

镉污染稻草还田对土壤镉形态转化的影响

曹晓玲^{1,2}, 罗尊长^{2*}, 黄道友¹, 朱奇宏¹, 刘守龙¹, 饶中秀¹, 任雪菲¹, 席园¹

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

摘要:采用模拟培养实验,研究了镉污染稻草还田后清洁土壤(pH=4.72)和镉污染土壤(pH=7.90)中有效态镉含量及镉形态分布的变化特征。结果表明:添加稻草和淹水培养使土壤 pH 值向 6.0~7.5 的区间转变,并显著提高了土壤可溶性有机碳(DOC)含量。清洁土壤添加镉污染稻草后,土壤 DTPA(Diethylene triamine pentacetate acid)提取态 Cd 含量增加 23.5%~225.0%,土壤酸提取态和可还原态镉的相对比例显著提高,而残渣态和可氧化态镉的比例则相对降低,其效果随稻草添加量的增加显著增强;镉污染土壤添加镉污染稻草后,DTPA 提取态镉仅在培养初期(2 d)略有提高,随培养时间的延长,DTPA 提取态镉含量显著降低(28.6%~41.1%),且添加稻草促使酸提取态镉向可还原态镉和残渣态镉转化。研究表明,镉污染稻草进入清洁土壤会带来镉污染的扩散风险,而进入供试污染土壤后则能在一定程度上降低污染土壤中镉的有效性。

关键词:稻草还田;Cd 污染;清洁土壤;污染土壤;土壤 Cd 形态

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)09-1786-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.09.012

Effects of Cd-contaminated Rice Straw Incorporation on Transformation of Cd Forms in Soils

CAO Xiao-ling^{1,2}, LUO Zun-chang², HUANG Dao-you¹, ZHU Qi-hong¹, LIU Shou-long¹, RAO Zhong-xiu¹, REN Xue-fei¹, XI Yuan¹

(1.Key Laboratory for Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, CAS, Hunan 410125, China; 2.Hunan Soil and Fertilizer Institute, Hunan 410125, China)

Abstract: To investigate the effects of Cd-contaminated rice straw incorporation on the Cd fractions and the available Cd contents in soils (a non-contaminated soil, pH=4.72 and a Cd-contaminated soil, pH=7.90) an incubation experiment (28 d) was conducted. The results indicated that after the addition of rice straw (both contaminated and clean rice straw) the pH in both soils were neutralized (6.0 to 7.5) and the contents of dissolved organic carbon (DOC) in both soils were sharply increased in the first 2 d and reduced gradually in the rest incubation period. At the same time, Cd-contaminated rice straw incorporation significantly increased the DTPA extractable Cd by 23.5%~225.0% and the proportions of acid-extractable and reducible Cd, and relatively decreased the proportions of residual and oxidizable Cd in clean soil. These effects were enhanced with the increasing of Cd-contaminated rice straw added. Whereas, in Cd-contaminated soil, the DTPA extractable Cd was slightly increased firstly, and then decreased (by 28.6%~41.1%) continually during the rest incubation period (2~28 d) when Cd-contaminated rice straw was applied. Moreover, the addition of Cd-contaminated rice straw reduced acid-extractable Cd and simultaneously increased reducible Cd and residual Cd in Cd-contaminated soil. In conclusion, the application of Cd-contaminated rice straw may induce Cd-pollution risk in clean acidic soil and contrarily may reduce the availability of Cd in Cd-contaminated alkaline soil.

Keywords: rice straw incorporation; Cd pollution; clean soil; Cd-contaminated soil; soil Cd fractions

镉(Cd)是人体非必需且生物毒性最强的重金属元素之一。日益加剧的土壤镉污染严重威胁了我国

农产品质量和人体健康,目前,我国镉污染农田面积和年产镉超标农产品数量,分别达到 28 万 hm² 和 150 万 t^[1]。然而,在镉污染农田上,作物秸秆中的重金属含量大多高于可食部分,以水稻为例,杂交水稻叶片中镉含量是精米中的 4 倍,而茎中镉含量是精米中的 20 倍左右^[2]。我国当前的农作物秸秆年产生量为 6~7 亿 t,其中稻草约 2 亿 t,秸秆还田作为秸秆综合利用和补充农田土壤有机质的重要方式,其比例已达到

收稿日期:2013-02-22

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAD05B06,2012BAJ24B03);
湖南省科技重大专项(2011FJ1002-3)

作者简介:曹晓玲(1987—),女,山东临沂人,在读硕士,主要从事重金属的环境行为及其控制方面的研究。

E-mail:caoxiaoling0919@163.com

* 通信作者:罗尊长 E-mail:luozunchang@vip.sohu.com

20%以上,还田后其中的重金属也会随之进入土壤^[3-5]。

关于秸秆还田对土壤中镉的有效性和形态变化的影响已有报道。有研究表明,秸秆等有机物料的施用,可以促使土壤中 Cd 等重金属元素从有效性较高的形态(交换态)向有效性较低的形态(有机结合态、铁锰氧化物结合态等)转化,从而降低土壤中 Cd 等重金属的植物有效性,减少植物对其吸收^[6-8]。与之相对的,也有研究者发现,施用秸秆等有机物料,促进了土壤中 Cd 等重金属元素的溶出,增加了农作物对 Cd 等重金属元素的吸收^[9-10]。然而,这些研究大多只考虑了秸秆施用后,土壤性质变化引起的 Cd 形态分布和有效性的改变,并未考虑可能随秸秆进入土壤中的 Cd。贾乐等^[4]研究了旱作条件下,高 Cd 含量作物秸秆还田后对污染土壤中 Cd 形态转化和植物有效性的影响,并指出随秸秆进入土壤的 Cd 对土壤总 Cd 的贡献率低于 4%,秸秆还田对 Cd 形态和有效性的影响主要是由其改变的土壤性质引起的。考虑到稻草对 Cd 的积累能力较强,以及稻作淹水条件的差异,本文采用模拟培养实验,以不同 Cd 含量土壤为对象,以清洁稻草为对照,研究镉污染稻草还田对土壤中镉形态转化的影响,以期为镉污染稻草的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试镉污染土壤采自湖南株洲,土壤类型为潮土;清洁土壤采自湖南桃源,土壤类型为红壤。土样采回后,去除杂物,经自然风干后过 2 mm 筛备用,其基本性质见表 1。

供试的镉污染稻草和清洁稻草分别采自湖南株洲和桃源,于 60 ℃烘干至恒重,用粉碎机粉碎后过 1 mm 筛备用,其基本性质见表 2。

1.2 实验方法

土壤培养实验在室外进行。试验用盆上口直径 25 cm,底部直径 20 cm,盆高 20 cm,每盆装土 5 kg(干土)。清洁土壤设置 6 个处理:不添加稻草和加 1%、2%、3%、4%、5%镉污染稻草(以干土的质量分数计,下同)。污染土壤设置 11 个处理:不添加稻草,加 1%、2%、3%、4%、5%清洁稻草,加 1%、2%、3%、4%、5%污染稻草。把稻草和土壤充分混匀,每个处理 3 次重复。培养期内保持淹水状态(保证土层表层覆水 2~3 cm),培养时间为 28 d,培养期内日平均气温约为 26.8 ℃。分别于第 2、7、14、21、28 d 取样,采样时将土充分混匀,剩余土继续培养,将所取的土壤样品风干后过 2 mm 筛备用。

1.3 样品测定

土壤 pH 值采用 1:2.5(W/V)土水比浸提,pH 计直接测定;可溶性有机碳(DOC)用 K₂SO₄ 提取,TOC 仪(Phoenix-8000)测定;土壤中有有效态镉用 DTPA (Diethylene triamine pentacetate aced)溶液浸提(pH=7.3),ICP-OES(Varian 720-ES)测定;土壤 Cd 形态用改进后的 BCR 连续提取法^[11]提取,ICP-OES 测定;土壤全镉采用 HNO₃-HCl-HClO₄ 消解,ICP-OES 测定。在测定土壤 Cd 含量时,采用土壤成分分析标准物质 GBW(E)070011 和 GBW07457,作为标准曲线基体和控制样。

2 结果与分析

2.1 添加稻草对土壤 pH 值和 DOC 含量的影响

由图 1 可以看出,与对照相比,所有添加镉污染稻草处理的清洁土壤其 pH 均明显升高。随培养时间的推移,包括对照在内所有处理的土壤 pH 均逐渐升高,起始 pH 与最终 pH 的差值在 0.96~1.53 之间。向污染土壤中添加镉污染稻草,在整个培养期间,各添

表 1 供试土壤的基本性质(0~20 cm)

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soils(0~20 cm)

土壤	pH(H ₂ O)	有机 C/g·kg ⁻¹	全 N/g·kg ⁻¹	全 P/g·kg ⁻¹	全 K/g·kg ⁻¹	全 Cd/mg·kg ⁻¹
清洁土壤	4.72	22.59	1.33	0.97	15.37	0.37
污染土壤	7.90	38.79	2.11	1.12	12.71	2.88

表 2 供试稻草的基本性质(干稻草)

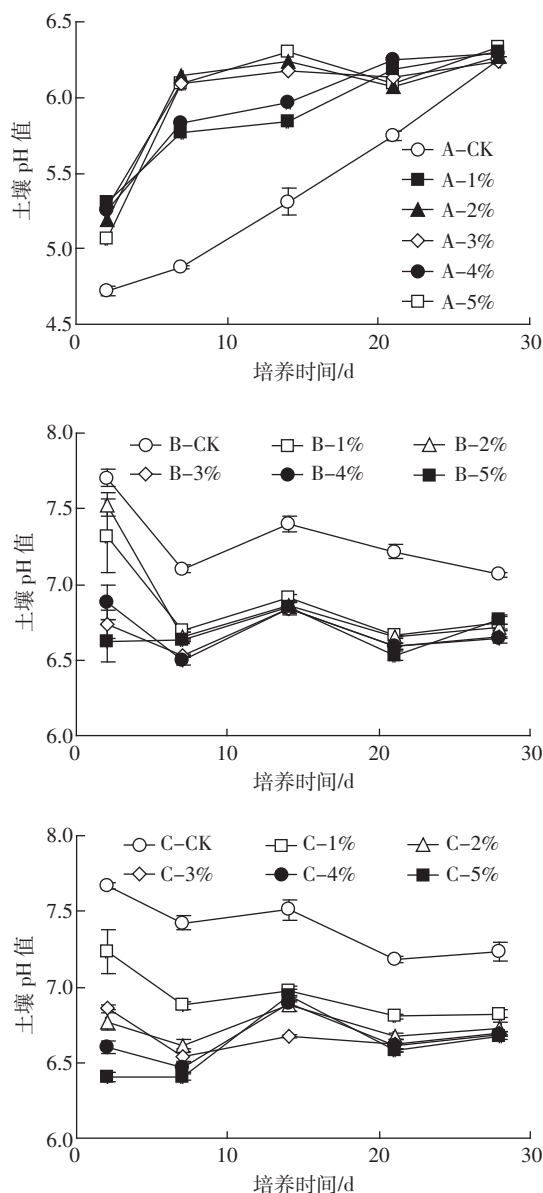
Table2 Basic physical and chemical properties of tested rice straws(Dry rice straws)

稻草	全 C/g·kg ⁻¹	全 N/g·kg ⁻¹	全 P/g·kg ⁻¹	全 K/g·kg ⁻¹	C/N	全 Cd/mg·kg ⁻¹
清洁稻草	377.22	9.19	1.30	28.27	41.05	0.10
污染稻草	394.13	10.19	1.53	25.73	38.67	6.66

加稻草处理的土壤 pH 明显低于对照组。在培养初期,随着时间的延长,土壤 pH 值稍有降低的趋势。污染土壤添加清洁稻草培养中,土壤 pH 的变化过程同其添加镉污染稻草的变化过程基本一致。

从图 2 可以看出,在没有添加稻草的情况下,随培养时间的延长,清洁土壤中 DOC 变化幅度不大,基本维持在 $(164.5 \pm 25.9) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而将镉污染稻草添加到清洁土壤后,在整个培养过程中,与对照相比,各稻

草处理的 DOC 浓度均有增加,且随着稻草用量的提高增加效果越明显。随着培养时间的延长,添加稻草处理的土壤 DOC 浓度有下降的趋势,且随着稻草添加量的增加降幅越大。添加镉污染稻草也大幅度提高了污染土壤中 DOC 含量,且效果随稻草添加量的增加而增强。随培养时间延长,土壤中 DOC 含量呈下降趋势。向污染土壤中添加清洁稻草和污染稻草,其 DOC 含量变化趋势基本一致。

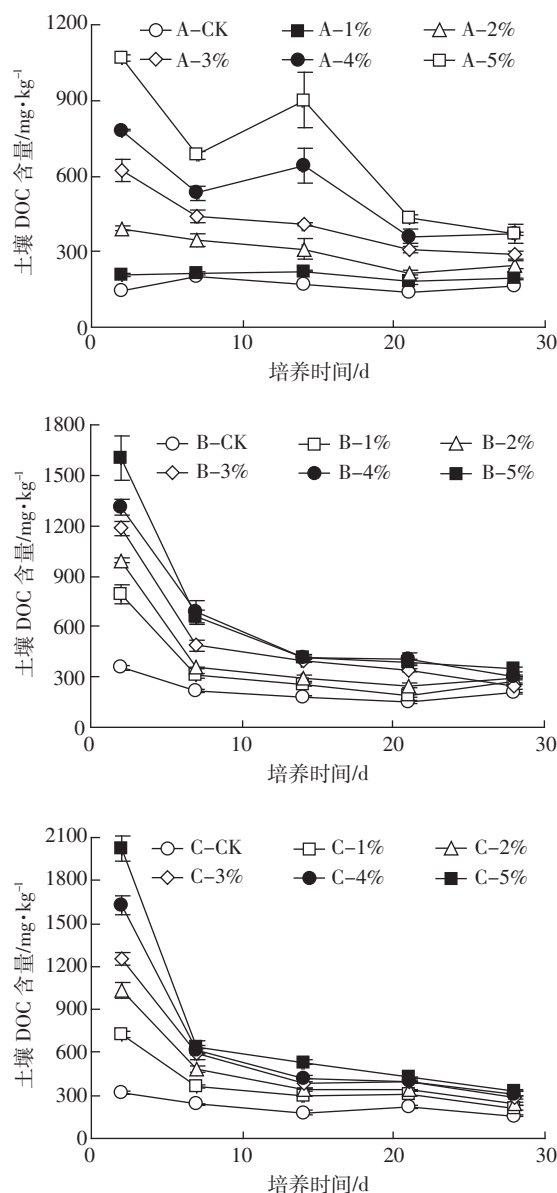


A: 清洁土壤+镉污染稻草; B: 污染土壤+镉污染稻草;
C: 污染土壤+清洁稻草

A: clean soil+Cd-contaminated rice straw; B: contaminated soil+ Cd-contaminated rice straw; C: contaminated soil+clean rice straw

图 1 添加稻草对土壤 pH 值的影响

Figure 1 Effects of rice straw addition on soil pH



A: 清洁土壤+镉污染稻草; B: 污染土壤+镉污染稻草;
C: 污染土壤+清洁稻草

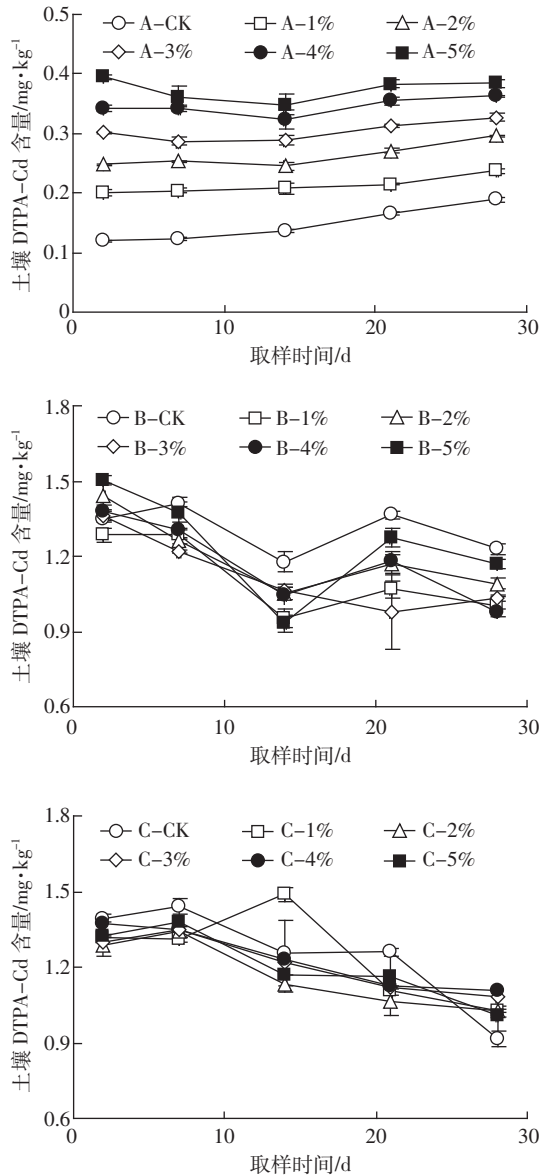
A: clean soil+Cd-contaminated rice straw; B: contaminated soil+Cd-contaminated rice straw; C: contaminated soil+clean rice straw

图 2 添加稻草对土壤可溶性有机碳(DOC)含量的影响

Figure 2 Effects of rice straw addition on contents of DOC in soils

2.2 添加稻草对土壤 DTPA-Cd 含量的影响

图 3 是添加镉污染稻草后两种土壤中 DTPA-Cd 的变化规律。不添加稻草处理,土壤中 DTPA-Cd 含量维持在 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。与对照相比,向清洁土壤中添加污染稻草可以显著提高土壤中 DTPA-Cd 含量,增幅达 23.5%~225.0%,且效果随着稻草添加量的增加而增强。随着培养时间的增加,DTPA-Cd 含量没



A: 清洁土壤+镉污染稻草; B: 污染土壤+镉污染稻草;
C: 污染土壤+清洁稻草

A: clean soil+Cd-contaminated rice straw; B: contaminated soil+Cd-contaminated rice straw; C: contaminated soil+clean rice straw

图 3 添加稻草土壤 DTPA 提取态 Cd 含量的影响

Figure 3 Effects of straw addition on contents of DTPA extractable Cd in soils

有明显的变化。

向污染土壤中添加镉污染稻草,培养第 2 d,除了 1%稻草处理,其他各处理 DTPA-Cd 含量均高于对照组 ($1.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其中 5%稻草处理 DTPA-Cd 含量增加最明显,增幅为 11.6%。培养 7 d 后,与对照相比,添加稻草处理的 DTPA-Cd 含量均降低。随着培养时间的延长,各稻草处理 DTPA-Cd 含量有逐渐降低的趋势,降幅为 28.6%~41.1%。向污染土壤中添加清洁稻草,培养前期,包括对照在内各处理的土壤 DTPA-Cd 含量没有显著差异 ($P>0.05$)。培养 14 d 后,各处理土壤 DTPA 镉含量明显低于对照组,降幅为 9.9%~22.0%,随培养时间的延长,各处理的土壤 DTPA-Cd 含量有降低的趋势。

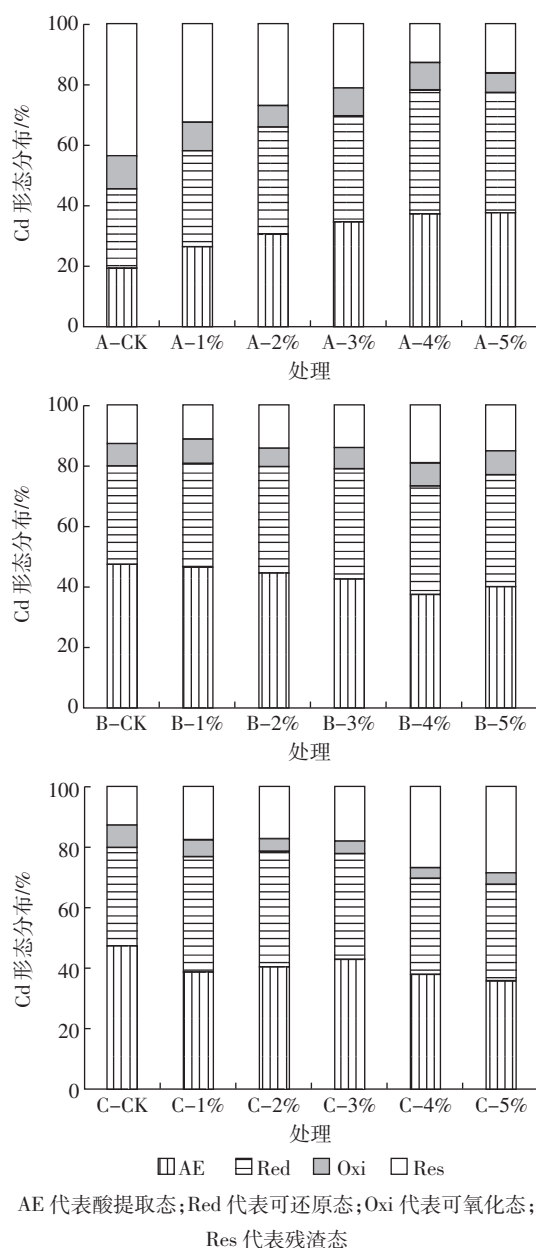
2.3 添加稻草对土壤镉形态分布的影响

采用 BCR 连续提取法对培养结束时(第 28 d)各处理土壤镉形态分布的分析显示(图 4),未添加稻草的清洁土壤中,镉表现为残渣态镉(43%)>可还原态镉(26%)>酸提取态镉(20%)>可氧化态镉(11%)。添加镉污染稻草,与对照相比,显著提高了清洁土壤中酸提取态镉和可还原态镉的比例,增幅分别为 67.5%~254.8%和 37.9%~161.4%,其效果随添加量的增加而增强;可氧化态镉和残渣态镉的比例显著降低,降幅为 11.9%~34.4%和 11.9%~52.0%,其效果均随稻草添加量的增加而增强。

在镉污染土壤中,镉主要是以酸提取态镉和可还原态镉的形式存在,占 80%左右。与对照相比,添加镉污染稻草,使得土壤中酸提取态镉含量稍有降低,降幅为 7.9%~10.0%,同时,显著增加了可还原态镉和残渣态镉含量(1%处理除外),增幅分别为 5.0%~23.4%和 18.2%~64.4%,而对可氧化态镉含量没有明显影响。添加清洁稻草后,土壤镉形态分布也产生相似变化规律:酸提取态镉和可氧化态镉比例的降幅分别为 9.5%~18.8%和 23.5%~51.9%,可还原态镉比例升高 6.1%~16.1%,残渣态镉的比例显著提高,增幅达 39.6%~149.6%。

3 讨论

添加稻草和淹水后,两种土壤 pH 值呈现截然不同的变化规律。一般认为,土壤淹水和添加新鲜有机物料条件下,受土壤氧化还原条件和产生的有机酸的影响,土壤 pH 值均趋向于中性范围,可由原来的 4.6~8.6 向 6.0~7.5 变动^[12],这在本研究中得到了验证。添加稻草后土壤 DOC 含量均呈现先快速增加,再



A: 清洁土壤+镉污染稻草; B: 污染土壤+镉污染稻草;

C: 污染土壤+清洁稻草

A: clean soil+ Cd-contaminated rice straw; B: contaminated soil+ Cd-contaminated rice straw; C: contaminated soil+ clean rice straw

图4 添加稻草对土壤镉形态分布的影响

Figure 4 Effects of rice straw addition on distribution of Cd in soils

逐渐降低的变化趋势。这主要是因为,新鲜有机物料加入土壤初期,微生物对外源有机物料的利用率较高,而DOC主要来源于有机物料的分解产物,随培养时间的延长,稻草向较为稳定的土壤腐殖质组分转化,土壤DOC含量随之降低^[13]。两种土壤DOC变化规律的差异可能主要受土壤pH值等性质的影响,在较高pH值土壤中,DOC易于和土壤中的钙、镁化合

物发生中和反应^[14],所以其DOC含量降低的速率和幅度均高于酸性土壤。

土壤中Cd的植物有效性的评价方法可分为一步提取法和连续提取法,其中DTPA提取法和BCR连续提取法是较为常用的两种方法^[14-15]。清洁土壤添加Cd污染稻草后,虽然培养过程中土壤pH值显著提高,但DTPA-Cd含量也显著升高,且效果随着稻草添加量的增加而显著增强。BCR连续提取法的结果与之一致,有效性较高的酸提取态和可还原态Cd的比例显著提高,残渣态Cd比例显著降低。这主要是由于土壤本底Cd含量低($0.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),随污染稻草进入土壤的Cd对土壤总Cd的贡献率较高,其中5%污染稻草处理的土壤全Cd含量可达到 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,这同时也表明随污染稻草进入土壤的Cd在短期内可能保持较高有效性^[4]。Cd污染旱作物秸秆还田后的类似效果已有报道,Cd污染玉米和菜豆秸秆还田后,可以显著提高土壤中DTPA提取态Cd的含量,显著降低白菜生物量,还可能提高白菜地上部Cd的含量^[4]。由此可见,镉污染稻草进入清洁土壤后会显著提高土壤全镉(增幅为18%~78%)和有效性较高形态镉的含量,造成明显的镉污染风险,因此,需防止镉污染稻草进入清洁土壤造成镉污染的扩散。

污染土壤添加稻草后,土壤中镉形态的变化与清洁土壤明显不同。添加清洁稻草和污染稻草后,仅在培养初期(2d)DTPA提取态Cd含量变化有一定差异,高量(5%)污染稻草处理略有增加,随着培养时间的延长,两种稻草对DTPA提取态Cd含量的影响相似,均比培养初期显著降低,添加稻草处理均低于对照处理。BCR连续提取法的结果也显示,在污染土壤中添加镉污染稻草和清洁稻草,都使土壤中酸提取态和可还原态镉的比例降低,而残渣态和可氧化态镉的比例显著提高。张亚丽等^[16]也观测到了类似的现象,施用稻草等有机物料后土壤有效态Cd含量显著降低了30%~50%。因为污染土壤Cd的本底含量高达 $2.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,污染稻草中的Cd对土壤总Cd的贡献率低于10%,稻草腐解过程中土壤性质变化对Cd形态的影响效果可能高于新进入Cd的贡献,所以施用污染稻草和清洁稻草均表现为钝化效果。这种钝化的作用机制主要包括两个方面:一是稻草腐解产生的活性物质和官能团,增强了土壤对Cd的吸附固定能力^[17];二是淹水条件和施用稻草产生的还原条件,提高了土壤中无定形铁锰氧化物的含量和对Cd的吸附固定^[18]。可见,添加清洁稻草可以有效的降低污

染土壤中重金属Cd的活性;添加镉污染稻草虽然会增加污染土壤中总镉的含量,却降低了镉的活性,但长期施用是否会带来负面的效果,还有待研究。

土壤pH值和可溶性有机碳(DOC)均是影响土壤中重金属形态分布的重要因素,前期研究大多表明,随pH值的降低土壤中的镉向有效性较高的形态转化,而DOC可以通过与镉等重金属离子发生络合和螯合作用,改变镉的赋存形态^[10,19]。然而,所选取的两种土壤虽然土壤pH值和DOC含量均存在一定的差异,但由于土壤本底镉含量差异较大,添加污染稻草后,随之进入土壤中的镉占土壤总镉的比例不大,呈现出污染稻草施用对土壤中镉形态转化的影响主要是受土壤本底镉含量制约,至于土壤pH值等性质对污染稻草施用后土壤镉形态转化的影响,还有待进一步探讨。

4 结论

在短期培养过程中(28 d),向酸性的清洁土壤添加镉污染稻草,显著增加了对植物有效性高的酸提取态镉的含量,同时,大幅度提高了DTPA-Cd的含量,其效果均随稻草添加量的增加而显著增强,因此,需禁止镉污染稻草进入酸性的清洁土壤,防止镉污染的扩散。

偏碱性的镉污染潮土在施用镉污染稻草后,仅在培养初期使土壤中DTPA-Cd含量有所增加,总体来看,添加镉污染稻草和清洁稻草均使得该土壤中酸提取态镉向有效性较低的可还原态和残渣态镉转化,而且由于添加清洁稻草不会向污染土壤中引入镉,因而在镉污染的偏碱性土壤中可以通过施用一定量的清洁稻草来降低土壤中镉的有效性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵步洪, 张洪熙, 奚岭林, 等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 306-312.
ZHAO Bu-hong, ZHANG Hong-xi, XI Ling-lin, et al. Concentrations and accumulation of Cadmium in different organs of hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(3): 306-312.
- [3] 余冬立, 王凯荣, 谢小立, 等. 稻草还田的土壤肥力与产量效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 100-104.
SHE Dong-li, WANG Kai-rong, XIE Xiao-li, et al. Impact of incorporation of rice straw into the soil on soil fertility and yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(1): 100-104.
- [4] 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.
- [5] Perronet K, Schwartz C, Gérard E, et al. Availability of cadmium and zinc accumulated in the leaves of *Thlaspi caerulescens* incorporated into soil[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227: 257-263.
- [6] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 212-218.
ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, JIANG Yang. Effects of organic manure on the amelioration of Cd-polluted soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 212-218.
- [7] 王果, 陈建斌, 高山, 等. 稻草和紫云英对土壤外源铜的形态及生态效应的影响[J]. 生态学报, 1999, 19(4): 551-556.
WANG Guo, CHEN Jian-bin, GAO Shan, et al. Influence of application of rice straw and Chinese mile vetch on the species and ecological effect of added copper in two soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(4): 551-556.
- [8] 胡星明, 袁新松, 王丽平, 等. 磷肥和稻草对土壤重金属形态微生物活性和植物有效性的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(1): 77-82.
HU Xing-ming, YUAN Xin-song, WANG Li-ping, et al. Effects of phosphate fertilizer and rice straw on soil heavy metal fraction, microbial activity and phytoavailability[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(1): 77-82.
- [9] 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.
- [10] 单玉华, 李昌贵, 陈晨, 等. 施用秸秆对淹水土壤镉铜溶出的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1362-1366.
SHAN Yu-hua, LI Chang-gui, CHEN Chen, et al. Effects of straw incorporation on the solubility of cadmium and copper in flooded soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1362-1366.
- [11] Mossop K F, Davidson C M. Comparison of original and modified BCR sequential extraction procedures for the fractionation of copper, iron, lead, manganese and zinc in soils and sediments[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, 478: 111-118.
- [12] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] 葛云辉, 邹冬生, 苏以荣, 等. 外源碳酸钙和稻草对喀斯特地区土壤活性有机碳的影响[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2012, 38(3): 314-318.
GE Yun-hui, ZOU Dong-sheng, SU Yi-rong, et al. Influence of exoge-

- nous calcium carbonate and rice straw on active organic carbon of Karst soils[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Science*, 2012, 38(3):314-318
- [14] 李永涛, 刘科学, 张 池, 等. 广东大宝山地区重金属污染水田土壤的 Cu、Pb、Zn、Cd 全量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(6):1110-1114.
- LI Yong-tao, LIU Ke-xue, ZHANG Chi, et al. Relationships between total and DTPA extractable contents of Cu, Pb, Zn, Cd in trace metal-contaminated paddy soils of Dabaoshan, Guangdong[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6):1110-1114.
- [15] 汤嘉南, 彭 娜, 涂常青, 等. BCR 法研究铜矿区周边农田重金属形态分布[J]. *嘉应学院学报: 自然科学*, 2011, 29(8):51-54.
- TANG Jia-nan, PENG Na, TU Chang-qing, et al. Assessment of heavy metals pollution in Yu-Water Copper by modified BCR extraction procedure[J]. *Journal of Jiaying University: Natural Science*, 2011, 29(8):51-54.
- [16] 张亚丽, 沈其荣, 谢学俭, 等. 猪粪和稻草对镉污染黄泥土生物活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11):1997-2000.
- ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, XIE Xue-jian, et al. Effect of pig manure and rice straw on biological activity of Cd-contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1997-2000.
- [17] 王意锬, 张焕朝, 郝秀珍, 等. 有机物料在重金属污染农田土壤修复中的应用研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(5):1275-1280.
- WANG Yi-kun, ZHANG Huan-chao, HAO Xiu-zhen, et al. A review on application of organic materials to the remediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5):1275-1280.
- [18] 张大庚, 依艳丽, 李亮亮, 等. 水分和有机物料对土壤锌-镉形态及化学性质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4):939-944.
- ZHANG Da-geng, YI Yan-li, LI Liang-liang, et al. Effects of water and organic materials on cadmium and zinc forms and chemical properties in compound pollution soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):939-944.
- [19] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12):1499-1502.
- HAN Chun-mei, WANG Lin-shan, GONG Zong-qiang, et al. Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12):1499-1502.