

## 土壤盐胁迫对日本荚蒾生理生化特性的影响

徐千瑞<sup>1</sup>, 周星怡<sup>2</sup>, 李贺鹏<sup>3</sup>, 岳春雷<sup>3</sup>

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 318020; 2. 南京农业大学 生命科学学院, 江苏 南京 210095;  
3. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**为评价日本荚蒾 *Viburnum japonicum* 的耐盐性,以日本荚蒾 3 年生实生苗为试验材料进行盆栽盐胁迫试验,设置土壤含盐量分别为 0 (CK)、0.15%、0.30%、0.45%、0.60% 和 0.75% 共 6 个浓度的土壤盐分处理,分别在盐胁迫 10 d、20 d、30 d、40 d 时测定植株叶片的丙二醛 (MDA) 含量、抗氧化酶活性及渗透调节物质含量等生理生化指标。结果表明,植株叶片的 MDA 含量、可溶性蛋白含量及可溶性糖含量与土壤含盐量成正比;随着盐胁迫时间的延长,0.15% 土壤含盐量处理组植株叶片的超氧化物歧化酶 (SOD) 活性呈上升趋势,CK 与其他处理组植株叶片的 SOD 活性均呈先上升后下降趋势;除 0.60% 及 0.75% 含盐量处理组外,其余各处理组植株叶片的过氧化物酶 (POD) 活性均高于 CK 的,但随着胁迫的持续进行,0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性持续下降,CK、0.15% 及 0.30% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性在上升一段时间后呈下降趋势。综上所述,日本荚蒾对轻度土壤盐胁迫 (0.15% 及以下土壤含盐量) 具有一定的抵抗能力和适应能力,但在 0.30% 及以上含盐量土壤条件下无法长期存活。以上研究结果为极小种群植物日本荚蒾的保护、迁地引种及园林推广提供了科学依据。

**关键词:** 日本荚蒾; 盐胁迫; 耐盐性; 生理生化特性

中图分类号: S794.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776 (2022) 01-0024-07

## Effect of Different Salt Stress on Physiological and Biochemical Properties of *Viburnum japonicum*

XU Qian-rui<sup>1</sup>, ZHOU Xing-yi<sup>2</sup>, LI He-peng<sup>3</sup>, YUE Chun-lei<sup>3</sup>

(1. School of Forestry and Bio-technology, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. School of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** On June 2020, 3-year *Viburnum japonicum* seedlings were potted for experiment. On July 13<sup>th</sup> 2020, potted seedlings were treated by 0 (CK), 0.15%, 0.30%, 0.45%, 0.60% and 0.75% NaCl solution. Physiochemical indicators were measured 10 d, 20 d, 30 d, 40 d later. The results showed that the content of MDA, soluble protein and soluble sugar of the plant leaves increased with soil salt content. With the duration of salt stress, the activity of superoxide dismutase (SOD) of seedlings of treatment with 0.15% showed an upward trend, while that of CK and the other treatments increased first and then decreased. Peroxidase (POD) activity of treated seedlings was higher than that of CK, except that treated by 0.60% and 0.75%. But with the duration of stress, POD activity of the treatment with 0.45% continued to decrease, while that of CK and with 0.15% and 0.30% increased first and decreased later. The experiment demonstrated that *V. japonicum* had resistance and adaptability to soil salt content of 0.15% and below, but cannot survive for a long time under salt content of 0.30% and above.

**Key words:** *Viburnum japonicum*; salt stress; salt tolerance; physiological and biochemical property

收稿日期: 2021-09-01; 修回日期: 2021-11-03

基金项目: 浙江省省院合作项目 (2015SY01); 浙江省院所专项项目 (2016F30011)

作者简介: 徐千瑞, 硕士研究生, 从事植物生态研究; E-mail: 100540507@qq.com。通信作者: 岳春雷, 博士, 研究员, 从事植物生态研究; E-mail: 1049876924@qq.com。

盐胁迫指植物的生长环境中存在过量钠离子和氯离子<sup>[1]</sup>, 影响植物的生长及分布<sup>[2]</sup>。全世界受盐胁迫影响的土壤非常多, 已有超过 20% 的农林耕地受到盐分的危害, 并且数量仍在不断增加<sup>[3]</sup>, 预计到 21 世纪中叶, 将有半数耕地出现土壤盐渍化现象<sup>[4]</sup>, 这会对土地利用、植株生存及作物生产造成严重威胁<sup>[5]</sup>。土壤盐渍化以及盐渍化土地资源该如何利用, 成为了一个世界性难题<sup>[6]</sup>。首先, 土壤盐胁迫会通过渗透胁迫提高植物细胞的渗透势, 使植物体无法正常吸收水分, 这种危害会长期存在; 其次, 由离子胁迫造成的离子失调使植物缺少生长发育所必需的营养元素; 最后, 产生氧化胁迫, 即加深膜脂过氧化程度, 破坏细胞结构以及紊乱代谢<sup>[7-10]</sup>。为了抵抗土壤盐胁迫造成的伤害, 植物自身会表现出一系列的生理及生态适应性变化, 以调节叶片内离子和水分的平衡, 维持正常的生理活动<sup>[2]</sup>。因此, 研究植物在盐胁迫环境中生理生化指标的变化, 对于了解植物的耐盐机理, 评价植物的耐盐性以及筛选耐盐植物进行盐渍化土地造林具有重要意义。

日本荚蒾 *Viburnum japonicum* 为常绿乔灌木, 主要分布在环太平洋西部海岛, 在我国仅生长于台湾省的北部海岸、浙江省台州市以及舟山市的部分海岛, 分布范围狭窄, 数量稀少, 需要重点保护<sup>[11-14]</sup>。日本荚蒾叶片革质深绿, 白花簇状, 熟果鲜红, 观赏性好, 园林价值高<sup>[15]</sup>。近年来, 对日本荚蒾的研究主要集中在抗旱性<sup>[16]</sup>、耐荫性<sup>[17]</sup>、扦插繁殖<sup>[18]</sup>、遗传多样性<sup>[19]</sup>等方面。李瑞姣等<sup>[20]</sup>发现日本荚蒾幼苗对轻中度干旱胁迫具有一定的抵抗能力, 并且在遮阴条件下能正常生长, 具有耐荫性; 王宝党等<sup>[18]</sup>认为混合基质更适宜日本荚蒾插穗生根。与其它植物相比, 对日本荚蒾的研究进展较为缓慢<sup>[21]</sup>, 且目前并没有关于此濒危海岛植物耐盐性的相关研究。本试验选用 3 年生日本荚蒾实生苗, 研究日本荚蒾生理生化指标对土壤盐胁迫的响应, 分析该植物的耐盐机理, 探讨其对土壤盐胁迫的抵抗能力, 有利于更加充分地了解日本荚蒾的濒危原因, 同时为该植物的种群恢复、迁地引种以及推广应用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验选用浙江省临海市林业技术推广总站提供的日本荚蒾 3 年生实生苗, 苗高约为 50 cm, 冠幅约为 40 cm。植株生长旺盛、长势基本一致。试验所用苗木的栽培方法为盆栽法, 选择下口直径为 16 cm、上口直径为 21.3 cm、高为 20 cm 的塑料盆钵, 每盆内装入挖取于苗圃的混匀熟土 (有机质含量为 27.43 g·kg<sup>-1</sup>, 有效氮含量为 0.175 g·kg<sup>-1</sup>, 有效磷含量为 70.50 g·kg<sup>-1</sup>, 速效钾含量为 20.57 g·kg<sup>-1</sup>) 5 kg, 每盆栽入 1 株日本荚蒾幼苗。

### 1.2 试验设计

2020 年 6 月, 将日本荚蒾容器苗移入浙江省林业科学研究院大棚内缓苗, 期间进行正常养护。日本荚蒾适应生长 1 个月后, 挑选长势基本一致的植株进行土壤盐胁迫处理。为防止盐分渗漏, 每盆植物的下方垫有托盘。试验共设置 6 个土壤盐分梯度, 于 2020 年 7 月 13 日一次性浇入不同浓度的 NaCl 溶液, 使土壤含盐量分别为 0 (CK)、0.15%、0.30%、0.45%、0.60%、0.75%。每个处理重复 4 株容器苗。植株经过土壤盐胁迫处理之后, 于 2020 年 7 月 23 日、8 月 2 日、8 月 12 日及 8 月 22 日分别进行一次采样及各项指标的测定。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 生理生化指标的测定 每个处理随机选择 3 株日本荚蒾容器苗, 每株选取正常枝条的中上部成熟叶片 2~3 片, 将采得的叶片立即编号并用液氮进行冷冻处理, 带回实验室后保存于 -80℃ 的冰箱中备用。

丙二醛 (MDA) 含量测定采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法; 可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝染色法; 可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定采用氮蓝四唑 (NBT) 法; 过氧化物酶 (POD) 活性测定采用愈创木酚法。

1.3.2 数据分析 采用 SPSS 23.0 软件对试验数据进行统计分析, 运用 LSD 法进行显著性分析和多重比较, 使用 Origin 2018 绘制图形。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤盐胁迫对日本荚蒾叶片 MDA 含量的影响

由图 1 可知,在土壤盐胁迫下,日本荚蒾叶片的 MDA 含量均高于 CK 的,且在胁迫的同一阶段,叶片的 MDA 含量随着土壤含盐量的升高持续上升。盐胁迫初期(10 d),在 0.60% 和 0.75% 土壤含盐量环境中的植株叶片的 MDA 含量显著高于前 4 组处理的( $P<0.05$ );盐胁迫 20 d 时,0.30% 和 0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 MDA 含量显著增加( $P<0.05$ ),与同浓度盐胁迫 10 d 时相比分别增加了 54.8% 和 41.2%,0.60% 和 0.75% 土壤含盐量处理组的植株死亡;盐胁迫 30 d 后,0.30% 和 0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 MDA 含量继续增大,较同浓度盐胁迫 20 d 时分别增加了 31.3% 与 45.4%;盐胁迫 40 d 时,0.15% 土壤含盐量处理组植株叶片的 MDA 含量增量较大,与 CK 产生显著性差异( $P<0.05$ ),而 0.30% 和 0.45% 土壤含盐量处理组的植株死亡。

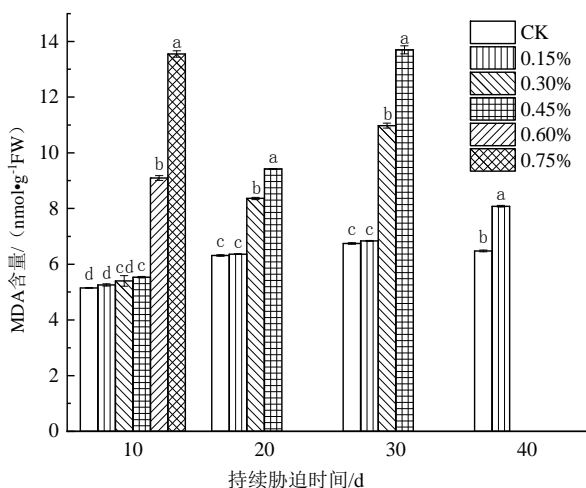
### 2.2 土壤盐胁迫对日本荚蒾叶片渗透调节物质含量的影响

由图 2 可知,在土壤盐胁迫处理下,各处理组日本荚蒾叶片的可溶性蛋白含量均高于 CK 的,且在胁迫的同一阶段,植物叶片细胞内的可溶性蛋白含量与土壤含盐量成正比。0.15% 土壤含盐量处理组植株叶片的可溶性蛋白含量从盐胁迫 30 d 开始与 CK 产生较大差异( $P<0.05$ ),而其他处理组植株叶片的可溶性蛋白含量在盐胁迫初期(10 d)就显著高于 CK 的( $P<0.05$ )。

由图 3 可知,日本荚蒾叶片可溶性糖含量的变化情况与可溶性蛋白含量的变化类似,随着土壤含盐量的升高持续上升,但在盐胁迫 10 d 时,0.30% 土壤含盐量处理组植株叶片的可溶性糖含量略低于 0.15% 土壤含盐量处理组的。

### 2.3 土壤盐胁迫对日本荚蒾叶片抗氧化酶活性的影响

SOD 和 POD 是植物叶片细胞内重要的抗氧化酶,可反映出植物对胁迫环境的响应。由图 4 可以得知,在盐胁迫的 10 d 和 20 d 时,日本荚蒾叶片的 SOD 活性与土壤含盐量及胁迫持续时间成正比;在盐胁迫 30 d 时,0.30% 和 0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 SOD 活性较盐胁迫 20 d 时下降,其中,0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 SOD 活性降至 CK 之下,比 CK 的低 7.9%;盐胁迫 40 d 时,0.15% 土壤含盐量处理组植株



注:不同小写字母表示相同胁迫时间内不同处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

图 1 不同浓度土壤盐分处理下日本荚蒾叶片MDA含量的变化

Figure 1 MDA content in leaves of *V. japonicum* under different salt treatments

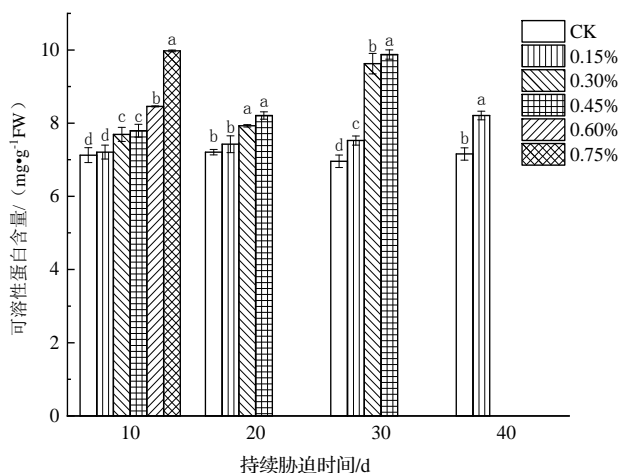


图 2 不同浓度土壤盐分处理下日本荚蒾叶片可溶性蛋白含量的变化

Figure 2 Soluble protein content in leaves of *V. japonicum* under different salt treatments

叶片的 SOD 活性大幅上升, 与 CK 差异显著 ( $P<0.05$ )。

由图 5 可知, 盐胁迫 10 d 时, 除 0.60% 及 0.75% 土壤含盐量处理组外, 植株叶片的 POD 活性随土壤含盐量的升高而上升, 而 0.60% 及 0.75% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性均低于 CK 的, 且两组中土壤含盐量越高的处理组植株叶片的 POD 活性越低; 盐胁迫持续 20 d 时, 0.15% 及 0.30% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性继续上升, 0.30% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性达到了最大值, 而 0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性较盐胁迫 10 d 时下降, 0.60% 及 0.75% 土壤含盐量处理组植株死亡; 盐胁迫 30 d 时, 0.15% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性达到了最大值, 0.30% 及 0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性较盐胁迫 20 d 时下降, 0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性降至 CK 之下; 当盐胁迫持续 40 d 时, 0.15% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性下降, 但仍高于 CK 的, 其余处理组植株死亡。

综上所述, 随着土壤盐胁迫的持续进行, 日本荚蒾叶片的 SOD 活性在轻度胁迫 (0.15% 土壤含盐量) 下持续上升, 在中度胁迫 (0.30% 土壤含盐量) 下先上升后下降; 0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性持续下降, CK、0.15% 及 0.30% 土壤含盐量处理组植株叶片的 POD 活性呈先上升后下降的趋势。

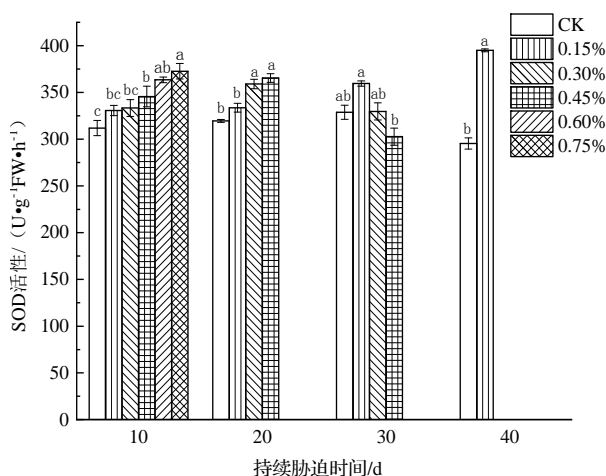


图 4 不同浓度土壤盐分处理下日本荚蒾叶片 SOD 活性的变化

Figure 4 SOD activity in leaves of *V. japonicum* under different salt treatments

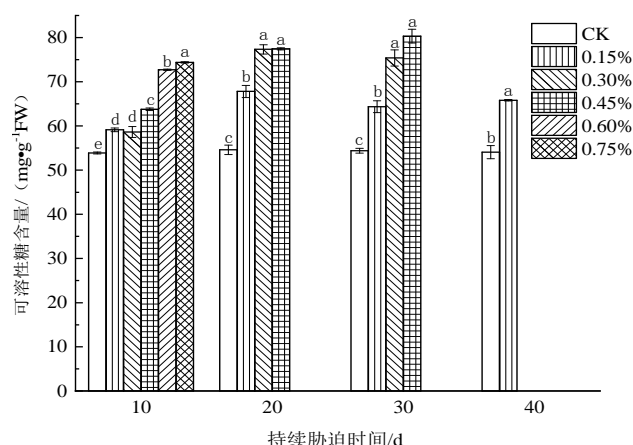


图 3 不同浓度土壤盐分处理下日本荚蒾叶片可溶性糖含量的变化

Figure 3 Soluble sugar content in leaves of *V. japonicum* under different salt treatments

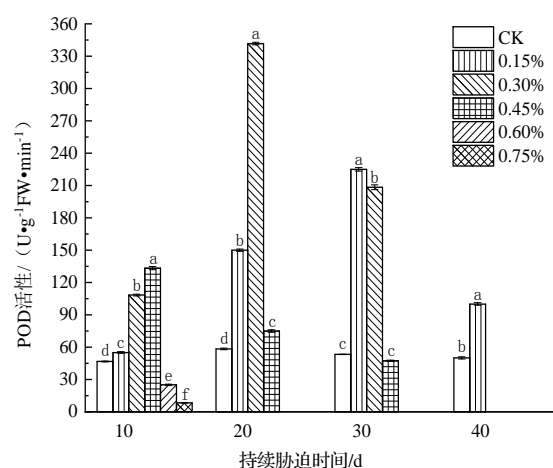


图 5 不同浓度土壤盐分处理下日本荚蒾叶片 POD 活性的变化

Figure 5 POD activity in leaves of *V. japonicum* under different salt treatments

## 2.4 土壤盐胁迫下日本荚蒾叶片各生理指标相关性分析

由表 1 可以得知, 日本荚蒾在土壤盐胁迫下, 叶片中的 MDA 含量与可溶性蛋白及可溶性糖含量具有极显著正相关关系 ( $P<0.01$ ), 与 POD 活性具有负相关关系, 但相关性不显著。可溶性蛋白含量与可溶性糖含量呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与 POD 活性呈负相关, 但相关性不显著。

表 1 盐胁迫下日本荚蒾叶片各生理生化指标的相关系数  
Table 1 Correlation coefficients of physiological and biochemical index in *V. japonicum* leaves under salt stress

生理生化指标	MDA 含量	可溶性蛋白含量	可溶性糖含量	SOD 活性	POD 活性
MDA 含量	1				
可溶性蛋白含量	0.936**	1			
可溶性糖含量	0.800**	0.811**	1		
SOD 活性	0.200	0.235	0.414	1	
POD 活性	- 0.099	- 0.026	0.299	0.216	1

注：“\*”表示显著相关（ $P<0.05$ ），“\*\*”表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

土壤盐胁迫会对植物造成许多不利影响，使植物的生长状况、形态特征、生理指标等发生较大变化<sup>[22]</sup>。在本试验中，没有盐胁迫的日本荚蒾植株生长旺盛，长势较好，0.15%土壤含盐量处理组的植株在胁迫期间几乎没有盐害症状，而在 0.30%及以上土壤含盐量环境中，随着胁迫时间的增加植株陆续死亡。以上结果说明日本荚蒾植株在 0.15%及以下含盐量土壤环境中能够正常生长，而在 0.30%及以上含盐量土壤环境中无法长期存活。

植物在胁迫环境中由于膜脂过氧化作用产生 MDA，MDA 的形成代表着植物细胞膜遭到了破坏<sup>[23]</sup>。研究表明，植物叶片中 MDA 含量的变化规律与该植物的耐盐能力有关：在土壤盐胁迫过程中，植物叶片细胞内的 MDA 含量越高，说明该植物抵抗盐胁迫的能力越弱<sup>[24]</sup>。本试验中，在不同程度的土壤盐胁迫下，各处理组日本荚蒾叶片的 MDA 含量均高于 CK 的。盐胁迫 10 d 时，0.15% ~ 0.45% 土壤含盐量环境中植株叶片的 MDA 含量虽高于 CK 的但二者间的差距不显著（ $P>0.05$ ），可以认为试验初期该盐胁迫浓度范围中日本荚蒾叶片的细胞膜几乎没有遭到破坏，而 0.60% 及 0.75% 土壤含盐量处理组植株叶片的 MDA 含量明显高于 CK 的，说明这两组处理的植株叶片在试验初期膜脂过氧化程度就很高，细胞膜遭到了严重破坏；0.30% 及 0.45% 土壤含盐量处理组在盐胁迫 10 d 以后植株叶片的 MDA 含量持续大幅度上升，说明这两组植株在土壤盐胁迫的过程中细胞膜的破坏程度不断加深，直至死亡；0.15% 土壤含盐量处理组植株叶片的 MDA 含量与 CK 在盐胁迫 40 d 之前均无显著性差异（ $P>0.05$ ），直至盐胁迫 40 d 时大幅增加，出现胁迫症状。而余建炜等<sup>[25]</sup>在研究沼泽小叶桦 *Betula microphylla* var. *paludosa* 时发现，该植物在土壤盐胁迫处理下叶片的 MDA 含量总体上低于 CK 的，这与本试验结果有差异。王斌等<sup>[26]</sup>发现，沼泽小叶桦的野生种主要生长于盐碱沼泽地中，耐盐能力较强，而日本荚蒾在 0.30% 及以上土壤含盐量环境中胁迫反应明显，这进一步体现出日本荚蒾的耐盐性不强。

土壤盐胁迫会提高植物的渗透势，植物通过合成渗透调节物质使植物能够从外界汲取水分<sup>[27]</sup>。在土壤盐胁迫环境中，可溶性蛋白和可溶性糖作为渗透调节物质会提高植物的耐盐能力<sup>[28]</sup>，同时，可促进植物体内有机物的合成，增强细胞膜的稳定性，也可对酶类产生保护作用<sup>[29]</sup>。在本试验中，植株叶片的可溶性糖及可溶性蛋白含量与 MDA 含量均具有极显著正相关性（ $P<0.01$ ）。随着土壤盐浓度的升高和胁迫的持续进行，植株叶片的 MDA 含量攀升，细胞膜遭到严重破坏。为了提高植物叶片的渗透调节能力以降低胁迫对细胞膜的破坏程度，日本荚蒾细胞中的可溶性蛋白含量及可溶性糖含量随着 MDA 含量的升高不断上升，这说明日本荚蒾通过提高体内渗透调节物质的含量降低细胞的渗透势，缓解细胞膜的膜脂过氧化程度，进而减轻土壤盐胁迫对植物造成的危害。本试验对日本荚蒾渗透调节物质的研究结果与盐胁迫下白刺 *Nitraria tangutorum*<sup>[30]</sup>的研究结果一致，可溶性蛋白与可溶性糖的含量都与土壤含盐量成正比，说明植物在受到盐胁迫时会通过合成渗透调节物质降低胁迫对自身造成的伤害。

在受到土壤盐胁迫时，植物会通过提高细胞内抗氧化酶活性清除多余活性氧，减少活性氧积累对植物造成的伤害<sup>[24]</sup>。SOD 和 POD 可通过协同作用降低细胞内的活性氧数量。SOD 将活性氧转化为  $O_2$  和  $H_2O_2$ ，POD 清除由 SOD 产生的  $H_2O_2$ <sup>[31]</sup>。在正常环境中，植物体内的活性氧数量会保持相对平衡，而当植物处于胁迫环境中其活性氧的清除数量要低于所产生数量，随着活性氧积累数量的增加会促使植物启动自我保护机制，即通过提

高抗氧化酶活性清除体内多余的活性氧<sup>[32]</sup>。在本试验中, 随着土壤盐胁迫的持续进行, 日本荚蒾叶片的 SOD 活性与 POD 活性总体上呈现出先上升后下降的趋势, 但不同浓度盐分处理下的植株抗氧化酶活性的变化情况存在较大差异。本研究中, 日本荚蒾在受到土壤盐胁迫处理后, 0.15% 土壤含盐量处理组植株叶片的 SOD 活性持续上升, POD 活性上升至盐胁迫 40 d 时开始下降, 体现出日本荚蒾在土壤含盐量为 0.15% 的胁迫环境中, 会通过提高抗氧化酶活性抵抗由胁迫造成的伤害, 说明日本荚蒾在轻度土壤盐胁迫 (0.15% 及以下土壤含盐量) 中耐盐性较高。彭立新等<sup>[33]</sup>发现, 在盐胁迫环境中沙枣 *Elaeagnus angustifolia* 幼苗的抗氧化酶活性先上升后下降, 由此提出了植物细胞只能承受一定范围内的活性氧积累, 一旦超出这个范围会造成膜脂过氧化程度加深, 细胞结构被破坏, 进而降低植物耐盐能力的结论。在本试验中, 随着胁迫的持续进行, 0.30% 土壤含盐量处理组植株叶片的 SOD、POD 活性及 0.45% 土壤含盐量处理组植株叶片的 SOD 活性也表现出先上升后下降的趋势, 说明随着胁迫的持续进行, 日本荚蒾在中度土壤盐胁迫中受到的盐害会不断增强。0.60% 及 0.75% 土壤含盐量处理组植株叶片的 SOD 活性高于 CK 的, 而 POD 活性显著低于 CK 的, 说明在重度土壤盐胁迫下植物体内 SOD 的作用高于 POD 的, 但细胞内部积累的活性氧数量超出了细胞可承受范围, 多余活性氧破坏了抗氧化酶系统, 导致植物对重度土壤盐胁迫的抵抗能力弱。

### 3.2 结论

综上所述, 日本荚蒾耐盐性弱, 在 0.15% 及以下土壤含盐量环境中, 会通过提高渗透调节物质含量及抗氧化酶活性降低细胞渗透势, 抵抗膜脂过氧化作用, 维持植物生理活动的正常进行。但当土壤含盐量达到 0.30% 及以上时, 日本荚蒾的生理调节系统遭到破坏, 活性氧不断积累, 膜脂过氧化程度持续加深, 最终导致植株死亡。因此, 在日本荚蒾的迁地保护和栽培过程中应选择土壤含盐量低的立地以保证植物正常生长。日本荚蒾喜温和多雨的海洋性气候, 自然分布仅限于海岛<sup>[21]</sup>, 而海岛土壤盐渍程度相对较高<sup>[34]</sup>, 因此, 推测日本荚蒾耐盐性低是致使该种群扩散困难的原因之一。

### 参考文献:

- [1] MUNNS R. Genes and salt tolerance: bringing them together [J]. *New Phytol*, 2005, 167 (3): 645–63.
- [2] 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 (08): 2741–6.
- [3] ZHANG X, SHI Z, TIAN Y, et al. Salt stress increases content and size of glutenin macropolymers in wheat grain[J]. *Food Chem*, 2016, 197 (APR.15PT.A): 516–21.
- [4] WANG W, VINOCUR B, ALTMAN A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. *Plant*, 2003, 218 (1): 1–14.
- [5] JUNCHENG W, LIRONG Y, BAOCHUN L, et al. Comparative proteomic analysis of cultured suspension cells of the halophyte *halogeton glomeratus* by iTRAQ provides insights into response mechanisms to salt stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7 (30): 110.
- [6] 刘云芬, 彭华, 王薇薇, 等. 植物耐盐性生理与分子机制研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (12): 30–6.
- [7] Flowers T J. Improving crop salt tolerance[J]. *J Exp Bot*, 2004, 55 (396): 13.
- [8] JIN LIN Z, HUAZHONG S. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance[J]. *Photosynth Res*, 2013, 115 (1): 1–22.
- [9] RANA M, MARK T. Mechanisms of salinity tolerance[J]. *Ann Rev Plant Biol*, 2008: 596, 51–81.
- [10] ZHU J K. Plant salt tolerance[J]. *Trends Plant Sci*, 2001, 6 (2): 66–71.
- [11] 裘宝林, 陈征海, 张晓华. 见于浙江的中国及中国大陆新记录植物[J]. *云南植物研究*, 1994 (03): 231–4.
- [12] 郭亮, 孙海平, 陈献志, 等. 浙江省台州市海岛植物区系的研究[J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 1999 (04): 28–32.
- [13] 朱弘, 葛斌杰, 叶喜阳. 浙江舟山岛福山岛种子植物区系初探[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32 (01): 150–5.
- [14] 高浩杰, 王国明, 郁庆君. 舟山市种子植物物种多样性及其分布特征[J]. *植物科学学报*, 2015, 33 (01): 61–71.
- [15] 李瑞姣, 岳春雷, 李贺鹏, 等. 干旱胁迫对日本荚蒾幼苗生理生化特性的影响[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33 (02): 56–61, 103.
- [16] 李瑞姣, 陈献志, 岳春雷, 等. 干旱胁迫对日本荚蒾幼苗光合生理特性的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38 (06): 2041–7.
- [17] 夏云飞, 李瑞姣, 杨在娟, 等. 光照强度对日本荚蒾幼苗生长和生理特性的影响[J]. *浙江林业科技*, 2020, 40 (03): 16–21.
- [18] 王宝党, 陈献志, 李贺鹏, 等. 日本荚蒾嫩枝扦插繁殖研究[J]. *浙江林业科技*, 2018, 38 (03): 9–15.
- [19] 蒋明, 应梦豪, 徐丽娜, 等. 珍稀植物日本荚蒾遗传多样性的 ISSR 分析[J]. *浙江大学学报 (理学版)*, 2021, 48 (01): 100–6.
- [20] 李瑞姣. 极小种群植物日本荚蒾抗旱性和耐荫性研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.

