

## 镉胁迫对盐地碱蓬二型种子幼苗生长及抗逆生理的影响

崔盼盼, 李彤, 苏芳莉

引用本文:

崔盼盼, 李彤, 苏芳莉. 镉胁迫对盐地碱蓬二型种子幼苗生长及抗逆生理的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(5): 991-999.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0703>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 铀对蚕豆幼苗光合特性和呼吸代谢的毒害机理

刘泽伟, 赖金龙, 李俊柯, 丁峰, 张宇, 罗学刚

*农业环境科学学报*. 2020, 39(9): 1916-1924 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0390>

#### 屎肠球菌胞外多糖对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响

罗晟, 赵泽文, 任新宇, 魏宏宇, 马雅静, 潘起涛, 李荣同, 龚国胜, 程新

*农业环境科学学报*. 2020, 39(9): 1888-1899 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0181>

#### Pb、Cd和酸胁迫对枫香种子萌发、幼苗生长及体内抗氧化酶活性的影响

陈顺钰, 韩航, 薛凌云, 张韵, 侯晓龙, 蔡丽平, 周垂帆

*农业环境科学学报*. 2018, 37(4): 647-655 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1510>

#### Delftia sp.B9对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗镉积累的影响

刘玉玲, 彭鸥, 铁柏清, 刘亦婷, 罗海艳, 李丹阳, 刘寿涛

*农业环境科学学报*. 2019, 38(8): 1855-1863 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0261>

#### 四种盐生植物对Cd Pb复合污染提取修复效果比较研究

陈柯罕, 张科, 李取生, 胡妮, 徐智敏, 魏佳

*农业环境科学学报*. 2017, 36(3): 458-465 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1252>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

崔盼盼, 李彤, 苏芳莉. 镉胁迫对盐地碱蓬二型种子幼苗生长及抗逆生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 991-999.  
CUI P P, LI T, SU F L. Effects of cadmium stress on dimorphic seedling growth and the stress-resistance physiology of *Suaeda salsa*[J].  
*Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5): 991-999.



开放科学 OSID

# 镉胁迫对盐地碱蓬二型种子幼苗生长及抗逆生理的影响

崔盼盼<sup>1</sup>, 李彤<sup>1</sup>, 苏芳莉<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁盘锦湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 沈阳 110866; 3. 辽宁双台河口湿地生态系统国家定位观测研究站, 辽宁 盘锦 124112)

**摘要:**为探究盐地碱蓬二型种子幼苗对Cd胁迫的适应策略,明确Cd胁迫下植物响应机理并筛选出对Cd污染盐渍土壤有修复潜力的种子类型,以辽河口湿地潮滩区盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)为材料,采用土培盆栽方法对盐地碱蓬进行0、0.04、0.2、0.4、0.8 mg·kg<sup>-1</sup> Cd胁迫,分析2种盐地碱蓬幼苗生长情况、不同部位Cd含量、抗氧化酶比活力和渗透调节物含量。结果表明: Cd胁迫对黑色种子幼苗株高、鲜质量和根冠比的抑制作用大于棕色种子幼苗, Cd胁迫下棕色种子幼苗根、茎、叶生物量总体高于黑色种子幼苗; 盐地碱蓬棕色种子幼苗叶片SOD、POD和CAT对Cd胁迫的抗氧化响应能力强于黑色种子幼苗,渗透调节物含量随着Cd胁迫浓度的增加呈升高的趋势,且棕色种子幼苗可溶性糖和脯氨酸含量明显高于黑色种子幼苗; 盐地碱蓬棕色种子幼苗器官中Cd累积含量高于黑色种子幼苗,各器官Cd的积累分配为根>叶>茎; 盐地碱蓬Cd累积与渗透调节物质含量之间呈正相关( $P<0.01$ ),植物生长与抗氧化酶活性之间呈正相关( $P<0.05$ )。研究表明,棕色种子幼苗Cd胁迫耐性强于黑色种子幼苗,盐地碱蓬棕色种子有较好的Cd污染盐土修复潜力。

**关键词:**盐地碱蓬; 镉胁迫; 二型种子; 抗逆生理

中图分类号: X173 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)05-0991-09 doi:10.11654/jaes.2023-0703

## Effects of cadmium stress on dimorphic seedling growth and the stress-resistance physiology of *Suaeda salsa*

CUI Panpan<sup>1</sup>, LI Tong<sup>1</sup>, SU Fangli<sup>1,2,3\*</sup>

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Liaoning Panjin Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Shenyang 110866, China; 3. Liaoning Shuangtai Estuary Wetland Ecosystem Research Station, Panjin 124112, China)

**Abstract:** The adaptation strategy and response mechanism of *Suaeda salsa* dimorphic seedlings under Cd stress were explored, and the seed type with the greater potential to repair Cd-polluted saline soil was selected. Seedling growth, Cd accumulation in different organs, antioxidant enzyme activity, and osmotic regulator contents were examined by soil culturing *S. salsa* in the Liaohe Estuary wetlands with 0, 0.04, 0.2, 0.4 mg·kg<sup>-1</sup>, and 0.8 mg·kg<sup>-1</sup> Cd. The results were as follows. The plant height and fresh weight of black seedlings were reduced compared to those of brown seedlings, and the root, stem, and leaf biomasses of brown seedlings were larger than those of black seedlings. The antioxidative responses of SOD, POD, and CAT in brown seedlings were stronger than those in black seedlings. The osmotic regulator content increased significantly, and the soluble sugar and proline contents in brown seedlings were significantly higher than those in black seedlings. The Cd accumulation of brown seedlings was higher than that of black seedlings, and its distribution in different organs was root>leaf>stem. Cd accumulation and osmotic regulator content were positively correlated ( $P<0.01$ ), as well as plant growth and antioxidant

收稿日期: 2023-08-29 录用日期: 2023-11-08

作者简介: 崔盼盼(1997—),男,河南洛阳人,博士研究生,主要从事水土保持与湿地生态研究。E-mail: cuiapan3@163.com

\*通信作者: 苏芳莉 E-mail: sufangli@syau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1301004); 辽宁省“兴辽英才计划”科技创新领军人才项目(XLYC2002054)

**Project supported:** National Key Research and Development Program of China (2022YFF1301004); "Xingliao Talents Plan" Science and Technology Innovation Leading Talents Project of Liaoning Province (XLYC2002054)

enzyme activity ( $P<0.05$ ). In conclusion, brown seedlings showed stronger Cd tolerance and better ability to repair Cd-polluted saline soil than black seedlings.

**Keywords:** *Suaeda salsa*; cadmium stress; dimorphic seeds; stress-resistance physiology

滨海湿地易沉积上游水体的重金属元素,常成为重金属元素的储存库<sup>[1]</sup>,从而使得河口区域的生态环境恶化<sup>[2]</sup>。镉(Cd)是一种环境污染物,可以通过食物链富集,有很强的生态毒性积累效应<sup>[3-4]</sup>。辽东湾大辽河底栖无脊椎动物的Cd、Cu和Zn含量显著高于鱼类,其中,Cd的生物富集系数最高<sup>[5]</sup>。由于工业、农业和其他人类活动的发展,我国湿地沉积物的Cd污染问题应当得到重视<sup>[6]</sup>。研究发现,黄河口从淡水湿地、微咸湿地到盐沼湿地0~50 cm土壤中Cd的平均含量均高于相应的背景值<sup>[7]</sup>。此外,Zhao等<sup>[8]</sup>分析了中国14个典型三角洲地区采集的217个表层沉积物样品,结果表明,Cd含量范围为0~0.51 mg·kg<sup>-1</sup>,有11个地区的土壤受到中度生态风险的影响。因此,湿地Cd污染滩涂的治理显得尤为迫切和重要。

土壤中高含量Cd会降低植物的根系活力,使根系营养吸收功能受损,从而抑制植物的株高、叶面积及生物量等<sup>[9]</sup>。黄东华等<sup>[10]</sup>发现堇叶碎米荠(*Cardamine violifolia*)的生长受到重金属Cd的抑制作用,叶片保护酶活性和叶绿素含量等呈现出先升后降的趋势。低含量重金属可以提高米氏凯伦藻叶片(*Karenia mikimotoi*)超氧化物歧化酶活性和叶绿素含量<sup>[11]</sup>,以及水稻根系分泌物含量和根系活力<sup>[12]</sup>。陈雷等<sup>[13]</sup>用不同含量Cd对盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)进行处理的盆栽试验结果表明,盐地碱蓬对Cd处理的盐碱土有一定的耐受能力,盐地碱蓬具有修复Cd污染盐渍土的潜力;杨佳等<sup>[14]</sup>通过室外盆栽试验对盐地碱蓬修复Cd污染盐渍土进行研究,发现低含量Cd污染的盐渍土促进了盐地碱蓬的生长,高含量Cd污染抑制盐地碱蓬的生长。然而,关于Cd胁迫下对比2种类型种子幼苗抗Cd胁迫响应机理<sup>[15]</sup>及对Cd污染盐渍土壤修复潜力的研究相对较少。

盐地碱蓬是辽河口湿地潮间带生境的单优群落<sup>[16]</sup>,是改善盐碱土壤和恢复退化湿地的先锋物种<sup>[17-18]</sup>。盐地碱蓬具有二型性种子,即同一植株上产生两种(黑色种子和棕色种子)形态种子的现象。盐地碱蓬液泡在低盐环境中以叶绿素为主,植株表现为绿色;而在高盐度的潮间带生境中,则形成较多的甜菜红素,植株表现为红色<sup>[19]</sup>,因此形成了辽河口湿地“红海滩”景观。辽河口湿地的土壤中Cd的含量范围

为0.04~0.78 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为0.23 mg·kg<sup>-1</sup>,高于背景值(0.11 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[20]</sup>,且土壤重金属Cd污染面积大,Cd污染已经成为辽河口湿地盐地碱蓬生态退化的主要因素。由于重金属污染和富营养化,辽河口湿地出现生态退化,盐地碱蓬数量减少,生物多样性锐减,河口盐地碱蓬湿地退化已经成为人们不可忽视的问题。

因此,本试验对比研究Cd胁迫下盐地碱蓬二型种子幼苗(棕色种子和黑色种子)生长、叶片抗氧化酶(SOD、POD、CAT)比活力及渗透调节物含量等抗逆生理指标的响应特征,阐明盐地碱蓬二型种子幼苗对Cd的耐受能力,为植被修复退化湿地和重金属污染土壤提供最佳种子选择。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2021年8月从辽宁省辽河口湿地(40°40'~41°27' N, 122°05'~122°26' E)潮间带采集盐地碱蓬植株,成熟的盐地碱蓬植株上有二型种子(黑色和棕色),种子形态特征见表1和图1。从风干穗中将种子分离出来,室温(20~25℃)下储存在密闭容器中,直到进一步试验。

### 1.2 试验设计

盐地碱蓬二型种子幼苗Cd胁迫处理共设0(对照)、0.04、0.2、0.4、0.8 mg·kg<sup>-1</sup>5个处理,每个处理设置3次重复。供试基质为蛭石与湿地土壤(Cd含量低于0.01 mg·kg<sup>-1</sup>)1:1比例拌匀,保证混合土壤pH为7.1~7.2。将储存的种子在5%次氯酸钠(NaClO)溶液中灭菌3 min,然后用蒸馏水冲洗种子3次,晾干后将测试种子放置在内衬双层消毒滤纸的无菌培养皿(直径

表1 盐地碱蓬二型种子形态特征

Table 1 Morphological characteristics of dimorphic seeds in *Suaeda salsa* population

种子 Seed	表皮 Coat	直径 Diameter/mm	厚度 Thickness/mm	千粒质量 Thousand kernel weight/g
黑色 Black	角质	1.762±0.224b	1.110±0.099a	1.02±0.19b
棕色 Brown	膜质	2.272±0.253a	0.939±0.244b	2.49±0.65a

注:不同小写字母表示在 $P<0.01$ 的水平上存在显著差异。

Note: Different letters represented the significant differences at the level of  $P<0.01$ .

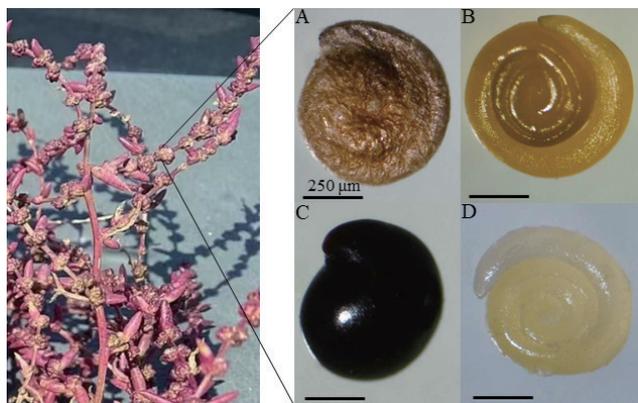


图1 潮间带生境盐地碱蓬棕色种子和胚以及黑色种子和胚  
Figure 1 Brown seed and its embryo, black seed and its embryo of *Suaeda salsa* in the intertidal habitat

12 cm)中进行发芽,待长出1~2片真叶后,将幼苗分别移植到装有0.5 kg混合土壤的花盆中(直径12 cm、高12 cm),每盆3株幼苗。随后,开始向花盆中喷洒20 mL相应浓度的 $\text{CdCl}_2$ 溶液(1、5、10、20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )进行Cd胁迫处理,对应土壤Cd含量分别为0.04、0.2、0.4、0.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,符合实际辽河口湿地土壤中Cd的含量范围(0.04~0.78  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。将30个花盆(5个 $\text{CdCl}_2$ 处理 $\times$ 3个重复 $\times$ 2型种子)放置在培养箱中。培养箱中温度20~25  $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度75%~85%,14 h光照/10 h黑暗。每周随机更换花盆的位置,定期施加Hoagland营养液保证植物生长。培养40 d后,选取3株幼苗,测定根、茎、叶中Cd含量,以及叶片抗氧化酶活性和渗透调节物质含量。剩余幼苗测量其株高并测定地上部分和地下部分鲜、干质量。

### 1.3 测定指标与方法

#### 1.3.1 抗氧化酶活性测定

取盐地碱蓬新鲜叶片冲洗干净,拭干后研磨成匀浆进行抗氧化酶活性测定。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光还原法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定<sup>[21]</sup>。

#### 1.3.2 渗透调节物质含量测定

取盐地碱蓬新鲜叶片冲洗干净,拭干后研磨成匀浆进行叶片渗透调节物质含量测定。可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法,可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝染色法,脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮显色法<sup>[22]</sup>。

#### 1.3.3 质量测定

将盐地碱蓬幼苗清洗干净,用滤纸吸干表面水

分,分为地下(根)部分和地上(茎、叶)部分,称量幼苗鲜质量并测量株高,计算盐地碱蓬根冠比,即植物地下部分与地上部分的鲜质量的比值。然后在105  $^{\circ}\text{C}$ 下杀青20 min,再置于80  $^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘至恒质量,分别对每株植株的地上部分干质量和地下部分干质量进行测定。

#### 1.3.4 器官中Cd含量的测定

将幼苗用去离子水清洗干净,用滤纸擦干,然后烘干(105  $^{\circ}\text{C}$ ,30 min)称质量。用研钵将1 g烘干植物组织均匀化10 mL混酸中(浓硝酸:高氯酸:浓硫酸=8:1:1),然后缓慢加热消化,待溶液呈清亮无色后过滤,定容至25 mL,用U-5100分光光度计(HITACHI)测定盐地碱蓬幼苗中Cd的含量。

### 1.4 数据分析

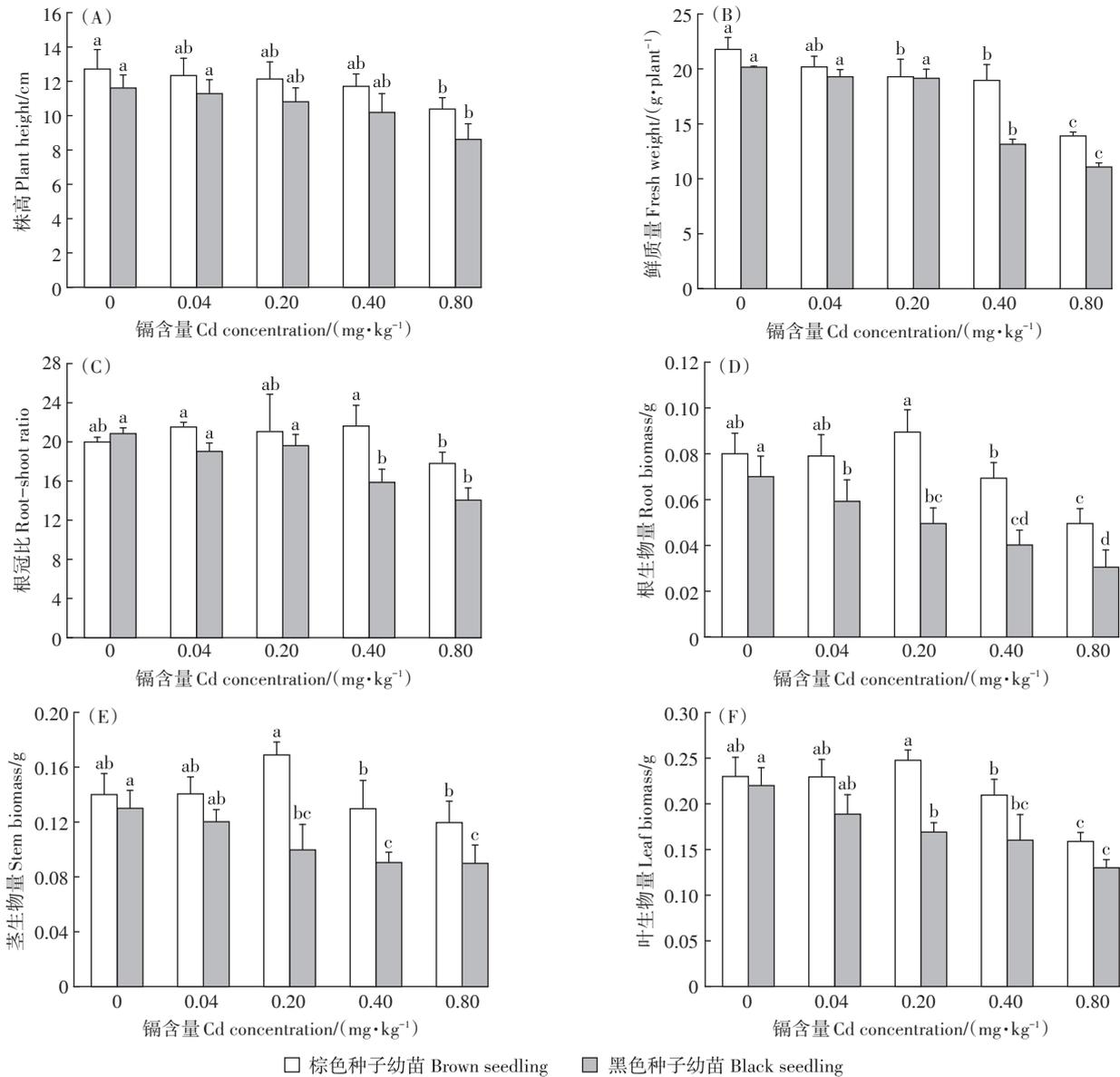
使用Excel 2019计算数据平均值和标准差。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)评价Cd处理对幼苗生长和生理特征的影响。在进行统计分析之前,利用SPSS 22.0的Kolmogorov-Smirnov检验和Levene检验分析数据的正态性和方差齐性。如果方差不齐性,对数据进行对数转换,保证方差的正态和同质性。当方差分析显示处理间差异显著时( $P < 0.05$ ),采用Duncan进行多重比较。使用Origin 2021绘制柱状图。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd胁迫对盐地碱蓬二型种子幼苗生长的影响

与对照比较,随着Cd含量的增加,盐地碱蓬二型种子幼苗株高和鲜质量均呈下降趋势,表明Cd胁迫可明显抑制盐地碱蓬的生长(图2A和图2B)。棕色种子幼苗和黑色种子幼苗在Cd含量为0.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时株高达到显著差异,较对照降幅分别为18.33%和25.75%;此外,当Cd含量达到0.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,棕色种子和黑色种子幼苗每株鲜质量较对照分别减少了36.18%和45.09%。黑色种子幼苗株高和鲜质量降低幅度明显大于棕色种子幼苗,说明Cd胁迫对黑色种子幼苗生长的抑制作用显著大于棕色种子幼苗( $P < 0.05$ )。

根冠比反映了植物地下部分与地上部分生物量分配情况,黑色种子幼苗根冠比随着Cd含量增加逐渐降低,而棕色种子幼苗根冠比则出现先上升后下降的趋势(图2C)。随着Cd含量的增加,盐地碱蓬棕色种子幼苗根、茎、叶生物量均在Cd含量为0.2  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到峰值,随后在Cd含量为0.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最低值,与Cd含量为0.2  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时相比,分别降低了



□ 棕色种子幼苗 Brown seedling    ■ 黑色种子幼苗 Black seedling

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Different letters represented significant differences among different concentrations ( $P < 0.05$ ). The same below.

图2 Cd胁迫下盐地碱蓬二型种子幼苗的株高、鲜质量、根冠比、根生物量、茎生物量和叶生物量

Figure 2 The plant height, fresh weight, root-shoot ratio, root biomass, stem biomass and leaf biomass of *Suaeda salsa* dimorphic seedling under cadmium stress

44.44%、29.41%和36.00%；盐地碱蓬黑色种子幼苗在受到Cd胁迫时，其根、茎、叶生物量均表现出减小的趋势，且差异显著，0.8 mg·kg<sup>-1</sup>Cd胁迫下各指标降低幅度最大，分别为62.5%、35.71%、45.83%（图2D~图2F），黑色种子幼苗株高和鲜质量降低幅度明显大于棕色种子幼苗。

## 2.2 Cd胁迫对盐地碱蓬二型种子幼苗抗逆生理特性的影响

棕色种子幼苗叶片的可溶性糖、可溶性蛋白和脯

氨酸含量由对照的0.51、0.93 mg·g<sup>-1</sup>和0.085 mg·g<sup>-1</sup>增加为Cd含量0.8 mg·kg<sup>-1</sup>时的1.44、5.62 mg·g<sup>-1</sup>和0.208 mg·g<sup>-1</sup>，黑色种子幼苗叶片的可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量在高Cd含量(0.8 mg·kg<sup>-1</sup>)时较对照增加了0.63、1.90 mg·g<sup>-1</sup>和0.132 mg·g<sup>-1</sup>（图3A~图3C）。盐地碱蓬幼苗叶片可溶性物质含量均随Cd含量增加而增加，且棕色种子幼苗可溶性物质含量明显高于黑色种子幼苗，各处理间的差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。

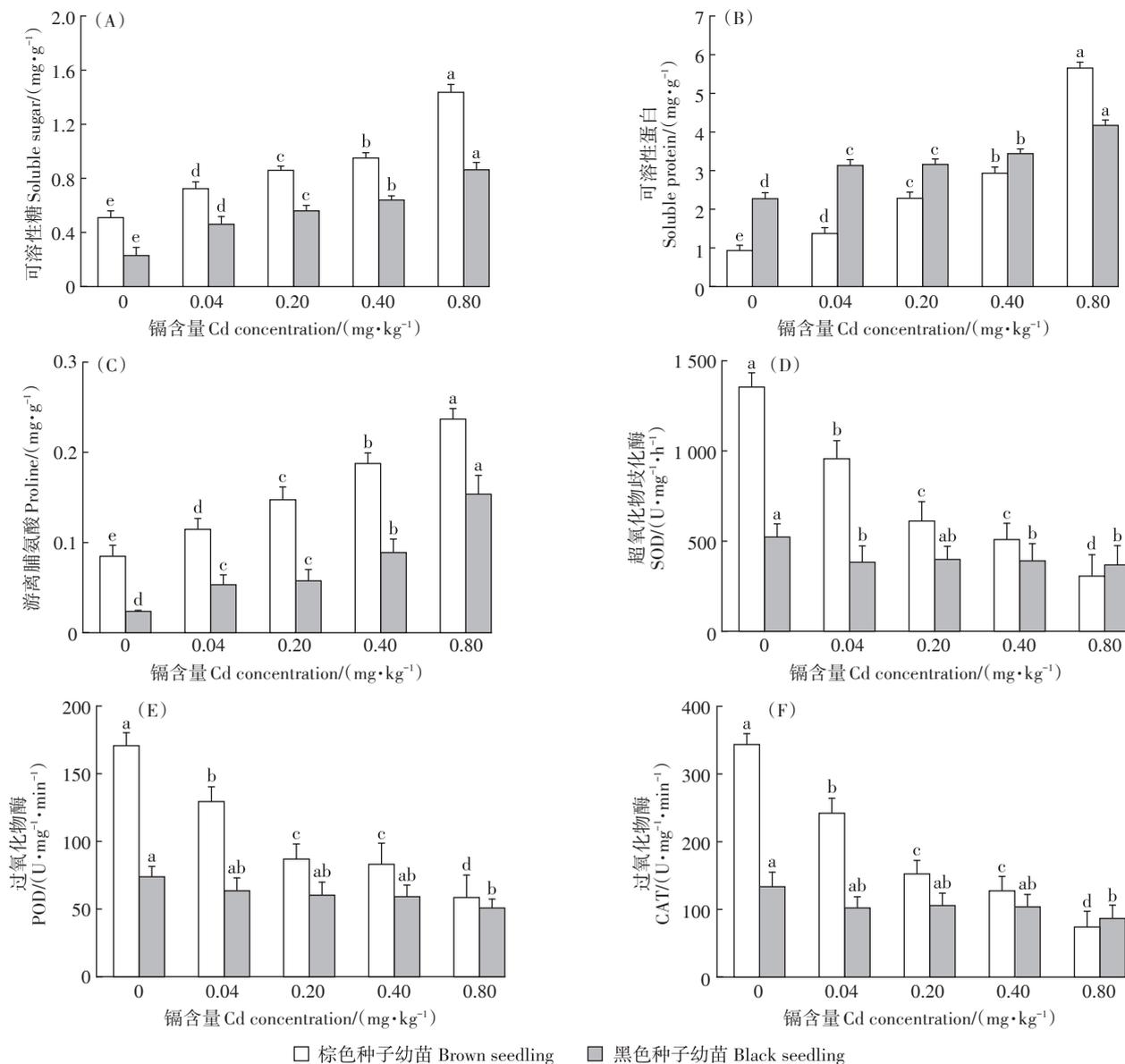


图3 Cd胁迫下盐地碱蓬幼苗叶片可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量以及超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶比活力  
Figure 3 Contents of soluble sugar, soluble protein, proline and the specific activity of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) in leaves of *Suaeda salsa* seedling under cadmium stress

盐地碱蓬二型种子幼苗叶片SOD、POD和CAT比活力随着Cd含量的增加均呈降低的趋势(图3D~图3F)。与对照相比,盐地碱蓬二型种子幼苗叶片SOD、POD和CAT比活力在Cd胁迫下均达到显著差异水平( $P < 0.05$ )。在Cd含量为 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,棕色种子幼苗叶片SOD、POD和CAT比活力分别比对照组降低77.38%、65.69%和78.47%,而黑色种子幼苗叶片SOD、POD、CAT比活力降低幅度分别为29.59%、31.33%和35.12%。

### 2.3 Cd胁迫下盐地碱蓬各器官Cd的积累分配规律

如图4所示,随着Cd含量的增加,盐地碱蓬种子

幼苗根、茎、叶中Cd含量呈上升趋势,且各处理间的差异均达到显著水平。在 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd处理时,与茎和叶中Cd含量相比,棕色种子幼苗根部Cd含量分别显著增加了105.34%和25.51%,黑色种子幼苗根部Cd含量分别显著增加了103.47%和10.51% ( $P < 0.05$ ),表明根系是盐地碱蓬Cd富集的重要器官,这在一定程度上可以减少地上部Cd含量。在不同Cd含量处理下,棕色种子幼苗根、茎和叶中Cd累积量均高于黑色种子幼苗,在 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd处理时,棕色种子幼苗根、茎和叶中Cd含量相较于黑色种子幼苗分别增加了23.33%、22.10%和8.56%。

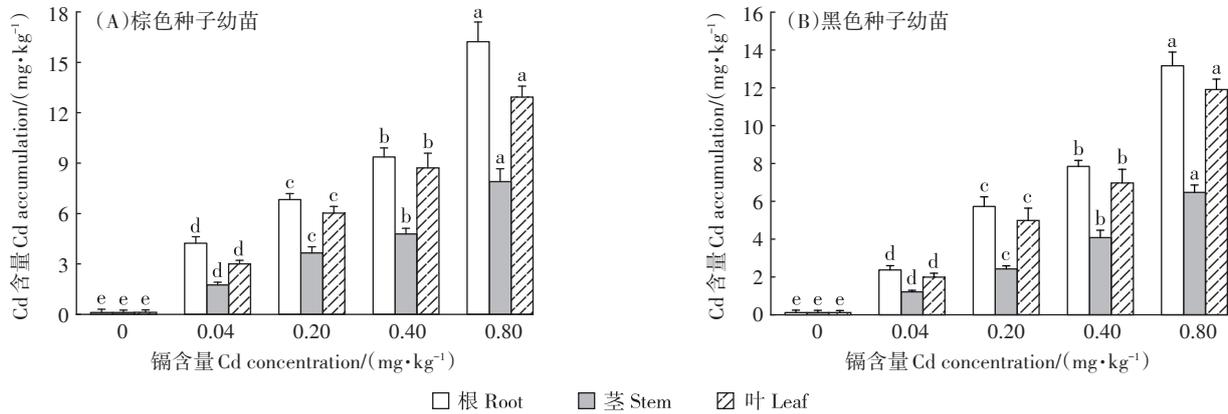


图4 Cd胁迫下盐地碱蓬棕色种子幼苗和黑色种子幼苗根、茎、叶Cd含量

Figure 4 Root, stem and leaf Cd accumulation in brown seedling and black seedling of *Suaeda salsa* under Cd stress

### 3 讨论

植物的形态特征是响应环境变化的重要指标,具有极强的敏感性和可塑性<sup>[23]</sup>。本研究中,Cd胁迫下黑色种子幼苗株高和鲜质量较棕色种子幼苗降低更为明显(图2A和图2B)。植物通过调节生物量分配模式来提高其生态适应性和竞争能力<sup>[24]</sup>。随着Cd含量的升高,黑色种子幼苗的根、茎、叶生物量相较于棕色种子幼苗均下降得更为显著(图2D~图2F)。本研究中,棕色种子幼苗的根冠比明显高于黑色种子幼苗的,且随着Cd胁迫增加出现了先上升后降低的趋势(图2C)。重金属胁迫下,植物通过扩大根系规模来吸收营养元素<sup>[25]</sup>。因此,Cd胁迫下盐地碱蓬棕色种子幼苗根系伸长生长导致了较高的根冠比。研究人员在对黑麦草(*Lolium*)<sup>[26]</sup>和台湾桤木(*Alnus formosana*)<sup>[27]</sup>的研究中也发现了与本研究一致的结果。

遭受重金属胁迫时,植物细胞产生的过量的活性氧自由基会对细胞膜产生氧化损伤,而抗氧化酶(SOD、POD和CAT)共同组成调控活性氧平衡的抗氧化酶系统,其中SOD是清除过量活性氧的第一道防线,可将毒性较强的超氧阴离子自由基歧化为毒性较弱的过氧化氢和基态氧,避免生成毒性更强的羟自由基,POD和CAT则进一步将过氧化氢分解为水,从而减轻过量活性氧对植物的损伤<sup>[28]</sup>。盐地碱蓬二型种子幼苗叶片SOD、POD和CAT比活力均在高含量Cd胁迫时低于对照(图3D~图3F),这与刺槐(*Black Locust*)<sup>[29]</sup>幼苗叶片细胞抗氧化酶变化结果一致,说明盐地碱蓬幼苗体内超氧阴离子自由基和过氧化氢的水平超过了抗氧化酶的清除能力,其对叶片细胞的毒害作用开始显现,抗氧化酶的合成受到抑制,导致活性

下降。同时,棕色种子幼苗抗氧化酶的比活力高于黑色种子幼苗,这可能是盐地碱蓬棕色种子幼苗具有较强的Cd耐性。综合本研究和其他研究结果<sup>[30]</sup>发现,在重金属胁迫下,植物抗氧化酶比活力的变化有一定的阈值范围,说明植物的抗氧化能力有限,还需要其他解毒机制参与其中。

在遭受重金属胁迫时,植物细胞合成渗透调节物质(可溶性蛋白、可溶性糖及游离脯氨酸),调节细胞渗透势,维持细胞正常的生理代谢能力<sup>[9,31]</sup>。可溶性糖是植物储存能量的主要形式,植物在抵御重金属毒害的过程中需要消耗大量的能量,这是盐地碱蓬幼苗响应Cd胁迫的主要生理策略之一。本研究发现,随着Cd含量的增加,盐地碱蓬棕色种子幼苗可溶性糖含量上升且高于黑色种子,这与苏芳莉等<sup>[32]</sup>研究盐地碱蓬幼苗响应重金属胁迫结果一致。Cd胁迫下盐地碱蓬种子幼苗叶片可溶性蛋白含量较对照增加,表明盐地碱蓬种子通过提高体内可溶性蛋白含量以保护自身免遭Cd胁迫的毒害,这与银灰杨(*Populus scapenscen*)幼苗可溶性蛋白质含量变化结果一致<sup>[33]</sup>,这种生理响应可以在一定程度上减低Cd的毒害作用。可溶性蛋白质可以与液泡中离子态金属结合形成螯合物,从而减缓重金属离子对细胞的毒害<sup>[34-35]</sup>。Cd可以结合的可溶性蛋白有谷胱甘肽(GSH)、植物螯合肽(PCs)和金属硫蛋白(MTs)等<sup>[30,36]</sup>。此外,2种盐地碱蓬种子幼苗叶片脯氨酸的累积均被激活,在清除活性氧自由基等方面发挥了重要作用<sup>[37]</sup>,一定程度上缓解了Cd胁迫造成的氧化损伤。芥菜(*Brassica juncea*)<sup>[38]</sup>幼苗对Cd胁迫响应研究中也观察到类似的结果,但植物诱导脯氨酸积累的能力是有限的<sup>[35,39]</sup>,Cd胁迫下盐地碱蓬黑色种子幼苗叶片的脯氨酸含量逐渐减少

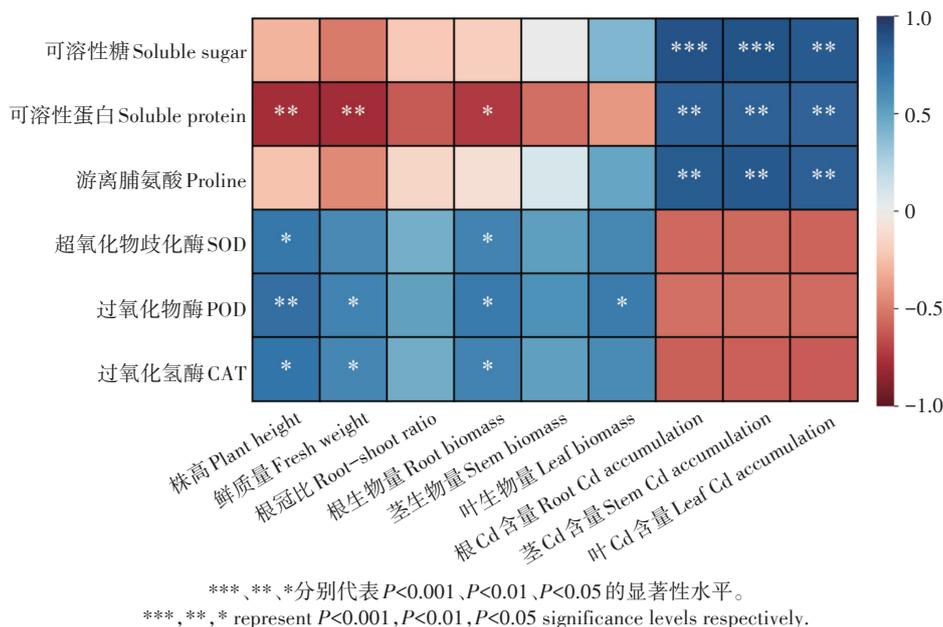


图5 Cd积累、植物生长与酶活性、渗透调节物间的相关性分析

Figure 5 Correlation analysis among cadmium accumulation, plant growth, specific enzyme activity and osmotic regulators

且低于棕色种子幼苗,说明棕色种子幼苗有着更强的自我保护能力。

本研究发现,盐地碱蓬二型种子幼苗根系Cd含量最高(图4),其次是叶和茎,这与重金属离子在箭叶雨久花(*Monochoria hastata*)<sup>[40]</sup>及秋华柳(*Salix variegata*)<sup>[41]</sup>等水生植物中的分布规律相一致。Cd进入植物根部后,难以被转移到地上部,原因是Cd为植物的非必需元素,植物体内没有专门负责其迁移的转运蛋白和相应通道,故多数Cd离子滞留在植物根部,以减缓Cd对叶片的毒害作用。应用于土壤修复实践时可直接通过收割植物进行焚烧处理,一方面可提高经济效益,另一方面便于集中处理含大量重金属Cd的灰渣。通过Cd积累、植物生长与酶活性等生理指标间的相关性分析(图5),发现盐地碱蓬幼苗根、茎和叶Cd含量与叶片可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量之间存在显著正相关性( $P < 0.01$ ),盐地碱蓬幼苗株高和根生物量与叶片SOD、POD和CAT活性之间存在显著正相关性( $P < 0.05$ ),盐地碱蓬幼苗株高、鲜质量和根生物量与叶片可溶性蛋白含量之间存在显著负相关性( $P < 0.05$ )。

## 4 结论

(1)Cd胁迫对黑色盐地碱蓬种子幼苗株高、鲜质量和根冠比的抑制作用大于棕色种子幼苗,盐地碱蓬幼苗均优先增加叶片生物量,Cd胁迫下棕色种子幼

苗的根、茎、叶生物量总体高于黑色种子幼苗的。

(2)盐地碱蓬棕色种子叶片的SOD、POD和CAT对Cd胁迫的抗氧化响应强于黑色种子幼苗的,棕色种子幼苗的可溶性蛋白和游离脯氨酸含量对Cd胁迫的响应程度强于黑色种子幼苗的,渗透调节物质发挥积极作用以减缓重金属对细胞的毒害效应。

(3)盐地碱蓬棕色种子幼苗的根、茎、叶中Cd含量均高于黑色种子幼苗的,且根系为盐地碱蓬Cd富集的重要部位。盐地碱蓬Cd累积与渗透调节物质含量之间呈正相关( $P < 0.01$ ),植物生长与抗氧化酶活性之间呈正相关( $P < 0.05$ )。

(4)棕色种子的抗Cd胁迫能力整体高于黑色种子的,盐地碱蓬棕色种子幼苗有较好的Cd污染盐土修复能力。

## 参考文献:

- [1] WU Y M, LENG Z R, LI J, et al. Sulfur mediated heavy metal biogeochemical cycles in coastal wetlands: from sediments, rhizosphere to vegetation[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2022, 16(8): 1-18.
- [2] XU J Y, WANG X L, WANG J B, et al. Dominant environmental factors influencing soil metal concentrations of Poyang Lake wetland, China: soil property, topography, plant species and wetland type[J]. *Catena*, 2021, 207: 105601.
- [3] 李振良, 谢群, 曾珍, 等. 湛江观海长廊红树林土壤-植物体系重金属富集与迁移规律[J]. *热带地理*, 2021, 41(2): 398-409. LI Z L, XIE Q, ZENG Z, et al. Enrichment and migration of heavy metals in

- mangrove soil-plant system from sea promenade in Zhanjiang[J]. *Tropical Geography*, 2021, 41(2):398-409.
- [4] 赵雪健, 陈春宇, 杨志刚. 镉和酸化对水生动物的毒害及生理生态的影响[J]. 生命科学研究, 2021, 25(4):347-354. ZHAO X J, CHEN C Y, YANG Z G. Toxic effects of cadmium and acidification on aquatic animals and their eco-physiological responses[J]. *Life Science Research*, 2021, 25(4):347-354.
- [5] GUO B B, JIAO D Q, WANG J, et al. Trophic transfer of toxic elements in the estuarine invertebrate and fish food web of Daliao River, Liaodong Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 113(1/2):258-265.
- [6] 罗松英, 王嘉琦, 周敏, 等. 湛江东海岛红树林湿地表层土壤重金属空间分布特征及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8):1547-1555. LUO S Y, WANG J Q, ZHOU M, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the surface soils of mangrove wetland in Donghai Island, Zhanjiang[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(8):1547-1555.
- [7] ZHAO Q Q, BAI J H, GAO Y C, et al. Heavy metal contamination in soils from freshwater wetlands to salt marshes in the Yellow River Estuary, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 774:145072.
- [8] ZHAO M W, WANG E K, XIA P, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in the intertidal zone environments of typical sea areas in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 138:397-406.
- [9] 查应琴, 潘凤, 关萍. 镉胁迫对鸡冠花种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(11):1900-1908. ZHA Y Q, PAN F, GUAN P. Seed germination and seedling physiological and biochemical characteristics of *Celosia cristata* L. under cadmium stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(11):1900-1908.
- [10] 黄东华, 麦淑华, 仇曙, 等. 镉对藜叶碎米荠生长生理特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(5):87-97. HUANG D H, MAI S H, QIU S, et al. Effects of cadmium on growth and physiological characteristics of *Cardamine violifolia*[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(5):87-97.
- [11] 蔡卓平, 刘伟杰, 段舜山. 重金属  $Zn^{2+}$  胁迫下米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*) 的生长生理响应研究[J]. 生态科学, 2019, 38(2):176-181. CAI Z P, LIU W J, DUAN S S. Growth and physiological response of *Karenia mikimotoi* to heavy metal  $Zn^{2+}$  stress[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(2):176-181.
- [12] 周季妮, 杨琛, 宋之怡, 等. 四环素与镉复合污染对水稻根系的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4):1518-1528. ZHOU J N, YANG C, SONG Z Y, et al. Influences of tetracycline and cadmium on rice roots: growth and root exudates[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4):1518-1528.
- [13] 陈雷, 杨亚洲, 郑青松, 等. 盐生植物碱蓬修复镉污染盐土的研究[J]. 草业学报, 2014, 23(2):171-179. CHEN L, YANG Y Z, ZHENG Q S, et al. Phytoremediation of Cd polluted saline soils by the halophyte *Suaeda salsa*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2):171-179.
- [14] 杨佳, 王趁义, 陈翟, 等. 碱蓬对  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  单一及复合胁迫的反应及其吸收累积特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):323-327. YANG J, WANG C Y, CHEN Z, et al. Responses and accumulation characteristics of *Suaeda Salsa* under combined and single stress of  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$ [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2):323-327.
- [15] ZHOU J, CHENG K, HUANG G, et al. Effects of exogenous 3-indoleacetic acid and cadmium stress on the physiological and biochemical characteristics of *Cinnamomum camphora*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 191:109998.
- [16] 侯利萍, 夏会娟, 孔维静. 河口湿地优势植物资源化利用研究进展[J]. 湿地科学, 2019, 17(5):593-599. HOU L P, XIA H J, KONG W J. Advance in researches on resource utilization of dominant plants in estuarine wetlands[J]. *Wetland Science*, 2019, 17(5):593-599.
- [17] XIE T, CUI B S, LI S Z, et al. Topography regulates edaphic suitability for seedling establishment associated with tidal elevation in coastal salt marshes[J]. *Geoderma*, 2019, 337:1258-1266.
- [18] 杨策, 陈环宇, 李劲松, 等. 盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10):1578-1586. YANG C, CHEN H Y, LI J S, et al. Soil improving effect of *Suaeda salsa* on heavy coastal saline-alkaline land[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(10):1578-1586.
- [19] 王青, 骆梦, 邱冬冬, 等. 滨海盐沼水文特征对盐地碱蓬定植过程的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12):2569-2579. WANG Q, LUO M, QIU D D, et al. Effect of hydrological characteristics on the recruitment of *Suaeda salsa* in coastal salt marshes[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12):2569-2579.
- [20] YU Y, ZHANG J, QIN J, et al. Characteristics and influencing factors of metal distribution in different wetlands of the Liaohe Delta, north-eastern China[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9:1011457.
- [21] 郝在彬, 苍晶, 徐仲, 等. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004. HAO Z B, CANG J, XU Z, et al. Plant physiology experiment[M]. Harbin:Harbin Institute of Technology Press, 2004.
- [22] 王晶英. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社, 2003. WANG J Y. Experimental techniques and principles of plant physiology and biochemistry[M]. Harbin:Northeast Forestry University Press, 2003.
- [23] 张景波, 李新乐, 吴波, 等. 长期模拟增雨对荒漠植物形态特征及空间分布格局的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10):3367-3375. ZHANG J B, LI X L, WU B, et al. Effects of long-term rainfall addition on the morphological characteristics and point pattern of desert plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10):3367-3375.
- [24] WU T, LIU S, LIE Z, et al. Divergent effects of a 6-year warming experiment on the nutrient productivities of subtropical tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 461:117952.
- [25] HUANG X, HO S H, ZHU S, et al. Adaptive response of arbuscular mycorrhizal symbiosis to accumulation of elements and translocation in *Phragmites australis* affected by cadmium stress[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 197:448-455.
- [26] 刘俊祥, 魏树强, 翟云飞, 等.  $Cd^{2+}$  胁迫下多年生黑麦草的生长与生理响应[J]. 核农学报, 2015, 29(3):587-594. LIU J X, WEI S Q, ZHAI F F, et al. Growth and physiology response of *Perennial Ryegrass* to  $Cd^{2+}$  stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015,

- 29(3):587-594.
- [27] 谭长强, 黄志玲, 彭玉华, 等. Cd胁迫下施N对台湾柾木(*Alnus formosana*)干物质及N、P、K、Cd积累与分配的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7):1847-1854. TAN C Q, HUANG Z L, PENG Y H, et al. Influences of cadmium and nitrogen on the accumulation and distribution of dry matter and N, P, K, Cd in *Alnus formosana*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(7):1847-1854.
- [28] 朱利君, 闫秋洁, 陈光升, 等. 外源H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>通过介导抗氧化酶、ABA和GA促进高盐胁迫下黄瓜种子的萌发[J]. 植物生理学报, 2019, 55(3):342-348. ZHU L J, YAN Q J, CHEN G S, et al. Exogenous H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> promotes seed germination under high salinity by regulating antioxidant enzymes, ABA and GA interaction in cucumber(*Cucumis sativus*)[J]. *Plant Physiology Journal*, 2019, 55(3):342-348.
- [29] 刘金秀, 张松彦, 周建. 镉胁迫对刺槐幼苗生长与光合生理特性的影响[J]. 林业科学研究, 2023, 36(3):1-11. LIU J X, ZHANG S Y, ZHOU J. Effects of cadmium stress on growth and photosynthetic physiological characteristics of *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. *Forest Research*, 2023, 36(3):1-11.
- [30] AIT E K, BEN B W, ENNOURY A, et al. Germination parameters and responses of antioxidant enzymatic activities of two medicinal plants (*Peganum harmala* L. and *Origanum majorana* L.) under heavy metal stress[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(3):3942-3957.
- [31] YIN D C, QI J Y. The physiological response of ectomycorrhizal fungus *Lepista sordida* to Cd and Cu stress[J]. *PeerJ*, 2021, 9:e11115.
- [32] 苏芳莉, 孙旭, 孙权, 等. 湿地翅碱蓬生长及渗透调节物质对盐度的响应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7):1997-2002. SU F L, SUN X, SUN Q, et al. Responses of growth and osmoregulatory substances of *Suaeda heteroptera* to salt concentrations in wetlands[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7):1997-2002.
- [33] 张阿芳, 张庆, 代惠萍, 等. 镉胁迫对银灰杨根和叶片渗透调节物质的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2):83-87. ZHANG A F, ZHANG Q, DAI H P, et al. Effects of cadmium stress on the osmotic adjustment substance of *Populus canescens* in leaves and roots[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(2):83-87.
- [34] WEI S H, BAI J Y, YANG C J, et al. Compound amino acids added in media improved *Solanum nigrum* L. phyto remedying Cd-PAHs contaminated soil[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18(4):358-363.
- [35] 张家洋, 陈丽丽, 楚莉莉, 等. 锌镉单一胁迫对小麦和稗草生理生化特性的影响[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(6):89-96. ZHANG J Y, CHEN L L, CHU L L, et al. Effects of Zn and Cd on physiological and biochemical characteristics of *Triticum aestivum* and *Beckmannia syzigachne*[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences)*, 2018, 38(6):89-96.
- [36] 林翰志, 陈涛, 蒋少军, 等. 活性硅缓解植物重金属胁迫及其生物学机制研究进展[J]. 生态科学, 2022, 41(5):243-251. LIN H Z, CHEN T, JIANG S J, et al. Research progress on biological mechanism of active silicon alleviating heavy metal stress in plants[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(5):243-251.
- [37] 龚茵茵, 燕璐, 林建中, 等. 低等生物谷氨酸脱氢酶基因用于作物遗传改良的研究进展[J]. 生命科学研究, 2021, 25(1):31-38. GONG Y Y, YAN L, LIN J Z, et al. Research advances on glutamate dehydrogenase genes of lower organisms for crop genetic improvement [J]. *Life Science Research*, 2021, 25(1):31-38.
- [38] WANG Y, TAN P, CHANG L, et al. Exogenous proline mitigates toxic effects of cadmium via the decrease of cadmium accumulation and re-establishment of redox homeostasis in *Brassica juncea*[J]. *BMC Plant Biology*, 2022, 22(1):182.
- [39] 朱志国, 周守标. 铜锌复合胁迫对芦竹生理生化特性、重金属富集和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):276-280. ZHU Z G, ZHOU S B. Effects of physiological and biochemical characteristics, accumulation of *Arundo donax* and soil enzyme activities under combined stress of Cu and Zn[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):276-280.
- [40] BARUAH S, BORA M S, SHARMA P, et al. Understanding of the distribution, translocation, bioaccumulation, and ultrastructural changes of *Monochoria hastata* plant exposed to cadmium[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228:1-21.
- [41] 刘媛, 魏虹, 马文超, 等. 秋华柳对镉的积累及其亚细胞分布特征[J]. 林业科学, 2018, 54(8):48-55. LIU Y, WEI H, MA W C, et al. Accumulation and subcellular distribution of cadmium in *Salix variegata*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(8):48-55.