

中国沙棘幼苗对土壤镉生理耐性和富集转运特征的性别差异

马永龙¹, 朱 珠^{1,2*}, 王艳莉^{1,2}, 张燕茹¹, 赵 安¹, 田 青¹

(1 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2 甘肃省枸杞无害化栽培工程研究中心, 兰州 730070)

摘 要: 为探究中国沙棘对土壤镉(Cd)胁迫的性别响应差异, 该研究以中国沙棘2年生幼苗为材料, 利用盆栽试验研究在不同浓度Cd处理下(0(CK)、25、50、100和200 mg·kg⁻¹)雌、雄株幼苗的生长、叶片生理特性以及Cd富集特征的差异。结果表明:(1)Cd处理下中国沙棘幼苗雌、雄株的株高和基径生长以及各器官生物量均表现出低浓度(< 50 mg·kg⁻¹)促进, 高浓度(> 100 mg·kg⁻¹)抑制的现象; 低浓度Cd处理下雌株的株高、基径增长率和生物量的增幅均高于雄株; 高浓度Cd处理下(200 mg·kg⁻¹)雄株株高增长率、叶生物量和总生物量分别较CK显著降低, 而雌株均未显著下降。(2)随着Cd浓度升高, 雌、雄株叶片光合色素含量和抗氧化酶活性呈先升后降的变化趋势, 丙二醛(MDA)和渗透调节物质含量呈上升趋势; Cd浓度为50~200 mg·kg⁻¹时, 雌株叶片的光合色素含量、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量均高于雄株, 而MDA含量始终低于雄株。(3)随着Cd浓度升高, 雌、雄株各器官Cd含量均逐渐上升且表现为根>茎>叶, 雌株各器官Cd含量均高于雄株; 雌、雄株地上和地下部分富集系数呈先增后减的变化趋势且均大于1, 转移系数逐渐降低且均小于1; 雌株地上和地下部分Cd富集系数以及转移系数均高于雄株, 且地上部分Cd富集系数在Cd浓度为25~100 mg·kg⁻¹时显著高于雄株。研究发现, 中国沙棘幼苗在土壤Cd浓度小于50 mg·kg⁻¹时表现出一定的Cd耐受性, 当土壤Cd浓度大于100 mg·kg⁻¹时其Cd耐受性减弱, 雌株对土壤Cd的生长适应性、生理耐性和富集转运能力较雄株强。

关键词: 中国沙棘; 镉; 性别差异; 生理耐性; 富集转运能力

中图分类号: Q945.79; S793.6 文献标志码: A

Gender Differences in Physiological Tolerance, Enrichment and Transport Characteristics of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* Seedlings under Cadmium Treatment

MA Yonglong¹, ZHU Zhu^{1,2*}, WANG Yanli^{1,2}, ZHANG Yanru¹, ZHAO An¹, TIAN Qing¹

(1 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Innoxious Cultivation Engineering Research Center of Wolfberry in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the differences of gender response of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* to cadmium (Cd) in soil, this study used biennial seedlings of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* as materials to study the differences in growth, leaf physiological characteristics and Cd accumulation characteristics of female and male seedlings under Cd concentration of 0(CK), 25, 50, 100 and 200 mg·kg⁻¹. The results

收稿日期: 2022-06-03; 修改稿收到日期: 2022-11-05

基金项目: 甘肃省青年科技基金计划项目(20JR5RA007); 甘肃省林业和草原局林草科技创新与合作项目(KJCX2021004); 甘肃农业大学科技创新基金项目(GAU-XKJS-2018-100)

作者简介: 马永龙(1997-), 男, 在读硕士生, 主要从事园林植物逆境胁迫研究。E-mail: 504634154@qq.com

* 通信作者: 朱 珠, 博士, 讲师, 主要从事园林植物资源利用研究。E-mail: zhuz@gsau.edu.cn

showed that: (1) under Cd treatment, the growth of plant height, basal diameter and biomass of female and male *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* seedlings showed the phenomenon of low concentration ($< 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) promotion and high concentration ($> 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) inhibition. Under low concentration of Cd treatment, the growth rate of plant height, basal diameter and biomass of female seedlings were higher than those of males. Under high concentration of Cd treatment ($200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), the growth of plant height, the leaf biomass and the total biomass of male seedlings were significantly lower than those of CK, while those of female seedlings were not decrease significantly. (2) With the increasing of Cd concentration, the content of photosynthetic pigments and the activities of antioxidant enzymes in the leaves of female and male seedlings increased at first and then decreased, and the contents of malondialdehyde (MDA) and osmoregulation substances increased. When the Cd concentration was $50-200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the photosynthetic pigment content, antioxidant enzyme activities and osmoregulation substance contents in leaves of female seedlings were higher than those of males, while the MDA content was always lower than that of the males. (3) With the increasing of Cd concentration, the Cd content in various organs of female and male seedlings gradually increased and showed a trend of root $>$ stem $>$ leaf. The Cd content in various organs of female seedlings was higher than that of male seedlings. The bioconcentration factors (BCF) of aboveground and underground parts of female and male seedlings increased at first and then decreased, and all of them were higher than 1, while the translocation factors (TF) gradually decreased and were less than 1. The BCF and TF of aboveground and underground parts of female seedlings were higher than those of male seedlings. When the Cd concentration was $25-100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the BCF of aboveground parts was significantly higher than that of male seedlings. It was found that *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* seedlings showed tolerance to Cd in certainly degree when the Cd concentration in soil was less than $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. When the Cd concentration in soil was higher than $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the tolerance to Cd was weakened. The growth adaptability, physiological tolerance, enrichment and transport capacity of female seedlings to Cd in soil were stronger than male seedlings.

Key words: *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*; cadmium stress; gender difference; physiological tolerance; enrichment and transport capacity

随着工农业发展和城镇化进程加快,土壤重金属污染已成为全球性的环境问题。2022年3月中国生态环境部在《关于进一步加强重金属污染防控的意见》中指出,一些地区重金属污染问题依旧突出,威胁生态环境安全和人民群众的健康,重金属污染防控任重道远^[1]。据土壤污染状况调查公报显示,中国耕地土壤Cd污染点位超标率高达7%^[2]。如果Cd通过植物进入食物链甚至会威胁到动物与人类的健康,因此,如何低成本、高效率、安全地降低土壤重金属Cd污染成为目前的研究热点。

当前,土壤重金属污染修复方式多种多样,如生物修复、物理修复等,其中植物修复是一种环境友好型重金属污染土壤修复方式^[3]。由于重金属离子易被植物吸收和转运,进而积累在植物体内影响细胞正常代谢功能,破坏植物的叶片叶绿素结构和各种保护酶活性,严重影响植物正常生长^[4-6]。研究表明许多木本植物在其耐受范围内能够通过调节抗氧化系统和渗透调节物质含量等形式来应对重金属胁迫。如杞柳(*Salix integra*)通过调节优化根系构型、激活抗氧化酶系统缓解自身所受Cd胁迫^[3];盐肤木(*Rhus*

chinensis) 在锰胁迫下可以通过调节渗透调节物质含量、增强抗氧化酶活性和根富集锰而表现出较强的锰耐受性^[7]。植物界雌雄异株植物共计14 000余种,占被子植物的4%~10%^[8]。这类植物由于长期环境适应性进化,在表型、生理及生殖格局等方面表现出了明显的性别二态性^[9]。同时,水分、干旱和重金属等非生物胁迫条件下,很多雌雄异株植物在生长和生理生化特征等方面表现出了明显的性别差异^[10-11]。如干旱胁迫下黄柳(*Salix gordejvii*)雌株扦插苗通过保持较高的光合作用来维持植株生长,从而表现比雄株更强的抗旱性^[12];在生境水分条件较差时,中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*)雄株光合速率大幅下降,雌株却仍保持较高的光合速率和水分利用效率^[13];在Cd胁迫下,桑树(*Morus alba*)雌株较雄株有更好的光合和生长能力^[4],而蒿柳(*Salix viminalis*)雌株根系中过氧化氢含量增加较雄株快,脂质过氧化程度较雄株高,雄株表现更强的耐Cd能力^[14]。因此,在利用雌雄异株木本植物修复和恢复生态的过程中应考虑植株不同性别间的抗逆性差异。

沙棘属 (*Hippophae*) 植物是典型的雌雄异株植物,具有较强的抗逆和生态适应能力^[15]。有研究表明沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 可通过根和叶富集重金属来降低根际土壤重金属含量,尤其在 0~60 cm 土层中,沙棘根际土壤 Cd 含量显著低于桑树,表现出更强 Cd 吸收能力^[16]。此外,沙棘林地也可以通过增加土壤硝态氮来提高土壤养分^[17]。这表明选用沙棘属植物作为土壤 Cd 污染修复树种,不仅可以吸收土壤 Cd,还可以发挥其根系固氮功能增加土壤氮素的有效性,提高重金属污染土壤的养分含量。中国沙棘是沙棘属植物的原始类群之一,也是开发利用及种植规模最大的类群^[18],分布面积和数量均居沙棘属植物之首^[13]。目前有关中国沙棘在逆境条件下的研究多集中于水分胁迫和 UV-B 辐射对其光合或抗氧化酶系统的影响等方面^[13-18],而关于重金属胁迫对其生长、生理生化特征和 Cd 积累方面的研究较少,特别是在 Cd 处理下雌、雄株性别响应差异的研究鲜有报道。因此,本研究以中国沙棘 2 年生幼苗为试验材料,采用不同浓度 Cd 处理盆栽试验,通过考察其幼苗雌、雄株生长、生理生化特性和 Cd 积累等方面的特征,揭示 Cd 处理下中国沙棘性别响应差异,以期为中国沙棘在 Cd 污染土壤修复中的应用奠定理论基础,亦为沙棘属植物修复 Cd 污染土壤的性别选择提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

中国沙棘 2 年生幼苗来自辽宁省阜新蒙古族自治县苗圃基地 (121°45'E, 42°4'N)。试验在甘肃省兰州市安宁区兰州市园林科学研究所 (103°42'E, 36°7'N) 温室进行。于 2021 年 3 月培养幼苗 100 株 (雌雄各 50 株), 2021 年 4 月选取长势和冠幅大小基本一致的雌、雄株幼苗各 20 株移栽至带托盘的塑料花盆 (口径、底径和高分别为 30 cm、20 cm 和 25 cm), 每盆装土 12 kg, 土壤为混合土培养基质 [V (蛭石) : V (草炭土) : V (田园土) = 1 : 1 : 3]。培养基质有机质含量为 7.36%, 速效 N 为 5.6 g · kg⁻¹, 速效 P 为 43 mg · kg⁻¹, 速效 K 为 135 mg · kg⁻¹, pH 7.8, Cd 含量为 0.002 mg · kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验为两因素随机区组设计。因素 1 为性别, 设置雌 (F)、雄 (M) 2 个水平; 因素 2 为土壤 Cd 处理浓度 (以盆土干质量计, mg · kg⁻¹), 设置 0 (CK)、25 (C₂₅)、50 (C₅₀)、100 (C₁₀₀)、200 (C₂₀₀) 5 个水平, 共组

成 10 个处理。每个处理 4 个生物学重复, 共 40 株幼苗。按照以上 Cd 浓度水平进行折算, 采用 CdCl₂ · 2.5H₂O 分别配制相应浓度 500 mL 的 Cd 溶液, 然后按照处理水平分别将相应浓度的 Cd 溶液均匀浇施到盆土中, 渗到托盘里的溶液反复回浇, 处理后 2 d 不浇水, 之后定期定量浇水培养。处理 60 d 后测定幼苗的生长、生物量、叶片生理指标和各器官 Cd 含量。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标 在 Cd 处理前后测定每株幼苗的株高和基径, 并计算株高和基径的增长率 (%)。实验结束后将植株分成根、茎、叶 3 部分, 并用清水洗净后放入 110 °C 烘箱杀青 30 min, 再将温度调至 80 °C 烘干至恒重, 称重记数得到植株根、茎、叶生物量, 总生物量为根、茎、叶生物量之和。

1.3.2 生理生化指标 实验结束后从植株四周上中下部位均匀采集 90 片左右完整的叶片装入 10 mL 离心管中, 随后立即放入液氮速冻, 并保存于 -80 °C 超低温冰箱, 用于生理生化指标测定。试验方法参照陈刚和李胜《植物生理学实验》^[19] 进行, 微调每个指标样品量和酶提取液浓度, 可溶性糖含量测定使用干样, 其他指标均用鲜样, 每个指标分别做 3 次技术重复。

(1) 光合色素含量 用 80% 丙酮提取新鲜叶片中的叶绿素和类胡萝卜素, 采用紫外分光光度计在 663、646 和 470 nm 波长下测定其吸光度值 A₆₆₃、A₆₄₆ 和 A₄₇₀, 并依此计算得到叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量, 总叶绿素含量为叶绿素 a 与叶绿素 b 含量之和。

(2) 抗氧化酶活性 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定采用氮蓝四唑 (NBT) 光还原法, 以 NBT 还原抑制到对照的 50% 时所用的酶量为 1 个酶活单位 (U); 过氧化物酶 (POD) 活性测定采用愈创木酚比色法, 以每分钟内 ΔA₄₇₀ 变化 0.01 的酶量为 1 个酶活单位 (U); 过氧化氢酶 (CAT) 活性测定采用紫外吸收比色法, 以每分钟内 A₂₄₀ 减少 0.1 的酶量为 1 个酶活单位 (U); 抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 采用紫外吸收比色法, 以每克叶片每分钟氧化 1 μmol 抗坏血酸 (ASA) 为 1 个酶活单位 (U)。SOD 活性单位表示为 U · g⁻¹, 而 POD、CAT、APX 活性单位均表示为 U · g⁻¹ · min⁻¹。

(3) 丙二醛 (MDA) 含量 采用硫代巴比妥酸 (TBA) 比色法测定, 取新鲜叶片加入 2 mL 三氯乙酸 (10%) 研磨, 进一步加入 8 mL 三氯乙酸后以

4 000 r · min⁻¹ 离心 10 min 后得到上清液,取 2 mL 上清液加入 2 mL TBA(6%)加热后离心,最后在 450、552 和 600 nm 波长下测定其吸光度值 A_{450} 、 A_{552} 和 A_{600} ,并计算得到 MDA 含量。

(4)渗透调节物质含量 可溶性蛋白(SP)含量的测定采用 G250 考马斯亮蓝法,以 1 mg · mL⁻¹ 牛血清蛋白溶液为标准溶液;可溶性糖(SS)含量测定采用苯酚法,以 100 μg · mL⁻¹ 蔗糖溶液为标准溶液;游离脯氨酸(Pro)含量测定采用酸性茚三酮比色法,以 100 μg · mL⁻¹ 脯氨酸溶液为标准溶液。

1.3.3 Cd 含量 实验结束后采集各处理组内的土样和每株植物的根、茎和叶烘干至恒重后打磨成粉,分别过 100 目筛,经过 HNO₃-H₂O₂ 法消煮后得到待测溶液,之后用原子吸收分光光度计(AA-6800, Shimadzu, Japan)火焰法测定土样、地下部分(根)和地上部分(茎和叶)中的 Cd 含量^[20],并据此计算 Cd 富集系数和转移系数。

富集系数(BCF) = 地下或地上部分 Cd 含量 / 土壤中 Cd 含量

转移系数(TF) = 地上部分 Cd 含量 / 地下部分 Cd 含量

1.4 数据处理

采用 SPSS 26.0 软件进行处理间的单因素方差分析(One-Way ANOVA),并用 Duncan 多重比较检验(Duncan's multiple range test)分析其差异显著性($P < 0.05$);Cd 浓度、性别因素以及二者间交

互作用对各项指标的显著性影响采用双因素方差分析方法进行分析;作图采用 Origin Pro 2021 软件;图表中数据均为(平均值±标准误)。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫下中国沙棘雌雄幼苗生长指标的差异

双因素方差分析结果表明,中国沙棘幼苗株高、基径的增长率和生物量(除茎生物量)均受到 Cd 胁迫显著影响,但均未受到植株性别、植株性别与 Cd 胁迫交互效应的显著影响。由表 1 可知,随着 Cd 胁迫浓度上升,雌、雄株株高、基径的增长率和各器官生物量均呈先上升后下降的变化趋势,并且均在 C₅₀ 处理达到峰值;雌、雄株株高、基径的增长率和各器官生物量在 C₂₅ 和 C₅₀ 处理下均高于相应 CK,在 C₁₀₀ 和 C₂₀₀ 处理下均低于相应 CK,但雄株的株高增长率、叶生物量和总生物量在 C₂₀₀ 处理下分别较 CK 显著降低了 39.29%、45.89%和 35.43%,而雌株与 CK 差异均未达显著水平。以上结果说明,中国沙棘幼苗雌、雄株对镉胁迫均有一定的耐受能力,但雌株的耐受性更强。

2.2 Cd 胁迫下中国沙棘雌雄株幼苗叶片生理响应的差异

2.2.1 光合色素含量 Cd 胁迫对中国沙棘叶片光合色素含量有显著影响,而植株性别仅对其类胡萝卜素含量有显著影响,植株性别与 Cd 胁迫的交互效应对其光合色素含量均无显著影响(表 2)。其中,

表 1 Cd 处理下中国沙棘雌雄幼苗生长指标的变化

Table 1 Changes of growth indexes of male and female *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* seedlings under cadmium treatments

处理 Treatment	性别 Sex	株高增长率 Growth rate of height/%	基径增长率 Growth rate of basal diameter/%	根生物量 Root biomass /g	茎生物量 Stem biomass /g	叶生物量 Leaf biomass /g	总生物量 Total biomass /g
CK	M	7.00±0.41ab	22.56±1.34ab	13.75±1.42abc	21.07±1.90ab	15.10±1.25abc	49.93±4.14bc
	F	7.25±0.75ab	19.13±1.98ab	14.60±2.20abc	22.17±3.94ab	15.92±1.17abc	52.69±5.04abc
C ₂₅	M	7.75±1.18ab	23.31±1.80ab	14.21±2.48abc	23.08±4.47ab	16.32±2.71abc	53.61±3.98abc
	F	8.50±0.87a	23.51±1.72ab	16.06±3.92ab	24.06±2.06ab	17.99±2.79ab	58.11±6.64ab
C ₅₀	M	8.25±1.44a	25.92±3.73a	16.22±2.75ab	26.81±4.37ab	18.15±2.35ab	61.19±6.48ab
	F	8.75±1.03a	24.54±4.00ab	18.54±2.08a	28.13±1.77a	20.03±0.94a	66.70±1.25a
C ₁₀₀	M	6.25±0.85abc	19.78±1.47ab	11.68±1.11abc	19.49±2.05ab	11.08±1.67cd	42.25±3.81cd
	F	7.00±0.71ab	18.48±2.19ab	12.75±1.01abc	21.88±5.67ab	13.59±1.95bcd	48.22±5.93bc
C ₂₀₀	M	4.25±0.25c	17.13±1.45b	8.18±0.98c	15.89±2.10b	8.17±1.50d	32.24±2.72d
	F	5.25±0.25bc	18.95±2.08ab	10.40±1.70bc	19.58±3.19ab	11.11±1.04cd	41.09±5.66cd

注:M, 雄株;F, 雌株;CK、C₂₅、C₅₀、C₁₀₀、C₂₀₀ 分别表示 0、25、50、100、200 mg · kg⁻¹ Cd²⁺ 胁迫处理;同列不同小写字母表示处理组间在 0.05 水平存在显著差异($P < 0.05$);下同

Note: M, Male plant; F, Female plant; CK, C₂₅, C₅₀, C₁₀₀ and C₂₀₀ stand for treatments with 0, 25, 50, 100 and 200 mg · kg⁻¹ Cd²⁺, respectively; Different normal letters within same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. The same as below

随着 Cd 胁迫浓度上升,中国沙棘幼苗雌、雄株叶中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均呈先上升后下降的变化趋势,并且均在 C_{50} 处理达到峰值。雌、雄株间叶中光合色素含量在 CK、 C_{25} 、 C_{100} 和 C_{200} 处理下差异均不显著,但雌株叶中的类胡萝卜素含量在 C_{50} 处理下显著高于雄株。与 CK 相比,在 C_{25} 处理下,雌株叶绿素 b、类胡萝卜素和总叶绿素含量以及雄株叶绿素 b 含量均显著增加;在 C_{50} 处理下,雌株各光合色素含量以及雄株的叶绿素 b 含量和总叶绿素含量也均显著升高;在 C_{100} 处理下,雌、雄株各光合色素含量均无显著变化;在 C_{200} 处理下,雌、雄株各光合色素含量均显著下降,而雌株仅类胡萝卜素含量显著下降。可见,中国沙棘雌株幼苗的耐镉胁迫能力强于雄株。

2.2.2 抗氧化酶活性 双因素方差分析结果表明,Cd 胁迫对中国沙棘叶中 4 种抗氧化酶活性均有极显著影响,植株性别、植株性别与 Cd 胁迫的交互效应对其 SOD 和 CAT 活性均有显著影响(图 1)。其中,各浓度 Cd 胁迫处理的雌株叶中 4 种抗氧化酶活性均高于雄株,其 SOD 活性增幅均达显著水平,CAT 活性在 C_{100} 处理下增幅也达显著水平,POD 和 APX 活性均无显著差异。随着 Cd 浓度的升高,雌、雄株叶中的 SOD、POD、CAT 和 APX 活性均呈先升后降的变化趋势,POD 和 APX 活性均在 C_{50} 处理下达到最高,而 SOD 和 CAT 活性均在 C_{100} 处理下达到最高值。在 C_{25} 处理下,雌株叶中 SOD、POD 和 CAT 活性以及雄株的 POD 和 CAT 活性均比相应 CK 显著增强,雌、雄株叶中 APX 活性均

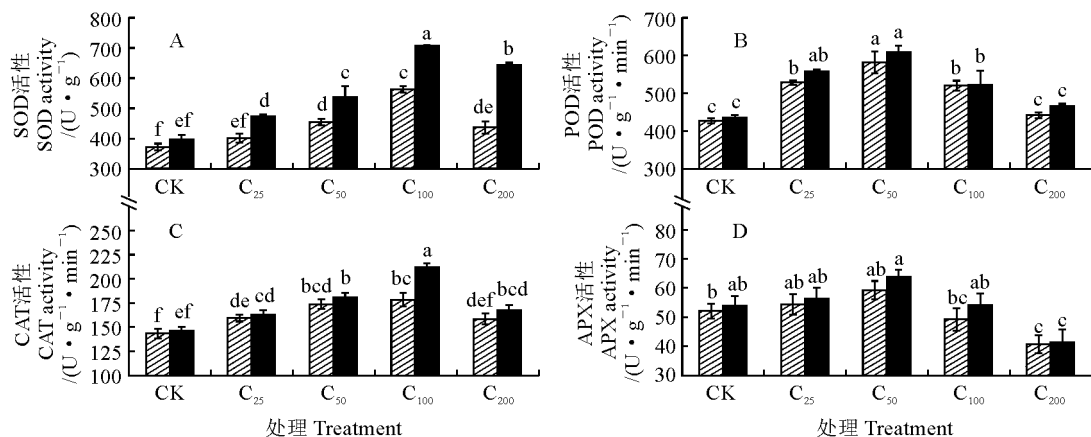
无显著变化;在 C_{50} 和 C_{100} 处理下,雌、雄株叶中 SOD、POD 和 CAT 活性均显著高于相应 CK,雌、雄株叶中 APX 活性仍均无显著变化;在 C_{200} 处理下,雌、雄株叶中 SOD 活性以及雌株叶中 CAT 活性均比 CK 显著升高,此时雌、雄株叶中 APX 活性均比 CK 显著降低。以上结果说明,中国沙棘雌、雄株幼苗能够通过调节抗氧化酶活性应对 Cd 胁迫,但雌株表现出更强的抗氧化能力。

2.2.3 MDA 和渗透调节物质含量 双因素方差分析结果表明,Cd 胁迫和植株性别对中国沙棘叶中 MDA、SP 和 Pro 含量均有显著影响,对其 SS 含量均无显著影响,植株性别及 Cd 胁迫交互效应对其 MDA 和 3 种渗透调节物质含量均无显著影响(图 2)。其中,各浓度 Cd 处理下雌株叶中 SP、Pro 和 SS 含量均高于雄株,但雌株叶中 MDA 含量低于雄株,其中 SP、SS 和 MDA 含量均无显著差异,Pro 含量在 C_{100} 、 C_{200} 处理下有显著差异。随着 Cd 浓度的升高,雌、雄株叶中 MDA、SP、Pro 和 SS 含量均呈上升趋势。与 CK 相比,雌、雄株叶中 MDA 含量均仅在 C_{200} 处理下显著升高,增幅分别为 41.33% 和 51.42%,在其余处理下均无显著差异;雌、雄株叶中 SP 含量均仅在 C_{100} 和 C_{200} 处理下显著升高,雌株增幅分别为 32.34% 和 50.18%,雄株增幅分别为 26.97% 和 36.23%;雌株叶中 Pro 含量在 C_{25} ~ C_{200} 处理下显著增加 23.97%~79.54%,雄株叶中 Pro 含量在 C_{50} ~ C_{200} 处理下显著升高了 24.00%~59.24%;雌、雄株叶中 SS 含量上升均不显著。以上结果说明,中国沙棘雌、雄株幼苗叶片脂质过氧化程

表 2 Cd 处理下中国沙棘雌雄株叶片光合色素含量的变化

Table 2 Changes of photosynthetic pigment contents in leaves of male and female *H. rhamoides* subsp. *sinensis* seedlings under cadmium treatments

处理 Treatment	性别 Sex	叶绿素 a Chlorophyll a /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素 b Chlorophyll b /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总叶绿素含量 Total chlorophyll /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	类胡萝卜素 Carotenoid /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
CK	M	14.97±1.24bcde	6.98±0.29de	21.96±1.54bc	22.71±1.59cd
	F	13.81±1.40cde	6.02±0.38ef	19.83±1.30cd	23.85±0.81cd
C_{25}	M	18.51±2.76abc	9.05±0.09bc	27.56±2.85ab	26.83±1.33bc
	F	17.53±1.91abcd	8.91±0.34bcd	26.43±2.21ab	30.29±2.40ab
C_{50}	M	19.06±0.57ab	10.02±1.02ab	29.09±1.35a	27.84±3.24bc
	F	20.27±2.38a	11.22±1.25a	31.49±3.63a	33.97±1.56a
C_{100}	M	11.78±0.50e	5.70±0.82ef	17.48±1.14cd	19.18±1.17de
	F	12.45±1.03de	7.25±0.20cde	19.70±1.18cd	23.71±0.60cd
C_{200}	M	6.78±0.48f	3.67±0.13g	10.45±0.56e	13.49±0.91f
	F	10.34±1.93ef	4.86±0.69fg	15.20±2.62de	17.59±0.39ef



不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 ($P < 0.05$)。下同

图 1 Cd 处理下中国沙棘雌雄株叶片抗氧化酶活性的变化

Different normal letters meant significant difference at 0.05 level among treatments. The same as below

Fig. 1 Changes of antioxidant enzyme activities in leaves of male and female *H. rhammoides* subsp. *sinensis* seedlings under cadmium treatments

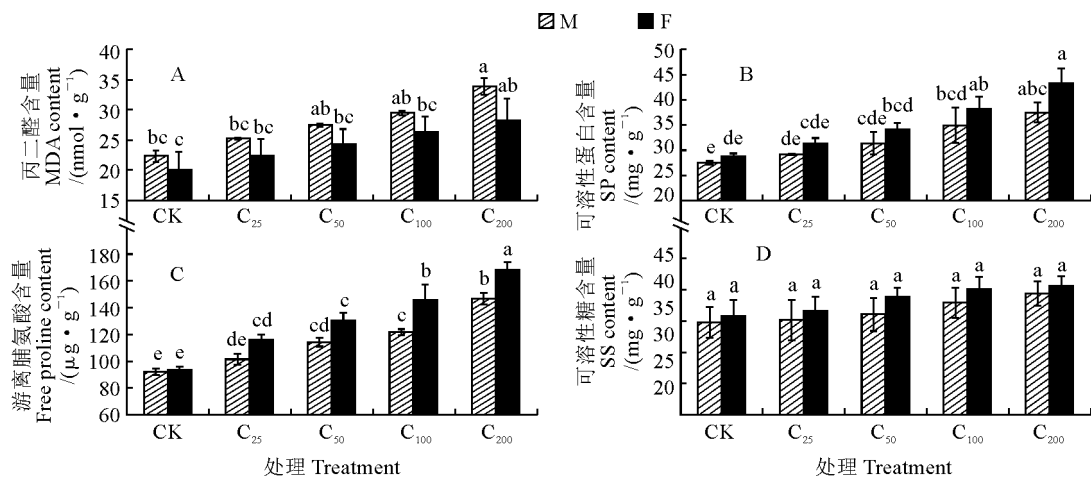


图 2 Cd 处理下中国沙棘雌雄株叶片丙二醛、可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖含量的变化

Fig. 2 Changes of malondialdehyde (MDA), soluble protein (SP), proline and soluble sugar (SS) contents in leaves of male and female *H. rhammoides* subsp. *sinensis* seedlings under cadmium treatments

度与 Cd 胁迫浓度成正比, 并且其主要通过 Pro 和 SP 的合成维持一定的细胞渗透浓度, 但雌株的脂质过氧化程度更低, 渗透调节能力更强, 表现出更强的耐镉能力。

2.3 Cd 胁迫下中国沙棘雌雄株幼苗体内 Cd 的累积和分布特征差异

2.3.1 Cd 含量 由图 3 来看, Cd 胁迫对中国沙棘不同器官及总 Cd 含量均有显著影响, 植株性别、植株性别与 Cd 胁迫交互效应对其茎、叶和总 Cd 含量有显著影响, 而对其根 Cd 含量无显著影响。雌株各器官 Cd 含量在不同 Cd 浓度处理下均不同程度地高于雄株, 其中叶 Cd 含量在各浓度处理下均差异显著, 茎 Cd 含量和总 Cd 含量均在 C_{100} 和 C_{200} 处理下差异显著, 根 Cd 含量差异均不显著。随着 Cd

浓度的升高, 雌、雄株各器官及总 Cd 含量均呈逐渐上升趋势, 且在各浓度处理下大多显著高于 CK。另外, 各器官间相比较, 不同浓度 Cd 处理下雌、雄株各器官 Cd 含量均表现出根 > 茎 > 叶。

2.3.2 富集和转运系数 由表 3 可知, 雌株 Cd 富集系数和转移系数在不同 Cd 浓度处理下均高于雄株, 其中地上部分富集系数在 C_{25} ~ C_{100} 处理下均差异显著, 地下部分富集系数仅在 C_{50} 处理下差异显著, 转移系数在各浓度处理下差异均不显著。随着 Cd 浓度的升高, 雌、雄株地下和地上部分富集系数均呈先升后降变化趋势; 雌株和雄株地下部分富集系数分别介于 2.33 ~ 3.57 和 2.04 ~ 2.91 之间, 且分别在 C_{50} 和 C_{100} 处理具有最高值; 地上部分富集系数分别介于 0.59 ~ 1.05 和 0.38 ~ 0.76 之间, 且均

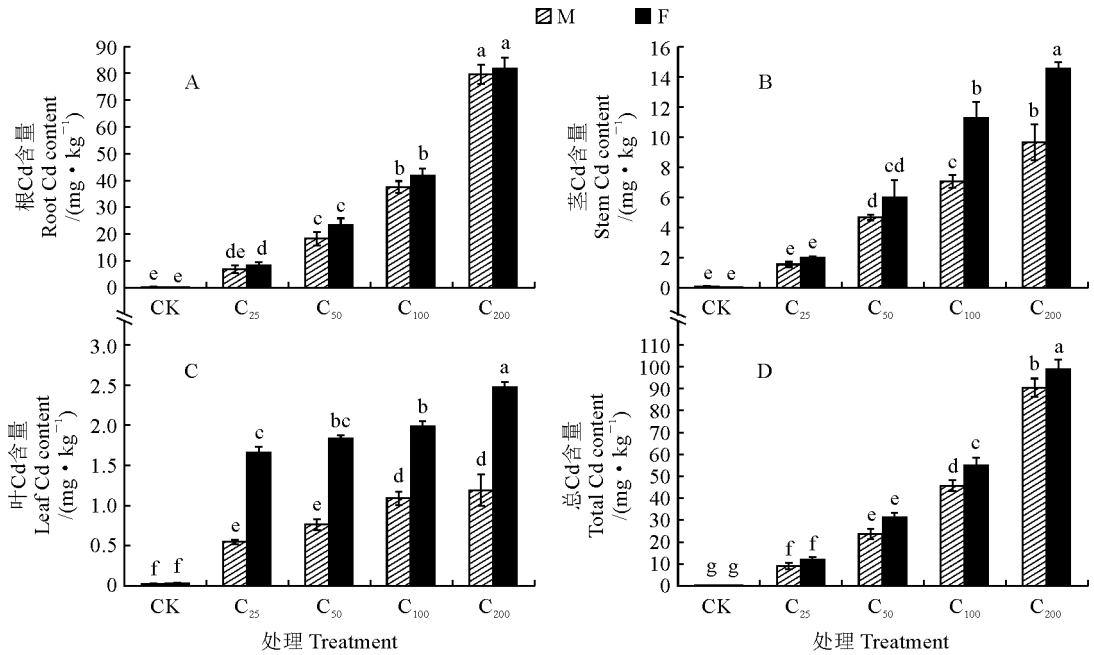


图3 Cd处理下中国沙棘雌雄株各器官和总Cd含量变化

Fig. 3 Changes of total cadmium content in different organs of male and female *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* seedlings under cadmium treatments

表3 Cd处理下中国沙棘雌雄株幼苗富集系数和转移系数变化

Table 3 Changes of bioconcentration factors and translocation factors of male and female *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* seedlings under cadmium treatments

处理 Treatment	性别 Sex	富集系数 Bioconcentration factor		转移系数 Translocation factor
		地下部分 Root	地上部分 Aboveground	
C ₂₅	M	2.04 ± 0.35c	0.63 ± 0.06cd	0.33 ± 0.07ab
	F	2.33 ± 0.33bc	1.05 ± 0.06a	0.48 ± 0.09a
C ₅₀	M	2.57 ± 0.36bc	0.76 ± 0.0bc	0.31 ± 0.05abc
	F	3.57 ± 0.35a	1.21 ± 0.21a	0.35 ± 0.08ab
C ₁₀₀	M	2.91 ± 0.22abc	0.63 ± 0.04cd	0.22 ± 0.01bc
	F	3.12 ± 0.22ab	0.98 ± 0.06ab	0.32 ± 0.02ab
C ₂₀₀	M	2.81 ± 0.17abc	0.38 ± 0.05d	0.14 ± 0.01c
	F	2.82 ± 0.08abc	0.59 ± 0.02cd	0.21 ± 0.0bc

在 C₅₀ 处理具有最高值。雌、雄株转移系数随 Cd 浓度的升高而降低且均小于 1, 分别介于 0.21~0.48 和 0.14~0.33 之间。以上结果说明, 中国沙棘幼苗雌、雄株都具有一定的 Cd 富集转运能力, 但雌株富集转运能力强于雄株。

3 讨论

植物受到重金属胁迫后植株生长的变化是其最先表现的可见响应^[21]。Saraswat 等^[22]研究表明,

当植物体内的 Cd 积累到一定程度时会导致植物生长受到抑制, 甚至无法进行基本的生长代谢而死亡。贾中等^[23]也研究发现低浓度土壤 Cd (<10 mg · kg⁻¹) 对秋华柳 (*Salix variegata*) 和枫杨 (*Pterocarya stenoptera*) 幼苗生长具有促进作用, 随着 Cd 浓度增高对其生长产生了显著的抑制作用。本研究中, 中国沙棘雌、雄株幼苗株高、基径增长率和生物量亦呈“低促 (<50 mg · kg⁻¹)、高抑 (>100 mg · kg⁻¹)”的现象。另外, 本研究还发现 Cd 处理下雌、雄株生长虽无显著差异, 但低浓度 Cd 处理下 (<50 mg · kg⁻¹) 雌株生长指标上升幅度高于雄株; 100 mg · kg⁻¹ Cd 处理虽对雌、雄株生长无显著的抑制作用, 但雄株生长指标下降幅度大于雌株, 而 200 mg · kg⁻¹ Cd 处理对雄株株高增长率、叶生物量和总生物量有显著的抑制作用, 雌株却没有受到显著的抑制作用。说明雌株生长在低浓度 Cd 处理下受到的促进作用较雄株明显, 而在高浓度 Cd 处理 (>100 mg · kg⁻¹) 下的耐受能力强于雄株, Cd 对雄株生长的抑制作用更明显。

光合色素是植物顺利进行光合作用的重要前提, 其含量的高低可以反映植物的抗性^[12]。本研究中, 低浓度 Cd 处理对中国沙棘雌株叶片叶绿素 a (除 25 mg · kg⁻¹)、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素合成均具有显著促进作用, 雄株仅叶绿素 b 含量和总叶绿素含量在 50 mg · kg⁻¹ 处理下显著升高,

这可能与雌株叶 Cd 含量显著高于雄株有直接关系。100 mg · kg⁻¹ 处理对雌、雄株叶中光合色素合成无显著影响;200 mg · kg⁻¹ 处理对雄株叶中光合色素合成均有显著抑制作用,而雌株叶中仅类胡萝卜素合成有显著抑制作用。另外,雌株叶中类胡萝卜素含量在 50 mg · kg⁻¹ 处理时显著高于雄株。这些结果说明中国沙棘雌株在低浓度 Cd 处理下能够通过更高的叶绿素含量来保持更好的光合能力,在高浓度 Cd 处理下其光合色素吸收、传递和转化光的能力虽然也受到抑制,但受抑制程度明显弱于雄株。

活性氧(ROS)积累引起的膜脂过氧化反应增强是 Cd 胁迫引起细胞损伤和死亡的重要机制之一,而抗氧化酶(SOD、POD、CAT 和 APX 等)将起到防止其进一步受损的作用^[14]。当重金属浓度超过植物的最大耐受值时会对植物产生毒害作用,导致抗氧化酶的合成受阻,其活性开始下降^[24-25]。本研究中也得到相似的结果,即随着 Cd 浓度的升高,中国沙棘雌、雄株叶中 4 种抗氧化酶的活性先明显升高后增幅减小甚至有下降的趋势,这些结果还可以证明雌、雄株在 Cd 处理下 4 种酶具有一定的协同作用。结合本研究中雌、雄株叶中光合色素含量和抗氧化酶活性来看,雌、雄株生长有“低促高抑”现象的原因可能是低浓度 Cd 处理下植株产生应激反应,叶绿素合成得到促进,抗氧化酶活性升高,从而加快了植株光合和细胞代谢,表现出株高、基径增长率和生物量高于相应 CK 的结果,随着 Cd 浓度进一步升高,Cd 大量积累在其各器官中,植株叶中叶绿素和抗氧化酶合成受阻,导致株高、基径增长率和生物量降低,这可能是中国沙棘对 Cd 胁迫的一种应对机制。同时,雌株叶中 4 种抗氧化酶活性在不同浓度 Cd 处理下均不同程度地高于雄株,且各浓度处理下 SOD 活性和 100 mg · kg⁻¹ 处理下 CAT 活性在性别间差异显著,表明雌株在 Cd 处理下通过 SOD 和 CAT 清除 ROS 的能力强于雄株。另外,MDA 是细胞脂质过氧化的有害产物,其含量可以反映 ROS 对植株膜系统的损伤程度^[11]。本研究中各浓度 Cd 胁迫处理均使雌、雄株叶中 MDA 含量升高,且雄株 MDA 含量略高于雌株,但只有在 200 mg · kg⁻¹ 处理下较各自 CK 有显著升高,而雌株上升幅度大于雄株。这可能是因为在 0~100 mg · kg⁻¹ Cd 胁迫处理下高活性的抗氧化酶可有效清除过量的 ROS,而在 200 mg · kg⁻¹ 处理下抗氧化酶活性降低到一定程度,ROS 无法被及时清除,导致

MDA 含量大幅上升,说明雌、雄株幼苗在低浓度 Cd 胁迫下其膜系统受损不明显,表现出较强的 Cd 耐受性,但雌株膜系统受损较雄株严重。

植物受重金属胁迫时,SP、Pro 和 SS 作为植物细胞内重要的渗透调节物质,其累积不仅能维持细胞渗透压,而且对植物抵御非生物胁迫也发挥着重要作用^[12]。本研究中,Cd 处理下中国沙棘幼苗雌、雄株叶中 SP、Pro 和 SS 含量均高于 CK,尤其是 SP 和 Pro 含量分别在不同 Cd 浓度处理下显著高于 CK。这可能是中国沙棘对重金属的一种适应性反应,即叶片通过螯合、区化等调控作用保持细胞原生质渗透势和膨压,缓解 Cd 胁迫造成的细胞脱水或水分代谢的异常,以维持其正常生长发育^[26]。另外,在不同浓度 Cd 处理下雌株叶中 3 种渗透调节物质含量均高于雄株,其中 Pro 在 100 和 200 mg · kg⁻¹ 处理下有显著的性别响应差异,进一步说明在 Cd 处理下雌株利用 Pro 降低渗透势,提高细胞吸水或保水的能力比雄株强。

前人研究表明较多的木本植物 Cd 积累量随 Cd 浓度的升高而升高且表现为根>茎>叶^[27],本研究得出的结果与之一致,表明中国沙棘对 Cd 有显著的积累作用,且根系是 Cd 积累的主要器官。富集系数(BCF)和转移系数(TF)能够反映植株对 Cd 的吸收富集和转运能力^[28]。本研究中,中国沙棘雌、雄株地下部分 BCF 均大于 1 且远远高于地上部分 BCF,说明中国沙棘具有较强的 Cd 富集能力,且根富集能力强于地上部分。原因可能是植株通过限制 Cd 进入根系具有传导养分和水分功能的运输组织,以此减少 Cd²⁺ 转运到地上部分^[29]。同时,随着 Cd 浓度升高,雌、雄株地下和地上部分 Cd 富集能力均呈先增大后减小的变化趋势,雌、雄株 TF 均小于 1 且转运能力逐渐下降。主要原因可能是在较低 Cd 浓度时,植株根系将吸收的 Cd²⁺ 向地上部分转运,随着 Cd 浓度升高,根内 Cd²⁺ 浓度增加至与土壤 Cd²⁺ 浓度达到平衡,从而减少了向地上部分的转运^[30]。另外,雌株根部和地上部分 Cd 富集系数以及转移系数始终高于雄株,分别是雄株的 1.14~1.23、1.38~1.55 及 0.55~1.50 倍,其中地上部分 Cd 富集系数性别间差异显著。结合雌株根、茎、叶 Cd 含量高于雄株,尤其地上部分(茎和叶)Cd 含量差异显著,证明雌株比雄株有更强的 Cd 富集转运能力。

多数研究表明重金属胁迫下雌株受环境的影响大于雄株^[9],但本研究结果与之相反,而本研究与高丽等^[31]对于旱胁迫下中国沙棘性别差异的研究结

果一致。目前沙棘属植物应对 Cd 胁迫表现出性别差异的原因尚不完全明确,但 Booy 等^[32]研究表明植物会通过遗传变异来适应环境变化,其遗传多样性越丰富,对环境变化的适应能力就越强,而已有研究表明中国沙棘雌株的遗传多样性高于雄株^[33],这可能是 Cd 胁迫下中国沙棘雌株生长适应和生理耐受能力较强的重要遗传基础,但出现这种性别差异的具体原因还需要结合转录、代谢、分子机制和根系生理生化等方面深入研究。

4 结 论

随着 Cd 浓度的升高,中国沙棘雌、雄株株高和基径的增长率以及生物量、光合色素含量、抗氧化酶活性均呈先升后降的变化趋势,MDA 和渗透调节物质含量则持续上升。中国沙棘雌、雄株根、茎、叶

的 Cd 含量随着 Cd 浓度升高均逐渐增加,地下和地上部分富集系数先增后减且均大于 1,转移系数逐渐减小且均小于 1。Cd 处理下雌株的生长能力较雄株强,并且雌株有较高的叶片光合色素含量(除 25 mg · kg⁻¹ 处理)、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量、各器官 Cd 含量和地上、地下部分富集转移系数,以及较低的 MDA 含量。中国沙棘幼苗对土壤 Cd 表现出一定的耐受和富集转运能力,其主要通过调节光合色素含量、抗氧化系统活性和合成更多的渗透调节物质来减小 Cd 的毒害作用,雌株对土壤 Cd 表现出更强的生长适应性、生理耐性和富集转运能力。从植物修复角度讲,中国沙棘雌株幼苗更有利于作为土壤 Cd 污染的修复树种,以其更强的适应和固定镉的能力来改善土壤重金属污染,减轻土壤重金属的危害。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 关于进一步加强重金属污染防控的意见[J]. 资源再生, 2022, (3): 54-57.
Ministry of Ecology and Environment. Opinions on further strengthening the prevention and control of heavy metal pollution[J]. *Resource Recycling*, 2022, (3): 54-57.
- [2] 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 等. 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5 531-5 539.
CHEN S L, XU C Y, GENG Z C, *et al.* Remediation effects of different composite materials on cadmium-contaminated farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5 531-5 539.
- [3] 尹泽润, 罗宝利, 罗 锋, 等. 镉胁迫下水培杞柳生理特性及镉吸收转运[J]. 草业科学, 2021, **38**(10): 1 900-1 909.
YIN Z R, LUO B L, LUO F, *et al.* Physiological characteristics and Cd absorption and transportation in *Salix integra* under Cd stress[J]. *Pratacultural Science*, 2021, **38**(10): 1 900-1 909.
- [4] 臧 畅, 吕志强, 董莲春, 等. 不同性别桑树幼苗对镉与酸雨复合处理的生长响应及镉积累差异[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(3): 969-975.
ZANG C, LÜ Z Q, DONG L C, *et al.* Variations in growth response and cadmium accumulation of different gender *Morus alba* seedlings to combined treatments of Cd and acid rain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(3): 969-975.
- [5] 贾 茵, 刘才磊, 兰晓悦, 等. 镉胁迫对小报春幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(3): 454-462.
JIA Y, LIU C L, LAN X Y, *et al.* Effect of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Primula forbesii* seedlings [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(3): 454-462.
- [6] 王欣欣, 邓明华, 龚 明, 等. Cd²⁺胁迫对小桐子幼苗叶片抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(3): 527-533.

- WANG X X, DENG M H, GONG M, *et al.* Effect of Cd²⁺ stress on antioxidant system in the leaves of *Jatropha curcas* seedlings [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, **36**(3): 527-533.
- [7] 王悟敏, 胡佳瑶, 刘文胜, 等. 镉胁迫下盐肤木镉富集及生理响应特征[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(4): 628-636.
WANG W M, HU J Y, LIU W S, *et al.* Characteristics of manganese accumulation and physiological response of *Rhus chinensis* under manganese stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(4): 628-636.
- [8] RENNER S S, RICKLEFS R E. Dioecy and its correlates in the flowering plants[J]. *American Journal of Botany*, 1995, **82**(5): 596-606.
- [9] 胥 晓, 杨 帆, 尹春英, 等. 雌雄异株植物对环境胁迫响应的性别差异研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(11): 2 626-2 631.
XU X, YANG F, YIN C Y, *et al.* Research advances in sex-specific responses of dioecious plants to environmental stresses[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(11): 2 626-2 631.
- [10] XU X, PENG G Q, WU C C, *et al.* Drought inhibits photosynthetic capacity more in females than in males of *Populus cathayana* [J]. *Tree Physiology*, 2008, **28**(11): 1 751-1 759.
- [11] 伍柳燃. 滇杨雌雄植株对增强 UV-B 辐射和重金属铅、铜胁迫的生理生化响应差异[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [12] 马少薇, 刘果厚, 王 蕾, 等. 干旱胁迫对黄柳雌雄扦插苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(7): 1 250-1 258.
MA S W, LIU G H, WANG L, *et al.* Effect of drought stress on growth and physiological characteristics of male and female *Salix gordejewii* cuttings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(7): 1 250-1 258.
- [13] 高 丽, 杨 劼, 刘瑞香. 不同土壤水分条件下中国沙棘雌

- 雄株光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J]. 生态学报, 2009, **29**(11): 6 025-6 034.
- GAO L, YANG J, LIU R X. Effects of soil moisture levels on photosynthesis, transpiration, and moisture use efficiency of female and male plants of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(11): 6 025-6 034.
- [14] ZOU J, ZHANG Y, LI X, *et al.* Sexual differences in root growth and antioxidant characteristics in *Salix viminalis* exposed to cadmium stress[J]. *Int J Phytoremediation*, 2021, **23**(14): 1 466-1 475.
- [15] 姚莹, 王伟, 孙永媛, 等. 沙棘 HrTCP 转录因子家族鉴定及其干旱胁迫下的表达分析[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(4): 576-584.
- YAO Y, WANG W, SUN Y Y, *et al.* Identification of HrTCP transcription factors in seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides*) and its response to drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(4): 576-584.
- [16] 黄秋娟, 石娟华, 李玉灵, 等. 铁尾矿区沙棘-桑树混交林中重金属元素的积累与分配[J]. 蚕业科学, 2016, **42**(5): 783-792.
- HUANG Q X, SHI J H, LI Y L, *et al.* Accumulation and distribution of heavy metals in *Hippophae rhamnoides* and *Morus L.* mixed plantation in iron tailing region[J]. *Science of Sericulture*, 2016, **42**(5): 783-792.
- [17] 杜佳团, 李广, 马维伟, 等. 黄土丘陵区 4 种典型植被土壤可溶性氮组分特征[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(6): 251-257.
- DU J N, LI G, MA W W, *et al.* Characteristics of soil soluble nitrogen components under four typical vegetations in the loess hilly areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(6): 251-257.
- [18] 周璇. 增强 UV-B 辐射对两种沙棘幼苗抗氧化及光合特性的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [19] 陈刚, 李胜. 植物生理学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [20] 黄晓纯, 刘昌弘, 张军, 等. ICP-MS 测定蔬菜样品中重金属元素的两种微波消解前处理方法[J]. 岩矿测试, 2013, **32**(3): 415-419.
- HUANG X C, LIU C H, ZHANG J, *et al.* Two microwave digestion pretreatment methods for determination of heavy metals in vegetable samples[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2013, **32**(3): 415-419.
- [21] BAKER A J M, WALKER P L. Physiological responses of plants to heavy metals and the quantification of tolerance and toxicity[J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 1989, **1**(1): 7-17.
- [22] SARASWAT S, RAI J P N. Phytoextraction potential of six plant species grown in multimetal contaminated soil [J]. *Chemistry and Ecology*, 2009, **25**(1): 1-11.
- [23] 贾中民, 魏虹, 孙晓娟, 等. 秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性[J]. 生态学报, 2011, **31**(1): 107-114.
- JIA Z M, WEI H, SUN X C, *et al.* Accumulation and tolerance of *Salix variegata* and *Pterocarya stenoptera* seedlings to cadmium[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(1): 107-114.
- [24] PATEL A, PANDEY V, PATRA D D. Metal absorption properties of *Mentha spicata* grown under tannery sludge amended soil-its effect on antioxidant system and oil quality [J]. *Chemosphere*, 2016, **147**: 67-73.
- [25] 陆海燕, 刘志辉, 吕光辉. 镉污染下芦苇叶片丙二醛、脯氨酸及 SOD 保护酶反应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27**(8): 171-175.
- LU H Y, LIU Z H, LÜ G H. Reaction of MDA, proline, and SOD under Cd stress in mixture of *Phragmites australis*'s stems and leaves[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, **27**(8): 171-175.
- [26] 周际海, 程坤, 郝茹茹, 等. 土壤镉污染对香樟幼苗光合和生理特性的影响[J]. 林业科学, 2020, **56**(6): 193-201.
- ZHOU J H, CHENG K, GAO R R, *et al.* Photosynthesis and other physiological characteristics of *Cinnamomum camphora* seedlings under cadmium stress[J]. *Scientia Sinicae*, 2020, **56**(6): 193-201.
- [27] 唐敏, 张欣, 刘燕, 等. 镉在 3 种乔木中的积累及其亚细胞分布和化学形态研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(6): 2 440-2 447.
- TANG M, ZHANG X, LIU Y, *et al.* Accumulation, subcellular distribution and chemical forms of cadmium in three tree species[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(6): 2 440-2 447.
- [28] 段曼莉, 付冬冬, 王松山, 等. 亚硒酸盐对四种蔬菜生长、吸收及转运硒的影响[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 658-665.
- DUAN M L, FU D D, WANG S S, *et al.* Effects of different selenite concentrations on plant growth, absorption and transportation of selenium in four different vegetables[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(3): 658-665.
- [29] CONN S, GILLIHAM M. Comparative physiology of elemental distributions in plants[J]. *Annals of Botany*, 2010, **105**(7): 1 081-1 102.
- [30] FRANK V B, ANN C, BRAHIM S, *et al.* Subcellular localization of cadmium in roots and leaves of *Arabidopsis thaliana* [J]. *The New Phytologist*, 2007, **173**(3): 495-508.
- [31] 高丽, 杨劼, 刘瑞香. 不同土壤水分条件下中国沙棘雌雄株叶片形态结构及生理生化特征[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(9): 2 201-2 208.
- GAO L, YANG J, LIU R X. Leaf morphological structure and physiological and biochemical characteristics of female and male *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* under different soil moisture condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(9): 2 201-2 208.
- [32] BOOY G, HENDRIKS R J J, SMULDERS M J M, *et al.* Genetic diversity and the survival of populations[J]. *Plant Biology*, 2000, **2**(4): 379-395.
- [33] 刘瑞香, 杨劼, 高丽. 中国沙棘和俄罗斯沙棘的 ISSR 分析[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(4): 4 671-4 677.
- LIU R X, YANG J, GAO L. ISSR analysis of Chinese seabuckthorn and Russian seabuckthorn[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(4): 4 671-4 677.