

湛方栋, 陈建军, 秦 丽, 等. 镉铅污染的玉米秸秆还田对蚕豆生长、养分和镉铅含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4):661–668.

ZHAN Fang-dong, CHEN Jian-jun, QIN Li, et al. Effects of applying Cd/Pb contaminated maize stalks on growth and nutrient and Cd and Pb content of faba bean[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):661–668.

镉铅污染的玉米秸秆还田对蚕豆生长、养分和镉铅含量的影响

湛方栋, 陈建军, 秦 丽, 王吉秀, 李 元*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:通过盆栽试验,模拟铅锌矿区镉铅污染的玉米秸秆还田,研究玉米秸秆的不同部分(根茬、茎秆、叶片和整株)还田对土壤速效养分、蚕豆生长、养分(N、P和K)、Cd含量、Pb含量的影响,结果表明:玉米秸秆还田增加土壤的碱解N和速效K的含量,增幅分别为14%~58%和36%~134%,但对土壤速效P的含量影响不显著。玉米秸秆还田显著增加蚕豆地上部养分的含量,其中叶片还田使N、P和K含量分别增加28%、40%和102%,根茬还田使P含量增加42%,茎秆和整株还田使K含量增加61%和98%;但对蚕豆地下部养分含量没有显著影响(仅叶片还田增加蚕豆地下部的P含量)。玉米秸秆还田导致蚕豆叶片叶绿素a和叶绿素b的含量显著下降,对蚕豆株高和生物量的影响小,仅叶片还田增加蚕豆的株高、茎秆还田增加蚕豆地上部的生物量。污染玉米秸秆还田极显著增加蚕豆地上部的Cd和Pb、地下部的Cd含量,分别提高了56%~76%、50%~133%和204%~507%,叶片和整株还田的蚕豆地上部Pb和地下部Cd的含量增幅较大。综上可知,镉铅污染的玉米秸秆还田在提高土壤肥力、改善后茬作物矿质营养的同时,会增加后茬作物对Cd、Pb的吸收,降低叶片叶绿素含量,有一定的环境危害风险,且秸秆不同部位的影响存在差异。

关键词:铅锌矿区;玉米秸秆;蚕豆;氮磷钾;镉;铅

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)04-0661-08 doi:10.11654/jaes.2016.04.008

Effects of applying Cd/Pb contaminated maize stalks on growth and nutrient and Cd and Pb content of faba bean

ZHAN Fang-dong, CHEN Jian-jun, QIN Li, WANG Ji-xiu, LI Yuan*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In this experiment, Cd–Pb contaminated maize stalks grown in a Pb–Zn mining area was applied to soil, and biomass of roots, stems, leaves and whole plants of, and N, P, K, Cd and Pb content of faba bean plants and soil available nutrients were examined. Application of maize stalks enhanced soil available N and K by 14%~58% and 36%~134%, respectively; but had no significant effect on soil available P. Applying maize leaves increased faba bean N, P and K by 28%, 40% and 102%, respectively, while adding maize roots only enhanced P by 42%. Applications of stems and whole plants promoted the faba bean K content by 61% and 98%, respectively. No significant effects of maize stalk applications on nutrient content in the underground part of faba bean were observed, except an increase in P content caused by maize leaves. However, maize stalk applications caused significant decreases in chlorophyll a and b in the faba bean leaves. The height and biomass of faba bean were little affected by maize stalk applications, but applying leaves and stems increased the height and

收稿日期:2015-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41461093);国家自然科学基金委员会-云南省人民政府联合基金项目(U1202236)

作者简介:湛方栋(1980—),男,博士,副教授,主要从事环境微生物与土壤修复研究。E-mail:zfd97@ynau.edu.cn

*通信作者:李 元 E-mail:liyuan@ynau.edu.cn

aboveground biomass of the bean. Applications of maize leaves enhanced the Cd and Pb content in the aboveground part, and Cd content in the belowground part of faba bean by 56%~76% and 50%~133%, and 204%~507%, respectively. These results indicate that applying maize stalks contaminated with Cd/Pb shows beneficial roles in enhancing soil fertility and improving mineral nutrition of the following crop, while may cause environmental risks induced by Cd/Pb contamination to soils including increased plant Cd and Pb uptake by and decreased chlorophyll content in leaves of the following crops.

Keywords: Pb–Zn mining area; maize stalk; faba bean; N, P and K; Cd; Pb

我国的金属矿区,由于土壤重金属背景值高、矿产资源的开采和冶炼等原因,矿区和周边农田土壤镉(Cd)、铅(Pb)等重金属污染严重^[1-2],导致污染区域生长的作物植株和可食部分重金属含量高^[3-5]。作物秸秆中的重金属含量普遍高于可食部分,如玉米根、茎和叶的Cd含量分别是籽粒的16.8、7.5和6.9倍,Pb含量是籽粒的4.1、2.6和1.3倍^[6]。但相对于作物可食部分,对重金属含量高的作物秸秆研究较少。

秸秆是作物收获子实后剩余的部分,占作物生物量的50%以上。还田利用是我国秸秆资源处理的主要方式之一,具有改善土壤肥力、促进作物生长、提高作物产量等效益^[7-8]。但将重金属含量高的作物秸秆还田,可能会使秸秆成为土壤中重金属的重要输出源,影响后茬作物的生长,增加后茬作物对重金属的吸收,因而存在一定的环境风险^[9-11]。因此,重金属含量高的作物秸秆还田利用,需综合考虑其对土壤养分、后茬作物生长与重金属吸收等方面的影响。

云南地处中国西南部,有丰富的铅锌矿产资源,是中国重要的铅锌矿生产基地^[12]。铅锌矿区及周边农田存在不同程度的重金属污染,Cd和Pb是土壤主要的污染元素^[1],玉米-蚕豆轮作是当地主要的种植模式。生长于铅锌矿周边农田的玉米秸秆Cd、Pb含量较高,如玉米根的Cd与Pb含量分别为5.31、318.42 mg·kg⁻¹,茎为0.68、22.95 mg·kg⁻¹,叶为1.25、226.73 mg·kg⁻¹^[13]。但铅锌矿区的玉米秸秆还田对后茬蚕豆有何影响,有待研究。

本文以来自云南某铅锌矿周边农田的玉米秸秆为研究材料,采用盆栽实验,施加玉米秸秆的不同部分(根茬、茎秆、叶片和整株),模拟秸秆还田,测定盆栽土壤速效养分含量,后茬蚕豆的株高、生物量、叶绿素含量、植株部分养分、Cd和Pb的含量等指标,综合分析重金属含量高的玉米秸秆还田对后茬作物生长、重金属吸收的影响,评估重金属污染秸秆还田利用的环境风险,为污染区域作物秸秆的管理与利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与玉米秸秆

供试土壤采自云南农业大学后山,土壤基本理化性质:pH5.85,有机质含量7.37 g·kg⁻¹,全N、全P和全K含量分别为0.19、1.35、3.64 g·kg⁻¹,碱解N、速效P和速效K含量分别为33.7、10.4、148.7 mg·kg⁻¹,Pb含量37.04 mg·kg⁻¹,Cd含量0.32 mg·kg⁻¹。

玉米秸秆采自云南省某铅锌矿区周边农田,秸秆基本理化性质见表1。秸秆分成根茬、茎秆、叶片和整株4部分,分别剪成1 cm左右的小段后备用。

表1 铅锌矿区的玉米秸秆养分和镉铅含量

Table 1 Content of nutrients, Cd and Pb in maize stalk sampled from a Pb–Zn mining area

秸秆部位	养分含量/%			镉铅含量/mg·kg ⁻¹	
	N	P	K	Cd	Pb
根茬	0.83±0.08	1.74±0.38	2.17±0.07	2.36±0.06	24.08±2.65
茎秆	1.41±0.29	0.74±0.17	2.58±0.07	1.36±0.13	26.69±4.17
叶片	1.15±0.05	0.38±0.03	1.70±0.09	2.88±0.03	31.78±2.33
整株	1.20±0.18	0.90±0.17	2.26±0.07	1.99±0.09	27.31±3.33

1.2 盆栽试验与处理

盆栽试验于2014年12月开始至2015年3月结束,在云南农业大学后山试验农场大棚内进行。试验设不施秸秆的对照处理和施玉米秸秆不同部位(根茬、茎秆、叶片和整株)的处理,每个处理4个重复。添加秸秆处理为:称取过2 mm筛的土壤15.6 kg,按2.5%的比例分别加入0.4 kg的玉米秸秆根茬、茎秆、叶片和整株,与土壤充分混匀后,平均分装到4个花盆。

每盆播种蚕豆种子4颗,出苗7 d后间苗至2棵。培养过程中不施肥,自然光照,根据盆栽土壤水分状况浇灌蒸馏水,以保持盆栽土壤湿润。

1.3 土壤、植株样品采集与指标测定

蚕豆生长120 d后,常规方法测定植物的株高。称取0.5 g蚕豆顶部叶片,碾磨成浆,采用96%乙醇提取叶片叶绿素,定容至25 mL,选取波长665 nm和

649 nm,分光光度法测定和计算叶片叶绿素 a 和 b 的含量^[14]。

收获时将植物地上部和地下部分开,先用自来水冲洗,后用蒸馏水漂洗干净,晾干,然后于 105 ℃ 杀青 30 min,再经烘干(75 ℃,72 h),每株分别称重,获得生物量。

植物烘干样品用粉碎机全部粉碎、混匀,过 0.25 mm 筛后备用。称取 0.1 g 蚕豆植株地上部和地下部干样, $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,分别采用奈氏比色法、钒钼黄比色法和火焰光度法测定 N、P 和 K 的含量^[15]。称取 0.5 g 蚕豆植株地上部和地下部干样,采用硝酸-高氯酸(4:1)湿法消解,将滤液定容到 50 mL,采用火焰原子吸收分光光度法测定 Pb 和 Cd 的含量^[15]。

土壤样品风干、磨碎,过 100 目筛后备用。土壤 pH 值采用电位计法,有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法,全 N 采用半微量开氏法,全 P 采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法,全 K 采用 NaOH 熔融-火焰光度法,碱解 N 含量采用碱解扩散法,速效 P 含量采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法,速效 K 含量采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定^[15]。称取 5.0 g 土壤样品,采用王水-高氯酸湿法消解土壤样品,过滤后用蒸馏水将滤液定容到 50 mL,火焰原子吸收分光光度法测定 Pb 和 Cd 的含量^[15]。

1.4 数据处理方法

实验数据运用 Microsoft Excel 对数据进行处理,计算平均值和标准差。数据分析采用 SPSS 17.0 数据处理系统进行方差分析和多重比较。

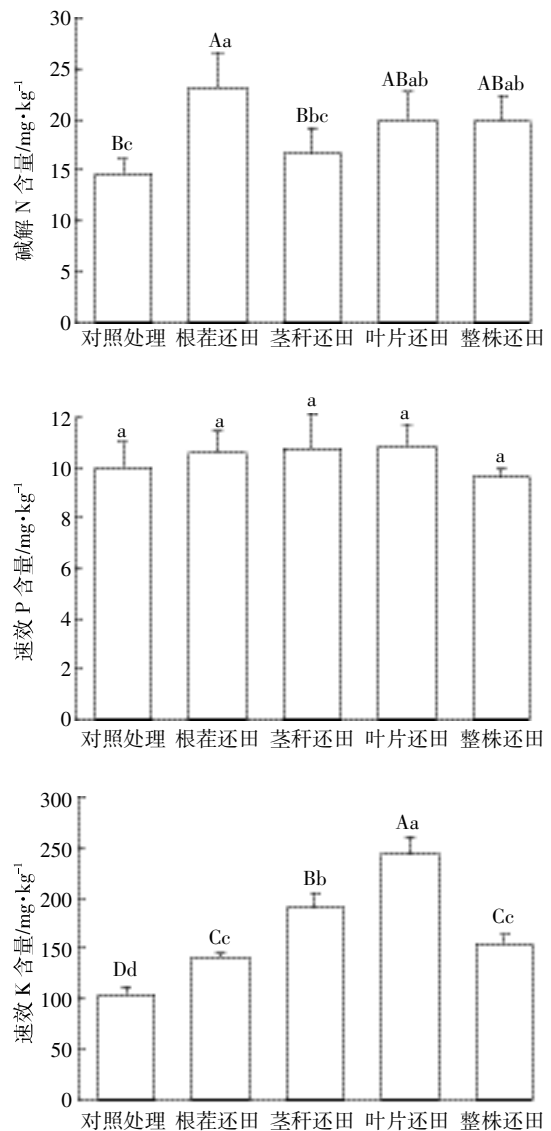
2 结果与分析

2.1 秸秆还田对土壤速效养分含量的影响

与对照处理相比,根茬还田的土壤碱解 N 含量增加了 58% ($P<0.01$),叶片和整株还田分别增加 37% 和 36% ($P<0.05$),茎秆还田增加 14% ($P>0.05$)。玉米秸秆还田极显著增加土壤速效 K 的含量 ($P<0.01$),叶片、茎秆、整株和根茬还田的土壤速效 K 含量分别增加 134%、83%、49% 和 36%。可见,除土壤速效 P 的含量没有显著变化外,玉米秸秆还田会增加土壤碱解 N 和速效 K 的含量(图 1)。

2.2 秸秆还田对蚕豆植株养分含量的影响

玉米秸秆不同部分还田后,根茬还田使蚕豆地上部 P 含量增加 42% ($P<0.05$);茎秆和整株还田增加蚕豆地上部 K 含量 ($P<0.01$),增幅分别为 61% 和 98%;叶片还田导致蚕豆地上部的 N、P 含量显著增加 ($P<$



不同大写字母者表示处理间差异极显著 ($P<0.01$);
不同小写字母者表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同

图 1 秸秆还田对土壤速效养分含量的影响

Figure 1 Effects of maize stalk applications on available nutrients in soil

0.05)、K 含量极显著增加 ($P<0.01$),分别增加了 28%、40% 和 102%。可见,玉米叶片还田增加蚕豆地上部 N、P 和 K 含量的效应最大(图 2)。

除叶片还田使蚕豆地下部 P 含量增加 65% ($P<0.01$)、整株还田与茎秆还田蚕豆地下部 K 含量差异显著 ($P<0.05$) 外,玉米秸秆不同部分还田对蚕豆地下部的 N、P 和 K 含量没有显著影响(图 3)。

2.3 秸秆还田对蚕豆生长的影响

叶片和整株还田的蚕豆叶片叶绿素 a 含量分别降低 14% 和 15% ($P<0.05$),根茬、茎秆、叶片和整株还

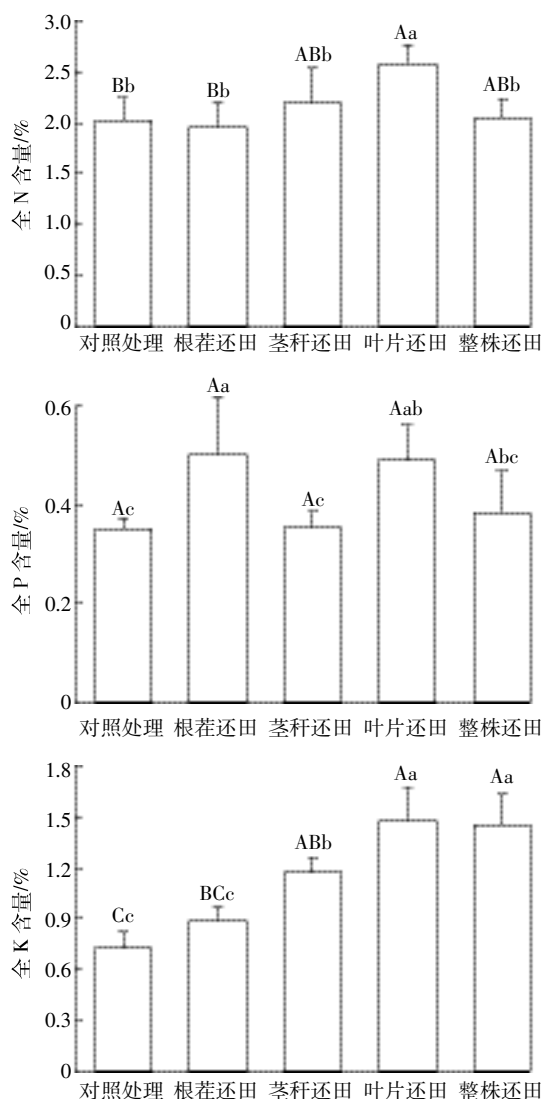


图2 秸秆还田对蚕豆地上部N、P和K含量的影响

Figure 2 Effects of maize stalk applications on N, P and K content in aboveground part of faba bean

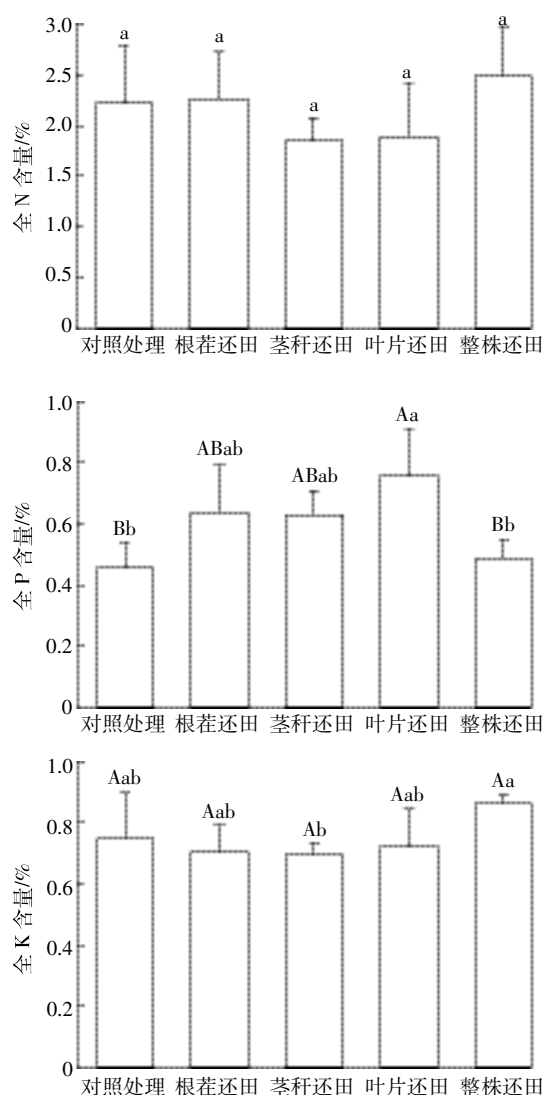


图3 秸秆还田对蚕豆地下部N、P和K含量的影响

Figure 3 Effects of maize stalk applications on N, P and K content in belowground part of faba bean

田的蚕豆叶绿素b含量分别降低35%、33%、21%和27% ($P < 0.01$)。可见,玉米秸秆还田导致蚕豆叶片叶绿素含量降低(图4)。

叶片还田显著增加蚕豆植株的株高 ($P < 0.05$),增幅为11%;茎秆还田极显著增加蚕豆地上部生物量 ($P < 0.01$),增幅为93%。玉米秸秆的其余部分还田对蚕豆株高、地上部和地下部的生物量没有显著影响(图5)。

2.4 秸秆还田对蚕豆植株镉、铅含量的影响

玉米秸秆不同部分还田都导致蚕豆地上部Cd和Pb含量极显著增加 ($P < 0.01$),分别增加了56%~76%和50%~133%。秸秆不同部分处理间的蚕豆地上部Cd含量差异不显著,蚕豆地上部的Pb含量为叶片、整株还田>茎秆还田>根茬还田。表明玉米

秸秆还田增加蚕豆地上部的Cd和Pb含量(图6)。

根茬、茎秆、叶片和植株还田都导致蚕豆地下部Cd含量极显著增加 ($P < 0.01$),分别增加了351%、204%、490%和507%,蚕豆地下部的Cd含量为叶片、整株还田>根茬还田>茎秆还田。不同处理间蚕豆地下部Pb含量没有显著差异。表明玉米秸秆还田增加蚕豆地下部的Cd含量,但未增加Pb含量(图7)。

3 讨论

3.1 重金属污染的秸秆还田对土壤重金属有效性的影响

作物秸秆中重金属含量通常远高于可食部分,重金属污染的秸秆还田,会把作物吸收的大部分重金属

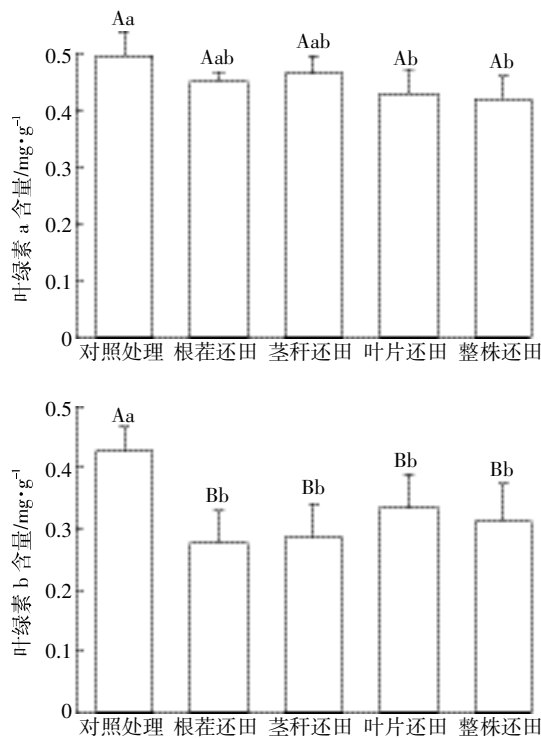


图 4 秸秆还田对蚕豆叶片叶绿素含量的影响

Figure 4 Effects of maize stalk applications on chlorophyll content of faba bean leaves

归还农田, 增加农田土壤重金属的含量。长期定位试验表明, 水稻秸秆还田将秸秆中富集的 Cd 重新归还到稻田土壤中, 导致土壤 Cd 含量显著升高^[16]。将重金属污染的作物秸秆施加到清洁土壤上, 由于清洁土壤本底重金属含量低, 秸秆对土壤重金属输入的贡献大, 显著增加土壤重金属的含量^[17]。由于作物根茬的重金属含量通常高于其他部分, 根茬连续还田更能增加土壤重金属的含量^[11]。

同时, 秸秆还田显著影响土壤重金属的有效性。一些研究发现, 由于秸秆具有化学吸附性能, 秸秆还田降低了土壤重金属的生物有效性, 一定程度上起到钝化土壤重金属的作用^[18]。但重金属含量高的秸秆还田, 主要表现为提高土壤重金属的生物有效性, 其原因主要涉及两方面: 一方面, 重金属含量高的秸秆在土壤中的腐解过程可将秸秆吸收固定的重金属释放出来, 提高土壤中 DTPA 提取态、醋酸提取态等有效态重金属的含量^[19]; 另一方面, 还田秸秆分解时, 释放有机酸和水溶性有机碳化合物^[10, 20-21], 降低土壤 pH 值, 导致土壤中胡敏酸(HA)和富里酸(FA)含量的变化^[22-23], 从而活化重金属, 促进土壤中有效态重金属的含量增加。

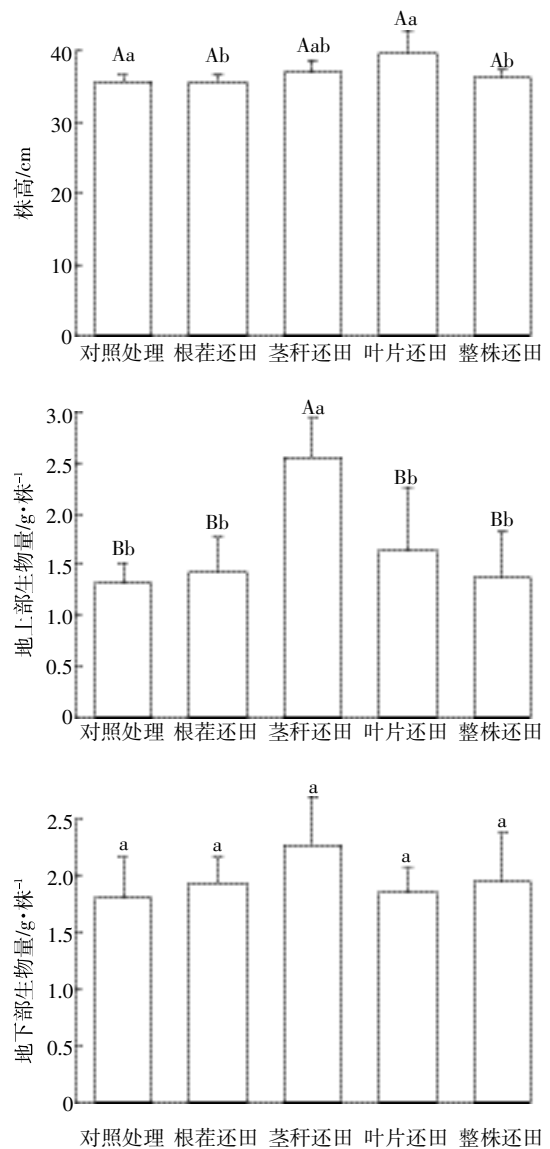


图 5 秸秆还田对蚕豆株高和生物量的影响

Figure 5 Effects of maize stalk applications on height and biomass of faba bean

3.2 重金属污染的秸秆还田对后茬作物生长与重金属吸收的影响

秸秆还田对后茬作物生长与重金属吸收的影响效应, 因作物秸秆和后茬作物种类的不同而存在差异。如菜豆秸秆还田对后茬白菜的生长和 Cd 含量影响不明显, 但玉米秸秆还田降低了白菜生物量, 增加了白菜 Cd 含量^[10]。玉米和菜豆根茬还田不影响后茬大白菜和冬小麦的生长以及后茬小麦的 Cd 吸收, 但显著增加后茬大白菜地上部 Cd 的含量^[11]。Cd 污染稻草秸秆还田导致后茬大白菜的 Cd 含量增加 13.9%~84.1%, 但降低后茬水稻籽粒和秸秆的 Cd 含量, 降幅分别为 12.8%~70.2 %和 39.3%~57.3%^[19]。施小飞蓬和

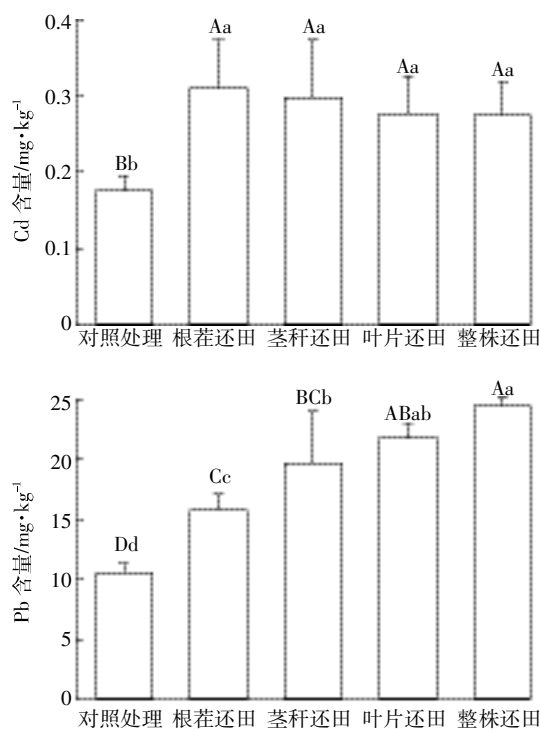


图6 秸秆还田对蚕豆地上部 Cd、Pb 含量的影响

Figure 6 Effects of maize stalk applications on Cd and Pb content in aboveground part of faba bean

碎米茅秸秆可提高牛膝菊的株高和生物量,但施旱莲草和豆瓣菜秸秆降低牛膝菊的株高和生物量,施加这4种植物的秸秆均提高牛膝菊地上部的 Cd 含量^[24]。

本试验中,除叶片还田增加蚕豆的株高、茎秆还田增加蚕豆地上部的生物量外,秸秆的其余部分还田对蚕豆株高和生物量没有显著影响;玉米秸秆还田增加后茬蚕豆地上部的 Cd 和 Pb、地下部的 Cd 含量,其中叶片和整株还田的蚕豆地上部 Pb 和地下部 Cd 的含量增幅较大。当地农民常将收获的蚕豆秸秆干燥粉碎作为饲料用于喂养牛、羊等家畜,而污染玉米秸秆还田极显著增加后茬蚕豆秸秆的 Pb 含量,导致蚕豆秸秆饲用的安全风险增大。因此,需要关注喂养重金属污染的粗饲料对家畜生长和畜产品安全性的影响^[25]。

玉米秸秆的不同部分对后茬作物生长与重金属吸收的影响存在较大的差异,可能与玉米秸秆不同部分重金属含量、生物降解性等性质的不同有关。本试验施用的秸秆 Cd 和 Pb 含量为叶片>根茬>茎秆,相对于根茬和茎秆还田,叶片和整株还田带入清洁土壤的 Cd 和 Pb 数量更多。叶片的生物降解性最大,易在土壤中降解^[26],将吸收的重金属释放出来,可能是叶片和整株还田的蚕豆地上部 Pb 和地下部 Cd 含量较高的原因所在;而茎秆重金属含量低,木质素含量高^[27],

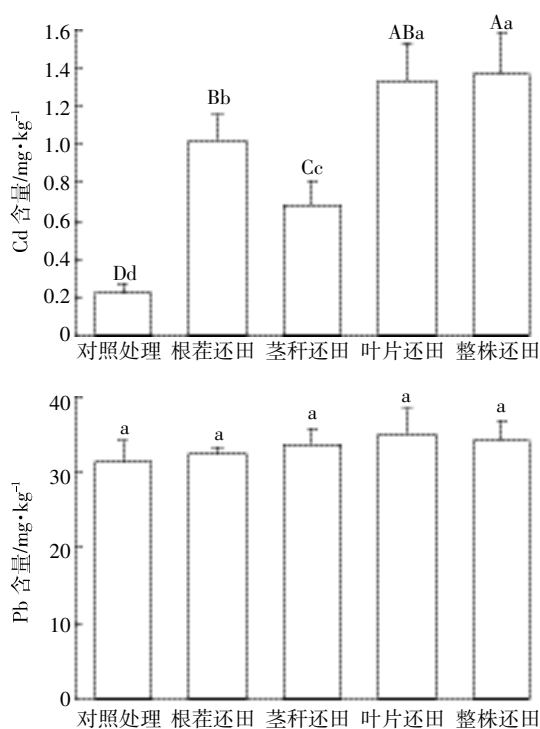


图7 秸秆还田对蚕豆地下部 Cd、Pb 含量的影响

Figure 7 Effects of maize stalk applications on Cd and Pb content in belowground part of faba bean

在土壤中降解慢,导致茎秆吸收固定的重金属不易释放出来,可能是茎秆还田增加蚕豆地上部生物量的原因之一。

重金属污染的秸秆还田影响后茬作物生长与重金属吸收的过程与效应很复杂,是土壤肥力、重金属含量和有效性、植物化感等方面综合作用的结果,受土壤类型、作物种类、秸秆还田方式等因素的影响^[10-11,16,19]。本研究仅为一次的初步试验结果,今后需要将大田和室内试验相结合,开展长期系统的研究,重点研究污染秸秆带入农田的重金属生物有效性、在土壤-作物系统中的迁移特征及其影响因素,明确重金属污染秸秆还田的农业生态效应与环境危害风险,为金属矿区农业固体废弃物的管理与利用提供可靠的科学依据。

4 结论

镉铅污染的玉米秸秆还田可改善后茬蚕豆地上部的矿质营养,但会降低蚕豆叶片叶绿素含量,增加蚕豆地上部的 Cd 和 Pb、地下部的 Cd 含量,具有一定的环境危害风险,秸秆不同部位的影响存在明显差异。因此,利用污染区域的作物秸秆还田,应综合考虑秸秆提高土壤肥力、改善作物营养的有益效应,以及秸秆中的重金属释放进入土壤、迁移进入后茬作物的

环境危害问题。

致谢:感谢云南农业大学 2011 级环境科学专业的刘承程、叶泰、张萍、韩倩倩等同学的帮助。

参考文献:

- [1] 李敬伟, 湛方栋, 何永美, 等. 云南会泽铅锌矿区土壤理化与生物学性质[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(5):906-912.
LI Jing-wei, ZHAN Fang-dong, HE Yong-mei, et al. Physicochemical and biological properties of soils from Huize lead-zinc mining area of Yunnan[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(5):906-912.
- [2] Li Z, Feng X, Bi X, et al. Probing the distribution and contamination levels of 10 trace metal/metalloids in soils near a Pb/Zn smelter in Middle China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(6):4149-4162.
- [3] 邹小玲, 祖艳群, 李元, 等. 云南某铅锌矿区周边农田土壤 Cd、Pb 分布特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2143-2148.
ZOU Xiao-leng, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Pollution and health risk assessment of cadmium and lead in cultivated soils and crops surrounding a lead-zinc mine in Yunnan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2143-2148.
- [4] Zhang C, Li Z, Yang W, et al. Assessment of metals pollution on agricultural soil surrounding a lead-zinc mining area in the Karst region of Guangxi, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 90(6):736-741.
- [5] Bortey-Sam N, Nakayama S M, Akoto O, et al. Accumulation of heavy metals and metalloid in foodstuffs from agricultural soils around Tarkwa area in Ghana, and associated human health risks[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(8):8811-8827.
- [6] 杨惟薇, 刘敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(6):774-779.
YANG Wei-wei, LIU Min, CAO Mei-zhu, et al. Accumulation and transfer of lead(Pb) and cadmium(Cd) on different species of maize[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(6):774-779.
- [7] Wang J, Wang X, Xu M, et al. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(3):371-381.
- [8] Kong L. Maize residues, soil quality, and wheat growth in China: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2):405-416.
- [9] 宋成军, 张玉华, 刘东生, 等. 污灌区作物根与秸秆不同处置的重金属健康风险评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7):295-301.
SONG Cheng-jun, ZHANG Yu-hua, LIU Dong-sheng, et al. Health risk assessment of heavy metal of different treatments for roots and straws of crops in wastewater irrigation area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7):295-301.
- [10] 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.
- [11] 张晶, 于玲玲, 辛术贞, 等. 根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(2):685-691.
ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, et al. Phytoavailability and chemical speciation of cadmium in different Cd contaminated soils with crop root return[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2):685-691.
- [12] 雷力, 周兴龙, 文书明, 等. 我国铅锌矿资源特点及开发利用现状[J]. 矿业快报, 2007(9):1-4.
LEI Li, ZHOU Xing-long, WEN Shu-ming, et al. Characteristics and present situation of development and utilization of lead and zinc mineral resources in China[J]. *Express Information of Mining Industry*, 2007(9):1-4.
- [13] 顾继光, 林秋奇, 胡韧, 等. 矿区重金属在土壤-作物系统迁移行为的研究——以辽宁省青城子铅锌矿为例[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4):634-637.
GU Ji-guang, LIN Qiu-qi, HU Ren, et al. Translocation behavior of heavy metals in soil-plant system: A case study from Qingchengzi lead-zinc mine in Liaoning Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4):634-637.
- [14] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
WANG Xue-kui. Plant physiology and biochemistry experiment principle and technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [15] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: Chinese Agriculture Publication, 2000.
- [16] 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.
- [17] 曹晓玲, 罗尊长, 黄道友, 等. 镉污染稻草还田对土壤镉形态转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9):1786-1792.
CAO Xiao-ling, LUO Zun-chang, HUANG Dao-you, et al. Effects of Cd-contaminated rice straw incorporation on transformation of Cd forms in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9):1786-1792.
- [18] 张晶, 苏德纯. 不同镉污染农田土壤上秸秆和炭化秸秆分解动态及其对土壤镉的吸附特征[J]. 环境工程学报, 2013, 7(10):4097-4102.
ZHANG Jing, SU De-chun. Decomposition dynamic and Cd adsorption characteristic of crop straw and biochar in different Cd-contaminated farmland soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(10):4097-4102.
- [19] Wang S, Huang D, Zhu Q, et al. Speciation and phytoavailability of

- cadmium in soil treated with cadmium-contaminated rice straw[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(4):2679–2686.
- [20] Bai Y, Gu C, Tao T, et al. Straw incorporation increases solubility and uptake of cadmium by rice plants[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2013, 63(3):193–199.
- [21] Cui Y, Fu J, Chen X. Speciation and bioaccessibility of lead and cadmium in soil treated with metal-enriched Indian mustard leaves[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(4):624–632.
- [22] 孙文博, 莫创荣, 安鸿雪, 等. 施用蔗渣对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9):1793–1799.
- SUN Wen-bo, MO Chuang-rong, AN Hong-xue, et al. Effects of bagasse application on speciation and bioavailability of cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9):1793–1799.
- [23] 陕红, 李书田, 刘荣乐. 秸秆和猪粪的施用对土壤镉有效性的影响和机理研究[J]. 核农学报, 2009, 23(1):139–144.
- SHAN Hong, LI Shu-tian, LIU Rong-le. Availability and the related mechanisms of cadmium in soils as influenced by the application of straw or pig manure[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(1):139–144.
- [24] 汤福义, 林立金, 廖进秋, 等. 土施富集植物秸秆对牛膝菊生长及镉积累的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(4):213–218.
- TANG Fu-yi, LIN Li-jin, LIAO Jin-qiu, et al. Effects of applying accumulator straw in soil on growth and cadmium accumulation of *Galinsoga parviflora*[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(4):213–218.
- [25] Makridis C, Svarnas C, Rigas N, et al. Transfer of heavy metal contaminants from animal feed to animal products[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology A*, 2012(2):149–154.
- [26] Abiven S, Recous S, Reyes V, et al. Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 42(2):119–128.
- [27] 闫贵龙, 曹春梅, 鲁琳, 等. 玉米秸秆不同部位主要化学成分和活体外消化率比较[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(3):70–74.
- YAN Gui-long, CAO Chun-mei, LU Lin, et al. Comparison of main chemical composition and in vitro digestibility in various sections of corn stalks[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2006, 11(3):70–74.