

# 镉在青菜中的富集及其生理的影响

梁巧玲, 杨 晖

(丽水学院 生态学院, 浙江 丽水 323000)

**摘 要:**以 3 个品种的青菜(*Brassica chinensis* var. *chinensis*)“秋田上海青”、“油冬青菜”、“黑叶矮脚油冬”为试材,研究不同浓度镉(Cd)处理对青菜种子发芽以及水培条件下青菜生物量、生理和 Cd 富集能力的影响。结果表明: Cd 对青菜种子发芽的影响呈现低促高抑现象,在 Cd 浓度为 5.0 mg/L 时,3 个品种发芽率达到最高值,分别为 91.30%、90.00%和 89.30%;在 Cd 浓度超过 20.0 mg/L 时“秋田上海青”、“油冬青菜”发芽率显著降低( $P<0.05$ )。在 Cd 浓度超过 50.0 mg/L 时,“黑叶矮脚油冬”发芽率显著降低( $P<0.05$ )。青菜生物量在 Cd 浓度超过 1.0 mg/L 时受到显著抑制( $P<0.05$ )。Cd 对青菜生理生化有胁迫作用,不同品种青菜的叶绿素和可溶性糖含量均随 Cd 浓度的增加而降低,“黑叶矮脚油冬”在 Cd 浓度超过 1.0 mg/L 时显著降低( $P<0.05$ )。不同品种青菜 Cd 富集量均随着 Cd 浓度的增加而升高,但 3 个品种富集能力差异显著,“秋田上海青”Cd 富集能力显著低于其它 2 个品种。

**关键词:**青菜;Cd;种子发芽;生物量;Cd 富集

**中图分类号:**Q 946.91 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)09-0006-05

蔬菜中含有大量维生素、纤维素,还有矿质营养<sup>[1]</sup>,这些是人类不可缺少的营养物质,同时蔬菜还具有食疗作用<sup>[2]</sup>。农田中的蔬菜吸收重金属,并且通过土壤-植物系统进行迁移,严重影响蔬菜品质,并由食物链进入人体,在人体内富集下来,久而久之对人类健康造成威胁,引发高血压、骨质疏松、肝功能紊乱等病症<sup>[3-4]</sup>。Cd 作为一种对危害极大的重金属,不仅会导致土壤正常的功能失调、质量下降,而且会对植物产生毒害<sup>[5]</sup>。研究表明,当植物受重金属污染时,其生长和生理生化也会受到极大影响<sup>[6]</sup>。刘景红等<sup>[7]</sup>的研究发现,各城市蔬菜重金属污染形势最严峻的是 Cd 污染。据相关统计发现,农田 Cd 污染在我国已经达到了 1.09 万  $\text{hm}^2$ ,并且在不断上升<sup>[8]</sup>。凌乃规<sup>[9]</sup>的研究表明,重金属污染中以叶菜类最易受污染。而沈彤等<sup>[10]</sup>研究表明不同蔬菜品种对重金属的积累不同。

该试验通过不同浓度 Cd 对青菜的处理,探讨影响青菜种子发芽、青菜生物量和生理生化的 Cd 浓度,了解青菜对 Cd 富集能力随着 Cd 浓度增加表现出的趋势,并选出 Cd 富集能力最小的青菜品种,以提高食用蔬菜的安全性,保证人体健康。

**第一作者简介:**梁巧玲(1967-),女,浙江丽水人,本科,高级实验师,研究方向为植物与植物生理。E-mail: lsliangqiaoling@163.com.

**收稿日期:**2015-12-16

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选取丽水种子公司提供的 3 个品种青菜(*Brassica chinensis* var. *chinensis*)“秋田上海青”、“油冬青菜”、“黑叶矮脚油冬”为试验材料,其特征见表 1。

**表 1** 3 个青菜品种的特征

Table 1 Characteristics of three varieties of vegetables

品种 Variety	特征 Characteristics
“秋田上海青” ‘Akita Shanghai vegetable’	植株直立,叶面光滑、全缘、椭圆形,叶柄浅绿色
“油冬青菜” ‘Youdong vegetable’	植株直立、束腰不明显、叶椭圆形深绿色、叶面光滑、叶柄绿色、抗病强
“黑叶矮脚油冬” ‘Aijiao black leaf vegetable’	叶片墨绿色、基部膨大、束腰明显、早熟、抗寒性极强

### 1.2 试验方法

试验采用水培方式栽培,水培营养液为日本园试配方<sup>[11]</sup>。研究不同浓度 Cd 对青菜种子发芽情况、生物量积累和青菜生理的影响,并研究青菜 Cd 积累情况。

试验选取 3 个品种的青菜种子,设 Cd 浓度为 0.5、1.0、5.0、10.0、20.0、50.0 mg/L 的 6 个处理组和 1 个 Cd 浓度为 0 mg/L 的对照组。催芽后的种子分别种在准备好的 3 个装有土壤的泡沫箱中,每个泡沫箱种 1 个品种的青菜。待其长出 2、3 片真叶后,定植于定植板上,进行水培。每个定植板有 6 列,每 2 列定植 1 个品种的青菜(图 1),即每个品种每种处理水培 8 株青菜。7 个储液箱

加入营养液,设置 Cd 浓度分别为 0、0.5、1.0、5.0、10.0、20.0、50.0 mg/L,对青菜进行水培,水培期间每 7 d 换 1 次营养液,水培 1 个月后,对试验材料分别进行生物量、叶绿素、可溶性总糖、重金属含量的测定。

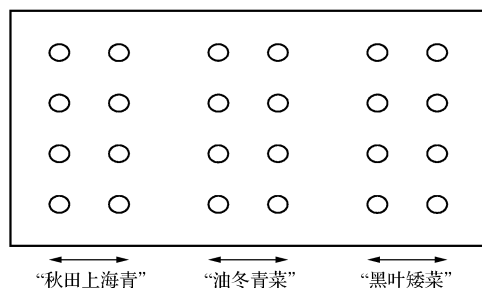


图 1 定植板上青菜种植示意图

Fig. 1 The diagram of vegetable planting on engraftment plate

## 2 结果与分析

### 2.1 不同 Cd 浓度处理对青菜种子发芽的影响

由表 2 可知,3 个青菜品种的种子发芽率均随着 Cd 浓度的增加呈现出低促高抑现象。在 Cd 浓度 < 5.0 mg/L 时,3 个品种的种子发芽率随着 Cd 浓度增加而上升,“油冬青菜”、“黑叶矮脚油冬”的发芽率在 Cd 浓度为 1.0 mg/L 时显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ),“秋田上海青”的发芽率在 Cd 浓度为 5.0 mg/L 时显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。在 Cd 浓度为 5.0 mg/L 时,3 个青菜品种的种子发芽率均达到最大值,分别为 91.30%、90.00% 和 89.30%,与对照相比差异显著 ( $P < 0.05$ )。在 Cd 浓度超过 5.0 mg/L 时,3 个品种的种子发芽率随 Cd 浓度的增加而降低,“秋田上海青”、“油冬青菜”在 Cd 浓度超过 20.0 mg/L 时,种子发芽率显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ),“黑叶矮脚油冬”在 Cd 浓度为 50.0 mg/L 时,种子发芽率显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。

表 2 Cd 对青菜种子发芽率的影响

Table 2 Effect of Cd on vegetable seed germination rate %

Cd 处理浓度 Concentration of Cd /(mg · L <sup>-1</sup> )	“秋田上海青” ‘Akita Shanghai vegetable’	“油冬青菜” ‘Youdong vegetable’	“黑叶矮脚油冬” ‘Aijiao black leaf vegetable’
0	81.70±3.10cd	78.00±2.50e	72.70±3.50def
0.5	79.70±1.50d	78.30±2.00de	71.00±2.50f
1.0	87.30±2.50abc	84.30±4.00c	78.70±3.50e
5.0	91.30±1.50a	90.00±2.00a	89.30±2.00a
10.0	84.70±3.50bcd	84.70±1.00bc	83.70±2.00bc
20.0	72.00±6.00e	72.30±2.50f	71.30±3.50efg
50.0	63.70±1.50f	68.30±1.50f	68.30±2.50g
平均 Average	80.04±9.00a	79.43±4.83a	76.43±2.17a

注:表中同列不同小写字母表示各处理在  $P < 0.05$  水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters within the same column in the groups mean significant difference at 0.05 level. The same below.

由表 3 可知,3 个青菜品种的芽苗总长均随着 Cd 浓度的增加呈现单抑现象。在 Cd 浓度为 0.5 mg/L 时,

3 个品种芽苗总长分别比对照低 9.1%、2.1%、4.7%,与对照相比,“秋田上海青”差异显著 ( $P < 0.05$ ),“油冬青菜”、“黑叶矮脚油冬”差异不显著。在 Cd 浓度超过 1.0 mg/L 时,3 个品种芽苗总长和对照相比,显著下降 ( $P < 0.05$ ),且随着 Cd 浓度增加抑制作用增强。

表 3 Cd 对青菜芽苗长度的影响

Table 3 Effect of Cd on vegetable seedling length cm

Cd 处理浓度 Concentration of Cd /(mg · L <sup>-1</sup> )	“秋田上海青” ‘Akita Shanghai vegetable’	“油冬青菜” ‘Youdong vegetable’	“黑叶矮脚油冬” ‘Aijiao black leaf vegetable’
0	11.77±0.55a	9.63±0.40a	9.23±0.40a
0.5	10.70±0.75b	9.43±0.30a	8.80±0.40ab
1.0	8.97±0.30cd	8.80±0.25b	8.37±0.10bc
5.0	8.20±0.35d	8.13±0.15c	7.77±0.35c
10.0	5.33±0.35ef	5.57±0.50d	5.47±0.35de
20.0	4.60±0.35fg	4.77±0.30e	5.00±0.20e
50.0	4.13±0.25g	3.90±0.25f	4.23±0.70f
平均 Average	7.67±3.82a	7.18±2.87a	6.98±2.50a

### 2.2 不同 Cd 浓度处理对青菜生物量的影响

由表 4 可知,Cd 处理浓度为 0.5 mg/L 时,与对照相比,3 个品种青菜植株重量差异均不显著。Cd 处理浓度为 1.0 mg/L 时,与对照相比,3 个品种青菜的重量分别下降了 26.62%、20.12%、22.00%,且差异显著 ( $P < 0.05$ )。Cd 处理浓度超过 1.0 mg/L 时,3 个品种青菜的重量均下降,且与对照相比差异显著 ( $P < 0.05$ ),且随着 Cd 浓度增加抑制作用增强。

表 4 Cd 对青菜植株重量的影响

Table 4 Effect of Cd on vegetable weight g

Cd 处理浓度 Concentration of Cd /(mg · L <sup>-1</sup> )	“秋田上海青” ‘Akita Shanghai vegetable’	“油冬青菜” ‘Youdong vegetable’	“黑叶矮脚油冬” ‘Aijiao black leaf vegetable’
0	4.81±0.42a	5.02±1.02a	4.09±0.56a
0.5	4.86±0.78a	4.99±0.59a	4.17±0.51a
1.0	3.77±0.53b	4.01±0.42b	3.19±0.48b
5.0	2.30±0.19c	2.07±0.18c	1.86±0.36c
10.0	1.71±0.27d	1.47±0.17d	1.19±0.16d
平均 Average	3.49±1.55a	3.51±1.78a	2.90±1.45b

由表 5 可知,Cd 处理浓度为 0.5 mg/L 时,3 个品种地上部分高度与对照比差异不显著。Cd 处理浓度为 1.0 mg/L 时,3 个品种青菜的地上部分高度和对照比,分别下降了 26.28%、17.16%、17.62%,且差异显著 ( $P < 0.05$ )。Cd 处理浓度超过 1.0 mg/L 时,3 个品种青菜的地上部分高度与对照相比均差异显著 ( $P < 0.05$ ),且随着 Cd 浓度增加抑制作用增强。

由表 6 可知,Cd 处理浓度为 0.5 mg/L 时,3 个品种青菜地下部分根长较对照有所上升,但差异不显著。Cd 处理浓度为 1.0 mg/L 时,3 个品种青菜地下部分根长与对照比分别降低了 7.72%、5.39%、7.02%,差异也不显著。Cd 处理浓度超过 5.0 mg/L 时,3 个品种青菜的地下根长与对照比差异显著 ( $P < 0.05$ ),且随着 Cd 浓度增加抑制作用增强。

表 5 Cd 对青菜植株地上部分高度的影响

Table 5 Effect of Cd on the aboveground height of vegetable

cm

Cd 处理浓度 Concentration of Cd/(mg·L <sup>-1</sup> )	“秋田上海青” ‘Akita Shanghai vegetable’	“油冬青菜” ‘Youdong vegetable’	“黑叶矮脚油冬” ‘Aijiao black leaf vegetable’
0	11.53±0.95a	5.07±0.80a	6.47±0.55a
0.5	12.17±0.85a	5.77±0.95a	7.33±0.70a
1.0	8.50±1.90b	4.20±1.50b	5.33±1.35b
5.0	4.37±0.35c	2.93±0.85c	2.57±0.40c
10.0	3.27±0.85c	2.63±0.60d	2.40±0.55c
平均 Average	7.97±4.13a	4.12±1.22b	4.82±2.03b

在 Cd 处理下,“秋田上海青”、“油冬青菜”的植株重  
量显著大于“黑叶矮脚油冬”(P<0.05);“秋田上海青”  
(P<0.05);不同品种间地下部分根长无显著差异。

表 6 Cd 对青菜植株地下根长的影响

Table 6 Effect of Cd on underground root length of vegetable

cm

Cd 处理浓度 Concentration of Cd/(mg·L <sup>-1</sup> )	“秋田上海青” ‘Akita Shanghai vegetable’	“油冬青菜” ‘Youdong vegetable’	“黑叶矮脚油冬” ‘Aijiao black leaf vegetable’
0	19.43±0.95ab	18.57±2.80ab	17.10±2.55ab
0.5	20.97±2.85a	19.60±2.15a	18.17±1.95a
1.0	17.93±1.90b	17.57±1.93b	15.90±1.73b
5.0	7.87±0.95c	7.43±0.85c	6.37±1.02c
10.0	5.83±0.85c	5.47±0.60d	5.67±0.75c
平均 Average	14.41±6.80a	13.73±6.55a	12.64±5.72a

## 2.3 不同 Cd 浓度处理对青菜叶绿素含量的影响

由表 7 可知,Cd 处理浓度为 0.5 mg/L 时,“秋田上海青”、“油冬青菜”的叶绿素含量分别下降了 3.65%、8.57%,与对照比,差异显著(P<0.05),而“黑叶矮脚油冬”差异不显著。Cd 处理浓度为 1.0 mg/L 时,3 个品种青菜的叶绿素含量与对照比分别降低了 63.50%、

83.57%和 85.38%,差异显著(P<0.05)。Cd 浓度超过 1.0 mg/L 时,3 个品种叶绿素含量和对照相比显著下降,且随着 Cd 浓度增加抑制作用增强。在 Cd 处理下,不同品种的叶绿素含量差异显著(P<0.05)。叶绿素含量高低为“黑叶矮脚油冬”>“油冬青菜”>“秋田上海青”。

表 7 Cd 对青菜叶绿素含量的影响

Table 7 Effect of Cd on chlorophyll content of vegetable

mg/L

Cd 处理浓度 Concentration of Cd/(mg·L <sup>-1</sup> )	“秋田上海青” ‘Akita Shanghai vegetable’	“油冬青菜” ‘Youdong vegetable’	“黑叶矮脚油冬” ‘Aijiao black leaf vegetable’
0	1.37±0.21a	2.22±0.37a	2.82±0.35a
0.5	1.32±0.09b	1.96±0.22b	2.73±0.46a
1.0	0.50±0.11c	0.46±0.12c	0.51±0.15b
5.0	0.20±0.06d	0.21±0.06d	0.25±0.05c
10.0	0.15±0.05d	0.19±0.02d	0.23±0.07c
平均 Average	0.71±0.57c	1.00±0.34b	1.31±0.48a

## 2.4 不同 Cd 浓度对青菜可溶性糖含量的影响

由表 8 可知,Cd 浓度为 0.5 mg/L 时,“秋田上海青”、“油冬青菜”的可溶性糖含量分别下降了 14.47%、

10.30%,与对照相比差异显著(P<0.05),“黑叶矮脚油冬”差异不显著。Cd 浓度为 1.0 mg/L 时,3 个品种青菜的可溶性糖含量分别下降了 16.93%、12.98%和 14.46%,

表 8 Cd 对青菜可溶性糖含量的影响

Table 8 Effect of Cd on soluble total sugar content of vegetable

μg

Cd 处理浓度 Concentration of Cd/(mg·L <sup>-1</sup> )	“秋田上海青” ‘Akita Shanghai vegetable’	“油冬青菜” ‘Youdong vegetable’	“黑叶矮脚油冬” ‘Aijiao black leaf vegetable’
0	149.88±6.06ac	151.05±7.36a	149.40±7.15a
0.5	128.20±5.54bc	135.49±8.92b	145.40±5.06ab
1.0	124.50±3.02c	131.45±4.44c	127.79±9.89bc
5.0	97.96±5.62d	114.94±4.99d	118.93±10.28c
10.0	73.68±4.50e	90.43±8.20e	96.53±7.69d
平均 Average	114.85±38.10b	124.47±21.31a	127.51±26.44a

与对照相比,差异显著( $P<0.05$ )。Cd 浓度超过 1.0 mg/L 时,3 个品种的可溶性糖含量和对照相比均显著下降( $P<0.05$ ),且随着 Cd 浓度增加抑制作用增强。在 Cd 处理下,“秋田上海青”的可溶性糖含量显著低于“油冬青菜”、“黑叶矮脚油冬”。

## 2.5 青菜 Cd 富集能力的分析

由表 9 可知,随着 Cd 处理浓度的增加,青菜 Cd 富集量呈现上升趋势。在 Cd 处理浓度为 0.5 mg/L 时,与对照相比,“秋田上海青”的 Cd 富集有所下降,但差异不显著,“油冬青菜”、“黑叶矮脚油冬”的 Cd 富集增加,且差异显著( $P<0.05$ )。在 Cd 处理浓度超过 1.0 mg/L 时,3 个品种的 Cd 富集量和对照相比均显著增加( $P<0.05$ ),且随着浓度增加 Cd 富集量增加。“秋田上海青”的 Cd 富集量在 Cd 处理浓度为 0.5 mg/kg 时为 0.115 mg/kg,超过国际限值(0.02 mg/kg);“油冬青菜”、“黑叶矮脚油冬”的 Cd 富集量在 Cd 处理浓度为 0.0 mg/kg 时分别为 0.136、0.183 mg/kg,都超过国际限值。在 Cd 处理下,不同品种青菜的 Cd 富集能力差异显著( $P<0.05$ )。Cd 富集能力高低为:“黑叶矮脚油冬”>“油冬青菜”>“秋田上海青”,“黑叶矮脚油冬”比“秋田上海青”显著高出 2.557 mg/kg。

表 9 不同 Cd 浓度下青菜 Cd 富集量的差异

Table 9 The differences of vegetable malondialdehyde content of Cd

Cd 处理浓度 Concentration of Cd /(mg · L <sup>-1</sup> )	“秋田上海青” ‘Akita Shanghai vegetable’ /(mg · kg <sup>-1</sup> )	“油冬青菜” ‘Youdong vegetable’ /(mg · kg <sup>-1</sup> )	“黑叶矮脚油冬” ‘Aijiao black leaf vegetable’ /(mg · kg <sup>-1</sup> )
0.0	0.072±0.015d	0.136±0.020e	0.183±0.025e
0.5	0.115±0.030d	0.264±0.025d	0.372±0.070d
1.0	0.594±0.055c	0.925±0.137c	1.073±0.115c
5.0	1.387±0.140b	5.742±0.523b	5.983±0.930b
10.0	2.503±0.150a	8.169±1.165a	9.955±1.059a
平均 Average	0.934±0.22c	3.045±0.50b	3.491±0.38a

## 3 讨论

发芽率是对种子发芽评价常用的指标,反映了种子发芽的速度<sup>[12]</sup>。王兴明等<sup>[13]</sup>指出 Cd 对植物种子发芽率的影响呈现低促高抑现象。该试验结果表明,青菜种子在低浓度 Cd 处理下,发芽率随着 Cd 浓度的升高而上升,在高浓度 Cd 处理下则相反。与王兴明等<sup>[13]</sup>的试验结果相同。造成这种低促高抑现象的原因可能是当 Cd 浓度较低时,胚生理活性提高,从而有利于种子萌发;当 Cd 浓度较高时,Cd 对胚有伤害作用,并且降低酶的活性,抑制种子内有机物质的分解,不足以为种子萌发提供相应的物质和能量,从而抑制种子发芽<sup>[14-15]</sup>。同时试验结果还显示,在 Cd 浓度为 20.0 mg/L 时,对“秋田上海青”、“油冬青菜”的发芽率表现出显著抑制( $P<0.05$ );在 Cd 浓度为 50.0 mg/L 时,对“黑叶矮脚油冬”的发芽率表现出显著抑制( $P<0.05$ )。这种 Cd 浓度较

高条件下发芽的青菜种子,对人类食用青菜的健康安全性不利。

试验结果表明,在 Cd 浓度为 0.5 mg/L 时,青菜生物量有所增加;超过 0.5 mg/L 时,青菜重量和地上部分高度和对照相比均显著降低( $P<0.05$ )。这与刘俊等<sup>[16]</sup>的研究结果一致,即低浓度的 Cd 对大豆的生物量和株高的增长有刺激作用;高浓度 Cd 能抑制大豆的生物量和株高的增长,且浓度越高抑制越明显。原因可能是低浓度的 Cd 胁迫能刺激植株地上部分的生长素(IAA)和赤霉素(GA)的合成,而 IAA 和 GA 能显著增加植物的生物量和植株高度<sup>[17]</sup>。环境中的重金属通过影响植株生理生化,毒害植株的营养生长<sup>[18]</sup>。

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,其含量的高低直接影响植物正常的光合作用甚至新陈代谢。该试验结果表明,随着 Cd 浓度的增加,青菜叶绿素含量下降。叶绿素含量下降的原因可能是重金属干扰植株光合作用中电子传递,使酶活性降低甚至失活,导致能量减少,这影响了叶绿素的合成<sup>[19]</sup>。也有人认为,重金属引起植物内活性氧自由基的增加,这些自由基攻击植物叶绿体,从而破坏叶绿素结构,使叶绿素含量降低<sup>[20]</sup>。同时该试验结果还表明,“秋田上海青”、“油冬青菜”的叶绿素含量在 Cd 浓度为 0.5 mg/L 时显著下降( $P<0.05$ ),“黑叶矮脚油冬”则在 Cd 浓度为 1.0 mg/L 时显著下降( $P<0.05$ ),3 个品种的可溶性糖含量显著下降的浓度和叶绿素显著下降的浓度一致。而叶绿素含量的多少决定着植物光合作用能力的大小<sup>[21]</sup>,叶绿素含量下降表明光合作用的下降。这和孙赛初等<sup>[22]</sup>的结果相吻合:叶片内光合作用受阻可能会使植株内可溶性糖含量下降。原因可能是青菜叶绿素降低是光合作用受到抑制的主要原因,光合作用受抑,降低有机物和能量的积累,从而影响植物的生长生理<sup>[23]</sup>。

植株体内的重金属含量和积累量是衡量植物对重金属修复能力的一个关键指标<sup>[24]</sup>。试验结果表明,3 个品种青菜的 Cd 积累量差异显著,且 Cd 的积累量“秋田上海青”<“油冬青菜”<“黑叶矮脚油冬”。这与前人研究结果一致,即蔬菜 Cd 的积累存在品种的差异,这与该试验结果相吻合<sup>[25]</sup>。原因可能是不同品种青菜内的 MT 基因在结构和表达上的差异很大,而 MT 基因在对重金属的解毒、金属离子的运输等方面起作用,因此影响重金属的积累<sup>[26]</sup>。影响蔬菜 Cd 积累的原因除了品种之外,还有蔬菜种类、蔬菜部位、外界重金属含量、环境因子等<sup>[27]</sup>。通过 3 个品种青菜植株(可食部分)的 Cd 含量的比较可知,3 个品种青菜的 Cd 积累量大小为“黑叶矮脚油冬”>“油冬青菜”>“秋田上海青”,“秋田上海青”的 Cd 积累量在 Cd 浓度为 1.0 mg/kg 时超过国际限值;“油冬青菜”、“黑叶矮脚油冬”的 Cd 积累量在 Cd 浓度为

0.5 mg/kg 时就超过了国际限值。因此为了人类健康考虑,在土壤 Cd 含量比较高的农地上种植青菜时应该选用“秋田上海青”,摒弃“油冬青菜”、“黑叶矮脚油冬”,以减少 Cd 被青菜吸收而污染食物链,从而对人类健康产生威胁。

### 参考文献

- [1] 李睿. 我国 66 种蔬菜矿质营养成分的综合评价[J]. 广东微量元素科学, 2008, 15(9): 8-16.
- [2] 陈禹, 杨勤兵. 医学典籍记载 50 种蔬菜食疗作用的分析研究[J]. 中国民间疗法, 2011, 19(11): 11-12.
- [3] 王辉, 王宜娟, 黎星辉. 洛阳市蔬菜基地土壤重金属含量对蔬菜安全性的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(21): 369-372.
- [4] 程文伟. 甘蔗对铅和镉的吸收特性及生理响应研究[J]. 杭州: 浙江工商大学, 2009.
- [5] 张呈祥, 陈为峰. 德国鸢尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2165-2172.
- [6] 杨若鹏, 田登科, 张祖芸. 重金属复合污染对青菜生长和生理生化指标的影响[J]. 江西农业学报, 2013, 25(1): 28-30.
- [7] 刘景红, 陈玉成. 杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜 Pb、Zn 和 Cu 含量的环境质量评价[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 42-44.
- [8] 宗良纲, 孙静克, 沈倩宇. Cd、Pb 污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1): 63-68.
- [9] 凌乃规. 蔬菜品种重金属元素含量差异性分析[J]. 广西农业科学, 2001(1): 13-15.
- [10] 沈彤, 刘明月, 贾来. 长沙地区蔬菜重金属污染初探[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005, 31(1): 87-89.
- [11] 侯米红. 不同配方营养液对三种叶菜产量和品种的影响[J]. 内蒙古民族大学学报, 2011, 9(5): 541-544.
- [12] 魏本杰, 曾晓希. 火焰和石墨炉原子吸收分光光度法检测镉的精度分析[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 1(1): 16-19.
- [13] 王兴明, 李晶, 涂俊芳. Cd 对油菜种子发芽与幼苗生长的生态毒性[J]. 上海通报, 2006, 37(6): 1218-1223.
- [14] 周青, 黄晓华, 张一. 镉对种子萌发的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 156-158.
- [15] 张义贤. 重金属对大麦(*Hordeum vulgare*)毒性的研究[J]. 环境科学学报, 1998, 17(2): 199-201.
- [16] 刘俊, 廖柏寒, 周航. 镉胁迫下大豆生长发育的生理生态特征[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 333-340.
- [17] 黄运湘, 廖柏寒, 肖浪涛. 镉处理对大豆幼苗生长及激素含量的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1398-1401.
- [18] 张媛华. Cd 对植物生长发育的影响[J]. 农产品加工, 2012(8): 199-201.
- [19] KAHLE H. Response of trees of heavy metals[J]. *Envir Exp Bot*, 1993, 33: 99-119.
- [20] 何翠屏, 王慧忠. 重金属镉、铅对草坪植物根系代谢和叶绿素水平的影响[J]. 湖北农业科学, 2003(5): 60-63.
- [21] 杜天庆, 杨锦忠. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4475-4482.
- [22] 孙赛初, 王焕校, 李启任. 水生维管束植物受隔污染后的生理变化及受害机制初探[J]. 植物生理学报, 1985, 11(2): 113-121.
- [23] 杨彦明, 张胜气, 张润生. 外源激素对油菜角果叶绿素和可溶性糖含量的影响[C]. 中国作物学会学术研讨会, 2007: 422-426.
- [24] 潘秀, 石福臣, 刘立民. Cd、Zn 及其交互作用对互花米草中重金属的积累[J]. 植物研究, 2012, 32(6): 717-723.
- [25] 陈瑛, 李廷强, 杨肖娥. 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.
- [26] 姜芳. 白菜对硝酸盐和重金属 Cd 的吸收及积累差异研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [27] 李秋华, 白慧卿, 彭滨. 螺旋藻生物富集镉的影响因素研究[J]. 广州化学, 2007, 32(3): 26-30.

## Cd Enrichment in Vegetables and Its Effects on Physical and Chemical Properties

LIANG Qiaoling, YANG Hui

(College of Ecology, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000)

**Abstract:** Three *Brassica chinensis* var. *chinensis* ‘Akita Shanghai vegetable’, ‘Youdong vegetable’, ‘Aijiao black leaf vegetable’ were used as test materials, the effect of different concentration of Cd on seed germination, and under the hydroponic conditions, physiological and biochemical, and green vegetables Cd accumulation were studied. The results showed that, the effect of Cd on seed germination was that, low concentration would promote growth while high might inhibit the growth of the seed. When Cd concentration of 5.0 mg/L, three varieties of germination rate reached the highest, were 91.30%, 90.00% and 89.30% respectively. When it was 20.0 mg/L, seed germination rate of ‘Akita Shanghai vegetable’, ‘Youdong vegetable’ tended to be lower significantly ( $P < 0.05$ ). When it was 50.0 mg/L, seed germination rate of ‘Aijiao black leaf vegetable’ tended to be lower significantly ( $P < 0.05$ ). When it was more than 1.0 mg/L, the green biomass might be inhibited significantly ( $P < 0.05$ ). With the increase of Cd concentration, the Cd accumulation ability of different varieties of vegetables increased. Besides, When Cd concentration more than 1.0 mg/L, the ‘Akita Shanghai vegetable’ Cd accumulation ability was higher than control, and achieved significant difference ( $P < 0.05$ ). With the increasing of the Cd concentration, Cd accumulation of three vegetables increased. While the Cd accumulation ability were significantly different, that was, ‘Akita Shanghai vegetable’ Cd concentration was significantly lower than the other two varieties.

**Keywords:** green vegetables; Cd; seed germination; biomass; Cd enrichment