

施用城市污泥堆肥对土壤和大豆器官重金属积累的影响

李淑芹, 田仲鹤, 金宏鑫, 于 淼, 许景钢*

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 重金属在土壤中易积累造成污染, 因此污泥中重金属含量成为其农用的限制因素, 重金属在作物中的富集问题也备受关注。以东北黑土为供试土壤, 大豆为供试作物, 采用随机区组设计, 通过施入不同水平的城市污泥堆肥的农田小区试验, 研究污泥堆肥对土壤和大豆不同器官的重金属积累的影响, 为污泥堆肥农用的安全性提供科学依据。试验结果表明, 随着污泥堆肥施入量的增加, 土壤中重金属 Cu、Zn、Cd、Pb 含量及大豆不同器官中 Cu、Zn、Cd 的含量均逐渐增加, 但在大豆各器官中均未检出 Pb。Cu、Zn 在大豆各器官的含量和富集系数大小顺序均为籽粒>根>豆荚>茎, 而 Cd 为茎>根>豆荚>籽粒。在本试验污泥堆肥施入量的范围内, 土壤和大豆籽粒中重金属 Cu、Zn、Cd、Pb 含量均未超过国家相关标准。从富集系数看, 除污泥堆肥施入量超过 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时大豆茎对 Cd 有富集作用外, 其他均未达到富集程度; 各处理的大豆干物重和产量的总体规律是污泥堆肥施用量 $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ >施用量 $18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ >施用量 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ >施用量 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ >施用量 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ >CK, 其中污泥堆肥施用量为 $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增产效果最好, 增产率为 12.65%。

关键词: 污泥堆肥; 重金属; 土壤; 大豆; 积累

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)02-0352-06 doi:10.11654/jaes.2014.02.021

Effects of Municipal Sludge Composts on Heavy Metal Accumulation in Soil and Soybean

LI Shu-qin, TIAN Zhong-he, JIN Hong-xin, YU Miao, XU Jing-gang*

(College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Accumulation of heavy metals in soils is a factor limiting the application of municipal sludge composts in agriculture. A plot experiment was performed to investigate the effects of municipal sewage sludge composts on heavy metal accumulation in soil and soybean plants in black soil in the Northeast China. Concentrations of Cu, Zn, Cd and Pb in soil and of Cu, Zn, and Cd in soybean plants increased gradually with increasing applications of sludge composts, while Pb was not detected in soybean. The contents and enrichment coefficients of Cu and Zn in soybean were in order of grain>root>pod>stem, while those of Cd were stem>root>pod>grain. At the present application rates of sludge composts, the contents of Cu, Zn, Cd, and Pb in soil and soybean did not exceed the national standards. However, applying the compost more than $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ caused Cd enrichment in the stem, although the enhancements of other metals were not obvious. The compost application increased dry biomass and yield of soybean, with 12.65% increase in yield in the treatment D ($24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). The findings suggest that it is necessary to assess the impacts of municipal sludge composts on soil and plants before applying to soils.

Keywords: sewage sludge compost; heavy metal; soil; soybean; accumulation

随着社会的发展, 城市化进程不断加快, 城市污水处理厂产生的污泥也不断增加, 污泥处理已成为我国城市发展亟待解决的问题。污泥中含有丰富的有机

质和植物生长发育所需的营养成分, 具有较好的植物可利用性及较高的农用价值^[1]; 可作为肥料和土壤的改良剂^[2-3]; 其养分含量高于一般禽畜粪便。在国外, 污泥堆肥在农业上早已普遍应用, 肥效胜过农家肥; 但是污泥主要来源于城市工业污水及生活污水, 其中含有一些对环境及生物有毒有害的物质, 如病原菌、重金属等。虽经高温腐熟后, 病原菌和其他有毒有害物质减量到安全范围, 但重金属却并未被去除, 它们具有迁移

收稿日期: 2013-07-01

基金项目: 哈尔滨市科技攻关计划项目 (2010AA4CS024)

作者简介: 李淑芹 (1962—), 女, 教授, 主要从事有机固废处理与资源化研究。E-mail: shuqinli007@126.com

* 通信作者: 许景钢 E-mail: jinggangxu@126.com

慢、易富集、危害大等特点,限制了污泥的农用^[4]。国内外很多研究表明,污泥堆肥农用会增加土壤及作物中的重金属含量,其含量与污泥堆肥施用量及作物种类有关。梅忠等研究了污泥堆肥对土壤和小白菜重金属积累的影响,结果表明随着污泥堆肥施用量的增加,土壤和小白菜地上部组织的 Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量也呈积累趋势^[5]。Craig 等通过多年的定位实验发现,城市污泥堆肥连续施入土壤 7 年后,Zn、Cu、Cd 等重金属几乎全部停留在 0~10 cm 范围内,向下移动很少^[6]。污泥堆肥的施用使土壤中的重金属含量发生了明显的变化,随着污泥堆肥施用量的增加活性强的重金属含量也明显增加,所以污泥堆肥农用必须引起足够重视。黄雅曦、邵海林等^[7-8]的多项研究表明,如果将污泥堆肥的施用量控制在一定范围内,则不会对土壤造成危害。

大豆是世界上分布最广的农作物之一,具有很高的经济价值,常吃对人体有益^[9]。目前在国内外施用污泥堆肥对大豆体内重金属含量的影响研究鲜见报道,因此研究施用污泥堆肥对大豆体内重金属的积累状况非常重要。本试验主要通过施用不同水平的污泥堆肥,研究其对土壤及大豆各器官中重金属含量的影响,为污泥堆肥农用的安全性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试污泥堆肥取自城市污水处理厂经好氧堆肥处理后的污泥堆肥。全氮 31.27 g·kg⁻¹,全磷 16.15 g·kg⁻¹,速效钾 3.65 g·kg⁻¹,有机质 392 g·kg⁻¹,含水率 44%,pH 值 6.01,重金属 Cu 271.5 mg·kg⁻¹、Zn 2 912.5 mg·kg⁻¹、Cd 3.44 mg·kg⁻¹、Pb 30.17 mg·kg⁻¹。污泥堆肥中各重金属含量符合我国《农用污泥污染物控制标准 GB 4284—1984》。

供试土壤为东北黑土,基础肥力为全氮 3.2 g·kg⁻¹,全磷 1.9 g·kg⁻¹,速效钾 0.288 g·kg⁻¹,有机质 31.2 g·kg⁻¹,含水率 5.46%,pH 6.70。

1.2 试验设计

试验在东北农业大学实验实习基地进行。随机区组设计,小区面积 20 m²,按污泥堆肥施用量设 6 个处理:CK(0)、A(6 t·hm⁻²)、B(12 t·hm⁻²)、C(18 t·hm⁻²)、D(24 t·hm⁻²)和 E(30 t·hm⁻²),均按干污泥计,设 4 次重复。除 CK 外,各处理直接向 0~20 cm 耕层土壤施入污泥堆肥并充分混合,播种大豆种子(东农 163),常规田间管理,三铲三趟,人工除草。

收获时取各处理土壤和大豆植株整株样品。将大豆植株的根、茎、豆荚及籽粒分离出来,处理干净,放入 105 ℃ 的鼓风干燥箱中杀青 30 min,然后 80 ℃ 烘干,按不同部位称重,用粉碎机粉碎成 100 目左右粉末,装袋标记。同时将采集的土样经风干后用四分法取适量,研细过 2 mm 和 0.15 mm 孔径筛,密封标记保存,以备测定土壤和大豆植株各器官中的重金属含量。

1.3 测定方法

土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法^[10]测定;全氮含量采用半微量凯氏法(双通道全自动连续流动分析仪)测定;全磷含量采用硫酸高氯酸消煮法;速效钾含量采用火焰光度法;pH 采用电位法;含水量用烘干法测定。重金属(Cu、Zn、Pb、Cd)含量采用 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱)测定,各重金属仪器检出限为 0.000 05 mg·L⁻¹。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003、Microsoft Word 2003、SPSS 等软件进行数据的计算与处理。

2 结果与分析

2.1 污泥堆肥对土壤重金属含量的影响

污泥堆肥中一些重金属含量超出了土壤的正常含量,向土壤中施入污泥堆肥必然会引起土壤中重金属含量的升高,不同处理的土壤重金属含量见表 1。

表 1 不同处理对土壤重金属含量的影响

Table 1 Effects of municipal sludge composts on heavy metal concentrations of soil

处理	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹
CK	65.00±0.71f	76.98±1.17f	0.440±0.011c	6.04±0.09e
A	67.10±0.14e	78.28±0.11e	0.470±0.006b	6.21±0.04d
B	67.83±0.18d	96.15±0.28d	0.480±0.002b	6.32±0.01c
C	71.13±1.38c	101.28±0.60c	0.490±0.001b	6.40±0.01bc
D	75.75±0.21b	126.35±0.28b	0.520±0.003a	6.47±0.02b
E	80.65±0.99a	130.45±0.07a	0.530±0.002a	6.70±0.04a
GB I	35	100	0.20	35
GB II	100	250	0.60	300

注:GB I 表示土壤环境质量标准 GB 15618—1995 的一级标准,GB II 表示二级标准;同列英文小写字母不相同表明差异显著($P<0.05$)。

由表 1 可知,各施污处理的土壤中重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均超过空白处理 CK,差异显著,并随着污泥堆肥用量的增加呈增加趋势。与 CK 处理相比:对于 Cu,各施污处理分别高出 3.23%、4.35%、

9.42%、16.54%、24.08%,处理间差异显著;对于 Zn,各施污处理分别高出 1.69%、24.91%、31.57%、64.14%、69.47%,处理间差异显著;对于 Pb,各施污处理分别高出 2.73%、4.59%、6.00%、7.03%、10.93%,除处理 C 与 B、D 差异不显著外,其他各施污处理间均差异显著;对于 Cd,各施污处理分别高出 7.02%、9.03%、9.78%、17.87%、19.89%,处理 A、B、C 间和处理 D、E 间差异不显著,但处理 A、B、C 与 D、E 间差异显著。土壤中重金属含量大小顺序为 $Zn > Cu > Pb > Cd$ 。

所有处理土壤中的重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均达到了我国土壤环境质量标准(GB 15618—1995)^[11]的二级标准,其中所有处理的 Pb 及处理 A、B 的 Zn 含量还达到了一级标准。我国土壤环境质量标准规定二级标准适用于一般农田、蔬菜地、茶园、果园、牧场等土壤,土壤质量基本上对植物和环境不造成危害和污染。因此,在本研究的污泥堆肥用量范围内施用于大田不会造成土壤的 Cu、Zn、Pb、Cd 污染。

2.2 污泥堆肥对大豆植株中重金属含量的影响

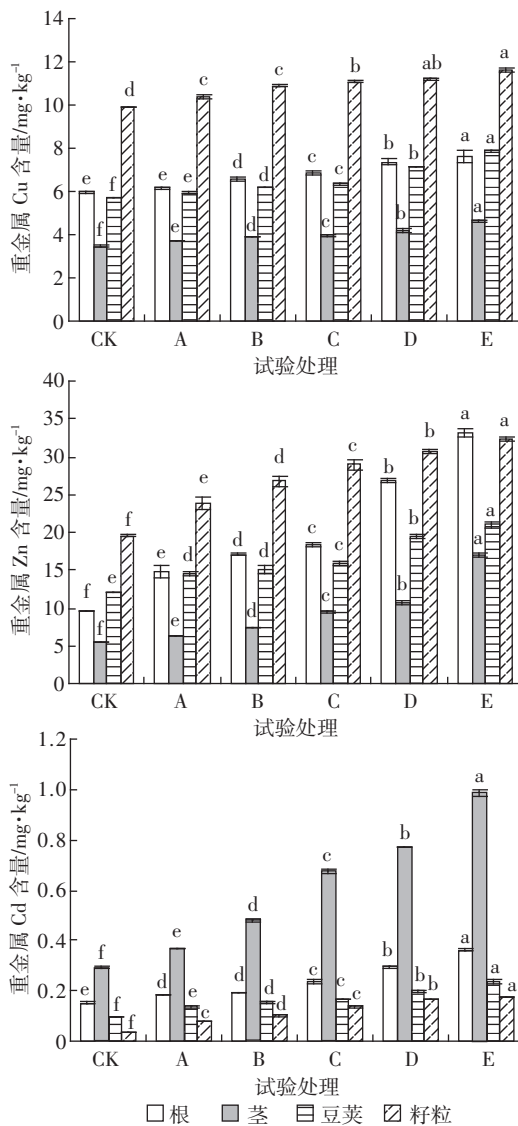
2.2.1 重金属在大豆各器官中的分布

随着污泥堆肥施入量的增加大豆不同器官中重金属 Cu、Zn、Cd 的含量逐渐增加,而各器官中 Pb 未检出(下同)。如图 1 可知,元素 Cu、Zn 在大豆各器官中的分布规律是籽粒>根>豆荚>茎,Cd 在大豆各器官的总体分布规律是茎>根>豆荚>籽粒;不同处理间大豆各器官中的 Cu、Zn、Cd 含量总体上差异显著。

对于 Cu,大豆根中各施污处理 A、B、C、D、E 分别比 CK 高出 8.49%、12.62%、15.38%、21.26%、34.47%;茎中各施污处理分别高出 4.41%、9.80%、11.53%、12.93%、16.69%;豆荚中各施污处理分别高出 4.56%、8.86%、11.70%、25.50%、38.38%;籽粒中各施污处理分别高出 3.47%、10.11%、14.86%、23.38%、28.26%。

对于 Zn,大豆根中各施污处理 A、B、C、D、E 分别比 CK 高出 54.54%、78.96%、91.33%、181.32%、247.92%;茎中各施污处理分别高出 13.79%、32.10%、70.73%、91.34%、204.55%;豆荚中各施污处理分别高出 20.69%、25.59%、31.82%、63.26%、75.22%;籽粒中各施污处理分别高出 22.27%、36.80%、47.81%、56.50%、65.63%。

对于 Cd,大豆根中各施污处理 A、B、C、D、E 分别比 CK 高出 21.12%、27.06%、55.44%、94.71%、138.94%;茎中各施污处理分别高出 26.75%、64.49%、131.90%、163.63%、238.42%;豆荚中各施污处理分别高出 44.97%、62.43%、76.19%、109.52%、148.67%;籽粒中



图中不同处理间字母不同表示差异显著($P < 0.05$),下同

图 1 大豆植株不同器官重金属的分布

Figure 1 Concentrations of heavy metals in different parts of soybean

各施污处理分别高出 128.98%、195.65%、300.00%、379.71%、410.14%。

根据我国最新食品污染物限量标准^[12]规定,食品中 Pb 和 Cd 的最高上限浓度均为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;对 Cu、Zn 则没有限定。而早期食品中 Cu 限量卫生标准^[13]和 Zn 限量卫生标准^[14]规定食品中的 Cu 和 Zn 的最高上限浓度分别为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,可见本试验大豆籽粒中各重金属浓度均低于标准限值,说明在本试验污泥堆肥用量范围内,施用污泥堆肥的大豆不会受到重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 污染,可放心食用。

2.2.2 重金属在大豆各器官中的富集

植物可以从土壤中吸收和富集重金属,植物对重

金属的富集系数是评价植物富集能力和迁移能力的常用指标^[15-17]。图2分别为各处理中Cu、Zn、Cd在大豆植株各器官的富集系数。

由图2可知:大豆不同器官对Cu、Zn、Cd的富集规律不同,Cu、Zn在大豆不同器官中EC的大小顺序均为籽粒>根>豆荚>茎,而Cd的EC依次为茎>根>豆荚>籽粒;同一器官富集系数Cd>Zn>Cu>Pb(未检出)。对于Cu,在大豆各器官中其EC随施污量的增加变化不大。对于Zn,在大豆根中刚施入污泥堆肥时,EC明显上升,之后随污泥施肥量的增加变化不大,当污泥施肥量大于C处理时,EC随污泥施肥量的增加呈上升趋势;在茎中,EC随污泥施入量的增加而

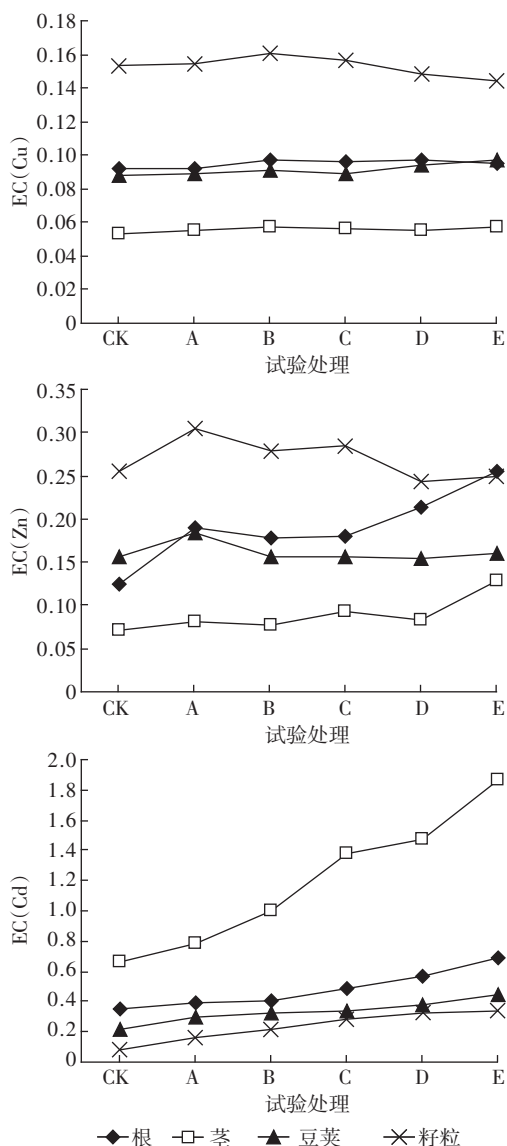


图2 大豆植株各器官重金属的富集系数(EC)

Figure 2 Enrichment coefficients(EC) of heavy metals in different parts of soybean

增加,但开始趋势不明显,当施入量大于D处理时,明显上升;在豆荚中,随污泥施入量的增加,EC呈先升高后下降之后趋于稳定的趋势;在籽粒中,大体上呈先升高后缓慢下降趋势。对于Cd,随污泥堆肥量的增加EC呈上升趋势;但只有大豆茎中EC上升趋势非常明显,施入量大于处理B($12\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)时EC超过1。

2.3 污泥堆肥对大豆干物重与产量的影响

生物量是指某一时刻单位面积内实存生活的有机物质总量,即干物重。干物重是反映植物叶片光合能力的重要指标,是作物丰产的物质基础,干物质的积累和分配与经济产量有着密切关系。通过研究和测定植株的干物重,可以鉴定土壤对植株生长所需养分的供给和植株对养分的吸收。图3、图4为成熟期大豆植株的干物质含量与产量。

从图3、图4可以看出,成熟期各施污处理的大豆干物重和产量均高于空白,差异显著,且随着施污量的增加呈先上升后下降的趋势。处理D的地上部干物重、地下部干物重与产量最高,分别比空白高出58.65%、53.33%、12.65%,即施肥量为 $24\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增产效果最好。

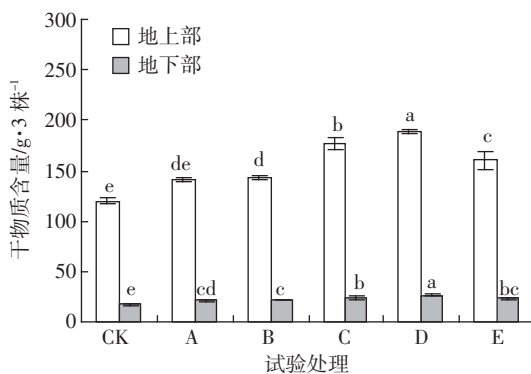


图3 成熟期大豆植株的干物质含量

Figure 3 Dry matter weight of soybean at mature

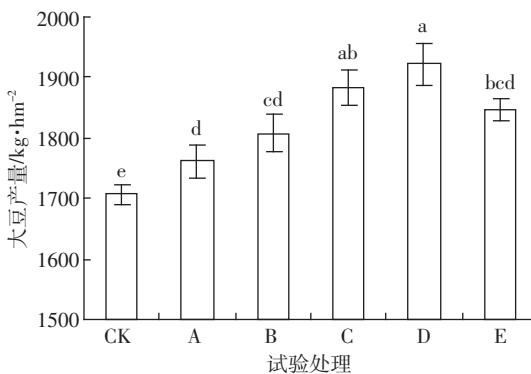


图4 各处理的大豆产量

Figure 4 Yields of soybean in different treatments

3 讨论

本试验在大豆植株各器官中均未检出 Pb, 这是由于供试土壤铅含量本身较低, 而 Pb 又属于活性较低的元素, 污泥中的 Pb 在土壤上层很容易被固定, 与土壤有机物形成配合物, 吸附在土壤中的矿物上, 进入土壤的 Pb 只有少部分是溶解态, 而溶解态的 Pb 一般只有 0.1%~0.3% 被植物吸收, 且大豆本身对重金属的富集能力也较低^[18-20]。另外 Pb 对植物的有效性还与土壤酸碱度有关, 本试验所用供试土壤 pH 值为 6.7, 接近中性, 这也是大豆植株 Pb 积累量很小以致未检出的原因^[21]。

本试验研究的重金属在大豆植株各器官中的分布结果表明, 元素 Cu、Zn 在大豆植株各器官中的分布规律是籽粒>根>豆荚>茎, Cd 在大豆植株各器官的总体分布规律是茎>根>豆荚>籽粒。这与边伟等^[22]、王意锐等^[23]的研究结果基本一致, 但与李铭红等^[24]的研究结果不一致, 可能与供试土壤的性质、大豆品种、土壤背景值、耕地种类不同等有关。很多研究表明^[25-26], 植物体内的重金属分布规律表现为在新陈代谢旺盛的器官积累量较大, 像籽粒、果实等营养储值器官积累量较小, 而 Cu、Zn 是植物生长的必需元素, 通过大豆茎叶部分较易向籽粒转移, 作物较易吸收。本试验结果与此相符。

1965 年前苏联彼列尔曼 (A.I. Perel'man) 按植物对元素的累积程度[生物吸收系数 (A_x) 即富集系数 EC]划分的 5 个元素生物吸收序列: ①生物极强烈吸收元素高至 100n (n 是 1~10 之间的数值); ②生物强烈吸收元素在 n~10n 之间; ③生物中等吸收元素在 0.1n~n 之间; ④生物弱吸收元素为 0.01n; ⑤极弱吸收元素低至 0.001n。据此当元素 $A_x > 1$ 时为生物富集元素。故本试验中只有当污泥堆肥用量大于处理 B ($12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 时, 在大豆茎中 Cd 富集系数大于 1, 其他均未达到富集程度。本试验 4 种重金属在大豆植株中的富集系数排序为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb}$, 这与很多研究结果 (重金属在作物中的富集规律) 基本一致^[27-28]。

本试验施用污泥堆肥对大豆干物重及产量的影响结果表明, 各施污处理的干物重及产量的总体规律是随着施污量的增加呈先上升后下降的趋势, 原因是污泥堆肥施入土壤后能够提供作物生长所需的养分, 为作物生长提供良好的条件, 故各处理后大豆干物重及产量均高于空白。但污泥堆肥中含有重金属, 施入量过大, 重金属会抑制污泥堆肥中养分的释放, 从而

抑制作物对养分的吸收。

4 结论

本文主要研究了施用不同水平的污泥堆肥对大豆各器官中重金属含量的影响, 结论如下:

在本研究污泥堆肥施入量范围内, 随着污泥堆肥施入量的增加, 土壤中 Cu、Zn、Cd、Pb 含量和大豆不同器官中 Cu、Zn、Cd 的含量均逐渐增加, 大豆各器官中均未检出 Pb。土壤和大豆籽粒中 Cu、Zn、Cd、Pb 均未超过国家相关标准。

元素 Cu、Zn 在大豆各器官中含量和富集系数均为籽粒>根>豆荚>茎, 而 Cd 为茎>根>豆荚>籽粒。从富集系数看, 只有污泥堆肥施入量超过 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 大豆茎对 Cd 有富集作用。

各施污处理的大豆干物重和产量的总体规律是 $D > C > E > B > A > CK$, 其中处理 D 增产效果最好, 因此可确定单施污泥堆肥的最佳施肥量是 $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

在实际农业生产中, 建议污泥堆肥与化肥配施, 这样对环境和食品安全更有利。

参考文献:

- [1] 丁竹红, 胡 忻. 南京市城市污泥和工业污泥中典型矿物质元素含量和形态分布研究[J]. 安全与环境学报, 2006(2): 57-60.
DING Zhu-hong, HU Xin. Contents and distribution of mineral elements in urban and industrial sludges in Nanjing[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006(2): 57-60.
- [2] 赵 鹏, 吴星五. 浅谈污水厂污泥堆肥化技术[J]. 四川环境, 2005, 24(3): 41-43.
ZHAO Peng, WU Xing-wu. Review of sewage sludge composting technologies[J]. *Sichuan Environment*, 2005, 24(3): 41-43.
- [3] 张清敏, 陈卫平, 胡国臣, 等. 污泥有效利用研究进展[J]. 农业环境保护, 2000, 19(1): 58-61.
ZHANG Qing-min, CHEN Wei-ping, HU Guo-chen, et al. State and development for treatment and disposal of sewage sludge in city[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(1): 58-61.
- [4] Boccelli R E, Capri E Galli, Lamberti V. Soil accumulation of heavy metals after repeated application of sludges[J]. *Fresenius Environ Bull*, 1997, 6: 642-647.
- [5] 梅 忠, 宋晓英, 赵 华. 施用污泥堆肥对土壤和小白菜重金属积累的影响[J]. 广东微量元素科学, 2009, 16(1): 31-35.
MEI Zhong, SONG Xiao-ying, ZHAO Hua. Heavy metal accumulation in *Brassica pekinensis* and in soil amended with sewage sludge compost [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2009, 16(1): 31-35.
- [6] Craig G C, Andy I B, Steven C F, et al. Seven years of biosolids versus inorganic nitrogen applications of tall fescue[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 2188-2194.
- [7] 黄雅曦, 李 季. 施用污泥堆肥对土壤和生菜重金属积累特性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2005(6): 15-18.
HUANG Ya-xi, LI Ji. Heavy metal accumulation in lettuce in soil a-

- mended with sewage sludge compost[J]. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2005(6): 15-18.
- [8] 邵海林. 城市生活垃圾和污泥的土壤和作物效应[D]. 山西: 山西农业大学, 2004.
- SHAO Hai-lin. Effects of municipal household garbage and sewage sludge on soil properties and plant growth[D]. Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2004.
- [9] 常汝镇. 国内外大豆生产动态及研究进展[J]. 中国食物与营养, 2000, 17(1): 13-15.
- CHANG Ru-zhen. The production performance and research progress of soybean at home and abroad[J]. *Food and Nutrition in China*, 2000, 17(1): 13-15.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- BAO Shi-dan. Agricultural soil analysis[M]. The third edition. Beijing: China Agricultural Press, 2005.
- [11] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- State Bureau of Environmental Protection, State Bureau of Technical Supervision. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils [S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [12] GB 2762—2012 食品中污染物限量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- GB 2762—2012 Standards for contaminant limits in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [13] GB 15199—1994 食品中 Cu 限量卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- GB 15199—1994 Limited hygiene standards of Cu in food[S]. Beijing: China Standards Press, 1994.
- [14] GB 13106—1991 食品中 Zn 限量卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- GB 13106—1991 Limited hygiene standards of Zn in food[S]. Beijing: China Standards Press, 1991.
- [15] 邵云, 姜丽娜, 李向力, 等. 五种重金属在小麦植株不同器官中的分布特征[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 204-207.
- SHAO Yun, JIANG Li-na, LI Xiang-li, et al. Distribution of five heavy metals in different organs of wheat[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 204-207.
- [16] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 等. 天津污灌区土壤重金属含量与理化性质对小麦吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1406-1410.
- WANG Zu-wei, LI Zong-mei, WANG Jing-gang, et al. Absorption to heavy metal by wheat and influencing features in sewage-irrigated soil in Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1406-1410.
- [17] 曹莹, 刘洋, 王国娇, 等. 铅-镉复合胁迫下玉米品种间积累铅、镉的差异[J]. 玉米科学, 2009, 17(1): 80-85.
- CAO Ying, LIU Yang, WANG Guo-jiao, et al. Differences in lead and cadmium concentrations among plant tissues of 25 maize cultivars under the combined stress of lead and cadmium[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(1): 80-85.
- [18] 林舜华, 黄银晓, 姚依群, 等. 铅在植物-土壤系统中的分配规律及其生态效应[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1985, 9(2): 85-91.
- LIN Shun-hua, HUANG Yin-xiao, YAO Yi-qun, et al. The distribution of Pb in the plant-soil system and its ecological reaction[J]. *Journal of Plant Ecology*, 1985, 9(2): 85-91.
- [19] 南忠仁, 程国栋. 干旱区污灌农田作物系统重金属 Cd、Pb 生态行为的研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 210-213.
- NAN Zhong-ren, CHENG Guo-dong. Behaviors of heavy metals (Cd and Pb) in crops grown in land of arid regions irrigated by wastewater [J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4): 210-213.
- [20] 刘云惠, 魏显有, 王秀敏, 等. 土壤中铅镉的作物效应研究[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(1): 24-28.
- LIU Yun-hui, WEI Xian-you, WANG Xiu-min, et al. Research on crop effects of lead and cadmium in soil[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1999, 22(1): 24-28.
- [21] 郑培源. 不同酸碱度对蓝莓重金属吸收的影响[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2010.
- ZHENG Pei-yuan. Effects of different pH on heavy metal absorption of blueberry[D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2010.
- [22] 边伟, 鄂勇, 胡振帮, 等. 重金属在施污土壤中分布及被大豆植株的吸收[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(8): 37-43.
- BIAN Wei, E Yong, HU Zhen-bang, et al. Distribution of heavy metals in cropland soils amended with sewage sludge and in the uptake by soybean[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2009, 40(8): 37-43.
- [23] 王意锃, 方升佐, 王玉军, 等. 改良剂对重金属复合污染土壤中菜用大豆品质及生理特性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(3): 87-92.
- WANG Yi-kun, FANG Sheng-zuo, WANG Yu-jun, et al. Effects of amendments on quality and physiological characteristics of young soybean grown in soil contaminated by heavy metals in combination[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(3): 87-92.
- [24] 李铭红, 李侠, 宋瑞生. 受污农田中农作物对重金属镉的富集特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 675-679.
- LI Ming-hong, LI Xia, SONG Rui-sheng. Cadmium accumulation in crops grown in polluted farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 675-679.
- [25] 纪玉琨, 李广贺. 作物对重金属吸收能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 104-108.
- JI Yu-kun, LI Guang-he. Adsorption of wheat and maize on heavy metals in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 104-108.
- [26] 刘志彦, 田耀武, 陈桂珠. 复合污染重金属在水稻不同部位的积累转运[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(2): 138-144.
- LIU Zhi-yan, TIAN Yao-wu, CHEN Gui-zhu. Accumulation and translocation of combined heavy metals in different parts of rice[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010, 49(2): 138-144.
- [27] 汪晶晶. 水稻重金属富集规律研究[J]. 农业灾害研究, 2012, 2(6): 34-35, 45.
- WANG Jing-jing. Study on the heavy metal accumulation laws in rice [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2012, 2(6): 34-35, 45.
- [28] 周彦珍. 小麦植株对重金属富集特征[J]. 农业灾害研究, 2012, 2(6): 36-37.
- ZHOU Yan-zhen. Characteristics of heavy metals accumulation in wheat plants[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2012, 2(6): 36-37.