 处理下降 8.8% 和 14.3%,但均未达显著差异水平。

表1 长期秸秆还田和地下水位管理土壤总镉及有效态镉含量

Table 1 Total and available cadmium contents in soil of long-term straw returning and groundwater level management			
地下水位 Groundwater levels	施肥处理 Fertilization treatments	总镉 Total Cd/ (mg·kg ⁻¹)	有效态镉 Available Cd/ (mg·kg ⁻¹)
-20 cm (高水位)	HS	0.531±0.012a	0.315±0.023a
	MS	0.479±0.005ab	0.294±0.024ab
	CF	0.436±0.083bc	0.197±0.027c
-80 cm (低水位)	HS	0.455±0.040abc	0.321±0.039a
	MS	0.373±0.023c	0.209±0.018c
	CF	0.409±<0.001bc	0.244±0.031bc
显著性检验(F 值)			
地下水位		9.514**	0.406
施肥		4.137*	12.717**
水位×施肥		1.005	5.913*

注:表中数据为均值±标准误差。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。下同。
Note: The values of table are presented as mean ± standard error. Different small letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different treatments. * $P<0.05$; ** $P<0.01$. The same below.

相同施肥处理,高水位土壤总镉含量均高于低水位土壤,其中MS处理土壤总镉含量高水位显著高于低水位;土壤有效态镉含量HS和CF处理高水位低于低水位,但未达显著差异水平,而MS处理则是高水位显著高于低水位。方差分析结果表明,施肥方式和地下水位均影响土壤总镉及有效态镉含量,施肥方式对土壤总镉含量影响显著,对有效态镉含量影响极显著;地下水位对土壤总镉含量影响极显著,对有效态镉含量影响不显著;地下水位和施肥方式的交互作用对土壤有效态镉含量影响显著,对总镉含量影响不显著。

2.2 试验处理变更对土壤总镉及有效态镉含量的影响

从表2可知,HS和MS变更为CF处理5 a后,土壤总镉和有效态镉含量前者分别降低2.5%和5.7%,后者分别提高1.7%和5.4%,但均未达显著差异水平。MS处理变更为HS处理5 a后,土壤总镉和有效态镉含量分别增加22.3%和29.3%,处理间差异达显著水平。CF处理变更为MS处理后,土壤总镉和有效态镉含量分别增加16.5%和58.9%,有效态镉含量处理间差异显著。从变更前、后土壤总镉和有效态镉含量的变化幅度可知,秸秆还田特别是大量秸秆还田,不仅增加土壤镉的积累,同时提高土壤镉的有效性。降低秸秆施用量,在一定程度上可以控制土壤镉的积累,降低镉的有效性。

2.3 长期秸秆还田和地下水位管理对土壤基本理化性质的影响

从表3可知,长期施用秸秆有机肥,土壤pH较CF处理降低,且低水位条件下差异达显著水平,HS、MS处理土壤pH分别较CF处理降低0.35个和0.24个单位;有机质含量较CF处理升高,HS处理高、低水位条件下均达显著差异水平,MS处理高水位条件下达显著差异水平。高水位条件下,HS、MS处理有机质含量分别较CF处理提高47.9%和46.5%,低水位条件下

表2 试验处理变更前、后土壤总镉及有效态镉含量
Table 2 The contents of total and available cadmium in soil before and after experiment treatment change

处理 Treatments	总镉 Total Cd/(mg·kg ⁻¹)	有效态镉 Available Cd/(mg·kg ⁻¹)
HS	0.531±0.012ab	0.315±0.023b
高改化	0.518±0.001abc	0.297±0.002b
MS	0.479±0.005bc	0.294±0.024b
常改化	0.487±0.024bc	0.310±0.017b
常改高	0.586±0.011a	0.380±0.033a
CF	0.436±0.083c	0.197±0.027c
化改常	0.508±0.033abc	0.313±0.026b

则分别提高45.2%和7.0%。CEC、粉粒含量及铁的结合形态等各处理之间未达显著差异水平。

表4表明,HS、MS处理改为CF处理5 a后,土壤pH较变更前分别升高0.15个和0.18个单位,有机质含量分别下降8.7%和16.5%。游离氧化铁、非晶质氧化铁、络合态铁含量等变化较小。

2.4 土壤总镉和有效态镉含量与土壤理化性质的相关性

从表5可知,土壤总镉与有机质、CEC、黏粒含量、非晶质氧化铁、络合态铁呈正相关关系,其中与有机质、络合态铁呈极显著正相关;与pH、全磷、粉粒含量、游离氧化铁呈负相关关系,其中与pH、粉粒含量呈显著负相关。土壤有效态镉与有机质、CEC、络合态铁呈正相关关系,其中与有机质、CEC呈极显著和显著正相关;与pH、全磷、黏粒、粉粒含量、游离氧化铁、非晶质氧化铁呈负相关关系,其中与pH、游离氧化铁极显著负相关。

3 讨论

秸秆是土壤有机碳的重要来源,也是提升土壤有

表3 长期秸秆还田和地下水位管理土壤基本理化性质

Table 3 The basic physical and chemical properties in soil of long-term straw returning and groundwater level management

水位 Groundwater levels	处理 Treatments	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	粉粒 Silt 0.05~0.002 mm	游离氧化铁 Free iron oxide/ (g·kg ⁻¹)	非晶质氧化铁 Amorphous iron oxide/ (g·kg ⁻¹)	络合态铁 Complex iron/ (g·kg ⁻¹)
-20 cm (高水位)	HS	5.37±0.02c	41.7±2.0a	13.6±0.4a	0.196±0.019b	28.4±0.1ab	3.34±0.10ab	2.18±0.01a
	MS	5.38±0.01c	41.3±0.8a	13.2±0.2a	0.186±0.040b	28.6±0.8ab	3.69±0.02ab	2.14±0.05a
	CF	5.49±0.03bc	28.2±4.2b	12.6±0.1a	0.224±0.082ab	30.7±0.9a	3.86±0.50a	2.04±0.07a
-80 cm (低水位)	HS	5.48±0.11bc	39.2±3.3a	13.0±0.3a	0.337±0.042a	27.1±0.1b	3.20±0.33b	2.08±0.06a
	MS	5.59±0.14b	28.9±3.4b	13.1±0.1a	0.339±2.510a	30.3±0.3a	3.20±0.91b	2.04±0.05a
	CF	5.83±0.05a	27.0±2.4b	12.2±0.3a	0.301±0.032ab	30.5±2.3a	3.26±0.07ab	2.01±0.13a

表4 试验处理变更前、后土壤的基本理化性质

Table 4 The basic physical and chemical properties in soil before and after the change of test treatment

处理 Treatments	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	粉粒 Silt 0.05~0.002 mm	游离氧化铁 Free iron oxide/ (g·kg ⁻¹)	非晶质氧化铁 Amorphous iron oxide/ (g·kg ⁻¹)	络合态铁 Complex iron/ (g·kg ⁻¹)
HS	5.37±0.02c	41.7±2.0a	13.6±0.4a	0.196±0.019ab	28.4±0.1ab	3.34±0.10b	2.18±0.01b
高改化	5.52±0.07ab	33.9±1.8b	13.1±0.1ab	0.154±0.013b	30.8±1.3a	3.41±0.20b	2.07±0.03b
MS	5.38±0.01c	41.3±0.8a	13.2±0.2ab	0.186±0.040b	28.6±0.8ab	3.69±0.02ab	2.14±0.05b
常改化	5.56±0.13a	34.5±0.2b	12.4±0.3c	0.184±0.021b	29.3±1.5ab	4.12±0.40a	2.12±0.03b
常改高	5.38±0.04c	43.5±3.9a	13.7±0.2a	0.157±0.032b	27.5±1.3b	3.81±0.25ab	2.05±0.04b
CF	5.49±0.03abc	28.2±4.2c	12.6±0.1bc	0.224±0.082ab	30.7±0.9a	3.86±0.50ab	2.04±0.07b
化改常	5.39±0.03bc	30.6±0.9bc	13.6±0.4a	0.292±0.062a	30.1±0.5a	3.74±0.21a	2.36±0.15a

表5 土壤理化性质与土壤总镉及有效态镉含量的相关性

Table 5 Correlation analysis of soil physical and chemical properties with soil total and available cadmium contents

处理 Treatments	pH	有机质 Organic matter	CEC	全磷 Total phosphorus	黏粒 Clay	粉粒 Silt	游离氧化铁 Free iron oxide	非晶质氧化铁 Amorphous iron oxide	络合态铁 Complex iron
总镉	-0.417*	0.600**	0.347	-0.109	0.122	-0.402*	-0.335	0.337	0.603**
有效态镉	-0.489**	0.786**	0.400*	-0.233	-0.018	-0.256	-0.531**	-0.207	0.308

注:n=18+12=30。

Note:n=18+12=30.

机质的重要途径^[22]。近年来有关秸秆还田对土壤镉积累及生物有效性的影响引起学者们高度关注。一方面作物吸收的镉主要贮存在秸秆中,且向籽粒转运较少,秸秆还田将作物吸收的大部分镉归还到土壤中,还田量越大,土壤镉积累越多^[23]。另一方面,秸秆分解过程中释放质子和有机酸,降低土壤pH,活化难溶态镉,致使土壤有效态镉含量增加^[10,14,24]。本研究基于长期定位试验,以化肥为对照,探明37 a长期秸秆还田对土壤总镉及有效态镉含量的影响。结果表明,-20 cm水位,相当于排水不畅的潜育型水稻土,HS处理(秸秆年施用量为19 200 kg·hm⁻²)土壤总镉及有效态镉含量较CF处理显著升高,升高幅度达21.8%和59.9%;MS处理(秸秆年施用量9 600 kg·hm⁻²)土壤总镉含量较CF处理仅提高9.8%,有效态镉提高49.2%,达显著差异水平。-80 cm水位,相当于水分状况良好的潜育型水稻土,HS处理土壤总镉较CF处理仅提高11.2%,有效态镉提高31.6%,达显著差异水平;MS处理,土壤总镉及有效态镉含量较CF处理降低,但未达显著差异水平。表明在镉轻度污染的土壤中,大量秸秆还田有增加土壤镉积累、提高镉活性的风险。究其原因,长期大量秸秆还田,一方面归还了作物吸收的大部分镉,同时有利于腐殖质的合成,增加了土壤对镉的吸附,土壤总镉含量在37 a内较CF处理有一定幅度上升(11.2%~21.8%);同时秸

秆在分解过程中产生大量的有机酸,降低了土壤的pH,活化了土壤镉,有效态镉含量较CF处理提高31.6%~59.9%。减少秸秆用量,同时降低地下水位,土壤总镉及有效态镉含量较CF处理降低,这可能与镉的淋洗下移及吸附固定有关,后续将进一步开展研究。从试验处理变更后土壤总镉和有效态镉含量的变化分析,进一步证实秸秆还田特别是大量秸秆还田,有增加土壤镉积累的风险,在中度和重度镉污染农田,应实施秸秆离田技术。

土壤水分状况直接影响土壤的发生发育过程、物质的淋溶、沉积及迁移转化特征,同时通过影响土壤的物理、化学与生物学性质,间接影响地壳元素的化学形态及生物有效性^[25]。高水位条件下,稻田排水不畅,还原作用加强,Eh下降。一方面硫化物还原生成的S²⁻与土壤中的Cd²⁺直接形成稳定、难溶的CdS沉淀,同时S²⁻与土壤铁结合生成铁的硫化物,与土壤中Cd²⁺发生共沉淀作用,导致镉的生物有效性降低^[26]。另一方面,土壤的还原环境促进了有机质的腐殖化过程,增加其对土壤镉的吸附,降低其有效性,这与朱丹妹等^[27]的研究结果一致。本研究表明,高水位条件下,土壤铁的活性增强,HS、MS、CF处理土壤活性氧化铁(也称非晶质氧化铁)含量较低水位土壤分别高出4.4%、15.3%和18.4%。活性氧化铁具有更多的吸附点位和更大的比表面积,这些均提高了对镉的吸附

能力,土壤总镉含量增加,由于镉的移动性下降,有效态镉含量降低,与朱丹妹等^[27]和 Tack 等^[28]的研究结果一致。相关分析结果表明,土壤有机质含量、CEC、pH 和铁的结合形态是影响土壤镉积累及其有效性的最主要因素。以上进一步表明了不同施肥方式与水分管理,通过改变土壤的基本理化性质,从而影响土壤镉的积累及其有效性,这与李慧敏等^[29]和张会民等^[30]的研究结果相似。

4 结论

(1)高地下水位(-20 cm)条件下,长期秸秆还田土壤总镉及有效镉含量分别较化肥处理升高;低地下水位(-80 cm)条件下,高量秸秆还田处理土壤总镉及有效态镉含量较化肥处理升高,而常量秸秆还田处理土壤总镉及有效态镉含量较化肥处理下降。施肥方式变更后,土壤总镉和有效态镉含量随秸秆施用量的增加而增加,随化肥施用量的增加而减少。

(2)高地下水位处理土壤总镉含量均高于低地下水位处理;有效态镉含量在常量秸秆还田处理下,高地下水位>低地下水位,高量秸秆还田和化肥处理下则表现为高地下水位<低地下水位。

(3)方差分析表明,施肥方式对土壤总镉和有效态镉含量表现出显著和极显著影响;地下水位对土壤总镉含量影响显著,对有效态镉含量影响不显著。

(4)相关分析表明,土壤有机质含量、CEC、pH 和铁的结合形态是影响土壤镉积累及其有效性的最主要因素。

参考文献:

- [1] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(2):507-515.
DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2): 507-515.
- [2] 鲁如坤, 时正元, 熊礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价[J]. 土壤学报, 1992, 29(2):150-157.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan, XIONG Li-ming. Cadmium contents of rock phosphates and phosphate fertilizers of China and their effects on ecological environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(2): 150-157.
- [3] Selles F, Clarke J M, Zentner R P, et al. Effects of source and placement of phosphorus on concentration of cadmium in the grain of two durum wheat cultivars[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2003, 83(3):475-482.
- [4] 徐一兰, 金自力, 刘唐兴, 等. 不同施肥措施对双季稻田土壤和大麦植株镉累积的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(7):1235-1241.
XU Yi-lan, JIN Zi-li, LIU Tang-xing, et al. Effects of long-term fertilization on heavy metal Cd accumulation in the surface soil and barley plant of double-cropping paddy rice system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7): 1235-1241.
- [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 Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, et al. Accumulation and migration characteristics in soil profiles and bioavailability of heavy metals from livestock manure[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4):1576-1586.
- [6] Berenguer M B, Cela S, Santiveri F, et al. Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilizer with liquid swine manure[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 1056-1061.
- [7] 茹淑华, 徐万强, 侯利敏, 等. 连续施用有机肥后重金属在土壤-作物系统中的积累与迁移特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2070-2078.
RU Shu-hua, XU Wan-qiang, HOU Li-min, et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on the accumulation and migration of heavy metals in soil-crop systems[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(10): 2070-2078.
- [8] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10):1992-1998.
JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10):1992-1998.
- [9] Peng C, Wang M E, Chen W P, et al. Modelling cadmium contamination in paddy soils under long-term ediation measures: Model development and stochastic simulations[J]. *Environmental pollution*, 2016, 216: 146-155.
- [10] 郑顺安, 刘代丽, 章明奎, 等. 长期秸秆还田对污染农田土壤与农产品重金属的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 354-359.
ZHENG Shun-an, LIU Dai-li, ZHANG Ming-kui, et al. Effects of long-term straw returning on heavy metals of soil and agricultural products in the polluted farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 354-359.
- [11] 潘逸, 周立祥. 施用有机物料对土壤中Cu、Cd形态及小麦吸收的影响:田间微区试验[J]. 南京农业大学学报, 2007, 30(2):142-146.
PAN Yi, ZHOU Li-xiang. Influence of applying organic manures on the chemical form of Cu and Cd in the contaminated soil and on wheat uptake: Field micro-plot trials[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 30(2): 142-146.
- [12] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2):257-263.
WANG Teng-fei, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 257-263.
- [13] During R A, Hoss T, Gath S. Depth distribution and bioavailability of

- pollutants in long-term differently tilled soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 66(2):184-195.
- [14] Alvarenga P, Goncalves A P, Fernandes R M, et al. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) Effects on soil chemical characteristics[J]. *Chemosphere*, 2009, 74 (10): 1292-1300.
- [15] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 水分调控和钝化剂处理对水稻土镉的钝化效应及其机理[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7):1316-1321.
- LI Jian-rui, XU Ying-ming, LIN Da-song, et al. Immobilization of cadmium in a paddy soil using moisture management and amendments [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1316-1321.
- [16] Gambrell R P, Wiesepe J B, Patrick W H, et al. The effects of pH, redox, and salinity on metal release from a contaminated sediment[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1991, 57/58(1): 359-367.
- [17] 崔晓炎, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2177-2184.
- CUI Xiao-ying, QIN Jun-hao, LI Hua-shou. Effect of different water management modes on rice (*Oryza sativa* L.) growth and heavy metal transport characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2177-2184.
- [18] 易亚男, 尹力初, 张蕾, 等. 施肥对不同地下水位水稻土团聚组成及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 144-148, 153.
- YI Ya-nan, YIN Li-chu, ZHANG Lei, et al. Effects of fertilization on aggregate composition and organic carbon distribution in paddy soil unde different groundwater level[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5):144-148, 153.
- [19] 黄运湘, 张杨珠, 刘鹏, 等. 稻作制与有机肥及地下水位对水稻土硫素状况的影响 I. 全硫和有效硫含量[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2001, 27(3): 205-208.
- HUANG Yun-xiang, ZHANG Yang-zhu, LIU Peng, et al. Effects of rice-based cropping system, organic manure and ground water level on sulphur status in paddy soil I. Total S and available S contents[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2001, 27 (3): 205-208.
- [20] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHANG Gan-lin, GONG Zi-tong. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000.
- [22] 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.
- [23] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属Cd的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):168-176.
- TANG Wen-guang, XIAO Xiao-ping, TANG Hai-ming, et al. Effects of long-term tillage and rice straw returning on soil nutrient pools and Cd concentration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 168-176.
- [24] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3):443-449.
- [25] 朱玉祥, 马良, 朱黎明, 等. 氧化还原条件下有机物料对酸性土壤pH、铁形态和铜吸附解吸的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(5): 65-68.
- ZHU Yu-xiang, MA Liang, ZHU Li-ming, et al. Effect of organic material incorporation on pH, iron species and adsorption and desorption of copper in acid soils under redox conditon[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(5): 65-68.
- [26] 邓林, 李柱, 吴龙华, 等. 水分及干燥过程对土壤重金属有效性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1045-1051.
- DENG Lin, LI Zhu, WU Long-hua, et al. Influence of moisture and drying process on soil heavy metal availability[J]. *Soils*, 2014, 46(6): 1045-1051.
- [27] 朱丹妹, 刘岩, 张丽, 等. 不同类型土壤淹水对pH、Eh、Fe及有效态Cd含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8):1508-1517.
- ZHU Dan-mei, LIU Yan, ZHANG Li, et al. Effects of pH, Eh, Fe, and flooded time on available-Cd content after flooding of different kinds of soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8):1508-1517.
- [28] Tack F M G, Ranst E V, Lievens C, et al. Soil solution Cd, Cu and Zn concentrations as affected by short-time drying or wetting: The role of hydrous oxides of Fe and Mn[J]. *Geoderma*, 2006, 137(1):83-89.
- [29] 李慧敏, 方圆, 唐翠荣, 等. 广西水稻土镉有效性、水稻镉富集系数与土壤性质的关系研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31(12): 2678-2684.
- LI Hui-min, FANG Yuan, TANG Cui-rong, et al. Relationship among bioavailability cadmium and cadmium enrichment coefficient in rice and paddy soil properties in Guangxi[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(12): 2678-2684.
- [30] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. pH对土壤及其组分吸附和解吸镉的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):320-324.
- ZHANG Hui-min, XU Ming-gang, LÜ Jia-long, et al. A review of studies on effects of pH on cadmium sorption and desorption in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):320-324.