

许杨贵, 李琦, 刘晖, 等. 不同肥料对镉污染土壤中两种菜心生长与Cd吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2059-2066.

XU Yang-gui, LI Qi, LIU Hui, et al. Effects of different fertilizers on two genotype Chinese Flowing Cabbage in Cd contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2059-2066.

不同肥料对镉污染土壤中两种菜心生长与Cd吸收的影响

许杨贵, 李琦, 刘晖, 李晶, 黎华寿*

(华南农业大学 农业部华南热带农业环境重点实验室, 广东省现代生态农业与循环农业工程技术研究中心, 广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642)

摘要:以相对高累积Cd品种特青60天菜心和相对低累积Cd品种油绿80天菜心为材料,在两种Cd污染程度不同的红壤土上进行盆栽实验,研究四种不同肥料的施用对两种菜心生长及Cd迁移的影响。结果表明土壤Cd含量的增加促进了两种菜心根际土、根部以及茎叶Cd含量的提高。随着土壤Cd含量的增加,Cd对两品种菜心生长的抑制作用增强,但油绿80天菜心的生物量显著高于特青60天菜心。不同肥料处理均能减少油绿80天菜心和特青60天菜心的可食部分(茎叶)和根部对土壤Cd吸收,其效果如下:鸡粪有机肥>硅镁肥>复合微生物肥>普通复合肥,其中鸡粪有机肥、硅镁肥处理的菜心茎叶和根部Cd的含量显著低于普通复合肥处理组。低积累Cd油绿80天菜心茎叶Cd含量显著低于高积累Cd特青60天菜心茎叶Cd的含量,平均含量为特青60天菜心的53.81%,其中在鸡粪有机肥条件下仅为特青60天菜心茎叶Cd含量的43.95%。在两个不同浓度Cd污染土壤条件下,鸡粪有机肥处理的油绿80天菜心分别比特青60天菜心增产33.53%和61.49%;油绿80天菜心对Cd富集和转移率均显著低于特青60天菜心,油绿80天菜心的富集系数为1.11和0.77,特青60天菜心的富集系数为2.07和2.26,油绿80天菜心的转移系数为1.24和0.96,特青60天菜心为2.89和1.99。因此油绿80天菜心比特青60天菜心更适合种植在Cd污染土壤,而使用鸡粪有机肥最佳,既能促进两种菜心的生长,且可减少对土壤Cd的吸收。

关键词:鸡粪有机肥;硅镁肥;复合微生物肥;菜心品种;Cd污染

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)11-2059-08 doi:10.11654/jaes.2016-0623

Effects of different fertilizers on two genotype Chinese Flowing Cabbage in Cd contaminated soil

XU Yang-gui, LI Qi, LIU Hui, LI Jing, LI Hua-shou*

(Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture, P.R. China, South China Agricultural University; Guangdong Engineering Research Center for Modern Eco-agriculture and Circular Agriculture; Key Laboratory of Agroecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effects of different fertilizers on the growth, cadmium (Cd) accumulation and distribution in Chinese Flowing Cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) Cultivar Youlv-80d-choy sum (Y80) and Teqing-60d-choy sum (T60) cultivated in Cd contaminated soil. Result showed that the increase of soil Cd content raised the concentration of Cd in rhizosphere soil, root, stem and leaf of the two cultivars. With the increase of soil Cd, the plant growth were also further inhibited. However, the biomass of Cultivar Y80 was significantly greater than that of T60. Under different fertilizer treatment, the range of Cd absorption in the edible part of these two cultivars from low to high was: chicken manure fertilizer>silicon magnesium fertilizer>bio-chicken manure fertilizer>compound fertilizer. The concentration of Cd in edible part was the lowest in the treatment of chicken manure fertilizer and then the second lowest was in treatment of silicon magnesium fertilizer. They both significantly lower than that in treatment of compound fertilizer. The concentration of Cd in stem and leaf was 46.19% lower in Cultivar Y80 than in Cultivar T60 on average. In chicken manure fertilizer treatments, the Cd content in stem and leaf was even 56.05% lower in Cultivar Y80 than in Cultivar T60. The biomass yields of Y80

收稿日期:2016-05-05

基金项目:国家高技术研究发展(863)计划项目(2013AA102402);广东省科技计划项目(2013B020303001,2014A030304036,2015B090903077);广东省教育厅科研项目(2013CXZDA007)

作者简介:许杨贵(1988—),男,博士研究生。E-mail:781385157@qq.com

*通信作者:黎华寿(1964—),教授,博士,博士生导师;研究方向:污染生态学。E-mail:lihuashou@scau.edu.cn

were 33.53%~61.49% more than Cultivar T60. In chicken manure fertilizer treatments, the enrichment rates were from 0.77 to 1.1 for Y80 and from 2.07 to 2.26 for T60 and the transfer rate of Cd were from 0.96 to 1.24 for Y80 and from 1.99 to 2.89 for T60 in the treatments of chicken manure fertilizer. So the Cultivar Y80 is more suitable than Cultivar T60 for production in Cd contaminated soil. Chicken manure fertilizer is important to control the vegetable contamination for these two cultivars in Cd contaminated soil.

Keywords: chicken manure fertilizer; silicon magnesium fertilizer; bio-chicken manure fertilizer; Cultivars of *Brassica campestris* L. Ssp. *chinesis* var. *utilis* Tsen et Lee; Cd contaminated

重金属是典型的土壤污染物,具有隐蔽性、难降解、移动性差和易被富集等特点^[1-2],由于工农业污水和生活垃圾的排放,我国农业土壤 Cd 的污染日益严重,污染源呈多元化发展。2011 年底,我国受 Cd、Cr、As、Pb 等重金属污染的耕地面积近 2000 万 hm^2 ,约占耕地面积的 1/5,其中 Cd 污染最为严重,导致每年被重金属污染的粮食超过 1200 万 t ^[3-4]。农田重金属不仅干扰土壤正常功能,妨碍作物生长,还通过土壤-作物迁移,经食物链威胁人体健康,尤其是重金属 Cd,其生物有效性比其他重金属更容易在农产品中积累,生物毒性强,更容易危害人体健康^[5-8]。因此,重金属在土壤和作物之间的迁移规律对污染农田的评估以及农田环境质量标准的制定具有重要的意义。作物吸收土壤中的重金属量不仅和土壤中重金属含量有关,施用不同的肥料或物料也有可能改变土壤的理化性质和土壤中重金属的形态从而影响植物对土壤中重金属的吸收^[9-14],不同的作物,甚至是不同基因型的同种作物对土壤重金属的富集特征都明显不同^[15-18]。降低植物中的重金属含量可以从以下两个方面进行:一是改变土壤重金属的浓度和活性,如换土、客土、清洗、电化法和施用有机物、粉煤灰、石灰、粘土矿物等,包括各种调理剂(如土壤钝化剂)的使用等;二是选用食用部位重金属积累少的作物品种。

我国南方地区土壤以红壤为主,pH 值普遍偏低,重金属活性较高,导致 Cd 等重金属的潜在生态危险较高^[19]。有学者在湘江中下游取样,分析结果显示:研究区域蔬菜 Cd 的超标率为 68.8%,土壤 Cd 的超标率为 68.5%^[20],其中在长沙市农产品 Cd 的超标率为 56%,叶菜类超标率更是高达 96.3%^[21];另外还有文献报道广州市内销售叶菜类的 Cd 超标率达 26.1%,属于中度污染,各类蔬菜的污染程度如下:叶菜类>根菜类>果菜类^[22-23]。

Cd 是人体非必需元素,高浓度的 Cd 会对人体健康产生危害^[24]。因此,通过选用低累积品种蔬菜以及施用适宜的肥料来钝化和减少蔬菜对 Cd 的吸收,具有重要的现实意义。有报道施硅、功能微生物菌肥可

钝化土壤镉的生物有效性^[25-26],因此本文盆栽研究了硅镁肥、复合微生物肥和生产上常用的鸡粪有机肥及普通复合肥对特青 60 天菜心和油绿 80 天菜心等两种菜心的生长及污染土壤 Cd 的吸收与迁移的影响,以明确 Cd 高低富集能力不同的菜心品种对基肥的响应,获得能促进作物生长并钝化 Cd 的适宜肥料种类。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参试的菜心品种为特青 60 天菜心(高积累 Cd 品种)和油绿 80 天菜心(相对低积累 Cd 品种)^[27-28],购于广州市农科院。试验土样取自广州天河区华南农业大学农场中前茬进行大豆镉污染试验的污染红壤,供试土壤经风干、压碎和过 5 mm 孔径筛后混匀,用于盆栽试验,其基本理化性质如下:全氮 $1.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $2.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $27.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质 $23.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $76.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $106.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $211.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全 Cd $2.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 5.27。鸡粪有机肥、硅镁肥、复合微生物肥以及普通复合肥等 4 种肥料 Cd 的本底值分别为 280.68 、 39.54 、 117.36 、 $123.45 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

按 2 个品种菜心、2 个污染浓度和 4 种肥料的正交试验设计,共 16 个处理。污染土壤设 2 个浓度水平,每盆装 3 kg 土,1 kg 土中加入含 1 mg Cd 的 CdCl_2 溶液(混匀后实际测定值为 $3.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)或加入同体积的水混匀,并老化一个星期,再按照不同肥料普通施用量分别做四个处理:鸡粪有机肥 $33.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、普通复合肥(NPK 的含量及比例:15%-15%-15%) $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、复合微生物肥 $1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、硅镁肥 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,同时分别向鸡粪有机肥、硅镁肥、复合微生物肥添加尿素 0.33 、 1.61 、 $1.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,补充到同一氮素营养水平,再将上述土壤和肥料重新混匀。菜心直接播种,每个处理三个重复,菜心种子萌芽后每个重复保留三株菜心。盆栽摆置于遮雨大棚并按随机区组摆放,每天早

晚按缺水情况浇水一次,为防止污染物淋溶渗漏损失,盆栽用 100 目筛网垫底,并在盆下放置塑料托盘,必要时将渗漏液倒回盆中。

1.3 测定项目与方法

种植 60 d 后,使用便携式叶绿素仪 SPAD 直接测定菜心叶绿素含量,并收获植株。用自来水洗掉泥沙并用湿布擦拭干净,将茎叶、根部根系分别放入纸质信封并置于烘箱中 75 ℃恒温烘干,称量各部位干重,并磨成粉状用密封袋装好备用。

菜心的茎叶和根部样采用硝酸-高氯酸消解;土壤样采用硝酸-氢氟酸-高氯酸消解,Cd 的测定采用 ZEE nit700P-LS 原子吸收测定仪。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据用平均值±标准误(Mean±SE)来表示,采用 Microsoft Excel 和 SPSS 20.0 进行统计分析,并用 GraphPad Prism 5 制图。

植物对重金属的转移系数=植物地上部重金属含量/根部该元素含量

植物对重金属的富集系数(PUF)=植物地上部重金属含量/土壤中该重金属元素含量

2 结果与分析

2.1 不同肥料对菜心生物量的影响

由表 1 可知,在对照组土壤(Cd 本底值为 2.61

mg·kg⁻¹)条件下,同种肥料的油绿 80 天菜心生物量显著大于特青 60 天菜心生物量。在鸡粪有机肥条件下,两种菜心的生物量最大,其中油绿 80 天菜心的生物量为特青 60 天菜心生物量的 1.34 倍;在普通复合肥料条件下,两种菜心的生物量最小,特青 60 天菜心的生物量仅为油绿 80 天菜心生物量的 22.95%。由表 2 可知,在土壤 Cd 的含量为 3.99 mg·kg⁻¹时,在相同肥料条件下,除了鸡粪有机肥条件下油绿 80 天菜心和特青 60 天菜心的生物量有所上升,其他肥料条件下的生物量整体都下降。在鸡粪有机肥条件下油绿 80 天菜心的生物量显著高于其他肥料条件下的生物量,鸡粪有机肥的油绿 80 天菜心生物量分别为硅镁肥、复合微生物肥、普通复合肥的 2.93、3.63、4.37 倍,同时也显著大于鸡粪有机肥条件下的特青 60 天菜心的生物量(1.61 倍),其他肥料条件下两种菜心之间的生物量差异不显著。从表 1 和表 2 中还可以看出,特青 60 天菜心和油绿 80 天菜心两个不同品种菜心的地上部与根部生物量均呈正相关。

2.2 不同肥料对菜心叶绿素的影响

由图 1 可知,当土壤本底值 Cd 浓度为 2.61mg·kg⁻¹以及添加 Cd 混匀后 Cd 的浓度为 3.99 mg·kg⁻¹时,同种肥料条件下的同种菜心叶绿素的 SPAD 值差异不显著,但特青 60 天菜心的 SPAD 值显著高于油绿 80 天菜心 SPAD。当土壤镉浓度为 2.61 mg·kg⁻¹

表 1 施用不同肥料对高低累积 Cd 菜心生物量的影响(CK 土壤 Cd 浓度为 2.61 mg·kg⁻¹)
Table 1 Effect of applied different fertilizers on the biomass of two vegetables choy sum under 2.61 mg·kg⁻¹ cadmium in soil

肥料	干重/g·株 ⁻¹					
	特青 60 天菜心			油绿 80 天菜心		
	全株	茎叶	根部	全株	茎叶	根部
鸡粪有机肥	3.37±0.36c	3.07±0.29c	0.25±0.46bcd	4.50±40d	4.12±0.35d	0.38±0.06cd
硅镁肥	1.82±0.08b	1.70±0.08b	0.13±0.01ab	4.21±0.53cd	3.8±0.51cd	0.42±0.04d
复合微生物肥	2.11±0.22b	1.81±0.33b	0.31±0.13bcd	3.27±0.12c	3.01±0.08c	0.26±0.04bcd
普通复合肥	0.42±0.11a	0.40±0.10a	0.027±0.01a	2.03±0.48b	1.83±0.43b	0.20±0.05abc

表 2 施用不同肥料对高低累积 Cd 菜心生物量的影响(土壤 Cd 浓度为 3.99 mg·kg⁻¹)
Table 2 Effect of applied different fertilizers on the biomass of two vegetables choy sum under 3.99 mg·kg⁻¹ cadmium in soil

肥料	干重/g·株 ⁻¹					
	特青 60 天菜心			油绿 80 天菜心		
	全株	茎叶	根部	全株	茎叶	根部
鸡粪有机肥	3.48±0.13b	3.13±0.09b	0.35±0.045b	5.62±0.54c	4.88±0.51c	0.74±0.03c
硅镁肥	1.53±0.48a	1.44±0.45a	0.09±0.036a	1.91±0.06a	1.75±0.57a	0.16±0.06a
复合微生物肥	1.40±0.53a	1.31±0.49a	0.09±0.04a	1.55±0.08a	1.45±0.09a	0.10±0.04a
普通复合肥	1.31±0.36a	1.18±0.31a	0.13±0.05a	1.29±0.29a	1.21±0.28a	0.08±0.01a

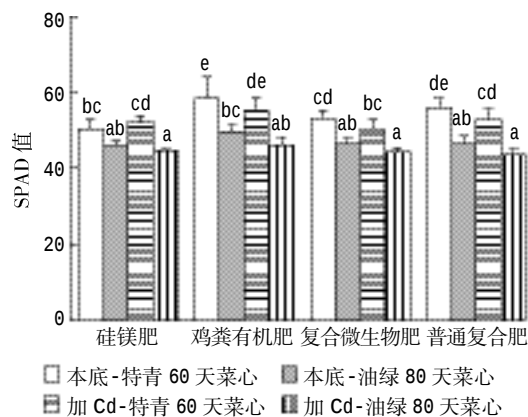


图1 不同浓度Cd污染土壤对菜心叶绿素SPAD值的影响
Figure 1 Effect of choy sum of chlorophyll when soil contaminated different concentrations of Cd

时,在鸡粪有机肥条件下,特青60天菜心的SPAD值显著高于硅镁肥和复合微生物肥料条件下的SPAD值;当土壤镉浓度为 $3.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,在鸡粪有机肥条件下,特青60天菜心的SPAD值显著高于复合微生物肥料条件下的SPAD值,而油绿80天菜心在相同镉污染土壤、不同肥料处理条件下的SPAD值差异不显著。

2.3 不同肥料对菜心和根际土Cd含量的影响

由表3可知,当土壤Cd含量为 $2.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,

两种菜心茎叶和根部Cd的含量如下:鸡粪有机肥<硅镁肥<复合微生物肥<普通复合肥,其中鸡粪有机肥条件下两种菜心根茎叶Cd的含量显著低于其他三种肥料条件下的含量。在普通复合肥条件下,两种菜心根部Cd含量显著高于其他肥料。在相同肥料条件下,油绿80天菜心茎叶Cd的含量显著低于特青60天菜心,其中在鸡粪有机肥条件下,油绿80天菜心茎叶Cd的含量是特青60天菜心的53.79%。不同肥料条件下的特青60天菜心和油绿80天菜心茎叶Cd的含量均高于根部的含量,其根际土Cd含量差异性不显著。

由表4可知,当土壤Cd含量 $3.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,不同肥料处理下的两种菜心茎叶、根部和根际土Cd的含量都增加,且不同肥料间菜心茎叶和根部Cd含量差异均显著,其中油绿80天菜心茎叶Cd的含量均显著低于特青60天菜心。在鸡粪有机肥处理条件下油绿80天菜心的茎叶和根部Cd的含量最小,分别为特青60天菜心茎叶和根部Cd含量的34.08%和70.73%。另外,当土壤Cd含量为 $3.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,油绿80天菜心的根部Cd含量明显比茎叶的含量高。

2.4 不同肥料对菜心Cd富集的影响

由图2可知,相同肥料条件下,特青60天菜心对Cd的富集系数显著大于油绿80天菜心,因此特青

表3 施用不同肥料对高低累积Cd菜心茎叶、根和根际土Cd含量的影响(CK土壤Cd浓度 $2.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 3 Effect of applied different fertilizers on the content of Cd of stem leaf, root and rhizosphere soil of two vegetables choy sum under $2.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ cadmium in soil (CK)

肥料	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
	特青60天菜心			油绿80天菜心		
	茎叶	根部	根际土	茎叶	根部	根际土
鸡粪有机肥	$5.41\pm 0.14\text{b}$	$1.89\pm 0.17\text{a}$	$1.85\pm 0.33\text{a}$	$2.91\pm 0.12\text{a}$	$2.34\pm 0.18\text{a}$	$2.88\pm 0.64\text{a}$
硅镁肥	$9.50\pm 0.48\text{c}$	$5.56\pm 0.28\text{cd}$	$2.46\pm 0.15\text{a}$	$5.62\pm 0.68\text{b}$	$4.17\pm 0.28\text{b}$	$2.98\pm 0.25\text{a}$
复合微生物肥	$13.64\pm 2.06\text{d}$	$5.80\pm 1.39\text{d}$	$3.08\pm 0.61\text{a}$	$5.79\pm 0.05\text{b}$	$4.67\pm 0.27\text{bc}$	$2.58\pm 0.29\text{a}$
普通复合肥	$14.35\pm 0.47\text{d}$	$16.12\pm 0.21\text{f}$	$2.98\pm 0.29\text{a}$	$7.53\pm 0.15\text{bc}$	$12.48\pm 0.21\text{e}$	$3.12\pm 0.11\text{a}$

表4 施用不同肥料对高低累积Cd菜心茎叶、根和根际土Cd含量的影响(土壤Cd浓度 $3.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 4 Effect of applied different fertilizers on the content of Cd of stem leaf, root and rhizosphere soil of two vegetables choy sum under $3.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ cadmium in soil

肥料	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
	特青60天菜心			油绿80天菜心		
	茎叶	根部	根际土	茎叶	根部	根际土
鸡粪有机肥	$8.127\pm 0.17\text{b}$	$4.10\pm 0.02\text{b}$	$3.29\pm 0.62\text{a}$	$2.77\pm 0.18\text{a}$	$2.90\pm 0.08\text{a}$	$4.79\pm 0.35\text{abc}$
硅镁肥	$14.29\pm 0.69\text{c}$	$13.78\pm 0.11\text{d}$	$4.04\pm 0.04\text{ab}$	$7.51\pm 0.61\text{b}$	$10.96\pm 6.02\text{c}$	$5.35\pm 0.44\text{bc}$
复合微生物肥	$17.35\pm 1.10\text{d}$	$13.79\pm 0.14\text{d}$	$5.33\pm 0.60\text{bc}$	$12.52\pm 0.47\text{c}$	$25.84\pm 0.76\text{f}$	$6.00\pm 0.21\text{c}$
普通复合肥	$29.37\pm 0.96\text{e}$	$34.70\pm 0.22\text{g}$	$4.62\pm 0.08\text{abc}$	$19.10\pm 0.54\text{d}$	$22.35\pm 0.95\text{e}$	$3.70\pm 0.79\text{a}$

60 天菜心比油绿 80 天菜心更容易富集重金属 Cd。在鸡粪有机肥条件下,油绿 80 天菜心和特青 60 天菜心对 Cd 的富集系数达到最小值,显著低于其他肥料条件下的富集系数。在土壤 Cd 浓度为 $2.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,油绿 80 天菜心对 Cd 的富集系数为 1.24,特青 60 天菜心对 Cd 的富集系数为 2.00,土壤 Cd 浓度为 $3.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,油绿 80 天菜心对 Cd 的富集系数为 0.96,特青 60 天菜心对 Cd 的富集系数为 2.28,而在其他肥料条件下的特青 60 天菜心和油绿 80 天菜心的富集系数都远大于 2。因此,鸡粪有机肥有利于减少两种菜心对土壤中 Cd 的富集。而普通复合肥条件下的两种菜心的富集系数达到最大值,且随着土壤中的 Cd 浓度的增加,富集系数变大,显著高于其他肥料的富集系数。总体上,特青 60 天菜心和油绿 80 天菜心在不同肥料条件下对 Cd 的富集系数如下:鸡粪有机肥<硅镁肥<复合微生物肥<普通复合肥,其中鸡粪有机肥条件下的两种菜心的转移系数均显著低于其他肥料($P<0.05$)。

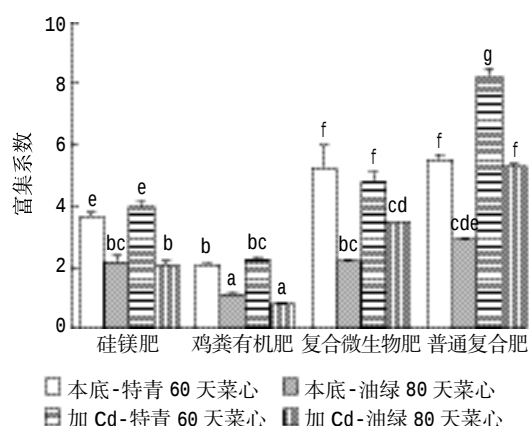


图 2 不同肥料对菜心 Cd 富集的影响

Figure 2 Effects of different fertilizers on the choy sum in Cd enrichment

2.5 不同肥料对菜心 Cd 转移的影响

由图 3 可知,随着土壤 Cd 含量增加,特青 60 天菜心和油绿 80 天菜心对 Cd 的转移系数总体上是下降的。在鸡粪有机肥和复合微生物肥条件下,油绿 80 天菜心的转移系数显著小于特青 60 天菜心的转移系数,其中在鸡粪有机肥条件下油绿 80 天菜心的转移系数分别为 1.24 和 0.96,特青 60 天菜心的转移系数分别为 2.89 和 1.99。另外当土壤 Cd 含量为 $3.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,不同肥料条件下的油绿 80 天菜心对 Cd 的转移系数均小于 1。

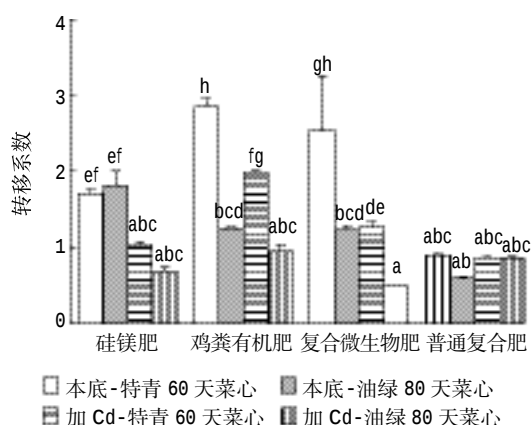


图 3 不同肥料对菜心 Cd 转移的影响

Figure 3 Effects of different fertilizers on the choy sum in Cd transfer

3 讨论

Cd 不是植物的必要营养元素,却是生物毒性最强的重金属之一,当植物组织内 Cd 的含量达到一定值时就会对某些植物产生不同程度的毒害,通常的毒害症状有生长迟缓、植株矮小,叶片退绿、产量下降甚至死亡,因而植物的生物量可以作为对 Cd 的耐性的一个指标。Cd 具有生物毒性,在植物体内富集,通过食物链危害人体健康,那么蔬菜的可食部分 Cd 的含量多少,对人体的健康有着间接的联系,因此研究不同肥料处理条件下,不同菜心对 Cd 的富集和转移以及对其生长情况的影响尤其重要。

肥料进入土壤中,能改变土壤的肥力,从而改变植物的生物量;能通过提高或者降低土壤 pH 值以及携带的竞争离子,改变土壤溶液重金属的有效性;通过影响作物根系和茎叶的代谢过程,络合或沉淀土壤的重金属,影响植物对重金属的吸收。本研究采用的盆栽实验,在相同 Cd 污染浓度下,特青 60 天和油绿 80 天两种菜心的生物量呈以下规律:鸡粪有机肥>硅镁肥>复合微生物肥>普通复合肥,其中鸡粪有机肥处理组的生物量显著高于其他三种肥料处理组的生物量,因此鸡粪有机肥最适合用于菜心的种植,硅镁肥次之。该结果和唐明灯等^[29]研究结果是一致的,这可能是因为鸡粪有机肥中除了含有有机物质以外,还含有磷和钾等元素,所以合理施用鸡粪有机肥,能有效促进作物生长发育,提高产量^[30-31];硅镁肥尽管不是植物生长的必需元素,在适量的施用水平,仍能促进禾本科、甜菜以及许多双子叶植物的生长发育^[32-34]。

何翠屏等^[35]研究表明,Cd 胁迫能使植物产生自

由基,攻击叶绿素,造成叶绿素破坏,导致叶片失绿。本实验结果显示,在相同浓度Cd污染的土壤条件下,特青60天菜心叶绿素的SPAD值显著大于油绿80天菜心的SPAD值,可能是因为特青60天菜心和油绿80天菜心品种不同而造成的SPAD值不同,但在鸡粪有机肥条件下特青60天菜心的SPAD值显著高于复合微生物肥料,则可能是因为在鸡粪有机肥条件下特青60天菜心茎叶镉的含量少于复合微生物肥料处理条件下的含量,从而减少Cd对叶绿素的破坏。另外,当油绿80天菜心茎叶Cd的含量超过 $5.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,显著抑制了油绿80天菜心生物量,当特青60天菜心茎叶Cd的含量超过 $9.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时也会显著抑制特青60天菜心的产量,与阳继辉等^[36]的研究结果是相似的。

王凤花等^[37]和王艳红等^[38]研究表明,施用普通化肥能明显提高小白菜茎叶和根部的Cd的含量,而施用鸭粪有机肥能有效地减少茎叶Cd的含量,根部Cd含量也比施用普通化肥的低;适量施用硅素调节剂能显著降低叶菜茎叶和根部Cd的含量,与本实验的研究结果一致:油绿80天菜心和特青60天菜心茎叶和根部Cd含量的规律是鸡粪有机肥<硅镁肥<复合微生物肥<普通复合肥,其中鸡粪有机肥处理条件下的植物体内Cd含量显著低于其他肥料处理。普通复合肥处理的菜心体内Cd的含量却显著高于其他肥料处理,原因可能是:第一,施用鸡粪有机肥,增加土壤的有机质、腐殖质,通过络合和螯合固定Cd,进而降低Cd对菜心的有效性;第二,施用鸡粪有机肥能提高土壤pH值,普通化肥则降低土壤pH值,而土壤中有效Cd与土壤pH值呈负相关关系^[39-40]。除土壤重金属的生物有效性外,植物对重金属的积累能力还取决于根系对重金属的吸收能力和转运能力^[41]。本实验在不同肥料处理下,不同菜心根际土Cd的含量差异不显著,但随着土壤Cd含量的增加,根际土、菜心根部和茎叶Cd的含量也增加,因此在一定范围内高浓度的Cd促进两种菜心对Cd的吸收,而吸收Cd的含量越多,Cd对菜心的毒害越大,生物量越少。虽然在鸡粪有机肥条件下两种菜心对Cd的转移系数最大,但它们对Cd的富集系数是最少的,因此两种菜心在鸡粪有机肥条件下的茎叶和根部相对其他肥料来说Cd的分布是最少的。

总的来说,在四种肥料中,鸡粪有机肥能减少特青60天菜心和油绿80天菜心对Cd的富集,同时促进植物的生长,是四种肥料中最佳的选择,而普通复

合肥却是恰恰相反。对于特青60天和油绿80天两种菜心来说,在Cd污染土壤环境下,油绿80天菜心对Cd的富集系数和转移系数都低于特青60天菜心,并且油绿80天菜心的生物量也大于特青60天菜心的生物量。该结果和邱丘等^[28]以及黄志亮等^[42]研究结果是一致的。不同品种的蔬菜对镉的吸收及其生长影响不同。大量研究表明植物体内Cd的亚细胞分布与不同物种(或基因型)的Cd积累、转运以及解毒等过程有关^[43-44]。植物细胞壁含有大量的纤维素、半纤维素和木质素等多糖以及黏胶和蛋白质,这些物质能够提供大量的包括羟基、胺类和醛基在内的功能基团,这些基团能够吸附Cd离子从而限制其跨膜扩散。邱丘等^[28]研究发现,菜心能通过细胞壁和Cd结合,有效降低胞质中Cd离子的浓度从而减轻Cd对细胞器的毒害,其中低积累品种菜心LB70体内与细胞壁结合的Cd的能力高于CX4基因型的菜心。这也可能是油绿80天菜心较特青60天菜心低积累Cd的原因。

4 结论

(1)几种肥料对促进菜心生长和抑制Cd吸收的效应差异显著,其作用大小规律如下:鸡粪有机肥>硅镁肥>复合微生物肥>普通复合肥。中高浓度Cd对特青60天菜心和油绿80天菜心的叶绿素和生长有抑制作用,且随着Cd浓度的增加,抑制作用加强。

(2)在Cd污染土壤条件下,油绿80天菜心的产量显著高于特青60天菜心,且对Cd的富集显著低于特青60天菜心,在鸡粪有机肥和硅镁肥条件下,Cd转移率也显著低于特青60天菜心,因此油绿80天菜心与特青60天菜心相比适合在Cd污染土壤种植。

参考文献:

- [1] 唐发静, 祖艳群. 土壤重金属空间变异的研究方法[J]. 云南农业大学学报, 2008, 23(4): 558-561.
TANG Fa-jing, ZU Yan-qun. Research methods of spatial variability of heavy metals in soil[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2008, 23(4): 558-561.
- [2] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499-1502.
HAN Chun-mei, WANG Lin-shan, GONG Zong-qiang, et al. Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12): 1499 - 1502.
- [3] 郭勇, 童艳君. 我国农业土壤重金属污染现状及防治对策[J]. 现代农业科技, 2012, 18: 220-221.
GUO Yong, TONG Yan-jun. Agricultural soil heavy metal pollution present situation and countermeasures of our country[J]. Modern Agriculture, 2012, 18: 220-221.

- tural Science and Technology, 2012, 18: 220-221.
- [4] 蔡美芳, 李开明, 谢丹平, 等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊2): 223-230.
CAI Mei-fang, LI Kai-ming, XIE Dan-ping, et al. The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(Suppl2): 223-230.
- [5] López-Chuken U J, Young S D. Modelling sulphate-enhanced cadmium uptake by Zea mays from nutrient solution under conditions of constant free Cd^{2+} ion activity[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(7): 1080-1085.
- [6] Berkelaar E J, Hale B A. Cadmium accumulation by durum wheat roots in ligand-buffered hydroponic culture: Uptake of Cd ligand complexes or enhanced diffusion?[J]. Canadian Journal of Botany, 2003, 81(7): 755-763.
- [7] Arcella D, Cappe S, Fabiansson S, et al. Cadmium dietary exposure in European population[S]. Eur Food Stf Auth(EFSA), 2012, 10:2551.
- [8] Kabata-Pendias A, Pendias H. Trace elements in soil and plant[M]. Florida: Floria CRC Press, 1992: 287-301.
- [9] 崔斌, 王凌, 张国印, 等. 土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 373-375.
CUI Bin, WANG Ling, ZHANG Guo-yin, et al. Status and harm of heavy metal pollution in soil and research progress in remediation technology[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(1): 373-375.
- [10] 王艳红, 李盟军, 唐明灯, 等. 石灰和泥炭配施对叶菜吸收Cd的阻控效应[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2339-2344.
WANG Yan-hong, LI Meng-jun, TANG Ming-deng, et al. Combined application of lime and peat reduced cadmium uptake by leafy vegetable[J]. Journal of Agro-environment Science, 2013, 32(12): 2339-2344.
- [11] 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 等. 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4268-4276.
YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, et al. Effects of different kinds of organic materials on soil heavy metal phytoremediation efficiency by Sedum alfredii Hance[J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 4268-4276.
- [12] 聂呈荣, 杨文瑜, 邓日烈, 等. 不同改良剂对镉污染土壤的改良效果及对油麦菜生长的影响[J]. 佛山科学技术学院学报: 自然科学版, 2010, 28(4): 1-5.
NIE Cheng-rong, YANG Wen-yu, DENG Ri-lie, et al. Effects of different soil amelioration materials on the improvement of Cd contaminated soil and the growth of Lactuca sativa[J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2010, 28(4): 1-5.
- [13] 庞强强, 陈旺, 陈日远, 等. TM对镉污染土壤中菜心生长、品质及土壤理化性质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2015(2): 105-107.
PANG Qiang-qiang, CHEN Wang, CHEN Ri-yuan, et al. Effect of TM on growth, quality of flowering Chinese cabbage and physicochemical properties of soil contaminated with cadmium[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2015(2): 105-107.
- [14] 谭国湛. 间作及伴随阴离子肥料对油菜镉吸收积累的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013: 16-17.
TAN Guo-zhan. Effect of inter cropping and anion-accompanying fertilizers on Cd uptake and accumulation of Brassica campestris[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013: 16-17.
- [15] 高巍, 耿月华, 赵鹏, 等. 不同小麦品种对重金属镉吸收及转运的差异研究[J]. 天津农业科学, 2014, 20(10): 55-59.
GAO Wei, GENG Yue-hua, ZHAO Peng, et al. Different of cadmium absorption and transfer between high-accumulation and low-accumulating wheat varieties[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2014, 20(10): 55-59.
- [16] 林君锋, 高树芳, 陈伟平, 等. 蔬菜对土壤镉铜锌富集能力的研究[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 248-251.
LIN Jun-feng, GAO Shu-fang, CHEN Wei-ping, et al. Study on the concentrating characteristics of vegetables for Cd, Cu and Zn[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 248-251.
- [17] 唐非, 雷鸣, 唐贞, 等. 不同水稻品种对镉的积累及其动态分布[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 1092-1098.
TANG Fei, LEI Ming, TANG Zhen, et al. Accumulation characteristic and dynamic distribution of Cd in different genotypes of rice (Oryza sativa L.) [J]. Journal of Agro-environment Science, 2013, 32(6): 1092-1098.
- [18] 潘义宏, 王宏宾, 谷兆萍, 等. 大型水生植物对重金属的富集和转移[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6430-6441.
PAN Yi-hong, WANG Hong-bin, GU Zhao-ping, et al. Accumulation and translocation of heavy metals by macrophytes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6430-6441.
- [19] 柴世伟, 温琰茂, 韦献革, 等. 珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J]. 中山大学学报, 2004, 43(4): 90-94.
CHAI Shi-wei, WEN Yan-mao, WEI Xian-ge, et al. Heavy metal content characteristics of agricultural soils in the Pearl River Delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(4): 90-94.
- [20] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. Chemosphere, 2000, 41(1): 133-138.
- [21] 沈彤, 盛穗, 马赛平. 长沙市蔬菜中铅、镉含量状况及控制对策[J]. 湖南农业科学, 2005(4): 62-63.
SHEN Tong, SHENG Sui, MA Sai-ping, et al. The condition of the content of lead and cadmium in vegetables and control countermeasures in Changsha city[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2005(4): 62-63.
- [22] 王冬卿. 甘蓝型油菜(Brassica napus L.)品种间及品种内Cd积累差异研究[D]. 广州: 中山大学, 2007.
WANG Dong-qing. Difference research for Cd accumulation within varieties and species[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2007.
- [23] 周轶慧. 苋菜对重金属Cd、Pb积累的基因型差异及其机理研究[D]. 广州: 中山大学, 2010.
ZHOU Yi-hui. The genotype differences of accumulation and mechanism research of heavy metal Cd, Pb for Amaranth[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010.
- [24] Kabata-Pendias A, Mukherjee A B. Trace elements from soil to human[M]. Springer Science & Business Media, 2007.
- [25] 陈喆, 张森, 叶长城, 等. 富硅肥料和水分管理对稻米镉污染阻控效果研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 4003-4011.

- CHEN Zhe, ZHANG Miao, YE Chang-cheng, et al. Mitigation of Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) with Si fertilizers and irrigation managements[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12):4003-4011.
- [26] 张连忠, 路克国, 王宏伟, 等. 重金属镉, 铜在苹果幼树体内的分布特性及生物有机肥对减少重金属效应的研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3):123-125.
- ZHANG Lian-zhong, LU Ke-guo, WANG Hong-wei, et al. Heavy metal(Cd & Cu) distribution in apple plant and effect of bio-fertilizer in reducing absorption of heavy metal[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3):123-125.
- [27] 徐照丽, 吴启堂, 依艳丽. 不同品种菜心对镉抗性的研究[J]. *生态学报*, 2002, 22(4):571-576.
- XU Zhao-li, WU Qi-tang, YI Yan-li. Studies on the resistance to cadmium in different cultivars of *Brassica parachinensis*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(4):571-576.
- [28] 邱 丘. 菜心 Cd 积累的品种间差异及 Cd 污染控制方法研究[D]. 广州: 中山大学, 2011.
- QIU Qiu. Genotype variation of Cd accumulation and control methods for Cd pollution in Chinese flowering cabbage(*Brassica parachinensis*)[D]. Guangzhou: SUN Yat-sen University, 2011.
- [29] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 有机肥对生菜生长及其 Cd 含量的影响[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(24):42-45.
- TANG Ming-deng, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Effect of organic manures on the growth and Cd concentration of *Lactuca sativa*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(24):42-45.
- [30] 李书田, 刘荣乐, 陕 红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1):179-184.
- LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):179-184.
- [31] Casale W L, Minassian V, Menge J A, et al. Urban and agricultural wastes for use as mulches on avocado and citrus and for delivery of microbial biocontrol agents[J]. *Journal of Horticultural Science*, 1995, 70(2):315-332.
- [32] 邢雪荣, 张 蕾. 植物的硅素营养研究综述[J]. *植物学通报*, 1998, 15(2):33-40.
- XING Xue-rong, ZHANG Lei. Review of the studies on silicon nutrition of plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15(2):33-40.
- [33] Aziz T, Gill M A. Silicon nutrition and crop production: A review[J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences (Pakistan)*, 2002.
- [34] Yu T H, Peng Y Y, Lin C X, et al. Application of iron and silicon fertilizers reduces arsenic accumulation by *Ipomoea aquatica*[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15:60345-60351.
- [35] 何翠屏, 王慧忠. 重金属镉, 铅对草坪植物根系代谢和叶绿素水平的影响[J]. *湖北农业科学*, 2003(5):60-63.
- HE Cui-ping, WANG Hui-zhong. Effect of cadmium and lead on the roots metabolism and chlorophyll of lawn plant[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2003(5):60-63.
- [36] 阳继辉, 沈方科, 曾 芳, 等. 菜心耐 Cd 性的基因型差异及其机制研究[J]. *广西农业生物科学*, 2007, 26(4):322-325.
- YANG Ji-hui, SHEN Fang-ke, ZENG Fang, et al. Genotypic variation of Cd-tolerance and corresponded mechanisms in *Brassica parachinensis*[J]. *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*, 2007, 26(4):322-325.
- [37] 王凤花, 任 超, 李新燕, 等. 三种肥料对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(1):124-128.
- WANG Feng-hua, REN Chao, LI Xin-yan, et al. Effects of three fertilizers on Cd uptake by pakchoi in Cd-contaminated soil[J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2016(1):124-128.
- [38] 王艳红, 艾绍英, 唐明灯, 等. 硅素调理剂在镉超标菜地中的应用效果[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(16):3310-3317.
- WANG Yan-hong, AI Shao-ying, TANG Ming-deng, et al. Effect of application of silicon amendment on Cd over-standard soils of vegetable fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(16):3310-3317.
- [39] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [40] 赵 晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2010(5):953-961.
- ZHAO Jing, FENG Wen-qiang, QIN Yu-sheng, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010(5):953-961.
- [41] Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants[J]. *Biochimie*, 2006, 88(11):1707-1719.
- [42] 黄志亮. 镉低积累蔬菜品种筛选及其镉积累与生理生化特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- HUANG Zhi-liang. Screening of low accumulation vegetable cultivars and research on its properties of Cd-accumulation and physiology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [43] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars[J]. *Plant Physiology*, 1998, 116(4):1413-1420.
- [44] Wang X, Liu Y, Zeng G, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckmannia nivea* (L.) Gaud[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3):389-395.