

小白菜对猪粪中高 Cu 和 Zn 的富集与转运

张妍^{1,2}, 崔骁勇^{1*}, 罗维², 时鹏¹, 吕永龙²

(1. 中国科学院研究生院资源与环境学院, 北京 100049; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:近年来, 规模化养猪中 Cu 和 Zn 广泛应用于饲料添加剂, 导致猪粪含大量的 Cu 和 Zn。猪粪土地利用中高 Cu 和 Zn 导致的环境污染和植物效应已引起了人们的高度关注。研究高 Cu 和 Zn 的猪粪施入土壤后典型蔬菜对 Cu 和 Zn 的富集和转运, 可为有机蔬菜安全生产和品质提高提供科学依据, 对粪便中重金属的健康风险评价具有重要的参考价值。本研究以含高 Cu 和 Zn 的猪粪(Cu 为 $1\,114.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn 为 $1\,496.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 堆肥作为试验材料, 设 5 个施肥处理(25、50、100、200 和 $500\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和不施肥的对照处理。通过盆栽试验研究了猪粪施用土壤中 Cu 和 Zn 向小白菜体内的富集和转运特征。结果表明, 不同施肥水平下小白菜地上、地下部 Zn 含量都高于 Cu, 且地下部 Cu 和 Zn 的含量均高于地上部。在猪粪施肥量 $> 50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 小白菜地上部 Cu 和 Zn 含量显著高于对照处理。随着猪粪施用量的增加, 小白菜对土壤中 Cu 的富集系数从 0.11 上升到 0.17, 但对 Zn 的富集系数则从 0.47 下降到 0.11。小白菜将 Cu 和 Zn 从地下部向地上部运输和转移的比例随着施用量的增加分别下降 25% 和 38%。增加猪粪施用量相对降低了重金属 Zn 在植物体内的富集, 但提高了 Cu 在蔬菜中的富集和对人体的健康风险。植物地上部、地下部以及整株的 Zn/Cu 都随着猪粪施用量的增加而降低, 增加猪粪的施用量可使小白菜对 Cu 和 Zn 吸收转运能力的差异减小。

关键词:猪粪; Cu; Zn; 小白菜; 富集; 转运

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1482-07

Bioconcentration and Translocation of Cu and Zn by *Brassica sinensis* L. Planted in High Cu and Zn Contaminated Pig Manure-Applied Soils

ZHANG Yan^{1,2}, CUI Xiao-yong¹, LUO Wei², SHI Peng¹, LÜ Yong-long²

(1. College of Resources and Environment, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In recent years, Cu and Zn have been widely used in pig fodders in large-scale animal feeding, causing Cu and Zn contamination in soils and effecting plants in land application of pig manure. It is of great concern to the world that pig manure is used in the dose greater than the organic fertilizer criterion. It is very important to clarify bioconcentration and translocation of Cu and Zn in vegetables in order to assess human health risk of these heavy metals accumulated in soil and to safely produce vegetables. Bioconcentration and translocation of Cu and Zn by *Brassica sinensis* L. planted in pig manure-applied soils were studied using pot experiments. Pig manure with great concentrations of Cu and Zn ($\text{Cu} = 1\,114.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Zn} = 1\,496.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) were applied to soils at six rates, i. e. 0, 25, 50, 100, 200 and $500\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. The results indicate that the concentration of Zn was greater than that of Cu in both aboveground and underground parts of *B. sinensis*. Both Cu and Zn concentrations in the underground part were greater than those in upper-ground for every treatment. There were significant differences for both Cu and Zn concentrations in shoots between CK and the treatment with application rate above $50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. Bioconcentration factor of Cu in *B. sinensis* increased with pig manure application rate from 0.11 to 0.17, while that of Zn decreased from 0.47 to 0.11. The proportion of Cu and Zn transported from roots to shoots decreased 25% and 38% with the increase of pig manure application, respectively. It indicates that pig manure application can reduce bioconcentration of Zn in *B. sinensis*, and build up Cu accumulation which leads to human health risk. The ratio of Zn:Cu in every part of *B. sinensis* decreased with manure application rate increment. This result prompted that uptake and translocation capacity discrepancy of Cu and Zn decreased with manure application rate increment in *B. sinensis*.

Key words: pig manure; Cu; Zn; *Brassica sinensis* L.; bioconcentration; translocation

近年来, 在规模化养猪业中, 由于一些微量元素(如 Cu 和 Zn 等)不仅是猪需要的营养元素, 而且能防治疾病, 提高饲料效率, 促进猪生长和增加产量等, 因而被广泛应用于饲料添加剂^[1]。对英格兰和威尔士 183 种畜禽饲料中重金属含量的研究发现, 大多数饲料中 Cu 和 Zn 的含量较高, 其中猪饲料中含

收稿日期: 2010-06-02; 修订日期: 2010-07-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2008CB418104, 2007CB407307); 城市与区域生态国家重点实验室项目(SKLURE2008-1-04); 国家自然科学基金项目(C031001); 环境保护部公益项目(200909103)

作者简介: 张妍(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染对植物、微生物的影响, E-mail: zhangyan-jingjiayi@126.com

* 通讯联系人, E-mail: cuixy@gucas.ac.cn

Cu 和 Zn 分别为 18 ~ 217 mg·kg⁻¹ 和 150 ~ 2 920 mg·kg⁻¹^[2],导致猪粪中 Cu 和 Zn 含量很高^[3]. 近些年关于猪粪中高 Cu 和 Zn 含量的报道不断增多,其中 Cu 含量甚至可高达 1 000 mg·kg⁻¹, Zn 含量高达 1 505.6 mg·kg⁻¹^[4]. 长期、大量施用高 Cu 和 Zn 的猪粪可能导致土壤和作物中重金属含量增加^[5],不仅可能影响植物的生长发育,而且导致 Cu 和 Zn 在植物内大量累积,通过食物链带来人体健康风险^[6].

调查显示,我国菜园土壤已不同程度地受到重金属的污染^[7],已有大量来自采矿、冶炼、污水灌溉、污泥施肥和化肥农药等中重金属对菜园土壤和蔬菜污染风险的研究报道^[8~13],结果表明,菜园土壤污染已达警戒级水平,土壤重金属污染产生明显的生态效应,对居民健康构成了威胁. 其中重金属元素 Cu 和 Zn 主要来源于农业生产活动,如有机肥的施用等. Zhou 等^[14]对猪粪作为有机肥施用于菜园土的研究结果表明,低含量 Cu 和 Zn 的猪粪(Cu 19.8 mg·kg⁻¹和 Zn 106 mg·kg⁻¹)虽然没有对蔬菜造成毒性,但使其各组织中 Cu 和 Zn 的含量增加. 猪粪农用时,由于随猪粪带入土壤的 Cu、Zn 有效性高于土壤中原有的 Cu、Zn,增加了土壤中 Cu 和 Zn

的累积,提高了 Cu、Zn 从土壤到植物的传输,造成对植物和环境的不良影响. 而对于高含 Cu 和 Zn 的猪粪所导致的菜园土壤污染与风险的研究相对较少^[15],尤其缺乏蔬菜对猪粪中高 Cu 和 Zn 的富集与转运方面的报道. 生物富集系数和转运系数可说明土壤重金属含量对蔬菜重金属含量的直接影响以及蔬菜对重金属的吸收和累积特性的差异^[16]. 另外,蔬菜对土壤重金属富集能力因蔬菜种类而异,其中叶菜类对重金属富集能力较强^[17]. 本研究针对 Cu 和 Zn 随猪粪带入的现实情况,通过施用含高 Cu 和 Zn 的猪粪(Cu 1 114.7 mg·kg⁻¹, Zn 1 496.8 mg·kg⁻¹)盆栽试验研究了小白菜对土壤中 Cu、Zn 的富集和转运特征,以期为农用有机肥大量施用土壤的 Cu、Zn 造成的蔬菜 and 人体健康危害风险提供理论依据,为蔬菜安全生产提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试猪粪采自某集约型养殖场,施用前经过堆肥腐熟、风干和磨碎处理. 土壤为未受重金属污染的菜园土,其基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤和猪粪的基本理化性状

Table 1 Basic physicochemical properties of soil and pig manure

基质	全氮/%	全碳/%	全磷/g·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	pH	有机质/g·kg ⁻¹
猪粪	1.40	18.66	3.60	1114.7	1496.8	6.71	94.36
土壤	0.09	1.39	0.60	56.3	74.4	8.33	15.53
国家土壤环境质量标准 ¹⁾				100	300	>7.5	

1) 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

试验设置 11、22、44、89 和 222 g·kg⁻¹(相当于 25、50、100、200 和 500 t·hm⁻²) 5 个猪粪施用水平,分别用 P1、P2、P3、P4 和 P5 表示. 对照为不施肥,用 CK 表示. 把猪粪和土壤按比例混匀(表 2),装入内径 20 cm、深 20 cm 的塑料盆中,每盆装入基质的总量为 8 kg. 所有处理均设 4 个重复,完全随机排列. 小白菜品种为四月慢(浙江省东阳市种子公司),种植期间保持土壤湿度为田间持水量的 60%,30 d 后收获. 所有盆栽试验在北京林业大学温室中进行,所有处理保持相同的温度和光照等条件. 温室温度范围为 15 ~ 25℃. 小白菜的最适生长温度为 12 ~ 20℃.

1.2 样品的采集与分析

小白菜全株收获,用蒸馏水轻轻冲去表面的灰

表 2 施用猪粪盆栽小白菜试验盆栽处理方案

Table 2 Treatments of pot experiments with *Brassica sinensis* L.

receiving pig manure						
处理	CK	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5
猪粪/t·hm ⁻²	0	25	50	100	200	500
猪粪用量/g·kg ⁻¹	0	11	22	44	89	222
加入土量/g·kg ⁻¹	1 000	989	978	956	911	778

尘和土壤,滤纸吸干水分后称量地上部和地下部的鲜重,然后置于称量瓶中在 105℃ 下杀青 15 min,再于 80 ~ 90℃ 下烘干至恒重. 同时采集全部土壤样品,风干过筛,用于重金属含量和化学性质分析.

风干后的土壤样品研磨过 100 目尼龙筛,植物样品经不锈钢粉碎机粉碎后过 60 目尼龙筛. 称取 0.25 ~ 0.30 g(精确到 0.000 1 g)样品放入消解罐

中,加入 9 mL 浓硝酸(土壤样品还需加入 3 mL 浓 HF),用微波炉赶酸至尽干,取出后用超纯水定容至 50 mL^[18]. Cu、Zn 有效态用 EDTA 提取^[19]. 用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES)测定 Cu 和 Zn 的含量.

pH 值用 pH 计测定(水土质量比为 2.5:1);有机质(SOM)用重铬酸钾水合热法测定;全氮、全碳用元素分析仪测定;全磷用酸溶-钼锑抗比色法测定;Eh 值用土壤氧化还原电位计测定. 称 20 g(干土重)新鲜土壤放入盛有 100 mL 去离子水的三角瓶中,常温下振荡浸提 30 min,用高速离心机离心,上清液过 0.45 μm 滤膜,用 TOC 仪测定浸提液有机碳浓度,得到溶解有机碳^[20].

1.3 小白菜对重金属的富集系数与转运系数的计算^[21]

富集系数 BCF(bioconcentration factor) = 地上部重金属含量/土壤重金属含量

转运系数 TF(translocation factor) = 地上部重金属含量/地下部重金属含量

1.4 数据统计分析

试验数据采用 SPSS 16.0 做方差分析、回归分析和相关性分析.

2 结果与讨论

2.1 土壤中 Cu 和 Zn 的含量

由表 3 看出,土壤 Cu 和 Zn 全量浓度范围分别为 58.6 ~ 177.0 mg·kg⁻¹和 78.1 ~ 425.8 mg·kg⁻¹;有效态浓度范围分别为 12.7 ~ 114.8 mg·kg⁻¹和 5.6 ~ 262.0 mg·kg⁻¹. 当猪粪施用量 > 100 t·hm⁻²时,土壤中 Cu 含量均显著高于对照;施用量 > 50 t·hm⁻²时,土壤中 Zn 含量均显著高于对照处理. 随猪粪施用量的增加,土壤的 Zn/Cu 由 1.33 升高到 2.40. 当猪粪施用量分别 > 100 t·hm⁻²和 > 200 t·hm⁻²时,土壤重金属 Cu 和 Zn 含量皆超过国家二级标准,长期大量施用含高 Cu 和 Zn 的猪粪将导致土壤重金属污染严重,而当土壤中 Cu 含量超过 100 mg·kg⁻¹会造成植物中毒,影响到植物生理生态过程、植物产量和品质^[2]. 由此表明,施用含高 Cu 和高 Zn 的猪粪对植物和环境会造成危害和污染,因此含高 Cu 和高 Zn 的猪粪已不适合施用于蔬菜土壤.

处理	全量		有效态	
	Cu	Zn	EDTA-Cu	EDTA-Zn
CK	58.6 ± 4.9 c	78.1 ± 3.5 d	12.7 ± 0.1 d	15.6 ± 0.5 d
P1	66.1 ± 1.4 c	87.4 ± 3.6 d	18.2 ± 1.1 d	19.3 ± 1.1 d
P2	70.5 ± 3.6 c	105.8 ± 1.9 d	21.5 ± 1.2 cd	31.7 ± 2.4 cd
P3	74.6 ± 1.1 c	130.7 ± 1.7 c	28.4 ± 1.9 c	51.1 ± 5.3 c
P4	110.8 ± 6.5 b	208.7 ± 7.1 b	55.6 ± 5.6 b	113.5 ± 11.8 b
P5	177.0 ± 9.1 a	425.8 ± 12.2 a	114.8 ± 5.5 a	262.0 ± 9.8 a

1) 同一列不同小写字母表示差异达显著水平($p < 0.05$)

2.2 小白菜 Cu 和 Zn 含量

小白菜地上、地下部 Cu 和 Zn 含量都随猪粪施用量的增加而增加,且地下部浓度均高于地上部(图 1),这与其他研究结果相符^[22]. 无论是地上部还是地下部,Zn 的含量都高于 Cu 的含量. 由此说明,同一种植物种类对不同的重金属的吸收富集能力不同. 猪粪施用量在 50 t·hm⁻²以上时,小白菜地上部 Cu 和 Zn 以及整株 Zn 含量较对照显著提高,而当猪粪施用量 > 100 t·hm⁻²时,小白菜地下部 Cu 和 Zn 含量以及整株 Cu 含量比对照显著提高. 整株含 Cu 量较对照随猪粪施用量的变化趋势与地下部含 Cu 量的变化趋势一致,但整株含 Zn 量的变化趋

势与地上部含 Zn 量的变化趋势一致.

Cu 和 Zn 是植物生长所必须的微量元素,大部分植物在土壤有效 Cu 缺乏临界值是 5 mg·kg⁻¹,但植物吸收过量的 Cu 可破坏其生理化学过程,降低作物产量,影响作物品质. 研究表明,低浓度的外源 Cu 可显著增加小白菜鲜重,高浓度的外源 Cu 抑制小白菜的生长,叶绿素值随着 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^[23]. 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^[24].

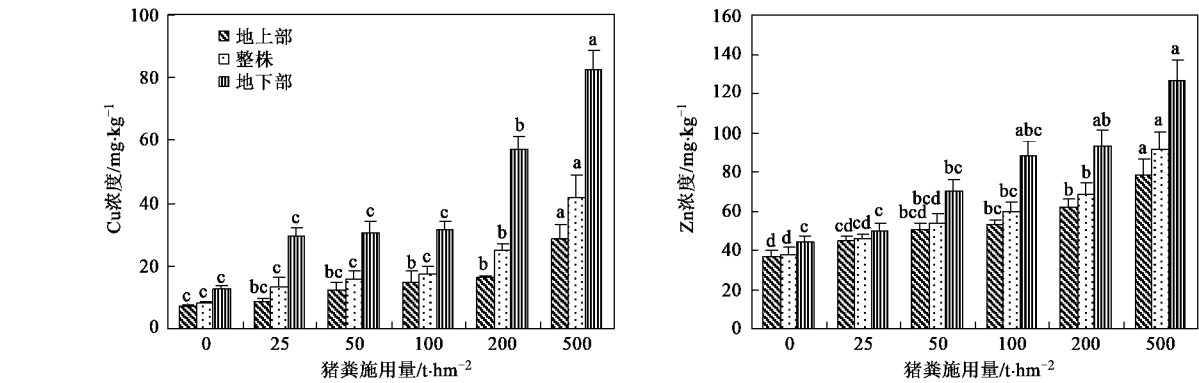


图1 不同猪粪施用量处理的小白菜 Cu、Zn 含量

Fig.1 Cu and Zn content in above-ground parts and under-ground parts of *Brassica sinensis* L. under different application amounts of pig manure

2.3 小白菜对 Cu 和 Zn 的富集与转运

为了进一步确定土壤中 Cu 和 Zn 的生物有效性,建立了土壤中 Cu 和 Zn 有效态含量与小白菜地上、地下部、整株 Cu 和 Zn 含量的线性回归方程(表 4),结果表明,各决定系数(R^2)都较高.从各决定系数可以看出,用土壤中有有效态的 Cu、Zn 表征植物各部分吸收 Cu 和 Zn 的含量效果更好.

表 4 植物与土壤有效态 Cu、Zn 含量之间的相关性¹⁾

Table 4 Correlation coefficients between contents of Cu and Zn in <i>Brassica sinensis</i> L. and in soil				
重金属	参数	回归方程	R^2	F
Cu	地上部	$Y=0.184X+0.029$	0.643 **	39.570
	地下部	$Y=0.615X+0.091$	0.677 **	46.019
	整株	$Y=0.296X+0.04$	0.717 **	55.684
Zn	地上部	$Y=0.145X+0.021$	0.675 **	45.703
	地下部	$Y=0.308X+0.07$	0.465 *	19.157
	整株	$Y=0.193X+0.031$	0.633 **	37.943

1) * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$,下同

植物地上、地下部不同重金属含量比值的变化以及其相对于土壤中重金属含量比值的改变,可表征植物对不同重金属富集及其体内转运的能力差异.小白菜对 Zn 的富集系数和转移系数均大于 Cu,且对土壤中 Cu 的富集系数随着猪粪施用量的增加而略呈增加的趋势,从 0.11 上升到 0.17,而对 Zn 的富集系数则随着猪粪施用量的增加而减小,从 0.47 下降到 0.11;小白菜体内 Cu 和 Zn 的转运系数随着猪粪施用量的增加均呈下降趋势,Cu 和 Zn 从地下部向地上部运输和转移的比例随着施用量的增加分别下降 25% 和 38% (图 2). 增加猪粪施用量相对降低了重金属 Zn 在植物体内的富集,但提高了 Cu 在蔬菜中的富集和对人体的健康风险.

虽然土壤的 Zn/Cu 随猪粪施用量的提高而升高,但是小白菜地上部和地下部的 Zn/Cu 都随猪粪施用量的增加而降低(图 3). 各处理小白菜地上部 Zn/Cu 的比值都显著高于地下部,并且显著高于土壤中的 Zn/Cu. CK 处理的地下部 Zn/Cu 达 3.4,是

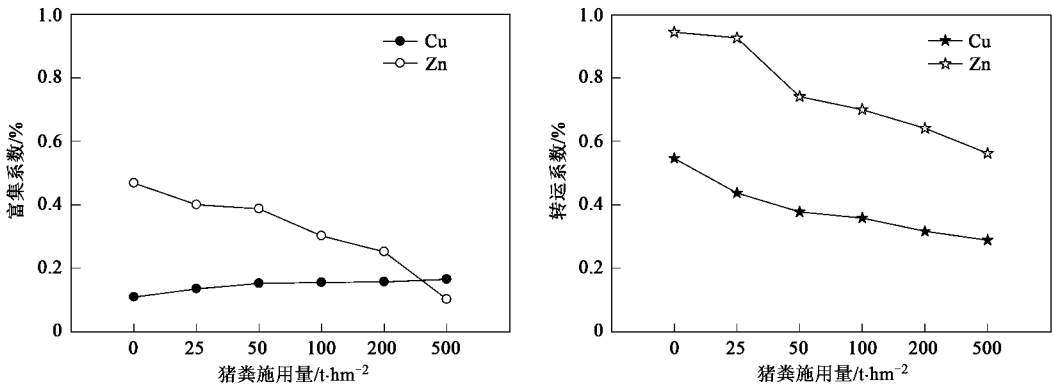


图2 小白菜对重金属 Cu 和 Zn 的富集系数和转运系数

Fig.2 Bioconcentration factors and translocation factors of Cu and Zn in *Brassica sinensis* L.

土壤中 Zn/Cu 3 倍左右,其余处理的地下部 Zn/Cu 和对应土壤 Zn/Cu 相差较小. 植株整体的 Zn/Cu 也随猪粪的施用量增加而降低,这说明小白菜吸收转运 Cu 的能力较 Zn 强,猪粪施用量的增加相对促进了小白菜对土壤中 Cu 的吸收和向地上部转移,降低了植物对 Cu 和 Zn 吸收转运的差异.

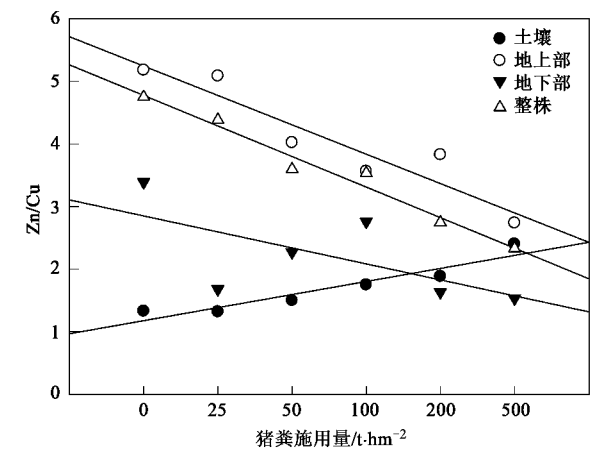


图3 土壤、小白菜 Zn/Cu 与猪粪施用量的关系
Fig.3 Relationships between the Zn/Cu in soil, *Brassica sinensis* L. and application amounts of pig manure

2.4 土壤理化性质与小白菜中 Cu 和 Zn 含量的关系

对小白菜地上部 Cu 和 Zn 与土壤的一些基本理化性质进行相关性分析(表5),结果发现施用猪粪的小白菜地上部 Cu 和 Zn 之间存在显著的正相关($p < 0.01$),主要原因是猪粪中 Cu 和 Zn 的比例是固定的,因此猪粪施用量增加时土壤的 Cu 和 Zn 含量同时增加. 施用猪粪的小白菜地上部 Cu、Zn 含量与 DOC、SOM 呈显著正相关;Cu 与 pH、Eh 呈显著负相关,Zn 与 pH 呈显著负相关,这与 Huang 等^[25]的研究结果一致.

表5 猪粪处理中小白菜地上部 Cu、Zn 和土壤性质的相关性 Table 5 Correlation coefficients between Cu and Zn contents in above-ground parts of <i>Brassica sinensis</i> L. and soil properties in pig manure treatments						
	Cu	Zn	pH	Eh	DOC	SOM
Zn	0.764 **	1				
pH	-0.694 **	-0.879 **	1			
Eh	-0.576 **	-0.278	0.133	1		
DOC	0.709 **	0.564 **	-0.662 **	-0.222	1	
SOM	0.787 **	0.783 **	-0.782 **	-0.359	0.746 **	1

猪粪有机质含量很高(表1),且小白菜地上部 Cu 和 Zn 含量与有机质含量呈正相关(表5). 腐殖酸中的官能团能释放出 H⁺ 而带负电荷,在吸附重

金属的同时也参与了与土壤离子的交换反应,因此有机质施用能增加土壤中重金属有效态的含量,有利于金属元素的迁移转化. Zhu 等^[26]研究了连续施用富含 Cu 的猪厩肥的土壤中 Cu 的有效性,结果表明施用猪厩肥显著提高了土壤有机质,同时也提高了土壤有效态 Cu 含量.

也有研究表明,有机质能明显提高土壤 Cu 的生物有效性,而对 Zn 的作用较小^[27]. 有机质对土壤 Cu 和 Zn 生物有效性影响的不同,导致植物对土壤中 Cu 和 Zn 的富集系数和转运系数随猪粪施用量的变化产生差异. 施用猪粪提高了土壤有机质含量,有机质中的水溶性组分(DOC)也随之提高(表5),其在土壤胶体表面的强竞争性吸附^[28],使得 Cu²⁺ 解吸,从而提高了 Cu 的溶解性和浸提性,促进 Cu²⁺ 向根际的迁移,增加了 Cu 的生物有效性^[29]. 土壤含有较高的硅酸盐也可与 Zn 结合,使大部分土壤 Zn 转化为残留态. 另外,短期内施用猪粪的农田土壤 DTPA-Zn 含量与对照相比差异不显著^[30].

需要指出的是,本研究是以含高 Cu 和 Zn 的猪粪为原料的,猪粪的用量和由此带入土壤的 Cu 和 Zn 的量是线性相关的,因此本试验不能确定猪粪本身对 Cu 和 Zn 的吸收转运的作用,因为其中混杂了 Cu 和 Zn 浓度共变的效应. 在有机质水平不变的情况下的研究显示,随着土壤中 Cu 和 Zn 含量的提高,植物的富集系数增大而转运系数减小^[31]. 而当土壤中 Cu 和 Zn 含量不变时,长期施入猪粪,土壤可提取态的 Cu 和 Zn 含量的增加 60% 之多^[32]. 以往的研究没有关注 Cu 和 Zn 随猪粪带入的现实情况,因此本研究的结果具有很好的针对性. 同时也揭示出不同重金属元素吸收转运的差异,这为制定合理的有机肥农用标准、乃至饲料中重金属添加标准提供了有价值的参考. 迄今为止,我国只对城镇垃圾和污泥的农用制定了重金属含量标准(GB 8172-87),但还没有制定有机肥中有毒有害物质的限量标准. 据报道全国畜禽粪便产生量超过农业废弃物的 60%,是工业废弃物的 3.2 倍^[33]. 我国饲料卫生标准(GB 13078-2001)中没有规定 Cu 和 Zn 的含量,由于畜禽对重金属的利用率低,粪便中 Cu 和 Zn 的含量最高是饲料中 4.4 倍和 6.6 倍^[34]. 本研究得到当 Cu、Zn 含量分别为 1 114.7 mg·kg⁻¹ 和 1 496.8 mg·kg⁻¹ 的猪粪施用量分别 >100 t·hm⁻² 和 >200 t·hm⁻² 时,土壤重金属 Cu 和 Zn 含量皆超过国家二级标准,且由于猪粪中高含量的有机质能明显提高土壤 Cu 的生物有效性,而对 Zn 的作用较

小。因此,可以考虑在修改和完善饲料卫生标准以及在制定畜禽粪便农用限量标准中,加强对 Cu 含量范围的要求,而对 Zn 含量范围适当放宽一些。

3 结论

(1)小白菜地上、地下部及整株 Cu 和 Zn 含量都随猪粪施用量的增加而增加,且每个施肥水平上小白菜地上、地下部 Zn 含量都高于 Cu。

(2)猪粪处理的小白菜地上部 Cu 和 Zn 含量在施用量 $>50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时都较对照显著提高。

(3)小白菜对 Zn 的富集系数和转运系数均大于 Cu。随着猪粪施用量的提高小白菜对 Cu 的富集系数略有升高,对 Zn 的富集系数降低,对 Cu 和 Zn 的转运系数都下降;植物地上部、地下部以及整株的 Zn/Cu 都降低,小白菜对 Cu 和 Zn 吸收转运能力的差异随着猪粪施用量的增加而下降。

参考文献:

- [1] Barker A V, Bryson G M. Bioremediation of heavy metals and organic toxicants by composting [J]. *Scientific World Journal*, 2002, **2**(4): 407-420.
- [2] 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.
- [3] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **311**(1-3): 205-219.
- [4] McBride M. Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH [J]. *Soil Science*, 2002, **167**(1): 62-67.
- [5] Bolan N S, Khan M A, Donaldson J, *et al.* Distribution and bioavailability of copper in farm effluent [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **309**(1-3): 225-236.
- [6] Hsu S C, Liu S C, Jeng W L, *et al.* 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.
- [7] 倪丹华,陈一定,林成永,等.模拟酸雨对菜园土壤施用猪粪后重金属释放的影响[J]. *浙江大学学报*, 2008, **34**(2): 214-220.
- [8] Zacccone C, Caterina R D, Rotunno T, *et al.* Soil-farming system-food-health: Effect of conventional and organic fertilizers on heavy metal (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) content in semolina samples [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, **107**(2): 97-105.
- [9] Cai L M, Huang L C, Zhou Y Z, *et al.* Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, **20**(1): 121-134.
- [10] Wang L X, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Heavy metal pollution of soils and vegetables in the midstream and downstream of the Xiangjiang River [J]. *Hunan Province Journal of Geographical Sciences*, 2008, **18**(3): 353-362.
- [11] 王贵玲, 蔺文静. 污水灌溉对土壤的污染及其整治 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(2): 163-166.
- [12] 窦磊, 马瑾, 周永章, 等. 乡镇企业密集区菜地土壤重金属含量分布特征及生态效应——以东莞市为例 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(5): 2048-2056.
- [13] Eduardo C O F, Renato M L, Francisco J R P. Comparative study on the susceptibility of freshwater species to copper-based pesticides [J]. *Chemosphere*, 2004, **56**(4): 369-374.
- [14] Zhou D M, Hao X Z, Wang Y J, *et al.* Copper and Zn uptake by radish and pakchoi as affected by application of livestock and poultry manures [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(2): 167-175.
- [15] 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.
- [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] 薛艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理 [J]. *土壤肥料*, 2005, **37**(1): 32-36.
- [18] US EPA. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices (Method 3052) [S]. 1996.
- [19] Sun B, Zhao F J, Lombi E, *et al.* Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **113**(2): 111-120.
- [20] 黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇, 等. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1380-1387.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Sun Q, He Z L, Yang X E, *et al.* Toxic effects of copper on Chinese cabbage and its ecological health parameter [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, **13**(2): 324-330.
- [24] Patra M, Bhowmik N, Bandopadhyay B, *et al.* 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.
- [25] Huang Z, Xu B, Zhang K, *et al.* Accumulation of heavy metals in the four years continual swine manure-applied greenhouse soils [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, **22**(11): 239-244.
- [26] Zhu Y M, Berry D F, Martens D C. Copper availability in two soils amended with eleven annual applications of copper-enriched hog manure [J]. *Soil Science and Plant Analysis*, 1991, **22**(7-8): 769-783.

- [27] 汪金舫, 刘月娟, 李本银. 秸秆还田对砂姜黑土理化性质与锰、锌、铜有效性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14**(3): 49-51.
- [28] Antoniadis V, Alloway B J. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils [J]. Environmental Pollution, 2002, **117**(3): 515-521.
- [29] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils [J]. Geoderma, 2003, **113**(3-4): 211-235.
- [30] Qian P, Schoenau J J, Wu T, *et al.* Copper and zinc amounts and distribution in soil as influenced by application of animal manure in east-central Saskatchewan [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2003, **83**(2): 197-202.
- [31] 徐华伟, 张仁陟, 谢永. 铅锌矿区先锋植物野艾蒿对重金属的吸收与富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(6): 1136-1141.
- [32] Berenguera P, Celaa S, Santiveria F, *et al.* Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilized with liquid swine manure [J]. Agronomy Journal, 2008, **100**(4): 1056-1061.
- [33] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(5): 614-617.
- [34] Cang L, Wang Y J, Zhou D M, *et al.* Study of heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu province [J]. Journal of Environmental Science, 2004, **16**(3): 371-374.