

有机物料及其用量对生菜生长与 Pb 含量的影响

唐明灯, 艾绍英*, 李盟军, 罗英健, 姚建武, 王艳红, 曾招兵, 余丹妮

(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, 广州 510640)

摘要:为了降低叶菜中重金属 Pb 的含量,选择有机肥、猪粪、牛粪、鸡粪和花生麸 5 种有机物料为材料,分别以 0.5%、1%、2%、4% 4 个水平的用量施入重金属污染土壤,通过种植 3 茬生菜(*Lactuca sativa* L.)的盆栽试验研究有机物料对重金属污染土壤上生菜生长及其 Pb 含量的影响。结果表明,与对照相比,有机物料利于生菜生长,有提高生菜生物量的趋势;大部分有机物料处理没有显著影响生菜地上部分的 Pb 含量;5 种有机物料中,仅牛粪有提高生菜地上部 Pb 含量的趋势;生菜 Pb 含量平均值高低的顺序为牛粪>鸡粪>花生麸>有机肥>猪粪,但不同有机物料之间没有显著差异。与对照相比,大部分处理没有显著影响土壤的 DTPA-Pb 含量,初步揭示了供试有机物料没有显著影响生菜地上部 Pb 含量的原因。

关键词:土壤;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(2011)11-2178-07

Effect of Organic Materials on the Growth and Pb Concentration of *Lactuca sativa*.

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

(Institute of Soil and Fertilizer, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangdong Key Lab of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

Abstract: There is increasing concern about vegetable safety and environmental heavy metal pollution in the rapidly developing suburb in China, especially in the Pearl River Delta Region, South China. The bioavailability of heavy metals can decrease due to their immobilization by adsorption or binding to organic matter with high molecule weight in soils. Therefore, addition of organic materials to soils may reduce the uptake of heavy metals by crops. Three continuous rounds of pot experiment were conducted to investigate the effect of five organic materials (manure, pig shit, cattle shit, hen shit, earthnut residue, and their application of 0.5%, 1%, 2%, 4% per kg soil, respectively) on the growth and Pb concentrations of lettuce (*Lactuca sativa*). The results showed that compared with the control, organic materials were beneficial for the growth of lettuce and increased the fresh biomass of lettuce; The growth response of lettuce growing in the soil to five organic material wasn't unanimous, which were in the order of hen shit>earthnut residue>pig shit>cattle shit>manure. Most of treatments affected insignificantly aboveground Pb concentration of lettuce in comparison with CK. Among 5 organic materials, only cattle shit had a trend to increase the Pb uptake of lettuce. The aboveground Pb concentration mean values of 5 organic materials for 3 crops lettuce were different (cattle shit>hen shit>earthnut residue>manure>pig shit), but there was not markedly difference among them. The effect of 5 organic materials on soil pH was different. There was a significantly negative relationship between treatment dose of manure (or earthnut residue) and soil pH (Pearson correlation: -0.820 , -0.917 , $N=20$, $P<0.01$); There was insignificant relationship between that of hen shit and soil pH; But there was markedly positive relationship between that of pig shit (or cattle shit) and soil pH (0.862 , 0.775 , $N=20$, $P<0.01$). DTPA-Pb was significantly negatively related to soil pH, but it was insignificantly related to aboveground Pb concentration. Compared with CK, most of treatments did not affect significantly soil DTPA-Pb concentration, so the preliminary reason is disclosed why the tested organic materials did not affect remarkably aboveground Pb concentration of *L. sativa*.

Keywords: soil; *Lactuca sativa*; heavy metal; pollution

收稿日期: 2011-05-14

基金项目: 广东省科技厅重大专项 (2007A032303001, 2008A030202002); 广东省农业领域重点专项项目 (2009A0201005); 广东省农业攻关 (2008B021000038) 资助

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

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

城市郊区都是叶菜的重点生产区域,Huang 等^[1]认为,城郊叶菜重金属超标率较高^[2-3],其中重金属 Pb 具有致癌等三致效应^[4-6]。土壤有机质可吸附或络合土壤重金属,能够通过影响重金属形态、降低重金属的生物有效性,从而降低作物重金属含量^[5-7],因此,施用有机质丰富的有机物料能有效降低叶菜 Pb 的含量^[8]。

有机物料多种多样,不同来源的有机物料其组成差异大,不同有机物料对土壤重金属 Pb 的影响是否相同?国内外这种比较研究不多,目前还无法回答这个科学问题^[9]。为此,本文选择有机肥(一种商品有机肥)、猪(杂食家畜)粪、牛(草食家畜)粪、鸡(杂食家禽)粪和花生麸(大宗植物油固体废弃物)施用到重金属污染土壤中,通过种植 3 茬叶菜来探索它们对叶菜 Pb 含量的影响,进而揭示不同有机物料对土壤重金属迁移的差异和共同规律。

1 材料与方法

1.1 供试土壤、有机物料与叶菜

土壤采自广州市近郊,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。土壤的部分性状如下:pH 5.70,有机质 40.8 g·kg⁻¹,Cd 全量 1.34 mg·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,DTPA-Pb 为 18.0 mg·kg⁻¹。

供试有机物料为:(1)有机肥(manure-M 购自某有机肥料厂)、(2)猪粪(pig shit-P 购自广州市白云区个体养猪场)、(3)牛粪(cattle shit-C 采自广州市番禺区奶牛场)、(4)鸡粪(hen shit-H 购自广东省农业科学院畜牧研究所养鸡场)、(5)花生麸(earthnut 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。供试有机物料的部分组分如表 1。

供试叶菜:意大利耐抽苔生菜(*Lactuca sativa* L.),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种子市场。

1.2 试验设计及实施

未处理土壤为对照(CK),5 种有机物料(M、P、C、H、E)分别从低到高设 4 个施用水平[0.5%(1)、1%(2)、2%(3)、4%(4)],计 21 个处理,每处理 4 次重复,共 84 盆。每盆土壤 1.50 kg(烘干基)。

称取每处理土壤和有机物料,混匀后平均分装到

表 1 有机物料的组分

Table 1 Some compositions of organic materials

物料代号	有机质/ g·kg ⁻¹	总 N/ g·kg ⁻¹	全 P/ g·kg ⁻¹	全 K/ g·kg ⁻¹	全 Cd/ mg·kg ⁻¹	全 Pb/ 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

塑料盆(底径 11 cm,口径 18 cm,高 11 cm)中。盆栽时间为 2009 年 6 月至 2009 年 12 月(2009 年 6 月 12 日开始播种第 1 茬),连续种植 3 茬生菜。四叶期定株 3 棵;每茬叶菜生长期间追施 2 次尿素,每次 0.5 g·盆⁻¹。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

记录生菜地上部鲜重、洗净、擦干蔬菜表面水分,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,待测消解液中的 Pb 浓度,同时称取蔬菜标准样品进行质量监控。收获第 3 茬后才采集土壤样本;自然风干,过 1 mm 尼龙筛,用 DTPA[0.005 mol·L⁻¹ 二乙基三胺五乙酸(DTPA)+0.01 mol·L⁻¹CaCl₂+0.1 mol·L⁻¹ 三乙醇胺(TEA)]浸提土壤有效态 Pb(土液比为 1:5),待测过滤液。石墨炉原子吸收分光光度计(Hitachi Z-2000)测定 Pb。土壤 pH 采用电位法(水土比为 5:1)测定。

1.4 数据整理和分析

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

2 结果与分析

2.1 生菜生长及其生物量

试验过程中发现,对照、猪粪处理与牛粪处理每茬生菜种子出芽和幼苗生长都很正常。但 H4 处理和 E2、E3、E4 处理第 1 茬大部分种子没有发芽或者出芽后无法生长;对 E4 处理而言,第 2、3 茬种子发芽率仍然很低或幼苗无法生长,推测可能是由于花生麸或鸡粪施用量较高造成的。有机肥处理生菜种子出芽率也较低,可能与其较高的 Pb、Cd 含量有关。

表 2 可见,除第 1 茬的 M3、E1 处理,第 2 茬的 P1 处理外,与对照相比,有机物料处理均有提高叶菜

表 2 生菜鲜重、土壤 DTPA-Pb 和 pH

Table 2 Aboveground fresh biomass of lettuce, DTPA extractable Pb concentration and pH of soil

处理	生菜鲜重/g·盆 ⁻¹			DTPA-Pb/ mg·kg ⁻¹	pH
	第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬		
CK	133±16b	101±14a	105±15b	14.0±0.5bc	6.31±0.06a
M1	145±19ab	115±45a	120±22b	14.3±0.3ab	6.34±0.13a
M2	163±17a	103±53a	135±35ab	14.3±0.3ab	6.21±0.06a
M3	133±11b	104±44a	139±22ab	14.0±0.9b	6.20±0.14a
M4	152±11ab	116±42a	160±56a	14.9±0.8a	5.95±0.07b
CK	133±16b	101±14bc	105±15c	14.0±0.5a	6.31±0.06c
P1	159±8ab	77±13c	137±16b	13.7±0.5a	6.34±0.07c
P2	167±16ab	119±22b	142±18b	13.4±0.4a	6.50±0.13b
P3	160±32ab	161±13a	158±11b	13.3±0.7ab	6.60±0.06ab
P4	195±42a	169±7a	185±18a	12.7±0.4b	6.70±0.05a
CK	133±16a	101±14c	105±15b	14.0±0.5a	6.31±0.06c
C1	156±33a	104±21c	129±16ab	13.8±0.7ab	6.47±0.08b
C2	159±33a	131±15b	131±14a	13.8±0.4ab	6.51±0.05b
C3	157±19a	135±27ab	127±24ab	14.0±0.5a	6.46±0.09b
C4	163±19a	160±8a	134±16a	13.2±0.2b	6.70±0.11a
CK	133±16b	101±14d	105±15c	14.0±0.5ab	6.31±0.06fb
H1	157±19ab	141±4c	124±13c	14.3±0.5a	6.54±0.07a
H2	167±24a	171±20bc	149±14b	13.4±0.5b	6.46±0.03ab
H3	170±9a	193±24ab	181±10a	13.7±0.5ab	6.52±0.08a
H4	—	229±8a	208±31a	12.5±0.5c	6.53±0.20a
CK	133±16a	101±14b	105±15d	14.0±0.5a	6.31±0.06a
E1	130±14a	128±18b	130±14c	13.9±0.6a	6.37±0.11a
E2	—	187±33a	177±8b	13.7±0.7a	6.34±0.15a
E3	—	166±46a	211±14a	13.7±0.5a	6.11±0.11b
E4	—	—	—	13.7±1.0a	5.53±0.07c

注:数据为 4 次重复的平均值±标准差,每列字母不同表示有显著差异($P<0.05$);“—”表示该处理没有收获到植株样本。

生物量的趋势,甚至部分处理显著高于对照。第 1 茬生菜生物量中,除 P4 和 E1 处理外,其余没有显著差异,且同一有机物料不同施用量间也没有显著差异;第 2 茬生菜中,有机肥(M)所有处理的生物量与对照没有显著差异,但猪粪、牛粪、鸡粪和花生麸的处理中有 P3、P4、C2、C3、C4、H1、H2、H3、H4、E2、E3 的生物量显著高于对照,且猪粪、牛粪和鸡粪 3 种有机物料中不同施用量与叶菜生物量呈极显著正相关关系(相关系数分别为 0.873、0.753、0.906, $N=16$, $P<0.01$);第 3 茬生菜中,除 M1、M2、M3、C1、C3、H1 与对照没有显著差异外,其余都显著高于对照的生物量,其中猪粪、鸡粪和花生麸 3 种有机物料中不同施用量与叶菜生物量呈极显著正相关关系(相关系数分别为 0.788、0.893、0.914, $N=16$, $P<0.01$)。另外,从 3 茬叶菜的生物

量可以看出,猪粪处理提高生菜产量的效果较好,而鸡粪和花生麸需要较长的时间才发挥作用,牛粪的肥效较低。对生物量进行聚类分析,发现 5 类有机物料分为肥效较高(鸡粪和花生麸)和肥效较低(猪粪、牛粪和有机肥)的 2 类(图 1);对 3 茬叶菜生物量进行多重比较发现,肥效优劣顺序为:鸡粪、花生麸、猪粪、牛粪和有机肥,其中鸡粪与有机肥之间有显著差异。

2.2 生菜地上部 Pb 含量

图 2 可见,第 1 茬生菜地上部 Pb 含量高于第 2 茬,第 3 茬生菜地上部 Pb 含量远大于第 1、2 茬生菜地上部 Pb 含量,经统计分析表明,都达显著水平,且第 3 茬大部分处理的生菜地上部超过蔬菜中 0.20 mg·kg⁻¹ 铅限量标准^[10],造成不同茬别生菜 Pb 含量差异的原因还有待研究。第 1 茬生菜中,除 C4 处理外,地上部 Pb 含量与对照没有显著差异;第 2 茬生菜中,除 P2、C1、C2、H4、E3 等少数处理地上部 Pb 含量显著大于对照外,其余与对照没有显著差异;第 3 茬除 C4 处理外,其余处理地上部 Pb 含量与对照没有显著差异;因此,与其他有机物料相比,牛粪处理有提高生菜地上部 Pb 含量的趋势;综合 3 茬叶菜 Pb 含量,生菜 Pb 含量平均值高低的有机物料顺序为牛粪、鸡粪、花生麸、有机肥、猪粪,但不同有机物料处理之间的 Pb 含量没有显著差异。有机肥中 Pb 含量较高,与 CK 相比,M1、M2、M3、M4 处理分别相当于提高土壤 Pb 含量达 1.30、2.60、5.20、10.4 mg·kg⁻¹,但 3 茬生菜 M1、M2、M3、M4 处理 Pb 含量与 CK 没有显著差异,可以看出高达 10.4 mg·kg⁻¹ 有机肥源 Pb 不能引起生菜地上部 Pb 含量的差异。

2.3 土壤 DTPA-Pb 含量和 pH

除 M4 处理的 DTPA-Pb 含量显著高于对照,P4、C4、H4 处理的 DTPA-Pb 含量显著低于对照外,大部分处理的 DTPA-Pb 含量与对照没有显著差异(表 2)。有机肥有提高土壤 DTPA-Pb 含量的趋势,但 DTPA-Pb 含量与有机肥施用量没有显著正相关(相关系数为

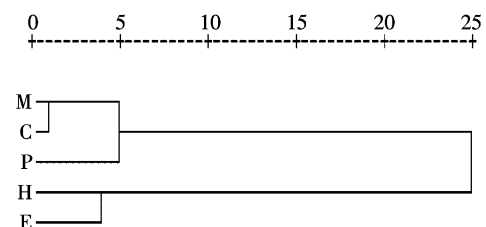


图 1 有机物料肥效的聚类分析

Figure 1 Cluster analysis of lettuce growth response to five organic materials

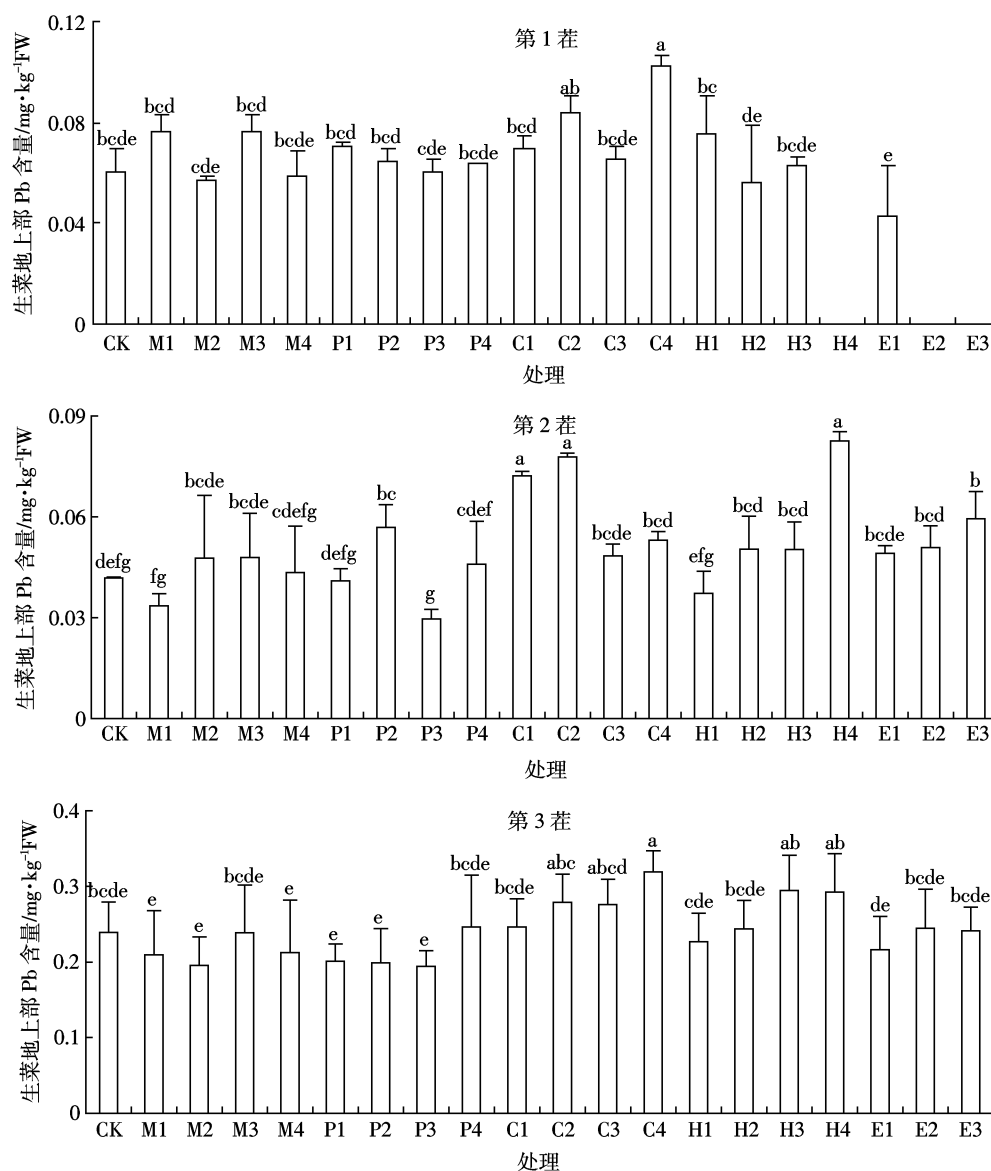


图2 生菜地上部 Pb 含量

Figure 2 Aboveground Pb concentration of lettuce

0.410, $N=20$, $P>0.05$), 由此可见, Pb 含量较高的有机肥对土壤 DTPA-Pb 含量的贡献较小。而猪粪处理、牛粪处理、花生麸处理有降低土壤 DTPA-Pb 含量的趋势, 且 DTPA-Pb 含量与猪粪处理、牛粪处理、鸡粪施用量显著负相关(相关系数为-0.706、-0.489、-0.728, $N=20$, $P<0.05$), 花生麸施用量与其 DTPA-Pb 含量没有显著相关性(-0.155, $N=20$, $P>0.05$)。有机肥、猪粪、牛粪、鸡粪和花生麸处理的 3 茬生菜地上部 Pb 含量与土壤 DTPA-Pb 含量都没有显著正相关。通过综合分析, 本试验土壤 DTPA-Pb 含量差即使达 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 生菜地上部 Pb 含量也没有显著差异, 推测叶菜地上部对 Pb 的吸收受多方面因素的影响。

土壤中施用有机物料后, 土壤 pH 出现分异: 与 CK 相比, P2、P3、P4、C1、C2、C3、C4、H1、H2、H3、H4 处理的 pH 显著提高, M4、E3、E4 处理 pH 显著降低, 初步可以看出有机肥和花生麸有降低土壤 pH 的趋势, 猪粪、牛粪和鸡粪有提高土壤 pH 的趋势(表 2); 经相关性分析表明, 有机肥或花生麸的施用量与土壤 pH 显著负相关(相关系数分别为-0.820、-0.917, $N=20$, $P<0.01$), 鸡粪的施用量与土壤 pH 没有显著相关性(相关系数为 0.393, $N=20$, $P>0.05$), 猪粪或牛粪的施用量与土壤 pH 显著正相关(相关系数分别为 0.862、0.775, $N=20$, $P<0.01$)。土壤 pH 与 DTPA-Pb 含量显著负相关(-0.367, $N=84$, $P<0.01$), 可见有机物料通过影响土

壤 pH, 从而影响 Pb 的生物有效性。对有机肥处理而言, 其 DTPA-Pb 含量与土壤 pH、有机肥中 Pb 含量的偏相关系数分别为 -0.284、0.026 ($N=20, P>0.05$), 据此推测, 与有机肥中的 Pb 相比, 土壤 pH 可能对 DT-PA-Pb 的影响会更大。

3 讨论

叶菜容易富集重金属^[11], 生菜是其中重金属吸收量较高的叶菜之一^[12-14], 但生菜 Pb 含量变异较大^[15], 且不同茬别生菜的 Pb 含量也有显著差异^[14], 本文不同差别生菜地上部 Pb 含量与文献^[14]的结果类似。根据已有报道, 有机物料对叶菜重金属含量的影响比较复杂, 受有机物料来源、土壤类别、重金属种类、叶菜种类等诸多因素的影响^[8, 16-20], 因此可以推测, 这些不确定因素可能提高叶菜可食部分 Pb 含量的超标率, 也可能是加大菜地土壤重金属钝化技术示范推广难度的原因之一。

由于商品有机肥重金属含量较高, 目前还没有商品有机肥钝化土壤中重金属 Pb 的报道。张亚丽等^[21]报道猪粪有降低 DTPA-Pb 含量的趋势^[22], 本文猪粪对土壤 DTPA-Pb 含量的影响与文献^[21-22]类似, 但对生菜地上部 Pb 含量没有显著影响, 没有剂量效应。另一方面, 猪粪对其他重金属的影响随蔬菜的变化而变化, 如显著降低苋菜重金属含量, 猪粪用量越大其效果越好^[23]; 提高通心菜和小白菜地上部重金属的吸收量, 吸收量与施用量显著正相关^[24-25], 提高叶菜重金属的主要原因是猪粪中重金属含量较高^[23-24]。由此可以推测, 重金属含量较高的这类猪粪, 即使在重金属含量较低的农田土壤上施用, 不仅会提高土壤重金属含量, 而且会导致作物可食部分重金属含量提高, 使农产品质量和环境风险增加。因此猪粪农用前除应测定 Pb 外, 还应测定其他重金属的含量, 以防止重金属含量较高的猪粪进入农田。

鸡粪显著降低苋菜地上部 Pb 含量, 不受土壤类型的影响^[8], 而且鸡粪经 EM 菌发酵或与其他物质配施, 对叶菜 Pb 含量的降低效果更好^[26-27]; 但姚丽贤等^[18]报道鸡粪对菜心 Pb 含量没有显著影响, 本文鸡粪对生菜地上部 Pb 含量的影响与文献^[18]的结果类似, 与吴清清等^[8]、刘瑞伟等^[26]、刘维涛和周启星^[27]的结果不一致。可能是叶菜种类、鸡粪来源、施用水平及土壤类别引起试验效果的差异。另一方面, 鸡粪提高菜心、小白菜、苋菜和通心菜其他重金属的含量^[18, 23-25], 其原因主要是鸡粪中其他重金属含量较高造成的^[17-18, 23-25], 因

此, 应严控重金属含量较高的鸡粪进入农用土壤。

牛粪和花生麸在重金属污染土壤的应用还比较少。已有的报道表明, 牛粪对土壤重金属影响的效果不尽相同, 牛粪处理可以降低外源 Pb 污染土壤上小白菜 Pb 含量, 钙镁磷肥与牛粪配施效果更佳^[28], 原因是牛粪促进 Pb 的钝化^[29]。但在矿区土壤上, 牛粪没有改变土壤重金属 DTPA 浸提态, 也没有显著影响甜菜的 Pb 含量^[17], 可能对重金属的固定有效。本试验牛粪具有提高生菜铅含量的趋势, 与以上文献不一致。

重金属污染土壤中施用有机物料, 一方面, 有机物料本身含有或分解产生的胡敏酸、胡敏素, 它们通过络合反应与金属离子生成不易溶的络合物, 显著降低重金属的生物有效性^[30-33]; 另一方面, 有机物料本身所携带的重金属的生物有效性较强, 水溶性有机物抑制重金属的吸附, 且有机物腐解过程对土壤强结合态重金属具有活化效应^[34-36]。因此, 土壤重金属活性的提高与否, 是重金属参与络合、溶解、吸附等反应的综合结果^[37]。猪粪、牛粪和鸡粪腐解过程与重金属 Pb 的络合、溶解、吸附作用基本相互抵消。此外, 不能忽略土壤性质(如 pH、氧化还原能力、阳离子交换量和可溶性盐)对有机物料的影响, 进而影响叶菜重金属含量^[33]。鉴于当前有机物料直接应用到重金属污染土壤的现状, 以及有机物料对土壤重金属影响的复杂性, Smith^[9]认为尚没有确切证据表明有机物料能影响重金属的生物有效性, 因此有必要继续研究有机物料对重金属的“钝化作用”。

4 结论

供试有机物料具有提高生菜生物量的趋势, 肥效优劣顺序为鸡粪、花生麸、猪粪、牛粪和有机肥。有机肥肥效最低, 可能与其较高的 Cd、Pb 含量有重要关系。

大部分有机物料处理的生菜地上部 Pb 含量与对照没有显著差异, 其中牛粪有提高生菜地上部 Pb 含量的趋势; 3 茬生菜地上部 Pb 含量按有机物料合并, 平均值高低顺序为牛粪、鸡粪、花生麸、有机肥、猪粪, 但不同有机物料间没有显著差异。不同茬别生菜地上部 Pb 含量有显著差异, 其中第 3 茬生菜地上部 Pb 含量最大(大部分处理超过 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 第 2 茬生菜 Pb 含量最小。

因此, 尚需要进一步研究有机物料对菜地土壤 Pb 污染的钝化作用, 但重金属含量较高的有机物料不宜施用于菜地土壤, 更不宜用于钝化菜地土壤的重金属。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Peris M, Micó C, Recataló 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.
- [3] 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.
- [4] Türkdogan 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王汉卫, 王玉军, 陈杰华, 等. 改性纳米碳黑用于重金属污染土壤改良的研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(4):431-436.
WANG Han-wei, WANG Yu-jun, CHEN Jie-hua, et al. Application of modified nano-particle black carbon for the remediation of soil heavy metal pollution[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(4):431-436.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] GB 14935—1994, 食品中元素限量标准[S].
GB 14935—1994, Tolerance limit of lead in foods[S].
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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 information superposition in fields[J]. *Soils*, 2011, 43(2):226-231.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 郑少玲, 陈琼贤, 马磊, 等. 施用生物有机肥对芥蓝及土壤重金属含量影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):62-66.
ZHENG Shao-ling, CHEN Qiong-xian, MA Lei, et al. Effect of bioorganic fertilizer application on contents of heavy metals in Chinese kale and soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):62-66.
- [17] 姚丽贤, 操君喜, 李国良, 等. 连续施用养殖场鸡、鸽粪对土壤养分和重金属含量的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(4):819-825.
YAO Li-xian, CAO Jun-xi, LI Guo-liang, et al. Effect of continuous application of chicken and pigeon manure from poultry farms on concentrations of soil nutrients and heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):819-825.
- [18] 姚丽贤, 李国良, 何兆桓, 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.
- [19] 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.
- [20] 刘恩玲, 孙继, 王亮. 不同土壤改良剂对菜地系统铅镉累积的调控作用[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(27):1192-1194.
LIU En-ling, SUN Ji, WANG Liang. Regulatory effect of different soil amendments on accumulation of Cd and Pb in vegetable field system[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2008, 36(27):1192-1194.
- [21] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. 土壤学报, 2001, 38(2):212-218.
ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, JIANG Yang. Effects of organic manure on the amelioration of Cd-polluted soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2):212-218.
- [22] 陕红, 刘荣乐, 李书田. 施用有机物料对土壤镉形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):136-144.
SHAN Hong, LIU Rong-le, LI Shu-tian. Cadmium fractions in soils as influenced by application of organic materials[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):136-144.
- [23] 姚丽贤, 李国良, 何兆桓, 等. 施用禽畜粪对两种土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(1):127-135.

- YAO Li-xian, LI Guo-liang, HE Zhao-huan, et al. Bioavailability of As, Cu and Zn in two soils as affected by application of two types of animal manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1):127-135.
- [24] 姚丽贤, 李国良, 党志, 等. 施用鸡粪和猪粪对 2 种土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(9):2592-2598.
- YAO Li-xian, LI Guo-liang, DANG Zhi, et al. Bioavailability of As, Cu and Zn in two soils as affected by application of chicken manure and pig manure[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(9):2592-2598.
- [25] 李莲芳, 耿志席, 曾希柏, 等. 施用有机肥对高砷红壤中小白菜砷吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1):196-200.
- LI Lian-fang, GENG Zhi-xi, ZENG Xi-bai, et al. Effects of organic fertilization on arsenic absorption of pakchoi (*Brassica Chinensis*) on arsenic-contaminated red soil[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2011, 22(1):196-200.
- [26] 刘瑞伟, 皇传华, 王磊. EM 发酵有机肥对油菜生物性状及重金属含量的影响[J]. 北方园艺, 2010, 17:36-38.
- LIU Rui-wei, HUANG Chuan-hua, WANG Lei. Effect of EM fermented organic fertilizer on content of heavy metal and nitrate of rapeseed[J]. *North Horticulture*, 2010, 17:36-38.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Clemente R, Escola Á, Bernal M P. Heavy metals fractionation and organic matter mineralization in contaminated calcareous soil amended with organic materials[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97:1894-1901.
- [30] 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.
- [31] Chen Y. Organic matter reactions involving micronutrients in soils and their effect on plants[M]. In: Piccolo A. (Ed.), *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 1996:507-530.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 葛滢, 黄丹丹, 周权锁. 添加有机物料对淹水土壤 Cd 活性的影响机制[J]. 中国环境科学, 2009, 29(10):1093-1099.
- GE Ying, HUANG Dan-dan, ZHOU Quan-suo, et al. Influence of organic material addition on the variation of Cd activity in submerged soils[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(10):1093-1099.