

Cd 胁迫下黄菖蒲幼苗根系生长与 Cd 积累的研究

仇 硕, 黄苏珍^①

(江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014)

摘要: 采用水培法研究了 Cd 胁迫对黄菖蒲 (*Iris pseudacorus* L.) 幼苗根系生长和 Cd 含量的影响, 用透射电镜观察了 Cd 胁迫对根尖细胞亚显微结构的影响并确定了 Cd 沉积部位。结果表明, 10 mg · L⁻¹ Cd 处理对黄菖蒲幼苗根系的生长有一定促进作用, 根毛数量及不定根上侧根的数量、密度和长度均高于对照; Cd 浓度高于 25 mg · L⁻¹ 时, 根系的生长发育受到抑制, 上述指标均显著低于对照。用 10 ~ 40 mg · L⁻¹ Cd 处理后, 黄菖蒲幼苗不定根上侧根中的 Cd 含量均显著高于未长侧根的不定根和去掉侧根的不定根 ($P < 0.05$), 说明不定根上的侧根对 Cd 沉积有重要作用。100 mg · L⁻¹ Cd 处理能导致根尖细胞质浓缩、质壁分离和液泡变大, 且大量 Cd 颗粒沉积在细胞壁上和细胞间隙中, 表明细胞壁和细胞间隙对 Cd 的沉积作用可能是黄菖蒲幼苗耐 Cd 胁迫的重要机理之一。

关键词: 黄菖蒲; Cd 胁迫; Cd 沉积; 根系; 超微结构

中图分类号: X173; S564⁺.3; Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0978(2008)03-0033-06

Study on growth and Cd accumulation of root system of *Iris pseudacorus* seedling under Cd stress

QIU Shuo, HUANG Su-zhen^① (Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2008, 17(3): 33-38

Abstract: The growth situation and Cd content of root system of *Iris pseudacorus* L. seedling under Cd stress were studied by water culture method. And the effect of Cd stress on cell ultrastructure of root tip was observed and the depositing position of Cd particles was determined using TEM. The results show that the 10 mg · L⁻¹ Cd stress has a certain promotion function to development and growth of root system of *I. pseudacorus* seedling, and the growth indexes including the number of root hair and the number, density and length of lateral root on adventitious root are all higher than those of the control. If the Cd concentration is above 25 mg · L⁻¹, the growth and development of root system are inhibited, and the above-mentioned growth indexes are all lower than those of the control. The Cd content in lateral root on adventitious root is obviously higher than that in adventitious root without lateral root or cut off lateral root ($P < 0.05$) with 10-40 mg · L⁻¹ Cd stress, which indicates the lateral root may play an important role in Cd depositing. After treated by 100 mg · L⁻¹ Cd, the concentrating cytoplasm, plasmolysis and largen vacuole are observed in root tip cell and a lot of Cd particles deposit on cell wall and in intercellular space. It is concluded that the deposition of cell wall and intercellular space to Cd in root system may be an important factor of *I. pseudacorus* seedling's tolerance to Cd.

Key words: *Iris pseudacorus* L.; Cd stress; Cd depositing; root system; ultrastructure

Cd 是对动物、植物及人类毒性最强的重金属污染物之一, Cd 污染土壤的治理一直是备受关注的研究热点。植物修复是近年兴起的一项治理重金属污染的新技术。目前, 人们对 Cd 超富集植物吸收及忍耐机制的研究虽然已经取得了一定的进展, 但研究对象主要集中于少数十字花科 (Brassicaceae) 植物, 如 *Arabidopsis halleri* (L.) Heynh.、*Thlaspi caerulescens* L. 和 *T. goesingense* 等^[1-5]。

黄菖蒲 (*Iris pseudacorus* L.) 为鸢尾属 (*Iris* L.) 多年生水生植物^[6], 具有较高的观赏价值, 并具有生长快、生物量相对较大、抗性强、管理较粗放等优

收稿日期: 2007-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30270940); 江苏省农业高新技术资助项目(BG2003308)

作者简介: 仇 硕(1977-), 男, 山东平邑人, 硕士, 主要从事观赏植物种质资源抗逆性评价。

^① 通讯作者 E-mail: hsz1959@163.com

点^[7];近年的研究还发现,黄菖蒲对 Cd 有较强的耐性和积累能力^[8]。以黄菖蒲作为 Cd 污染修复植物,可以克服十字花科 Cd 超富集植物普遍存在的生物量偏小的不足。为了探讨黄菖蒲的耐 Cd 机理,为重金属 Cd 污染的植物修复提供理论依据,作者以黄菖蒲为研究对象,研究了 Cd 污染对黄菖蒲根系生长及根尖细胞亚显微结构的影响,并分析了 Cd 的沉积和分布规律。

1 材料和方法

1.1 材料

供试黄菖蒲原产欧洲,于 20 世纪 70 年代引入并栽植于江苏省·中国科学院植物研究所鸢尾种质圃内,供试种子为无性繁殖群体自然结实的当年籽实。实验于 2006 年 4 月至 6 月在南京中山植物园温室内进行,温度 15 ℃ ~ 30 ℃,自然光照。

1.2 方法

1.2.1 Cd 处理方法 挑选饱满种子,用体积分数 0.5% 的 NaClO 溶液消毒 20 min,自来水冲洗数次后于常温下浸种催芽。种子萌发后播种于清洁石英砂中砂培,待幼苗长至株高约 10 cm 时,选择株高基本一致的幼苗置于 500 mL 培养瓶(高度 8 cm,直径 10 cm)中培养,培养瓶外用黑色塑料薄膜包裹(避免根系接受光照),每瓶 3 株,用钻孔的泡沫板固定,以 1/2 Hoagland 营养液预培养 1 周后,换用含 Cd 的 1/2 Hoagland (pH 6.8) 营养液培养。根据预实验及相关参考文献^[8],设置 Cd 浓度分别为 10、25、40 和 100 mg · L⁻¹,Cd 以 CdCl₂ · 2.5H₂O 形式加入,以不含 Cd 的 1/2 Hoagland (pH 6.8) 营养液为对照。每 5 天更换营养液 1 次,每处理 3 次重复。

1.2.2 根毛生长状况观察 处理 20 d 后取样观察根毛的生长状况。每处理随机取 10 条未长出侧根的不定根,在距根冠 3 ~ 4 cm 处取大约 0.5 cm 长的根段制成临时切片,在 OLYMPUS 解剖镜下观察根毛的生长情况并拍照。

1.2.3 根系生长指标测定 处理 42 d 后收获黄菖蒲幼苗用于测定根系的鲜质量和根长等生长指标并观察根系的颜色。随机选取 10 条根用测微尺测量每条根上 10 条根毛的长度。每处理随机取 3 株幼苗用于根鲜质量、根长以及不定根上侧根的数量和长度的测定。根系鲜质量采用 JA2003 型电子天平

称量;用直尺测量 3 株幼苗全部不定根的长度;统计每株幼苗最长 4 条根上所有的侧根数,并选取每株幼苗最长的 4 条根,分别从根基部起取 20 条侧根,用直尺测定其长度。以上指标测定结果均取平均值。不定根上的侧根平均数与不定根平均长度的比值即为不定根上的侧根密度,

1.2.4 Cd 含量测定 将各处理组幼苗的根系分为 3 部分,即不定根上的侧根、未长侧根的不定根和去掉侧根的不定根,分别用自来水冲洗干净并用去离子水洗净后,置于 20 mmol · L⁻¹ EDTA - Na₂ 溶液中交换 15 min,以去除表面附着的金属离子,再用去离子水冲洗干净,吸干表面水分后于 105 ℃ 下杀青 2 h,然后在 60 ℃ 条件下烘干至恒质量并称取干质量。将烘干的样品用玛瑙研钵磨碎后准确称取 0.2 g,用 HNO₃ - HClO₄ (V: V, 87: 13) 混合液消煮,待液体完全蒸发后加入体积分数 5% 的 HNO₃ 溶解并定容至 20 mL,用 TAS - 986 火焰原子分光光度计 (AAS) 测定 Cd 含量^[9]。

1.2.5 根尖细胞亚显微结构观察 取对照组和 100 mg · L⁻¹ Cd 处理组幼苗的根尖(长约 0.5 cm),参照 Danscher^[10] 的方法略加改进进行预处理。将根尖用质量体积分数 1% 的 Na₂S 溶液在 4 ℃ 条件下抽真空并固定 30 ~ 60 min,然后换用新鲜的同浓度 Na₂S 溶液固定 30 min,再把根尖转入体积分数 2.5% 的戊二醛和体积分数 1.0% 的锇酸中进行双重固定,经乙醇系列脱水和环氧树脂包埋后,用 LKB - V 型切片机制片,采用醋酸铀和柠檬酸铅双重染色后于 H - 7650 透射电镜下观察并拍照。

1.3 图片及数据处理

图片采用 Photoshop 8.0 软件进行处理,实验数据处理及统计均采用 Excel 和 Stst 等软件进行。

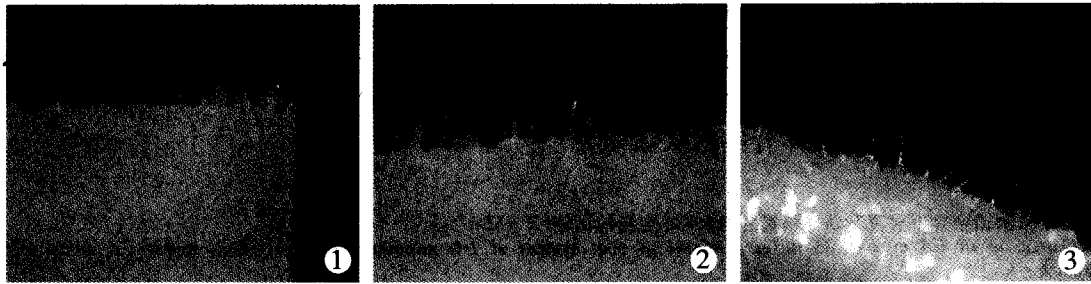
2 结果和分析

2.1 Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗根毛生长的影响

不同浓度 Cd 处理对黄菖蒲幼苗根毛生长的影响见图 1。由图 1 可看出,与对照(图 1 - 1)相比,用 10 mg · L⁻¹ Cd 处理后,黄菖蒲幼苗根毛的生长状况较好(图 1 - 2),其根毛长度为对照的 136.86%,且根毛密度也较大,表明 10 mg · L⁻¹ Cd 处理可促进黄菖蒲幼苗根毛的发育和生长;当 Cd 浓度超过 25 mg · L⁻¹,根毛的生长受到抑制,且随处理浓度升

高,抑制作用越加明显,其中用 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理后,幼苗的根毛长度仅为对照的 71.69%,且根毛

密度小于对照组和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理组。



1. 对照 CK; 2. $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理组 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd treatment group; 3. $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理组 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd treatment group.

图1 不同浓度 Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗根毛生长的影响

Fig. 1 Effect of Cd stress with different concentrations on the growth of root hair of *Iris pseudacorus* L. seedling

2.2 Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗根系生长的影响

不同浓度 Cd 处理对黄菖蒲幼苗根系生长的影响见表 1。由表 1 可见,用 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理后,黄菖蒲幼苗的根鲜质量较对照小、根长较对照长,但变化幅度不明显;而用 25、40 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理后,幼苗的根鲜质量和根长均显著低于对照,其中 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理组的根鲜质量仅为对照的 4.69%,根长仅为对照的 28.10%。此外,与对照相比, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理组黄菖蒲幼苗不定根上的侧根数增多、侧根密度增大且侧根较长;但用 25、40 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理后,不定根上的侧根数、侧根密度及侧根长度均明显低于对照,其中 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理组不定根上的侧根数仅为对照的 15.56%,侧根长度仅为对照的 15.21%。以上实验结果说明,低浓度 Cd 处理对黄菖蒲幼苗根系生长(包括不定根上的侧根发生和伸长)有一定的促进作用,高浓度 Cd 处理则抑制黄菖蒲幼苗不定根上侧根的发生和

伸长,甚至造成伤害。

2.3 Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗根系 Cd 含量的影响

不同浓度 Cd 处理后黄菖蒲幼苗不定根中 Cd 含量的变化见表 2。由表 2 可见,黄菖蒲幼苗不定根上的侧根、未长侧根的不定根和去掉侧根的不定根的 Cd 含量均随 Cd 浓度的提高而增加;在同一浓度的 Cd 处理组中,不定根上侧根中的 Cd 含量显著高于未长侧根的不定根和去掉侧根的不定根($P < 0.05$),而未长侧根的不定根和去掉侧根的不定根之间 Cd 含量的差异不显著($P > 0.05$)。在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理组中,不定根上侧根中的 Cd 含量是未长侧根的不定根的 3.54 倍,是去掉侧根的不定根的 2.82 倍;在 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理组中,不定根上侧根中的 Cd 含量是未长侧根的不定根的 1.94 倍,是去掉侧根的不定根的 1.98 倍。实验结果表明,黄菖蒲幼苗不定根上的侧根可能在 Cd 吸收及 Cd 积累中起着较为重要的作用。

表 1 不同浓度 Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗根系生长的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Effect of Cd stress with different concentrations on the growth of root system of *Iris pseudacorus* L. seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Cd 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of Cd	根鲜质量/g Fresh weight of root	根长/cm Root length	不定根上侧根的生长指标 Growth indexes of lateral root on adventitious root		
			数量 Number	长度/cm Length	密度/ cm^{-1} Density
0 (CK)	$3.83 \pm 0.26\text{a}$	$17.08 \pm 2.09\text{a}$	$67.30 \pm 10.46\text{b}$	$3.09 \pm 0.46\text{b}$	$3.05 \pm 0.39\text{b}$
10	$3.38 \pm 0.50\text{a}$	$18.87 \pm 2.47\text{a}$	$78.33 \pm 11.51\text{a}$	$5.42 \pm 1.14\text{a}$	$3.28 \pm 0.56\text{a}$
25	$2.28 \pm 0.39\text{b}$	$12.59 \pm 1.96\text{b}$	$45.68 \pm 9.76\text{c}$	$2.84 \pm 0.51\text{b}$	$2.75 \pm 0.41\text{c}$
40	$1.92 \pm 0.16\text{c}$	$10.22 \pm 1.25\text{b}$	$29.67 \pm 2.67\text{d}$	$1.75 \pm 0.25\text{c}$	$2.24 \pm 0.25\text{d}$
100	$0.18 \pm 0.04\text{d}$	$4.80 \pm 0.36\text{c}$	$10.47 \pm 1.53\text{e}$	$0.47 \pm 0.07\text{d}$	$2.18 \pm 0.23\text{b}$

¹⁾ 表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in this table are the average of three replications; 同列中不同的字母表示差异显著($P < 0.05$) The different letters in the same column indicate the significant difference($P < 0.05$).

2.4 Cd胁迫后黄菖蒲幼苗根尖细胞亚显微结构的变化及Cd沉积部位观察

用 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫处理后,黄菖蒲幼苗根尖细胞的亚显微结构见图2。由图2可见,与对照(图2-1,2)相比, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫处理可导致黄菖蒲根尖细胞的胞质浓缩、质壁分离(图2-3,4)、液泡变大(图2-3)及线粒体脊突膨胀和模糊

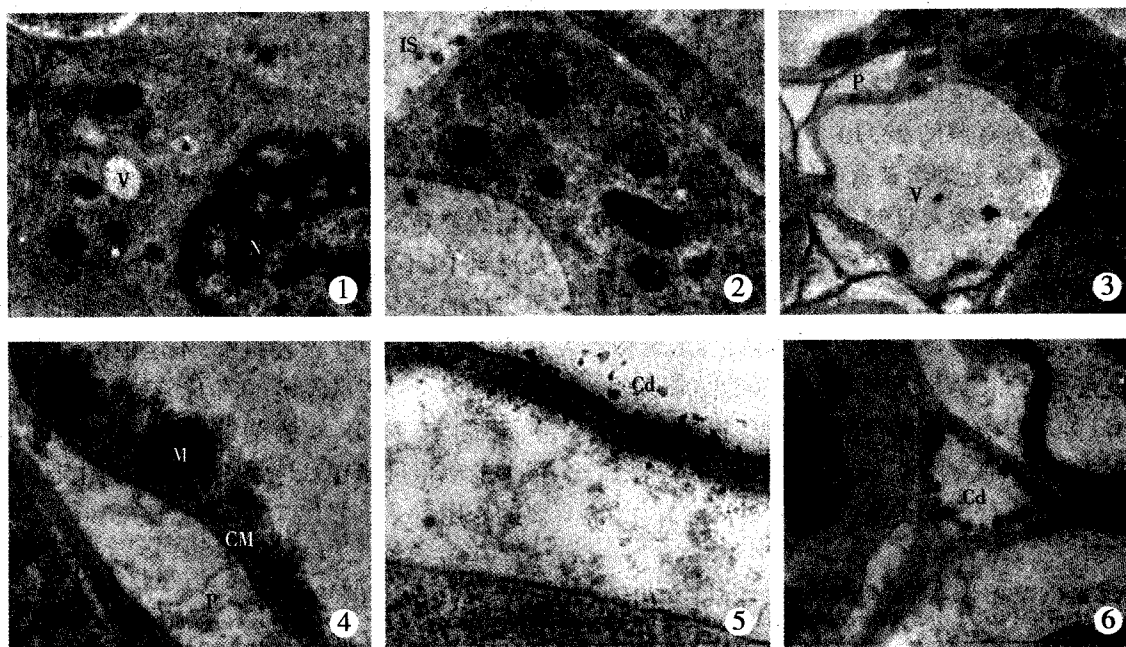
(图2-4);另外,根尖细胞的液泡膜也受到挤压,细胞核则因被挤压变形导致形状不规则(图2-3)。受 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫后,大量的Cd颗粒沉积在黄菖蒲幼苗根尖细胞的细胞壁上(图2-5)和细胞间隙中(图2-6),而在细胞膜、细胞质及液泡中则没有Cd颗粒的沉积。

表2 不同浓度Cd胁迫条件下黄菖蒲幼苗根系各部分Cd含量的比较($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison of Cd content in different parts of root system of *Iris pseudacorus* L. seedling under Cd stress with different concentrations($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Cd 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of Cd	根系各部位的Cd含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cd content in different parts of root system		
	不定根上的侧根 Lateral root on adventitious root	未长侧根的不定根 Adventitious root without lateral root	去掉侧根的不定根 Adventitious root cut off lateral root
10	$2\ 968.60 \pm 224.06\text{bA}$	$837.42 \pm 103.62\text{cB}$	$1\ 051.79 \pm 78.61\text{cB}$
25	$3\ 517.00 \pm 761.23\text{abA}$	$1\ 330.00 \pm 345.18\text{bB}$	$1\ 731.00 \pm 451.88\text{bB}$
40	$4\ 154.20 \pm 977.98\text{aA}$	$2\ 144.98 \pm 567.92\text{aB}$	$2\ 096.06 \pm 583.34\text{aB}$

¹⁾表中数据为3次重复的平均值 The datums in this table are the average of three replications; 同列中不同的小写字母表示不同浓度处理组间差异显著($P < 0.05$), 同行中不同的大写字母表示根系不同部位间差异显著($P < 0.05$) The different small letters in the same column indicate the significant difference among different concentration treatment groups($P < 0.05$), the different capitals in the same row indicate the significant difference among different parts of root system($P < 0.05$).



CW: 细胞壁 Cell wall; V: 液泡 Vacuole; CM: 细胞膜 Cell membrane; P: 质壁分离 Plasmolysis; N: 细胞核 Nucleus; M: 线粒体 Mitochondria; IS: 细胞间隙 Intercellular space; Cd: 镉颗粒 Cd particle.

1,2. 对照组根尖细胞的亚显微结构 Cell ultrastructure of root tip of control group: 1. 示液泡和细胞核 Showing vacuole and nucleus; 2. 示线粒体、细胞壁和细胞间隙 Showing mitochondria, cell wall and intercellular space. 3-6. $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫处理根尖细胞的亚显微结构 Cell ultrastructure of root tip of $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd treatment group: 3. 示不规则的细胞核、变大的液泡和质壁分离 Showing irregular nucleus, largen vacuole and plasmolysis; 4. 示线粒体膨胀的脊突和质壁分离 Showing swelling mitochondria crista and plasmolysis; 5. 示沉积于细胞壁上的Cd颗粒 Showing Cd particles depositing on cell wall; 6. 示沉积于细胞间隙的Cd颗粒 Showing Cd particles depositing in intercellular space.

图2 Cd胁迫后黄菖蒲幼苗根尖细胞的亚显微结构及Cd颗粒的沉积部位

Fig. 2 Cell ultrastructure and depositing position of Cd particles in root tip of *Iris pseudacorus* L. seedling after Cd stress

3 讨 论

3.1 Cd 胁迫与黄菖蒲幼苗根系生长及其 Cd 耐性的关系

根长的变化被认为是指示植物受重金属毒性影响的重要指标之一,而侧根的生长情况及根系色泽也是衡量植物耐重金属毒性强弱的常用指标^[11]。由上述实验数据可看出,10 mg · L⁻¹ Cd 处理对黄菖蒲幼苗根毛的生长发育有一定的促进作用,对根鲜质量及根长的抑制作用不显著,而且经 10 mg · L⁻¹ Cd 处理后黄菖蒲幼苗不定根上的侧根数、侧根长度及侧根密度均显著高于对照,表明黄菖蒲幼苗根系对轻度 Cd 胁迫具有较好的耐性。另外,低浓度 Cd 胁迫能诱导黄菖蒲幼苗根毛的形成、促进根毛对 Cd 的吸收,这可能与低浓度 Cd 胁迫下根系中的抗氧化酶活性升高有关^[12],从而对黄菖蒲幼苗植株的整体生长起到一定的保护作用。

在 Cd 胁迫浓度高于 25 mg · L⁻¹ 后,黄菖蒲幼苗的根鲜质量、根长、不定根上的侧根数、侧根长度及侧根密度均低于对照,但基本在对照的 50% 以上。已有的研究表明^[8],Cd 浓度在 10 ~ 40 mg · L⁻¹ 范围内,黄菖蒲地上部生长良好,Cd 含量超过了 Cd 超富集植物的要求(100 μg · g⁻¹),且黄菖蒲根系内的 Cd 含量也超过 100 μg · g⁻¹。因此,结合黄菖蒲幼苗根系的生长状况后可以确定,Cd 污染浓度在 10 ~ 40 mg · L⁻¹ 范围内可以用黄菖蒲进行土壤或水体 Cd 污染的植物修复。

Cd 浓度高于 40 mg · L⁻¹,黄菖蒲幼苗的生理代谢紊乱^[12],生长受到严重伤害。如用 100 mg · L⁻¹ Cd 胁迫处理 42 d 后,黄菖蒲幼苗的根毛生长状况、根鲜质量、根长及不定根上的侧根数、侧根密度及侧根长度等指标均显著低于对照。因此,在高浓度(高于 40 mg · L⁻¹) Cd 污染状况下,虽然黄菖蒲幼苗体内的 Cd 含量较高,但由于植株自身的生长及代谢受到了严重的伤害,因而不适用于土壤或水体 Cd 污染的植物修复。

3.2 Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗根尖细胞亚显微结构的影响及其与 Cd 沉积的关系

根系是植物体中最重要的重金属络合部位^[13]。在 Cd 胁迫条件下,黄菖蒲幼苗根系能够积累大量的 Cd,且在 10 ~ 40 mg · L⁻¹ Cd 处理条件下,黄菖蒲幼

苗不定根上侧根中的 Cd 含量明显高于未长侧根的不定根和去掉侧根的不定根,而后两者间 Cd 含量的差异并不显著,说明不定根上的侧根在黄菖蒲根系积累 Cd 的过程中起着较重要的作用,但这一研究结论与 George^[14]等的研究结果不一致,其原因有待进一步探讨。

有研究者认为,植物吸收的 Cd 主要积累在根系的细胞壁上^[15-17],而细胞壁是 Cd 离子进入细胞的第一道屏障,Cd 沉积在细胞壁上能阻止更多的重金属离子进入细胞原生质体而使细胞免受伤害^[18-19]。作者利用透射电镜观察到大量的 Cd 颗粒沉积在黄菖蒲幼苗根尖细胞壁上和细胞间隙中,表明通过根系细胞壁和细胞间隙使 Cd 沉积,这可能是黄菖蒲幼苗根系耐 Cd 胁迫的重要机理之一。而 Hart 等^[20]和 Chardonnens 等^[21]认为,Cd 在液泡中的区隔化可能是阻止 Cd 在植物体内长距离运输的有效途径,而在本实验过程中未观察到液泡中有 Cd 颗粒沉积,这可能是由于 Cd 以结合肽形式进入液泡中形成了 Cd - PC - Sulfide 复合物^[22],从而可能以可溶性 Cd 的形式存在于细胞中。此外,黄菖蒲幼苗根尖细胞的液泡明显增大,这可能与黄菖蒲幼苗利用原生质体与外界进行气体和养料的交换有关,而这种变化是否与黄菖蒲幼苗对 Cd 耐性的提高有关,将有待进一步研究。

线粒体是细胞进行呼吸作用的场所,Cd 胁迫导致线粒体脊突的膨胀,将会直接影响植物细胞正常的呼吸功能,这也是重金属离子对植物的毒害机理之一^[23]。细胞核是遗传信息贮存、复制和表达的场所,细胞核变形将严重影响基因的正常表达和细胞内蛋白质的合成及细胞分化^[24]。受 Cd 胁迫处理后黄菖蒲根尖细胞的细胞核受到破坏,这一现象与施国新^[25]等的研究结果相似,其原因可能是由于 Cd 进入细胞后与带负电荷的核酸结合,从而使核仁结构遭到了破坏^[26]。

参考文献:

- [1] Baker A J M, McGrath S P, Reeves R D, et al. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metal-polluted soils [M] // Terry N, Banuelos G. Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. Florida: Lewis Publishers, 2000: 85 - 107.
- [2] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, et al. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc-and cadmium-contaminated soil[J]. Journal of Environmental Quality,

- 1994, 23: 1151 - 1157.
- [3] Lombi E, Zhao F J, Dunham S J, et al. Cadmium accumulation in populations of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi goeingense* [J]. *New Phytologist*, 2000, 145: 11 - 20.
- [4] Danmani-Muller H, Van O F, Balabane M. Metal extraction by *Arabidopsis halleri* grown on an unpolluted soil amended with various metal-bearing solids; a pot experiment [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(1): 77 - 84.
- [5] Kütper H, Lombi E, Zhao F J, et al. Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyper-accumulator *Arabidopsis halleri* [J]. *Planta*, 2000, 212: 75 - 84.
- [6] 中国植物志编辑委员会. 中国植物志 第十六卷 第一分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 151 - 153.
- [7] 黄苏珍. 鸢尾属 (*Iris* L.) 部分植物资源评价及种质创新研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2004.
- [8] 原海燕. 鸢尾属 (*Iris* L.) 4种植物镉 (Cd) 积累、耐性机理及影响因子研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [10] Danscher G. Histochemical demonstration of heavy metals [J]. *Histochemistry*, 1981, 71: 1 - 16.
- [11] 倪才英, 陈英旭, 骆永明. 红壤模拟铜污染下紫云英根表形态及其组织和细胞结构变化 [J]. *环境科学*, 2003, 24(3): 116 - 121.
- [12] 仇 硕, 黄苏珍, 王鸿燕. Cd 胁迫对黄菘蒲幼苗 4 种抗氧化酶活性的影响 [J]. *植物资源与环境学报*, 2008, 17(1): 28 - 32.
- [13] 王春春, 沈振国. 镉在植物体内的积累及其对绿豆幼苗生长的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2001, 24(4): 9 - 13.
- [14] George J W, Ricky Y. Variation in cadmium accumulation potential and tissue distribution of cadmium in tobacco [J]. *Plant Physiology*, 1986, 82: 274 - 279.
- [15] Nishazono H. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense* [J]. *Plant and Soil*, 1987, 101: 15 - 20.
- [16] 倪天华, 魏幼璋. 镉在东南景天中的亚细胞分配 [J]. *植物学报*, 2003, 45(8): 925 - 928.
- [17] Sridhar B B M, Diehl S V, Han F X, et al. Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 54: 131 - 141.
- [18] Allan D L, Jarrel W M. Proton and copper absorption to maize and soybean root cell walls [J]. *Plant Physiology*, 1989, 89: 823 - 832.
- [19] Cristian B, Dennis H B, Fernando C. The cellular location of Cu in lichens and its effects on membrane integrity and chlorophyll fluorescence [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1997, 38: 165 - 179.
- [20] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedling of bread and durum wheat cultivars [J]. *Plant Physiology*, 1998, 116: 1413 - 1420.
- [21] Chardonnens A N, ten Bookum W M, Kuijper L D J, et al. Distribution of cadmium in leaves of cadmium tolerant and sensitive ecotypes of *Silene vulgaris* [J]. *Physiologia Plantarum*, 1999, 104: 75 - 80.
- [22] Salt D E, Smith R D, Raskin I. Phytoremediation [J]. *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49: 643 - 668.
- [23] 陈富华, 郑 耘, 郑政伟, 等. Cd、Cu 对长喙田菁 *Sesbania rostrata* 各器官亚显微结构的影响 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2005, 44(4): 107 - 110.
- [24] Van A F, Clijsters H. Effects of metal on enzyme activity in plants [J]. *Plant Cell Environment*, 1990, 13: 195 - 206.
- [25] 施国新, 杜开和, 解凯彬, 等. 汞、镉污染对黑藻叶细胞伤害的超微结构研究 [J]. *植物学报*, 2000, 42(4): 373 - 378.
- [26] Kazantzis G. Mutagenic and carcinogenic effects of cadmium [J]. *Toxicological Environmental Chemistry*, 1984, 8(2): 267 - 268.

欢迎订阅 2009 年《特产研究》

《特产研究》是由中华人民共和国农业部主管、中国农业科学院特产研究所和中国农学会特产学会联合主办的国家级农牧特产业学术期刊, 为中国科技核心期刊、《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊。主要报道野生经济动、植物的引种驯化、遗传育种、饲养繁殖、栽培管理、病虫害防治、产品加工、贮藏保鲜等方面的最新科研成果; 介绍农牧特产业的新技术、新方法和新经验等。主要栏目有研究报告、应用技术、测试分析、专论综述、译文等。适合各级从事特产科技工作的院校

师生、科研人员、生产技术人员及广大农村种植业和养殖业专业户参阅。季刊, 大 16 开本, 季末月出版。每期定价 5.00 元, 全年定价 20.00 元 (含邮费)。全国各地邮局 (所) 均可订阅, 邮发代号 12 - 182。也可通过当地邮局汇款至《特产研究》编辑部直接订阅, 编辑部地址: 吉林省吉林市左家镇鹿鸣大街 15 号 (邮编 132109); 单位: 中国农业科学院特产研究所《特产研究》编辑部; 联系人: 包秀芳; 电话: 0432 - 6513067, 0432 - 6512069 (传真); E-mail: tcyjbjb@126.com。