

## 重金属镉(Cd)胁迫对水芹生长及生理特性的影响

张静, 赵秀侠, 汪翔, 卢文轩\*

安徽省农业科学院水产研究所, 合肥230031

**摘要:** 采用水培试验, 在不同镉(Cd)浓度条件下, 研究镉在水芹各个器官内的积累及生长规律, 同时检测镉对水芹的生理生化指标的影响, 包括水芹根部细胞的超微结构、叶绿素含量、可溶性蛋白含量、根系活力指标。结果表明, 在低浓度Cd<sup>2+</sup>处理下, 实验组与对照组株高和根数无区别( $P>0.05$ ); 高浓度处理下, 水芹株高和根数都显著减少, 鲜重生物量也明显降低, 地上生物量与地下生物量比值升高。当Cd<sup>2+</sup>达到2 mg·L<sup>-1</sup>时根部细胞逐渐失去原有基本形态, 胞浆内容物密度增大, 细胞壁部分出现断裂等特征。根、茎和叶三种器官镉元素含量随着Cd<sup>2+</sup>浓度升高而增加, 当Cd<sup>2+</sup>浓度为10 mg·L<sup>-1</sup>时, 根、茎和叶中镉元素含量达到最大, 分别为(422.726±0.023)、(78.645±0.012)和(49.118±0.041) mg·kg<sup>-1</sup>; 吸收效率和转运效率随着Cd<sup>2+</sup>浓度升高而逐渐增高, 富集系数在Cd<sup>2+</sup>浓度为1 mg·L<sup>-1</sup>时达到最大, 随后呈递减趋势。此外, 在高浓度Cd<sup>2+</sup>的作用下, 叶绿素总量、叶绿素a和可溶性蛋白总体均呈现下降趋势。

**关键词:** 水芹; 镉; 富集系数; 超微结构; 根

## Effects of Cadmium Stress on the Growth and Physiological Property of *Oenanthe javanica*

ZHANG Jing, ZHAO Xiu-Xia, WANG Xiang, LU Wen-Xuan\*

Fisheries Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China

**Abstract:** A solution culture was carried out to study growth pattern of cadmium accumulation in various organs and examined the effect of cadmium on physiological property of *Oenanthe javanica*, including cell ultrastructure of root, chlorophyll content and root activity in *Oenanthe javanica* at different concentrations of cadmium (Cd). The results showed that the treatment with low concentration of Cd<sup>2+</sup> in the experimental groups and control group plant height and the number of root had no difference ( $P>0.05$ ). Instead, plant height and the number of the root significantly reduced, as well as fresh weight biomass at high concentrations. In addition, aboveground biomass and underground biomass ratio value increased, indicating obvious influence on the root of *Oenanthe javanica* with the Cd<sup>2+</sup> concentration increasing. Cell form of the root had gradually loss, cytoplasm contents density increased and part of cell wall was broken at Cd<sup>2+</sup> concentration of 2 mg·L<sup>-1</sup>. Cd content of the three organs increased in the overall trend with the Cd<sup>2+</sup> concentration increasing. The maximum cadmium content of roots, stems and leaves were (422.726±0.023), (78.645±0.012) and (49.118±0.041) mg·kg<sup>-1</sup> at Cd<sup>2+</sup> concentration of 10 mg·L<sup>-1</sup>. The absorption efficiency and transport efficiency were gradually increased, while the concentration coefficient reached maximum at Cd<sup>2+</sup> concentration of 1 mg·L<sup>-1</sup>, then gradually decreased with the Cd<sup>2+</sup> concentration increasing. Finally, the results also showed Cd<sup>2+</sup> lead to a downward trend of the total chlorophyll, chlorophyll a and soluble proteins.

**Key words:** *Oenanthe javanica*; cadmium; concentration coefficient; ultrastructure; root

现代工业中, 材料和化工领域废水和废物中含有大量的镉(Shah等2001), 而大量废水和废物随意排放, 导致环境中镉污染严重(Hassan等2005)。镉元素在自然环境中常以化合物的形式存在(唐秋香和缪新2013), 因此, 相对于其他重金属元素来说, 更容易被植物所吸收, 对植物造成的危害也更大, 是生物毒性最强的重金属之一(Brigitta等2014)。水生植物对重金属的吸收和富集有3种模

式: (1)吸附在根的外围; (2)转运进根系中; (3)通过根系继续向上运输(熊春晖等2012)。重金属在水

收稿 2015-08-14 修定 2015-11-10

资助 安徽省院士工作站项目(科人[2014] 12号)、院长青年基金项目(14B0533)、院创新团队项目(11c0505)和省工程中心项目(皖科[2010]123号)。

\* 通讯作者(E-mail: ahfishery@163.com; Tel: 0551-65147122)。

生植物体通过根系向上运输和富集就会影响植株的光合作用、呼吸代谢、渗透调节以及活性氧的平衡,因此利用水生植物来研究镉对植物的光合作用、抗逆性以及抗氧化性的影响,为水生植物对水体修复提供依据。芦苇、香蒲和凤眼莲等水生植物被应用于重金属水体污染的治理的研究(申华等2014),水生植物可以被构建成水体修复系统,在水体修复中非常有潜能。水芹是水生蔬菜的一种,嫩叶和叶柄可以作为蔬菜食用,口味清香独特,其营养和药用价值远远高于普通蔬菜。有研究表明水芹广泛分布在浅水处和河沟,对污水有一定的净化作用(罗竞等2013)。本研究选用水芹作为研究的对象,在不同浓度的镉的水培养条件下,初步研究水芹各部分对镉的富集、吸收、转运效率和根部生理状态变化,为水芹的水环境修复功能提供科学的参考依据,对环境保护有一定的意义。

## 材料与方法

### 1 材料

水芹(*Oenanthe javanica*)苗购自安徽安庆山泉水生蔬菜研究所,采用浮床无基质栽培方式进行培养。

### 2 方法

将水芹苗进行生根处理,数天后,选择长势良好、株高和鲜重一致、多新鲜根的水芹苗留为试验用。将水芹苗移入400 mL含有不同 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度的Hoaglands营养液(余史丹等2015)中继续培养。试验总共用水芹苗90株,采用5个镉浓度梯度(0.2、1、2、5、10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )和一个空白对照组, $\text{Cd}^{2+}$ 由 $\text{CdCl}_2$ 提供,每个处理3个平行,每个平行选择5株植株。每天10 h的光照(15 W日光灯),光照时培养温度为25  $^{\circ}\text{C}$ 。10 d后检测 $\text{Cd}^{2+}$ 对水芹生长状态和生理特征影响。

测定植物的株高、根长、根数、鲜重生物量、干重生物量等生长指标,用游标卡尺测量其长度,电子天平测量其重量。

根部细胞组织切片和电镜:选取不同浓度镉处理下10 d样品。取根尖组织1  $\text{mm}^3$ 大小,固定于2.5%戊二醛(磷酸缓冲液 pH 7.0)中6 h后,于1%锇酸中固定1 h,系列浓度酒精脱水,丙酮过夜,环氧树脂812渗透包埋,LKB-NOVA超薄切片机切片,

片厚约70 nm,醋酸双氧铀和柠檬酸铅染色,JEM-1230电镜观察(张海艳和高荣岐2013)。

水芹根茎叶Cd元素含量测定:将水芹用纯水洗净,根、茎和叶进行分离,105  $^{\circ}\text{C}$ 下杀青30 min,再在60  $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重。磨细、过筛,称取0.5 g进行湿热法消化,按照石墨炉原子吸收光谱法测定(Rajagopal等2000)。

鲜叶叶绿素含量的测定:二甲亚砷法(刘柿良等2015)。

可溶性蛋白含量的测定:Bradford考马斯亮蓝G-250法(徐臣善2014)。

根系活力的测定:甲烯蓝法(项阳等2015)。

### 3 数据分析

所有测定数据均为3次重复实验的平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ SD),并用SPSS 17.0进行方差分析,经分析有效的数据( $P<0.05$ )进行多重分析比较。

吸收效率(%)=整株金属总量/根系干重 $\times$ 100

转运系数=植株地上部镉含量/地下部镉含量

富集系数=地上部镉含量/溶液中镉含量

## 实验结果

### 1 $\text{Cd}^{2+}$ 胁迫对水芹生理状态影响

预先培养生长状况良好的水芹苗,均一性一致,经过不同浓度 $\text{Cd}^{2+}$ 培养后,生长状况产生显著性的差异。在低浓度 $\text{Cd}^{2+}$ 水样培养条件下,水芹生长状态与对照组无明显区别,甚至有促进其生长表现;在中度浓度培养条件下,水芹叶子稍微变黄;而在高浓度条件下,水芹叶子变黄、枯萎,根部颜色加深,出现明显根部腐烂(图1)。表1结果显示,水芹的株高、根数和生物量受抑制程度随着 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度的升高而增强。与对照组相比,培养10 d的水芹株高增长量、根数增长量、生物量与对照组相比分别减少41.97%、85%、33.18%,而地上与地下生物量之比增加48.33%。方差分析结果表明,与对照组比较,浓度高于5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Cd}^{2+}$ 显著抑制水芹的株高增长,而较低浓度的 $\text{Cd}^{2+}$ 显著抑制根数和生物量的增长。水芹生物量和地上与地下生物量比值在 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度高于2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时随着的升高而增加,与对照组存在显著性差异。

图2根部超微结构显示,对照组和0.2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cd}^{2+}$ 处理情况下水芹根细胞细胞器结构完整,细胞

图1 Cd<sup>2+</sup>胁迫对水芹根部影响Fig.1 Effect of Cd<sup>2+</sup> stress on the root of *Oenanthe javanica*

壁和细胞核清晰可见, 细胞壁界限明显, 在细胞内围分布较少数量的线粒体; 1 mg·L<sup>-1</sup> Cd<sup>2+</sup>处理下, 细胞壁和核膜增厚, 细胞核电子密度增高, 但仍有完整的细胞结构和细胞器结构; 2 mg·L<sup>-1</sup> Cd<sup>2+</sup>处理时, 细胞壁和细胞膜分离, 液泡中离子大颗粒逐渐增多, 细胞器结构模糊, 胞浆内容物也呈固缩性变化, 细胞壁部分出现断裂; 5 mg·L<sup>-1</sup> Cd<sup>2+</sup>处理后, 细胞壁完全断裂, 细胞器消失, 出现扭曲, 10 mg·L<sup>-1</sup> Cd<sup>2+</sup>处理时细胞解体。

植物根系是植物吸收营养元素重要器官, 因此根部的生长状态会直接影响地上部分代谢活动。从图3可以看出, 随着镉浓度提高, 水芹的根

表1 Cd<sup>2+</sup>胁迫对水芹生长的影响Table 1 Effect of Cd<sup>2+</sup> stress on the growth of *Oenanthe javanica*

Cd浓度/mg·L <sup>-1</sup>	株高增长量/cm	根数增长量/条	生物量(干重)/g	地上与地下生物量比值
0 (对照组)	22.30±1.42 <sup>ab</sup>	20±5 <sup>aA</sup>	2.23±0.09 <sup>bAC</sup>	1.20±0.15 <sup>bB</sup>
0.2	25.60±1.12 <sup>aA</sup>	16±3 <sup>abAB</sup>	2.35±0.05 <sup>aA</sup>	1.32±0.06 <sup>bB</sup>
1	18.50±2.62 <sup>ab</sup>	11±4 <sup>bcB</sup>	2.04±0.10 <sup>bcC</sup>	1.34±0.05 <sup>bB</sup>
2	16.40±1.89 <sup>ab</sup>	8±3 <sup>bcB</sup>	1.76±0.12 <sup>cb</sup>	1.56±0.14 <sup>bcAC</sup>
5	12.75±1.42 <sup>b</sup>	5±3 <sup>cb</sup>	1.53±0.04 <sup>cb</sup>	1.64±0.04 <sup>ca</sup>
10	12.36±1.74 <sup>B</sup>	3±3 <sup>cb</sup>	1.49±0.12 <sup>cb</sup>	1.78±0.05 <sup>aA</sup>

表中数值为平均值±标准差(n=3), 同列数据标小写字母为P=0.05的多重比较结果; 大写字母为P=0.01的多重比较结果。相同的大小写字母表示这两组数据差异不显著(P>0.05); 如没有相同的大小写字母, 则表示这两组数据差异显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)。表2和3同此。

系活力逐渐降低。在10 mg·L<sup>-1</sup> Cd<sup>2+</sup>处理条件下, 水芹根系的活力与对照组相比下降37%。在高浓度镉处理下, 水芹根数有明显减少且腐烂, 说明重金属Cd<sup>2+</sup>对水芹根部毒害很大, 这可能与根部大量富集镉元素也有一定关系。

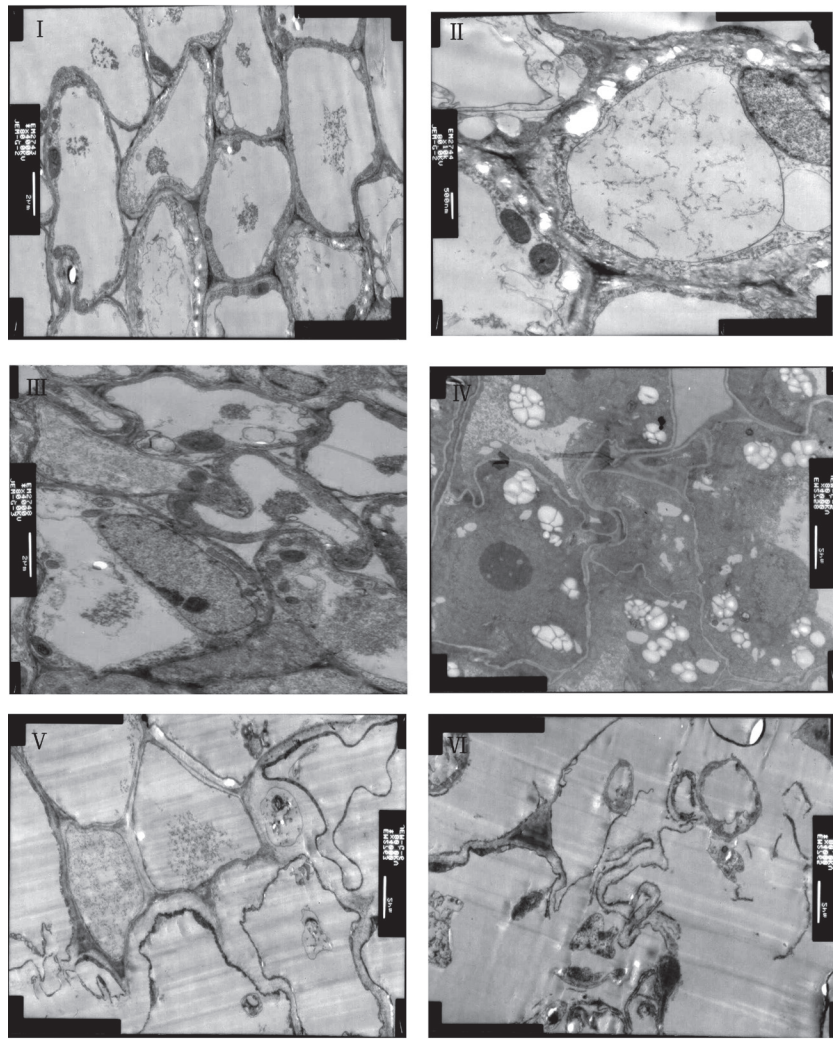
## 2 Cd<sup>2+</sup>胁迫对水芹不同器官Cd元素含量的影响

由表2可知, 在五种不同浓度Cd<sup>2+</sup>培养下, 水芹的根、茎和叶三种器官镉元素含量随着浓度的增高, 总体表现逐渐上升的趋势, 镉在根、茎和叶中

分布为: 根>茎>叶, 根部在整株植物中对镉的富集吸收占比重大。其中Cd<sup>2+</sup>浓度为10 mg·L<sup>-1</sup>, 根、茎和叶中镉元素含量达到最大, 分别为(422.726±0.023) mg·kg<sup>-1</sup>、(78.645±0.012) mg·kg<sup>-1</sup>和(49.118±0.041) mg·kg<sup>-1</sup>。与对照组比较, 培养10 d后根、茎和叶镉含量分别上升99.59%、98.72%和98.77%, 上升呈显著性差异。水芹富集系数在Cd<sup>2+</sup>浓度为1 mg·L<sup>-1</sup>时达到最大, 随后呈递减趋势。在0~10 mg·L<sup>-1</sup>范围内, 随着Cd<sup>2+</sup>浓度的增加, 水芹幼苗对

表2 Cd<sup>2+</sup>胁迫对水芹不同器官Cd元素含量的影响Table 2 Effect of Cd<sup>2+</sup> stress on various organ Cd concentration in *Oenanthe javanica*

Cd浓度/mg·L <sup>-1</sup>	根(Cd干重)/mg·kg <sup>-1</sup>	茎(Cd干重)/mg·kg <sup>-1</sup>	叶(Cd干重)/mg·kg <sup>-1</sup>	富集系数	转运系数	吸收效率/%
0 (对照组)	41.664±0.034 <sup>eE</sup>	0.458±0.057 <sup>eE</sup>	0.538±0.032 <sup>dE</sup>	/	0.012 <sup>c</sup>	10.66 <sup>eE</sup>
0.2	44.090±0.043 <sup>eE</sup>	1.318±0.021 <sup>dD</sup>	0.646±0.067 <sup>dE</sup>	9.82	0.022 <sup>c</sup>	11.51 <sup>eE</sup>
1	131.745±0.056 <sup>dD</sup>	12.799±0.071 <sup>dC</sup>	5.374±0.056 <sup>cd</sup>	18.17	0.069 <sup>b</sup>	37.48 <sup>dD</sup>
2	194.159±0.067 <sup>cC</sup>	20.935±0.032 <sup>cb</sup>	12.734±0.037 <sup>c</sup>	16.83	0.087 <sup>b</sup>	56.96 <sup>cC</sup>
5	284.663±0.019 <sup>bb</sup>	59.717±0.093 <sup>b</sup>	8.213±0.019 <sup>bb</sup>	13.59	0.119 <sup>a</sup>	88.15 <sup>bb</sup>
10	422.726±0.023 <sup>aA</sup>	78.645±0.012 <sup>aA</sup>	49.118±0.041 <sup>aA</sup>	12.78	0.151 <sup>a</sup>	127.72 <sup>aA</sup>

图2  $\text{Cd}^{2+}$ 胁迫下水芹根部细胞超微结构Fig.2 Effect of  $\text{Cd}^{2+}$  stress on the ultrastructure of the root cell in *Oenanthe javanica*

I: 对照细胞,  $\times 4\ 000$ ; II:  $0.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理细胞,  $\times 10\ 000$ ; III:  $1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理细胞,  $\times 4\ 000$ ; IV:  $2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理细胞,  $\times 4\ 000$ ; V:  $5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理细胞,  $\times 4\ 000$ ; VI:  $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理细胞,  $\times 4\ 000$ 。

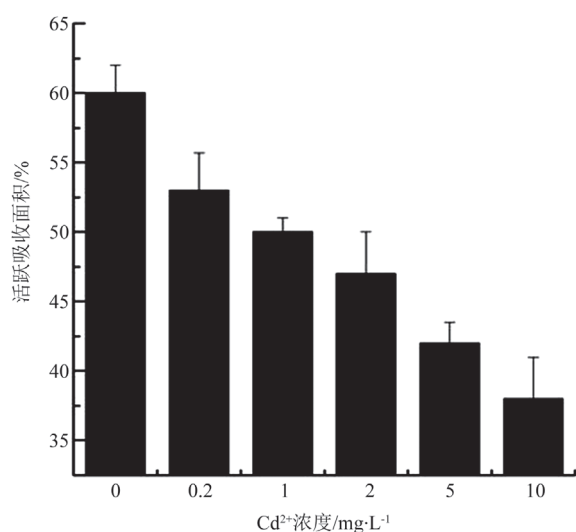
镉的转运系数和吸收效率总体趋势逐渐增大。

### 3 $\text{Cd}^{2+}$ 胁迫对水芹的叶绿素和可溶性蛋白含量影响

表3表明, 低浓度 $\text{Cd}^{2+}$ 能诱导可溶性蛋白含量的增加, 在 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度为 $1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大, 随着 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度逐渐升高可溶性蛋白含量呈显著性降低。叶绿素a和总叶绿素含量在 $1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大, 随后呈下降趋势, 而在 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度为 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时又同时升高。叶绿素a/叶绿素b随着 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度的变化与叶绿素a变化一致。统计分析结果显示, 当 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度升为 $5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 与最大含量相比, 叶绿素总量和叶绿素a均显著下降。同时与叶绿素a一致, 叶绿素a/叶绿素b也显著下降( $P < 0.05$ )。

## 讨 论

随着 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度不断提高, 根数和株高都呈现先升高后下降趋势, 地上和地下生物量比值逐渐升高, 这可能是由于 $\text{Cd}^{2+}$ 在浓度为 $0.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的低浓度时, 对水芹的生长有一定刺激作用。不同 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度处理对水芹的根系影响也不同, 通过检测根系活跃吸收面积, 水芹根系活力逐渐降低。水芹根部随着浓度提高, 根须稀疏且短小, 而且出现腐烂状态。高浓度 $\text{Cd}^{2+}$ 使水芹的根和地上部分都受到很大抑制, 且高浓度 $\text{Cd}^{2+}$ 对根和地上部分抑制作用不一致, 造成了地上部分与地下部分比值逐渐升高,

图3 Cd<sup>2+</sup>胁迫对水芹根系活力的影响Fig.3 Effect of Cd<sup>2+</sup> stress on root activity of *Oenanthe javanica*

一方面说明了高浓度Cd<sup>2+</sup>对水芹根部发育有严重影响,另一方面还受制于水芹转运作用。此试验运用水培的办法,观察到Cd<sup>2+</sup>对水芹根细胞有明显毒害现象,在Cd<sup>2+</sup>含量超过2 mg·L<sup>-1</sup>时,细胞壁和细胞膜分离,细胞器结构模糊,胞浆内容物密度增大,细胞壁部分出现断裂,细胞核高度浓缩,核膜消失,说明当溶液中Cd<sup>2+</sup>达到2 mg·L<sup>-1</sup>时根细胞逐渐失去原有基本形态。

试验表明镉浓度为10 mg·L<sup>-1</sup>,水芹还有一定的生长状态,表示水芹具有较高的镉耐受性。随着Cd<sup>2+</sup>浓度提高,水芹根、茎和叶中镉元素含量都升高,说明水芹对Cd<sup>2+</sup>具有富集作用。镉含量在根、茎和叶中分布不均均为根>茎>叶,而根在整株植物中对镉的富集吸收中占比重最大,0.2 mg·L<sup>-1</sup>低浓度处理时达到95.74%,10 mg·L<sup>-1</sup>高浓度时达

表3 Cd<sup>2+</sup>胁迫对水芹叶绿素和可溶性蛋白含量的影响Table 3 Effect of Cd<sup>2+</sup> stress on chlorophyll and soluble protein in *Oenanthe javanica*

Cd浓度/mg·L <sup>-1</sup>	叶绿素a/mg·g <sup>-1</sup>	叶绿素b/mg·g <sup>-1</sup>	叶绿素a/叶绿素b	总叶绿素/mg·g <sup>-1</sup>	可溶性蛋白/mg·g <sup>-1</sup>
0 (对照组)	9.112±0.042 <sup>c</sup>	2.860±0.012 <sup>a</sup>	3.186±0.456 <sup>e</sup>	11.972±0.122 <sup>c</sup>	2.167±0.034 <sup>b</sup>
0.2	8.436±0.023 <sup>c</sup>	2.692±0.009 <sup>c</sup>	3.134±0.321 <sup>e</sup>	11.128±0.056 <sup>c</sup>	2.231±0.013 <sup>a</sup>
1	10.429±0.035 <sup>aA</sup>	2.859±0.023 <sup>a</sup>	3.647±0.712 <sup>a</sup>	13.289±0.049 <sup>a</sup>	2.367±0.024 <sup>a</sup>
2	7.806±0.023 <sup>bB</sup>	2.550±0.009 <sup>b</sup>	3.061±0.005 <sup>e</sup>	10.357±0.098 <sup>d</sup>	2.043±0.003 <sup>b</sup>
5	7.929±0.017 <sup>bB</sup>	2.550±0.043 <sup>b</sup>	3.110±0.085 <sup>e</sup>	10.478±0.0234 <sup>d</sup>	1.690±0.045 <sup>c</sup>
10	10.328±0.003 <sup>aA</sup>	2.973±0.012 <sup>aA</sup>	3.474±0.043 <sup>b</sup>	12.399±0.071 <sup>b</sup>	1.121±0.003 <sup>d</sup>

到76.79%,对应其地上部分镉含量随处理浓度增高转运系数和吸收效率逐渐提高。水芹富集系数在Cd<sup>2+</sup>浓度为1 mg·L<sup>-1</sup>时达到最大,随后呈递减趋势。本文研究表明,随着Cd<sup>2+</sup>浓度提高,水芹根部吸收效率和转运效率都提高,而镉主要富集在水芹的根部。植物对重金属离子的抗性机制包括排斥和积累,水芹积累镉元素于根部组织,可能形成难溶性化合物或合成特定的有机化合物(Xu等2015)。

叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素,含量的高低能够反映光合作用水平的强弱。叶绿素下降可能是由多种原因所导致的,一种是镉元素与叶绿体中多种酶的巯基结合,叶绿体功能和结构都受到影响,使叶绿素分解(Bhaduri和Fulekar 2012);彭玲等(2015)认为可能是镉元素引起细胞内膜结构破坏,导致叶绿素的下降;此外有研究发现,镉元素可以影响锰元素吸收,进而影响叶绿素

合成(董如茵等2015)。由表3可知,镉对叶绿素a影响要比叶绿素b影响大,导致叶绿素a/b值的变化与叶绿素a呈相同趋势。高浓度的Cd<sup>2+</sup>使叶绿素a含量减小,这可能是由于Cd<sup>2+</sup>被水芹吸收后,与叶绿体中蛋白质的巯基结合,破坏叶绿体的结构或使叶绿体酶活性发生变化,进而影响叶绿体的合成及植物的光合作用(Bhaduri和Fulekar 2012)。

在低浓度镉作用下,可溶性蛋白含量下降速率慢,可能是水芹有一定解毒作用,低浓度镉与水芹DNA结合后,能够刺激水芹体内DNA活性,进而增加蛋白合成(Hall 2002),在高浓度条件下,可能就严重影响可溶性蛋白合成(Andor和Fernando 2011)。植物体内可溶性蛋白有助于维持细胞的正常代谢,它的含量的提高可以增强植物的抗逆性。如合成类金属螯合蛋白、金属硫蛋白、胁迫蛋白等以降低细胞内Cd<sup>2+</sup>浓度,防止Cd敏感酶变性失活,从而能够减轻Cd对植物的毒害作用,但过高

浓度 $\text{Cd}^{2+}$ 则会对蛋白质的合成与代谢起到破坏作用,高浓度 $\text{Cd}^{2+}$ 可抑制DNA的合成,使相关蛋白酶活性上升而加速蛋白质的分解,导致其含量下降。

### 参考文献

- 董如茵,徐应明,王林,赵明阳,梁学峰,孙约兵(2015). 土施和喷施锌肥对镉低积累油菜吸收镉的影响. 环境科学学报, 35 (8): 2589~2596
- 刘柿良,杨容子,马明东,蒋潘,赵燕(2015). 土壤镉胁迫对龙葵幼苗生长及生理特性的影响. 农业环境科学学报, 34 (2): 240~247
- 罗竞,柯卫东,刘玉平,汪李平,刘义满(2013). 水生蔬菜在水体修复中的应用概况. 长江蔬菜, (18): 37~41
- 彭玲,贾芬,田小平,杨晶,屈婵娟,赵小虎(2015). 硒对油菜根尖镉胁迫的缓解作用. 环境科学学报, 35 (8): 2597~2604
- 申华,黄鹤忠,张皓,吴小松(2008). 3种观赏水草对水体镉污染修复效果的比较研究. 水生态学杂志, 1 (1): 52~55
- 唐秋香,缪新(2013). 土壤镉污染的现状与修复研究进展. 环境工程, 31 (S1): 747~750
- 熊春晖,许晓光,卢永恩,欧阳波,张余洋,叶志彪,李汉霞(2012). 铅镉复合胁迫下莲藕对铅镉的富集及其生理变化. 园艺学报, 39 (12): 2385~2394
- 项阳,刘延波,秦利军,赵德刚(2015). 酵母*TPS1*基因促进干旱胁迫下玉米的根系生长. 植物生理学报, 51 (3): 363~369
- 徐臣善(2014). 钙对盐胁迫下小金海棠幼苗生物量及抗氧化系统的影响. 植物生理学报, 50 (6): 817~822
- 余史丹,邱佳妹,王康才,李雨晴,李柯妮,李丽(2015). 铜、锰、锌对麦冬光合特性和矿质元素的影响. 安徽农业大学学报, 42 (1): 143~147
- 张海艳,高荣岐(2013). 不同类型玉米胚乳细胞淀粉体的发育. 植物生理学报, 49 (10): 1105~1111
- Andor V, Fernando L (2011). Cd-induced membrane damages and changes in soluble protein and free amino acid contents in young barley plants. Emir J Food Agric, 23 (2): 130~136
- Bhaduri AM, Fulekar MH (2012). Antioxidant enzyme responses of plants to heavy metal stress. Rev Environ Sci Bio, 11 (1): 55~69
- Brigitta B, Giuseppe L, Ádám S, Brigitta T, Javier A, Ferenc F, Éva S (2014). Changes induced by cadmium stress and iron deficiency in the composition and organization of thylakoid complexes in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Environ Exp Bot, 101 (5): 1~11
- Hall JL (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. J Exp Bot, 53 (366): 1~11
- Hassan MJ, Wang Z, Zhang G (2005). Sulfur alleviates growth inhibition and oxidative stress caused by cadmium toxicity in rice. J Plant Nutr, 28 (10): 1785~1800
- Rajagopal S, Murthy S, Mohanty P (2000). Effect of ultraviolet-B radiation on intact cells of the cyanobacterium *Spirulina platensis*: characterization of the alterations in the thylakoid membranes. J Photoch Photobio A, 54 (1): 61~66
- Shah K, Kumar RG, Verma S, Dubey RS (2001). Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. Plant Sci, 161 (1): 1135~1144
- Xu C, Chen X, Duan D, Peng C, Le T, Shi J (2015). Effect of heavy-metal-resistant bacteria on enhanced metal uptake and translocation of the Cu-tolerant plant, *Elsholtzia splendens*. Environ Sci Pollut Res Int, 22 (7): 5070~5081