

有机无机配施对生菜生长及其 Cd Pb 含量的影响

唐明灯, 艾绍英*, 罗英健, 李盟军, 王艳红, 曾招兵, 姚建武

(广东省农业科学院土壤肥料研究所, 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 农业部南方植物营养与肥料重点实验室, 广州 510640)

摘 要: 为了比较等氮水平下不同有机肥及其与无机肥配施对土壤重金属的钝化效果, 通过在 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 氮水平下单施商品有机肥、猪粪、牛粪、鸡粪和花生麸, 及 5 种有机肥分别与无机肥(尿素+磷酸二氢钙+硫酸钾)配施(N:N=1:1)的盆栽试验, 研究它们对重金属污染土壤上生菜(*Lactuca sativa*)生长及其 Cd、Pb 含量的影响。结果表明, 与 CK 相比, 有机肥可提高生菜的生物量(商品有机肥单施除外), 有机肥单施时, 鸡粪处理生菜的鲜重最高, 配施时牛粪和鸡粪处理生菜的生物量最大。无论单施或配施, 花生麸和鸡粪处理降低生菜地上部 Cd 含量的效果最好, 且鸡粪较好地降低了生菜地上部 Pb 含量。牛粪和花生麸配施的 Pb 含量显著低于单施, 猪粪和商品有机肥单施的 Pb 含量显著低于配施, 其余单施和配施之间没有显著差异。因此, 鸡粪是 5 种有机肥中较适合施用于重金属污染菜地土壤的有机肥。

关键词: 土壤; 有机肥; 无机肥; 生菜; 重金属污染

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)06-1104-07

Effects of Organic Manures on the Growth, Cd and Pb Concentrations of Lettuce Plant Based on the Same Nitrogen Level

TANG Ming-deng, AI Shao-ying*, LUO Ying-jian, LI Meng-jun, WANG Yan-hong, ZENG Zhao-bing, YAO Jian-wu

(Soil and Fertilizer Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangdong Key Lab of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effects of five organic manures (commercial manure, pig shit, cattle shit, hen shit, earthnut residue) and their application combined with chemical fertilizers ($1/2$ organic manure + $1/2$ chemical fertilizers, the composition of chemical fertilizers were $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.4:0.75$) on the growth, Cd and Pb concentrations of lettuce (*Lactuca sativa*) under the condition of the same N level ($0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results showed that compared with the control, the organic manures increased the fresh biomass of *L. sativa* except for the treatment of only commercial manure. Hen shit had the highest fresh biomass among the single addition of organic manures, and cattle shit and hen shit had high fresh biomass among the organic manures combined with chemical fertilizers. The Cd and Pb concentrations of lettuce abovegrounds, significantly lower than those of lettuce roots, were below $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ which were the Chinese food limit, respectively. There was a significantly positive relationship between Cd concentrations in lettuce aboveground and root, but there was no significant relationship for Pb concentrations. No matter organic manures were applied alone or combined with chemical fertilizers, earthnut residue and hen shit had the lowest aboveground Cd concentration of *L. sativa*, and hen shit had the lowest lettuce aboveground Pb concentration. There was no significant difference for aboveground Cd or Pb concentrations of lettuce between single treatment and combined treatment of organic manure except for lower Pb concentrations of single treatments of pig shit and commercial manure than combined treatments, and that of combined treatments of cattle shit and earthnut residue than single treatments. Therefore, among the 5 tested organic manures, hen shit was the most suitable amendment for the soil contaminated by heavy metal because of its largest

收稿日期: 2011-10-26

基金项目: 广东省科学技术厅重大专项(2008A030202002); 广东省科学技术厅农业领域重点专项(2011A020101007); 广东省科学技术厅社会发展项目(2010B031800013); 广东省科学技术厅农业攻关项目(2011B020309003)

作者简介: 唐明灯(1968—), 男, 湖南武冈人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤重金属污染及其调控研究。E-mail: njautmd@163.com

* 通讯作者: 艾绍英 E-mail: shaoyingai@21cn.com

biomass, the lowest aboveground Cd or Pb concentration of lettuce, and invariable effect under the condition of single application or combination with chemical fertilizers.

Keywords: soil; organic manure; fertilizer; *Lactuca sativa*; heavy metal pollution

重金属在人体内能产生强烈的毒害作用^[1-3],其最重要的途径就是伴随食物经消化道进入机体。虽然叶菜类蔬菜易于富集重金属^[4-6],但通过一定的农艺措施等可以有效地降低其重金属含量^[7-9],如:施用有机质丰富的有机肥等能有效降低叶菜可食部分中 Cd、Pb 的含量^[10-12]。

不同来源的有机肥其组成成分变异较大,它们对叶菜重金属含量的影响可能不一致,目前国内外的比较研究不多,还无法回答这个科学问题^[13]。另外,研究表明施用无机肥料也能降低叶菜地上部 Cd、Pb 含量^[9,14],而有机肥与无机肥配施对叶菜重金属 Cd、Pb 含量的影响很少有报道。为此,本文在重金属污染土壤中分别单施商品有机肥、猪粪、牛粪、鸡粪、花生麸,或它们分别与相同的无机肥料配施,通过盆栽试验来探索它们对叶菜 Cd、Pb 含量的影响,进而揭示不同有机肥及其与无机肥配施对土壤重金属迁移影响的差异和共同规律。

1 材料与方法

1.1 供试土壤、有机肥、叶菜和无机养分

土壤取自广州市近郊,系由母质为三角洲冲积物发育而来的普通肥熟旱耕人为土(Typic Fimi-Orthic Anthrosols),取 0~20 cm,风干,过 1 mm 筛,备用。土壤的基本性状如下:pH 5.70,有机质 40.8 g·kg⁻¹,Cd 全量 1.34 g·kg⁻¹、Pb 全量 106 mg·kg⁻¹,全 N 2.12 g·kg⁻¹、碱解 N 172 mg·kg⁻¹、有效 P 135 mg·kg⁻¹、速效 K 362 mg·kg⁻¹。

供试有机肥为商品有机肥(manure-M 购自某有机肥料厂)、猪粪(pig shit-P 购自广州市白云区某个体养猪场)、牛粪(cattle shit-C 采自广州市番禺区某奶牛场)、鸡粪(hen shit-H 购自广东省农业科学院畜牧所养鸡场)、花生麸(earhnut residue-E 购自广东省农业科学院作物研究所金爵花生油厂)。猪粪、牛粪、鸡粪水分较高,自然风干。塑料粉碎机粉碎猪粪、鸡粪、牛粪、花生麸,过 1 mm 筛,备用。供试有机肥的部分组分如表 1。

供试叶菜为意大利耐抽苔生菜(*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort.),广州附近菜地全年可以正常生长,其种子购于广东省农业科学院蔬菜研究所。

表 1 供试有机肥的部分组分

Table 1 Selected components of tested organic manures

有机肥 代号	有机质	总 N	全 P	全 K	全 Cd	全 Pb
		g·kg ⁻¹			mg·kg ⁻¹	
M	549	30.4	18.9	41.9	16.5	366
P	493	32.2	21.5	15.4	0.55	18.7
C	471	19.9	6.53	12.5	0.51	10.9
H	578	50.7	11.3	35.9	0.51	1.75
E	821	95.0	9.72	15.8	0.12	0.43

试验所需无机养分分别由尿素、磷酸二氢钙、硫酸钾(均为分析纯)提供。

1.2 试验设计及实施

以不施化肥或有机肥为对照(CK),在供氮水平为 0.2 g·kg⁻¹ 下设置处理为:化肥处理(F,N:P₂O₅:K₂O=1:0.4:0.75,以尿素、磷酸二氢钙和硫酸钾形式施入);有机肥处理[商品有机肥单施(M),猪粪单施(P),牛粪单施(C),鸡粪单施(H),花生麸单施(E)];有机无机配施处理[由 1/2 化肥处理的用量和 1/2 有机肥处理的用量组成,即商品有机肥配施(BM),猪粪配施(BP),牛粪配施(BC),鸡粪配施(BH),花生麸配施(BE)]。共 12 个处理,每一处理 4 次重复,每盆土壤 7.0 kg。

试验时间为 2010 年 1 月 30 日至 2010 年 4 月 7 日。试验时称取所需土壤、化肥和有机肥,磷酸二氢钙和有机肥作为基肥施用,与土壤混匀后装入塑料盆;尿素和硫酸钾作追肥施用,分 3 次施入(25%+35%+40%,时间为:2010.02.23,2010.03.12,2010.03.25)。4 叶期定株 5 棵;浇自来水,称重法保持土壤湿度为最大田间持水量的 70%左右。试验在广东省农业科学院土壤肥料研究所网室进行。

1.3 样品采集和处理

采集生菜地上部和根,自来水冲洗干净,去离子水泡洗 2 次,擦干表面水分,记录鲜重后用塑料打浆机匀浆制成鲜样,称取 10.00 g 于三角瓶中、加入 10.0 mL 混酸(体积比 HNO₃:HClO₄=9:1,优质纯试剂)消煮、定容到 25 mL,消解液的 Cd、Pb 浓度待测,同时称取蔬菜标准样品进行质量监控。采集生菜样本后立刻收获土壤样本,自然风干,过 1 mm 尼龙筛,用 1 mol·L⁻¹ 的中性盐乙酸铵(分析纯)溶液浸提土壤有效态 Cd、Pb(土液质量比为 1:5),过滤液待测。石墨炉原子

吸收分光光度计(Hitachi Z-2000)测定 Cd、Pb。土壤 pH 采用电位法(土水质量比为 1:2.5)测定。

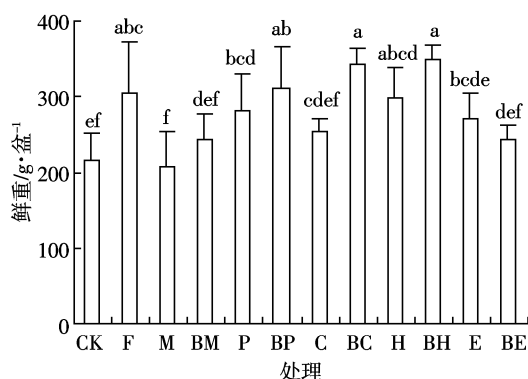
1.4 数据整理和分析

数据采用 Excel 2003 处理,SPSS 10.0 统计(差异显著水平为 $P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生菜生物量

由图 1 可知,处理 M、BM、C、E 和 BE 生菜地上部鲜重与对照没有显著差异,这可能是由于供试土壤的碱解氮、有效磷和速效钾含量比较高造成的;处理 M、BM 和 BE 生菜地上部鲜重显著低于处理 F,但处理 P、BP、C、BC、H、BH、E 与 F 没有显著差异,其中处理 BP、BC 和 BH 的平均值还高于处理 F;5 种有机肥中仅牛粪配施比单施显著提高生菜地上部鲜重,而花生麸配施降低生菜地上部鲜重,可能与未经堆腐有关。对生菜地上部鲜重聚类分析表明,单施时 5 种有机肥归为 3 类,鸡粪最容易促进生菜的生长,其次是猪粪、花生麸和牛粪,最后是商品有机肥;配施时 5 种有机肥也归为 3 类,牛粪和鸡粪最容易促进生菜生长,其次是猪粪,最后是商品有机肥和花生麸。因此,无论 5 种有机肥单施或配施,鸡粪促进生菜生长的效果最好,而商品有机肥的效果最差,可能与商品有机肥中 N 含量相对较低,而 P、K 以及 Cd、Pb 含量相对较高等多种因素有关。



不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

图 1 生菜地上部生物量

Figure 1 Aboveground biomass of lettuce

2.2 生菜 Cd、Pb 含量

从图 2 可见,生菜地上部 Cd 含量平均值都低于蔬菜中 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉限量标准^[15]。与 CK 相比,各种处理的生菜地上部 Cd 含量都降低,其中 BM、BP、H、BH、E、BE 处理显著降低,以 E 处理生菜地上部 Cd

含量降低幅度最大,达 43.5%。生菜根 Cd 含量显著大于地上部(图 2、图 3);与 F 处理相比,处理 M、BM、P、BP、C、BC、H、BH、BE 的生菜地上部 Cd 含量没有显著降低,处理 E 显著降低;对同一有机肥而言,单施和配施对生菜 Cd 含量的影响没有显著差异。对生菜地上部 Cd 含量进行聚类分析表明,单施时有机肥分为 3 类,花生麸和鸡粪的降低效果最好,其次是商品有机肥和猪粪,最后是牛粪;配施时有机肥分为 2 类,其中降低效果较好的是花生麸、鸡粪和商品有机肥,较差的是猪粪和牛粪。因此,5 种有机肥中,无论单施或配施,花生麸和鸡粪对降低生菜地上部 Cd 含量均有较好的效果,而牛粪的效果均较差。

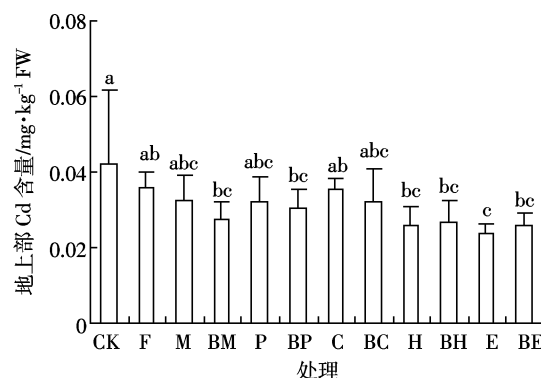


图 2 生菜地上部 Cd 含量

Figure 2 Lettuce aboveground part Cd concentration

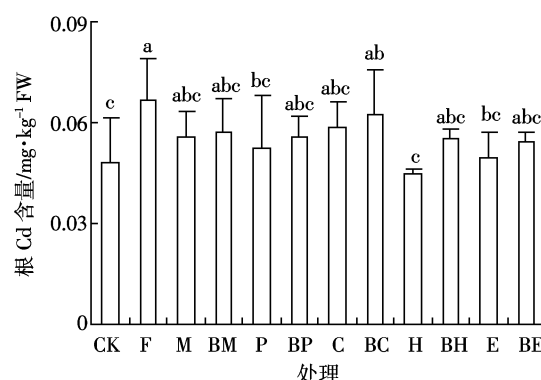


图 3 生菜根中 Cd 含量

Figure 3 Lettuce root Cd concentration

生菜地上部 Pb 含量低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Pb 限量标准^[16]。与 CK、F 处理相比, BM、BP 和 E 处理生菜地上部 Pb 含量显著增加,而 BC 和 BH 处理地上部 Pb 含量显著降低(图 4)。根部 Pb 含量显著高于生菜地上部(图 4、图 5)。对照处理的根部 Pb 含量最低, BM、C 和 E 处理的根部 Pb 含量显著高于 CK(图 5)。对同

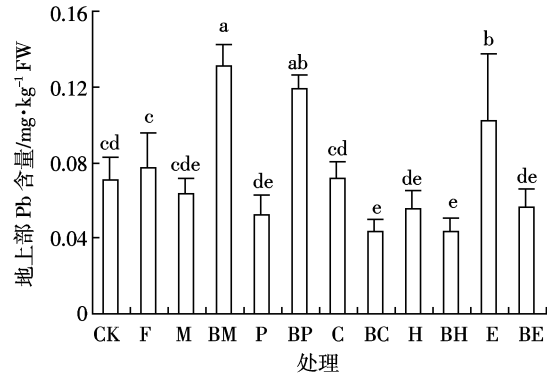


图 4 生菜地上部 Pb 浓度

Figure 4 Lettuce aboveground part Pb concentration

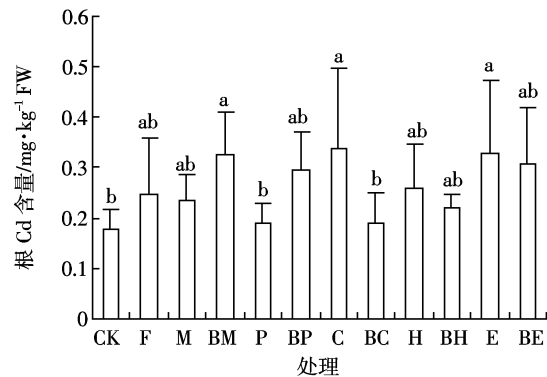


图 5 生菜根中 Pb 量

Figure 5 Lettuce root Pb concentration

一有机肥而言,与生菜地上部 Cd 含量相比,单施和配施显著影响生菜地上部 Pb 含量,其中商品有机肥、猪粪配施时生菜地上部 Pb 含量显著高于单施,鸡粪没有显著变化,而牛粪、花生麸配施时生菜地上部 Pb 含量显著降低。经对生菜地上部 Pb 含量进行聚类分析,单施时有机肥分为 3 类,降低生菜地上部 Pb 含量效果较好的是猪粪、鸡粪和商品有机肥,其次是牛粪,效果较差的是花生麸;配施时分为 2 类,鸡粪、牛粪和花生麸有较好地降低生菜地上部 Pb 含量的效果,而商品有机肥和猪粪的效果较差。因此,5 种有机肥中,无论单施或配施,鸡粪较好地降低了生菜地上部 Pb 含量,而牛粪和花生麸配施的效果均较好,猪粪和商品有机肥单施的效果较好。

生菜地上部与根部 Cd 含量显著正相关 ($r=0.424, N=48, P<0.01$),生菜地上部与根 Pb 含量也有显著相关性($r=0.620, N=12, P<0.05$),可见有机肥没有显著降低 Cd 或 Pb 从生菜根向地上部的迁移速度;生菜地上部 Cd(Pb)浓度下降主要是由于生物量提高的稀释作用造成的。

总之,无论单施或配施,鸡粪降低生菜地上部 Cd、Pb 含量均有最好的效果,且生菜根部 Cd、Pb 含量也较低;花生麸对 Cd 有较好的降低效果,而其他有机肥不仅单施和配施有别,而且对 Cd、Pb 的效果也有差异。

2.3 土壤 pH 及乙酸铵–Cd 含量

土壤 pH 对土壤中重金属的形态及作物体内重金属含量有重要影响。由表 2 可见,除 P 处理比对照土壤 pH 显著提高外,其余处理的土壤 pH 与对照没有显著差异;对同一有机肥而言,与单施相比,商品有机肥、猪粪、牛粪、鸡粪配施有降低土壤 pH 的趋势,花生麸配施有提高土壤 pH 的趋势。

表 2 土壤 pH 与乙酸铵–Cd 含量		
Table 2 Soil pH and NH ₄ OAc extractable Cd concentration		
处理	pH	乙酸铵–Cd/mg·kg ⁻¹
CK	6.69±0.16bc	0.058±0.003cd
F	6.75±0.02ab	0.066±0.003b
M	6.70±0.05bc	0.079±0.005a
BM	6.64±0.05c	0.075±0.007a
P	6.82±0.08a	0.056±0.003d
BP	6.70±0.03bc	0.066±0.006b
C	6.75±0.11ab	0.063±0.003bc
BC	6.70±0.09bc	0.057±0.005cd
H	6.76±0.06ab	0.061±0.002bcd
BH	6.68±0.04bc	0.063±0.005bc
E	6.70±0.04bc	0.066±0.003b
BE	6.73±0.03abc	0.066±0.003b

乙酸铵是一种中性盐,理论上乙酸铵–Cd 含量更能表征有机肥对土壤 Cd 形态的影响,从而揭示有机肥对叶菜 Cd 含量影响的部分机制。F、BP、M、BM、E 和 BE 处理的乙酸铵–Cd 含量显著高于对照;土壤 pH 与乙酸铵–Cd 含量没有显著相关性($r=-0.206, N=48, P>0.05$),即使对 P 和 BP 处理而言,也没有显著相关性($r=-0.445, N=8, P>0.05$)。乙酸铵–Pb 含量低于石墨炉检测限。乙酸铵–Cd 含量与生菜地上部或根 Cd 含量没有显著相关性(相关系数分别为-0.184、0.071, $N=48, P>0.05$);M 处理和 BM 处理的乙酸铵–Cd 含量显著高于其他处理,主要原因是商品有机肥中 Cd 含量较高(表 1),M 和 BM 处理分别相当于在土壤中施加 0.108、0.054 mg·kg⁻¹,但 M 和 BM 并没有提高生菜地上部 Cd 含量,可能是商品有机肥带入的 Cd 还没有达到引起叶菜 Cd 含量产生显著影响的临界值(前期结果 Cd 含量为 0.15 mg·kg⁻¹ 左右)。

3 讨论

叶菜容易富集重金属^[17],其中生菜是重金属 Cd 吸收量较高且响应灵敏的叶菜之一^[18-21],但生菜中 Pb 含量变异较大^[22]。叶菜地上部重金属含量易受施肥方式等多种因素的影响^[23],赵明等^[23]报道,有机氮和无机氮配比为 4:6 时大白菜 Cd 含量没有显著变化,Pb 含量降低。本文有机肥配施无机肥时 N 的比值(1:1)与此接近,牛粪、鸡粪、花生麸配施无机肥与此类似,但商品有机肥、猪粪配施无机肥时显著提高生菜地上部 Pb 含量。由此可见,有机肥的来源是影响有机肥与无机肥配施降低叶菜地上部 Cd、Pb 含量效果的重要因素之一。

花生麸国内外尚没有应用于钝化土壤重金属的报道,商品有机肥、猪粪、牛粪和鸡粪的报道也不多。从已有的报道来看,它们可以降低菜心、苋菜、大白菜、生菜等地上部的 Cd 含量和 Pb 含量,或降低土壤中的重金属有效态含量^[10-12,24-28];其中鸡粪的效果最好,其效果与土壤类型、外加 Cd、Pb 等无关^[10,25],甚至与其他物质配施时效果更佳^[25-26]。本文鸡粪的效果与文献^[10,12,25-26]类似,可见鸡粪具有一定的降低叶菜地上部 Cd、Pb 含量的趋势。因此,不同来源的有机肥对叶菜地上部重金属含量及其吸收规律的影响不同。

国内外对有机肥钝化土壤中重金属的机制探讨还很少。由于有机肥中有机质占较大的比例(表 1),有机肥对土壤重金属的钝化机制很可能与其中的有机质(低分子量水溶性有机物、富里酸、胡敏酸和胡敏素等)有重要关系。有机肥中的胡敏酸、胡敏素通过络合、螯合反应可与金属离子形成迁移能力较低的络合物,显著降低重金属的生物有效性^[24,29-31];另一方面,有机肥中水溶性有机物和富里酸抑制土壤胶体对重金属的吸附,有机物腐解过程也能活化土壤重金属^[32-34]。因此,植物体内重金属含量提高与否,与以上钝化作用和活化效应的消长有很重要关系。从有机肥单施对 Cd 的影响来看,花生麸的钝化作用更强于活化作用;商品有机肥、猪粪和牛粪配施无机肥时带入的多种阴阳离子对这 2 种作用的消长影响较大,但鸡粪配施对 2 种作用的消长影响较小,很可能是由于鸡粪中蛋白质含量较高,提高了土壤对肥料带入的阴阳离子的缓冲能力。

本文除处理 P 和 BC 的乙酸铵-Cd 含量低于 CK 外,其余处理均大于 CK,推测有机肥中可溶性有机物与 Cd 有很强的结合作用,加之易溶于水,从而提高

了乙酸铵-Cd 的含量,使得土壤 pH 上升时土壤乙酸铵-Cd 含量有增加的可能(表 2);另一方面,可溶性有机质与 Cd 形成的化合物很容易在生菜根表面角质层进行可逆性吸附,从而使得不同处理生菜根 Cd 含量变异较大且与对照没有显著差异(图 3),这也是生菜地上部(根)Cd 含量与乙酸铵-Cd 的含量没有显著正相关的原因之一。处理 BM 和 BP 地上部 Pb 含量显著高于 CK 和处理 F、M、P,很可能是由于肥料带入的阴阳离子促进了 Pb 竞争 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 等离子通道的能力;而对 E 处理而言,配施肥料带入的阴、阳离子降低了 Pb 竞争 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 等离子通道的能力,使 BE 处理地上部 Pb 含量显著低于 E、F 处理(图 4)。

另外需指出的是,有机肥能优化土壤结构、利于土壤气体和水分的迁移,促进作物生长,提高产量,保持土壤地力和可持续利用,其中产量提高对叶菜地上部重金属有一定的稀释效应。因此,施用有机肥来治理重金属污染土壤具有广阔的应用前景和多重现实意义。

4 结论

在 5 种供试有机肥中,除商品有机肥单施外,与对照相比,有机肥单施或与无机肥配施,提高生菜地上部鲜重,单施时,鸡粪最容易促进生菜生长,配施时牛粪和鸡粪对生菜生长的效果最佳;5 种有机肥中,仅牛粪配施的生菜地上部鲜重显著大于单施。

本试验中生菜地上部 Cd、Pb 含量均较低,分别低于 0.05 、 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,生菜根的 Cd、Pb 含量显著高于生菜地上部 Cd、Pb 含量。5 种供试有机肥中,无论是单施还是配施,花生麸和鸡粪对生菜地上部 Cd 含量降低的效果最佳;鸡粪降低生菜地上部 Pb 含量的效果最好。牛粪和花生麸配施的 Pb 含量显著低于单施,猪粪和商品有机肥单施的 Pb 含量显著低于配施,其余同一有机肥配施和单施之间的重金属含量没有显著差异。

因此,鸡粪是 5 种供试有机肥中提高生菜生物量、降低生菜地上部 Cd、Pb 含量效果最佳的有机肥,是中轻度重金属污染土壤上值得推广的有机肥。

参考文献:

- [1] Türkdoğan M K, Kilicel F, Kara K, et al. Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2002, 13: 175-179.

- [2] Ike A, Sriprang R, Ono H, et al. Bioremediation of cadmium contaminated soil using symbiosis between leguminous plant and recombinant rhizobia with the MTL4 and the PCS genes [J]. *Chemosphere*, 2007, 66: 1670–1676.
- [3] Lu A X, Zhang S Z, Shan X Q. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 125: 225–234.
- [4] Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112: 391–402.
- [5] Peris M, Micó C, Recatalá L, et al. Heavy metal contents in horticultural crops of a representative area of the European Mediterranean region[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 378: 42–48.
- [6] 师荣光, 周启星, 刘凤枝, 等. 天津郊区土壤-蔬菜系统中 Cd 的积累特征及污染风险[J]. 中国环境科学, 2008, 28(7): 634–639.
- SHI Rong-guang, ZHOU Qi-xing, LIU Feng-zhi, et al. Cadmium accumulation and pollution risks to human health based on Monte-Carlo model of soil and vegetable—using vegetable field in Tianjin suburbs as example[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(7): 634–639.
- [7] Hassan M J, Wang F, Ali S, et al. Toxic effect of cadmium on rice as affected by nitrogen fertilizer form[J]. *Plant and Soil*, 2005, 277(1–2): 359–365.
- [8] 王艳红, 李盟军, 艾绍英, 等. 钾肥对土壤-辣椒体系中铅生物有效性的影响[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(3): 151–155.
- WANG Yan-hong, LI Meng-jun, AI Shao-ying, et al. Effect of potassium fertilizer on lead bioavailability of soil system and pepper[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(3): 151–155.
- [9] 王艳红, 艾绍英, 李盟军, 等. 氮肥对镉在土壤-芥菜系统中迁移转化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 649–653.
- WANG Yan-hong, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Effect of nitrogen fertilization on cadmium translocation in soil-mustard system[J]. *Chinese Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 649–653.
- [10] 吴清清, 马军伟, 姜丽娜, 等. 鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1302–1309.
- WU Qing-qing, MA Jun-wei, JIANG Li-na, et al. Effect of poultry and household garbage manure on the growth of *Amaranth tricolor* L. and heavy metal accumulation in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1302–1309.
- [11] 李梦梅, 杨中艺, 李海军, 等. 有机物料对抑制菜心吸收镉的效果研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(6): 79–83.
- LI Meng-mei, YANG Zhong-yi, LI Hai-jun, et al. Effect of different organic materials on restriction of Cd accumulation in *Brassica parachinensis*[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsen*, 2007, 46(6): 79–83.
- [12] 姚丽贤, 李国良, 何兆恒, 等. 连续施用鸡粪对菜心产量和重金属含量的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1113–1120.
- YAO Li-xian, LI Guo-liang, HE Zhao-huan, et al. Yield and heavy metal content of *Brassica parachinensis* influenced by successive application of chicken manure[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5): 1113–1120.
- [13] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge[J]. *Environment International*, 2009, 35: 142–156.
- [14] 姚建武, 王艳红, 李盟军, 等. 施肥对铅镉污染土壤上芥菜铅镉含量及生理的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 659–662.
- YAO Jian-wu, WANG Yan-hong, LI Meng-jun, et al. Effect of fertilization on Pb and Cd content, and on physiological property of mustard growing in soil polluted by Pb and Cd[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 659–662.
- [15] GB 15201—1994, 食品中元素限量标准[S].
- GB 15201—1994, Tolerance limit of cadmium in foods[S].
- [16] GB 14935—1994, 食品中元素限量标准[S].
- GB 14935—1994, Tolerance limit of lead in foods[S].
- [17] Parida B K, Chhibba I M, Nayyar V K. Influence of nickel-contaminated soils on fenugreek (*Trigonella corniculata* L.) growth and mineral composition[J]. *Science of Horticulture*, 2003, 98: 113–119.
- [18] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 信息叠加法大田初步筛选镉、铅低富集叶菜[J]. 土壤, 2011, 43(2): 226–231.
- TANG Ming-deng, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Preliminary screening for leaf vegetables with lower Cd or Pb contents by using informational superposition in fields[J]. *Soils*, 2011, 43(2): 226–231.
- [19] Puschenreiter M, Horak O, Friesl W, et al. Low-cost agricultural measures to reduce heavy metal transfer into the food chain: A review[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2005, 51(1): 1–11.
- [20] 赵勇, 李红娟, 孙治强. 土壤-蔬菜 Cd 污染相关分析与土壤污染阈值研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 149–153.
- ZHAO Yong, LI Hong-juan, SUN Zhi-qiang. Correlation analysis of Cd pollution in vegetables and soils and the soil pollution threshold[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 149–153.
- [21] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 紫云英对污染土壤上叶菜生长及其镉铅含量的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(3): 461–465.
- TANG Ming-deng, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Effect of *Astragalus sinicus* on the growth, Cd and Pb concentration of leafy vegetables[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(3): 461–465.
- [22] 蔡立梅, 黄兰椿, 周永章, 等. 东莞市农业土壤和蔬菜铅含量特征分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(2): 122–125.
- CAI Li-mei, HUANG Lan-chun, ZHOU Yong-zhang, et al. Characteristic analysis of lead concentration in agricultural topsoil and vegetables of Dongguan, Guangdong province[J]. *Environmental Sciences & Technology*, 2010, 33(2): 122–125.
- [23] 赵明, 蔡葵, 王文娇, 等. 有机无机肥配施对大白菜产量、品质及重金属含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(1): 45–48.
- ZHAO Ming, CAI Kui, WANG Wen-jiao, et al. Effects of combining application of organic and inorganic fertilizers on yield and quality of chinese cabbage and heavy metal content[J]. *Soils and Fertilizers of China*, 2010(1): 45–48.
- [24] 华璐, 白玲玉, 韦东普, 等. 有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉锌形态和小麦生长的影响[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 346–350.
- HUA Luo, BAI Ling-yu, WEI Dong-pu, et al. Effects of interaction by organic manure-Cd-Zn formation in soil and wheat growth[J]. *China*

- Environmental Science*, 2002, 22(4):346–350.
- [25] 刘维涛, 周启星. 不同土壤改良剂及其组合对降低大白菜镉和铅含量的作用[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9):1846–1853.
- LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing. Effectiveness of different soil ameliorants in reducing concentrations of Cd and Pb in Chinese cabbage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(9):1846–1853.
- [26] 李红娟, 赵勇, 王谦, 等. 不同改良剂对叶用莴苣吸收 Cd 的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1):285–291.
- LI Hong-jun, ZHAO Yong, WANG Qian, et al. Effects of different modifiers on Cd pollution of lettuce[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(Supplement 1):285–291.
- [27] 桑爱云, 夏伟林, 王华, 等. 不同改良剂对铅污染砖红壤的修复效果[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8):503–506.
- SANG Ai-yun, XIA Wei-lin, WANG Hua, et al. Study on the remediation effect of different ameliorant to the Pb polluted in Granitic latosol[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(8):503–506.
- [28] Clemente R, Paredes C, Bernal M P. A field experiment investigating the effects of olive husk and cow manure on heavy metal availability in a contaminated calcareous soil from Murcia(Spain)[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118:319–326.
- [29] Chang C, Ent Z T. Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure applications in Southern Alberta[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25:145–153.
- [30] Chen Y. Organic matter reactions involving micronutrients in soils and their effect on plants[M]//Piccolo A. (Ed.), *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*. Amsterdam:Elsevier, 1996:507–530.
- [31] Walker D J, Clemente R, Roig A, et al. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122:303–312.
- [32] Almás A, Singh B R, Salbu B. Mobility of cadmium–109 and zinc–65 in soil influenced by equilibration time, temperature, and organic matter[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28:1742–1750.
- [33] 高明, 车福才, 魏朝富, 等. 长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1):11–17.
- GAO Ming, CHE Fu-cai, WEI Chao-fu, et al. Effect of long-term application of manures on forms of Fe, Mn, Cu and Zn in purple paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1):11–17.
- [34] 陈同斌, 陈志军. 水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2):183–186.
- CHEN Tong-bin, CHEN Zhi-jun. Cadmium adsorption in soil influenced by dissolved organic matter derived from rice straw and sediment[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2):183–186.