

镉胁迫对 10 种鸢尾属植物生长及镉积累特征的影响

杨 义, 王子纯, 王冬良*

(安徽农业大学园艺学院, 合肥 230036)

摘 要: 为研究鸢尾属植物对镉吸收特征的差异及鸢尾植物超微结构在镉胁迫下的变化, 进行了 10 个鸢尾品种的盆栽试验研究, 并分析了不同品种鸢尾在镉含量 20 mg kg^{-1} 下镉积累差异及 4 个品种鸢尾超微结构情况。结果表明: (1) 玉蝉花(*Iris ensata* Thunb.)的根系镉富集系数和植株镉积累总量最高, 分别为 $1.02 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ 和 $60.6 \mu\text{g}$ 。镉胁迫对株高、叶宽和叶片数有轻微抑制作用, 而对地上及根系物质质量有较强的抑制作用。其中, 地上部鲜重和生物量的减少率分别为 20.14%和 15.60%, 根系鲜重和生物量的减少率分别为 12.54%和 7.67%, 由于物质质量受镉胁迫影响较小, 故适用于镉污染地区的修复植物。(2) 蝴蝶花(*Iris tectorum*)根系富集系数和镉积累总量均较高, 分别为 $0.14 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ 和 $19.01 \mu\text{g}$; 其叶宽和林高分别增加了 2.47%和 5.84%, 其生长受到一定的促进作用, 表明其具有很强的镉适应性, 可用于作为镉污染地区的替代种植植物。(3) 黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)、守夜者(*Iris night ruler*)和胜利者(*Iris nelson*)镉积累总量较低, 分别为 17.62、15.90 和 $11.80 \mu\text{g}$, 同时生长受到的影响较小, 可用于镉污染地区的园林植物种植。(4) 其他品种镉积累量极低, 生长受到的抑制作用大, 不适宜在镉污染地区种植。(5) 镉胁迫可导致鸢尾属植物细胞变形、质壁分离, 线粒体结构破碎、溶解, 叶绿体肿胀、片层结构紊乱或溶解, 而细胞核形态变化不明显。研究结果为鸢尾属植物改良重金属土壤提供了科学依据, 同时为重金属污染地区的园林应用提供参考。

关键词: 鸢尾; 镉积累量; 富集系数; 超微结构

中图分类号: S682.19

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)04-0648-07

Effects of cadmium stress on growth and cadmium accumulation of 10 varieties of *Iris* plants

YANG Yi, WANG Zichun, WANG Dongliang

(School of Horticulture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: To study the differences in *Iris* plants uptake cadmium and the changes in the ultrastructure of *Iris* plants under cadmium stress, the pot experiments of 10 *Iris* varieties were carried out in this paper. The differences in cadmium accumulation and the ultrastructure of four *Iris* varieties under the cadmium content of 20 mg kg^{-1} were analyzed. The results showed that: (1) The *Iris ensata* Thunb. had the highest enrichment coefficients of Cd in the root and presented the highest accumulation in the total plant, which were $1.02 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ and $60.6 \mu\text{g}$, respectively. Cd stress had no significant inhibitory effect on plant height, leaf width, and leaf amounts, but it obviously inhibited the mass of aboveground (the reduction rates of fresh weight and biomass were 20.14% and 15.60%, respectively) and underground materials (the reduction rates fresh weight and biomass were 12.54% and 7.67%, respectively). Since the biomass of *Iris ensata* Thunb. was less affected by Cd stress, it was suitable for restoration plants in Cd polluted areas. (2) The root enrichment coefficient of *Iris tectorum* and the total accumulation of Cd were both higher, which were $0.14 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ and $19.01 \mu\text{g}$, respectively, but its leaf width and plant height increased by 2.47% and 5.84%, respectively, and the growth of *Iris tectorum* was promoted to a certain extent, which indicated that it has strong Cd adaptability and can be used as an alternative growing plant in cadmium polluted areas. (3) The total accumulation of Cd in *Iris pseudacorus*, *Iris night ruler* and *Iris nelson* was lower, of 17.62, 15.90 and $11.80 \mu\text{g}$, respectively. Besides, the growth process was less affected and could be used for garden plants in Cd-contaminated areas. (4) The Cd accumulation in other varieties was extremely low, and the growth was greatly inhibited. Hence, they were not suitable for planting in cadmium polluted areas. (5) Cd stress could cause cell deformation, plasmolysis, mitochondrial structure

收稿日期: 2020-08-02

基金项目: 阜阳国家农业科技园区创新能力项目资助。

作者简介: 杨 义, 硕士研究生。E-mail: 2269501066@qq.com

* 通信作者: 王冬良, 副教授。E-mail: wangdongliang@ahau.edu.cn

fragmentation and dissolution, chloroplast swelling, and lamellar structure disorder or dissolution, but the nucleus morphology did not change significantly. The results will provide a scientific basis for *Iris* plants to improve heavy metal soil and a reference for garden applications in heavy metal polluted areas.

Key words: *Iris*; cadmium accumulation; enrichment coefficient; ultrastructure

重金属污染是全球范围内严峻的生态环境污染问题之一^[1]。其中, 镉是生物毒性最强的重金属元素, 在土壤环境中化学活性及迁移能力均较强, 容易通过植物富集作用危及人类健康^[2-3]。利用植物来修复土壤镉污染是一种重要的办法, 而筛选镉积累能力强的植物也是当今社会关注的热点^[4]。研究表明鸢尾属植物具有一定的镉积累能力且品种资源丰富, 系统地分析研究鸢尾属植物不同品种之间的镉积累能力差异以及自身生理特征变化情况对重金属污染地区种植植物的品种选择和深层次研究具有重要的意义。

国内外对鸢尾属植物的镉积累特点及生理特征的研究表明, 植物对重金属的积累特性因植物基因型的不同而存在差异^[5-9]。韩鹰等^[10]研究发现路易斯安娜鸢尾对 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下的 Cd^{2+} 具有较强的抗性和吸收富集能力, 且主要富集部位在根部。史一鸣等^[11]研究发现西伯利亚鸢尾对人工湿地中镉有明显的净化效果。朱广慧等^[12]通过培养液方法研究了路易斯安娜鸢尾在镉胁迫下的幼苗生长及生理变化, 结果表明镉胁迫下植物幼苗生长缓慢, 地上及地下干重减小, 叶片中叶绿素含量降低, 而叶片中丙二醛含量、游离脯氨酸含量以及超氧化歧化酶活性均增大。肖罗怡^[13]通过对比多种植物材料水浸提剂对土壤中镉淋洗效率发现, 鸢尾对土壤中镉的淋洗效率大于豌豆藤、构树和大青叶。Ma 等^[14]研究表明, 西伯利亚鸢尾在镉含量 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的人工湿地环境中, 其地下部分的镉累积量可达 $443.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。鸢尾植物品种繁多, 然而此前的研究中对镉富集能力强的鸢尾品种鉴别存在不足, 有待进一步发掘, 且对于镉胁迫后鸢尾叶片细胞质壁结构、细胞膜、线粒体、叶绿体以及细胞核的超微结构缺乏研究^[15]。因此, 本试验扩大鸢尾属植物品种样本, 探究不同品种鸢尾在镉处理后的响应机制和镉积累特征, 希望能进一步发掘适应性优良的品种, 为重金属污染地区植物的品种选择提供科学依据, 故以安徽阜阳地区的 10 个常见鸢尾品种为材料, 通过盆栽试验, 研究镉胁迫对不同品种鸢尾生长特点和超微结构的影响以及不同品种鸢尾镉积累差异情况, 筛选出净化效果好的鸢尾品种, 对镉污染地区的植物园林应用提供建议。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种均来自安徽阜阳金丰生态育种基地的 2 年生分株苗, 共 10 个常见品种, 分别为白天鹅 (*Iris white swan*)、蝴蝶花 (*Iris tectorum*)、粉小姐 (*Iris play girl*)、蓝蝴蝶 (*Iris black gamecock*)、黄菖蒲 (*Iris pseudacorus*)、白雪 (*Iris snowdrift*)、胜利者 (*Iris nelson*)、玉蝉花 (*Iris ensata* Thunb.)、守夜者 (*Iris night ruler*) 以及玫瑰红 (*Iris lorilee*)。

1.2 方法

1.2.1 盆栽试验 本试验于 2019 年 4 月 10 日—7 月 20 日, 在安徽农业大学农萃园日光温室内进行。该地区的地理位置为东经 117° 、北纬 31° , 地区海拔高度约 10 m, 属于亚热带湿润季风性气候。试验所用花盆的外径为 21 cm, 高 15 cm。实验土壤的 pH 值为 6.18, 有机质含量为 $22.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤的全氮含量为 $1.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤的速效钾含量为 $94.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷含量为 $49.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。按土壤镉 $20.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的含量为标准加入固体氯化镉, 混合均匀后, 每个花盆中装入土壤 1.5 kg。将长势相近、株高为 10~15 cm 的 10 个鸢尾品种的 2 年生分株苗种植到花盆中, 每个花盆种植 1 株。每个处理设 3 个重复, 并设置对照组 (不含氯化镉的土壤)。根据需要统一肥水管理。

1.2.2 指标测定 (1) 生长指标测定。待收获时测量鸢尾的株高、叶宽和叶片数, 并记录。

(2) 地上部、根系生物量测定。待收获植株后, 分别收集植株的地上部及根系部分, 分别用自来水和去离子水冲洗 3~4 次, 吸水纸吸干水分, 将植株剪碎混合, 然后放入烘箱 105°C 杀青 0.5 h, 再在 70°C 下烘干至恒重后称重, 并记录数据^[16]。

(3) 镉含量测定。将烘干至恒重的植株样品, 磨碎、混匀后, 称取 0.5 g 于消解管中, 每个处理 3 个重复, 加入 9 mL 硝酸和 1 mL 高氯酸后塞紧消解管塞, 放入石墨消解仪, 槽中温度设置在 150°C 。达到设定温度后维持在 100 min 左右直至样品完全消解为止。然后再升高温度至 180°C , 赶出消解管中棕黄色的气体, 直到消解管中无黄烟冒出为止, 液体呈清亮透明状, 待液体蒸发到还剩余 1 mL 左

右时取出消解管,冷却后将溶液倒入 25 mL 的容量瓶(提前用 10% HNO₃ 浸泡 12 h 以上,再用纯水润洗 3~4 次)中,摇晃均匀,然后用去离子水定容直至 25 mL。取 10 mL 过滤,过滤后置于 10 mL 的离心管中备用。最终测定样品中镉的浓度^[17]。

(4) 超微结构分析。鸢尾属植物在含镉基质中生长 40 d 后,取叶尖嫩叶,去叶脉后,将叶片切为长 2~5 mm、宽 2~3 mm 和厚度 1 mm 的细条。将所取的材料在 2.5% 戊二醛和 1.0% 的锇酸中进行双固定,乙醇系列脱水,Epon 812 树脂包埋,EM UC7 型号超薄切片机制片,醋酸铀和柠檬酸铅双染色后在 HT-7700 型号透射电镜下观察、拍照^[18]。

1.2.3 数据处理^[19] 转运系数=地上部平均镉含量/根系平均镉含量;富集系数=地上部或根系平均镉含量/土壤镉含量;地上部镉积累量=地上部平均镉含量×地上部生物量;根系镉积累量=根系平均镉含量×根系生物量;镉积累总量=地上部镉积累量+根系镉积累量。用 SPSS (19.0) 统计软件进行数据方差分析。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对 10 种鸢尾属植物株高、叶宽及叶片数的影响

镉胁迫下 10 种鸢尾属植物的株高、叶宽和叶片数的结果(表 1)表明,除蝴蝶花外,其他 9 个鸢尾品种的镉处理组在株高、叶宽和叶片数方面的生长情况明显弱于对照组,说明镉胁迫会影响鸢尾属植物株高、叶宽和叶片数的生长。然而,蝴蝶花在

镉处理后,株高和叶宽的生长明显优于对照组,表明镉对蝴蝶花的生长有一定的促进作用,蝴蝶花对重金属镉的适应性更强。玉蝉花、黄菖蒲和守夜者在株高、叶宽和叶片数方面受到的抑制程度均较小,耐镉能力较强。蓝蝴蝶的耐镉能力最弱,其他品种次之。对镉处理下鸢尾品种的株高生长抑制程度按大小顺序排列为:蝴蝶花<玉蝉花<守夜者<黄菖蒲<玫瑰红<胜利者<粉小姐<白雪<白天鹅<蓝蝴蝶;对镉处理下 10 个鸢尾品种叶宽生长抑制程度按大小顺序排列为:蝴蝶花<玉蝉花<黄菖蒲<守夜者<胜利者<粉小姐<玫瑰红<白雪<白天鹅<蓝蝴蝶;对镉胁迫下鸢尾品种的叶片数减少程度按大小顺序排列为:玉蝉花<黄菖蒲<守夜者<胜利者<蝴蝶花<粉小姐<玫瑰红<白天鹅<白雪<蓝蝴蝶。

2.2 镉胁迫对 10 种鸢尾属植物鲜重的影响

由镉胁迫下 10 种鸢尾属植物的鲜重结果(表 2)可知,镉处理后,鸢尾地上部和根系部分的鲜重均有明显减少,鸢尾地上部鲜重减少率为 19.50%~39.38%,鸢尾根系鲜重减少率为 12.54%~31.51%。其中,镉处理后黄菖蒲、玉蝉花和蝴蝶花鲜重的减少率最小,耐镉性较强,而白雪、白天鹅和粉小姐鲜重的减少率最大,耐镉性最差。根据表 2 中的数据,对不同鸢尾品种地上部鲜重的减少率按从小到大排序为:黄菖蒲<玉蝉花<蝴蝶花<胜利者<守夜者<玫瑰红<蓝蝴蝶<白天鹅<粉小姐<白雪。对 10 种鸢尾根系鲜重的减少率按从小到大顺序排列为:玉蝉花<黄菖蒲<蝴蝶花<守夜者<胜利者<玫瑰红<蓝蝴蝶<粉小姐<白雪<白天鹅。

表 1 镉胁迫对 10 种鸢尾生长的影响

Table 1 Effects of cadmium stress on the growth of 10 varieties of *Iris* L.

品种	株高/cm		叶宽/cm		叶片数/片	
	对照	处理	对照	处理	对照	处理
白天鹅	65.67±6.66 ^{bcd}	61.33±5.51 ^{bc}	1.80±0.52 ^c	1.67±0.10 ^c	7.67±0.58 ^b	6.33±0.58 ^c
蝴蝶花	54.33±0.58 ^d	55.67±1.15 ^{bc}	3.94±0.30 ^a	4.17±0.21 ^a	15.67±6.43 ^a	14.67±3.06 ^a
粉小姐	54.67±0.58 ^d	43.33±2.89 ^{de}	0.77±0.06 ^e	0.67±0.20 ^e	7.00±1.73 ^b	6.00±1.53 ^c
蓝蝴蝶	67.33±1.53 ^{bcd}	47.00±7.94 ^{cde}	1.30±0.44 ^d	1.11±0.15 ^d	7.00±1.73 ^b	5.00±2.65 ^c
黄菖蒲	69.67±8.33 ^{bc}	67.00±7.00 ^b	0.84±0.06 ^e	0.81±0.12 ^e	13.33±0.58 ^a	12.67±1.53 ^a
白雪	55.00±17.35 ^d	41.67±7.64 ^e	0.83±0.12 ^e	0.73±0.12 ^e	9.00±5.20 ^{ab}	7.33±0.58 ^{bc}
胜利者	60.67±6.81 ^{cd}	51.67±2.89 ^{cd}	2.13±0.12 ^b	2.03±0.12 ^b	10.00±2.65 ^{ab}	9.33±3.79 ^{bc}
玉蝉花	78.17±7.75 ^{ab}	77.00±7.00 ^a	1.03±0.32 ^e	1.01±0.06 ^e	6.67±2.89 ^b	6.33±3.79 ^c
守夜者	40.83±6.33 ^e	38.33±2.08 ^f	1.37±0.31 ^{cd}	1.31±0.35 ^d	11.00±3.46 ^{ab}	10.33±2.52 ^{bc}
玫瑰红	84.67±0.58 ^a	80.33±1.53 ^a	2.07±0.61 ^b	1.97±0.36 ^{bc}	9.33±3.51 ^{ab}	8.00±2.65 ^{bc}

注:表中同列数据后不同字母表示同一土壤镉含量下不同鸢尾品种间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 镉胁迫对 10 种鸢尾属植物生物量的影响

镉胁迫下鸢尾地上及根系生物量的变化结果(表 3)显示,镉处理后,鸢尾地上部及根系生物量均有所减少,地上部生物量减少率为 13.70%~

25.21%,根系生物量减少率为 7.67%~25.00%。其中,镉处理后,玉蝉花、黄菖蒲和蝴蝶花的生物量减少率最小,耐镉能力较强,其他品种耐镉能力较差。10 个鸢尾品种地上部生物量减少率大小顺序

为: 黄菖蒲<玉蝉花<胜利者<蝴蝶花<守夜者<玫瑰红<蓝蝴蝶<粉小姐<白天鹅<白雪; 根系生物量减少率大小排序为: 玉蝉花<黄菖蒲<蝴蝶花

表 2 10 种鸢尾属植物鲜重的差异

Table 2 Differences in fresh weight between 10 varieties of *Iris* L.

品种	地上部鲜重/g		减少率/%	根系鲜重/g		减少率/%
	对照	处理		对照	处理	
白天鹅	13.40±3.52 ^c	9.54±2.75 ^d	28.81	32.02±11.08 ^a	21.93±6.32 ^{bc}	31.51
蝴蝶花	77.67±36.30 ^a	62.02±7.83 ^a	20.15	32.57±6.83 ^a	26.38±3.15 ^a	19.01
粉小姐	15.17±2.26 ^c	10.11±4.88 ^c	33.36	19.26±2.96 ^{cd}	14.13±3.86 ^{bcd}	26.64
蓝蝴蝶	6.67±1.53 ^d	4.84±2.35 ^d	27.44	17.49±5.20 ^{cd}	13.00±6.24 ^{cd}	25.67
黄菖蒲	24.89±9.34 ^b	20.04±6.71 ^c	19.50	21.90±4.85 ^{bcd}	18.88±4.67 ^{bc}	13.79
白雪	16.25±1.29 ^c	9.85±1.63 ^d	39.38	26.40±5.56 ^{abc}	19.35±6.56 ^{bc}	26.70
胜利者	9.33±1.53 ^d	7.31±1.14 ^d	21.65	12.67±3.06 ^d	9.91±0.53 ^d	21.78
玉蝉花	7.00±1.00 ^d	5.59±2.25 ^d	20.14	13.00±2.00 ^d	11.37±2.57 ^{cd}	12.54
守夜者	13.00±2.65 ^c	10.06±3.83 ^c	22.62	16.33±2.31 ^{cd}	13.10±4.17 ^{cd}	19.78
玫瑰红	60.33±9.07 ^a	45.21±23.37 ^b	25.06	24.67±5.03 ^{abc}	18.66±1.53 ^{bc}	24.36

表 3 10 种鸢尾生物量的差异

Table 3 Biomass changes in 10 varieties of *Iris* L.

品种	地上部生物量/g		减少率/%	根系生物量/g		减少率/%
	对照	处理		对照	处理	
白天鹅	2.32±0.77 ^b	1.75±0.72 ^b	24.57	4.37±1.55 ^{ab}	3.36±0.13 ^{bc}	23.11
蝴蝶花	6.23±1.00 ^b	4.98±1.73 ^b	20.06	6.14±2.42 ^a	5.54±0.26 ^a	9.77
粉小姐	2.27±0.70 ^b	1.72±0.56 ^b	24.23	4.19±1.83 ^{ab}	3.14±1.80 ^{bc}	25.00
蓝蝴蝶	1.75±0.58 ^b	1.33±0.15 ^b	24.00	2.57±1.59 ^b	2.05±1.20 ^c	20.23
黄菖蒲	3.65±2.86 ^b	3.15±1.65 ^b	13.70	3.62±2.79 ^{ab}	3.27±2.20 ^{bc}	9.67
白雪	2.42±0.30 ^b	1.81±0.69 ^b	25.21	3.90±1.85 ^{ab}	3.18±1.02 ^{bc}	18.46
胜利者	1.90±0.17 ^b	1.52±0.06 ^b	20.00	2.90±0.46 ^b	2.42±0.13 ^c	16.55
玉蝉花	1.41±0.43 ^b	1.19±0.44 ^b	15.60	3.00±0.92 ^{ab}	2.77±1.42 ^c	7.67
守夜者	2.03±0.06 ^b	1.56±0.56 ^b	23.15	2.80±0.44 ^b	2.45±1.18 ^c	12.50
玫瑰红	11.33±4.16 ^a	8.64±5.98 ^a	23.74	3.43±0.51 ^{ab}	2.71±0.45 ^c	21.00

表 4 10 种鸢尾镉吸收和转运的差异

Table 4 Cadmium contents in 10 varieties of *Iris* L.

品种	地上部镉含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	根系镉含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	转运系数/	地上部富集系数/	根系富集系数/
白天鹅	0.61±0.03 ^{cd}	0.78±0.01 ^d	0.78	0.03	0.04
蝴蝶花	0.77±0.18 ^{bcd}	2.74±0.22 ^{cd}	0.28	0.04	0.14
粉小姐	0.84±0.13 ^{bc}	0.24±0.11 ^d	3.50	0.04	0.01
蓝蝴蝶	1.23±0.14 ^b	0.20±0.07 ^d	6.15	0.06	0.01
黄菖蒲	1.15±0.00 ^b	4.28±0.30 ^b	0.27	0.06	0.21
白雪	0.57±0.09 ^{cd}	2.38±0.19 ^{cd}	0.24	0.03	0.12
胜利者	1.35±0.12 ^b	4.03±0.13 ^{bc}	0.33	0.07	0.20
玉蝉花	3.30±0.14 ^b	20.46±7.86 ^a	0.16	0.17	1.02
守夜者	6.11±0.68 ^a	2.60±0.27 ^{cd}	2.35	0.31	0.13
玫瑰红	0.33±0.32 ^d	1.07±0.47 ^d	0.31	0.02	0.05

2.4 10 种鸢尾属植物镉含量、富集系数及转运系数的差异

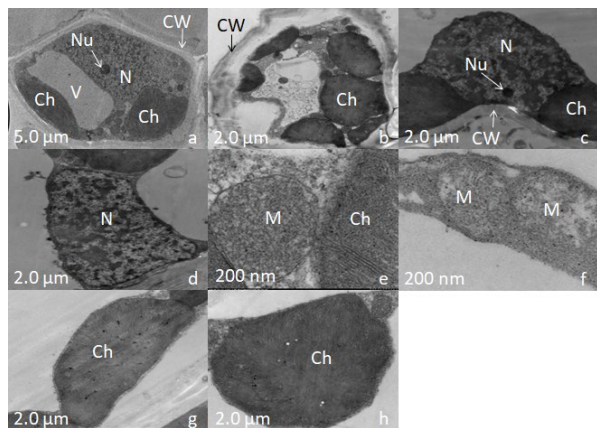
表 4 显示 10 种鸢尾在镉处理条件下的植株地上部及根系镉含量。其中, 玉蝉花根系镉含量最高, 为 20.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其他品种地上部和根系镉含量均低于 10.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。粉小姐、蓝蝴蝶和守夜者的镉转

运系数均大于 1.0 $\mu\text{g}\cdot\mu\text{g}^{-1}$, 分别为 3.50、6.15 和 2.35 $\mu\text{g}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ 。玉蝉花和守夜者的地上部富集系数较高, 分别为 0.17 和 0.31 $\mu\text{g}\cdot\mu\text{g}^{-1}$; 玉蝉花的根系富集系数最高, 为 1.02 $\mu\text{g}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ 。玉蝉花根系的镉含量和镉积累量远远高于其他品种, 富集系数最大, 耐镉性最强。这与田小霞等^[20]关于鸢尾材料镉含量较高、

富集系数较大及耐镉性较强的结论一致。实验材料中白天鹅、胜利者、白雪、粉小姐和蓝蝴蝶均属于路易斯安娜鸢尾，其中，白天鹅、胜利者和白雪的地上部镉含量低于根系镉含量，转运系数小于 $1 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ ，而粉小姐和蓝蝴蝶的情况则相反。这与韩鹰等^[21]研究镉胁迫下，路易斯安娜鸢尾地上部镉含量低于根系镉含量的结论有所差异。说明鸢尾植物同一种属下的不同品种，镉积累特征因基因型不同而存在差异。

表 5 10 种鸢尾镉积累量的差异

品种	地上部镉积累量	根系镉积累量	镉积累总量
白天鹅	1.07	2.62	3.69
蝴蝶花	3.83	15.18	19.01
粉小姐	1.44	0.75	2.19
蓝蝴蝶	1.64	0.41	2.05
黄菖蒲	3.62	14.00	17.62
白雪	1.03	7.57	8.60
胜利者	2.05	9.75	11.80
玉蝉花	3.93	56.67	60.60
守夜者	9.53	6.37	15.90
玫瑰红	2.85	2.90	5.75



a. 对照细胞, $\times 1.5 \text{ k}$; b. 处理细胞, $\times 2.0 \text{ k}$; c. 对照细胞, $\times 3.0 \text{ k}$; d. 处理细胞, $\times 2.5 \text{ k}$; e. 对照细胞, $\times 7.0 \text{ k}$; f. 处理细胞, $\times 7.0 \text{ k}$; g. 对照细胞, $\times 4.0 \text{ k}$; h. 处理细胞, $\times 4.0 \text{ k}$. CW. 细胞壁, N. 细胞核, Nu. 核仁, M. 线粒体, V. 液泡, Ch. 叶绿体。

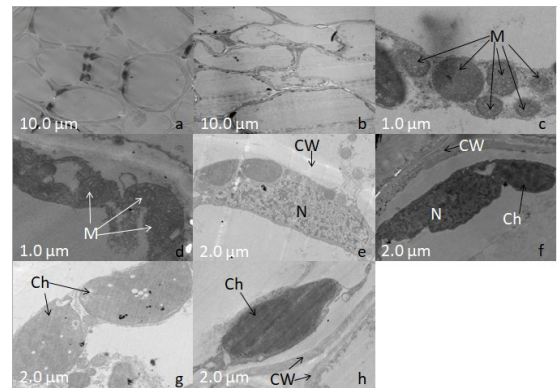
图 1 粉小姐细胞超微结构

Figure 1 Ultrastructure of *Iris play girl*

2.5 10 种鸢尾属植物镉积累量的差异

表 5 为 10 种鸢尾植株的地上部及根系镉积累量。由表 5 可知，玉蝉花、黄菖蒲和蝴蝶花的地上部镉积累量分别是 3.93 、 3.62 和 $3.83 \mu\text{g}$ ，远低于其根系的镉积累量（分别为 56.67 、 14.00 和 $15.18 \mu\text{g}$ ）。镉积累总量是鸢尾植物地上部和根系部分的镉积累量的总和，可反应出鸢尾植株对土壤重金属镉的积累能力大小。玉蝉花镉积累量最高，为 $60.60 \mu\text{g}$ ；

其次是蝴蝶花、黄菖蒲、守夜者和胜利者，镉积累量分别为 19.01 、 17.62 、 15.90 和 $11.80 \mu\text{g}$ ；而白雪、玫瑰红、白天鹅、粉小姐和蓝蝴蝶的镉积累量较低，均小于 $10.00 \mu\text{g}$ 。其中，10 种镉积累量大小顺序为：玉蝉花 $>$ 蝴蝶花 $>$ 黄菖蒲 $>$ 守夜者 $>$ 胜利者 $>$ 白雪 $>$ 玫瑰红 $>$ 白天鹅 $>$ 粉小姐 $>$ 蓝蝴蝶。玉蝉花、黄菖蒲和蝴蝶花地上部的镉积累量远低于根系的镉积累量，结合文中生长特点的结论，可知其生长过程中受到镉的影响较低，而粉小姐和蓝蝴蝶地上部的镉积累量远高于根系的镉积累量，其生长所受镉的抑制作用也较大，能够验证 Huang 等^[22]关于镉在植物地上部的积累量减少则植物受到的毒害作用减轻的说法。因此，猜测植物可通过将镉积累在根部，减少地上部运输镉的量从而提升耐镉能力，降低镉对植物生长的危害。



a. 对照细胞, $\times 0.7 \text{ k}$; b. 处理细胞, $\times 0.7 \text{ k}$; c. 对照细胞, $\times 7.0 \text{ k}$; d. 处理细胞, $\times 7.0 \text{ k}$; e. 对照细胞, $\times 2.0 \text{ k}$; f. 处理细胞, $\times 2.0 \text{ k}$; g. 对照细胞, $\times 3.0 \text{ k}$; h. 处理细胞, $\times 3.0 \text{ k}$ 。

图 2 白天鹅细胞超微结构

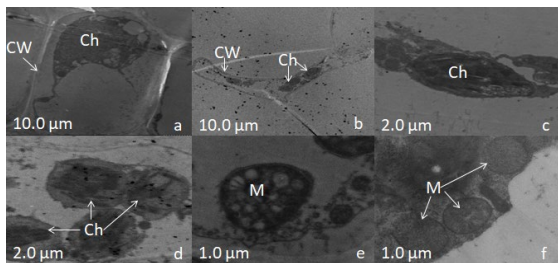
Figure 2 Ultrastructure of *Iris white swan*

2.6 镉胁迫对 4 个鸢尾品种超微结构的影响

(1) 镉胁迫对粉小姐品种超微结构的影响。图 1 为粉小姐植株细胞超微结构。Han 等^[23]研究表明，重金属镉被植物吸收后主要分布在细胞壁、细胞质和木质部导管内表面，严重时会导致植物细胞坏死。通过镉胁迫与对照条件下的细胞超微结构对比，发现粉小姐细胞出现质壁分离现象（图 1 b），细胞核表面结构出现轻微溶解现象（图 1 d），叶绿体出现肿胀现象（图 1 h），线粒体结构破碎、空洞化，细胞膜结构破碎、溶解，细胞壁周围产生了大量的内含物，可能是破碎的细胞膜和其他细胞结构脱落物等（图 1 f）。

(2) 镉胁迫对白天鹅品种超微结构的影响。图 2 为白天鹅植株细胞超微结构。通过镉胁迫与对照条件下的细胞超微结构对比，发现细胞壁扭曲变形（图 2 b）；线粒体形态变化不明显，线粒体周围有大量的

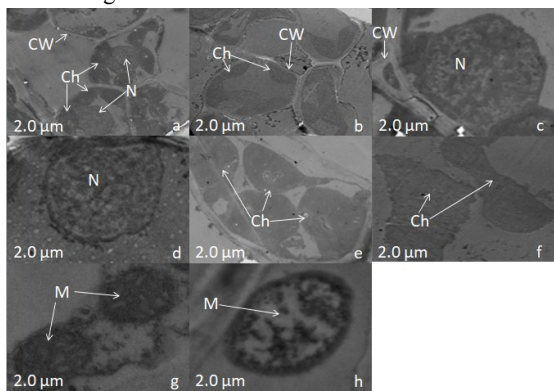
内含物, 可能是破碎的细胞结构脱落物质(图 2 d); 叶绿体、细胞核的形态无明显变化(图 2 h 和 2 f)。



a. 对照细胞, $\times 0.7$ k; b. 处理细胞, $\times 0.7$ k; c. 对照细胞, $\times 3.0$ k; d. 处理细胞, $\times 3.0$ k; e. 对照细胞, $\times 7.0$ k; f. 处理细胞, $\times 7.0$ k。

图 3 蝴蝶花细胞超微结构

Figure 3 Ultrastructure of *Iris tectorum*



a. 对照细胞, $\times 0.7$ k; b. 处理细胞, $\times 0.7$ k; c. 对照细胞, $\times 2.0$ k; d. 处理细胞, $\times 2.0$ k; e. 对照细胞, $\times 2.0$ k; f. 处理细胞, $\times 2.0$ k; g. 对照细胞, $\times 7.0$ k; h. 处理细胞, $\times 7.0$ k。

图 4 黄菖蒲细胞的超微结构

Figure 4 Ultrastructure of *Iris pseudacorus*

(3) 镉胁迫对蝴蝶花品种超微结构的影响。图 3 为蝴蝶花植株细胞的超微结构。通过镉胁迫与对照条件下的细胞超微结构对比, 发现个别细胞形态出现扭曲、变形(图 3 b), 叶绿体片层结构分布不均匀、紊乱(图 3 d), 线粒体双层膜结构受到轻微破坏(图 3 f)。

(4) 镉胁迫对黄菖蒲品种超微结构的影响。图 4 为黄菖蒲植株细胞的超微结构。通过镉胁迫与对照条件下的细胞超微结构对比, 发现细胞壁出现轻微变形, 镉处理后植物的细胞间隙变大, 且间隙中分布大量黑色颗粒物质, 此研究结果与 Zhou 等^[24]的研究结果一致, 而对照细胞无此现象。推测黑色颗粒物质是重金属镉, 可得出黄菖蒲细胞壁将有害物质镉阻隔在细胞间隙(图 4 b)。由此可知, 黄菖蒲可通过细胞壁的作用, 使有害物质重金属镉分布在细胞间隙, 以降低细胞的损伤, 增加自身的耐镉能力。细胞核形态变化不大(图 4 d)。个别叶绿体出现膜结构溶解现象, 形状发生改变(图 4 f)。个别线粒体结构也出现了严重的破碎、溶解现象(图 4 h)。

3 讨论与结论

镉是自然界中植物的非必需元素, 在镉污染的土壤中, 会有少量镉被植物吸收, 镉进入植物体内后会通过破坏或抑制植物的生命活动, 如蒸腾作用、有机物合成过程等对植物生长、细胞形态产生一定的影响。不同的镉含量影响不同, 不同的植物所受的影响也不尽相同。一般情况下高浓度镉对植物的生理生长有抑制和破坏的作用, 然而对蝴蝶花有刺激生长的作用, 蝴蝶花在 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤镉浓度下, 株高增加了 2.5%, 叶宽增加了 5.8%, 这也表明了蝴蝶花的耐重金属镉的能力较强, 与原海燕等^[25]研究马蔺镉胁迫下的生长情况相同。前人研究中提出重金属镉元素可能通过与植物的某种物质结合或者替代生命活动中必不可少的某种元素, 从而影响植物的生命进程, 严重时可导致植物黄化或枯死^[26]。本试验研究结果表明, 不同的鸢尾品种耐重金属特性不同, 这与范洪黎等^[19]的试验结果一致, 猜测与植物体内抗重金属的特殊物质有关。前人研究发现重金属刺激下会导致植物产生几种特定的蛋白质, 对重金属胁迫有一定的缓解作用, 而合成相关蛋白质的基因需要通过进一步的发掘与提取, 从而对未来植物用于重金属土壤、水域的净化起到关键性作用^[15]。目前可通过植物对重金属的吸收积累作用, 筛选出适宜的植物用于重金属污染地区的园林应用。植物对重金属的积累部位主要集中在根部或者地上部, 而不同的鸢尾品种有差异, 大部分鸢尾品种所吸收的重金属镉积累在根部的量远远高于地上部, 这与植物的抗重金属特性、解毒机制相关。由于试验在温室中开展, 统一控制所有鸢尾属植物的生长条件, 而不同的鸢尾属植物所适宜生长的环境不同, 其中, 不同的湿度条件下植物所吸收积累重金属的量不同, 这是由于氯化镉易溶于水, 从而更容易被植物吸收。对 10 个鸢尾品种分析可得: (1) 玉蝉花镉含量、镉积累总量最高, 株高、叶宽、叶片数、鲜重和生物量受到的影响较小, 生长受到的抑制作用较小, 适合应用于镉污染地区的植物修复; (2) 蝴蝶花镉含量较低, 实验条件下, 叶片的生长受到促进作用, 适宜作为镉污染地区的替代植物; (3) 黄菖蒲、守夜者和胜利者的镉吸收含量较低, 镉积累总量较低, 而叶宽、株高、叶片数、鲜重和生物量受到的抑制作用较小, 也可用于镉污染地区的园林造景植物应用; (4) 粉小姐、白天鹅、白雪和蓝蝴蝶的镉吸收含量和镉积累总量较低, 而生长受到的抑制程度较高, 不适合种植于镉污染情况严重的地区。

重金属被植物摄入后大部分被阻隔在细胞壁之外的细胞间隙,而少部分会进入细胞破坏叶绿体、线粒体、细胞质等细胞结构的形态。在试验的镉浓度条件下,10种鸢尾植物长势减缓、分蘖数减少,而颜色和形状并未发生异常现象,只有通过透射电镜才能观察到植物的细胞结构已发生了极大的改变。粉小姐、黄菖蒲细胞线粒体出现溶解、破碎、空洞化现象,线粒体受到的损害程度较大。此结果与吴建慧等^[27]认为线粒体对重金属敏感程度较高的结论相同。此外,粉小姐品种的叶绿体结构肿胀,蝴蝶花品种的叶绿体片层结构紊乱,黄菖蒲品种的叶绿体轻微溶解。相关研究表明,叶绿体肿胀与重金属离子进入细胞中,导致叶绿体膜结构的渗透调节系统紊乱有关^[28]。植物细胞器是植物每项生命活动的运作系统,细胞器破坏又会导致植物生长停滞,有机物无法合成。其中,叶绿体膜结构溶解,无法进行正常的光合作用;线粒体膜结构消失、溶解,细胞的呼吸作用、光合作用和蒸腾作用等一系列生命活动受抑制,能量无法进行正常转换,物质运输受阻^[29];细胞质壁结构被破坏,抑制细胞正常分裂活动。细胞核是细胞遗传和代谢系统活动的控制中心^[30],而镉胁迫下细胞核的形态变化不明显,猜想是因为细胞核的核被膜是选择性渗透膜,控制核和细胞质之间的物质交换作用,使得细胞核成为细胞中一个相对独立的体系,能够减少重金属进入且能及时排出重金属物质。综合以上分析得出镉胁迫下鸢尾细胞结构敏感程度:细胞壁>线粒体>叶绿体>细胞核。

参考文献:

- [1] 邵小杰,杨洪强. 氯化镉胁迫下葡萄根系生理反应的品种差异[J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2485-2490.
- [2] 张兴梅,杨清伟,李扬. 土壤镉污染现状及修复研究进展[J]. 河北农业科学, 2010, 14(3): 79-81.
- [3] MORENO-CASELLES J, MORAL R, PÉREZ-ESPINOSA A, et al. Cadmium accumulation and distribution in cucumber plant[J]. J Plant Nutr, 2000, 23(2): 243-250.
- [4] 高岚,李泽琴,李国臣. 土壤重金属污染植物修复研究动态[J]. 作物杂志, 2011(5): 12-15.
- [5] 田小霞,毛培春,郭强,等. 镉胁迫对马蔺根系活力 and 矿质营养元素吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(9): 2090-2096.
- [6] HAN Y L, HUANG S Z, GU J G, et al. Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L.[J]. Ecotoxicology, 2008, 17(8): 853-859.
- [7] CALDELAS C, ARAUS J L, FEBRERO A, et al. Accumulation and toxic effects of chromium and zinc in *Iris pseudacorus* L.[J]. Acta Physiol Plant, 2012, 34(3): 1217-1228.
- [8] HAN Y L, HUANG S Z, YUAN H Y, et al. Organic acids on the growth, anatomical structure, biochemical parameters and heavy metal accumulation of *Iris lactea* var. *chinensis* seedling growing in Pb mine tailings[J]. Ecotoxicology, 2013, 22(6): 1033-1042.
- [9] ZHONG S Q, SHI J C, XU J M. Influence of iron plaque on accumulation of lead by yellow flag (*Iris pseudacorus* L.) grown in artificial Pb-contaminated soil[J]. J Soils Sediments, 2010, 10(5): 964-970.
- [10] 韩鹰,高岳,王薇,等. 路易斯安娜鸢尾对重金属镉的吸收、积累及其抗性的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2014, 35(1): 76-80.
- [11] 史一鸣,王文垅,陈少华,等. 西伯利亚鸢尾人工湿地对镉污染河水的净化研究[J]. 环境工程, 2016, 34(1): 21-24, 40.
- [12] 朱广慧,唐蓉,高莉,等. 镉、铜胁迫对路易斯安娜鸢尾生理生化的影响[J]. 北方园艺, 2011(24): 84-86.
- [13] 肖罗怡. 植物材料水浸提剂对污染土壤锌和镉淋洗效率研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [14] MA N, WANG W L, GAO J Q, et al. Removal of cadmium in subsurface vertical flow constructed wetlands planted with *Iris sibirica* in the low-temperature season[J]. Ecol Eng, 2017, 109: 48-56.
- [15] 李春焯,丁国华,刘保东. 重金属影响植物细胞超微结构和功能的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(18): 114-118.
- [16] 马晶晶. 5种鸢尾属植物耐盐及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [17] 李丽. 马蔺对 Cd 胁迫的生理响应及富集特性研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2016.
- [18] 李伟. 盐胁迫下拟南芥与盐芥显微及超微结构的比较研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014, 42(4): 1316-1324.
- [19] 范洪黎,周卫. 镉超富集苋菜品种(*Amaranthus mangostanus* L.)的筛选[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1316-1324.
- [20] 田小霞,李丽,毛培春,等. 马蔺苗期耐镉性分析及鉴定指标筛选[J]. 核农学报, 2018, 32(3): 591-599.
- [21] 韩鹰,朱旭东,邓鹏,等. 路易斯安娜鸢尾对镉的积累特性及对矿质元素吸收的影响[J]. 北方园艺, 2015(11): 65-70.
- [22] HUANG Y F, ZHU Z B, WU X, et al. Lower cadmium accumulation and higher antioxidative capacity in edible parts of *Brassica campestris* L. seedlings applied with glutathione under cadmium toxicity[J]. Environ Sci Pollut Res, 2019, 26(13): 13235-13245.
- [23] HAN Y L, YUAN H Y, HUANG S Z, et al. Cadmium tolerance and accumulation by two species of *Iris*[J]. Ecotoxicology, 2007, 16(8): 557-563.
- [24] ZHOU Y Q, HUANG S Z, YU S L, et al. The physiological response and sub-cellular localization of lead and cadmium in *Iris pseudacorus* L.[J]. Ecotoxicology, 2009, 19(1): 69-76.
- [25] 原海燕,郭智,黄苏珍. Pb 污染对马蔺生长、体内重金属元素积累以及叶绿体超微结构的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3350-3357.
- [26] CALDELAS C, BORT J, FEBRERO A. Ultrastructure and subcellular distribution of Cr in *Iris pseudacorus* L. using TEM and X-ray microanalysis[J]. Cell Biol Toxicol, 2012, 28(1): 57-68.
- [27] 吴建慧,兰凤,张静,等. 重金属铅对绢毛委陵菜生理特性和叶片超微结构的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(7): 1383-1389.
- [28] 黄晓霞,匡经舸,李琬婷,等. 铅镉胁迫对小叶榕叶片细胞超微结构的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(6): 41-47.
- [29] 郑庆伟. 研究发现植物细胞核和质体基因差异表达触发植物免疫反应新机制[J]. 农药市场信息, 2019(4): 45-46.
- [30] 胡冰钰,方志刚,娄来清,等. 14份柳枝稷种质资源苗期耐镉性综合评价[J]. 草业学报, 2019, 28(1): 27-36.