

施肥对 Cd 胁迫下小白菜生理生化特性和生物累积的影响

薛瑞玲, 黄懿梅, 麦诗荃

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用土培盆栽试验研究了在施化肥和有机肥的条件下, 不同浓度 Cd 胁迫对小白菜生理生化特性及生物累积效应的影响。结果表明, 在施肥的条件下, 土壤中添加 $0 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的外源 Cd 时, 小白菜生物量表现为 Cd 低浓度处理 ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时升高, 高浓度处理 ($\geq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时降低的趋势; 叶绿素含量也表现出低浓度 ($\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理升高, 高浓度 ($\geq 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理降低的趋势; Vc 含量随 Cd 处理浓度的增大逐渐下降; MDA 含量及 Cd 在小白菜体内的累积量与 Cd 处理浓度正相关, 且根部 Cd 的累积量高于地上部。与化肥相比, 有机肥在一定程度上可以缓解 Cd 对小白菜生物量、叶绿素、Vc、膜结构破坏等的毒害作用, 降低土壤中 Cd 的生物有效性, 因为施有机肥条件下小白菜对镉的吸收率较低。关于有机肥对 Cd 胁迫的缓解机理还需进一步研究。

关键词: Cd; 小白菜; 化肥; 有机肥; 生理生化特性; 生物累积

中图分类号: Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)增刊-0020-06

Effects of Cadmium on Physiological and Biochemical Characteristics and Bio - Accumulation of Pakchoi in Different Fertilizing

XUE Rui - ling, HUANG Yi - mei, MAI Shi - quan

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the effects of cadmium on physiological, biochemical characteristics and bio - accumulation of pakchoi under chemical or organic fertilizing. The experimental results showed that when cadmium was added to the soil with levels between $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil and $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil, biomass of pakchoi increased at Cd amounts $\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil, but decreased when Cd was $\geq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil. Chlorophyll content of pakchoi increased at Cd amounts $\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil, but decreased when Cd was $\geq 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil. Vc content of pakchoi decreased as the amount of cadmium increased. MDA content and cadmium concentration in pakchoi were positively correlated with the amount of cadmium applied to soil and cadmium concentration was higher in roots than in aerial part of pakchoi. The result also indicated that the toxic effect of Cd on pakchoi and the biological availability of soil Cd both reduced in the presence of organic fertilizer compare to chemical fertilizer due to the uptake efficiency of Cd by pakchoi was lower under organic fertilizer than chemical fertilizer conditions. More research is needed to study the mechanisms of the reduction of toxicity effect and Cd accumulation in pakchoi with the application of organic fertilizer.

Keywords: cadmium; pakchoi; mineral fertilizer; organic fertilizer; physiological and biochemical characteristics; bio - accumulation

收稿日期: 2009 - 08 - 13

基金项目: 西北农林科技大学青年专项(06ZR047)

作者简介: 薛瑞玲(1986—), 女, 陕西户县人, 在读硕士, 主要从事环境化学方面的研究。E - mail: xueruiling1985@163.com

通讯作者: 黄懿梅 E - mail: ymhuang1971@163.com

我国约有 1.3 万 hm^2 耕地受到镉污染, 涉及 11 个省市的 25 个地区^[1], 植物中的镉有 40% ~ 70% 来自土壤。有研究表明, 低浓度的镉对某些植物的生长发育有一定的促进作用, 高浓度的镉会抑制植物的生

长发育^[2],当镉进入植物并积累到一定程度,就会表现出毒害,通常表现为生长迟缓、植株矮小、退绿、产量和质量下降,抑制光合作用、降低蒸腾速率,干扰营养元素的吸收,导致酶活性下降、膜脂过氧化、植物可溶性蛋白和可溶性糖含量降低等^[3-4]。不同品种的蔬菜累积镉的能力不同,镉对蔬菜的污染影响为叶菜类>果菜类>根菜及豆类>瓜类;同一品种的蔬菜不同部位镉累积能力也不同,党秀芳(1998)、李学德等(2004)等对青菜、芹菜、菠菜等多种蔬菜的调查表明同种蔬菜不同部位对镉的富集能力为叶>茎>根,但孙光闻、王林等的研究却表明蔬菜对镉的富集能力为根>地上部分^[5-6]。

多数情况下化肥对重金属的作用主要是通过影响植物的生长和植物对重金属的吸收来实现的。大量化肥带入的阴阳离子可以与重金属直接发生沉淀,或者通过一定的离子交换作用,或更复杂的拮抗或协同交互作用来影响土壤、根际及植物中重金属的行为。土壤pH对多种重金属的行为有显著的影响,而施用氮、磷、钾化肥在许多情况下会对土壤的pH产生影响^[7]。在镉污染的土壤中增施有机肥可使土壤中有效态的镉含量明显降低,水溶及交换态的含量明显减少,有机络合态的含量明显增加^[8-10]。但也有研究指出,施用有机物质作为改良剂,反而会促进植物对重金属的吸收^[11]。

可见,镉污染对蔬菜的影响以及施肥对镉污染的作用还有待进一步研究。为此,本研究选择人们广泛食用的小白菜作为研究对象,通过盆栽试验的方法,研究外源镉胁迫对小白菜的生理生化特性及生物累积效应的影响,探讨有机肥和化肥对镉污染的影响,为土壤重金属污染的生物监测和重金属的污染控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为杨凌地区的典型人为农耕土——壤土,土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾的含量分别为11.03 g·kg⁻¹、0.663 g·kg⁻¹、11.07 mg·kg⁻¹和181.86 mg·kg⁻¹,CEC为8.61 cmol·kg⁻¹,pH 8.3,总镉为0.92 mg·kg⁻¹。有机肥为鸡粪和锯末的堆肥,全氮和全磷的含量分别为2.01%和1.02%。化肥施用KH₂PO₄和CO(NH₂)₂,Cd添加剂为CdCl₂·H₂O。供试蔬菜为四季小白菜。

1.2 试验方案

试验在西北农林科技大学植物玻璃温室中进行,

参照我国土壤环境质量标准 GB15618—1995 的二级标准中土壤镉的临界值确定镉的添加量;以 N—2.0%,P—1.0% 为标准确定化肥及有机肥施加量,每盆装风干土 5 kg,共设 13 个处理(3 个重复),具体方案如表 1。

表 1 不同施肥条件下各处理镉的施用量

Table 1 The amount of Cd put in the treatment under different fertilizer apply

肥料(Fertilizer)		Cd/mg·kg ⁻¹				
有机肥(Org)(12.5 g·kg ⁻¹ soil)	CK	0	0.5	1	5	10 25
化肥(Che)(0.43 gCO(NH ₂) ₂ ·kg ⁻¹ soil,0.14 g KH ₂ PO ₄ ·kg ⁻¹ soil)		0	0.5	1	5	10 25

注:Org 为 Organic Fertilizer 简称,Che 为 Chemical Fertilizer 缩写。

重金属 Cd 以 CdCl₂·H₂O 溶液、化肥以 KH₂PO₄ 和 CO(NH₂)₂ 溶液分层施入土壤,有机肥以固体形态施入土壤。将土壤与添加的镉及肥料充分混匀后,装入塑料盆中,加水使含水量为田间持水量的 70%,平衡 2 d 后直播小白菜籽(30 粒/盆),待出苗 1 周后定苗(20 株/盆)。植物生长期间每日以称重法加水,保持土壤湿度为田间持水量的 70%,并保持正常的日光照射。在小白菜生长期间对其生长状况(株高、叶片大小、叶色、病害等)进行观察记录。

1.3 测定项目及方法

叶绿体色素的测定采用乙醇提取—紫外分光光度法^[12];Vc 含量的测定采用 2,6—二氯酚靛滴定法^[13];MDA 含量的测定采用 TBA 比色法^[12];总 Cd 的测定采用火焰原子吸收法^[14]。

1.4 数据处理方法

数据采用 Excel 和 DPS 数据处理软件处理。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对小白菜生物量的影响

CK 小白菜地上部干重为(12.55±0.750)g·20 plants⁻¹;根干重为(0.519±0.020)g·20 plants⁻¹。与 CK 相比,0(Org)地上部干重减少了 1.04%,根部干重增加了 1.73%,而 0(Che)的地上部和根部干重分别增加了 13.78%和 3.47%,可见施肥促进了小白菜的生长,且化肥的作用强于有机肥。

施有机肥和化肥时,小白菜地上部和根干重均随 Cd 处理浓度的升高先增大(≤5 mg·kg⁻¹)后减小(≥10 mg·kg⁻¹)。从表 2 中变化率可看出,除 Cd 处理浓度为 25 mg·kg⁻¹时,化肥处理的小白菜根重小于相应的有机肥处理外,Cd 处理浓度在 0~10 mg·

kg⁻¹时,化肥处理的小白菜地上部和根部生物量均小于有机肥处理。但比较镉浓度相同,不同肥料的处理对小白菜生长的影响时可发现,Cd 处理浓度高于 10 mg·kg⁻¹时,Cd 对小白菜地上部和根部生长的抑制率都表现为化肥处理大于有机肥处理,可见施有机肥能够缓解镉污染对小白菜生长的抑制作用。

表 2 施肥对镉胁迫下小白菜生物量的影响
Table 2 Effects of cadmium on the biomass of pakchoi in different fertilizing

Cd/mg·kg ⁻¹	地上部干重/g·20plants ⁻¹			根干重/g·20plants ⁻¹		
	有机肥	化肥	变化率/%	有机肥	化肥	变化率/%
0	12.42±0.55abc	14.28±0.58a	14.97	0.528±0.021a	0.537±0.019b	1.70
0.5	12.76±0.25ab(2.74)	14.35±0.4a(0.49)	12.38	0.543±0.021a(2.84)	0.551±0.028ab(2.61)	1.47
1	13.30±0.53ab(7.09)	14.35±0.52a(0.49)	7.97	0.538±0.027a(1.89)	0.549±0.011ab(2.23)	2.04
5	13.45±0.93a(8.29)	15.03±0.66a(5.25)	11.75	0.539±0.018a(2.08)	0.589±0.028a(9.68)	9.28
10	12.25±0.56bc(-1.37)	14.10±0.41a(-1.26)	15.10	0.504±0.029a(-4.55)	0.507±0.04b(-5.59)	0.60
25	11.26±0.89c(-9.34)	12.18±0.59b(-14.71)	8.17	0.447±0.026b(-15.34)	0.426±0.039c(-20.67)	-4.70

注:各列中小写字母相同表示不同 Cd 水平无显著差异,不同表示差异显著(P < 0.05)。
变化率(%)=(化肥处理干重-有机肥处理干重)/有机肥处理干重×100
()内数据为添加 Cd 处理相对于施肥对照的增减百分率(%)=(加镉处理-施肥处理对照)/施肥处理对照×100

2.2 Cd 胁迫对小白菜叶绿体色素含量的影响

植物叶片叶绿素含量是植物生长和生理代谢的重要标志,与光合作用密切相关,是反映 C、N 素同化代谢的重要指标,对植株的生长发育起着重要作用。
CK 小白菜叶片叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、总叶绿素 (Chl) 和类胡萝卜素 (Car) 含量分别为 0.676、0.356、1.032 和 0.101 mg·g⁻¹FW,施肥后的结果见图 1,显著性分析表明,施有机肥或化肥对叶绿体色素含量的影响无显著差异。

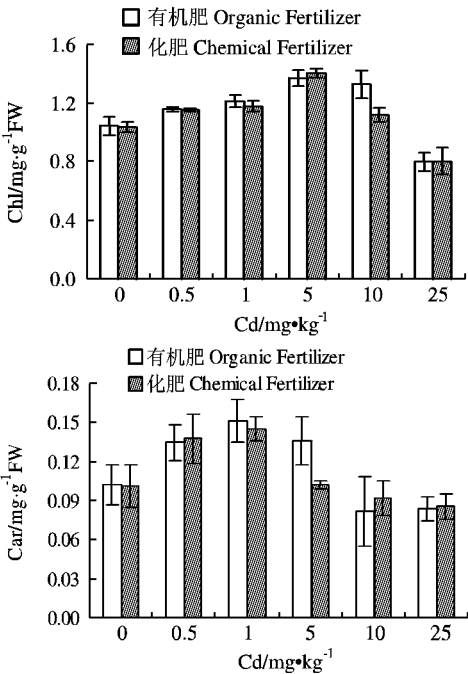
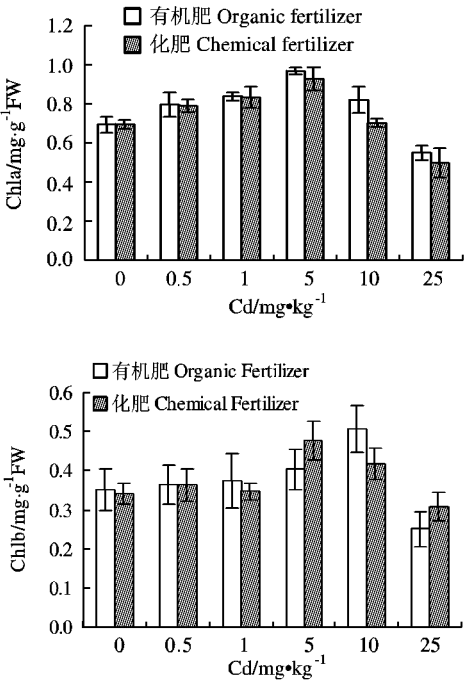


图 1 施肥对镉胁迫下小白菜叶绿体色素含量的影响
Figure 1 Effects of cadmium on the contents of chlorophyll and carotenoids of pakchoi in different fertilizing

小白菜叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均随 Cd 处理浓度的升高先增后降。叶绿素 a 和总叶绿素含量在两种施肥条件下都表现为镉处理浓度≤5 mg·kg⁻¹时,较 CK 有所增大,Cd 处理浓度≥10 mg·kg⁻¹时,则小于 CK;Cd 处理浓度为 10、25 mg·kg⁻¹时,化肥处理的叶绿素 a 含量较有机肥处理分别减少了 14.38% 和 9.46%,Cd 处理浓度

为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 化肥处理的总叶绿素含量相对于有机肥处理减少了 15.70%, 可见有机肥缓解了高浓度镉对叶绿素合成的抑制作用。叶绿素 b 含量, 在施有机肥条件下, 峰值出现在 Cd 处理浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 而施化肥时, 峰值出现在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 类胡萝卜素含量的峰值在两种施肥条件下都出现在 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时。Cd 处理浓度为 0.5、1、5、10、25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 化肥处理的叶绿素 b 含量相对于有机肥处理的变化率分别为 0.00%, -7.12%, 18.29%, -17.83%, 22.75%, 类胡萝卜素分别为 2.42%, -3.85%, -25.05%, 12.57%, 1.88%, 无明显变化规律。

2.3 Cd 胁迫对小白菜叶片 Vc 和 MDA 含量的影响

Vc 是蔬菜的一个重要品质指标, 其含量高低与人们健康有密切关系。近年来, 在植物衰老和逆境等自由基伤害理论的研究中, Vc 作为生物体对自由基伤害产生的相应保护系统成员之一, 也受到了人们的关注。植物器官衰老或在逆境下遭受伤害, 往往发生膜脂过氧化作用, 丙二醛 (MDA) 是膜脂过氧化作用的最终分解产物, 其含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度。

CK 小白菜叶片中 Vc 和 MDA 含量分别为 $0.7222 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $27.85 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$, 施有机肥和化肥后, 叶片中 Vc 含量分别增加了 0.8% 和 0.8%, MDA 含量分别增加了 1.2% 和 16.1%。可见施肥可提高小白菜体内 Vc 含量及 MDA 的累积量, 有机肥与化肥对 Vc 的影响作用一样, 而施化肥对叶片中 MDA 累积的促进作用更明显, 施肥 Cd 处理的 Vc 和 MDA 变化如图 2 所示。

施有机肥和化肥时, 小白菜叶片中 Vc 含量均随 Cd 处理浓度的升高而降低, 且 Cd 处理浓度越大降低越快; MDA 含量均随 Cd 处理浓度的升高而增加, 且 Cd 浓度越高 MDA 含量增加越快。Cd 处理浓度为 0.5、1、5、10、25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 化肥处理的 Vc 含量相对于有机肥处理的分别降低了 4.97%, 5.85%, 2.93%, 10.84%, 5.16%, 而化肥处理的 MDA 含量相对于有机肥处理的分别增加了 14.07%, 10.80%, 9.78%, 10.27%, 8.12%, 可见与化肥相比, 有机肥可缓解 Cd 胁迫对 Vc 及膜结构的破坏作用。

2.4 Cd 在小白菜体内的累积

CK 地上和根部总 Cd 含量分别为 $1.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 施肥对小白菜地上部 Cd 累积量无显著影响, 但增加了根部 Cd 累积量, 可能是因为施肥促进了小白菜的生长, 而土壤中的 Cd 更容易迁移到根部, 从而也增加了根部 Cd 含量。小白菜地上部和

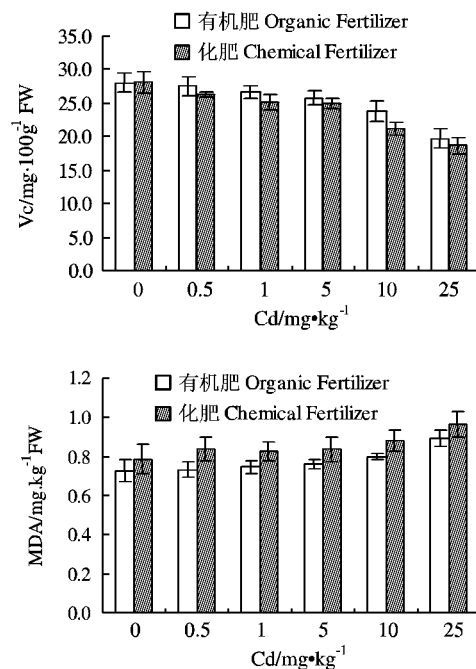


图2 Cd 胁迫对小白菜 Vc 和 MDA 含量的影响

Figure 2 Effects of Cd on the Vc and MDA content of pakchoi

根部 Cd 累积量随 Cd 处理浓度升高显著增加 (表 3), 二者呈正相关。施有机肥时, 小白菜地上部和根部 Cd 累积量与 Cd 处理浓度的相关方程和相关系数分别为:

$$y = 1.5406x + 6.3844$$

$$R^2 = 0.9232$$

$$y = 2.3822x + 5.8935$$

$$R^2 = 0.9885$$

施化肥时, 分别为:

$$y = 1.8963x + 7.9901$$

$$R^2 = 0.8984$$

$$y = 3.077x + 8.7758$$

$$R^2 = 0.9775$$

可见, 施有机肥和化肥时, 小白菜对 Cd 的富集系数均随 Cd 处理浓度的升高逐渐下降 (表 3), 根部 Cd 累积量 > 地上部。化肥对照地上部和根部 Cd 含量均小于有机肥对照, 添加 Cd 后, Cd 处理浓度相同, 施化肥时小白菜体内 Cd 含量均比施有机肥时高 (化肥处理的富集系数高于有机肥), 且变化率先增大后减小, 说明有机肥可以降低土壤中 Cd 的生物有效性。

3 讨论

试验结果表明, 施肥条件下, 壤土中添加 Cd 浓度小于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 对小白菜地上部和根的生长均有

表 3 施肥对镉胁迫下小白菜体内重金属累积的影响
Table 3 Effects of cadmium on Cd content of pakchoi in different fertilizing

Cd/mg · kg ⁻¹	地上部 Cd 含量/mg · kg ⁻¹			根部 Cd 含量/mg · kg ⁻¹		
	有机肥	化肥	变化率/%	有机肥	化肥	变化率/%
0	1.59 ± 0.1e	1.55 ± 0.19d	-2.47	2.95 ± 0.43ef	2.93 ± 0.48e	-0.78
0.5	4.69 ± 0.68de(938)	5.34 ± 0.62cd(1 068)	13.92	7.00 ± 0.33de(1 401)	7.80 ± 0.78e(1 561)	11.43
1	7.77 ± 0.26d(777)	9.08 ± 0.29c(808)	16.92	9.12 ± 0.76d(912)	18.09 ± 1.09d(1 809)	98.31
5	20.02 ± 1.71c(400)	27.29 ± 1.76(546)	36.32	22.00 ± 0.54c(440)	28.43 ± 1.06c(569)	29.26
10	26.15 ± 1.78b(262)	31.76 ± 1.92b(318)	21.44	27.81 ± 1.18b(278)	37.72 ± 1.98b(377)	35.64
25	43.13 ± 1.06a(168)	51.62 ± 7.12a(206)	22.83	65.34 ± 4.94a(261)	85.38 ± 6.43a(342)	30.67

注: ()内数值为小白菜的生物富集系数。
变化率(%) = (化肥处理干重 - 有机肥处理干重)/有机肥处理干重 × 100

一定的促进作用,而当 Cd 浓度在 10 ~ 25 mg · kg⁻¹ 时,小白菜植株高度减小,地上部及根的干重降低。张旭等^[15]发现当外源 Cd 达到 20 mg · kg⁻¹,小白菜出现了失绿、枯萎症状。本试验中小白菜除植株高度降低外未出现其他外观毒害症状,这可能与土壤中 Cd 含量、植物品种、土壤性质有关。

低浓度的 Cd 对叶绿素及类胡萝卜素的合成具有一定的促进作用,超过一定浓度后产生了破坏作用,这与孙光闻等^[16]的研究结果一致。Cd 引起叶绿体色素含量变化可能与 Cd 影响叶绿素合成与分解代谢有关,Cd 能降低叶绿素的含量^[17]、改变叶绿体的超微结构^[18]。Cd 使叶绿素降低,很可能是 Cd 进入叶内,在局部累积过多,与叶绿体中蛋白质上的 -SH 结合或取代 Fe²⁺、Zn²⁺、Mg²⁺ 等,破坏了叶绿体结构和功能活性。Cd 胁迫引起了小白菜叶片 Vc 含量降低,MDA 含量增加,说明 Cd 能促使小白菜体内 Vc 的分解,发生脂质过氧化作用,引起 MDA 累积,抗逆能力减弱。

Cd 在小白菜体内的累积量与土壤中 Cd 添加量呈正相关;小白菜对 Cd 的吸收率随 Cd 处理浓度升高逐渐下降,Cd 在小白菜体内的累积量为根部 > 地上部,植株吸收的 Cd 大部分积累在根中,极少部分转运到地上部^[5-6,19]。小白菜对 Cd 的吸收率随 Cd 处理浓度升高而逐渐下降可能与小白菜的上述生理活性降低有关。

与化肥相比,有机肥在一定程度上可以缓解 Cd 对小白菜生物量、叶绿素、Vc、膜结构破坏等的毒害作用,这可从不同施肥条件下,小白菜对 Cd 的吸收率看出。施有机肥时,小白菜体内 Cd 含量均比施化肥时低,可能是有机肥中的有机质对重金属具有一定的吸附作用,从而降低了土壤中重金属的生物有效性。此

外,有机肥料影响土壤其他基本性状(如 pH、有机质等)所产生的间接作用也会对土壤中 Cd 的有效性产生影响,有机肥中的营养元素与镉间的相互作用也会影响两者的有效性。张青等^[20]发现,在土壤中加入外源 Cd 后,配施有机肥比不施有机肥的土壤中交换态 Cd 的比例降低了 11%。但也有研究显示添加有机肥后,外源 Cd 进入土壤中主要以植物可吸附利用的有效态存在^[21];施用有机物质作为改良剂,反而会促进植物对重金属的吸收^[11]。因此,关于有机肥对 Cd 胁迫的缓解机理还须进一步研究。

4 结论

(1)在施肥的条件下,土壤中添加 0 ~ 25 mg · kg⁻¹ 的外源 Cd 时,小白菜生物量表现为 Cd 低浓度处理(≤5 mg · kg⁻¹)时升高,高浓度处理(≥10 mg · kg⁻¹)时降低的趋势;叶绿素含量也表现出低浓度(≤10 mg · kg⁻¹)处理升高,高浓度(≥25 mg · kg⁻¹)处理降低的趋势;Vc 含量随 Cd 处理浓度的增大逐渐下降;MDA 含量及 Cd 在小白菜体内的累积量与 Cd 处理浓度正相关,且根部 Cd 的累积量高于地上部。

(2)与化肥相比,有机肥在一定程度上可以缓解 Cd 对小白菜生物量、叶绿素、Vc、膜结构破坏等的毒害作用,降低土壤中 Cd 的生物有效性。

参考文献:

[1]曹仁林,贾晓葵.关于我国土壤重金属污染对农产品安全性影响的思考[C]//厦门:第七次全国土壤与环境学术讨论会论文集,2001,11:2-5.
CAO R L, JIA X K. Effects of soil heavy pollution on the security of agricultural products in China[C]//Xiamen: Disquisition Collection of Seventh National Symposium on Environment and Soil, 2001,11:2-5.

- [2] 曾咏梅, 毛昆明, 李永梅. 土壤中镉污染的危害及其防治对策[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(3): 360–365.
- ZENG Y M, MAO K M, LI Y M. Damage of the cadmium pollution in soil and its control [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(3): 360–365.
- [3] ZHANG G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and components in wheat genotypes differing in Cd tolerant seedling stage[J]. *Crops Res*, 2002, 77: 93–98.
- [4] WU F B, ZHANG G P, Dominy P. Four barley genotypes respond differently to cadmium: lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity[J]. *Environ Expri Bot*, 2003, 50: 67–78.
- [5] 孙光闻. 小白菜镉积累及毒害机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- SUN G W. Investigation of physiological mechanisms of cadmium accumulation and toxicity in pakchoi[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [6] 王林, 史衍玺. 蔬菜对镉、铅的吸收累积特征与生理响应研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2005.
- WANG L, SHI Y X. absorption and accumulation characteristics and physiological response of different vegetables to cadmium and lead [D]. Jinan: Shandong Agricultural University, 2005.
- [7] 陈苏, 孙丽娜, 等. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 182–188.
- CHEN S, SUN L N, et al. Influence of potassium fertilizer on the phytoavailability of cadmium[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, 28(1): 182–188.
- [8] Lee B D, Carter B J, Basta N T, et al. Factors influencing heavy metal distribution in six Oklahoma benchmark soils[J]. *Soil Science of America Journal*, 1997, 61(1): 218–223.
- [9] 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: 212–218.
- ZHANG Y L, SHEN Q R, JIANG Y. Effects of organic manure on the amelioration of cadmium polluted soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38: 212–218.
- [10] 何雨帆, 刘宝庆, 吴明文, 等. 腐植酸对小白菜吸收 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25: 84–86.
- HE Y F, LIU B Q, WU M W, et al. Effect of Humus on uptake of cadmium in pakchoi [J]. *Journal of Agro – Environment Science*, 2006, 25: 84–86.
- [11] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2005, 20(4): 539–543.
- DU C Y, ZU Y Q, LI Y. Effect of pH and organic matter on the bioavailability Cd and Zn in soil[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: (Natural Science Edition)*, 2005, 20(4): 539–543.
- [12] 西北农业大学植物生理生化教研组. 植物生理学实验指导[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986: 47–48.
- Research Group of Plant Physiology and Biochemistry of Northwest Agricultural University. Plant physiology laboratory procedure[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Education Publishing House, 1986: 47–48.
- [13] 郝建军. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 183–185.
- HAO J J. Plant physiology experimental technology[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2007: 183–185.
- [14] 食品中镉的测定方法(GB/T 5009.15—2003)[S]. 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会, 2004. 1. 1.
- Determination of cadmium in foods (GB/T 5009.15—2003)[S], Ministry of Health of the People's Republic of China, China National Standardizing Committee, 2004. 1. 1.
- [15] 魏成熙, 张旭. 土壤锌铅镉污染对小白菜硝酸盐含量的影响[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(4): 436–438.
- WEI C X, ZHANG X. Effects of zinc lead and cadmium contamination on nitrate contents in pakchoi[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2005, 27(4): 436–438.
- [16] 孙光闻, 朱祝军, 方学智, 等. 镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 700–703.
- SUN G W, ZHU Z J, FANG X Z, et al. Effect of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of pakchoi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 700–703.
- [17] Somashekaraiah B V, Padmaja K, Prasad A R K. Phytotoxicity of cadmium ions on germinating seedlings of bean (*Phaseolus vulgare*) – involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation[J]. *Physiol Plant*, 1992, 60: 85–89.
- [18] Beszyadd T, Waj da L, Kml M, et al. Photosynthetic activities of cadmium treated tomato plants[J]. *Physiol Plant*, 1980, 48: 365–370.
- [19] 方学智, 朱祝军, 孙光闻. 不同浓度 Cd 对小白菜生长及抗氧化系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 877–880.
- FANG X Z, ZHU Z J, SUN G W, et al. Effects of different concentrations of cadmium on antioxidant system in *Brassica Campestris* ssp. *Chinensis*[J]. *Journal of Agro – Environment Science*, 2004, 23(5): 877–880.
- [20] 张青, 李菊梅, 徐明岗, 等. 改良剂对复合污染红壤中镉锌有效性的影响及机理[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 861–865.
- ZHANG Q, LI J M, XIU M G, et al. Effects of amendments on bioavailability of cadmium and zinc in compound contaminated red soil [J]. *Journal of Agro – Environment Science*, 2006, 25(4): 861–865.
- [21] 徐应明, 林大松, 吕建波, 等. 化学调控作用对 Cd、Pb、Cu 复合污染菜地土壤重金属形态和植物有效的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 326–330.
- XU Y M, LIN D S, LV J B. Effects of organic manure and molecular sieve material on speciation of Cd, Pb and Cu in soil and bioavailability[J]. *Journal of Agro – Environment Science*, 2006, 25(2): 326–330.