

土壤 Cd 污染对青菜和蕹菜生长及 Cd 含量的影响

孙兆海^{1,2}, 郑春荣¹, 周东美¹, 杨林章¹, 陈怀满^{1,3}

(1.中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3.钟山学院环境工程系, 江苏 南京 210049)

摘要:通过温室盆栽试验,研究了草甸棕壤、红壤和灰色石灰土的人为 Cd 污染对青菜和蕹菜生物量和 Cd 含量的影响。结果表明,红壤加入 Cd 浓度为 0.5、1.0、3.0、5.0 mg·kg⁻¹ 时,青菜地上部分的生物量与对照相比分别降低了 13%、15%、25% 和 91%;蕹菜地上部分的生物量在添加 Cd 浓度为 0.5、1.0、3.0 mg·kg⁻¹ 时与对照相比分别增加了 21%、64% 和 81%,而添加浓度为 5.0 和 10.0 mg·kg⁻¹ 时则分别降低了 63% 和 86%;生长于草甸棕壤和灰色石灰土中的蕹菜地上部分的生物量随土壤 Cd 浓度的增加无显著差异。在土壤添加 Cd 浓度相同的条件下,青菜和蕹菜地上部分的 Cd 含量在 3 种土壤中的顺序为:灰色石灰土<草甸棕壤<红壤。在试验条件下,以国家食品卫生标准为依据、以青菜为指示植物计算得到的 3 种土壤 Cd 的表观临界含量分别为:以总 Cd 计算:草甸棕壤为 0.33 mg·kg⁻¹,红壤为 0.066 mg·kg⁻¹,灰色石灰土为 0.70 mg·kg⁻¹;以 DTPA 提取态 Cd 计算:草甸棕壤为 0.13 mg·kg⁻¹,红壤为 0.012 mg·kg⁻¹,灰色石灰土为 0.33 mg·kg⁻¹。

关键词:青菜; 蕹菜; Cd; 土壤污染临界值

中图分类号: X503.231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2005)03-0417-04

Phyto-Toxicity and Uptake of Cadmium by *Brassica chinensis* and *Ipomoea aquatica* in Soils

SUN Zhao-hai^{1,2}, ZHENG Chun-rong¹, ZHOU Dong-mei¹, YANG Lin-zhang¹, CHEN Huai-man^{1,3}

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Department of Environmental Engineering, Zhongshan College, Nanjing 210049, China)

Abstract: Effects of Cd pollution in soil on growth of *Brassica chinensis* and *Ipomoea aquatica* and its uptake by the plants were investigated in three different soils using pot experiments in greenhouse. Compared with control, the aboveground part biomass of *Brassica chinensis* growing in red soil decreased by 13%, 15%, 25% and 91% when added Cd concentrations were 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 mg·kg⁻¹, respectively, while the aboveground part biomass of *Ipomoea aquatica* increased at low added Cd concentration (≤ 3.0 mg·kg⁻¹), then decreased at high added Cd concentration (5.0 and 10.0 mg·kg⁻¹), respectively. However, the aboveground part biomass of *Ipomoea aquatica* did not show significant change with the change of soil Cd concentration where it grew in both meadow brown soil and gray lime soil. It has been found that Cd contents in the aboveground part of *Brassica chinensis* and *Ipomoea aquatica* increased with increasing soil Cd concentration. Furthermore, it was indicated that Cd mobility in red soil was higher than that in meadow brown soil and gray lime soil. Critical levels of Cd based on *Brassica chinensis* and National Critical Food Limit Standard of Cd were given under experimental condition.

Keywords: *Brassica chinensis*; *Ipomoea aquatica*; Cd; critical value of soil pollution

Cd 是毒性最强的重金属元素之一,在自然界普遍存在。Cd 不是植物必需的元素,过量的 Cd 会影响植物的生长,并可在植物体内积累^[1,2],再通过食物链

进入人体,严重危害人体健康。土壤是植物 Cd 的主要来源,近年来由于人类活动导致了一些地区农田土壤受到不同程度的 Cd 污染,粮食和蔬菜的污染问题也逐渐突出^[3-7]。蔬菜是人们不可缺少的副食品,消费量大,因而蔬菜的品质保证和菜地土壤的质量评价应引起人们的足够重视。不同品种和蔬菜对重金属的积累能力不同,一般叶菜类大于根茎类和瓜果类蔬菜^[7,8]。植物对 Cd 的吸收不仅与其种类有关,还受到

收稿日期:2004-09-27

基金项目:国家重点基础发现规划项目(2002CB410808);科技部社会公益研究专项资金项目(2001DIA10022)

作者简介:孙兆海(1978—),男,硕士研究生,主要从事生态与环境保护的研究工作。

联系人:陈怀满 E-mail:hmchen@issas.ac.cn

土壤中 Cd 的含量和土壤基本性质等的明显影响^[9,10]。

本研究通过温室盆栽试验研究了 3 种理化性质不同的人为 Cd 污染土壤对青菜和薤菜生长及吸收 Cd 的影响,计算了 3 种土壤的表观临界含量,可为蔬菜基地的土壤健康质量的保护提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料和盆栽试验

供试土壤为草甸棕壤、红壤和灰色石灰土,分别采自辽宁、湖北和广西,土壤基本性质已如前述^[11]。供试蔬菜品种为青菜(*Brassica chinensis*)(四月慢)、薤菜(*Ipomoea aquatica*)种子由南京市蔬菜研究所提供。

盆栽试验采用塑料盆钵,将土壤自然风干,剔除石块和植物根茎,压碎(<1 cm),混匀,每盆装土 4 kg,加入 N 和 P 肥作底肥,用量均为 0.25 g·kg⁻¹ 土(尿素 0.54 g·kg⁻¹ 土;KH₂PO₄1.10 g·kg⁻¹ 土)。土壤中添加的 Cd 化合物为 CdCl₂·2.5H₂O,添加浓度(以 Cd 计)为:0、0.5、1.0、3.0、5.0、10.0 mg·kg⁻¹ 土,每个处理 3 个重复。先将土壤与肥料(水溶液)混和,一周后与 Cd(CdCl₂ 水溶液)混匀,加水至田间持水量的 60%,放置平衡,平衡期间定期加水维持含水量。平衡一个月后,在每盆中直播 15 粒种子,在出苗整齐、长势良好后定植,根据长势和不同生长期分析的需要分别在播种后 30、48、75 d 取样,每次每盆取相同的株数,取样时轻轻将青菜连根拔起,将地上部分和根系分开;第 3 次取样后每盆还有 3 株青菜,播种后 124 d 收取地上部分,称鲜重(用于计算生物量)。在青菜生长期间追肥一次,每盆加入肥料量为 0.1 gKNO₃ 和 0.1 gKH₂PO₄,用水溶解后洒施。青菜收获一个月后在盆钵中继续种植薤菜,待其出苗整齐、长势良好后定植,生长两个半月收取地上部分,称鲜重。所有植株样品均用去离子水洗净,70 ℃烘干,粉碎,分析 Cd 的含量。

1.2 分析方法

土壤可提取态 Cd 采用 0.005 mol·L⁻¹ DTPA 溶液(pH7.3)提取,植株样品用 HNO₃-HClO₄ 消化,原子吸收分光光度计(Hitachi180-80)测定。其余采用常规方法测定^[12]。

2 结果与讨论

2.1 土壤 Cd 污染对青菜和薤菜生物量的影响

2.1.1 土壤 Cd 污染对青菜生物量的影响

由于土壤性质的差异,3 种土壤 Cd 污染对青菜生物量的影响不同(表 1)。草甸棕壤和灰色石灰土中的青菜没有受害症状,而在红壤中青菜生长受到了明显的抑制,主要症状为植株矮小,叶片发黄、边缘卷曲等,在 Cd 浓度为 0.5、1.0、3.0、5.0 mg·kg⁻¹ 时地上部分的生物量分别比对照降低了 13%、15%、25%和 91%,加入 Cd 浓度为 10 mg·kg⁻¹ 时青菜出芽后干枯死亡。草甸棕壤添加 Cd 对青菜的生长有刺激作用,与对照相比,各处理地上部分的生物量都有所增加,因而从表观上并不能发现 Cd 污染的明显症状,体现了该土壤 Cd 污染的隐蔽性和危害性。灰色石灰土添加 Cd 浓度不高于 5 mg·kg⁻¹ 时青菜地上部分的生物量与对照相比有显著增加,如在加入 Cd 浓度为 0.5 和 5 mg·kg⁻¹ 时地上部分生物量分别增加了 18%和 23%,在加入 Cd 浓度为 10 mg·kg⁻¹ 时与对照无显著差异。

2.1.2 土壤 Cd 污染对薤菜生物量的影响

在草甸棕壤和灰色石灰土中,薤菜在生长过程中没有观察到受害症状,在红壤中添加 Cd 浓度较低(≤3.0 mg·kg⁻¹)时,与对照相比薤菜生长情况更好,而在 Cd 浓度较高(5.0、10.0 mg·kg⁻¹)时,薤菜植株矮小,叶片发黄,生长受到抑制(表 1),如在 Cd 浓度为 0.5、1.0、3.0 mg·kg⁻¹ 时薤菜地上部分的生物量分别比对照增加了 21%、64%和 81%;而在加 Cd 浓度为 5.0 mg·kg⁻¹ 和 10.0 mg·kg⁻¹ 时,薤菜地上部分的生物量显著下降,分别比对照降低了 63%和 86%。随着草甸棕

表 1 土壤中 Cd 对青菜和薤菜地上部分生物量的影响						
Table 1 Effects of Cd in soils on aboveground part biomass of <i>Brassica chinensis</i> and <i>Ipomoea aquatica</i>						
添加 Cd /mg·kg ⁻¹	青菜/g·盆 ⁻¹			薤菜/g·盆 ⁻¹		
	草甸棕壤	红壤	灰色石灰土	草甸棕壤	红壤	灰色石灰土
0	358 b	264 a	366 c	59.2 a	39.5 c	70.3 a
0.5	448 a	229 ab	433 ab	57.5 a	47.6 bc	69.9 a
1.0	371 ab	224 ab	409 b	57.0 a	64.8 ab	70.3 a
3.0	415 ab	199 b	411 b	56.4 a	71.4 a	62.8 a
5.0	400 ab	22.5 c	452 a	56.5 a	14.5 d	57.8 a
10.0	395 ab		357 c	53.4 a	5.37 d	57.6 a

注:表中数据为平均值,生物量以鲜重计;同一列不同处理间字母相同表示无显著性差异,字母不同表示有显著性差异(P<0.05)。

壤和灰色石灰土 Cd 浓度的增加,蕹菜地上部分的生物量有降低的趋势,但统计分析表明处理间无显著性差异。从青菜和蕹菜的生长状况和生物量的比较来看,蕹菜比青菜对 Cd 的耐受能力要强一些。

2.2 土壤 Cd 污染对青菜和蕹菜吸收 Cd 的影响

从图 1 可以看出,随着土壤中 Cd 浓度的增加,青菜地上部分的 Cd 含量有明显的提高,在 3 种土壤中均表现出相同的趋势。已有研究结果表明^[13,14],植物吸收重金属的量与土壤中重金属的污染程度有很大关系,总体表现为污染程度越高,植物吸收量越多。

在相同的处理浓度下,青菜地上部分的 Cd 含量在 3 种土壤中的顺序为:灰色石灰土<草甸棕壤<红壤(图 1),这与土壤的基本理化性质有关。在相同的处理浓度下,红壤中的青菜地上部分的 Cd 含量显著高于草甸棕壤和灰色石灰土,如在添加 Cd 浓度为 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,草甸棕壤和灰色石灰土青菜地上部分 Cd 含量分别为 0.62 和 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而红壤则为 $5.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这是因为草甸棕壤和灰色石灰土的 pH 值明

显高于红壤,pH 的升高会引起土壤吸附 Cd 能力的增强,吸附量增加^[15],Cd 的生物有效性降低。

相同条件下,青菜在不同生长期对 Cd 的积累量不同(图 2)。随着土壤 Cd 浓度的增加,青菜在不同生长期地上部分的 Cd 含量均增加。在灰色石灰土的所有处理中,青菜在 30 d 时地上部分的 Cd 含量最高,124 d 时含量最低。随着生长期的延长,青菜地上部分的 Cd 含量有逐渐降低的趋势,这可能是与青菜后期生长加快而产生了稀释效应有关。在草甸棕壤除对照和土壤添加 Cd 浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外的其余处理中,青菜地上部分的 Cd 含量也是在 30 d 时最高。在红壤中,当加入 Cd 浓度不高于 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地上部分的 Cd 含量 48 d 时最高,然后随生长期延长而下降,这可能是由于红壤 pH 较低,青菜在播种 48 d 时依然生长缓慢,而随后生长速度加快的缘故。H.Lehn 等的研究结果表明,在 Cd 污染土壤中生长的 *Brassica napus* L.napus 的 Cd 含量随着生长期的延长而下降^[14],说明植物的生长期对植物积累 Cd 有重要的影响。

蕹菜的 Cd 含量与青菜表现出的趋势基本相同(图 3),随着 Cd 添加浓度的增加,蕹菜地上部分的 Cd 含量也有所增加;同时亦明显受土壤性质的影响。

2.3 土壤 Cd 表观临界含量的计算

研究表明,随着土壤中添加 Cd 量的增加,DTPA 提取的 Cd 量也随着增加,土壤添加 Cd 与 DTPA 提取 Cd 量有较好的相关性(草甸棕壤 $r=0.999$,红壤 $r=0.997$,灰色石灰土 $r=0.998$, $n=18$)。青菜地上部分的 Cd 含量与土壤总 Cd 和可提取态 Cd 的相关方程如表 2 所示。由此以国家食品卫生标准(蔬菜 Cd 含量 $\leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,鲜重)为依据,以青菜为指示作物,计算出的土壤 Cd 的表观临界含量(表 2)分别为:

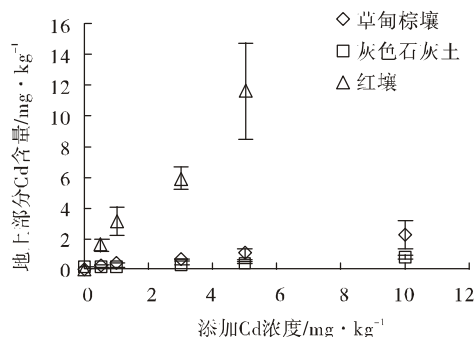


图 1 土壤中 Cd 对青菜地上部分(鲜重)吸收 Cd 的影响

Figure 1 Cd concentration of shoots(FW) of *Brassica chinensis* as affected by addition of Cd in soils

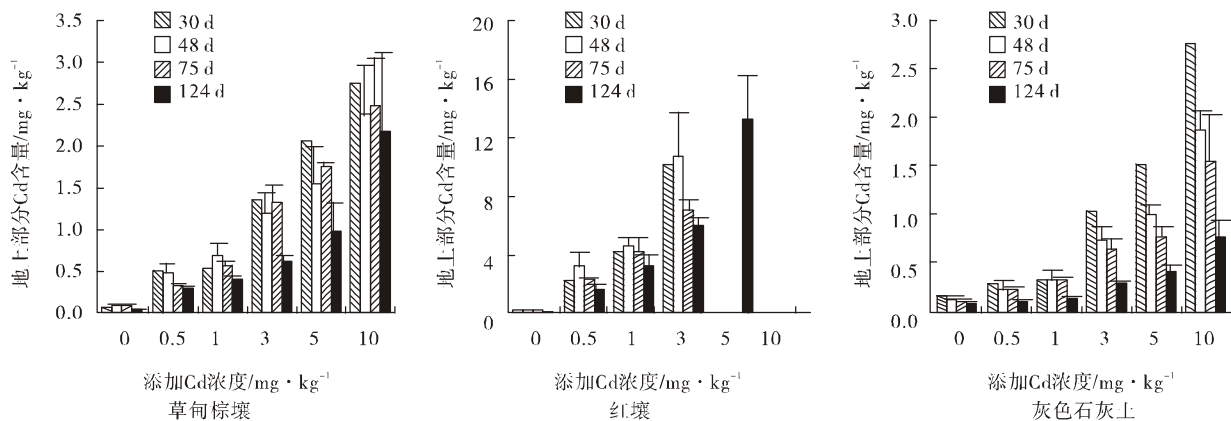


图 2 土壤中 Cd 对青菜不同生长期地上部分(鲜重)吸收 Cd 的影响

Figure 2 Effects of Cd in soils on Cd concentration of shoots of *Brassica chinensis* (FW) in different growth stage

表 2 青菜地上部分的 Cd 含量(鲜重)与土壤 Cd 的关系

Table 2 Relationship between Cd concentrations in shoot of <i>Brassica chinensis</i> (FW) and Cd contents in the tested soils				
项目	土壤	相关方程	<i>r</i>	临界含量/mg·kg ⁻¹
总 Cd	草甸棕壤	lgY= -0.029 26+2.639 3lgx	0.977 4**	0.33
	红壤	lgY= 0.772 9+1.753 8lgx	0.994 0**	0.066
	灰色石灰土	lgY= -1.163 5+0.881 1lgx	0.982 8**	0.70
提取态 Cd	草甸棕壤	lgY= -0.459 1+0.943 0lgx	0.950 9**	0.13
	红壤	Y= -0.188 8x ² +4.198 4x	0.980 5**	0.012
	灰色石灰土	lgY= -0.906 3+0.829 7lgx	0.988 4**	0.33

注:根据 Cd 的蔬菜卫生标准 0.05 mg·kg⁻¹ 计算, ** 表示达到极显著水平(*P*<0.01)。

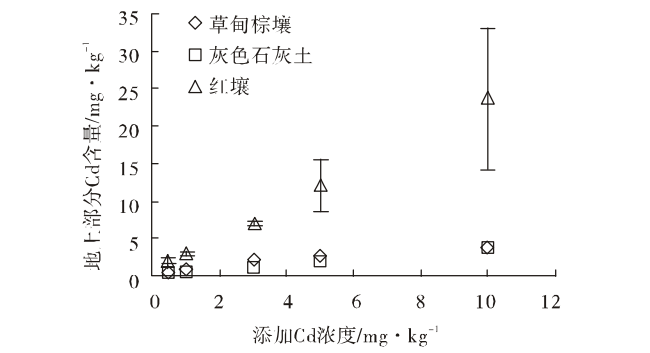


图 3 土壤中 Cd 对薤菜地上部分(鲜重)吸收 Cd 的影响
Figure 3 Cd concentration of shoots of *Ipomoea aquatica* (FW) as affected by addition of Cd in soils

以总 Cd 计算:草甸棕壤 0.33 mg·kg⁻¹,红壤 0.066 mg·kg⁻¹,灰色石灰土 0.70 mg·kg⁻¹;以提取态 Cd 计算:草甸棕壤 0.13 mg·kg⁻¹,红壤 0.012 mg·kg⁻¹,灰色石灰土 0.33 mg·kg⁻¹。

3 小结

(1)随着 Cd 污染程度的增加,在红壤中青菜地上部分的生物量显著降低,在加入 Cd 浓度为 0.5、1.0、3.0、5.0 mg·kg⁻¹ 时,青菜地上部分的生物量分别比对照降低了 13%、15%、25%和 91%;薤菜地上部分的生物量在加入低浓度 Cd(≤3.0 mg·kg⁻¹)时增加,在 Cd 浓度为 5.0 和 10.0 mg·kg⁻¹ 时显著下降,分别比对照降低了 63%和 86%。薤菜地上部分的生物量随草甸棕壤和灰色石灰土 Cd 含量的增加差异不显著。

(2)青菜和薤菜地上部分的 Cd 含量随着土壤 Cd 浓度的增加而增加。在土壤添加 Cd 相同浓度的条件下,青菜和薤菜地上部分的 Cd 含量在 3 种土壤中的顺序为:灰色石灰土<草甸棕壤<红壤。

(3)在试验条件下,以国家食品卫生标准为依据、以青菜为指示植物所计算出的土壤 Cd 的表观临界含量分别为:以总 Cd 计算:草甸棕壤为 0.33 mg·kg⁻¹,红壤为 0.066 mg·kg⁻¹,灰色石灰土为 0.70 mg·kg⁻¹;以

DTPA 提取态 Cd 计算:草甸棕壤为 0.13 mg·kg⁻¹,红壤为 0.012 mg·kg⁻¹,灰色石灰土为 0.33 mg·kg⁻¹。

参考文献:

[1] Zdzislaw Ciecko, Mirosław Wyszowski, Władysław Krajewski, et al. Effect of organic and liming on the reduction cadmium uptake from soil by triticale and spring oilseed rape[J]. *The Science of the Total Environment*, 2001,281:37-45.

[2] ZWARICH M A, MILLS J G. Heavy metal accumulation by some vegetable crops grown on sewage-sludge-amended soils[J]. *Can J Soil Sci*, 1982, 62:243-247.

[3] 周建利,陈同斌. 我国城郊菜地土壤和蔬菜重金属研究现状与展望[J].*湖北农学院学报*,2002,22(5):476-480.

[4] 许炼烽,郝兴仁,冯显湘. 城市蔬菜的重金属污染及其对策[J]. *生态科学*,2000,19(1):80-85.

[5] 赵锁劳,段 敏,马往校,等. 西安市蔬菜中重金属污染调查研究[J]. *水土保持学报*,2002,16(4):112-115.

[6] 胡勤海,叶兆杰. 蔬菜主要污染问题[J]. *农村生态环境*,1995,11(3):52-56.

[7] 王丽凤,白俊贵. 沈阳市蔬菜污染调查及防治途径研究[J]. *农业环境保护*,1994,13(2):84-88.

[8] 祖艳群,李 元,陈海燕,等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*,2003,22(3):289-292.

[9] 宋书巧,吴 欢,黄胜勇. 重金属在土壤-农作物系统中的迁移转化规律研究[J]. *广西师院学报(自然科学版)*,1999,16(4):87-92.

[10] 陈怀满,等. 土壤—植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版社,1996.

[11] 郑春荣,孙兆海,周东美,等. 土壤 Pb Cd 污染的植物效应(1)—Pb 污染对水稻生长和 Pb 含量的影响[J]. *农业环境科学学报*,2004,23(3):417-421.

[12] 中国土壤学会.土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[13] X XIAN. Effect of chemical forms of cadmium, zinc, and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants [J]. *Plant and Soil*, 1989, 113:257-264.

[14] Lehn H, Bopp M. Prediction of heavy-metal concentration in mature plants by chemical analysis of seedlings [J]. *Plant and Soil*, 1987, 101:9-14.

[15] 廖 敏,黄昌勇,谢正苗. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. *环境科学学报*,1999,19(1):81-86.