

不同种源马蔺幼苗对 Cd 耐性及积累特性的差异分析

王玮琳, 刘清泉, 张永侠, 王银杰, 原海燕, 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: 采用水培法对不同浓度(0、25 和 50 mg · L⁻¹) Cd 胁迫下 4 个种源(辽宁、山东、河南和江西)马蔺(*Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.)幼苗生长和 Cd 积累特性进行了分析。结果表明:随着 Cd 浓度的提高,同一种源马蔺幼苗的株高、根长以及地上部和根系的鲜质量和干质量的相对值总体上呈逐渐减小的趋势。25 和 50 mg · L⁻¹ Cd 处理下,辽宁种源马蔺幼苗的株高、根长以及地上部和根系的鲜质量和干质量的相对值总体上较高。随着 Cd 浓度的提高,辽宁种源马蔺幼苗地上部和根系中 Cd 含量明显升高;山东、河南和江西种源马蔺幼苗地上部中 Cd 含量不同程度降低,根系中 Cd 含量明显升高。马蔺幼苗根系中 Cd 含量远高于地上部中 Cd 含量,说明马蔺幼苗中的 Cd 主要积累在根系。50 mg · L⁻¹ Cd 处理下,辽宁种源马蔺幼苗的 Cd 转运系数和生物富集系数总体上显著大于山东、河南和江西种源。综合研究结果显示:辽宁种源马蔺幼苗的 Cd 耐性以及 Cd 转运能力和富集能力均较强,可作为 Cd 污染环境的修复材料。

关键词: 马蔺; 种源; Cd 耐性; 转运系数; 生物富集系数

中图分类号: Q945.78; S682.1⁺9; X503.233 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)02-0057-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.02.08

Analysis on differences in tolerance and accumulation characteristics of Cd of *Iris lactea* var. *chinensis* seedlings from different provenances WANG Weilin, LIU Qingquan, ZHANG Yongxia, WANG Yinjie, YUAN Haiyan, HUANG Suzhen^① (Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(2): 57-63

Abstract: Growth and Cd accumulation characteristics of *Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedlings from four provenances (Liaoning, Shandong, He'nan, and Jiangxi) under different concentrations (0, 25, and 50 mg · L⁻¹) of Cd stress were analyzed by using hydroponic method. The results show that with enhancing of Cd concentration, relative values of height, root length, and fresh and dry masses of above-ground part and root of *I. lactea* var. *chinensis* seedlings from the same provenance show a tendency to gradually decrease in general. And under the treatments of 25 and 50 mg · L⁻¹ Cd, those of *I. lactea* var. *chinensis* seedlings from Liaoning provenance are relatively high in general. With enhancing of Cd concentration, Cd content in above-ground part and root of *I. lactea* var. *chinensis* seedlings from Liaoning provenance increases evidently; Cd content in above-ground part of *I. lactea* var. *chinensis* seedlings from Shandong, He'nan, and Jiangxi provenances decreases with different degrees, and that in root increases obviously. Cd content in root of *I. lactea* var. *chinensis* seedlings is much higher than that in above-ground part, indicating that Cd in *I. lactea* var. *chinensis* seedlings is mainly accumulated in root. Under the treatment of 50 mg · L⁻¹ Cd, translocation factor and bio-concentration factor of Cd of *I. lactea* var. *chinensis* seedlings from Liaoning provenance are significantly greater than those of seedlings from Shandong, He'nan, and Jiangxi provenances in general. The comprehensive research results show that Cd tolerance and abilities of translocation and enrichment of Cd of *I. lactea* var. *chinensis* seedlings from Liaoning provenance are relatively strong, which can be used in

收稿日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31572196); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20180317); 江苏省植物资源研究与利用重点实验室开放基金(JSPKLB201843)

作者简介: 王玮琳(1993—),女,江苏南京人,硕士研究生,主要从事观赏植物重金属耐性方面的研究。

^①通信作者 E-mail: hsz1959@126.com

phytoremediation of Cd contaminated environment.

Key words: *Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.; provenance; Cd tolerance; translocation factor; bio-concentration factor

近年来土壤和水体中的镉(Cd)及其他重金属元素含量剧增。Cd的生物毒性较强,在人体中的半衰期长达30年^[1],长期摄入会危害肾脏、神经和骨骼等^[2]。Cd在生物体中迁移性很强,易被有机体吸收和积累,因此,Cd污染的治理工作迫在眉睫。植物修复是指利用植物去除污染土壤和废水中的重金属,具有绿色、无二次污染和应用方便等特点,现已成为治理重金属污染的有效途径^[3-4]。植物对重金属的耐性以及植株地上部对重金属的积累能力是决定植物修复效率的关键要素,因此,筛选重金属耐性和积累能力强的植物对于重金属污染环境的修复具有重要意义。

目前用于修复Cd污染环境的植物主要包括宝山堇菜(*Viola baoshanensis* Shu, Liu et Lan)^[5]、忍冬(*Lonicera japonica* Thunb.)^[6]、龙葵(*Solanum nigrum* Linn.)^[7]、天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens* J. Presl et C. Presl)^{[8]40}、东南景天(*Sedum alfredii* Hance)^[9]、油菜(*Brassica campestris* Linn.)^[10]和印度芥菜(*Brassica juncea* Linn.)^[11]等Cd超积累植物。然而,目前已发现的Cd超积累植物普遍具有生物量小、生长速度慢和一年生等特点,严重影响Cd污染环境的修复效率^[10]。

近年来,国内外学者对观赏植物Cd耐性和积累机制进行研究^[12-17]。观赏植物修复Cd污染土壤不仅具有景观和生态功能,还能创造巨大的经济价值,同时还有助于减少Cd向食物链中的转移^[18]。鸢尾属(*Iris* Linn.)植物是优良的多年生观赏植物,具有一定的重金属耐性和积累能力。马蔺[*Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.]是鸢尾属中分布广且应用价值高的植物之一,具有生长速度快、生物量大、适应性广、抗性强、观赏价值高和露天繁殖简单等特性^[19],在生态建设中有良好的应用前景。近年来,国内外有关马蔺的研究主要集中在生物学特性和栽培技术等方面^[20-23]。原海燕等^[24-25]比较了鸢尾属4种植物的Cd耐性差异,发现马蔺的耐性最强,在铅锌矿区土壤中种植马蔺1个月后,土壤Cd修复效率为22.3%。彭少麟等^[26]认为,在重金属耐性方面,同种植物不同生态型可能具有较大差异,这些差异可能源

于金属转运体、遗传特性、解毒机制以及酶系统等方面。Lombi等^[27]研究发现,不同生态型天蓝遏蓝菜的Cd耐性存在差异,来自法国南部的Ganges生态型天蓝遏蓝菜较来自比利时的Prayon生态型天蓝遏蓝菜的Cd耐性更强。胡莹等^[28]在研究Cd对不同生态型水稻(*Oryza sativa* Linn.)的毒性研究中发现,相对于籼稻品种‘K优818’(‘KYou 818’),Cd对粳稻品种‘杨辐粳7号’(‘Yangdao 7’)生长指标的影响更大。因此,对不同生态型植物富集特性的比较分析,是揭示植物重金属耐性和积累机制的重要途径,并且高耐性和高积累的生态型能更好地修复重金属污染环境^[26]。

为了解不同种源马蔺对Cd耐性和积累能力的差异,本研究采用水培法对Cd胁迫下辽宁、山东、河南和江西4个种源马蔺幼苗的生长状况及Cd积累和分布状况进行了研究,以期研究马蔺Cd耐性和积累机制以及Cd污染环境的植物高效修复提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试马蔺种子分别采自辽宁、山东、河南和江西,均为无性繁殖群体当年自然结实的种子,种源地土壤类型分别为黑土、棕壤土、黄壤土和红壤土。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 挑选籽实饱满的马蔺种子,经体积分数10%NaClO溶液消毒30 min,自来水冲洗数次后播种于干净的河沙中。待种子萌发后选择生长基本一致、株高约10 cm且无病虫害的幼苗,用海绵将幼苗固定于带有小孔的黑色泡沫板上,每孔1株幼苗,然后置于塑料杯(口径9.5 cm、高13.5 cm)中,塑料杯用黑色胶带包裹,每杯5株幼苗。用去离子水配置1/2 Hoagland营养液,每杯加入1 L营养液,每隔2 d更换1次营养液。预培养15 d后进行Cd处理。Cd以CdCl₂·2.5H₂O形态加入,设置对照、低浓度和高浓度3个处理,Cd终浓度分别为0、25和50 mg·L⁻¹,3次重复。处理30 d后取样。

1.2.2 生长指标测定 每杯选取4~5株长势基本一致的幼苗,用蒸馏水冲洗根系3次,再用 $555 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液清洗3次,去除根系表面粘附的金属离子。吸水纸吸干表面水分,分别用直尺(精度0.1 cm)测量株高和根长,然后将每杯的植株分成地上部和根系2部分,同杯植株的地上部和根系分别混合,用电子天平(精度0.001 g)分别称量地上部和根系的鲜质量,然后于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青30 min, $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量,采用电子天平分别称量地上部和根系的干质量。

1.2.3 Cd含量测定及相关指标计算 采用 HNO_3 - HClO_4 湿法消化法^[4]测定Cd含量,并计算Cd的转移系数(translocation factor,TF)和生物富集系数(bio-concentration factor,BCF),计算公式分别为 $\text{TF} = \text{地上部中Cd含量}/\text{根系中Cd含量}$ ^[29]和 $\text{BCF} = \text{地上部中Cd含量}/\text{营养液中Cd浓度}$ ^[30]。

1.3 数据处理与分析

实验数据采用SPSS 13.0统计分析软件进行方差分析和LSD多重比较。

2 结果和分析

2.1 Cd胁迫对马蔺幼苗株高和根长的影响

Cd胁迫下不同种源马蔺幼苗株高和根长的比较

结果见表1。由表1可以看出:随着Cd浓度的提高,同一种源马蔺幼苗的相对株高和相对根长总体上呈逐渐减小的趋势。25和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理下,不同种源间马蔺幼苗相对株高的差异较大,其中,辽宁种源的相对株高最高,河南种源的相对株高最低,且二者间存在显著差异。25和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理下,不同种源间马蔺幼苗相对根长的差异较小,其中,25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理下辽宁种源以及 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理下江西种源的相对根长最长,山东种源的相对根长最短。

2.2 Cd胁迫对马蔺幼苗鲜质量和干质量的影响

Cd胁迫下不同种源马蔺幼苗鲜质量和干质量的比较结果见表2。由表2可以看出:随着Cd浓度的提高,同一种源马蔺幼苗地上部和根系的相对鲜质量和相对干质量总体上呈逐渐减小的趋势。25和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理下,辽宁和江西种源地上部的相对鲜质量和相对干质量明显高于山东和河南种源,其中,河南种源的降幅最大。25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理下,4个种源间马蔺幼苗根系的相对鲜质量和相对干质量均无显著差异; $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理下,辽宁种源根系的相对鲜质量和相对干质量最大,其根系相对鲜质量显著高于其他3个种源。

2.3 Cd胁迫对马蔺幼苗中Cd含量的影响

Cd胁迫下不同种源马蔺幼苗地上部和根系中Cd

表1 Cd胁迫下不同种源马蔺幼苗株高和根长的比较($\bar{X} \pm \text{SD}$)

Table 1 Comparison on height and root length of *Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedlings from different provenances under Cd stress ($\bar{X} \pm \text{SD}$)

Cd 浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ Cd concentration	种源 Provenance	株高 Height		根长 Root length	
		测量值/cm Measured value	相对值/ $\%^{1)}$ Relative value ¹⁾	测量值/cm Measured value	相对值/ $\%^{1)}$ Relative value ¹⁾
0	辽宁 Liaoning	13.83±0.76		28.00±1.00	
	山东 Shandong	17.67±0.58		26.67±6.43	
	河南 He'nan	18.33±1.16		29.67±4.51	
	江西 Jiangxi	16.67±1.53		23.33±2.89	
25	辽宁 Liaoning	14.00±1.00	101.20±7.23a	18.00±1.73	64.29±6.19a
	山东 Shandong	16.00±1.73	90.57±9.80ab	15.33±2.52	57.50±9.44a
	河南 He'nan	14.67±0.58	80.00±3.15b	18.67±3.51	62.92±11.84a
	江西 Jiangxi	14.00±1.00	84.00±6.00b	14.33±1.16	61.43±4.95a
50	辽宁 Liaoning	13.33±1.53	96.39±11.04a	15.67±1.16	55.95±4.12a
	山东 Shandong	14.67±0.58	83.02±3.27b	14.33±1.16	53.75±4.33a
	河南 He'nan	13.00±0.00	70.91±0.00c	16.00±2.00	53.93±6.74a
	江西 Jiangxi	14.83±0.29	89.00±1.73ab	13.33±2.52	57.14±10.79a

¹⁾ 相对值表示各处理组的指标占对照组($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)该指标的百分比 Relative value indicates percentage of index in each treatment group to that in the control group ($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd). 同列中不同小写字母表示同一Cd浓度不同种源间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different provenances of the same Cd concentration.

表2 Cd胁迫下不同种源马蔺幼苗鲜质量和干质量的比较 ($\bar{X}\pm SD$)Table 2 Comparison on fresh and dry masses of *Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedlings from different provenances under Cd stress ($\bar{X}\pm SD$)

Cd 浓度/(mg · L ⁻¹) Cd concentration	种源 Provenance	地上部鲜质量 Fresh mass of above-ground part		根系鲜质量 Fresh mass of root	
		测量值/g Measured value	相对值/% ¹⁾ Relative value ¹⁾	测量值/g Measured value	相对值/% ¹⁾ Relative value ¹⁾
0	辽宁 Liaoning	0.52±0.07		0.78±0.22	
	山东 Shandong	0.72±0.11		0.95±0.21	
	河南 He'nan	0.94±0.20		0.83±0.18	
	江西 Jiangxi	0.52±0.08		0.96±0.18	
25	辽宁 Liaoning	0.26±0.07	49.15±13.12a	0.22±0.04	28.10±4.70a
	山东 Shandong	0.31±0.07	42.48±9.43ab	0.23±0.08	24.32±8.26a
	河南 He'nan	0.31±0.05	33.22±4.79b	0.23±0.05	27.64±5.61a
	江西 Jiangxi	0.28±0.01	54.74±2.27a	0.22±0.04	22.92±4.59a
50	辽宁 Liaoning	0.26±0.04	49.79±7.00ab	0.23±0.03	29.67±4.05a
	山东 Shandong	0.28±0.06	38.96±7.89b	0.16±0.02	17.39±2.35b
	河南 He'nan	0.24±0.06	25.89±5.98c	0.16±0.05	19.56±6.46b
	江西 Jiangxi	0.32±0.06	61.31±11.57a	0.16±0.04	16.96±3.40b
Cd 浓度/(mg · L ⁻¹) Cd concentration	种源 Provenance	地上部干质量 Dry mass of above-ground part		根系干质量 Dry mass of root	
		测量值/g Measured value	相对值/% ¹⁾ Relative value ¹⁾	测量值/g Measured value	相对值/% ¹⁾ Relative value ¹⁾
0	辽宁 Liaoning	0.11±0.01		0.10±0.03	
	山东 Shandong	0.14±0.02		0.09±0.02	
	河南 He'nan	0.17±0.05		0.07±0.01	
	江西 Jiangxi	0.10±0.02		0.09±0.02	
25	辽宁 Liaoning	0.09±0.03	84.06±24.57a	0.04±0.01	38.15±10.69a
	山东 Shandong	0.10±0.01	71.26±6.72ab	0.04±0.01	44.67±15.40a
	河南 He'nan	0.10±0.01	57.13±3.60b	0.04±0.01	50.58±13.62a
	江西 Jiangxi	0.09±0.00	87.41±1.90a	0.03±0.01	39.62±7.03a
50	辽宁 Liaoning	0.09±0.02	81.61±18.66ab	0.03±0.00	29.68±3.31a
	山东 Shandong	0.09±0.02	68.08±11.32b	0.02±0.00	25.48±4.53a
	河南 He'nan	0.08±0.02	46.76±8.53c	0.02±0.00	26.07±3.38a
	江西 Jiangxi	0.10±0.00	92.62±1.73a	0.02±0.00	24.07±3.92a

¹⁾ 相对值表示各处理组的指标占对照组(0 mg · L⁻¹ Cd) 该指标的百分比 Relative value indicates percentage of index in each treatment group to that in the control group (0 mg · L⁻¹ Cd). 同列中不同小写字母表示同一 Cd 浓度不同种源间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different provenances of the same Cd concentration.

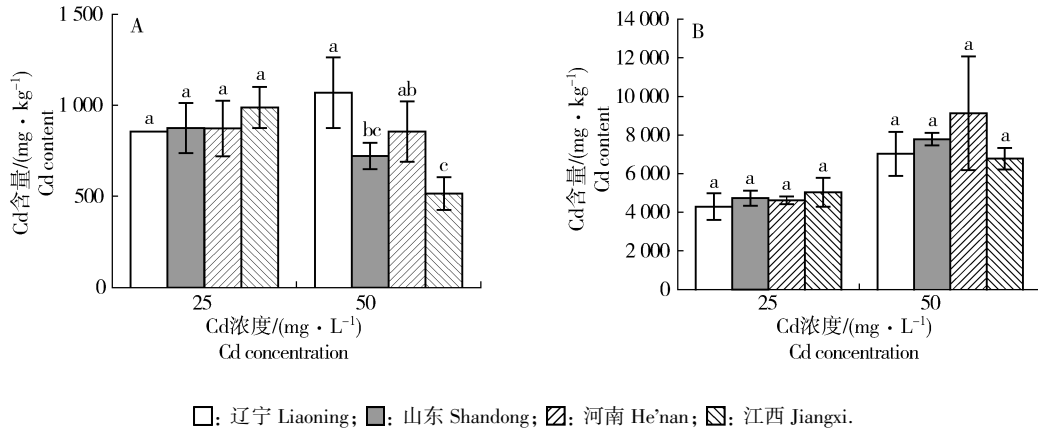
含量的比较结果见图1。由图1-A可以看出:25和50 mg · L⁻¹ Cd处理下,4个种源马蔺幼苗地上部中Cd含量均高于500 mg · kg⁻¹,表明马蔺具有较强的Cd积累能力。25 mg · L⁻¹ Cd处理下,4个种源地上部中Cd含量在750~1 000 mg · kg⁻¹之间,且不同种源间地上部中Cd含量差异不显著;50 mg · L⁻¹ Cd处理下,辽宁种源地上部中Cd含量总体上显著高于其他3个种源,其中,江西种源地上部中Cd含量最低。

由图1-B可以看出:25和50 mg · L⁻¹ Cd处理下,不同种源马蔺幼苗根系中Cd含量均高于4 000 mg · kg⁻¹,远高于地上部中Cd含量,且根系中Cd含

量均随着Cd浓度的提高而升高,但不同种源间根系中Cd含量差异不显著。

2.4 Cd胁迫对马蔺幼苗Cd转运系数和生物富集系数的影响

Cd胁迫下不同种源马蔺幼苗Cd转运系数和生物富集系数的比较结果见表3。由表3可以看出:25 mg · L⁻¹ Cd处理下,不同种源间马蔺幼苗的Cd转运系数和生物富集系数均差异不显著;50 mg · L⁻¹ Cd处理下,辽宁种源的Cd转运系数和生物富集系数总体上显著高于其他3个种源,而江西种源的Cd转运系数和生物富集系数均最低。



不同小写字母表示同一 Cd 浓度不同种源间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different provenances of the same Cd concentration.

图 1 Cd 胁迫下不同种源马蔺幼苗地上部 (A) 和根系 (B) 中 Cd 含量的比较
Fig. 1 Comparison on Cd content in above-ground part (A) and root (B) of *Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedlings from different provenances under Cd stress

表 3 Cd 胁迫下不同种源马蔺幼苗 Cd 转运系数和生物富集系数的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Comparison on translocation factor and bio-concentration factor of Cd of *Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedlings from different provenances under Cd stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Cd 浓度/(mg·L ⁻¹) Cd concentration	种源 Provenance	转运系数 Translocation factor	生物富集系数 Bio-concentration factor
25	辽宁 Liaoning	0.20±0.03a	34.21±0.06a
	山东 Shandong	0.19±0.04a	34.98±5.49a
	河南 He'nan	0.19±0.04a	34.89±6.12a
	江西 Jiangxi	0.20±0.01a	39.50±4.50a
50	辽宁 Liaoning	0.15±0.02a	21.38±3.90a
	山东 Shandong	0.09±0.01b	14.43±1.45bc
	河南 He'nan	0.10±0.03b	17.11±3.33ab
	江西 Jiangxi	0.08±0.01b	10.30±1.80c

¹⁾ 同列中不同小写字母表示同一 Cd 浓度不同种源间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different provenances of the same Cd concentration.

3 讨论和结论

Cd 胁迫下, 植物体内叶绿素含量下降, 导致光合作用减弱, 营养物质积累减少, 同时细胞膜被破坏, 导致代谢系统紊乱, 有机物过度消耗, 最终引起植物地上部和根生长受阻, 生物量减少, 生育期推迟, 叶片变黄, 甚至出现坏死斑等症状^[8,32,25,31]。一般来说, 植物株高、根长、鲜质量和干质量等生长指标可以反映植物在 Cd 胁迫下的生长状况^[32]。原海燕^[24]通过对 Cd 胁迫下鸢尾属植物相关生长指标进行分析, 认为

马蔺的 Cd 耐性最强。本研究对 Cd 胁迫下 4 个种源马蔺幼苗的生长状况进行比较, 认为辽宁种源的 Cd 耐性较强。

Cd 超积累植物需要具备以下条件: 植物地上部 Cd 含量在 100 mg·kg⁻¹ 以上, 转运系数大于 1, 且植物生长没有受到严重影响^[33]。本研究中, Cd 处理下, 马蔺幼苗地上部和根系中 Cd 含量均高于 100 mg·kg⁻¹, 但转运系数小于 1, 因此, 马蔺属于 Cd 积累植物, 这一结果与已有的马蔺苗期 Cd 耐性和积累能力的研究结果一致^[34-35]。一般来说, 若 Cd 在叶片中积累过多, 会直接影响植物的光合作用, 因此, 根系积累相对较多的 Cd 能够减小 Cd 对植物地上部的毒害作用^[36]。马蔺幼苗地上部 Cd 含量超过 100 mg·kg⁻¹, 但生长并未受到严重影响, 因此, 马蔺地上部存在一定的 Cd 耐性和积累能力。不同生态型或种源地间, 同种植物的重金属耐性和积累能力可能存在一定的差异^[37]。本研究对 4 个种源马蔺幼苗 Cd 积累和转运特性进行比较, 结果显示: 高浓度 (50 mg·L⁻¹) Cd 处理下, 辽宁种源马蔺幼苗地上部中 Cd 含量最高, 明显高于其他种源, 但不同种源根系中 Cd 含量的差异并不显著, 推测马蔺地上部对 Cd 的积累能力存在差异, 可能与 Cd 从根系向地上部的转运能力差异有关。

转运系数能反映植物将重金属从根系转移到地上部的能力, 生物富集系数是评价植物对重金属离子的积累能力^[38], 两者都可以用来评价植物修复土壤

重金属污染土壤的能力^[39]。本研究中,马蔺幼苗 Cd 转运系数和生物富集系数均随着 Cd 浓度的提高而降低。Guo 等^[38]研究认为,随着 Cd 处理浓度的提高,冰草 [*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.] 的 Cd 转运系数逐渐降低。王小雪^[40]在海滨木槿 (*Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.) 响应重金属的研究中也有类似结果。Cd 超积累或积累植物能够将根系吸收的 Cd 转移至地上部,并通过螯合作用和区域化作用等解毒机制减小重金属对地上部的毒害作用^[41]。在高浓度 Cd 处理下,辽宁种源马蔺幼苗的 Cd 转运系数和生物富集系数总体上显著大于其他 3 个种源,说明该种源马蔺幼苗的 Cd 转运能力较强;且辽宁种源马蔺幼苗的相对株高和相对地径较大,说明该种源马蔺幼苗的 Cd 耐性在 4 个种源中也最强,而相关调控机制仍有待进一步明确。

综上所述,辽宁种源马蔺幼苗的 Cd 耐性以及 Cd 转运能力和富集能力均最强,可作为 Cd 污染环境的修复材料进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 曹晓林. 水稻镉结合蛋白质鉴定与分析[D]. 杭州: 中国农业科学院中国水稻研究所, 2015: 13.
- [2] SATARUG S, GARRETT S H, SENS M A, et al. Cadmium, environmental exposure, and health outcomes [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, 118(2): 182-190.
- [3] 韩璐, 魏巍, 官子楸, 等. Zn/Cd 超富集植物天蓝遏蓝菜 (*Thlaspi caerulescens*) 中 *TcCaM2* 基因的克隆及在酵母中的重金属耐受性分析[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007, 24(4): 465-472.
- [4] 鲁如坤, 熊礼明, 时正元. 关于土壤—作物生态系统中镉的研究[J]. *土壤*, 1992, 24(3): 129-132.
- [5] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜 (*Viola baoshanensis*) ——一种新的镉超富集植物[J]. *科学通报*, 2003, 48(19): 2046-2049.
- [6] 刘周莉, 何兴元, 陈玮. 忍冬——一种新发现的镉超富集植物[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 666-670.
- [7] 罗琼, 葛青, 刘小京, 等. 重金属超富集植物龙葵对镉响应的蛋白组学分析[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(11): 1429-1436.
- [8] 孙瑞莲. 镉超积累植物的生态特征及污染耐性机理分析[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2006.
- [9] 金晓芬. 镉超积累植物东南景天谷胱甘肽代谢特征及比较蛋白质组学研究[D]. 杭州: 浙江大学环境与资源学院, 2008: 53.
- [10] 王激清, 刘波, 苏德纯. 超积累镉油菜品种的筛选[J]. *河北农业大学学报*, 2003, 26(1): 13-16.
- [11] EBBS S D, LASAT M M, BRADY D J, et al. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil [J]. *Journal of Environment Quality*, 1997, 26(5): 1424-1430.
- [12] 邹春萍, 张佩霞, 陈金峰, 等. 25 种观赏植物的重金属富集特性研究[J]. *广东农业科学*, 2015(12): 66-72.
- [13] LIU J-N, ZHOU Q-X, SUN T, et al. Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(1): 261-267.
- [14] CALDELAS C, ARAUS J L, FEBRERO A, et al. Accumulation and toxic effects of chromium and zinc in *Iris pseudacorus* L. [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(3): 1217-1228.
- [15] CHATTERJEE S, SINGH L, CHATTOPADHYAY B, et al. A study on the waste metal remediation using floriculture at East Calcutta Wetlands, a Ramsar site in India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(8): 5139-5150.
- [16] 燕傲蕾, 吴亭亭, 王友保, 等. 三种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性[J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2491-2498.
- [17] 梁明霞, 郭英, 何云晓, 等. 重金属处理下萱草的富集能力和生理生态响应[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(8): 269-274.
- [18] 韦良焕. 镉污染土壤的植物修复研究[D]. 西安: 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 2007: 16.
- [19] 徐飞鹏, 岳俊芳. 优良水保护坡观赏地被植物——马蔺的开发应用前景[J]. *内蒙古科技与经济*, 2003(12): 54-55.
- [20] 刘德福, 陈世璜, 陈敬文, 等. 马蔺的繁殖特性及生态地理分布的研究[J]. *内蒙古农牧学院学报*, 1998, 19(1): 1-6.
- [21] 王育青, 马小春, 周延林, 等. 马蔺开花及传粉的生物学特性[J]. *中国草地学报*, 2010, 32(3): 45-50.
- [22] 张明轩, 黄苏珍, 绳仁立, 等. NaCl 胁迫对马蔺生长及生理生化指标的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2011, 20(1): 46-52.
- [23] SUN Y C, ZHANG Y J, WANG K. NaOH scarification and stratification improve germination of *Iris lactea* var. *chinensis* seed [J]. *HortScience*, 2006, 41(3): 773-774.
- [24] 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: 南京农业大学园艺学院, 2006: 75.
- [25] 原海燕, 黄苏珍, 郭智. 4 种鸢尾属植物对铅锌矿区土壤中重金属的富集特征和修复潜力[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1918-1922.
- [26] 彭少麟, 杜卫兵, 李志安. 不同生态型植物对重金属的积累及耐性研究进展[J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 2004, 25(4): 19-26.
- [27] LOMBI E, ZHAO F J, DUNHAM S J, et al. Cadmium accumulation in populations of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi goessingense* [J]. *New Phytologist*, 2000, 145(1): 11-20.
- [28] 胡莹, 黄益宗, 段桂兰, 等. 镉对不同生态型水稻的毒性及其在水稻体内迁移转运[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(6): 664-670.
- [29] 刘周莉, 何兴元, 陈玮, 等. 镉胁迫下金银花的生长反应及积累特性[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1579-1583.
- [30] SLOAN J J, DOWDY R H, DOLAN M S, et al. Long-term effects of biosolids applications on heavy metal bioavailability in

