

低浓度镉对小白菜生长 及营养元素吸收积累的影响

张菊平¹, 崔文朋¹, 焦新菊¹, 张巧珍²

(1. 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003; 2. 巩义市大峪沟镇政府 农技站, 河南 巩义 451271)

摘要: 用水培模拟轻度重金属污染土壤, 研究低浓度 Cd ($5 \mu\text{mol/L}$) 对 10 个品种小白菜生长及营养元素吸收积累的影响。结果表明, 低浓度 Cd 对耐性强的品种的生长有促进作用, 对耐性差的品种的生长有抑制作用。 $5 \mu\text{mol/L}$ Cd 促进小白菜根系对 Ca、Mg 的吸收, 但抑制 Ca、Mg 向地上部转运; 小白菜地上部 Ca、Mg、Mn、Zn、Cu 含量受到 Cd 的抑制, 且抑制程度存在品种差异。小白菜根部 Fe、Zn 含量受到不同程度的抑制。不同品种小白菜地上部和根部的镉含量存在差异, 其中日本华冠火青菜地上部镉含量较低, 耐性指数较高; 大头·沪王青、抗热 605 两个品种地上部镉含量也较低, 但地上部生长量受到抑制较大, 不利于生产。

关键词: 低浓度镉; 小白菜; 营养元素; 镉积累

中图分类号: S643.1; X592 文献标志码: A 文章编号: 1000 - 2286(2011)01 - 0022 - 07

Effect of Low Concentration Cadmium on the Growth and Accumulation of Nutrient Elements in Pakchoi

ZHANG Ju-ping¹, CUI Wen-peng¹, JIAO Xin-ju¹, ZHANG Qiao-zhen²

(1. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003 China; 2. Agricultural Technology Station of Dayugou Town Government, Gongyi 451271, China)

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to investigate the effect of low level Cd on the growth and accumulation of nutrient elements in pakchoi cultivars with different Cd tolerance. The results indicated that low concentration Cd stimulated the growth of high-tolerant cultivars but inhibited that of low-tolerant ones. $5 \mu\text{mol/L}$ Cd enhanced the accumulation of Ca and Mg in the roots, but inhibited the transport of them to the shoots. Cd inhibited the accumulation of Ca, Mg, Mn, Zn and Cu in the shoots, and the inhibition degree differed among different cultivars. The contents of Fe and Zn were subject to inhibition in different degrees in the roots. The cadmium content of pakchoi varied in different cultivars, among them Huaguanhuoqingcai had a lower Cd content in the shoots and showed a higher Cd tolerance index. The two cultivars Datou·huwangqing and Kangre 605 had lower cadmium content in the shoots, but the growth of the shoots was inhibited greatly, which was detrimental to production.

Key words: low concentration cadmium; pakchoi; nutrient elements; cadmium accumulation

重金属镉是蔬菜污染的主要种类之一, 它通过抑制蔬菜植物细胞分裂和伸长, 刺激和抑制一些酶活性, 影响其组织蛋白质合成, 降低光合作用, 伤害细胞膜系统, 从而影响蔬菜生长发育^[1-2]。Cd 具有较

收稿日期: 2010 - 09 - 09 修回日期: 2010 - 12 - 01

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD01A7) 和河南科技大学博士科研启动基金项目(09001217)

作者简介: 张菊平(1968—) 女 副教授 博士 主要从事蔬菜遗传育种与生物技术研究 E-mail: jupingzhang@163.com。

高的生物有效性,易在蔬菜中累积,威胁人类健康^[3-4]。因此,筛选 Cd 低积累蔬菜品种显得较为重要和迫切。已有研究表明,不同基因型小白菜^[5]、甘蓝^[6]、菠菜^[7]、茼蒿、四季豆^[7]等蔬菜对镉吸收存在较大差异,其他种类蔬菜对镉吸收也可能存在差异,可作为筛选镉低积累蔬菜品种的依据^[8]。原产我国的普通白菜(不结球白菜)(*Brassica chinensis*)又称小白菜、青菜,属于十字花科芸薹属芸薹种小白菜亚种,品种众多,在蔬菜周年供应中占有重要地位^[5],为筛选镉低积累小白菜品种奠定了基础。本文用水培模拟轻度重金属污染土壤,研究 Cd 对 10 个小白菜品种苗期生长和营养元素吸收积累的影响,明确 Cd 胁迫下小白菜对 Ca、Mg、Zn、Fe、Cu、Mn 等矿质元素的吸收的差异,为筛选镉低积累小白菜品种筛选及轻度污染土壤蔬菜栽培提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料 10 个小白菜品种的种子均购于洛阳关林农贸市场。名称与编号如表 1 所示。营养液采用常用的 Hoagland 配方;处理所用试剂为分析纯氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)。

1.2 方法

1.2.1 小白菜的培育和镉胁迫 分别取 10 个品种饱满一致的种子,用 10 g/L NaCl 消毒 10 min,然后用蒸馏水清洗干净后浸泡 2 h。把充分吸胀后的种子用干净的湿纱布包好,放在瓷盘中置 25 °C 恒温培养箱内催芽。将露白的种子播种在装有营养土($W_{\text{蛭石}}:W_{\text{珍珠岩}}:W_{\text{草炭}}=1:1:1$)的穴盘中,每穴 1 株进行培养。15 d 后挑选各品种大小均匀一致的幼苗从穴盘中移出,小心用自来水将根部冲洗干净,放入 1/2 改良 Hoagland 营养液中预培养 2 d 后转移到含有 0 mg/L、0.562 mg/L (5 $\mu\text{mol/L}$) 重金属 Cd^{2+} 的新鲜 1/2 Hoagland 培养液中 2 d 换 1 次营养液。每个处理 18 株,3 次重复。处理 14 d 后收获。以植株基部为准分为地上部和根部,经自来水、蒸馏水洗净后于 105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重,备用。

表 1 试验所用的小白菜品种名称及编号

Tab. 1 Cultivars of pakcho and theirs code in the test

编号 Code	品种名称 Name of pakcho cultivar	编号 Code	品种名称 Name of pakcho cultivar
1	四季青白菜 Sijiqing pakcho	6	日本华冠火青菜 Japan huaguanhuoqingcai
2	大头·沪王青 Datou·huwangqing	7	原种四月慢 Yuanzhongsiyueman
3	平油一号 Pingyou No. 1	8	上海五月慢 Shanghaiwuyueman
4	抗热 605 Kangre 605	9	上海鸡毛菜 Shanghaijimaocai
5	绿秀(91-1) Lvxiu(91-1)	10	裕农一号 Yunong No. 1

1.2.2 元素测定 将样品分别用研钵研细,过 200 目网筛,备用。准确称取一定量样品,置于瓷坩埚内,放入马弗炉灰化(先在 200 °C 2 h,后在 500 °C 24 h)。各加入硝化液($V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HClO}_3}=3:1$) 5.0 mL,在电热板上低温加热煮沸,至溶液无色或淡黄澄清透亮近干为止。硝化后的样品冷却后加少许蒸馏水溶解,转移至 50.0 mL 容量瓶中,蒸馏水定容。同时做样品空白。用 AA240 原子吸收分光光度计(美国瓦里安技术中国有限公司)测定待测液吸光度值,由测得的吸光度通过标准曲线计算含量。根据样品含量及元素测定灵敏度不同,各元素测定时分别稀释不同的倍数。测定 Mg、Ca 时溶液加入氯化镧(LaCl_3) 释放剂,使其质量分数为 0.2%。

1.3 数据统计分析

根据 Metwally 等^[9]的方法计算耐性指数,评价小白菜的耐镉性强弱。

Cd 转运效率(%) = 地上部 Cd 净积累量 / (地上部 Cd 净积累量 + 根部 Cd 净积累量) × 100。

采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 3.0 进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 镉处理下不同品种小白菜地上部生物量

生物量大小是蔬菜对重金属响应的直接表现。从图 1 可知,经 Cd 处理(5 $\mu\text{mol/L}$)后,与各自的对

照相比,大多数品种的干物质量均有下降(6号除外),减幅分别为20.5%、23.3%、24.8%、47.7%、18.7%、23.6%、21.9%、22.9%、16.0%。

2.2 镉处理下不同品种小白菜根部生物量

从图2可知,经Cd处理(5 μmol/L)后,与各自的对照相比,大多数品种的干物质量均有下降(6号除外),减幅分别为27.3%、11.7%、10.6%、21.8%、20.0%、25.9%、15.2%、1.9%、7.7%。

2.3 不同品种小白菜对镉的耐性

5 μmol/L Cd处理下,各品种小白菜地上部干物质量的耐性指数如图3所示。耐性指数越大说明该品种对Cd的耐性越强。从图3可以看出,6号品种的耐性指数最大(20.7%),说明6号品种对Cd的耐性在所选品种中较高;而其他品种的耐性指数为负值,说明Cd对这几个品种的抑制作用较大,也说明这几个品种对Cd更为敏感。

2.4 镉处理下不同品种小白菜地上部和根部Cd含量

表2是10个小白菜品种5 μmol/L Cd处理后地上部和根部的Cd含量(对照未检出)。从表2可知,Cd处理下小白菜中的Cd主要累积在根部,向地上部运输的相对较少。地上部和根部Cd含量都存在品种差异,其中2号品种大头·沪王青地上部Cd含量最低,5号品种绿秀(91-1)地上部Cd含量最高,抗热605、日本华冠火青菜镉含量较低。小白菜体内Cd含量的高低不因品种的耐性强弱发生有规律的变化,说明小白菜体内Cd含量的大小与品种Cd耐性的强弱关系不明显。

2.5 不同品种小白菜对镉的转运效率

Cd转运效率是反映植株富集重金属能力的指标之一^[10]。由图4可见,不同品种小白菜对镉的转运效率存在差异,其中3号、7号、9号、10号的转运效率较高,说明这几个品种能将根部的Cd更多的转运至地上部,食用这些品种的小白菜对人类健康造成的威胁更高;6号品种的转运效率最低,为1.45%。其它品种间差异不大。由此可见,小白菜品种间Cd含量的差异是由品种自身的基因型决定的,具有遗传特性。

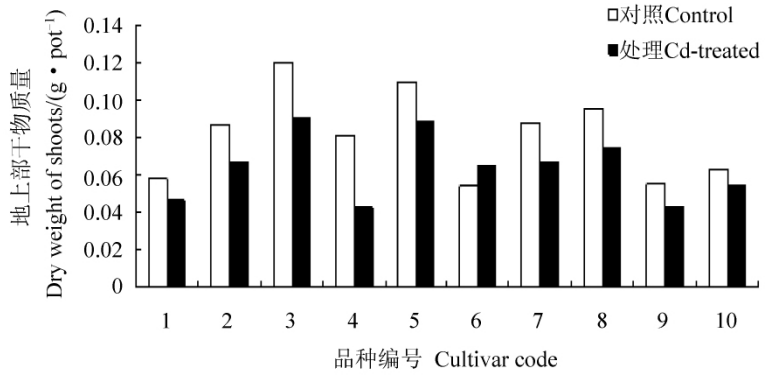


图1 镉处理对不同品种小白菜地上部干物质量的影响

Fig. 1 Effect of Cd treatment on dry weight of shoots in different pakcho cultivars

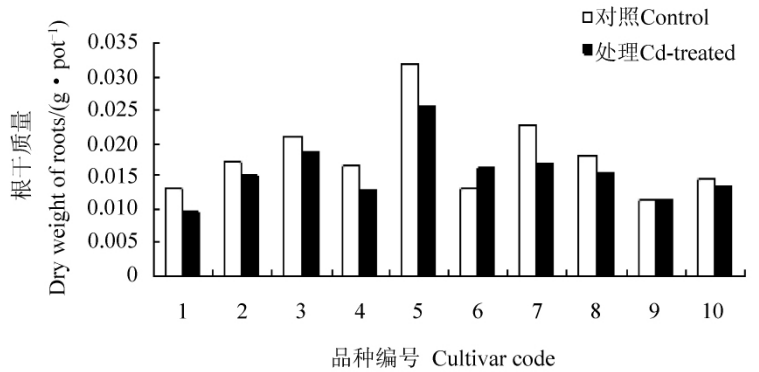


图2 镉处理对不同品种小白菜根部干物质量的影响

Fig. 2 Effect of Cd treatment on dry weight of roots in different pakcho cultivars

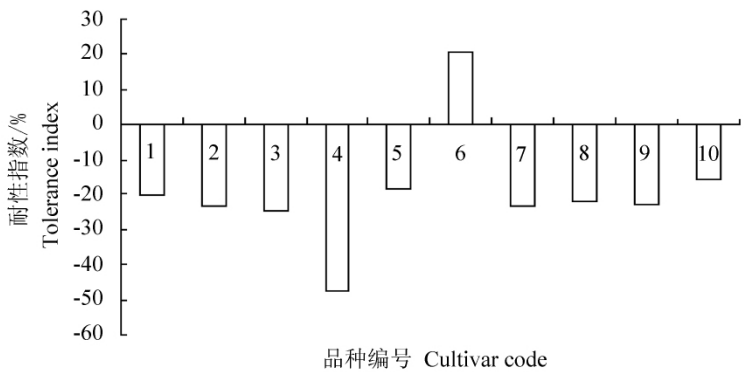


图3 不同品种小白菜的镉耐性差异

Fig. 3 Cd tolerance index in pakcho

2.6 镉处理对不同品种小白菜大量营养元素的影响

从表 3 可以看出, Cd 处理条件下小白菜地上部和根部大量营养元素的含量出现不同程度的变化。Cd 对小白菜地上部大量营养元素 Ca 的积累有抑制作用, 对大量营养元素 Mg 在 1 号、2 号、3 号、6 号品种中的积累有促进作用, 增加幅度分别为 24.5%、1.6%、6.8%、21.2%, 对其它品种有抑制作用。Cd 对小白菜根部 Ca、Mg 的吸收的影响存在品种差异, 1 号、9 号、10 号品种小白菜的根部 Ca、Mg 等营养元素的含量在 Cd 处理下呈现不同程度的降低, 说明低浓度 Cd 抑制这 3 个品种对营养元素的吸收, 但其余 7 个品种小白菜根部营养元素的吸收受到了 Cd 的促进, 相对于各自的对照有不同程度的增加。品种间差异与品种对 Cd 的耐性没有直接关系, 说明大量营养元素的吸收差异不是品种对 Cd 耐性的原因。

2.7 Cd 处理对不同品种小白菜微量营养元素的影响

2.7.1 Cd 处理对不同品种小白菜地上部微量元素含量的影响

从表 4 可知, 不同耐性品种微量营养元素的含量不同, 所有品种小白菜地上部 Zn 含量都有不同程度的降低; 除 5 号品种外其余品种小白菜地上部 Mn 含量都有不同程度的降低; 除 4 号、5 号品种外其余品种小白菜地上部 Cu 含量都有不同程度的降低; 除 1 号、3 号、4 号、5 号品种外其余品种小白菜地上部 Fe 含量都有不同程度的降低。

2.7.2 Cd 处理对不同品种小白菜根部微量元素含量的影响 从表 5 可以看出, 不同耐性品种根部微量营养元素的含量不同, 除 1 号、6 号、7 号、8 号外其余品种小白菜的根部 Mn 含量均有不同程度降低; 除 2 号、7 号品种外其余品种小白菜的根部 Fe 含量均有不同程度降低; 除 2 号、6 号、8 号品种外其余品种小白菜的根部 Zn 含量均有不同程度降低; 除 1 号、3 号、6 号、7 号、8 号品种外其余品种小白菜的根部 Cu 含量均有不同程度降低。

3 结论与讨论

Cd 对小白菜生长的影响因品种的耐性强弱不同, 对耐性强的品种而言, Cd 对其生长有促进作用, 反之, 对耐性弱的品种有抑制生长的作用。5 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理下小白菜幼苗体内的重金属含量较高, 由此带来的食品安全风险不容忽视。低浓度 Cd 对小白菜大部分品种地上部 Ca、Mg 元素的积累有抑制作用而对根部 Ca、Mg 元素的积累有促进作用。低浓度 Cd 对不同品种小白菜微量元素含量的影响, 因品

表 2 Cd 处理对不同品种小白菜地上部和根部 Cd 含量的影响

Tab.2 Effect of Cd treatment on Cd contents of shoots and roots in different pakcho cultivars

品种编号 Cultivar code	小白菜地上部/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Shoots of pakcho	小白菜根部/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Roots of pakcho
1	23.94 \pm 2.94	1 118.75
2	16.63 \pm 3.10	785.21
3	23.14 \pm 4.75	699.10
4	17.61 \pm 1.17	695.81
5	36.40 \pm 2.87	1 429.59
6	18.05 \pm 2.53	1 225.14
7	34.00 \pm 4.83	965.75
8	20.06 \pm 2.21	660.56
9	29.21 \pm 3.01	839.65
10	26.80 \pm 1.28	756.52

地上部数据用平均值 \pm 标准差表示 根部数据用平均值表示。

Shoots data indicated with the mean value \pm standard deviation, roots data expressed with the mean value.

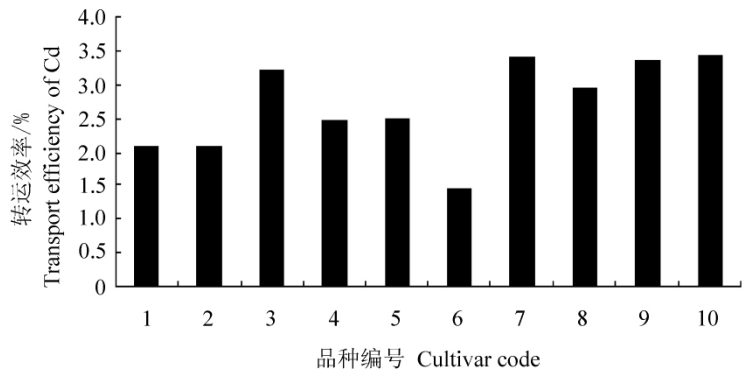


图 4 不同品种小白菜对镉的转运效率

Fig.4 Cd transport efficiency in different pakcho cultivars

表3 Cd处理对不同品种小白菜大量营养元素含量的影响

Tab.3 Effect of Cd treatment on macro-nutrient-element contents in shoots and roots of pakcho cultivars

数值 Value	品种编号 Cultivar code	地上部 Shoots		根部 Roots		品种编号 Cultivar code	地上部 Shoots		根部 Roots	
		Ca	Mg	Ca	Mg		Ca	Mg		
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	1	24.43 ± 4.63	5.05 ± 0.96	82.46	3.00	6	19.28 ± 1.48	5.60 ± 0.63	102.20	3.65
相对变化率/% Relative change rate		-17.6	24.5	-1.5	-12.9		-21.7	21.2	18.7	26.7
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	2	24.50 ± 1.65	7.78 ± 3.78	41.93	1.59	7	24.47 ± 1.01	4.66 ± 0.95	45.33	2.58
相对变化率/% Relative change rate		-4.3	1.6	16.6	1.4		-18.2	-37.6	7.8	23.5
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	3	31.86 ± 2.92	14.15 ± 2.12	30.15	1.51	8	22.36 ± 1.75	5.93 ± 1.39	41.87	1.56
相对变化率/% Relative change rate		-11.9	6.8	13.2	40.7		-23.3	-26.4	27.8	19.0
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	4	18.29 ± 0.21	3.75 ± 0.32	38.12	1.47	9	18.92 ± 1.24	3.70 ± 0.26	57.68	1.82
相对变化率/% Relative change rate		-34.5	-55.0	2.0	6.4		-22.4	-6.9	-28.6	-22.4
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	5	25.95 ± 4.13	4.27 ± 0.71	51.15	3.23	10	23.50 ± 2.57	5.84 ± 1.43	39.02	1.93
相对变化率/% Relative change rate		-17.1	-68.0	8.6	10.1		-29.1	-36.5	-21.8	-18.9

相对变化率(%) = 100 × (Cd处理 - 对照) / 对照。

Relative change rate(%) = 100 × (Cd treated - CK) / CK.

表4 Cd处理对不同品种小白菜地上部微量元素含量的影响

Tab.4 Effect of Cd treatment on micro-nutrient-element contents in shoots of pakcho cultivars

数值 Value	编号 Code	Mn	Fe	Zn	Cu	编号 Code	Mn	Fe	Zn	Cu
相对变化率/% Relative change rate		-27.6	1.9	-68.1	-17.4		-34.0	-37.0	-70.8	-15.2
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	2	564.20 ± 2.43	142.50 ± 16.34	85.93 ± 10.13	6.67 ± 0.87	7	809.54 ± 1.17	115.28 ± 1.48	69.95 ± 8.74	9.09 ± 0.54
相对变化率/% Relative change rate		-33.9	-22.0	-11.3	-25.9		-19.7	-43.3	-70.1	-13.8
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	3	631.56 ± 1.70	143.04 ± 2.73	48.37 ± 3.06	5.58 ± 0.19	8	586.56 ± 2.89	99.89 ± 19.10	60.38 ± 1.39	7.62 ± 0.77
相对变化率/% Relative change rate		-32.1	19.2	-68.6	-34.9		-29.5	-33.0	-53.9	-18.1
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	4	628.95 ± 1.71	133.28 ± 13.87	69.35 ± 5.60	9.42 ± 1.06	9	665.64 ± 2.32	121.13 ± 13.02	55.14 ± 0.67	9.46 ± 0.72
相对变化率/% Relative change rate		-18.3	15.3	-42.7	26.2		-25.1	-16.7	-62.3	-1.1
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	5	965.31 ± 6.28	172.96 ± 32.97	85.73 ± 23.61	9.97 ± 1.52	10	744.20 ± 1.40	335.31 ± 13.10	56.69 ± 2.80	12.48 ± 1.17
相对变化率/% Relative change rate		8.5	26.4	-49.5	42.7		-25.7	10.2	-65.7	35.5

相对变化率(%) = 100 × (Cd处理 - 对照) / 对照。

Relative change rate(%) = 100 × (Cd treated - CK) / CK.

表 5 Cd 处理对不同品种小白菜根部微量元素含量的影响

Tab. 5 Effect of Cd treatment on micro - nutrient - element contents in roots of pakcho cultivars

数值 Value	编号 Code	Mn	Fe	Zn	Cu	编号 Code	Mn	Fe	Zn	Cu
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	1	90.19	83.05	66.03	74.32	6	91.74	326.74	65.91	94.37
相对变化率/% Relative change rate		-13.9	-75.6	-24.8	15.6		4.9	-1.7	0.4	4.4
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	2	58.48	174.06	44.38	48.99	7	61.93	210.67	33.10	73.42
相对变化率/% Relative change rate		5.4	13.1	24.6	-3.2		305.7	216.9	-24.5	32.1
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	3	42.23	163.68	33.26	52.46	8	63.56	135.17	30.95	52.32
相对变化率/% Relative change rate		-15.4	-9.8	-2.4	9.8		14.8	19.4	7.6	25.1
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	4	58.93	167.49	36.86	50.27	9	67.55	178.66	46.57	59.24
相对变化率/% Relative change rate		-6.1	-2.6	-2.6	-0.8		-31.9	-24.2	-32.7	-23.6
含量/(mg·g ⁻¹) Contents	5	79.53	186.98	73.16	75.62	10	51.51	132.03	32.75	57.99
相对变化率/% Relative change rate		-10.7	-50.4	-4.8	-2.0		-31.4	-37.4	-32.8	-23.9

相对变化率(%) = 100 × (Cd 处理 - 对照) / 对照。

Relative change rate(%) = 100 × (Cd treated - CK) / CK.

种和营养元素种类的不同而异,同时不同小白菜体内营养元素的含量与其 Cd 耐性没有关系,说明营养元素的吸收积累可能不是所选小白菜 Cd 耐性差异的原因。6 号品种日本华冠火青菜在较低 Cd 含量(5 μmol/L) 处理下生物量比对照增加,说明它在低 Cd 浓度下有相对较强的 Cd 耐性。

重金属镉是植物非必需元素,重金属胁迫下细胞膜透性和膜脂过氧化程度增加,细胞选择透性机能受损^[10-13]。镉进入植物体内并积累到一定程度,会影响细胞分裂和生长,干扰营养物质的吸收和分配,从而影响植物的生长,表现出生长迟缓、植株矮小、产量下降等^[14-15]。本试验设置 Cd 5 μmol/L 为处理浓度,约相当于土壤 Cd 1 mg/kg,是根据《土壤环境质量标准》(GB5618-1995),为保障农业生产,维护人体健康的土壤限制值的最高含量设定,这对明确土壤镉污染临界含量下蔬菜苗期对镉的吸收积累差异更有实际意义。本试验研究结果显示 5 μmol/L 镉含量的水培条件下小白菜的生长受到抑制,所有供试材料的干物质积累减缓(除 6 号品种外),表明小白菜对镉具有较强的敏感性。6 号品种日本华冠火青菜在低 Cd(5 μmol/L) 时有相对较强的耐 Cd 能力,同时其地上部镉含量较低,对镉的转运效率最低,在轻度镉污染土壤上种植有利于降低镉污染的人类健康风险;1 号(四季青白菜)、5 号(绿秀 91-1)、9 号(上海鸡毛菜)、10 号(裕农一号)品种生物量降低较少,但绿秀(91-1)品种的吸 Cd 量最大,1 号(四季青白菜)、9 号(上海鸡毛菜)、10 号(裕农一号)品种的吸 Cd 量和镉转运效率比较高,因而,应注意其体内高浓度 Cd 对人及食物链的不良影响,反之,这些品种对 Cd 污染土壤可能具有相对较强的修复潜力。5 μmol/L Cd 对小白菜地上部大量营养元素 Ca 的积累有抑制作用,对根部大量营养元素 Ca 的积累有促进作用(除 1 号、9 号、10 号品种),说明 5 μmol/L Cd 对小白菜大量营养元素 Ca 的转运有抑制作用。5 号品种小白菜地上部 Mn、Fe、Cu 含量增加,4 号品种小白菜地上部 Fe、Cu 含量增加。6 号、8 号品种根部 Mn、Zn、Cu 含量增加,7 号品种根部 Mn、Fe、Cu 含量增加。小白菜不同品种间在 Cd 的吸收和积累上存在明显差异,这与前人的研究结果相一致^[5],有选择地种植镉低积累小白菜品种日本华冠火青菜对无害化蔬菜栽培具有重要意义。不同小白菜品种在镉耐性上的差异,为进一步研究提供了方向。

参考文献:

- [1] Ebbs S D , Lasat M M , Brady D J , et al. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Quality* ,1997 26 (5) : 1424 – 1430.
- [2] Brown S L , Chaney R L , Angle J S , et al. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator and metal tolerant silene vulgaris grown on sludge – amended soils [J]. *Environmental Science & Technology* ,1995 29(6) : 1581 – 1585.
- [3] 张金彪 , 黄维南. 镉胁迫对草莓光合的影响 [J]. *应用生态学报* 2007 ,18(7) : 1673 – 1676.
- [4] 唐秀梅 , 龚春风 , 刘鹏. 镉胁迫下龙葵叶中三种抗氧化酶的活性和抗坏血酸含量的变化 [J]. *植物生理学通讯* 2008 ,44(6) : 1135 – 1136.
- [5] 陈瑛 , 李廷强 , 杨肖娥 , 等. 不同品种小白菜对镉的吸收积累差异 [J]. *应用生态学报* 2009 20(3) : 736 – 740.
- [6] Alexander P D , Alloway B J , Dourado A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd ,Cu ,Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables [J]. *Environmental Pollution* 2006 ,144(3) : 736 – 745.
- [7] 孙建云 , 沈振国. 镉胁迫对不同甘蓝基因型光合特性和养分吸收的影响 [J]. *应用生态学报* 2007 ,18(11) : 2605 – 2610.
- [8] 张微 , 吕金印 , 柳玲. 不同基因型番茄幼苗对镉胁迫的生理响应及镉吸收差异 [J]. *农业环境科学学报* 2010 29(6) : 1065 – 1071.
- [9] Metwally A , Safronova V I , Belimov A A , et al. Genotypic variation of the response to cadmium toxicity in *Pisum sativum* L [J]. *Journal of Experimental Botany* 2005 56(409) : 167 – 178.
- [10] Sun L N , Niu Z X , Sun T H. Effects of amendments of N ,P ,Fe on phytoextraction of Cd ,Pb ,Cu and Zn in soil of Zhangshi by mustard ,cabbage and sugar beet [J]. *Environmental Toxicology* 2007 22(6) : 565 – 571.
- [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 22(4) : 571 – 576.
- [12] 杨居荣 , 贺建群 , 张国祥 , 等. 农作物对 Cd 毒害的耐性机理探讨 [J]. *应用生态学报* ,1995 6(1) : 87 – 91.
- [13] 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.
- [14] 宋玉芳 , 许华夏 , 任丽萍. 土壤重金属对白菜种子发芽与根伸长抑制的生态毒性效应 [J]. *环境科学* 2002 ,23(1) : 103 – 107.
- [15] 姚会敏 , 杜婷婷 , 苏德纯. 不同品种芸薹属蔬菜吸收累积镉的差异 [J]. *中国农学通报* 2006 22(1) : 291 – 294.