

不同种类蔬菜苗期对镉的敏感性研究

刘传娟, 刘凤枝, 蔡彦明, 王 玲, 沃 飞, 刘 申

(农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要:产地环境中镉(Cd)对蔬菜的影响主要表现为蔬菜可食部分超标,高浓度时影响其生长发育,基于评述蔬菜幼苗对 Cd 的敏感性是按其对 Cd 的吸收累积量来排序,累积 Cd 量越高定义为该蔬菜幼苗对 Cd 越敏感,采用水培方法,探讨了 Cd 对小白菜(叶菜)、黄瓜、豇豆(果菜)和萝卜(根菜)幼苗吸收累积量及生长发育的影响。结果表明,蔬菜幼苗根和茎叶中累积 Cd 量均随 Cd 处理浓度的增加而显著增加($P<0.05$)。同一处理浓度下根中 Cd 含量远高于茎叶中 Cd 含量,根和茎叶对 Cd 的累积强弱顺序也即蔬菜苗期对 Cd 的敏感性排序为小白菜>萝卜>黄瓜>豇豆;随 Cd 浓度增加,叶片中叶绿素含量降低,过氧化氢酶(CAT)含量升高;蔬菜出苗率、幼苗根长、植株鲜重显著降低。

关键词:镉;蔬菜;苗期;敏感性

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)09-1789-06

Sensitivity of Different Vegetable Seedlings to Cadmium

LIU Chuan-juan, LIU Feng-zhi, CAI Yan-ming, WANG Ling, WO Fei, LIU Shen

(Institute of Agro-environmental Protection, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Excessive accumulation of cadmium (Cd) in agricultural soil can influence growth and development of vegetables. On the basis of the amount of Cd uptake and accumulation, this paper evaluated the sensitivity of vegetable seedlings to Cd. The higher cumulative amount of Cd in the vegetable seedlings, the more sensitivity of vegetables to Cd. A hydroponic experiment was carried out to investigate the influences of Cd on different vegetables seedlings (leafy vegetables; Chinese cabbage; fruit vegetables; cucumber, cowpea; root vegetables; radish). The results showed that, in all roots and shoots of vegetable seedlings, Cd contents was significantly increasing ($P<0.05$) with increasing concentration of Cd, and at the same concentration, Cd was easily absorbed and accumulated in roots than in shoots. For the roots and shoots of these tested vegetables, Cd enrichment capacity in increasing order was Chinese cabbage>radish>cucumber>cowpea. This indicated that Chinese cabbage was most sensitive to Cd among studied vegetables. Correspondingly, cowpea had been affected the most. Its seedling root length decreased significantly compared to comparison at Cd concentration of $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; when Cd concentration was $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, plant fresh weights were significantly lower; when Cd concentration was $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, there was a significant reduction of vegetable emergent seedling rates and roots could not normally grow. For four tested vegetables, as Cd concentration increased, catalase contents (CAT) increased and chlorophyll contents decreased; vegetable emergent seedling rates, seedling root lengths and plant fresh weights decreased significantly.

Keywords: cadmium; vegetables; seedling at nursery stage; sensitivity

镉(Cd)是重金属中污染最普遍、蔬菜最敏感的元素之一,产地受 Cd 污染后,不仅影响其安全质量,

而且污染严重时还影响产量。目前国内外对蔬菜 Cd 污染的研究较多,如 Cd 对蔬菜生长发育^[1]、吸收累积^[2-3]、生理生化特性^[4-6]等方面的影响均有大量报道。研究表明,Cd 对作物的危害受外界温度、Cd 浓度、作用部位等众多因素影响^[7-9],不同种类蔬菜对 Cd 迁移、累积存在较大差异^[10-12]。此外农产品中重金属的残留问题、重金属沿食物链向生物体可食部位的迁移问题以及重金属污染与疾病发生相关性等方面的研究也相当活跃。

但对同一试验条件下多种蔬菜类别(叶菜类、根

收稿日期:2008-12-29

基金项目:国家科技攻关计划课题(2002BA906A76);国家社会公益研究专项(2001DIA10022);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(农业部环境保护科研监测所);国家“十一五”科技支撑计划(2006BAJ10B01)

作者简介:刘传娟(1982—),女,山东平阴县人,生态学在读硕士,主要从事农产品产地监测与评价方面的研究。

E-mail:liuchuanjuan@163.com

通讯作者:刘凤枝 E-mail:liufengzhi@cae.org.cn

茎类和瓜果类等)的系统性对比研究较少,本文通过对 4 种不同蔬菜的水培试验,探讨 Cd 对其幼苗吸收累积和生长发育的影响,并按对 Cd 累积量的多少进行敏感性排序,同一条件下吸收累积 Cd 量越多定义为该蔬菜对 Cd 越敏感,旨在找出不同种类蔬菜苗期对 Cd 的敏感性差异,从而推断 Cd 对不同种类蔬菜安全质量的影响程度,为农产品产地种植结构调整提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 Cd 标准溶液

1 000 mg·L⁻¹, 光谱纯镉粉用少许高纯硝酸水浴溶解配制。

1.1.2 蔬菜种子

小白菜(*Brassica chinensis* L.早熟五号)、黄瓜(*Cucumis sativus* L.神农春四)、豇豆(*Vigna unguiculata* L.科选特长)和萝卜(*Rhaphanus sativas* L.卫青萝卜)。选择小白菜、萝卜、黄瓜和豇豆作为叶菜、根菜和果菜的代表作物,也是各地广泛种植的大宗作物,具有一定的实际应用价值。

1.1.3 自来水

晾晒 24 h 后自来水有关成分测定结果见表 1。

1.2 试验设计

本试验设 5 个 Cd 浓度梯度(0.01、0.1、1.0、5.0、10.0 mg·L⁻¹),各 5 个平行。用自来水作为对照(CK),水培器皿为 400 mL 烧杯,烧杯口以纱布作支撑,挑选饱满健壮的种子播种在纱布上,每杯播 25 粒,14 d 后收获。日间温度 20~25 ℃,湿度 87%~95%;夜间温度 16~20 ℃,湿度 81%~89%。

播种后从第 2 d 开始每 24 h 补加一次同等浓度的 Cd 溶液约 10 mL,观察出苗及生长情况,填写相关记录表格。萌发期间因种子内贮藏有丰富的养料,一般不吸收矿质元素;幼苗对矿质元素的需要量也很少^[13],因此未添加营养液。

1.3 测定指标及分析方法

1.3.1 出苗率

参见《常用农业计算方法》^[14]。

1.3.2 根长

分别测量经 14 d 培养后不同 Cd 浓度下各蔬菜幼苗的主根长,取平均值。

1.3.3 植株鲜重

将经 14 d 培养后不同 Cd 浓度下的各蔬菜幼苗称重。

1.3.4 叶绿素和过氧化氢酶

参见《植物生理学实验指导》^[15]。

1.3.5 根和茎叶累积 Cd 量

将根和茎叶自然风干磨碎,密闭微波消解后,用 ICP-MS 测定其中 Cd 含量。

1.3.6 统计分析方法

试验数据用统计分析软件 DPS v7.05 进行分析,考虑 95%的置信水平,应用最小显著差异法(LSD)对不同浓度进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 Cd 对蔬菜幼苗吸收累积量及生理指标的影响

2.1.1 蔬菜幼苗根和茎叶中 Cd 含量(均以干重计)

由于实际生产中产地环境 Cd 浓度较低,在考察蔬菜幼苗对 Cd 的吸收累积作用时 Cd 浓度设定到 1.0 mg·L⁻¹。不同种类蔬菜幼苗根和茎叶中 Cd 含量分别见表 2 和表 3。

表 2 蔬菜幼苗根中 Cd 含量

Table 2 Cd contents in roots of tested vegetable seedlings with

different concentrations

Cd 浓度/mg·L ⁻¹	CK	0.01	0.1	1.0
小白菜	39.54	112.04	380.09	2 638.18
根中 Cd 含量/ mg·kg ⁻¹				
黄瓜	15.20	80.73	198.06	1 199.37
豇豆	12.86	39.19	202.29	703.88
萝卜	41.48	109.97	395.29	1 545.58

表 3 蔬菜幼苗茎叶中 Cd 含量

Table 3 Cd contents in shoots of tested vegetable seedlings with

different concentrations

Cd 浓度/mg·L ⁻¹	CK	0.01	0.1	1.0
小白菜	0.01	0.1	1.0	5.9
茎叶中 Cd 含 量/mg·kg ⁻¹				
黄瓜	17.15	98.59	545.92	3.29
豇豆	12.36	28.56	172.84	1.65
萝卜	3.83	6.65	38.72	4.92

表 1 自来水中相关成分测定值

Table 1 Components in tap water after laying in the air for 24 h

pH	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	K ⁺ /mg·L ⁻¹	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	Na ⁺ /mg·L ⁻¹	Cu ²⁺ /μg·L ⁻¹	Zn ²⁺ /μg·L ⁻¹	Pb ²⁺ /μg·L ⁻¹	Cd ²⁺ /μg·L ⁻¹	As ³⁺ /μg·L ⁻¹	Cr ⁶⁺ /μg·L ⁻¹	Ni ²⁺ /μg·L ⁻¹
7.15	1.83	0.17	5.49	57.03	21.39	28.22	2.33	664.9	4.27	0.25	0.91	4.81	1.13

从表2和表3可以看出,蔬菜根和茎叶Cd含量均随Cd处理浓度的增加而显著增加($P<0.05$),二者呈显著正相关线性关系,相关系数均大于0.98,且同一处理水平下根中Cd含量远高于茎叶中Cd含量,Jerome Perriguet 等^[3]的研究得出同样结论。表明蔬菜对Cd有很强的累积作用,且根的累积能力远大于茎叶,如Cd浓度为 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,4种蔬菜根中Cd含量是茎叶中的3.86~30.42倍。因此对某一种蔬菜而言,环境中Cd含量是决定蔬菜体内Cd含量的重要因素。

从上表还可以看出,在Cd浓度相同的情况下,不同蔬菜种类体内Cd含量存在较大差异。小白菜体内的Cd含量最高,萝卜体内的Cd含量与之接近,当溶液中Cd浓度在 $0.01\sim 1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,小白菜根中Cd的含量分别是黄瓜和豇豆最高含量的1.39~2.20倍,最低含量的1.92~3.75倍,小白菜茎叶中Cd的含量分别是黄瓜和豇豆最高含量的1.39~3.45倍,最低含量的4.48~14.83倍。因此,4种蔬菜中,小白菜和萝卜对Cd有较强的累积能力。

蔬菜根和茎叶对Cd的累积强弱顺序均为小白菜>萝卜>黄瓜>豇豆,也就是说,小白菜对Cd最敏感,其次是萝卜,然后是黄瓜和豇豆。

2.1.2 对叶绿素的影响

叶绿素在将光能转变成化学能并贮存在有机物中的过程起重要作用,作物受重金属危害后,叶绿素含量降低,表现为植株叶片出现退绿现象。4种供试蔬菜中,Cd对豇豆幼苗叶绿素影响最大,不同处理水平下Cd对豇豆叶片叶绿素的影响趋势见图1。

由图1可见,豇豆叶绿素含量在Cd浓度低于 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时略有增加,高于该浓度时则显著降低。

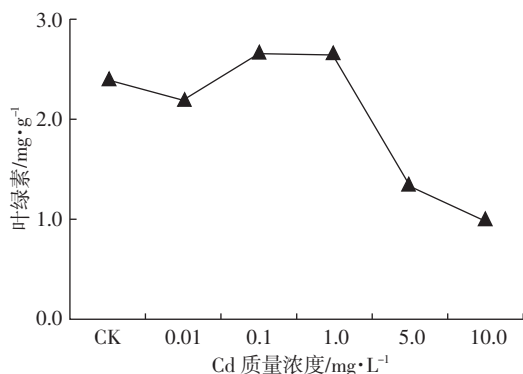


图1 Cd对豇豆叶绿素的影响

Figure 1 Effects of different Cd concentrations on chlorophyll of cowpea

Yasemin Ekmekci 等^[4]在Cd对玉米光合作用的研究中得出同样结论,这可能与Cd取代了叶片中 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 等元素,破坏了叶绿体微结构有关^[16]。

2.1.3 对过氧化氢酶(CAT)活性的影响

过氧化氢酶是生物防御体系的关键酶之一,能有效清除生物体内的 H_2O_2 对生物分子的氧化作用^[11],可反映某一时期植物体内代谢的变化。不同处理水平下,供试蔬菜幼苗CAT活性变化最大的是小白菜,Cd对小白菜CAT的影响见图2。

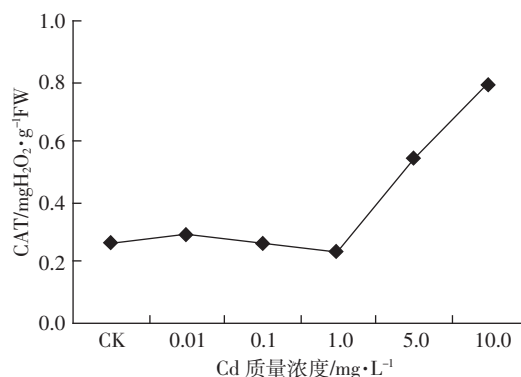


图2 Cd对小白菜CAT的影响

Figure 2 Effects of different Cd concentrations on CAT of Chinese cabbage

由图2可见,当Cd处理浓度高于 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,小白菜叶片中CAT活性随着Cd处理浓度的增加而显著增加,表明小白菜受到了Cd胁迫,引起了其活性氧物质的升高。这与刘可慧等^[17]的结果一致。 $10.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时,小白菜叶片中CAT活性约是对照的5倍,说明随处理浓度的增加,Cd向蔬菜叶片中的迁移累积量在增加,植物体正常生长受到影响,从而启动自身保护机制,以减轻受Cd的危害。

2.2 Cd对蔬菜幼苗生长发育的影响

种子出苗及幼苗生长期是作物生长发育的最脆弱时期,也是最关键时期^[18],因此用出苗率及幼苗生长发育受Cd危害的程度可推断Cd对蔬菜产量的影响。

2.2.1 播种14 d后蔬菜幼苗的生长情况

有研究表明, $0.01\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (相当于 $1.124\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的Cd对发芽、株高、生物量等略有促进作用^[12],本试验中在Cd浓度为0.01或 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时与对照相比,对蔬菜生长略有促进作用。但随着Cd处理浓度的增加及处理时间延长,蔬菜生长受到抑制,Cd浓度高于 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时蔬菜幼苗株高和根长均显著降低,根系发育受阻,根尖发褐发黑,侧根和根毛数减少;蔬菜叶缘轻度褪绿萎蔫、出现黄色斑点,甚至幼苗死亡,豇豆

和小白菜死亡数较多。播种 14 d 后蔬菜幼苗的生长情况见图 3。

2.2.2 对出苗率的影响

在本试验设定的 0.01~10.0 mg·L⁻¹Cd 浓度范围内,Cd 对小白菜、黄瓜和萝卜出苗率均略有促进作用,但当 Cd 浓度高于 5.0 mg·L⁻¹时对豇豆出苗表现为抑制作用,豇豆出苗率比对照低 10.0%,10.0 mg·L⁻¹时豇豆出苗率比对照低 14.8%(表 4)。说明 Cd 对豇

豆的萌发及正常出苗有危害,Cd 浓度达 5.0 mg·L⁻¹时即显著抑制了其出苗。

2.2.3 对根长的影响

Cd 对蔬菜的危害首先作用在根部,因为在种子萌发时胚根最先接触到溶液,在累积量和作用时间上均大于芽,Cd 对 4 种供试蔬菜的根长均有明显影响。由表 5 可见,小白菜和黄瓜在各 Cd 浓度下的根长均比对照减少,且随 Cd 浓度增加减少幅度增大,当 Cd

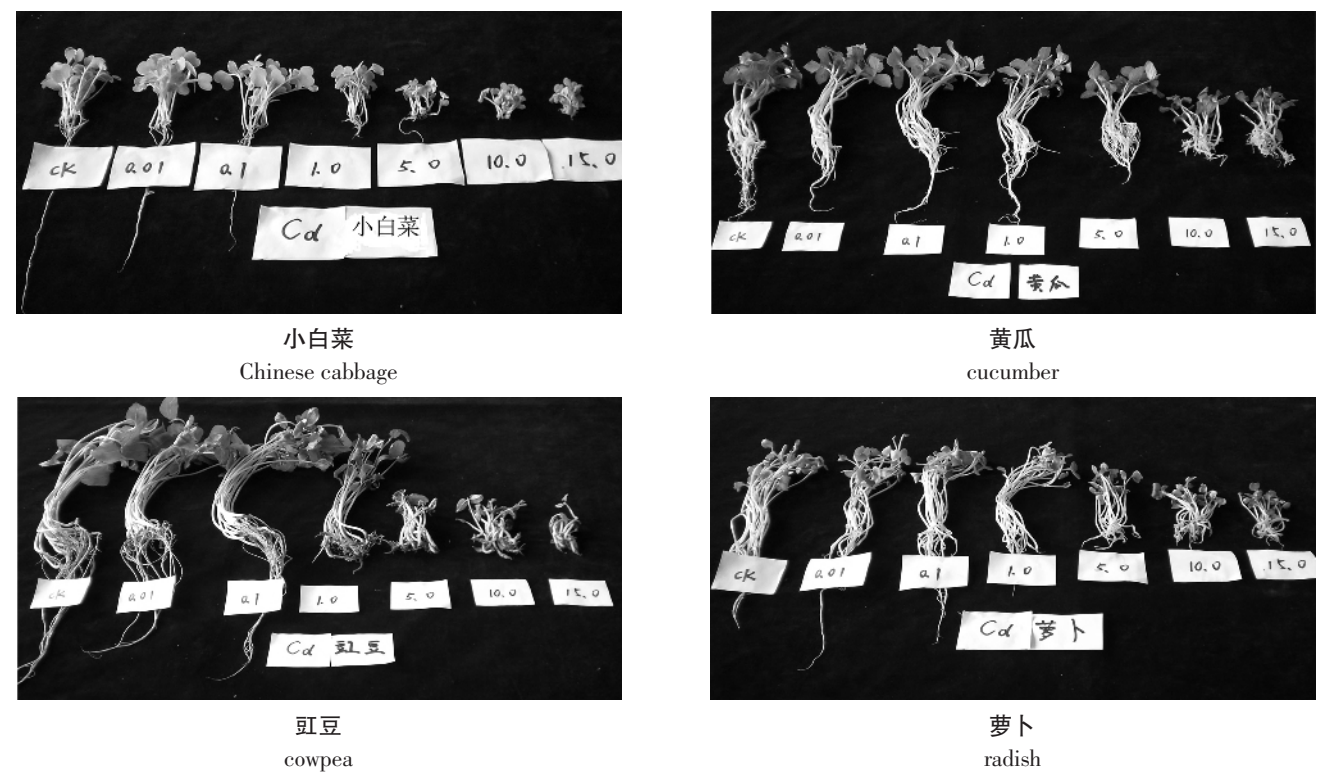


图 3 播种 14 d 后 Cd 各浓度下的蔬菜幼苗
Figure 3 Vegetable seedlings growing for 14 days with different concentrations of Cd

表 4 Cd 对出苗率的影响

Table 4 Effects of different concentrations of Cd on emergent seedling rates							
Cd 浓度/mg·L ⁻¹		CK	0.01	0.1	1.0	5.0	10.0
出苗率/%	小白菜	98.67±2.31a	98.67±2.31a	100±0.00a	100±0.01a	100±0.02a	100±0.03a
	黄瓜	71.67±2.89a	73.33±5.77a	83.33±2.89a	71.67±10.41a	76.67±10.41a	76.67±15.28a
	豇豆	96.67±0.00a	96.67±4.04ab	96.67±0.00a	96.67±0.00a	87±0.00bc	82.33±13.61c
	萝卜	80±10.8ab	86.25±8.54a	83.75±9.46a	81.25±14.93b	80.00±5.77ab	80.00±7.07ab

注:表中数据为平均值±标准差,数据后的不同字母表明具有显著性差异(P<0.05),下同。

表 5 Cd 对根长的影响

Table 5 Effects of different concentrations of Cd on roots length							
Cd 浓度/mg·L ⁻¹		CK	0.01	0.1	1.0	5.0	10.0
根长/cm	小白菜	8.06±1.78a	7.78±2.22a	6.14±1.47b	2.34±0.92cd	1.79±0.72d	1.68±0.89d
	黄瓜	12.89±3.18a	9.67±2.64bc	11.06±3.61b	7.99±2.77c	5.29±2.58d	2.01±0.62e
	豇豆	20.77±3.24b	20.57±3.74b	22.98±1.85a	1.94±0.94c	—	—
	萝卜	11.73±4.52a	12.19±4.01a	11.86±3.30a	7.66±2.63b	4.53±1.59c	5.49±1.75c

浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,小白菜根长比对照减少 71.0%,黄瓜根长比对照减少 38.0%;当 Cd 浓度为 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,小白菜根长比对照减少 79.2%,黄瓜根长比对照减少 84.4%。

Cd 浓度低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对豇豆和萝卜根的生长有促进作用,当 Cd 浓度高于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对其则有显著抑制作用。豇豆在 Cd 浓度 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时根长比对照减少 90.66%,当 Cd 浓度高于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时根不能正常生长;萝卜在 Cd 浓度 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时根长比对照减少 34.7%,在 Cd 浓度为 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时根长比对照减少 61.4%。

因蔬菜种类和 Cd 浓度不同,蔬菜根长受到的影响差异较大。其中豇豆根的生长受 Cd 危害最大,由前面分析可知,Cd 浓度高于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,不仅叶绿素含量显著减少(图 1),出苗率显著降低(表 4),而且出苗后根也无法正常生长。

2.2.4 对植株鲜重的影响

植株鲜重同出苗率、根长一样,也是植物体生长发育的关键指标之一,Cd 对蔬菜幼苗植株鲜重的影响见表 6。

表 6 Cd 对蔬菜幼苗植株鲜重的影响

Table 6 Effects of different concentrations of Cd on fresh weights

Cd 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	CK	0.01	0.1	1.0	5.0	10.0
小白菜	2.51	2.50	1.91	1.31	1.30	1.38
植株鲜重/g						
黄瓜	13.3	12.08	12.17	11.11	9.22	5.58
豇豆	17.44	16.74	16.92	9.75	8.29	8.88
萝卜	6.84	7.86	7.62	7.16	6.41	6.01

由表 6 可见,Cd 对蔬菜植株鲜重有明显影响,影响的大小则因 Cd 浓度的不同而有很大差异。小白菜、黄瓜、豇豆在各水平下的植株鲜重均比对照低,随 Cd 浓度增大植株鲜重减少的幅度增加, $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时小白菜植株鲜重比对照减少 45.0%,黄瓜植株鲜重比对照减少 58.0%,豇豆植株鲜重比对照减少 49.0%。但萝卜例外,Cd 浓度低于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对其幼苗生长发育有促进作用,Cd 浓度为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时萝卜植株鲜重比对照增加 14.9%,但当 Cd 浓度为高于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对其鲜重略有抑制,Cd 浓度为 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时萝卜幼苗鲜重比对照低 12.1%。

3 结论

(1)蔬菜幼苗对 Cd 有很强的吸收累积作用,且根的累积作用远大于茎叶,根和茎叶对 Cd 的累积强

弱顺序均为小白菜>萝卜>黄瓜>豇豆,同时考虑食品安全将是限制蔬菜生产的主要因素,因此供试蔬菜幼苗对 Cd 的敏感性排序为小白菜>萝卜>黄瓜>豇豆。

(2)随 Cd 质量浓度增大及处理时间延长,植株叶片叶绿素降低,蔬菜叶片轻度褪绿直至萎蔫,根部变褐变黄,豇豆和小白菜幼苗存活率下降。但 CAT 活性逐渐升高,说明随处理浓度的增加,蔬菜幼苗受到危害增大,从而启动自身保护机制,减轻受 Cd 的危害。

(3)4 种供试蔬菜幼苗的生长发育在 Cd 胁迫下受到不同程度的影响,豇豆受到的影响最大,其幼苗根长在 Cd 质量浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时比对照显著降低, $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时植株鲜重显著降低, $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出苗率显著降低,并且根无法正常生长。

参考文献:

- [1] 徐明岗,纳明亮,张建新,等.红壤中 Cu、Zn、Pb 污染对蔬菜根伸长的抑制效应[J].中国环境科学,2008,28(2):153-157.
XU Ming-gang, NA Ming-liang, ZHANG Jian-xin, et al. Inhibition effects of Cu, Zn and Pb on vegetable root elongation in contaminated red soil[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(2):153-157.
- [2] 孙兆海,郑春荣,周东美,等.土壤 Cd 污染对青菜和蕹菜生长及 Cd 含量的影响[J].农业环境科学学报,2005,24(3):417-420.
SUN Zhao-hai, ZHENG Chun-rong, ZHOU Dong-mei, et al. Phytotoxicity and uptake of cadmium by brassica chinensis and ipomoea aquatica in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3):417-420.
- [3] Jerome Perriguy, Thibault Sterckeman, Jean-Louis Morel. Effect of rhizosphere and plant-related factors on the cadmium uptake by maize (*Zea mays* L.)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63:333-341.
- [4] Yasemin Ekmekci, Deniz Tanyolac, Beycan Ayhan. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165:600-611.
- [5] 任安芝,高玉葆,刘爽.铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响[J].应用与环境生物学报,2000,6(2):112-116.
REN An-zhi, GAO Yu-bao, LIU Shuang. Effect of Cr, Cd and Pb on free proline content etc in leaves of *Brassica chinensis* L.[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2000, 6(2):112-116.
- [6] 秦天才,吴玉树,王焕校,等.镉、铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究[J].生态学报,1998,18(3):321-325.
QIN Tian-cai, WU Yu-shu, WANG Huan-xiao, et al. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica chinensis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(3):321-325.
- [7] Valentine K Mubiana, Ronny Blust. Effects of temperature on scope for growth and accumulation of Cd, Co, Cu and Pb by the marine bivalve *Mytilus edulis*[J]. *Marine Environmental Research*, 2007, 63:219-235.
- [8] Qin SUN, Xiao-Rong WANG, Shi-Ming DING, et al. Effects of interac-

- tion between cadmium and plumbum on phytochelatins and glutathione production in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(4):435-442.
- [9] Uslu G, Dursun A Y, Ekiz H I, et al. The effect of Cd (II), Pb (II) and Cu (II) ions on the growth and bioaccumulation properties of *Rhizopus arrhizus*[J]. *Process Biochemistry*, 2003, 39:105-110.
- [10] John M K, et al. Differential effects of cadmium on lettuce varieties[J]. *Environment Pollution*, 1976, 10:163-173.
- [11] 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, 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, 4:571-576.
- [12] WU Fei-bo, DONG Jing, JIA Guo-xia, et al. Genotypic difference in the responses of seedling growth and Cd toxicity in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2006, 5(1):68-76.
- [13] 王 忠. 植物生理学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
WANG Zhong. Plant physiology[M]. Beijing:Chinese Agriculture Press, 2000.
- [14] 李贵斌, 刁荣生. 常用农业计算方法[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 1977.
LI Gui-bin, DIAO Rong-sheng. Traditional calculation methods of agriculture[M]. Guiyang:Guizhou People's Publishing House, 1977.
- [15] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 第2版. 广州:华南理工大学出版社, 2006.
CHEN Jian-xun, WANG Xiao-feng. The guidance of plant physiology experiments[M]. 2nd Version. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.
- [16] PENG L, PARDEE A B. Differential display of eukaryotic messenger RNA by means of the polymerase chain reaction[J]. *Science*, 1992, 257:967-971.
- [17] 刘可慧, 于方明, 李明顺, 等. 镉胁迫对小白菜(*Brassica campestris* L.) 抗氧化机理的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(4):1466-1470.
LIU Ke-hui, YU Fang-ming, LI Ming-shun, et al. Responses and resistance mechanism of *Brassica campestris* L. to cadmium stress[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4):1466-1470.
- [18] 蒋高明. 植物生理生态学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
JIANG Gao-ming. Plant physiological ecology[M]. Beijing:Higher Education Press, 2004.