

倪中应, 沈倩, 章明奎. 秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3): 215-225.

NI Zhong-ying, SHEN Qian, ZHANG Ming-kui. Effects of Crop Straw Returning with Lime on Activity of Cu, Zn, Pb and Cd in Paddy Soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3): 215-225.

秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响

倪中应¹, 沈倩², 章明奎^{2*}

(1.桐庐县农业和林业技术推广中心, 浙江 桐庐 311500; 2.浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 秸秆还田是我国培肥地力和增加农田土壤碳固定的重要措施,但进入农田的秸秆存在着活化土壤重金属的风险。为了解不同来源的秸秆对污染水平不同农田土壤重金属活性的影响,采取相应措施防止因秸秆还田对农田土壤重金属的激活,开展了盆栽和田间小区试验研究秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、镉、铅活性的影响。盆栽和田间试验在轻度和重度污染2种土壤上同时进行。盆栽试验中施用秸秆包括重污染水稻秸秆、轻污染水稻秸秆和轻污染油菜秸秆3种,石灰用量设对照(0 kg·hm⁻²)和石灰处理(750 kg·hm⁻²)2个处理;田间小区试验设对照(不施秸秆和石灰)、秸秆还田及秸秆还田+石灰3个处理。动态观察了试验过程中土壤有效态重金属、重金属形态及水稻籽粒中重金属积累情况。结果表明,试验初期(前20 d)秸秆还田显著增加了水田土壤中水溶性有机碳与水溶性重金属的含量;与对照处理比较,水溶性重金属含量以重度污染土壤增幅较为明显。试验后期(60 d后)秸秆还田对土壤重金属的活性的影响逐渐变得不明显。油菜秸秆还田土壤中水溶性重金属含量低于水稻秸秆还田,重污染水稻秸秆还田土壤中水溶性重金属含量高于低污染水稻秸秆还田。盆栽试验和田间试验的结果都表明,重污染水稻秸秆还田可轻微增加水稻籽粒中镉的积累,但轻度污染水稻秸秆还田与油菜秸秆还田对水稻籽粒镉积累的影响较小;3种秸秆还田对水稻籽粒铅、铜、锌积累的影响不明显。配施石灰可显著降低土壤中水溶性重金属的含量,降低水稻籽粒中重金属的积累。研究认为,在污染农田管理上应控制重污染水稻秸秆还田,在秸秆还田的同时适量配施石灰。

关键词: 秸秆还田;重金属污染;食品安全;配施石灰

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)03-0215-11

doi: 10.13254/j.jare.2016.0305

Effects of Crop Straw Returning with Lime on Activity of Cu, Zn, Pb and Cd in Paddy Soil

NI Zhong-ying¹, SHEN Qian², ZHANG Ming-kui^{2*}

(1. Agricultural and Forestry Technology Promotion Center of Tonglu County, Tonglu 311500, China; 2. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Crop straw returning is an important measure for increasing soil carbon fixation and soil fertility in China, but it also may result in some risk of raising activity of heavy metals in the soil. In order to understand the effects of different sources of crop straw on heavy metals activity in soil with different pollution levels, and to take appropriate measures to prevent the activation of heavy metals in the soil, both pot and field experiments were carried out to study the effects of crop straw returning with lime on activity of Cu, Zn, Pb and Cd in paddy soil. The experiments were carried out in the soils with both light and heavy pollution of heavy metals. In the pot experiment, three straws, including rice straw with heavy pollution of heavy metals, rice straw with light pollution of heavy metals, and rape straw with light pollution of heavy metals, were tested. Two dosages of lime (0 kg·hm⁻² and 750 kg·hm⁻²) were applied. Field experiment had three treatments, i.e., control without application of straw and lime, straw returning and straw returning + lime. Soil available heavy metals, accumulation of heavy metals in rice grain, and chemical forms of soil heavy metals were dynamical monitored. The results showed that crop straw returning increased significantly the concentrations of dissolved organic carbon and water soluble heavy metals in paddy soils at the early stage of experiment

收稿日期: 2016-12-17

基金项目: 浙江省农业厅《桐庐县农业“两区”土壤污染治理试点试验》; 国家科技支撑计划项目(2014BAD14B04)

作者简介: 倪中应(1966—),男,浙江桐庐人,高级农艺师,主要从事土壤与肥料技术方面的研究。E-mail: hztlnzy@163.com

*通信作者: 章明奎 E-mail: mkzhang@zju.edu.cn

(in first 20 days). The increase in water soluble heavy metals in the soil with heavy pollution of heavy metals was most obvious as compared with the control treatment. After 60th day of the experiment, the effects of straw returning on the activity of heavy metals in the soil decreased gradually with the time, and became no obvious. The concentrations of water soluble heavy metals in the soil treated with rape straw was generally lower than that of rice straw, while those in the soil treated with heavy pollution of rice straw was higher than low pollution of rice straw. The results of both pot and field experiments showed that the accumulation of Cd in rice grains could be slightly increased by application of rice straw with heavy pollution. However, application rice straw or rape straw with slight pollution had little effects on the accumulation of Cd in rice grain. The effects of all three tested straws on the accumulation of Pb, Cu and Zn in rice grains were not obvious. The content of soil water soluble heavy metals and heavy metals accumulation in rice grain could be significantly reduced by the application of lime. It was suggested that the rice straw returning should be controlled in the field with heavy pollution of heavy metals. When returning straw to the field, it was better to cooperate with the application of lime.

Keywords: straw returning; heavy metal pollution; food safety; straw returning with lime

秸秆还田是当今世界上普遍重视的一项提升耕地地力的有效措施,同时也是增加农田土壤碳素固定、杜绝秸秆焚烧所造成的大气污染的有效方法^[1]。在过去的 60 多年中,我国土壤研究者就秸秆还田对农田生态系统的作用进行了大量而广泛的研究^[2-3]。研究表明,秸秆还田能协调土壤水、肥、气、热的功能^[4],减少化肥使用量,增加土壤中有机质、钾素、磷素的积累^[5-7],平衡土壤养分,增加水稳定性团聚体含量、增强土壤的通气透水性、改善土壤结构及农作物根系生长环境,促进土壤微生物活力和土壤养分的转化^[8-9],降低土壤中病虫害的发生,补充土壤微量元素的不足。一些定位试验也表明^[10-12],秸秆还田增肥增产作用显著,一般可增产 5%~10%,改善稻米品质^[11]。然而,作物秸秆中重金属含量常常高于作物籽粒,污染农田产生的秸秆还田在把营养物质带入土壤的同时也把秸秆中的重金属带入了土壤;还田的秸秆在土壤中周转不仅可影响养分的循环,其对土壤重金属的转化和生物有效性也会产生一定的影响^[13-14]。目前,有关施用有机肥或秸秆还田对土壤重金属的影响还存在不同的观点。土壤中有机质可影响重金属的活性,秸秆还田增加土壤中溶解性有机碳(DOC)水平,后者可增加对土壤中重金属的络合,从而影响重金属在土壤中的迁移,因此在重金属污染的土壤中进行秸秆还田可能会增加土壤中有效态重金属的含量和重金属的积累。例如,汤文光等^[15]的研究表明,秸秆还田在改善土壤肥力的同时,也将秸秆中富集的镉重新归还到稻田土壤中,不利于土壤镉的转移修复。陈国华^[16]的模拟试验表明,秸秆还田后土壤渗滤液中镉浓度呈先上升后下降的趋势,增加了水稻对镉的吸收。高秀丽^[17]的研究表明,添加重金属污染秸秆可显著增加土壤中有效态铅和镉的水平。贾乐等^[18]的研究表明,在镉污染水

稻土上还田玉米和菜豆秸秆可显著提高土壤中有效态镉含量,但随时间延长土壤中可提取态镉增加变得不明显,但当秸秆还田量为 2% 时却显著降低了白菜中镉含量;在模拟镉污染土壤上还田菜豆秸秆对白菜生长和镉含量的影响则不明显。另有研究表明,在重金属污染土壤中秸秆还田或施用有机肥可降低可提取态重金属含量,原位钝化土壤中的重金属,降低作物对土壤重金属的吸收^[19-20]。以上结果的不一致可能与研究土壤污染程度和有机肥料的组成差异有关。为了解不同来源的秸秆对污染水平不同农田土壤重金属活性的影响,研讨防止秸秆还田对农田土壤重金属激活的应对措施,本研究采用盆栽和田间小区试验相结合的方法开展了秸秆还田配施石灰对水田土壤镉、铜、铅活性影响的研究,目的是为科学地进行重金属污染农田秸秆还田提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

研究分别在重金属污染水平不同的 2 种农田土壤上进行(下文称重污染农田和轻污染农田),其中田间小区试验在原位农田土壤中进行,盆栽采用 2 种农田的表层土壤(0~15 cm)开展试验。试验表层土壤的性状见表 1。试验秸秆有 3 种,分别为重污染水稻秸秆、轻污染水稻秸秆和轻污染油菜秸秆,其中,重污染水稻秸秆采自以上重金属重污染农田,轻污染水稻秸秆和轻污染油菜秸秆采自以上重金属轻污染农田。3 种秸秆的重金属含量见表 2。供试水稻品种为甬粳 15。

1.2 盆栽试验

盆栽试验在温室大棚内进行,每一土壤各设 3 个类型秸秆(重污染水稻秸秆、轻污染水稻秸秆和轻污染油菜秸秆)和 2 个石灰施用量等级(不施和施石灰)

表1 供试土壤的基本性状及重金属含量

Table 1 Basic properties and concentrations of heavy metals of the tested soils

农田	土壤类型	pH 值	有机质/g·kg ⁻¹	质地	Cd/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹
重污染农田	水稻土	5.78	28.54	壤土	4.57	168.65	143.68	554.82
轻污染农田	水稻土	5.69	31.46	壤土	0.56	54.32	58.65	154.26

表2 供试秸秆中重金属含量

Table 2 Concentrations of heavy metals of the tested straws

秸秆类型	Cd/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹
重污染水稻秸秆	3.87	59.76	5.76	87.65
轻污染水稻秸秆	0.43	32.75	2.75	40.98
轻污染油菜秸秆	0.56	37.34	3.47	47.89

的完全组合处理,另设不施加秸秆和石灰的对照处理,即每一土壤共设7个处理,3次重复。试验在一塑料容器中进行(直径30 cm、高度30 cm),每盆用土量(试验前过5 mm)为15 kg,秸秆用量为0.33%(即每盆50 g,相当于500 kg·667 m⁻²);石灰用量分别为0 g·盆⁻¹和5 g·盆⁻¹,相当于0 kg·hm⁻²和750 kg·hm⁻²;每盆加NH₄NO₃、KH₂PO₄、KCl各1 g作底肥。试验秸秆施用前切割至2~5 cm。土壤与秸秆、石灰及肥料充分混匀后装盆,灌水至土表保持5 cm水层,选择大小、长势基本一致的3.5叶水稻秧苗移栽至盆中,每盆5株。1个月后加施追肥一次,施用量同底肥。试验期间根据水稻生长需要调控田面水层,各处理管理措施均保持一致。分别于试验10、20、40、60、90 d采集土样,用于分析土壤中水溶性重金属和可溶性有机碳。土样由一竹制的柱状(内径2 cm)采样器从每一容器中采集5个柱状土样混合而成,充分混匀后,保留30 g左右用于分析,多余部分返还相应的试验容器。水稻成熟后(第90 d)采样分析籽粒中重金属含量。

1.3 田间试验

田间小区试验同时在2类污染农田中进行,各设3个处理,分别为对照(不施秸秆和石灰)、秸秆还田及秸秆还田+石灰3个处理。小区面积为10 m²(2 m×5 m),重复3次。小区间设置1 m宽的保护行,每一小区灌溉与排水自成一体,相互不连通。所用秸秆(切割至2~5 cm)为各自田块上一季水稻秸秆,用量为500 kg·667 m⁻²,石灰用量为750 kg·hm⁻²;每一小区施用NH₄NO₃、KH₂PO₄、KCl各150 g作底肥;秸秆与石灰及肥料一起均匀耕翻混入表层土壤。灌水至土表保持10 cm左右,选择大小、长势基本一致的3.5叶水稻秧苗进行移栽15 cm×15 cm,每穴栽3~5本。1个月后加

施追肥一次,施用量同底肥。用常规方法进行田间管理。水稻成熟时(第90 d)收获稻谷,估算产量;同时采集水稻籽粒样品和耕作层土壤样品。样品用玛瑙研钵研磨粉碎,过100目尼龙筛。

1.4 分析方法

土壤pH值采用常规方法测定^[21]。土壤有机质含量采用Vario.EL元素分析仪测定。水溶性有机碳用0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄溶液浸提,用Shimadzu TOC自动分析仪测定。植物样品用高氯酸消化法消化,用石墨炉-原子吸收光谱法测定铜、锌、镉和铅。土壤中重金属含量采用标准方法测定^[22],其中,镉、铜、锌用盐酸-硝酸-高氯酸消解,用石墨炉原子吸收分光光度法测定镉,用原子光谱吸收法测定铜、锌;铅用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解,石墨炉原子吸收分光光度法测定。籽粒样品分析过程中以GBW10045标准物质进行质控,土壤样品分析过程中以GBW07405或GBW07429标准物质进行质控,同时全程设空白对照。土壤中有有效态重金属含量用DTPA方法(0.005 mol·L⁻¹, pH 7.3,土液比1:5,振荡2 h);土壤中水溶性重金属含量用去离子水提取,方法如下:称取10 g土样,加入10 mL去离子水湿润土样,在室温下培养24 h后,再加入90 mL去离子水并振荡2 h后用定量滤纸过滤。浸提液中铜、锌、镉和铅用石墨炉-原子吸收光谱法测定,在测定时每10个样品用标液检测结果的可靠性。

土壤重金属分级采用Amacher的程序^[22],共分为交换态、碳酸盐结合态、氧化物结合态、有机质结合态和残余态等5种组分,顺次用0.01 mol·L⁻¹ Mg(NO₃)₂、pH 5、1 mol·L⁻¹ NaOAc、0.2 mol·L⁻¹ 草酸铵+0.2 mol·L⁻¹ 草酸+0.1 mol·L⁻¹ 抗坏血酸(pH 3.3)和30% H₂O₂(pH 2)提取交换态、碳酸盐结合态、氧化物结合态、有机结合态重金属。残余态元素含量用HNO₃-HClO₄-HF三酸消化提取。提取液中重金属浓度用石墨炉-原子吸收光谱法测定。5种组分的生物有效性:交换态>碳酸盐结合态>氧化物结合态、有机质结合态>残余态。

分析数据采用Microsoft Excel 2003处理,差异显著性统计分析在DPS 3.0软件实现。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对土壤中 DOC 的影响

无论是重污染土壤还是轻污染土壤,在试验初期(前 40 d)施加 3 类秸秆均显著增加了土壤中 DOC 含量(表 3)。在试验时间为 10 d 时,重污染土壤施加 3 类秸秆后土壤中 DOC 含量比对照(不施加秸秆)增加了 49.56%~76.97%;轻污染土壤施加 3 类秸秆后土壤中 DOC 含量比对照(不施加秸秆)增加了 46.70%~71.15%。不同秸秆处理之间土壤 DOC 差异较小,除个别情况外,差异不明显。施加石灰轻微降低了土壤中 DOC 含量,可能与石灰施用加速了土壤中可溶性有机物质分解有关。随着试验时间的增加,土壤中 DOC 含量均呈现明显的下降趋势,施加秸秆处理土壤与对照土壤之间 DOC 含量的差异缩小,至试验第 90 d 时,各处理土壤之间 DOC 含量都较为接近。

2.2 秸秆还田与施用石灰对土壤中水溶性重金属含量的影响

秸秆还田可影响试验初期土壤中水溶性重金属含量(表 4~表 7)。盆栽试验表明,对于重污染土壤,在施加秸秆的前 20 d,重污染水稻秸秆+不加石灰、轻污染水稻秸秆+不加石灰和轻污染油菜秸秆+不加石灰 3 个处理的土壤中水溶性镉含量显著高于对照,其中重污染水稻秸秆+不加石灰处理的这种影响可一直延

续至试验第 90 d,但随着试验时间的增加,施加秸秆处理土壤与对照土壤之间的水溶性镉含量差异逐渐减小(表 4)。施加秸秆对土壤中水溶性铜含量的影响也较为明显,但这种影响主要在试验的前 40 d(但只有部分处理达到显著差异);至试验第 60~90 d 时,对照土壤中水溶性铜含量甚至高于施加秸秆处理的土壤(表 5)。施加秸秆对土壤中水溶性锌含量的影响主要出现在试验前 10 d,至试验第 20 d 后,这种影响逐渐变得不明显,至试验第 60~90 d 时对照土壤中水溶性锌含量甚至高于施加秸秆处理的土壤(表 6)。施加秸秆虽然也增加了土壤中水溶性铅的含量,但它们与对照土壤之间的差异多不显著,至试验第 60~90 d,施加秸秆处理土壤中水溶性铅含量甚至低于对照土壤(表 7)。总体上,施加秸秆对土壤中水溶性重金属的影响程度:镉 > 铜 > 锌 > 铅。

对于轻污染土壤,在试验前 60 d,重污染水稻秸秆+不加石灰处理的土壤中水溶性镉含量显著高于对照,但至试验第 90 d 其与对照土壤之间的水溶性镉含量差异逐渐减小(表 4);重污染水稻秸秆+加石灰处理在试验前 20 d 和第 60 d 土壤中水溶性镉含量显著高于对照,其他时间与对照差异不明显;轻污染水稻秸秆+不加石灰处理只有在试验的第 20 d 和 40 d 土壤中水溶性镉含量显著高于对照,其他时间与对照差异不明显;在试验第 90 d 时,所有处理的土壤中水

表 3 盆栽试验秸秆还田对土壤中 DOC 含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 3 Effects of straw returning on soil DOC concentration in pot experiment(mg·kg⁻¹)

土壤	处理	试验时间/d				
		10	20	40	60	90
重污染土壤	不施用秸秆	343±16d	315±11c	308±12c	287±9c	279±20ab
	重污染水稻秸秆+不加石灰	554±19b	417±8b	387±8a	345±14ab	289±17ab
	重污染水稻秸秆+加石灰	523±21bc	367±28b	354±6b	328±11b	279±16ab
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	607±33a	453±17a	412±13a	378±16a	332±18a
	轻污染水稻秸秆+加石灰	583±22ab	432±14a	387±14a	369±13a	326±17a
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	549±24b	432±12a	398±16a	337±12b	265±15b
	轻污染油菜秸秆+加石灰	513±18c	412±9b	364±13ab	317±10c	258±13b
轻污染土壤	不施用秸秆	364±20c	343±11d	324±15d	309±12c	314±13bc
	重污染水稻秸秆+不加石灰	623±39a	514±22a	458±22a	423±27a	359±13a
	重污染水稻秸秆+加石灰	587±26a	477±19b	423±24ab	407±19a	364±15a
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	593±30a	448±20bc	397±19b	354±16b	328±12b
	轻污染水稻秸秆+加石灰	564±31ab	411±19c	357±20c	339±15b	317±12bc
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	563±27ab	437±18bc	385±21bc	339±13b	287±12c
	轻污染油菜秸秆+加石灰	534±20b	398±17c	357±19c	314±22bc	278±14c

注:同列不同字母表示同一土壤不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference among different treatments in the same soil at 0.05 level. The same below.

溶性镉含量与对照均无显著差异。施加秸秆虽然也增加了土壤中水溶性铜、锌和铅的含量,但它们与对照土壤之间的差异多数不显著,至试验第60 d后,施加秸秆处理土壤中水溶性铜、锌和铅含量甚至低于对照土壤。

多数情况下,施用重污染水稻秸秆的土壤中水溶性重金属含量一般要略高于施用轻污染水稻秸秆的土壤。而施用轻污染油菜秸秆的土壤水溶性镉含量一

般要低于施用轻污染水稻秸秆的土壤(表4);但施用轻污染油菜秸秆与轻污染水稻秸秆的土壤之间水溶性铜、锌和铅的差异不明显(表5~表7)。在施加秸秆的同时配施少量石灰可显著降低土壤中水溶性重金属含量。

2.3 秸秆还田与施用石灰对土壤有效态重金属含量的影响

对盆栽试验结束时(试验第90 d)土壤有效态重

表4 盆栽试验秸秆还田对土壤水溶性Cd含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 Effects of straw returning on soil water soluble Cd concentration in pot experiment($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤	处理	试验时间/d				
		10	20	40	60	90
重污染土壤	不施用秸秆	0.213±0.008c	0.196±0.004d	0.188±0.018bc	0.189±0.006b	0.192±0.008bc
	重污染水稻秸秆+不加石灰	0.318±0.022a	0.268±0.006a	0.273±0.011a	0.224±0.006a	0.238±0.005a
	重污染水稻秸秆+加石灰	0.218±0.007c	0.203±0.005c	0.169±0.010c	0.178±0.006b	0.172±0.009c
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	0.287±0.026ab	0.235±0.009b	0.217±0.016b	0.228±0.007a	0.223±0.006a
	轻污染水稻秸秆+加石灰	0.201±0.010c	0.189±0.005d	0.172±0.009c	0.178±0.008bc	0.167±0.010c
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	0.234±0.011b	0.204±0.004c	0.221±0.012b	0.208±0.009ab	0.213±0.007ab
	轻污染油菜秸秆+加石灰	0.173±0.011d	0.154±0.004e	0.146±0.008d	0.152±0.004c	0.142±0.004d
轻污染土壤	不施用秸秆	0.059±0.004b	0.055±0.003c	0.057±0.003b	0.055±0.004b	0.056±0.006ab
	重污染水稻秸秆+不加石灰	0.096±0.008a	0.087±0.007a	0.063±0.002a	0.074±0.006a	0.061±0.005a
	重污染水稻秸秆+加石灰	0.083±0.010a	0.074±0.006ab	0.060±0.004ab	0.072±0.005a	0.057±0.004a
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	0.078±0.011ab	0.072±0.006ab	0.068±0.004a	0.053±0.004b	0.059±0.005a
	轻污染水稻秸秆+加石灰	0.069±0.006b	0.063±0.006bc	0.061±0.004ab	0.049±0.003bc	0.045±0.003b
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	0.063±0.005b	0.054±0.004c	0.056±0.003b	0.053±0.003b	0.052±0.005ab
	轻污染油菜秸秆+加石灰	0.052±0.006b	0.043±0.006c	0.044±0.003c	0.041±0.003c	0.039±0.004b

表5 盆栽试验秸秆还田对土壤水溶性Cu含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 Effects of straw returning on soil water soluble Cu concentration in pot experiment($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤	处理	试验时间/d				
		10	20	40	60	90
重污染土壤	不施用秸秆	6.19±0.27b	5.78±0.27ab	5.88±0.14b	5.47±0.21a	5.01±0.16a
	重污染水稻秸秆+不加石灰	7.37±0.36a	6.35±0.24a	6.13±0.26a	5.16±0.30ab	4.78±0.22ab
	重污染水稻秸秆+加石灰	6.42±0.28b	5.89±0.24ab	5.54±0.21b	4.98±0.29ab	4.46±0.15b
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	7.14±0.39a	6.21±0.17a	5.98±0.29ab	5.04±0.27ab	4.49±0.13b
	轻污染水稻秸秆+加石灰	6.23±0.31b	5.58±0.16b	5.47±0.22b	4.68±0.32b	4.21±0.15bc
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	7.32±0.36a	6.34±0.23a	6.03±0.27ab	4.89±0.14b	4.52±0.12b
	轻污染油菜秸秆+加石灰	6.08±0.40b	5.63±0.16b	5.55±0.20b	4.78±0.26b	4.18±0.11c
轻污染土壤	不施用秸秆	1.12±0.13ab	0.95±0.16ab	0.91±0.05ab	0.89±0.03a	0.82±0.06a
	重污染水稻秸秆+不加石灰	1.32±0.11a	1.17±0.13a	0.96±0.04a	0.87±0.03a	0.74±0.07ab
	重污染水稻秸秆+加石灰	1.03±0.12b	0.89±0.12b	0.83±0.03b	0.82±0.05ab	0.66±0.05b
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	1.28±0.09a	1.08±0.17ab	0.97±0.05a	0.82±0.04ab	0.76±0.06ab
	轻污染水稻秸秆+加石灰	0.97±0.08b	0.85±0.10b	0.81±0.03b	0.73±0.04b	0.67±0.04b
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	1.29±0.14a	1.03±0.14ab	1.03±0.04a	0.81±0.04ab	0.79±0.07a
	轻污染油菜秸秆+加石灰	0.91±0.11b	0.84±0.08b	0.76±0.03c	0.79±0.03b	0.64±0.03b

表 6 盆栽试验秸秆还田对土壤水溶性 Zn 含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 6 Effects of straw returning on soil water soluble Zn concentration in pot experiment(mg·kg⁻¹)

土壤	处理	试验时间/d				
		10	20	40	60	90
重污染土壤	不施用秸秆	11.45±0.33b	10.98±0.16ab	10.71±0.20ab	10.54±0.27a	10.42±0.61a
	重污染水稻秸秆+不加石灰	13.25±0.43a	11.32±0.15a	11.07±0.13a	10.23±0.26a	9.89±0.22a
	重污染水稻秸秆+加石灰	11.43±0.38b	11.14±0.15ab	10.63±0.18ab	9.98±0.34a	9.56±0.26a
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	12.87±0.40a	11.43±0.14a	10.97±0.11a	10.14±0.32a	9.97±0.39a
	轻污染水稻秸秆+加石灰	11.29±0.36b	11.02±0.16ab	10.54±0.17ab	9.76±0.41a	9.52±0.46a
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	12.64±0.39ab	11.23±0.13a	10.74±0.28ab	10.04±0.27a	9.79±0.37a
	轻污染油菜秸秆+加石灰	11.03±0.35b	10.87±0.13b	10.23±0.32b	9.82±0.32a	9.41±0.56a
	轻污染土壤	不施用秸秆	3.13±0.31ab	2.79±0.31ab	2.68±0.24ab	2.71±0.23a
重污染土壤	重污染水稻秸秆+不加石灰	3.56±0.25a	3.02±0.30a	3.11±0.18a	2.68±0.21a	2.56±0.21a
	重污染水稻秸秆+加石灰	2.98±0.32ab	2.65±0.33ab	2.48±0.13b	2.43±0.22ab	2.32±0.28ab
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	3.55±0.27a	3.24±0.32a	3.08±0.17a	2.69±0.20a	2.66±0.30a
	轻污染水稻秸秆+加石灰	2.76±0.14b	2.56±0.36ab	2.34±0.15b	2.44±0.24ab	2.21±0.26ab
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	3.48±0.30a	3.14±0.30a	2.98±0.16a	2.64±0.19a	2.69±0.29a
	轻污染油菜秸秆+加石灰	2.81±0.14b	2.48±0.26b	2.29±0.14b	2.33±0.13b	2.16±0.18b

表 7 盆栽试验秸秆还田对土壤水溶性 Pb 含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 7 Effects of straw returning on soil water soluble Pb concentration in pot experiment(mg·kg⁻¹)

土壤	处理	试验时间/d				
		10	20	40	60	90
重污染土壤	不施用秸秆	1.45±0.16ab	1.38±0.11a	1.27±0.14a	1.31±0.13a	1.29±0.15a
	重污染水稻秸秆+不加石灰	1.69±0.14a	1.32±0.10a	1.17±0.16ab	1.21±0.12a	1.13±0.17ab
	重污染水稻秸秆+加石灰	1.35±0.12b	1.29±0.18ab	1.11±0.15ab	0.91±0.05b	0.93±0.10b
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	1.66±0.13a	1.25±0.18ab	1.22±0.11a	1.13±0.16ab	1.17±0.16ab
	轻污染水稻秸秆+加石灰	1.29±0.11b	1.17±0.17ab	1.03±0.14ab	0.94±0.24ab	0.91±0.07b
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	1.71±0.15a	1.42±0.12a	1.28±0.13a	1.17±0.19ab	1.08±0.18ab
	轻污染油菜秸秆+加石灰	1.32±0.12b	1.09±0.06b	0.93±0.07b	0.87±0.05b	0.84±0.08b
	轻污染土壤	不施用秸秆	0.41±0.08ab	0.38±0.09ab	0.39±0.08a	0.38±0.06a
重污染土壤	重污染水稻秸秆+不加石灰	0.52±0.09a	0.48±0.10a	0.41±0.10a	0.36±0.06a	0.31±0.06ab
	重污染水稻秸秆+加石灰	0.32±0.06b	0.29±0.07b	0.27±0.05b	0.24±0.04b	0.22±0.04b
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	0.46±0.08ab	0.42±0.08ab	0.37±0.08a	0.32±0.07ab	0.30±0.06ab
	轻污染水稻秸秆+加石灰	0.31±0.05b	0.29±0.06b	0.23±0.06b	0.25±0.03b	0.23±0.04b
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	0.47±0.09ab	0.44±0.09ab	0.35±0.10ab	0.31±0.07ab	0.29±0.07ab
	轻污染油菜秸秆+加石灰	0.35±0.06b	0.31±0.06b	0.28±0.11ab	0.23±0.03b	0.19±0.03b

金属含量的分析表明(表 8),重污染土壤中施加秸秆与不加石灰处理可显著增加土壤中有效态镉含量,比对照增加 16.58%~24.06%;但重污染土壤中施加秸秆不但没有增加土壤中有效态铜、锌、铅的含量,多数情况下甚至略低于对照土壤(差异不明显),比对照分别下降 6.02%~13.69%、5.91%~9.20%和 9.91%~15.95%。轻污染土壤中施加秸秆对土壤中有效态重金属的影响不明显(表 8),多数情况下甚至略低于对照土壤

(差异不明显)。与对水溶性重金属含量的影响相似,配施少量石灰可影响土壤中有效态重金属含量。由表 8 可知,施加石灰的土壤镉、铜、锌和铅含量低于不加石灰处理的对应施加秸秆土壤和对照土壤。

田间小区试验的结果也表明(表 9),重污染土壤中施加秸秆显著增加了土壤中有效态镉的含量,增幅为 37.97%。但重污染土壤中施加秸秆对土壤中有效态铜、锌和铅含量没有显著的影响,施加秸秆土壤中

表8 秸秆还田对土壤有效态重金属含量的影响(盆栽水稻收获时)

Table 8 Effects of straw returning on soil available heavy metals in pot experiment(at harvest time)

土壤	处理	重金属含量/mg·kg ⁻¹			
		Cd	Cu	Zn	Pb
重污染土壤	不施用秸秆	1.87±0.14b	33.23±2.38a	148.65±12.24a	39.56±3.28a
	重污染水稻秸秆+不加石灰	2.23±0.19a	29.65±3.39ab	139.87±10.48ab	34.56±3.47ab
	重污染水稻秸秆+加石灰	1.76±0.15b	25.41±2.69b	124.65±10.57bc	23.14±2.64c
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	2.32±0.22a	31.23±2.27a	135.46±11.37ab	35.64±3.11ab
	轻污染水稻秸秆+加石灰	1.73±0.14b	24.69±3.11b	117.65±6.48c	24.65±2.93c
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	2.18±0.31ab	28.68±3.69ab	134.98±10.44ab	33.25±3.76b
	轻污染油菜秸秆+加石灰	1.68±0.16b	27.34±3.77ab	123.45±9.44bc	28.79±3.66bc
轻污染土壤	不施用秸秆	0.18±0.03a	13.11±2.01a	35.68±3.45a	9.14±1.56a
	重污染水稻秸秆+不加石灰	0.19±0.03a	12.32±1.70a	36.54±3.16a	8.69±1.29a
	重污染水稻秸秆+加石灰	0.11±0.02b	9.42±1.37b	30.14±3.44ab	6.02±1.03b
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	0.21±0.04a	13.24±2.33a	34.65±3.67ab	9.11±1.47a
	轻污染水稻秸秆+加石灰	0.12±0.02b	8.64±1.47b	29.42±2.79b	5.65±1.22b
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	0.18±0.03a	11.68±2.75ab	37.41±4.11a	9.65±1.55a
	轻污染油菜秸秆+加石灰	0.12±0.02b	8.33±1.42b	28.64±2.45b	5.88±1.34b

表9 秸秆还田对土壤有效态重金属含量的影响(小区试验水稻收获时)

Table 9 Effects of straw returning on soil available heavy metals in field experiment(at harvest time)

土壤	处理	重金属含量/mg·kg ⁻¹			
		Cd	Cu	Zn	Pb
重污染土壤	不施用秸秆	1.58±0.12b	30.25±1.68a	134.26±3.14a	35.87±2.67a
	重污染水稻秸秆+不加石灰	2.18±0.21a	28.74±2.03ab	131.28±3.06a	32.65±3.64ab
	重污染水稻秸秆+加石灰	1.66±0.13b	26.33±2.21b	126.98±2.68b	26.98±3.98b
轻污染土壤	不施用秸秆	0.17±0.03ab	11.14±1.04a	31.29±2.33a	7.98±0.56a
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	0.19±0.04a	10.87±1.33a	30.58±2.08a	7.34±0.48a
	轻污染水稻秸秆+加石灰	0.13±0.03b	8.98±0.94b	26.33±2.14b	5.87±0.37b

有效态铜、锌和铅含量均略低于对照土壤。轻污染土壤中施加秸秆对土壤中有效态镉、铜、锌和铅含量均没有显著的影响,除有效镉外,施加秸秆土壤中有效态重金属含量均略低于对照土壤(表9)。

2.4 秸秆还田对土壤重金属化学形态的影响

表10为小区试验结束时土壤重金属化学形态的分析结果。结果表明,不同重金属元素在土壤中的存在形态有所差别,并随重金属污染程度发生变化。残余态重金属的比例一般是轻污染土壤高于重污染土壤;交换态重金属比例随污染程度增加而增加。由于研究土壤呈酸性,所有研究的4种重金属的碳酸盐结合态比例均较低,多在5%以下。镉和铜的有机结合态一般要高于氧化物结合态,而锌和铅的有机结合态却明显低于氧化物结合态。

总体上,施加秸秆和石灰对土壤重金属化学组成的影响较小,但大致有如下变化趋势:施加秸秆后,有

机结合态重金属的比例增加,交换态重金属的比例也略有增加,而氧化物结合态、碳酸盐结合态和残余态重金属的比例呈现下降的趋势;而施用石灰后,碳酸盐结合态重金属的比例增加,而有机质结合态重金属的比例也呈增加的趋势。

2.5 秸秆还田对水稻产量和籽粒中重金属积累的影响

小区试验表明,重污染土壤中,不施用秸秆、重污染水稻秸秆+不加石灰和重污染水稻秸秆+加石灰处理的平均产量分别为396、409、418 kg·667 m⁻²,轻污染土壤中,不施用秸秆、重污染水稻秸秆+不加石灰和重污染水稻秸秆+加石灰处理的平均产量分别为423、431、435 kg·667 m⁻²。同一试验土壤的3种处理之间产量差异不明显,但一般以同时施用秸秆和石灰处理的最高,以不施秸秆的最低。

与土壤有效态重金属含量的变化相似,在盆栽试验中,重污染土壤中施加秸秆可增加籽粒中镉的积

表 10 秸秆还田对土壤重金属化学形态的影响(小区试验水稻收获时)

Table 10 Effects of straw returning on chemical forms of soil heavy metals in field experiment(at harvest time)

重金属	土壤	处理	总量/ mg·kg ⁻¹	交换态/%	碳酸盐 结合态/%	氧化物 结合态/%	有机质 结合态/%	残余态/%
Cd	重污染土壤	不施用秸秆	4.52±0.10	16.34±1.33ab	6.34±2.21ab	23.90±1.74a	28.76±0.76b	24.66±1.13a
		重污染水稻秸秆+不加石灰	4.62±0.11	17.76±1.13a	4.65±1.48 b	21.49±1.86ab	32.43±1.54a	23.67±1.08a
		重污染水稻秸秆+加石灰	4.65±0.12	14.87±1.06b	8.67±1.76a	19.43±1.66b	33.14±1.63a	23.89±1.47a
	轻污染土壤	不施用秸秆	0.58±0.04	7.45±1.64a	5.88±2.11ab	25.11±2.14a	29.43±3.44a	32.13±1.18a
		轻污染水稻秸秆+不加石灰	0.61±0.02	7.38±1.12a	3.68±1.73b	26.21±2.08a	31.26±2.67a	31.47±1.47a
		轻污染水稻秸秆+加石灰	0.60±0.03	5.23±0.74b	7.25±2.16a	23.31±2.73a	32.18±3.13a	32.03±1.32a
Cu	重污染土壤	不施用秸秆	172.66±0.74	21.32±2.14a	3.33±1.06a	16.51±1.13a	34.66±1.27b	24.18±2.14a
		重污染水稻秸秆+不加石灰	174.38±1.28	22.98±1.93a	1.63±0.73b	16.13±2.04a	36.79±2.11ab	22.47±1.63a
		重污染水稻秸秆+加石灰	175.16±1.14	16.58±1.18b	4.67±1.24a	17.87±1.67a	37.14±1.13a	23.74±1.78a
	轻污染土壤	不施用秸秆	53.67±0.36	4.65±1.03ab	2.88±0.78ab	18.05±1.28a	25.64±3.13a	48.78±2.66a
		轻污染水稻秸秆+不加石灰	55.14±0.63	5.53±1.14a	1.64±0.55b	17.86±1.49a	27.38±2.63a	47.59±2.47a
		轻污染水稻秸秆+加石灰	54.67±0.76	3.65±0.76b	3.65±0.73a	16.11±1.53a	28.31±2.46a	48.28±3.24a
Zn	重污染土壤	不施用秸秆	551.66±2.74	21.68±1.17a	2.23±1.13ab	33.30±2.27a	14.32±1.67b	28.47±2.28a
		重污染水稻秸秆+不加石灰	554.32±2.68	22.68±1.28a	1.42±0.54b	32.79±3.16a	17.23±1.95ab	25.88±3.11a
		重污染水稻秸秆+加石灰	557.16±2.46	18.23±1.06b	3.65±0.64a	32.91±3.66a	18.23±1.64a	26.98±2.93a
	轻污染土壤	不施用秸秆	152.64±1.68	6.58±1.66a	1.64±0.56ab	30.23±2.11a	10.32±2.41a	51.23±2.27a
		轻污染水稻秸秆+不加石灰	155.68±1.27	7.14±2.43a	0.89±0.43b	29.94±3.23a	13.25±2.63a	48.78±2.94a
		轻污染水稻秸秆+加石灰	156.74±1.03	5.49±1.98a	2.14±0.46a	29.06±2.98a	13.65±2.28a	49.66±3.11a
Pb	重污染土壤	不施用秸秆	144.17±1.65	5.47±1.67a	3.98±1.28ab	35.21±2.27a	15.47±1.94a	39.87±2.43a
		重污染水稻秸秆+不加石灰	147.87±1.66	6.22±1.74a	2.13±0.85b	35.63±2.63a	17.35±2.23a	38.67±2.08a
		重污染水稻秸秆+加石灰	146.87±1.54	7.36±1.69a	4.32±1.14a	32.87±2.11a	18.21±2.46a	37.24±2.17a
	轻污染土壤	不施用秸秆	57.43±1.28	2.32±0.53a	2.99±1.12ab	39.72±2.27a	13.65±1.23b	41.32±3.66a
		轻污染水稻秸秆+不加石灰	59.64±1.16	3.14±0.67a	1.33±0.54b	40.11±3.68a	15.34±2.11ab	40.08±2.97a
		轻污染水稻秸秆+加石灰	60.12±1.08	2.08±0.48a	3.39±0.76a	37.78±3.88a	16.88±1.64a	39.87±3.48a

累(表 11),其中重污染水稻秸秆+不加石灰和轻污染水稻秸秆+不加石灰 2 个处理与对照间的差异达到显著水平,3 个施秸秆+不加石灰处理的籽粒中镉含量比对照增加 10.20%~18.37%;但重污染土壤中施加秸秆均没有增加籽粒中铜、锌、铅的积累。轻污染土壤中施加秸秆对籽粒中重金属积累的影响均不明显(表 11)。多数情况下配施少量石灰可明显降低籽粒中重金属的积累。田间小区试验也表明(表 12),施加秸秆除增加重污染土壤中生产的籽粒中镉的积累,对重污染土壤上生产的籽粒中铜、锌、铅的积累和对轻污染土壤上生产的籽粒中 4 种重金属的积累均无显著影响。

3 讨论

以上结果表明,秸秆还田可改变土壤的化学平衡,从而影响了土壤中 DOC 含量和重金属的化学形

态,但这种影响因土壤重金属污染程度、还田秸秆种类及随还田时间的增加而发生变化。秸秆还田初期土壤中 DOC 含量明显高于对照,这与秸秆中含有大量的纤维素、半纤维素等含碳物质,其腐解过程中易产生小分子有机酸等中间产物有关;由于稻田土壤淹水灌溉,土壤通气性较差,施入稻田中的秸秆分解后容易形成低分子的有机化合物。但土壤中新形成的 DOC 多数是不稳定的,随时间的增加可逐渐被分解,因此,积累在土壤中的 DOC 随时间呈现显著的下降趋势,最后与对照处理的土壤逐渐接近。

上述试验结果也表明,土壤中的水溶性重金属含量几乎与土壤中的 DOC 同步变化,这与 DOC 可与重金属形成水溶性的络合物有关^[4]。一般来说,土壤中重金属的活性与土壤重金属的污染程度、土壤环境条件(包括 pH、DOC、有机质含量、土壤质地)等有关^[23-24]。盆栽试验中试验秸秆有重污染水稻秸秆、轻污染水稻

表 11 秸秆还田对籽粒重金属积累的影响(盆栽水稻收获时)

Table 11 Effects of straw returning on heavy metal accumulation of grains in pot experiment(at harvest time)

土壤	处理	重金属/mg·kg ⁻¹			
		Cd	Cu	Zn	Pb
重污染土壤	不施用秸秆	0.98±0.05b	11.89±1.66ab	51.14±6.23ab	0.54±0.07a
	重污染水稻秸秆+不加石灰	1.16±0.06a	12.21±1.03a	53.90±3.66a	0.53±0.06a
	重污染水稻秸秆+加石灰	0.74±0.04c	9.87±1.01b	44.32±2.97b	0.37±0.06b
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	1.13±0.05a	13.65±1.48a	54.66±3.84a	0.49±0.09ab
	轻污染水稻秸秆+加石灰	0.68±0.04c	10.12±0.92b	43.18±3.32b	0.34±0.08b
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	1.08±0.06ab	13.56±1.54a	52.17±5.12ab	0.52±0.07a
	轻污染油菜秸秆+加石灰	0.74±0.04c	10.03±0.53b	42.68±5.11b	0.35±0.06b
轻污染土壤	不施用秸秆	0.35±0.04a	5.41±0.32a	12.98±1.13a	0.18±0.04ab
	重污染水稻秸秆+不加石灰	0.33±0.06ab	5.47±0.31a	12.32±1.04a	0.19±0.03a
	重污染水稻秸秆+加石灰	0.26±0.05b	4.23±0.24b	9.74±1.07b	0.12±0.02b
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	0.39±0.07a	5.38±0.29a	13.65±1.65a	0.21±0.04a
	轻污染水稻秸秆+加石灰	0.37±0.06a	3.98±0.22b	8.45±1.59b	0.11±0.04b
	轻污染油菜秸秆+不加石灰	0.35±0.05a	5.46±0.31a	11.98±2.42ab	0.22±0.04a
	轻污染油菜秸秆+加石灰	0.24±0.05b	4.22±0.19b	8.12±1.47b	0.13±0.03b

表 12 秸秆还田对籽粒重金属积累的影响(小区试验水稻收获时)

Table 12 Effects of straw returning on heavy metal accumulation of grains in field experiment(at harvest time)

土壤	处理	重金属/mg·kg ⁻¹			
		Cd	Cu	Zn	Pb
重污染土壤	不施用秸秆	1.14±0.22ab	12.36±1.17a	57.48±3.58ab	0.66±0.06a
	重污染水稻秸秆+不加石灰	1.29±0.21a	13.33±1.36a	60.14±3.36a	0.67±0.05a
	重污染水稻秸秆+加石灰	0.83±0.17b	10.48±1.03b	51.27±3.44b	0.48±0.03b
轻污染土壤	不施用秸秆	0.42±0.04ab	6.28±1.12a	14.12±1.27a	0.23±0.03a
	轻污染水稻秸秆+不加石灰	0.48±0.04a	6.63±1.04a	16.87±1.43a	0.26±0.02a
	轻污染水稻秸秆+加石灰	0.38±0.03b	4.53±0.84b	10.39±1.06b	0.16±0.02b

秸秆和轻污染油菜秸秆等3种,其中重污染水稻秸秆因含有较高的重金属含量,还田时其引入土壤的重金属也较多,盆栽试验中施用重污染水稻秸秆处理的籽粒中镉含量一般高于其他处理可能与此有关。结果表明,土壤污染程度较高的土壤中施用秸秆对土壤中重金属的活化作用相对也较强,在重污染土壤中施加秸秆可比对照增加16.57%~24.06%的土壤有效态镉,增加10.20%~18.37%的籽粒中镉的积累,因此,在重金属污染程度较高的土壤中施用秸秆存在较大的污染风险,但这种影响在轻度污染的土壤中相对不明显。

秸秆还田施入土壤的有机物质可随时间发生变化,其在土壤中降解及腐殖化过程的产物有DOC和腐殖质,DOC分子量较低,其含有大量的羧基、羟基、羰基等官能团对土壤中重金属具有较强的络合能力,可促进土壤重金属的活化^[31],而腐殖质的形成可增加对土壤中活性重金属的吸附与固定,从而降低重金属

的活性。在秸秆还田初期,由于形成的DOC较多,而相应的腐殖质形成数量较少,土壤中的重金属主要以活化过程为主;但至试验后期,由于DOC的逐渐分解,而腐殖质形成的增加,土壤中重金属以降活(活性减弱)过程为主,这就是为什么土壤中水溶性重金属随试验时间下降的原因。由于水稻籽粒的形成主要在水稻生长后期,这一时期土壤中DOC及水溶性重金属含量已降低至较低水平,因此因秸秆还田对籽粒中重金属的积累影响相对较小。对小区试验重金属的化学形态分析也表明,在试验结束时秸秆还田土壤显示出重金属形态由交换态向有机物结合态转变的趋势,这显然与施加秸秆后土壤中腐殖质增加有关,所以,至试验后期施秸秆处理的土壤多数重金属有效态含量并没有比对照高。

另外,施用轻污染油菜秸秆的土壤水溶性镉含量和籽粒中镉的积累一般要低于施用轻污染水稻秸秆

的土壤(表 4),这可能与油菜秸秆的化学组成与水稻秸秆存在差异有关。有研究报道^[25-26],油菜等十字花科植物秸秆含有丰富的巯基化合物,其能与镉发生螯合作用,从而降低了土壤中镉的活性和生物有效性。

试验结果还表明,在秸秆还田的同时,配施石灰对减弱重金属危害是有效的,无论是试验前期还是后期,配施石灰均可降低 DOC 的水平和土壤有效态重金属含量及籽粒中重金属的积累。这一方面可能与施用石灰可增强土壤微生物活性,加速对 DOC 的分解有关,另一方面,石灰本身可提高土壤的 pH 值^[23-24],降低土壤中重金属的活性和生物有效性。对土壤重金属的化学形态分析也证实,石灰的施用可促进交换态重金属向碳酸盐结合态重金属转变。

4 结论

(1) 秸秆还田对土壤重金属的影响因土壤重金属污染程度、还田秸秆种类及还田时间的不同有所差别。秸秆还田初期可显著增加了水田土壤中 DOC 与水溶性重金属的含量,水溶性重金属含量以重度污染土壤增幅较为明显。随着秸秆还田时间的增加对土壤重金属的活性的影响逐渐变得不明显。

(2) 油菜秸秆中因含丰富的巯基化合物,其还田后土壤中水溶性重金属含量低于水稻秸秆还田。

(3) 除重污染水稻秸秆还田可轻微增加水稻籽粒中镉的积累外,秸秆还田对水稻籽粒铅、铜、锌积累的影响不明显,轻度污染水稻秸秆还田与油菜秸秆还田对水稻籽粒镉积累的影响也较小。

(4) 秸秆还田配施石灰可显著降低土壤中水溶性重金属的含量,降低水稻籽粒中重金属的积累。

参考文献:

[1] 李长生,肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5):493-503.
LI Chang-sheng, XIAO Xiang-ming, Frolking S, et al. Greenhouse gas emissions from croplands of China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5):493-503. (in Chinese)

[2] 张岳芳,郑建初,陈留根,等. 麦秸还田与土壤耕作对稻季 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6):2334-2338.
ZHANG Yue-fang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of wheat straw returning and soil tillage on CH₄ and N₂O emissions in paddy season[J]. *Ecology and Environment*, 2009, 18(6):2334-2338. (in Chinese)

[3] 邹国元,张福锁,陈新平,等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6):47-50.
ZOU Guo-yuan, ZHANG Fu-suo, CHEN Xin-ping, et al. Effect of straw

addition on denitrification in upland soil[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2001, 3(6):47-50. (in Chinese)

[4] 朱玉芹,岳玉兰. 玉米秸秆还田培肥地力研究综述[J]. 玉米科学, 2004, 12(3):106-108.
ZHU Yu-qin, YUE Yu-lan. Review of effects of corn straw return on soil fertility[J]. *Journal of Maize Science*, 2004, 12(3):106-108. (in Chinese)

[5] 洪春来,魏幼璋,黄锦法,等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(6):627-633.
HONG Chun-lai, WEI You-zhang, HUANG Jin-fa, et al. Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment[J]. *Journal of Zhejiang University(Agricultural & Life Sciences)*, 2003, 29(6):627-633. (in Chinese)

[6] 吴家梅,纪雄辉,彭 华,等. 稻草还田方式下对双季稻田耕层土壤有机碳积累的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10):2360-2365.
WU Jia-mei, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effect of patterns of straw returning to soil on the cultivated soil organic carbon accumulation in double-crop rice system[J]. *Ecology and Environment*, 2010, 19(10):2360-2365. (in Chinese)

[7] 李成芳,寇志奎,张枝盛,等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11):2362-2367.
LI Cheng-fang, KOU Zhi-kui, ZHANG Zhi-sheng, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2362-2367. (in Chinese)

[8] 路文涛,贾志宽,张 鹏,等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):522-528.
LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):522-528. (in Chinese)

[9] 区惠平,何明菊,黄 景,等. 稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(24):6812-6820.
OU Hui-ping, HE Ming-ju, HUANG Jing, et al. Effect of no-tillage and rice straw manuring on the combined forms of humus and microbial activities in paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24):6812-6820. (in Chinese)

[10] 钟 杭,朱海平,黄锦法. 稻麦等秸秆全量还田对作物产量和土壤的影响[J]. 浙江农业学报, 2002, 14(6):344-347.
ZHONG Hang, ZHU Hai-ping, HUANG Jin-fa, et al. Effects of total wheat and rice straw application on the crop yield and the soil properties[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2002, 14(6):344-347. (in Chinese)

[11] 刘义国,林 琪,王月福,等. 秸秆还田与氮肥耦合对冬小麦光合特性及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1):42-44.
LIU Yi-guo, LIN Qi, WANG Yue-fu, et al. Effects of straw-return and nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1):42-44. (in Chinese)

- [12] 李孝勇, 武际, 朱宏斌, 等. 秸秆还田对作物产量及土壤养分的影响[J]. 安徽农业科学, 2003, 31(5): 870-871.
LI Xiao-yong, WU Ji, ZHU Hong-bin, et al. Effect of straw returned into field on crop yield and soil fertility[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, 31(5): 870-871. (in Chinese)
- [13] 余贵芬, 蒋新, 孙磊, 等. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 770-776.
YU Gui-fen, JIANG Xin, SUN Lei, et al. A review for effect of organic substances on the availability of cadmium in soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 770-776. (in Chinese)
- [14] 王良梅, 周立祥, 占新华, 等. 水田土壤中水溶性有机物的动态及对土壤中重金属活性的影响: 田间微区试验[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5): 158-161.
WANG Gen-mei, ZHOU Li-xiang, ZHAN Xin-hua, et al. Dynamics of dissolved organic matter and its effect on metal availability in paddy soil; Field micro-plot trials[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5): 158-161. (in Chinese)
- [15] 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): 168-171.
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): 168-171. (in Chinese)
- [16] 陈国华. 秸秆还田对土壤 Cd 活度及水稻 Cd 积累的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
CHEN Guo-hua. Effect of straw returning on soil Cd activity and Cd accumulation in rice plant[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese)
- [17] 高秀丽. 重金属污染及污染秸秆施用对土壤质量影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
GAO Xiu-li. Effects of heavy metal pollution and polluted straw application on soil quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [18] 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. (in Chinese)
- [19] Alvarenga P, Goncalves A P, Fernandes R M, et al. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization (1) Effects on soil chemical characteristics[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(10): 1292-1300.
- [20] Susan T, John R H, Mark A N, et al. Remediation of metal polluted mine soil with compost: Co-composting versus incorporation[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(2): 690-697.
- [21] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978, 1-320.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Soil physical and chemical analyses [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978; 1-320. (in Chinese)
- [22] Spark D L. Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods[M]. Madison: SSSA and ASA, 1996: 703-919.
- [23] 王晓琦, 唐琦, 黄一帆, 等. 两种生物炭对污染土壤铜有效性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 361-368.
WANG Xiao-qi, TANG Qi, HUANG Yi-fan, et al. Effects of two kinds of biochars on soil Cu availability in contaminated soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(4): 361-368. (in Chinese)
- [24] 龙思斯, 杨益新, 宋正国, 等. 三种类型阻控剂对不同品种水稻富集镉的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5): 459-465.
LONG Si-si, YANG Yi-xin, SONG Zheng-guo, et al. Effects of three inhibitors on the accumulation of cadmium in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5): 459-465. (in Chinese)
- [25] Mishra S, Tripathi R D, Srivastava S, et al. Thiol metabolism play significant role during cadmium detoxification by *Ceratophyllum demersum* L.[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100: 2155-2161.
- [26] Hrustiger S C. Phytochelating and their role in heavy metal detoxification[J]. *Plant Physiology*, 2000, 123: 25-32.