

不同品种大白菜苗期吸收积累镉的差异研究*

刘志华^{1,2} 伊晓云^{1,2} 王火焰¹ 沈仁芳^{1†}

(1土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

(2中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要 利用实验室水培模拟轻度镉污染土壤研究了 13 个大白菜品种苗期吸收积累镉的差异。结果表明,不同品种大白菜地上部和根部的镉含量存在显著差异,其中,603 大白菜地上部镉含量较低(104.7 mg kg^{-1}),耐性指数较高,在轻度镉污染土壤上种植 603 大白菜有利于降低镉污染的人类健康风险。不同大白菜品种在受到 Cd 胁迫时,其叶绿素含量和组成均有显著差异,为耐性机理研究提供了理论依据。

关键词 大白菜;苗期;镉;耐性

中图分类号 S634.1; X592 **文献标识码** A

镉是环境中的一种重要的有毒重金属,被列为五大毒物(Cd, Hg, As, Cr, Pb)之首^[1]。与其他重金属相比,植物更容易自土壤中吸取镉^[2],镉具有累积效应并能进一步通过食物链对人类健康造成威胁^[3],甚至在极低的浓度下也对人体健康有害。

镉能对植物产生毒害,使植物生理生化和结构发生改变,严重时导致植物死亡^[4]。研究证明,镉在植物体内的积累及分布因植物种类及品种而异^[5,6]。由于植物存在遗传特异性,故不同种类和品种之间对镉的吸收和累积表现出较大的差异性^[5,6],通常叶菜类蔬菜能吸收并积累较多的镉^[7]。沈阳市近郊的各种蔬菜中的重金属含量研究结果表明,蔬菜中镉污染均比较严重,其中大白菜中镉的超标率为 100%^[8];南京城郊 18 个点的青菜叶样分析表明,镉含量全部超过食品卫生标准,最高超出 17 倍^[9]。由于植物吸收的镉大部分累积在茎叶中,只有一部分会转移到籽粒或果实中去,因而对污染农田上生产的叶菜类蔬菜的食品安全性影响更大。存在于土壤中的重金属难以被微生物分解和转化,利用修复技术来治理重金属污染土壤也比较困难,因此,在轻度镉污染土壤上种植低吸收、低积累的蔬菜品种是保证食品安全的重要措施,有重要实践和理论研究意义。

由于土壤培养条件下蔬菜的根部对镉的吸收积累情况很难测定,但根部对镉的响应又是蔬菜对镉处理

下的生理表现的重要组成部分,因此本试验在室内用水培模拟轻度重金属污染土壤,选用在黑龙江省广泛种植的大白菜品种 13 个,研究其吸收积累镉的特征,筛选低吸收、低累积品种,为轻度重金属污染土壤上生产出符合食品安全标准的蔬菜品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用 13 个大白菜品种,名称与编号如表 1 所示;营养液采用常用的 Hoagland-A 配方;处理所用试剂为分析纯氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)。

表 1 试验所用的大白菜品种名称及编号

Table 1 Cultivars of Chinese cabbage and their codes in the test

编号 Code	品种名称 Name of Chinese cabbage cultivar	编号 Code	品种名称 Name of Chinese cabbage cultivar
1	601 四季大白菜 601 siji cabbage	8	龙协白 4 号 Longxiebai No. 4
2	602 大白菜 602 cabbage	9	龙协白 5 号 Longxiebai No. 5
3	603 大白菜 603 cabbage	10	新鲁白 9 号 Xinlubai No. 9
4	9811 大白菜 9811 cabbage	11	抗病牛心王 Kangbingniuxinwang
5	9812 大白菜 9812 cabbage	12	昌金菜王 Changjincaiwang
6	98 - 6 大白菜 98 - 6 cabbage	13	抗软腐 146 大白菜 Kangruanfu 146 cabbage
7	龙园 67 Longyuan 67		

* 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目(CXTD-Z2005-4)和国家重点基础研究发展规划项目(2002CB410811)资助

† 通讯作者, Tel: 025-86881563; E-mail: rfshen@issas.ac.cn

作者简介:刘志华(1979~),女,黑龙江省哈尔滨市人,博士研究生,主要从事植物逆境营养生理研究。E-mail: zhihua79@126.com

收稿日期:2007-05-14;收到修改稿日期:2007-11-28

1.2 试验方法

选择饱满一致的大白菜种子,用 1% NaClO 消毒 30 min,然后用蒸馏水清洗干净后浸泡 3 h,放在 25 恒温培养箱中避光催芽 2 d。

发芽整齐一致的种子放在装有石英砂的穴盘中培养,每穴 1 株,待真叶展开后浇灌适量 1/5 强度 Hoagland-A mon 营养液,10 d 后将大白菜幼苗从石英砂中移出,小心用自来水将石英砂冲洗干净,用海绵夹住移栽于盛有 1/4 浓度 Hoagland-A mon 营养液 1.4 L 的瓷盆中。瓷盆上覆以 PVC 板,每板植苗 2 株。培养至四叶一心开始试验处理。每品种 3 次重复,生长过程中每 3 d 换一次营养液,营养液 pH 6.0,连续通气。

两个试验处理为:对照,0.5 mmol L⁻¹ CaCl₂;镉处理,0.5 mmol L⁻¹ CaCl₂ + 5 μmol L⁻¹ CdCl₂。试验过程中处理液与 1/4 浓度 Hoagland-A mon 营养液交替培养,每 24 h 更换一次。这样做的目的为避免可能引起镉与其他营养元素之间的交互作用。处理 8 d 后收获。

本试验设置 Cd 5 μmol L⁻¹ 为处理浓度,约相当于土壤 Cd 1 mg kg⁻¹,是根据《土壤环境质量标准》(GB15618 - 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。

收获时由基部将大白菜分为地上部和根部两部分,测定植株顶部最大完全展开的功能叶的叶绿素含量,用自来水冲洗后用蒸馏水冲洗 3 次,于 105 烘箱杀青 30 min,75 烘干至恒重,备用。试验在人工气候室中进行,光照 14 h/10 h(白天/黑夜),温度 25 /20 (白天/黑夜),相对湿度 65%,光强 300 μmol m⁻² s⁻¹。

1.3 分析项目及方法

1.3.1 大白菜幼苗叶绿素测定 酒精丙酮混合提取液 (1:1) 提取比色^[10]。

1.3.2 大白菜叶片和根镉含量的测定 将烘干至恒重的大白菜地上部和根部用玻璃研钵分别磨成粉末,充分混匀,用浓硝酸与高氯酸 (硝酸:高氯酸 = 5:1) 湿法消解,用 ICP 测定样品镉含量。

1.4 数据处理

根据 Metwally 等^[11]的方法计算耐性指数,评价大白菜的耐镉性强弱,具体计算方法如下:

$$\text{耐性指数}(\%) = \frac{\text{处理生物量}}{\text{对照生物量}} \times 100 - 100$$

$$\text{Cd 转运效率}(\%) =$$

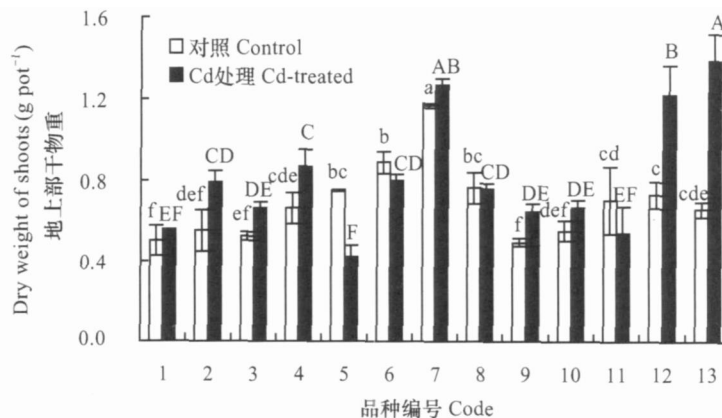
$$\frac{\text{地上部 Cd 净积累量}}{\text{地上部 Cd 净积累量} + \text{根部 Cd 净积累量}} \times 100$$

数据处理用 Excel 和 SPSS13.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 镉处理下不同品种大白菜地上部生物量

镉处理 (Cd 5 μmol L⁻¹) 对不同大白菜地上部干物重的影响如图 1。从图中可以看出,Cd 处理 8 d 后,与各自的对照相比,大多数品种的干物重均有增加的趋势 (5 号、6 号和 11 号除外),说明短期低浓度 Cd 处理对大白菜的生长有促进作用。张丽娜等^[13]研究硅对低镉污染水平下水稻幼苗的影响时,结果也表明低镉浓度能够促进水稻幼苗的生长;Arduini 等^[15]研究也发现低镉浓度 (低于 0.5 mg L⁻¹) 能够促进芒的生长。



注:不同品种间无相同字母者表示经统计检验差异达显著水平 ($p < 0.05$)

Note: Bars marked by the same letter (s) are not significantly different at $p < 0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test

图 1 不同品种大白菜地上部干物重

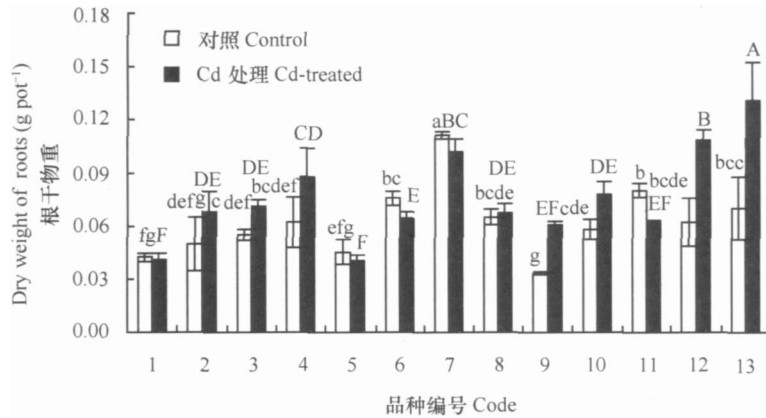
Fig. 1 Dry weight of shoots in different Chinese cabbage cultivars

比较不同品种间地上部干物重存在显著差异(图 1),在未加 Cd条件下,7号品种的干物重显著高于其他品种;5号、6号和 8号的干物重仅次于 7号品种,其间差异未达到显著水平,与其他品种差异显著;其余品种干物重较低,品种间差异不显著。在 $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ Cd处理条件下,13号品种的干物重最大,显著高于除 7号品种之外的其他品种,说明 13号品种对 Cd的耐性较高。

2.2 镉处理下不同品种大白菜根生物量

镉处理 ($\text{Cd } 5 \mu\text{mol L}^{-1}$)对 不同品种大白菜根

干重的影响如图 2。根据差异显著性分析,品种间根部干物重存在显著差异,7号品种的根部的对照干物重显著高于其他品种的对照干物重,其在 Cd处理条件下仍较高,但显著低于 13号品种。与各自的对照相比,Cd $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 处理后,5号、6号、7号和 11号根部干物重降低,其他品种的根部干物重增加,说明大白菜对 Cd的响应存在品种差异,可以利用基因型差异来进行筛选。



注:不同品种间无相同字母者表示经统计检验差异达显著水平 ($p < 0.05$)

Note: Bars marked by the same letter (s) are not significantly different at $p < 0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test

图 2 不同品种大白菜根部干物重

Fig. 2 Dry weight of roots in different Chinese cabbage cultivars

2.3 不同品种大白菜对镉的耐性

Cd浓度 $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 处理下,各品种大白菜地上部干物重的耐性指数如图 3所示。耐性指数越大说明该品种对 Cd的耐性越强。从图中可以看出,13号品种的耐性指数最大(110.3%),说明 13号品种对 Cd的耐性在所选品种中较高;而 5号、11号、6号

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。其他品种的耐性指数均为正值,大小依次为:12号 > 2号 > 9号 > 4号 > 3号 > 10号 > 1号 > 7号。说明试验大白菜品种在 Cd浓度 $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 处理 8 d,整体上表现出对 Cd的耐性(5号、11号、6号除外)。

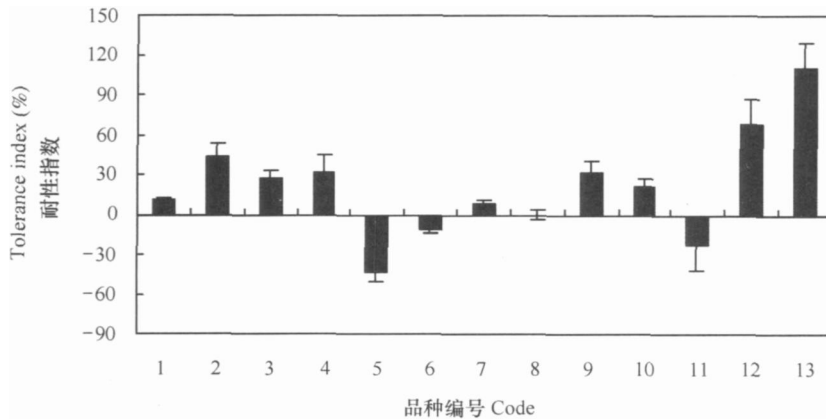


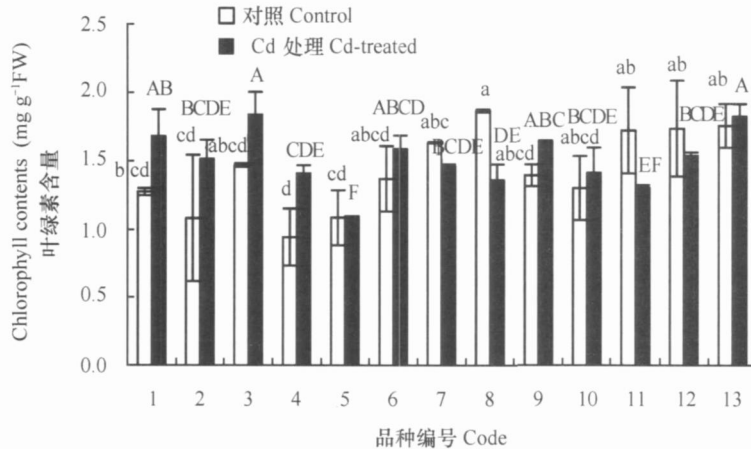
图 3 不同品种大白菜的镉耐性差异

Fig. 3 Cd tolerance index in Chinese cabbage

2.4 镉对不同品种大白菜叶绿素含量及组成的影响

大白菜幼苗经 Cd 5 μmolL⁻¹处理 8 d后,叶绿素的含量发生了不同程度的变化(图 4),与各自的对照相比较,其中,1号、2号、3号、4号和 9号品种

的叶绿素含量显著增加,其他品种的叶绿素含量降低。说明 5 μmolL⁻¹ Cd处理 8 d,虽然没有显著抑制大白菜地上部的生长(图 3),但也影响到了大白菜的光合作用。张丽娜等^[15]研究也发现镉在低浓度时促进水稻叶绿素的合成。



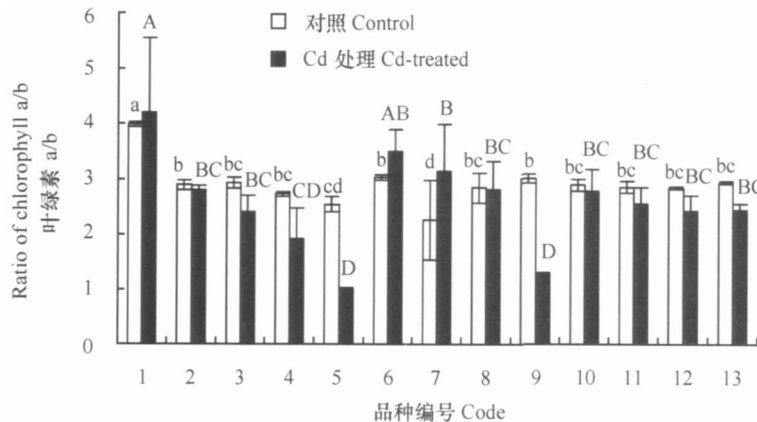
注:不同品种间无相同字母者表示经统计检验差异达显著水平 ($p < 0.05$)
Note: Bars marked by the same letter (s) are not significantly different at $p < 0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test

图 4 不同品种大白菜叶绿素含量

Fig. 4 Chlorophyll contents in shoots of Chinese cabbage cultivars

由图 5可知,镉处理 (Cd 5 μmolL⁻¹)不但影响了叶绿素含量,还改变了叶绿素的组成。与对照相比,除 1号、6号、7号品种外,Cd 5 μmolL⁻¹处理降低了叶绿素 a/b的比值,说明叶绿素 a对 Cd污染较叶绿素 b更敏感。这可能是由于重金属镉对光合反应作用中心 - 叶绿素 a的光反应过程中铁氧还原蛋白的影响。这与王林和史衍玺^[12]的研究结果一致。

不同品种间叶绿素 a/b的比值差异很大,达到显著水平。其中 5号和 9号品种叶绿素 a/b的比值降低程度超过了 50%,而 1号、6号和 7号的叶绿素 a/b的比值有增加作用,分别较对照增加了 5%、16%和 39%,这几个品种的耐性较差(图 3),可能叶绿素 a/b的比值也与镉耐性的强弱有关,这有待于进一步研究。



注:不同品种间无相同字母者表示经统计检验差异达显著水平 ($p < 0.05$)
Note: Bars marked by the same letter (s) are not significantly different at $p < 0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test

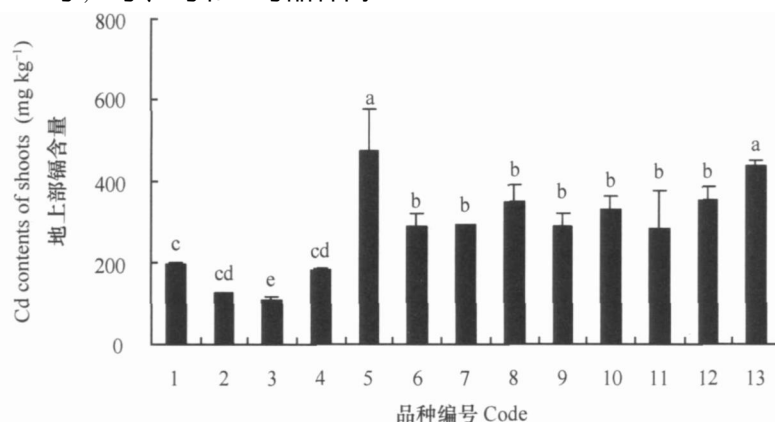
图 5 不同品种大白菜叶绿素 a/b

Fig. 5 Ratio of chlorophyll a/b in shoots of Chinese cabbage cultivars

2.5 镉处理下不同品种大白菜地上部镉含量

图 6 是 13 个大白菜品种 $\text{Cd } 5 \mu\text{molL}^{-1}$ 处理 8 d 后地上部的 Cd 含量 (对照未检出)。从图中可以看出,不同品种间大白菜的地上部 Cd 含量存在显著差异。其中,5 号和 13 号的地上部 Cd 含量较高,分别达 476.2 mg kg^{-1} 和 435.9 mg kg^{-1} ;3 号品种的地上部 Cd 含量最低,为 104.7 mg kg^{-1} ,仅为高积累品种 5 号的 22%。6 号、7 号、8 号、9 号、10 号、11 号和 12 号品种间地上部 Cd 含量没有显著差异,含量大小仅次于 5 号和 13 号;1 号、2 号和 4 号品种间

地上部 Cd 含量差异不显著,含量仅高于 3 号品种。说明在 $\text{Cd } 5 \mu\text{molL}^{-1}$ 处理下,采用室内水培方法能够筛选出低积累的大白菜品种。从图中还可以看出,在较低的 Cd 污染情况下 ($\text{Cd } 5 \mu\text{molL}^{-1}$),大白菜品种对 Cd 的积累量较高,尽管 3 号品种地上部的 Cd 含量最低,也超过了 100 mg kg^{-1} ,表明大白菜的 Cd 污染风险较高。可见,研究大白菜品种间对 Cd 的积累差异很有必要,以便于筛选出有利于人类健康的大白菜品种。



注:不同品种间无相同字母者表示经统计检验差异达显著水平 ($p < 0.05$)

Note: Bars marked by the same letter (s) are not significantly different at $p < 0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test

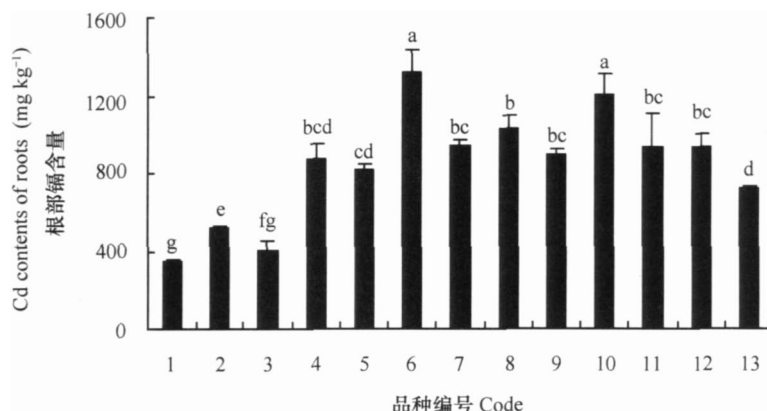
图 6 不同品种大白菜地上部的镉含量

Fig. 6 Cd contents in shoots of Chinese cabbage

2.6 镉处理下不同品种大白菜根部镉含量

13 个大白菜品种 $\text{Cd } 5 \mu\text{molL}^{-1}$ 处理 8 d 后根部的 Cd 含量如图 7 所示 (对照含量极低,故未列出)。与大白菜地上部镉积累状况比较,根系对 Cd

的积累程度要较地上部高,且品种间的差异更加显著。其中,6 号和 10 号品种根部的 Cd 含量较其他品种的要高,含量分别达到 1319 mg kg^{-1} 和 1209 mg kg^{-1} ,二者间差异不显著;1 号品种根部的



注:不同品种间无相同字母者表示经统计检验差异达显著水平 ($p < 0.05$)

Note: Bars marked by the same letter (s) are not significantly different at $p < 0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test

图 7 不同品种大白菜根部的镉含量

Fig. 7 Cd contents in roots of Chinese cabbage

Cd含量最低,为 344 mg kg^{-1} ,与 3号品种 (403 mg kg^{-1})比较差异不显著,其含量仅为 6号品种的 1/4; 2号品种根部 Cd含量略高于 1号和 3号,为 519 mg kg^{-1} 。说明不同品种大白菜根部对 Cd的响应不同,这可能也是不同大白菜品种对 Cd耐性强弱差异的根本所在,其机理有待于进一步研究。

2.7 不同品种大白菜对镉的转运效率

试验结果如图 8所示。从图中可见,不同品种

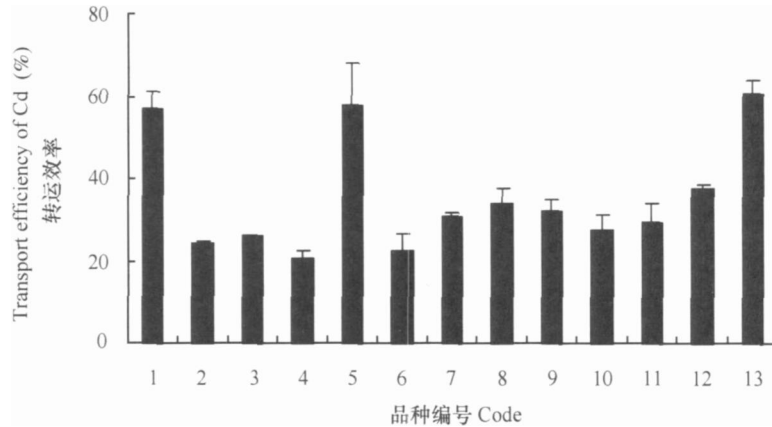


图 8 不同品种大白菜对镉的转运效率

Fig. 8 Cd transport efficiency in different Chinese cabbage cultivars

3 结论

本试验采用实验室水培模拟轻度镉污染土壤,研究不同品种大白菜对 Cd的积累特征。结果表明,短期低浓度镉处理 ($\text{Cd } 5 \mu\text{mol L}^{-1}$)能够促进大白菜幼苗的生长,大白菜幼苗体内的镉含量很高,由此带来的食品安全风险不容忽视。不同的大白菜品种在镉耐性上存在显著差异, $\text{Cd } 5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 处理下,3号品种 603大白菜的生物量较大,其耐性也较高,镉积累量相对较低 (104.7 mg kg^{-1}),在轻度镉污染土壤上种植这个品种有利于降低镉污染的人类健康风险; 13号品种抗软腐 146大白菜生物量大,Cd积累量高,转运效率也高。试验表明不同大白菜品种在镉耐性机理上存在差异,为进一步深入研究提供了方向。

参考文献

[1] 李忠武,王振中,张友梅,等. Cd对土壤动物群落结构的影响. 应用生态学报, 2000, 11 (6): 931 ~ 934. Li Z W, Wang Z Z, Zhang Y M, *et al* Effect of cadmium on soil community structure (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11 (6): 931 ~ 934

的转运效率存在显著差异,其中, 1号、5号和 13号的转运效率较高,均达到 55%以上,说明这几个品种能将根部的大部分 Cd转运至地上部,食用这些品种的大白菜对人类健康造成的威胁更高;其他品种的转运效率在 20%~ 40%之间,品种间的差异不大。由此可见,大白菜品种间 Cd含量的差异是由品种自身的基因型决定,具有遗传特性。

[2] 薛艳,沈振国,周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理. 土壤, 2005, 37 (1): 32 ~ 36. Xue Y, Shen Z G, Zhou D M. Difference in heavy metal uptake between various vegetables and its mechanism (In Chinese). Soils, 2005, 37 (1): 32 ~ 36

[3] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentration and components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seeding stage. Field Crops Research, 2002, 77: 93 ~ 98

[4] Sanitàdi Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants. Environmental and Experimental Botany, 1999, 41 (2): 105 ~ 130

[5] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat. Journal of Plant Nutrition, 2000, 9: 1337 ~ 1350

[6] 杨居荣,贺建群,黄翌,等. 农作物 Cd耐性的种内和种间差异 II 种内差. 应用生态学报, 1995, 6 (增刊): 132 ~ 136. Yang J R, He J Q, Huang Y, *et al* Inter- and intra-specific difference of crops in cadmium tolerance II Intraspecific difference (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6 (Suppl): 132 ~ 136

[7] 李学德,花日茂,岳永德,等. 合肥市蔬菜中铬、铅、镉和铜污染现状评价. 安徽农业大学学报, 2004, 31 (2): 143 ~ 147. Li X D, Hua R M, Yue Y D, *et al* Evaluation on contamination of Cr, Pb, Cd and Cu in vegetables of Hefei region (In Chinese). Journal of Anhui Agricultural University, 2004, 31 (2): 143 ~ 147

[8] 付玉华,李艳金. 沈阳市郊区蔬菜污染调查. 农业环境保护, 1999, 18 (1): 36 ~ 37. Fu Y H, Li Y J. Investigation for pollution

- on vegetable in Shenyang suburb (In Chinese). Agro-Environmental Protection, 1999, 18 (1): 36 ~ 37
- [9] 丁爱芳,潘根兴. 南京城郊零散菜地土壤与蔬菜重金属含量及健康风险分析. 生态环境, 2003, 12 (4): 409 ~ 411. Ding A F, Pan G X. Contents of heavy metals in soils and Chinese cabbages (*Brassica chinensis*) from some urban vegetable fields around Nanjing and the human health risks (In Chinese). Ecology and Environment, 2003, 12 (4): 409 ~ 411
- [10] 李合生,孙群,赵世杰,等. 植物生理生化实验原理和技术. 北京:高等教育出版社, 2000. 119 ~ 185. Li H S, Sun Q, Zhao S J, *et al* Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2000. 119 ~ 185
- [11] Metwally A, Safionova V I, Belimov A A, *et al* Genotypic variation of the response to cadmium toxicity in *Pisum sativum* L. Journal of Experimental Botany, 2005, 56: 167 ~ 178
- [12] 王林,史衍玺. 镉、铅及其复合污染对辣椒生理生化特性的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36 (1): 107 ~ 112. Wang L, Shi Y X. Effects of cadmium, lead and their combined pollution on the physiological and biochemical characteristics of *Capsicum annuum* (In Chinese). Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2005, 36 (1): 107 ~ 112
- [13] 张丽娜,宗良纲,任锬,等. 硅对低镉污染水平下水稻幼苗生长及吸收镉的影响. 农业环境科学学报, 2007, 26 (2): 494 ~ 499. Zhang L N, Zong L G, Ren C, *et al* Effects of Si on rice seedling growth and uptake of Cd in the low level of Cd pollution (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26 (2): 494 ~ 499
- [14] Ni W Z, Long X X, Yang X E. Studies on the criteria of cadmium pollution in growth media of vegetable crops based on the hygienic limit of cadmium in food. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25: 957 ~ 968
- [15] Arduini I, Masoni A, Mariotti M, *et al* Low cadmium application increase miscanthus growth and cadmium translocation. Environmental and Experimental Botany, 2004, 52: 89 ~ 100

Cd ACCUMULATION IN DIFFERENT CHINESE CABBAGE SEEDLINGS UNDER Cd STRESS

Liu Zhihua^{1,2} Yi Xiaoyun^{1,2} Wang Huoyan¹ Shen Renfang^{1†}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A hydroponic experiment was conducted to investigate differences in Cd accumulation in shoots of Chinese cabbage at the seedling stage between 13 cultivars. Results indicate that Cd contents in shoot and root varied sharply with the cultivars, among which, Cabbage 603 had a lower Cd content in shoots (104.7 mg kg^{-1}) and showed a higher Cd tolerance index, suggesting that this cultivar grown in slightly polluted soil posed less risk to food chain. It was also found that contents and composition of chlorophyll also varied significantly between cultivars different in tolerance index, under Cd stress.

Key words Chinese cabbage; Seedling stage; Cd; Tolerance