

3种作物对添加外源性 Cu、Zn 的土壤中 Cu、Zn 的富集与转运

王玉宏, 李保同*, 汤丽梅

(江西农业大学农学院, 江西 南昌 330045)

摘要:以 Cu、Zn 为研究对象, 分别在土壤中添加猪粪 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、猪粪 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ + Cu $63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ + Zn $54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、猪粪 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ + Cu $126\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ + Zn $108\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 同时设置不添加猪粪和外源性 Cu、Zn 的对照处理组, 通过盆栽试验研究了施用猪粪和外源性 Cu、Zn 后土壤中 Cu、Zn 在大蒜、白菜和玉米体内的富集和转运特征。结果表明, 只添加猪粪能显著提高作物生物量, 而添加猪粪+高剂量的 Cu+Zn 可抑制作物生长。其中不同作物的抑制强度表现为白菜>大蒜>玉米, 同种作物的抑制强度表现为根部>茎叶部。3种作物对 Zn 的积累显著高于 Cu, 其中大蒜对 Cu 的累积主要分布在茎叶部, 对 Zn 的积累主要分布在根部, 而白菜和玉米对 Cu 的积累主要分布在根部, 对 Zn 的积累主要分布在茎叶部。在添加猪粪+Cu+Zn 处理的3种作物中, Cu 浓度均低于国家的食品限量卫生标准, 而白菜和玉米中 Zn 浓度均高于国家的食品限量卫生标准, 在添加猪粪+低剂量的 Cu、Zn 处理的大蒜中, Zn 浓度低于国家食品限量卫生标准。土壤中 Cu、Zn 全量和有效态含量与大蒜、白菜和玉米的茎叶和根部 Cu、Zn 含量具有显著的相关性($P<0.01$), 因此, 可用土壤中 Cu、Zn 全量或有效态含量表征植物各部分吸收 Cu、Zn 的效果。3种作物对 Zn 的富集系数和转运系数均大于 Cu。其中对 Cu 的富集系数表现为大蒜>白菜>玉米, 对 Zn 的富集系数表现为白菜>玉米>大蒜。3种作物只添加猪粪处理对 Cu、Zn 的富集系数均略有上升, 而添加猪粪+Cu+Zn 处理的富集系数随 Cu、Zn 添加浓度的提高而下降, 白菜和玉米对 Cu、Zn 的转运系数均下降, 大蒜对 Cu 的转运系数上升, 对 Zn 的转运系数下降。添加猪粪和高剂量外源性 Cu、Zn 可显著抑制作物生长, 作物对 Cu 的积累显著低于 Zn, 对 Zn 的富集系数和转运系数均大于 Cu; 作物各部分对 Cu、Zn 的吸收效果可用土壤中 Cu、Zn 全量或有效态含量来表征。

关键词:作物; 外源性 Cu 和 Zn; 猪粪; 土壤; 富集; 转运

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)02-0250-07 doi:10.11654/jaes.2014.02.007

Bioconcentration and Translocation of Cu and Zn by Three Crops Grown in Exogenous Cu and Zn Added Soil

WANG Yu-hong, LI Bao-tong*, TANG Li-mei

(College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: Bioaccumulation and translocation of soil Cu and Zn by garlic (*Allium sativum*), Chinese cabbage (*Brassica rapa*) and corn (*Zea mays*) grown in a soil added with pig manure and exogenous Cu and Zn were investigated in pot experiment. Three treatments, pig manure $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pig manure $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ + Cu $63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ + Zn $54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pig manure $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ + Cu $126\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ + Zn $108\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, were employed with soil receiving no pig manure or exogenous Cu or Zn as the control. Results showed that adding pig manure only could significantly increase the biomass of crops, while pig manure with high concentrations of exogenous Cu + Zn could inhibit the growth of crops, compared with the CK. Such inhibition was in order of cabbage>garlic>corn and root>stem or leaf. The concentration of Zn was significantly greater than that of Cu for three crops at each treatment. For garlic, Cu was mainly accumulated in the stems and leaves, while Zn distributed mostly in the roots. For Chinese cabbage and corn, Cu was largely present in roots, but Zn most in stems and leaves. Copper concentrations in three crops were lower than the National Food Health Standard ($10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), but Zn concentrations in Chinese cabbage and corn were higher than the National Food Health Standard ($20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and Zn in garlic with low Cu and Zn addition was lower than the standard. Total

收稿日期: 2013-06-20

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(20114BAB204010)

作者简介: 王玉宏(1987—), 男, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 从事土壤环境化学研究。E-mail: wyh8885856@163.com

* 通信作者: 李保同 E-mail: libt66@163.com

and available Cu and Zn in soil were significantly positively correlated with Cu and Zn concentrations in stems, leaves and roots of garlic, Chinese cabbage and corn ($P < 0.01$). Both bioconcentration factor and translocation factor of Zn were greater than those of Cu for three crops at every treatment. The bioconcentration factor was garlic > Chinese cabbage > corn for Cu, whereas Chinese cabbage > corn > garlic for Zn. Bioconcentration factors of Cu and Zn for three crops were slightly greater in treatments with pig manure only than with pig manure plus exogenous Cu and Zn, being decreased with increasing Cu and Zn additions. The translocation factors of Cu and Zn decreased in Chinese cabbage and corn. In garlic, Cu translocation factor increased, but that of Zn decreased.

Keywords: crop; exogenous Cu and Zn; pig manure; soil; bioconcentration; translocation

在现代农业中有机肥占有极其重要的地位,而畜禽粪便作为常用的有机肥不仅为土壤提供丰富的营养,而且可改善土壤结构,提高作物的产量和品质。Cu、Zn 是广泛应用于猪饲料中的添加剂,它可抑制猪体内有害微生物的生长,促进猪的生长发育^[1-3]。然而,过量使用含 Cu、Zn 的添加剂极易导致其在猪粪中较高浓度的残留^[4-5]。长期使用含高 Cu、Zn 的猪粪会造成 Cu、Zn 在土壤中的浓度增加,这不仅可能影响植物的生长发育,而且易导致 Cu、Zn 在植物内大量累积,通过食物给人体健康带来风险^[6-7]。目前,作物中重金属含量已受到人们的广泛关注^[8-13],而对猪粪中 Cu、Zn 污染所导致的土壤风险研究相对较少^[14],尤其缺乏不同作物对 Cu、Zn 富集差异方面的报道。生物富集系数和转运系数可说明土壤重金属含量对作物重金属含量的直接影响以及作物对重金属的吸收与累积特性的差异^[15-16]。本文针对长期使用含高 Cu、Zn 的猪粪造成 Cu、Zn 在土壤中积累的现实情况,通过施用猪粪和高剂量外源性 Cu、Zn,采用盆栽试验法研究了 3 种作物对土壤中 Cu、Zn 的富集和转运特征,以期随农用有机肥施入到土壤中的 Cu、Zn 对农产品污染和人体健康危害进行风险评估提供理论依据,为蔬菜安全生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为南昌市江西农业大学科技园旱地 0~20 cm 的表层土,土壤类型为红色壤土,该地区常年种植雍菜、萝卜等作物;供试猪粪采自江西省新建县厚田乡一规模化养猪场。土壤和猪粪采集后自然风干,磨细过 2 mm 筛备用,其理化性质参照鲍士旦^[17]的方法测定,结果见表 1。供试作物为紫皮大蒜(*Allium sativum*)、夏白菜(*Brassica rapa*)和甜玉米(*Zea mays*),种子均由南昌市蔬菜研究所提供。

1.2 样品采集与分析

试验安排在江西农业大学农学院日光玻璃温室内进行,栽培时间为 2012 年 5—6 月。盆栽试验采用高 20 cm、直径 22 cm/18 cm(口/底)的盆钵,每盆装土 2.5 kg,拌入猪粪 10 g·kg⁻¹ 土,相当于每公顷农田施入 8 t 猪粪,Cu、Zn 分别以 CuSO₄ 和 ZnSO₄ 溶液形式加入,用于模拟不同施肥年限下土壤积累的 Cu、Zn 含量。CuSO₄ 和 ZnSO₄ 溶液与土壤混合平衡 1 周,再与猪粪混匀平衡 2 周后直接播种。试验设猪粪 10 g·kg⁻¹ (FM₁)、猪粪 10 g·kg⁻¹ + Cu 63 mg·kg⁻¹ + Zn 54 mg·kg⁻¹ (FM₂)、猪粪 10 g·kg⁻¹ + Cu 126 mg·kg⁻¹ + Zn 108

表 1 供试红壤和猪粪的基本理化性质

Table 1 Physicochemical characteristics of soil and pig manure used in the experiment

样品 Samples	pH 值	有机质 SOM/g·kg ⁻¹	黏粒 (<0.002 mm) Clay/%	全 N Total N/ g·kg ⁻¹	全 P Total P/ g·kg ⁻¹	全 K Total K/ g·kg ⁻¹	全 Cu Total Cu/ mg·kg ⁻¹	全 Zn Total Zn/ mg·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹
猪粪 Pig manure	6.83	—	—	23.42	9.26	9.02	177.98	359.40	—
红壤 Red soil	5.54	18.15	30.14	1.06	0.36	5.62	29.28	91.91	13.60
土壤环境质量标准 Environmental quality standard for soils	<6.5						≤50	≤200	

注:国家土壤环境质量标准是国家二级标准(GB 15618—1995),主要适用于一般农田、蔬菜地、茶园、果园、牧场等土壤,土壤质量对植物和环境基本不造成危害和污染。

Note: The national environmental quality standard for soils refers to the level two standard (GB 15618—1995) here, and is mainly applicable to general farmland, vegetable, tea garden, orchard, and pasture soil, which does not cause harm or pollution to plants and the environment.

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FM_3) 3个施肥处理,以不添加猪粪和外源性 Cu、Zn 的处理作对照(CK)。每处理 6 盆,每盆播 20 粒种子,发芽后保持 4 株,作物生长期按常规方法进行。待作物生长 60 d 后收获全株,用蒸馏水冲洗表面土壤,再用超纯水冲洗 3 次,用滤纸吸干水分后称量茎叶部和根部鲜重,然后置于称量瓶内在 105°C 下杀青 15 min,再置于 $80\sim 90^\circ\text{C}$ 的烘箱内烘干至恒重。同时采集全部土壤样品,风干过筛,用于 Cu、Zn 含量和化学性质分析。

土壤全 Cu、Zn 用三酸($\text{HF}-\text{HClO}_4-\text{HNO}_3$)消解,定容过滤后用原子吸收分光光度法测定 Cu、Zn 含量。DTPA 提取态 Cu、Zn 的测定参照鲍士旦^[17]的分析方法。猪粪和作物样品重金属全量采用 $\text{HNO}_3-\text{HClO}_4$ 消煮,原子吸收分光光度法测定^[18]。

1.3 数据处理与统计分析

作物对 Cu、Zn 的富集系数与转运系数分别按下式计算:富集系数=茎叶重金属含量/土壤重金属含量;转运系数=茎叶重金属含量/根重金属含量^[19]。

实验数据采用 SPSS 17 软件进行方差分析,用 Excel 2003 进行相关性分析和多元线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 土壤中 Cu 和 Zn 的含量

添加猪粪或猪粪+Cu、Zn 后平衡 2 周,土壤 Cu 和 Zn 全量浓度范围分别为 $31.04\sim 157.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $95.72\sim 204.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态浓度范围分别为 $6.65\sim 22.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $27.74\sim 73.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均高于对照处

理,其中 FM_2 和 FM_3 土壤重金属 Cu 及 FM_3 土壤重金属 Zn 含量皆超过国家土壤环境质量二级标准(表 1、表 2)。播种 60 d 作物采收后, FM_2 和 FM_3 处理土壤 Cu 和 Zn 全量浓度范围仍分别达 $93.89\sim 157.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $148.59\sim 204.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态浓度范围分别达 $16.72\sim 22.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $48.45\sim 73.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)。因此,外源 Cu、Zn 的输入可能导致土壤重金属的积累,而当土壤中 Cu 含量超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,会造成植物中毒,影响植物产量和品质^[4]。

2.2 土壤 Cu 和 Zn 对作物生长的影响

只添加猪粪能显著提高作物生物量,但添加猪粪的同时添加 Cu、Zn 可抑制这种作用,而且添加高剂量的 Cu、Zn 时甚至抑制了作物的生长,不同作物对 Cu、Zn 的响应存在差异(表 3)。与 CK 比较, FM_1 的大蒜、白菜和玉米茎叶部鲜重分别增加 72.48%、33.33% 和 19.44%,干重分别增加 88.89%、71.43% 和 18.49%,根系部鲜重分别增加 61.68%、38.89% 和 29.08%,干重分别增加 20.75%、150.00% 和 35.29%; FM_3 的大蒜、白菜和玉米茎叶部鲜重分别降低 33.56%、83.33% 和 28.33%,干重分别降低 44.44%、71.43% 和 20.05%,根系部鲜重分别降低 56.39%、83.33% 和 29.88%,干重分别降低 54.72%、50.00% 和 23.53%。其中, FM_3 处理的大蒜、白菜和玉米茎叶部及根部的鲜重、干重显著低于 FM_1 。3 种作物对添加的 Cu、Zn 响应不同,其中 Cu、Zn 对白菜生长的抑制作用最强,其次为大蒜和玉米。

Cu、Zn 是植物生长的必需微量元素,猪粪等有

表 2 3 种作物播种前和播种后 60 d 土壤中 Cu 和 Zn 的含量变化
Table 2 Soil Cu and Zn concentrations before and 60 days after growing three crops

金属种类 Metals	处理 Treatments	播种前 Before growing		播种后 60 d 60 days after growing					
		全量 Total contents/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效态 Available contents/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	大蒜 <i>Allium sativum</i>		白菜 <i>Brassica rapa</i>		玉米 <i>Zea mays</i>	
				全量 Total contents/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效态 Available contents/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全量 Total contents/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效态 Available contents/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全量 Total contents/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效态 Available contents/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Cu	CK	29.28±2.30c	6.07±0.78c	29.21±0.65c	6.04±0.75c	29.27±1.20c	6.06±0.77c	29.22±0.64c	6.03±0.62c
	FM_1	31.04±2.67c	6.65±1.17c	30.98±0.50c	6.61±0.83c	31.03±0.97c	6.64±1.15c	30.93±0.46c	6.58±0.93c
	FM_2	94.08±2.90b	16.76±0.95b	94.04±1.09b	16.73±1.06b	94.02±2.11b	16.72±0.48b	93.89±1.09b	16.89±1.04b
	FM_3	157.08±4.02a	22.39±1.02a	156.96±2.38a	22.35±0.45a	157.07±3.06a	22.38±1.10a	156.83±2.51a	22.31±1.21a
Zn	CK	91.83±1.68d	26.79±1.11c	91.47±1.11d	26.61±1.21c	91.78±2.23d	26.75±0.98c	90.63±1.07c	26.42±1.02c
	FM_1	95.72±0.90c	27.74±0.38c	95.41±0.58c	27.59±1.74c	95.47±1.19c	27.64±0.37c	93.55±0.48c	27.00±0.71c
	FM_2	150.33±4.00b	49.05±1.38b	150.16±3.16b	48.96±1.39b	150.04±4.17b	48.93±1.77b	148.59±3.25b	48.45±1.19b
	FM_3	204.57±4.26a	73.08±4.84a	203.85±3.34a	72.82±4.77a	204.33±3.13a	73.02±3.90a	202.28±3.38a	72.19±3.57a

注:表中同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著,下同。

Note: Different small letters in the same column within each metal indicate significant difference at 0.05 levels. The same below.

表 3 供试作物茎叶和根的生物量
Table 3 Biomass of aboveground and roots of three crops

类型 Types	处理 Treatments	大蒜/g·株 ⁻¹ <i>Allium sativum</i> /g·plant ⁻¹		白菜/g·株 ⁻¹ <i>Brassica rapa</i> /g·plant ⁻¹		玉米/g·株 ⁻¹ <i>Zea mays</i> /g·plant ⁻¹	
		茎叶 Aboveground	根 Roots	茎叶 Aboveground	根 Roots	茎叶 Aboveground	根 Roots
鲜重 Fresh weight	CK	1.49±0.21b	3.21±1.31b	3.66±0.32b	0.18±0.03b	39.15±3.39b	2.51±0.12a
	FM ₁	2.57±0.68a	5.19±1.28a	4.88±0.91a	0.25±0.04a	46.76±4.90a	3.24±1.00a
	FM ₂	2.10±0.59bc	2.03±0.70bc	4.12±0.62ab	0.12±0.01b	31.55±4.13c	2.40±0.56a
	FM ₃	0.99±0.21c	1.40±0.74c	0.61±0.08c	0.03±0.04c	28.06±3.21c	1.76±0.18b
干重 Dry weight	CK	0.09±0.01c	0.53±0.14b	0.35±0.04b	0.02±0.00bc	4.44±0.48b	0.34±0.07b
	FM ₁	0.17±0.05a	0.64±0.09a	0.60±0.09a	0.05±0.02a	5.26±0.43a	0.46±0.06a
	FM ₂	0.14±0.03b	0.39±0.07c	0.54±0.13a	0.04±0.00ab	3.88±0.85bc	0.37±0.05b
	FM ₃	0.05±0.01d	0.24±0.07d	0.10±0.01c	0.01±0.00c	3.35±0.42c	0.26±0.05c

机肥可增加作物的产量,但长期施用含高浓度 Cu、Zn 的猪粪,易造成 Cu、Zn 在土壤中的积累,对作物生长造成不良影响。Sun 等^[20]报道低浓度的外源 Cu 可显著增加小白菜鲜重,而高浓度的外源 Cu 抑制小白菜的生长,其叶绿素值随 Cu 污染浓度的增加而下降,高 Cu 污染下根系的生理特征发生显著变化,其体内生理代谢过程紊乱,进一步影响到产量和品质。Patra 等^[21]报道大部分植物含 Zn 量为 10~100 mg·kg⁻¹,当 Zn 含量超过 50 mg·kg⁻¹ 就会发生 Zn 中毒,植物光合作用受抑制,同时细胞膜渗透性发生改变。徐明岗等^[22]证实当土壤中 Cu 和 Zn 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时,对番茄根的伸长抑制率分别为 40.00%和21.00%,当 Cu 和 Zn 浓度分别达 400 mg·kg⁻¹ 和 500 mg·kg⁻¹ 时,番茄植株不再生长。本研究表明,当土壤中 Cu 和 Zn 全量分别达到 157.08 mg·kg⁻¹ 和 204.57 mg·kg⁻¹ 时,对大蒜、白菜和玉米均有不同程度的抑制作用,其中对白菜的茎叶和根系生长抑制最为显著,而对玉米生长的影响相对较小,这与其他研究结果相符^[9]。

2.3 3 种作物 Cu 和 Zn 的含量

作物茎叶和根中 Cu、Zn 浓度随着土壤中外源性 Cu、Zn 添加浓度的增加而上升(表 4),这与其他研究结果相符^[23]。与 CK 比较,FM₁、FM₂ 和 FM₃ 大蒜茎叶中 Cu 的积累量分别增加 35.80%、159.26%和 257.41%,根系中 Cu 的积累量分别增加 3.21%、23.72%和 32.05%,茎叶中 Zn 的积累量分别增加 15.79%、43.92%和 73.06%,根系中 Zn 的积累量分别增加 1.16%、17.34%和 54.35%;白菜茎叶中 Cu 的积累量分别增加 4.35%、251.30%和 373.91%,根系中 Cu 的积累量分别增加 16.57%、821.89%和 840.83%,茎叶中 Zn 的积累量分别增加 38.08%、81.22%和 94.30%,根系中 Zn 的积累量分别增加 19.04%、51.24%和 75.38%;玉米茎叶中 Cu 的积累量分别增加 10.13%、64.56%和 100.00%,根系中 Cu 的积累量分别增加 52.21%、416.18%和 1186.76%,茎叶中 Zn 的积累量分别增加 6.66%、29.47%和 122.54%,根系中 Zn 的积累量分别增加 35.42%、63.31%和 191.05%。由此说明,不同作物或同种作物不同部位对不同重金属的吸收

表 4 3 种作物中 Cu、Zn 的含量
Table 4 Concentrations of Cu and Zn in three crops

重金属 Heavy metals	处理 Treatments	大蒜 <i>Allium sativum</i> /mg·kg ⁻¹		白菜 <i>Brassica rapa</i> /mg·kg ⁻¹		玉米 <i>Zea mays</i> /mg·kg ⁻¹	
		茎叶 Aboveground	根 Roots	茎叶 Aboveground	根 Roots	茎叶 Aboveground	根 Roots
Cu	CK	1.62±0.37d	3.12±0.13b	1.15±0.37c	1.69±0.13b	0.79±0.08b	1.36±0.06c
	FM ₁	2.20±0.27c	3.22±0.30ab	1.20±0.04c	1.97±0.17b	0.87±0.18b	2.07±0.34c
	FM ₂	4.20±0.08b	3.86±0.79ab	4.04±0.69b	15.58±1.34a	1.30±0.08a	7.02±1.47b
	FM ₃	5.79±0.11a	4.12±0.21a	5.45±0.97a	15.90±3.32a	1.58±0.26a	17.51±0.92a
Zn	CK	11.84±0.68c	16.32±0.51c	23.16±2.21c	24.90±2.50d	18.63±2.19b	13.41±0.86c
	FM ₁	13.71±1.65c	16.51±0.58c	31.98±1.84b	29.64±0.86c	19.87±2.58b	18.16±1.37b
	FM ₂	17.04±1.90b	19.15±0.79b	41.97±3.18a	37.66±3.45b	24.12±3.24b	21.90±3.38b
	FM ₃	20.49±1.39a	25.19±1.07a	45.00±3.07a	43.67±1.38a	41.46±2.11a	39.03±3.02a

表 5 作物各部分重金属含量与土壤中有效态和全量 Cu、Zn 含量之间的相关性
Table 5 Correlation coefficients between concentrations of Cu and Zn in crops and in soil

作物 Crops	重金属 Metals	参数 Parameters	全量 Total concentrations			有效态 Available concentrations		
			回归方程 Regression equation	R^2	F	回归方程 Regression equation	R^2	F
大蒜 <i>Allium sativum</i>	Cu	茎叶 Stem leaf	$Y=31.037\ 1X-29.749\ 2$	0.983 8**	420.556 8	$Y=4.086\ 6X-1.201\ 6$	0.981 3**	364.447 5
		根 Root	$Y=78.883\ 2X-204.588\ 9$	0.786 2**	22.662 5	$Y=10.624\ 4X-25.074\ 8$	0.802 3**	25.282 5
	Zn	茎叶 Stem leaf	$Y=7.585\ 0X-64.121\ 7$	0.875 0**	45.754 1	$Y=5.151\ 0X-37.065\ 0$	0.936 2**	99.362 7
		根 Root	$Y=4.954\ 0X-28.546\ 1$	0.910 6**	67.975 6	$Y=4.658\ 9X-46.551\ 4$	0.959 3**	161.406 4
白菜 <i>Brassica rapa</i>	Cu	茎叶 Stem leaf	$Y=25.904\ 9X+2.420\ 9$	0.960 1**	164.973 6	$Y=3.408\ 6X+3.040\ 8$	0.957 1**	152.669 8
		根 Root	$Y=6.684\ 7X+19.149\ 1$	0.896 8**	57.525 4	$Y=0.919\ 2X+4.893\ 6$	0.934 3**	96.153 4
	Zn	茎叶 Stem leaf	$Y=4.586\ 8X-27.350\ 4$	0.877 1**	46.674 8	$Y=1.878\ 4X-22.568\ 9$	0.869 0**	43.175 6
		根 Root	$Y=5.877\ 7X-64.045\ 1$	0.946 0**	119.226 4	$Y=2.410\ 2X-37.703\ 3$	0.938 5**	103.441 9
玉米 <i>Zea mays</i>	Cu	茎叶 Stem leaf	$Y=142.909\ 2X-83.948\ 2$	0.924 4**	82.237 5	$Y=18.972\ 5X-8.514\ 5$	0.929 8**	89.293 3
		根 Root	$Y=7.956\ 9X+22.250\ 7$	0.978 5**	315.446 8	$Y=1.002\ 2X+5.963\ 1$	0.933 7**	95.235 6
	Zn	茎叶 Stem leaf	$Y=4.610\ 3X+15.656\ 1$	0.932 5**	93.349 4	$Y=1.930\ 8X-6.070\ 1$	0.944 9**	116.533 5
		根 Root	$Y=4.406\ 0X+33.723\ 0$	0.937 9**	102.316 9	$Y=1.830\ 2X+1.845\ 1$	0.942 5**	111.408 4

注:**表示 $P<0.01$ 。Note:** indicates $P<0.01$ 。

富集能力不同。虽然 Cu 在 3 种作物茎叶中的浓度显著升高,但仍低于国家标准规定的食品中 Cu 限量卫生标准(MRL 值 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),而 Zn 除 FM₂ 组的大蒜外,在 FM₂ 和 FM₃ 组白菜和玉米茎叶中的浓度均高于国家标准规定的食品中 Zn 限量标准(MRL 值 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

为了进一步确定土壤中 Cu、Zn 的生物有效性,建立了土壤中 Cu、Zn 全量及有效态含量与作物茎叶和根部 Cu、Zn 含量的线性回归方程(表 5)。结果表明,作物茎叶和根部 Cu、Zn 含量与土壤中 Cu、Zn 全量及有效态含量呈正相关,各决定系数(R^2)均大于 0.78($P<0.01$)。因此,可用土壤中 Cu、Zn 全量或有效态含量来表征植物各部分吸收 Cu、Zn 的效果。

2.4 3 种作物对 Cu 和 Zn 的富集和运转

重金属的富集系数是指作物茎叶部分的重金属含量与土壤相应重金属含量之比,它可评价土壤-作

物系统中元素迁移的难易程度^[24]。一般来说,作物对重金属的富集系数越小,表明其吸收重金属的能力越差,抗土壤重金属污染的能力越强。本实验表明,不同作物对同种金属的富集能力不同,同种作物对不同重金属的富集能力也存在差异,3 种作物对 Cu 的富集能力均显著低于 Zn。3 种作物对 Cu 的富集系数为 1.00%~7.09%,其大小顺序为大蒜>白菜>玉米,其中大蒜和玉米对 Cu 的富集系数为 FM₁>FM₂>FM₃,白菜以 FM₂ 处理富集系数最高,其他依次为 FM₃ 和 FM₁;3 种作物对 Zn 的富集系数为 10.02%~33.42%,其大小顺序为白菜>玉米>大蒜,其中大蒜 FM₁ 和 CK 处理显著大于 FM₂ 和 FM₃ 处理,白菜 FM₁ 处理显著大于 FM₂、FM₃ 和 CK 处理,而玉米 FM₁ 处理与 FM₃ 和 CK 处理无显著差异(表 6)。由此说明,Zn 在猪粪-土壤-作物系统中的迁移能力高于 Cu,这与其他研究结果相符^[25]。

表 6 3 种作物对 Cu 和 Zn 的富集系数和转运系数
Table 6 Bioconcentration factors and translocation factors of Cu and Zn in three crops

金属种类 Metals	处理 Treatments	富集系数 Bioconcentration factor/%			转运系数 Translocation factor/%		
		大蒜 <i>Allium sativum</i>	白菜 <i>Brassica rapa</i>	玉米 <i>Zea mays</i>	大蒜 <i>Allium sativum</i>	白菜 <i>Brassica rapa</i>	玉米 <i>Zea mays</i>
Cu	CK	5.55±1.09b	3.95±1.11a	2.71±0.30a	52.26±11.24c	68.94±1.26a	58.11±5.05a
	FM ₁	7.09±0.66a	3.23±0.16a	2.80±0.53a	69.1±11.78c	51.08±2.25b	42.57±9.90b
	FM ₂	4.52±0.20c	4.30±0.58a	1.38±0.06b	112.03±16.25b	26.17±5.17c	18.97±3.76c
	FM ₃	3.69±0.15c	3.47±0.48a	1.00±0.14b	140.83±7.56a	23.98±4.43c	9.02±1.48d
Zn	CK	12.89±0.55a	25.21±1.81c	20.28±1.88a	72.63±14.37b	93.81±1.20b	139.49±18.07a
	FM ₁	14.32±1.35a	33.42±1.63a	20.75±2.11a	82.92±4.44ab	107.90±1.07ab	110.25±18.91b
	FM ₂	11.35±1.18b	27.94±2.12b	16.07±1.99b	88.90±14.49a	112.30±1.67a	110.54±7.92b
	FM ₃	10.02±0.67b	22.01±1.44d	20.27±0.94a	79.24±6.99ab	103.14±1.13ab	106.44±5.78b

作物茎叶与根部Cu、Zn含量比值的变化,可表征Cu、Zn在作物体内转运能力的差异。本实验表明,3种作物对Cu的转运系数为9.02%~140.83%,其中大蒜对Cu的转运系数为 $FM_3 > FM_2 > FM_1 > CK$,而白菜和玉米为 $CK > FM_1 > FM_2 > FM_3$;3种作物对Zn的转运系数为72.63%~139.49%,同种作物 FM_1 、 FM_2 和 FM_3 处理间无显著差异,其中白菜和玉米对Zn的转运系数显著大于Cu(表6)。由此说明,Zn由白菜和玉米根系向茎叶转移的能力大于Cu,这与其他研究结果相符^[9]。本实验同时发现,Cu在大蒜中主要积累在茎叶部,而Zn主要积累在根部,Zn由大蒜根系向茎叶转移的能力小于Cu,其机理有待进一步研究。

3 结论

只添加猪粪能显著提高作物生物量,而添加猪粪和高剂量外源性Cu、Zn可抑制作物生长;3种作物对Cu的积累显著低于Zn,对Zn的富集系数和转运系数均大于Cu;可用土壤中Cu、Zn全量或有效态含量来表征植物各部分吸收Cu、Zn的效果。

参考文献:

- [1] 潘 寻,韩 哲,贲伟伟.山东省规模化猪场猪粪及配合饲料中重金属含量研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 160-165.
PAN Xun, HAN Zhe, BEN Wei-wei. Heavy metal contents in pig manure and pig feeds from intensive pig farms in Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 160-165.
- [2] Huang Y, Zhou T X, Lee J H. Effect of dietary copper sources (cupric sulfate and cupric methionate) and concentrations on performance and fecal characteristics in growing pigs[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2010, 23(6): 757-761.
- [3] Jacela J Y, Derouchey J M, Tokach M D. Feed additives for swine: Fact sheets—high dietary levels of copper and zinc for young pigs, and phy-tase[J]. *Journal of Swine Health and Production*, 2010, 18(2): 87-91.
- [4] Nicholson F A, Chambers B J, Williams J R, et al. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 70(1): 23-31.
- [5] 李和国. 规模化猪场猪粪中的营养素分析研究[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(3): 77-81.
LI He-guo. The analysis and research of nutrients in pig manure in the large-scale pig farms[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2009, 30(3): 77-81.
- [6] Bolan N S, Khan M A, Donaldson J. Distribution and bioavailability of copper in farm effluent[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 309(1-3): 225-236.
- [7] Hsu S C, Liu S C, Jeng W L. Variations of Cd/Pb and Zn/Pb ratios in Taipei aerosols reflecting long-range transport or local pollution emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 347(1-3): 111-121.
- [8] Zhou D M, Hao X Z, Wang Y J. Copper and Zn uptake by radish and pakchoi as affected by application of livestock and poultry manures[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(2): 167-175.
- [9] 张 妍,崔晓勇,罗 维,等.小白菜对猪粪中高Cu和Zn的富集与转运[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1482-1488.
ZHANG Yan, CUI Xiao-yong, LUO Wei, et al. Bioconcentration and translocation of Cu and Zn by *Brassica sinensis* L. planted in high Cu and Zn contaminated pig manure-applied soils[J]. *Environment Science*, 2011, 32(5): 1482-1488.
- [10] 方凤满,汪琳琳,谢宏芳,等.芜湖市三山区蔬菜中重金属富集特征及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1471-1476.
FANG Feng-man, WANG Lin-lin, XIE Hong-fang, et al. Enrichment characteristic and health risk assessment of heavy metals in vegetables in Sanshan District, Wuhu City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1471-1476.
- [11] 王 飞,林 诚,李清华,等.长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒与土壤锌、硼、铜、铁、锰含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1056-1063.
WANG Fei, LIN Cheng, LI Qing-hua, et al. Effects of long-term fertilization on contents of Zn, B, Cu, Fe and Mn in rice grain and soil in yellow paddy fields of Southern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1056-1063.
- [12] 夏凤英,李政一,杨 阳.南京市郊设施蔬菜重金属含量及健康风险分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(2): 183-187.
XIA Feng-ying, LI Zheng-yi, YANG Yang. Concentration analysis and health risk assessment of heavy metals in greenhouse vegetables of Nan-jing Suburb[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(2): 183-187.
- [13] 李 鸣,吴结春,李丽琴.鄱阳湖湿地22种植物重金属富集能力分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2413-2418.
LI Ming, WU Jie-chun, LI Li-qin. Absorption and accumulation of heavy metals by plants in Poyang Lake Wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2413-2418.
- [14] Jacek D, Dick S. Heavy metals balance in polish and dutch agronomy: Actual state and previsions for the future[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 107(4): 309-316.
- [15] Wei J L, Lai H Y, Chen Z S. Chelator effects on bioconcentration and translocation of cadmium by hyperaccumulators, *Tagetes patula* and *Impatiens walleriana*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 84(1): 173-178.
- [16] Hao X Z, Zhou D M, Huang D Q, et al. Heavy metal transfer from soil to vegetable in Southern Jiangsu Province, China [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(3): 305-311.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
BAO Shi-dan. Analyses of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2008.
- [18] 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, 1999.
LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [19] Song N H, Zhang S, Hong M, et al. Impact of dissolved organic matter

- on bioavailability of chlorotoluron to wheat[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(3):906-912.
- [20] 孙 权,何振立,杨肖娥,等.铜对小白菜的毒性效应及其生态健康指标[J].植物营养与肥科学报,2007,13(2):324-330.
- Sun Q, He Z L, Yang X E. Toxic effects of copper on Chinese cabbage and its ecological health parameter[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2):324-330.
- [21] Patra M, Bhowmik N, Bandopadhyay B. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52(3):199-223.
- [22] 徐明岗,纳明亮,张建新,等.红壤中Cu、Zn、Pb污染对蔬菜根伸长的抑制效应[J].中国环境科学,2008,28(2):153-157.
- XU Ming-gang, NA Ming-liang, ZHANG Jian-xin, et al. Inhibition effects of Cu, Zn and Pb on vegetable root elongation in contaminated red soil[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(2):153-157.
- [23] 许中坚,邱喜阳,冯 涛,等.酸雨地区蔬菜对重金属的吸收及重金属健康风险基准的估算[J].水土保持学报,2008,22(4):179-184.
- XU Zhong-jian, QIU Xi-yang, FENG Tao, et al. Uptake of heavy metals by vegetables and estimation of guidelines for health risk to heavy metals in vegetable plantation soil in acid rain area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4):179-184.
- [24] Azplazu M N, Romero F. Metal distribution and interaction in plant cultures on artificial soil[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1986, 28(1-2):1-26.
- [25] 窦 磊,马 瑾,周永章,等.广东东莞地区土壤-蔬菜系统重金属分布与富集特性分析[J].中山大学学报:自然科学版,2008,47(1):98-101.
- DOU Lei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in soil-vegetable system of Dongguan Area, Guangdong Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(1):98-101.