

# 小叶黄杨幼苗在盐旱交互胁迫下的生理响应

彭景勃,叶冬梅\*

(内蒙古农业大学林学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

**摘要:**为探究干旱胁迫在叠加盐胁迫条件下对小叶黄杨幼苗光合及生理特性的影响,以其扦插幼苗为材料,采用水培试验,设置16组盐、旱及交互胁迫处理,测定光合以及生理生化指标的变化,为小叶黄杨引种栽培提供理论依据。结果表明:(1)相较于干旱胁迫,小叶黄杨的生理生化特性受盐胁迫影响更大。(2)在重度干旱胁迫下,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)的活性相较于对照分别增加了14.25%,20.13%,差异显著( $P<0.05$ );脯氨酸(Pro)相较于对照显著增长了30.99%。(3)重度盐胁迫下,SOD,CAT的活性以及Pro含量相较于对照分别显著下降了13.67%,7.60%,27.75%( $P<0.05$ )。(4)在盐、旱及交互胁迫下,SOD,POD和CAT活性均表现出先升高后降低的趋势,3者之间相互协调一致。研究发现,小叶黄杨在应对干旱胁迫时,能通过调整自身生理特性来提高逆境适应能力,表现出较强的抗旱性;而重度盐胁迫会损害正常生长,盐旱互作加剧了对小叶黄杨光合作用的损害;另一方面小叶黄杨幼苗在盐和干旱的交互作用下,通过调节抗氧化酶活性、渗透调节物质来防止胁迫,表现出交互适应性。

**关键词:**小叶黄杨;盐旱交互胁迫;光合作用;生理响应;适应机制

**中图分类号:**Q945.78;S687

**文献标志码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2023.06.002

## Physiological responses of *Buxus Sinica* var. *parvifolia* seedlings under salt-drought stress

Peng Jingbo, Ye Dongmei\*

(Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

**Abstract:** In order to learn the effects of drought stress on physiological characteristics of *Buxus sinica* var. *parvifolia* seedlings under salt stress, 16 groups of salt, drought and reciprocal stresses were set up in this study. The physiological and biochemical indexes of the seedlings were measured to study the adaptation under double abiotic stress. The results showed that (1) Compared with drought stress, the physiological and biochemical characteristics of *B. sinica* var. *parvifolia* were more affected by salt stress. (2) Under severe drought stress, the activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) were increased by 14.25% and 20.13% compared with the control, respectively, and the differences were significant ( $P < 0.05$ ). Proline (Pro) increased significantly by 30.99% compared with control. (3) The activities of SOD, CAT and Pro content under severe salt stress were significantly decreased by 13.67%, 7.60% and 27.75%, respectively, compared with the control ( $P < 0.05$ ). (4) Under salt, drought and reciprocal stresses, the activities of SOD, peroxidase (POD) and CAT increased first and then decreased, and the three activities were consistent with one another. The results showed that when dealt with drought stresses, *B. sinica* var. *parvifolia* could improve its adaptability to adversity by adjusting its physiological characteristics, and showed strong drought resistance. However, severe salt stress could damage the normal growth, and the salt-drought interaction intensified the damage of salt stress on photosynthesis. On the other hand, through the interaction of salt and drought, *B. sinica* var. *parvifolia* seedlings could prevent salt stress by adjusting antioxidant enzyme activity and osmotic regulatory substances under drought stress, showing cross-adaptation.

收稿日期:2023-09-29;修回日期:2023-10-11

作者简介:彭景勃(1997-),女,硕士研究生。研究方向为森林培育。E-mail:1172573705@qq.com

\* 通信作者:叶冬梅(1971-),女,博士,副教授,硕士生导师。主要研究方向为森林培育理论与技术。E-mail:yiedongmei19@sina.com

**Key words:** *Buxus sinica* var. *parvifolia*; Interactive stress of salt and drought; Photosynthesis; Physiological response; Adaptation mechanism

自然界中的盐碱土壤成分非常复杂,主要成分包括  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaHCO}_3$  等盐类。干旱经常发生在盐碱地区,生长于盐碱干旱地区的树木会同时受到盐分和干旱 2 方面的胁迫,二者相互作用,对植物各种生理代谢活动产生很大影响。

小叶黄杨(*Buxus sinica* var. *parvifolia* M. Cheng)是一种抗逆性强的常绿灌木或小乔木植物。小叶黄杨具有一定的抗污能力,同时有耐干旱贫瘠,适应性强的优点,属于高抗性植物。小叶黄杨是常用的观叶树种,在景观方面发挥着重要作用。随着深入研究发现小叶黄杨具有较强的抗旱性,其适应机制主要包括通过调节气孔导度、优化叶肉细胞叶绿体结构等方式来提高光合作用效率,同时通过积累渗透调节物质和增加抗氧化酶活性等方式来减轻胁迫对植物的伤害<sup>[1-9]</sup>,这些机制使得小叶黄杨能够在盐旱交叉胁迫下保持较好的生长状态。而耐盐性方面的研究较少<sup>[3,10]</sup>,也很少关注两者之间的交互作用。因此,研究盐旱交互胁迫可以提供对植物响应复杂环境压力机制的深入理解,有助于推动植物生理学、生态学的发展。为了探究盐旱交互胁迫下小叶黄杨的适应机制,通过实验室模拟试验,保证了试验条件的一致性,使用先进科学仪器与技术进行更为深入的小叶黄杨抗逆性研究,这对在干旱、半干旱盐碱地区生态保护和恢复工作有重要理论与实践意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为 1 年生小叶黄杨扦插苗,共 720 株,每组处理设置重复 3 次。试验地点设在内蒙古农业大学林学院林木培育实验室。

### 1.2 试验方法

采用聚乙二醇(PEG-6000)溶液模拟干旱胁迫,盐渍化的土壤中除了含中性盐  $\text{NaCl}$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  外,还含有相当数量的碱性盐  $\text{NaHCO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,模拟盐渍化土壤设置碱性盐溶液由碱性盐( $\text{NaHCO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )与中性盐( $\text{NaCl}$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )按照 1:9 的标准比例进行物质质量配制而成<sup>[11-12]</sup>,以 1/2 Hoagland 溶液为对照(CK)。选择健康、规格基本一致的小叶黄杨幼苗(高度为 5—10 cm),并用缓慢冲洗的方式

清洁。然后将这些幼苗转移到装有 1/2 Hoagland 溶液的容器中,接着将其放置在光照培养箱中培育。光照培养箱的设定为:光暗周期为 12 h /12 h,温度约为 25.8 °C/24.6 °C,光强约为 4000 lx /0 lx,在上述条件下进行培育 13 d。

待幼苗恢复正常生长,将小叶黄杨幼苗移入合适的玻璃容器(5 株/瓶)中。根据预试验,试验设置 16 个处理,其中有 1 个对照,3 个干旱胁迫处理为  $T_1$ (5%PEG-6000+1/2 Hoagland 溶液)和  $T_2$ (15%PEG-6000+1/2 Hoagland 溶液), $T_3$ (20%PEG-6000+1/2 Hoagland 溶液)。3 个盐分胁迫处理为 B(50 mmol/L 盐溶液+1/2 Hoagland 溶液),C(125 mmol/L 盐溶液+1/2 Hoagland 溶液),D(200 mmol/L 盐溶液+1/2 Hoagland 溶液),B, C, D 的 pH 值分别为 8.34,8.38,8.45。9 个盐旱交互胁迫为 B, C, D 和  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  随机组合。

将胁迫处理 15 d,所得的样品材料进行液氮冷冻处理,随后放置在 -80 °C 冰箱中,以便进行下一步生理生化指标的测定。试验处理期间,为保持试验中处理浓度和含氧量的恒定,每天上午 9:00 至 10:00 需要更换水培溶液。

### 1.3 测定指标及方法

分别从每株小叶黄杨的相同部位摘取正常生长的成熟叶片,用于测定生理生化指标。生理指标都采用史树德等人所著植物生理学实验指导<sup>[13]</sup>中涉及的方法,主要测定指标有:光合指标(光合速率、蒸腾速率)、叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白质、游离脯氨酸、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)。

### 1.4 数据处理

Microsoft Excel 2016 作图,SPSS 26.0 软件进行数据统计分析。各项生理指标测定重复 3 次后取平均值。每个处理之间的显著性差异水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐旱胁迫对小叶黄杨叶片光合作用的影响

2.1.1 气体交换参数 由图 1,2 可看出,在盐、旱以及盐旱交互胁迫下,小叶黄杨叶片光合速率( $P_n$ )和蒸腾速率( $Tr$ )的变化基本一致。随着胁迫程度

加剧,各胁迫处理的  $P_n$  和  $T_r$  均呈下降趋势。干旱胁迫下,光合速率下降速度明显高于盐胁迫,盐旱交互胁迫对光合速率影响最小,且与对照相比,各处理均差异极显著 ( $P<0.01$ )。当盐胁迫保持不变时,随着干旱胁迫的增加,小叶黄杨幼苗叶片的  $P_n$  和  $T_r$  逐渐降低;在轻度干旱胁迫下,略有下降,而在中度至重度干旱胁迫下,  $P_n$  和  $T_r$  显著降低,表明干旱胁迫对光合作用的影响逐渐加剧。在较低的盐浓度下,光合速率仍能保持相对稳定,而在较高的盐浓度下,蒸腾速率的下降可能更为明显。

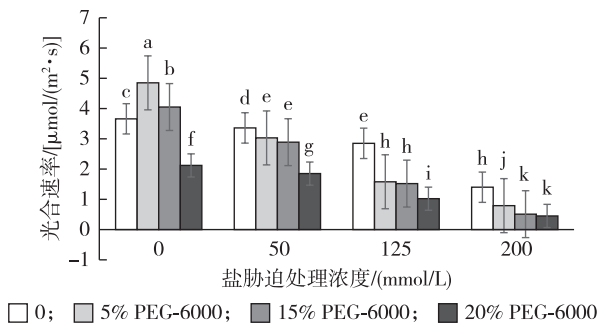


图1 盐旱胁迫下小叶黄杨幼苗叶片光合速率的变化

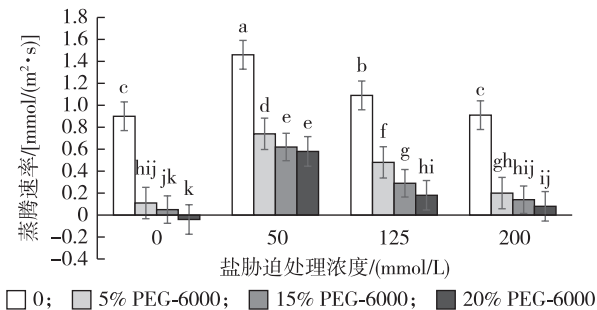


图2 盐旱胁迫下小叶黄杨幼苗叶片蒸腾速率的变化

**2.1.2 叶绿素含量** 由图3可知,在单一的盐分胁迫下,随着胁迫程度的加重,小叶黄杨幼苗叶绿素含量总体上出现逐渐降低的趋势,与对照差异不显著 ( $P>0.05$ ),这与气体交换参数逐渐降低的趋势相对应。在干旱胁迫下,小叶黄杨叶片叶绿素含量随着 PEG 质量分数的增加呈现先上升后下降的趋势,在中度干旱时含量最高,且差异显著 ( $P<0.05$ )。在盐旱交互胁迫下,叶绿素含量只在轻度干旱、中度干旱与低盐时有所上升,与对照组相比分别提高了 64.9% 和 73.4%;随着盐胁迫程度加深,主导因素由干旱转为盐,叶绿素含量与对照组相比逐渐下降。

## 2.2 盐旱胁迫对小叶黄杨抗氧化酶活性的影响

**2.2.1 超氧化物歧化酶(SOD)活性** 如图4所示,

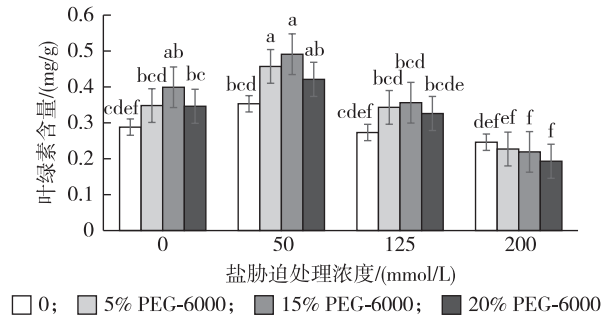


图3 盐旱胁迫下小叶黄杨幼苗叶片叶绿素含量的变化

在单一盐或干旱胁迫下,只有重度干旱胁迫和中度盐胁迫时 SOD 活性显著增加,且不同胁迫下变化趋势不尽相同。在轻度和重度盐胁迫条件下,小叶黄杨幼苗的叶片 SOD 活性随着干旱胁迫程度增加呈现逐渐降低;在中度盐胁迫时则会随着 PEG 质量分数增加出现先增强后降低的趋势。在中度和重度干旱胁迫下,随着盐溶液浓度的进一步增加,叶片 SOD 活性呈现出逐渐升高的趋势,这表明适度的盐旱交互胁迫能够增强植物内部的 SOD 活性,提升植物的抗逆能力。

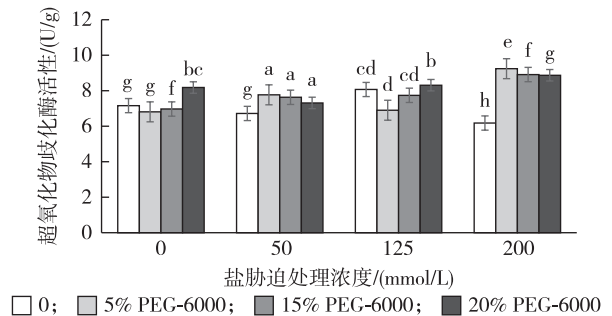


图4 盐旱胁迫下小叶黄杨幼苗叶片超氧化物歧化酶活性的变化

**2.2.2 过氧化氢酶(CAT)活性** 根据图5的结果显示,在干旱胁迫下,小叶黄杨幼苗 CAT 活性随着 PEG 质量分数的升高逐渐减少,在轻度干旱胁迫处理下与对照相比,显著增加了 14.99% ( $P<0.05$ )。在盐胁迫下,小叶黄杨幼苗 CAT 活性随着盐浓度的增加而逐渐降低,且在中度和重度盐胁迫下显著低于对照 ( $P<0.05$ )。所有水平的干旱胁迫处理并不能抑制小叶黄杨 CAT 活性,而盐胁迫处理下 CAT 活性已经出现下降的趋势,说明在单一盐或者干旱胁迫下,小叶黄杨幼苗的抗旱性要优于耐盐能力。盐旱交互胁迫时,在轻度盐胁迫与不同程度干旱交互胁迫下,小叶黄杨叶片 CAT 活性,随着胁迫程度的加重,呈现先增后减的趋势。在中度、重度盐胁迫

迫与不同干旱交互胁迫下,小叶黄杨叶片 CAT 活性呈现逐渐降低的趋势。此时,盐旱交互胁迫下盐胁迫占主导地位。

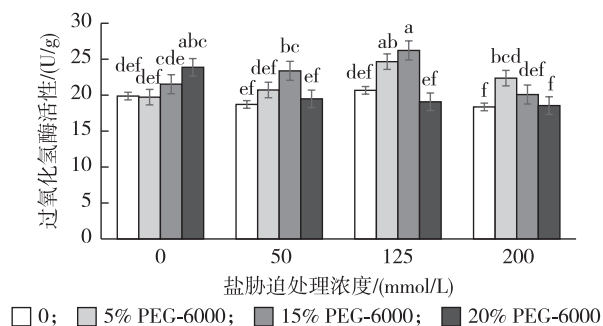


图5 盐旱胁迫下小叶黄杨幼苗叶片过氧化氢酶活性的变化

**2.2.3 过氧化物酶(POD)活性** 过氧化物酶能催化  $H_2O_2$  氧化,从而清除  $H_2O_2$  对细胞生物功能分子的破坏作用。根据图6,在单一盐胁迫下,小叶黄杨幼苗叶片的 POD 活性呈现随盐含量增加而逐渐降低的趋势,并在盐浓度为 200 mmol/L 处理下达到最小值,与对照之间存在极显著差异 ( $P < 0.01$ )。在干旱胁迫下,小叶黄杨幼苗叶片的 POD 活性随着 PEG-6000 质量分数的增加呈现先上升后降低的趋势,且各处理之间差异极显著 ( $P < 0.01$ )。在轻度干旱条件下,随着盐溶液浓度的增加,小叶黄杨幼苗叶片的 POD 活性先升高后显著降低;在重度干旱胁迫下,小叶黄杨幼苗叶片的 POD 活性随着盐溶液浓度的升高先升高后降低,并在盐溶液浓度为 200 mmol/L 时下降至最小值,这表明植物体内的 POD 活性受到抑制。

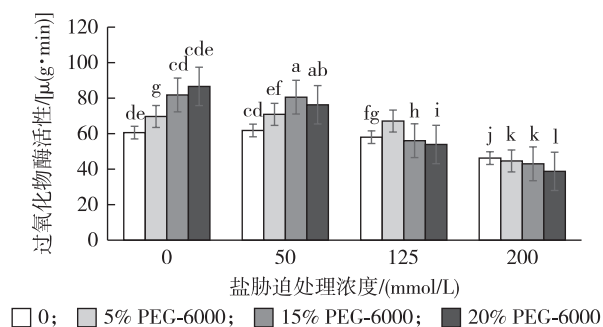


图6 盐旱胁迫下小叶黄杨幼苗叶片过氧化物酶活性的变化

## 2.3 盐旱胁迫对小叶黄杨幼苗渗透调节作用的影响

**2.3.1 可溶性蛋白质含量** 当植物处于缺水的环境中时,它们会主动积累可溶性蛋白以提高保水能力,从而抵抗干旱的影响。如图7所示,盐胁迫下小

叶黄杨幼苗叶片中的可溶性蛋白含量呈现出逐渐降低的趋势。在干旱胁迫下,小叶黄杨幼苗叶片中的可溶性蛋白含量随着 PEG-6000 质量分数的增加先上升后降低,与对照组相比差异显著 ( $P < 0.05$ ),说明单一的干旱胁迫对小叶黄杨可溶性蛋白的影响相对较小。当中度干旱胁迫时,不同盐溶液浓度下小叶黄杨幼苗叶片中的可溶性蛋白含量随着盐溶液浓度的增加呈现出上升的趋势,在盐浓度为 200 mmol/L 时上升至最高点,增加了 165.2%。这表明在胁迫加重的情况下,小叶黄杨通过合成新的蛋白质来进一步提高幼苗的抗逆性。

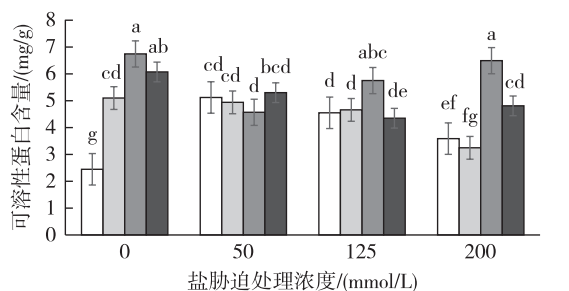


图7 盐旱胁迫下小叶黄杨幼苗叶片可溶性蛋白含量的变化

**2.3.2 可溶性糖含量** 可溶性糖作为一种小分子有机化合物,在植物细胞内扮演着重要角色,可以调节渗透压,当植物受到渗透胁迫时,它们会主动积累一些可溶性糖以降低渗透势,从而抵抗胁迫威胁<sup>[6]</sup>。如图8所示,轻度盐胁迫下,小叶黄杨幼苗叶片中的可溶性糖含量随着 PEG 质量分数增加逐渐上升;而中度、重度盐胁迫下可溶性糖含量则随着 PEG 质量分数的增加呈现出先上升后下降的趋势。干旱胁迫下,小叶黄杨幼苗叶片中的可溶性糖含量随着 PEG-6000 质量分数的增加逐渐上升,增幅分别为 20.8%,25.4%和 42.8%,与对照相比差异不显著 ( $P < 0.05$ )。当盐和干旱交互胁迫时,在轻度干旱胁迫下,小叶黄杨幼苗叶片中的可溶性糖含量随着盐溶液浓度的增加表现出逐渐上升的趋势,在盐浓度为 200 mmol/L 时上升至最高点,增幅为 77.5%,与对照差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

**2.3.3 游离脯氨酸含量** 如图9所示,在单一盐胁迫或干旱胁迫下,脯氨酸含量随着胁迫程度的加深呈现出明显的上升趋势,差异极显著 ( $P < 0.01$ ),且盐分对脯氨酸含量的影响大于干旱。在盐旱交互胁迫下,小叶黄杨幼苗叶片脯氨酸含量随着胁迫程度的加深也表现出显著的增加。在轻度和中度干



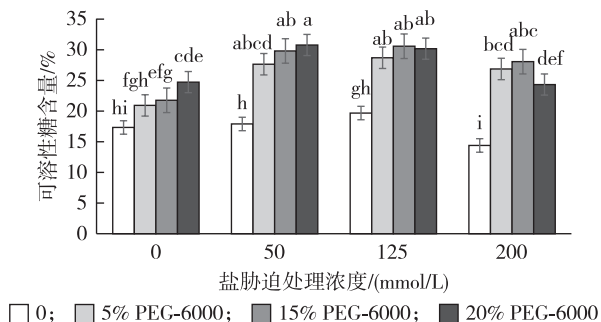


图 8 盐旱胁迫下小叶黄杨幼苗叶片可溶性糖含量的变化

旱胁迫下,脯氨酸含量在盐浓度为 125 mmol/L 时达到最高值,与对照组相比分别增加了 130.8% 和 99.1%。相较于重度干旱,随着盐含量的增加,小叶黄杨幼苗叶片脯氨酸含量逐渐降低,增加的幅度分别为 79.6%, 34.2%, 8.5%。这说明在干旱、高盐的环境下,小叶黄杨幼苗的细胞膜内外的渗透压失去稳定,同时代谢活动出现异常。

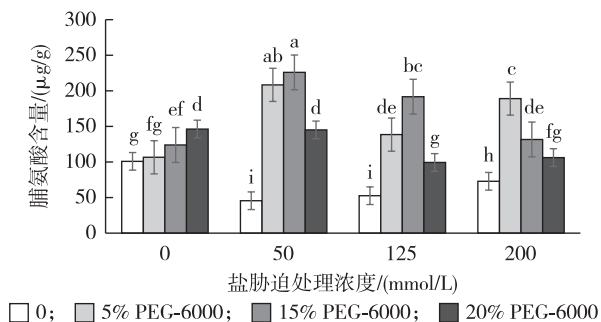


图 9 盐旱胁迫下小叶黄杨幼苗叶片游离脯氨酸含量的变化

### 3 讨论与结论

植物对盐胁迫的生理响应十分显著。本研究发现,在单一盐胁迫下,小叶黄杨气体交换参数、叶绿素含量、过氧化氢酶活性和可溶性蛋白质含量会随着盐溶液浓度增加而呈现逐渐降低的趋势;POD、CAT 活性则会随着盐溶液浓度增加而表现出先上升再降低的趋势;游离脯氨酸含量在盐胁迫下呈现出与可溶性蛋白质截然相反的趋势。脯氨酸是一种水溶性较大的氨基酸,具有出色的水合能力<sup>[14]</sup>,在干旱缺水的环境中,其功能是维持植物细胞膜内外的渗透压稳定以及正常的代谢活动。而试验中游离脯氨酸含量在单一盐胁迫下显著低于对照。植物体内脯氨酸的含量在某种程度上揭示了植物的抗逆性大小。当植物受到不利环境因素的胁迫时,会导游离脯氨酸的大量积累<sup>[15]</sup>。然而,当植物

面临盐胁迫时,由于外界渗透压降低,细胞会受到渗透胁迫的压力。为了维护细胞内的渗透压平衡,植物会大量积累渗透调节物质,以持续吸收环境中的水分,并防止水分流失<sup>[16-19]</sup>。小叶黄杨在盐胁迫条件下脯氨酸含量减少,与这一结论恰好相反,证实了小叶黄杨的耐盐性能并不是很好。

相关研究表明,超氧化物歧化酶(SOD)的主要作用是清除对机体有害的超氧阴离子自由基( $O_2^-$ ),以保护细胞膜系统免受损害<sup>[20]</sup>。同时,过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)也参与了这一过程,从而减少自由基对有机体的毒害<sup>[21]</sup>。在植物遭受逆境胁迫的情况下,抗氧化酶的活性会因树种、处理方式及处理时间的差异而呈现不同的趋势。有些情况下,抗氧化酶的活性会增加,以应对逆境胁迫;而有些情况下,其活性则可能会降低,这可能是由于植物在逆境下处于过度应激状态,导致抗氧化酶的活性降低。

在多重胁迫逆境条件下,植物渗透调节能力的提升可能是其交叉适应的一种生理机制<sup>[22-23]</sup>。植物对抗逆境能力的强弱与抗氧化酶的活性紧密相关。在多种逆境胁迫下,植物可能通过调整其抗氧化系统来实现交叉适应<sup>[24]</sup>。在本研究中,在干旱胁迫下,随着 PEG-6000 质量分数的增加,SOD,POD 和 CAT 活性表现为持续增加,有利于清除对机体有害的超氧阴离子自由基( $O_2^-$ ),以保护细胞膜系统免受损害。小叶黄杨幼苗在受到盐旱交互胁迫时,随着胁迫程度的增加,抗氧化酶 SOD,POD,CAT 活性呈先增后减趋势。说明小叶黄杨幼苗具有一定的抗逆性范围,植物体内的活性氧数量在受胁迫程度过大时急剧增加,超过植物所能自我保护的能力,可能导致 SOD,POD,CAT 活性下降。

综上所述,不论是盐胁迫还是干旱胁迫,都会对小叶黄杨幼苗的生理特性产生一定的影响。在经历干旱和盐单一或交互胁迫后,小叶黄杨幼苗的光合系统能迅速做出反应,维持正常的生长发育和代谢活动。小叶黄杨幼苗生理特性受盐旱交互胁迫的影响并非简单的 2 者相叠加,而是表现出了一种交互适应性的特征。适当的干旱预处理可以在一定程度上提高小叶黄杨幼苗在盐胁迫下的生长适应能力和耐受性。需要注意的是,本研究仅针对处理 15 d 的小叶黄杨实生幼苗进行了相关研究,因此这些研究结果只能代表初步的结论。对于小叶黄杨在不同环境条件下对盐旱环境的抗逆性,还需

要进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 张校宾.邯郸市六种木本园林植物抗旱性综合评价[D].邯郸:河北工程大学,2023.
- [2] 刘慧,张崇洋,刘世亮,等.干旱胁迫对屋顶绿化植物小叶黄杨叶片抗氧化特性的影响[J].林业与环境科学,2022,38(3):86-93.
- [3] 白玉娥,庞岩.小叶黄杨研究进展[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2021,42(1):114-120.
- [4] 梁行行,陈爽,赵冰,等.7种灌木幼苗耐淹性比较研究[J].西北林学院学报,2020,35(3):61-67.
- [5] 余莉琳.干旱矿区生态修复土壤改良及植物选择实验[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [6] 吴强,李倩,肖华,等.西南喀斯特地区小叶黄杨与白刺花光合特性研究[J].中国饲料,2019(9):22-28.
- [7] 谭雪红.5种灌木的生理特性及抗旱性的综合评价[J].东北林业大学学报,2013,41(2):29-34.
- [8] 周宇涵.小叶黄杨对干旱高温胁迫的生理生化响应[J].农村实用技术,2019(3):39-40.
- [9] 陈珺.四种观赏植物的活性氧代谢对干旱胁迫的响应[D].杭州:浙江农林大学,2013.
- [10] CASER M, SCARIOT V, GAINO W, et al. The effects of sodium chloride on the aesthetic value of *Buxus* spp. [J]. *European Journal of Horticultural Science*, 2013, 78(4): 153-159.
- [11] 金梦野,李小华,李昉泽,等.盐碱复合胁迫对水稻种子发芽的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(4):566-574.
- [12] 肖欣怡,李霞,史飞航,等.西北地区盐碱地治理方案探讨[J].农业与技术,2021,41(14):142-145.
- [13] 史树德,孙亚卿,魏磊.植物生理学实验指导[M].北京:中国林业出版社,2011.
- [14] 黄桂华,梁坤南,周再知,等.柚木无性系苗期抗旱生理评价与选择的研究[J].中南林业科技大学学报,2018,38(5):11-17.
- [15] 朱秀红,李职,蔡曜琦,等.白花泡桐幼苗对盐、干旱及其交互胁迫的生理响应[J].西部林业科学,2021,50(3):135-143.
- [16] 蒋宇杰.植物耐盐生理机制及耐盐性研究进展[J].农业灾害研究,2023,13(7):20-22.
- [17] 耿兴敏.植物逆境交叉胁迫适应性研究进展[J].林业科技开发,2014,28(4):14-18.
- [18] 齐琪,马书荣,徐维东.盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J].分子植物育种,2020,18(8):2741-2746.
- [19] 马玉花.植物耐盐分子机理研究进展[J].湖北农业科学,2013,52(2):255-257,261.
- [20] 赵春,陈佩林,施国新. Cd(II)离子对石龙尾生理生化特性的影响[J].淮阴师范学院学报(自然科学版),2003,2(3):241-244.
- [21] 吴蕾.环境胁迫对西藏飞蝗成虫取食生长和抗氧化酶系统的影响[D].成都:四川农业大学,2010.
- [22] 华智锐,李小玲.盐旱交叉胁迫对小麦幼苗渗透调节能力的影响[J].山西农业科学,2017,45(2):166-171.
- [23] 李怀伟.早涝—低温交叉胁迫对小麦抗寒性的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2013.
- [24] 李洁,武杭菊,胡景江,等.干旱-低温交叉逆境下小麦渗透调节能力的变化与交叉适应的关系[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):149-153.
- [25] CHINI A, FONSECA S, CHICO J M, et al. The ZIM domain mediates homo- and heteromeric interactions between Arabidopsis JAZ proteins[J]. *The Plant Journal*, 2009, 59(1): 77-87.
- [26] 李新然,张智俊,喻珮瑶,等.毛竹 *SWEET* 基因家族的全基因组鉴定与分析[J].生物信息学,2020,18(04):236-246.
- [27] 潘婷,胡利伟,王中,等.烟草 *JAZ1* 基因的克隆和功能分析[J].烟草科技,2018,51(12):15-22.
- [28] 杨冬静,孙厚俊,谢逸萍,等.甘薯等8种植物 *JAZ1* 基因的生物信息学分析[J].江苏农业学报,2019,35(5):1021-1027.
- [29] 曹宏哲,李薇,庞茜,等.转录因子 *ZmMYC7* 与拟南芥 *JAZ* 家族基因的互作研究[J].河北农业大学学报,2019,42(6):77-82.
- [30] KAZAN K, MANNERS J M. JAZ repressors and the orchestration of phytohormone crosstalk[J]. *Trends in Plant Science*, 2012, 17(1): 22-31.
- [31] CHENG H, SONG S, XIAO L, et al. Gibberellin acts through jasmonate to control the expression of *MYB21*, *MYB24*, and *MYB57* to promote stamen filament growth in *Arabidopsis* [J]. *PLoS Genetics*, 2009, 5(3): e1000440.