



4种南洋杉科植物耐盐性综合评价

梁育勤

引用本文:

梁育勤. 4种南洋杉科植物耐盐性综合评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(6): 651–660.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4988>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华南地区裸子植物与被子植物季节性水分利用的比较研究

Comparative Studies on Seasonal Water Use of Gymnosperms and Angiosperms in South China

热带亚热带植物学报. 2020, 28(5): 463–471 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4179>

盐胁迫对竹柳幼苗生理响应及结构解剖的研究

Effect of NaCl Stress on Physiological Responses and Anatomical Structure of Salix spp. Seedlings

热带亚热带植物学报. 2017, 25(5): 489–496 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3741>

液体培养的蛇足石杉离体叶状体生产石杉碱甲和生化特征研究

Studies on Huperzine A Accumulation and Biochemical Characteristics in Thallus of Huperzia serrata in vitro by Liquid Culture

热带亚热带植物学报. 2019, 27(1): 109–114 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3901>

三种适生植物对热带珊瑚岛胁迫生境的生理生化响应

Physiological and Biochemical Responses of Three Species to Environment Stresses of Tropical Coral Islands

热带亚热带植物学报. 2017, 25(6): 562–568 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3755>

盐胁迫对4个水稻种质抗逆性生理的影响

Effects of Salt Stress on Resistance Physiology of Four Rice Germplasms

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 149–156 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3920>

向下翻页，浏览PDF全文

4 种南洋杉科植物耐盐性综合评价

梁育勤

(厦门市园林植物园, 福建 厦门 361003)

摘要: 为推广应用南洋杉科植物, 比较了 4 种南洋杉科植物肯氏南洋杉(*Araucaria cunninghamii*)、异叶南洋杉(*A. heterophylla*)、大叶南洋杉(*A. bidwillii*)和贝壳杉(*Agathis dammara*)的耐盐能力, 盐胁迫 28 d 后统计 4 种植物的盐害情况, 并测定相关生理指标, 采用隶属函数法对 4 种植物的耐盐性进行综合评价。结果表明, 500 mmol/L NaCl 胁迫 28 d 后, 4 种植物的盐害率均为 100%; 盐害指数依次为肯氏南洋杉>贝壳杉>异叶南洋杉>大叶南洋杉; 4 种植物的叶绿素含量、 F_v/F_m 、 q_p 、 K^+/Na^+ 均比对照显著下降; 可溶性糖含量均显著高于对照; 脯氨酸含量除大叶南洋杉显著低于对照外, 其余 3 种均显著高于对照; 肯氏南洋杉和异叶南洋杉叶片中的 POD 活性显著增大, 另 2 种变化不显著; 4 种植物叶片中的 MDA 含量和 SOD 活性变化均不显著。综合 11 个耐盐指标, 4 种植物的耐盐性依次为异叶南洋杉>贝壳杉>大叶南洋杉>肯氏南洋杉。

关键词: 南洋杉科; 光合特性; 生理指标; 耐盐性评价

doi: 10.11926/jtsb.4988

CSTR: 32235.14.jtsb.4988

Comprehensive Evaluation on Salt Tolerance of 4 Species of Arauceraaceae

LIANG Yuqin

(Xiamen Botanical Garden, Xiamen 361003, Fujian, China)

Abstract: To promote the application of Araucariaceae plants, the salt tolerance of four Araucariaceae species, such as *Araucaria cunninghamii*, *A. heterophylla*, *A. bidwillii* and *Agathis dammara*, was compared. After 28 days of salt stress, the salt damage of the four species was statistically analyzed, the related physiological indicators were measured, and their salt tolerance was comprehensively evaluated by the membership function method. The results showed that under 500 mmol/L NaCl stress for 28 days, the salt damage rate of the four species was all 100%; the salt damage index was in the order of *Araucaria cunninghamii*>*Agathis dammara*>*Araucaria heterophylla*>*A. bidwillii*; the chlorophyll content, F_v/F_m , q_p and K^+/Na^+ of the four species were significantly lower than those of the control; the soluble sugar content was significantly higher than that of the control; the proline content of *A. bidwillii* was significantly lower than that of the control, while that of the other three species was significantly higher than that of the control; the POD activity in the leaves of *A. cunninghamii* and *A. heterophylla* significantly increased, while that of the other two species did not change significantly; the MDA content and SOD activity in the leaves of the four plants did not change significantly. Based on the comprehensive evaluation of 11 salt tolerance indicators, the salt tolerance of the four species was in the order of *A. heterophylla* > *Agathis dammara* > *Araucaria bidwillii* > *A. cunninghamii*.

Key words: Arauceraaceae; Photosynthetic characteristics; Physiological index; Salt tolerance evaluation

我国滨海地带盐渍化土地面积广阔, 土壤含盐量高, 植被难以生长, 制约了滨海盐碱地治理、沿

海防护林营造和滨海生态系统建设^[1]。通过筛选、培育耐盐植物来改良、利用盐碱地被认为是具有经

收稿日期: 2024-11-16

接受日期: 2025-01-18

基金项目: 厦门市科技局社会指导性项目(3502Z20214ZD4002)资助

This work was supported by Xiamen Science and Technology Bureau Social Guidance Pproject (Grant No. 3502Z20214ZD4002).

作者简介: 梁育勤(1976 年生), 女, 硕士, 主要从事园林植物引种与适应性研究。E-mail: 978152578@qq.com

济和生态双重效益的解决方案^[2]。

南洋杉科(Araucariaceae)有 3 属约 37 种植物,分布于南太平洋群岛、中美洲和南美洲等地,是为数不多的生长于热带、亚热带的大型裸子植物之一^[3]。南洋杉科植物树形高大,株形优美,是良好的园林绿化树种,也是良好的材用树种,其树脂还应用于工业与医疗,具有很高的经济价值。我国于 19 世纪末期开始引入南洋杉科植物^[4],主要有 4 种:肯氏南洋杉(*Araucaria cunninghamii*)、异叶南洋杉(*A. heterophylla*)、大叶南洋杉(*A. bidwillii*)和贝壳杉(*Agathis dammara*)。这 4 种南洋杉科植物在我国台湾、福建、海南、广东、广西等地有少量引种栽培,尚未广泛应用,但在福建沿海地区的绿化中显示出了良好的耐盐碱及抗风性能。近年来对肯氏南洋杉、异叶南洋杉幼苗在不同浓度的盐胁迫下幼苗生长、离子分布、生理特性、光合特性等的研究^[5],以及贝壳杉种子在盐胁迫下的发芽实验^[6]等,均证明它们有良好的耐盐性,可在华南沿海地区推广应用。由于植物的耐盐性存在种间差异,在盐碱地改良效果上也不尽相同,为明确上述 4 种南洋杉科植物的耐盐能力差异,本研究将其进行盐胁迫试验,通过测定其叶绿素含量、光合荧光参数、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性等指标,对其耐盐能力进行综合评价^[7],以期为我国南方沿海地区耐盐树种的选育提供理论依据,并为沿海防护林和风景林的建设提供数据支撑。

1 材料和方法

1.1 材料

材料为 2022 年 7 月采收并播种的肯氏南洋杉(*Araucaria cunninghamii*)、异叶南洋杉(*A. heterophylla*)、大叶南洋杉(*A. bidwillii*)和贝壳杉(*Agathis dammara*) 1 a 生实生苗,种子均采自厦门市园林植物园。试验用盐采用国药集团化学试剂有限公司生产的 NaCl(分析纯)。水培的营养液采用山东拓普生物工程有限公司生产的 Hoagland 营养液及其补充剂。

1.2 方法

在前期研究的基础上^[5]选用 500 mmol/L 的 NaCl 溶液进行盐胁迫试验。试验在人工气候室里进行,光照为 42~45 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,温度 25 $^{\circ}\text{C}$ ~28 $^{\circ}\text{C}$ 。2023 年 7 月分别选取 4 种植物的幼苗,在水培箱里用 1/2 Hoagland 营养液缓苗 1 个月后进行盐胁迫处理。挑

选每种生长一致的幼苗置于含盐的 1/2 Hoagland 营养液中水培,试验设置 0(对照,CK)和 500 mmol/L NaCl 处理,每处理设 3 个重复,每个重复 20 株。记录液面高度,每天观察补充营养液,保持液面高度及盐液浓度不变。每周更换一次培养液。

1.3 盐害指数、盐害率和相对含水量的测定

4 种植物幼苗盐胁迫处理 28 d,统计不同盐害分级下的植株数量,计算盐害指数和盐害率。根据幼苗盐害症状的表现,参考前人的定级方法^[5,8-9],将幼苗的盐害分级标准定为:0 级,全株未见任何盐害症状;1 级,少于 25%叶片发黄;2 级,25%~50%叶片发黄、枝条萎蔫;3 级,50%~75%的叶片黄化、枝条枯萎;4 级,多于 75%叶片黄化、枯萎或全株死亡。盐害指数(%)= $\sum(\text{盐害级值} \times \text{该级盐害株数})/(\text{盐害最高级值} \times \text{总株数}) \times 100\%$;盐害率(%)=出现盐害症状株数/总株数 $\times 100\%$ 。

每处理取 5 株植株,全株称量鲜重后置 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱杀青 30 min,转至 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘 24 h 至恒重,然后称量干重,计算相对含水量。相对含水量(%)=(鲜重-干重)/鲜重 $\times 100\%$ 。

1.4 离子含量和生理指标的测定

试验第 28 天将幼苗取出,用纯净水快速漂洗 3 次,用吸水纸擦干植物表面水分,每处理选取 5 株植株,剪取全部叶片测定 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 离子含量以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、丙二醛(MDA)、叶绿素、可溶性糖、脯氨酸的含量。

K^+ 、 Na^+ 离子使用上海仪电 FP 6410 火焰光谱仪测定;MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)检测法;SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光化学反应法;POD 活性测定采用愈创木酚法;游离脯氨酸含量测定采用茚三酮比色法;可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法;叶绿素含量测定采用乙醇浸提法^[10]。

叶绿素荧光参数采用德国 WALZ 公司生产的叶绿素荧光成像仪 IMAGING-PAM(MAXI)测定。根据汪文华^[11]的方法,取 CK 和 NaCl 处理组的 4 种植物各 3 株,于上午 9 点剪取中层小枝,经过 30 min 暗处理后,在光化光强度为 186 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的条件下测定幼苗的叶绿素荧光参数,并计算最大光化学效率(F_v/F_m)、非光化学淬灭系数(NPQ)和光化学淬灭系数(q_p)。

1.5 耐盐性评价

利用隶属函数法对 4 种植物的耐盐性进行综合评价^[12-14], (1) 求出各指标的隶属函数值。如果指

标与抗性之间存在正相关, 则用公式 $U_{(Xi)}=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$; 如果指标与抗性之间存在负相关, 则用公式 $U_{(Xi)}=1-(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$, 式中, X_i 为指标的测定值, $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为该指标所有处理的最大值、最小值。 $U_{(Xi)}$ 越大表明抗性越强。(2) 把每树种各耐盐性指标的隶属函数值进行累加, 计算其平均值(D), 根据平均值的大小来评价耐盐特性。

1.6 数据的统计分析

所有数据采用 SPSS 18 软件进行单因素方差分析, 运用 LSD 法进行显著性分析和多重比较, 并用隶属函数法进行统计分析, 使用 GraphPad Prism 8 绘制图形。

2 结果和分析

2.1 盐胁迫下植物的盐害率和盐害指数

4 种植物盐胁迫后, 最早出现盐害反应的时间、发展速度和症状各不相同。盐胁迫第 3 天贝壳杉幼苗最先出现盐害现象, 新叶微黄、下垂; 盐胁迫第 4 天肯氏南洋杉幼苗出现枝条先端新叶发黄; 盐胁迫第 5 天大叶南洋杉枝条基部有叶轻微发黄; 盐胁迫第 7 天异叶南洋杉出现枝条先端嫩叶微黄。

4 种植物盐胁迫后地上部分生长情况见图 1, CK 均枝叶鲜绿, 生长旺盛。处理 7 d, 肯氏南洋杉



图 1 盐胁迫对 4 种南洋杉科植物幼苗地上部分生长的影响

Fig. 1 Effect of salt stress on above-ground growth of the 4 Araucariaceae species

70%的植株先端新叶发黄；异叶南洋杉 10%的植株先端新叶微黄；大叶南洋杉 20%的植株出现少数枝条新叶发黄；贝壳杉 70%的植株新叶下垂较明显，30%的植株出现叶尖发黄。处理 14 d，肯氏南洋杉 100%的植株出现盐害反应，新叶发黄且逐渐下垂；异叶南洋杉 60%的植物出现盐害反应，新叶微黄，枝条轻微下垂；大叶南洋杉 80%出现盐害反应，新叶发黄下垂，枝条中段叶发黄渐多；贝壳杉 100%的植株出现盐害反应，新叶发黄下垂增加，下层叶开始发黄。处理 21 d，4 种南洋杉科植株均 100%出现盐害反应，枝叶下垂、发黄更严重；处理 28 d，肯氏南洋杉整体枯黄最严重；贝壳杉整体下垂，下层叶枯黄，但上层叶片仍能继续生长；异叶南洋杉枝

条均萎蔫下垂，但仍为绿色；大叶南洋杉表现最好，仅枝条先端嫩枝下垂，部分叶片发黄。可见，肯氏南洋杉、贝壳杉的盐害发展速度较快，而异叶南洋杉、大叶南洋杉的盐害发展速度较慢。推测大叶南洋杉幼苗的块茎不但提供幼苗生长的营养，还能截留盐离子以减小盐害。

4 种植物盐胁迫后根系的生长情况见图 2。CK 新根均生长旺盛。处理 7 d，4 种植物的根系均无新根生长，并开始变黑；处理 14 d，根系全部变黑，并出现粘液状分泌物；随着处理时间增长，根系越来越黑并逐渐腐烂。

从表 1 可见，盐胁迫 28 d 后，大叶南洋杉、异叶南洋杉、肯氏南洋杉、贝壳杉的盐害率均为 100%，

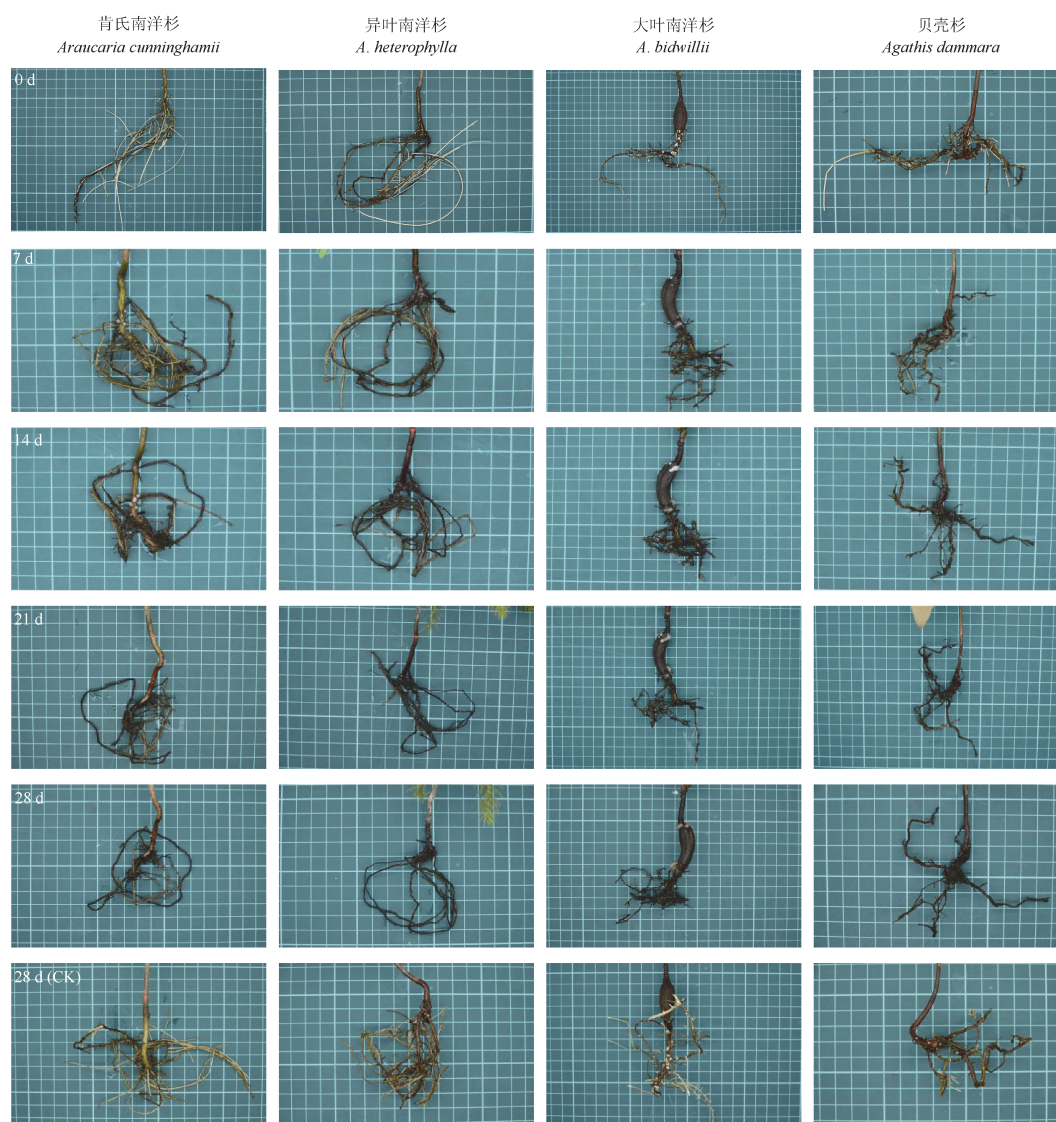


图 2 盐胁迫对 4 种南洋杉科植物幼苗根系生长的影响

Fig. 2 Effect of salt stress on root growth of the 4 Araucariaceae species

表 1 4 种南洋杉科植物的盐害率和盐害指数

植物 Species	盐害率 Salt damage rate /%				盐害指数 Salt damage index /%			
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d
肯氏南洋杉 <i>Araucaria cunninghamii</i>	70	100	100	100	17.5	57.5	95	100
异叶南洋杉 <i>A. heterophylla</i>	10	60	100	100	2.5	20.0	65	85
大叶南洋杉 <i>A. bidwillii</i>	20	80	100	100	5.0	30.0	55	65
贝壳杉 <i>Agathis dammara</i>	70	100	100	100	27.5	67.5	85	95

盐害指数大小为肯氏南洋杉>贝壳杉>异叶南洋杉>大叶南洋杉。盐害指数越高则耐盐性越差。

2.2 盐胁迫对植物幼苗生长指标的影响

从表 2 可见,处理 28 d 后 4 种植物 CK 的株高、茎粗均有所增大,而盐胁迫组皆因失水萎蔫导致株高、径粗减小,盐胁迫组的株高和径粗增量与 CK 差异显著。

相对含水量的变化是植物受盐胁迫时的直接

反映,盐胁迫会降低植物吸收水分的能力造成生理干旱,从而导致其生长速度下降。盐胁迫 28 d 后,4 种植物的相对含水量均比 CK 显著减小。肯氏南洋杉的降幅为 17.53%,异叶南洋杉降 21.91%,大叶南洋杉降 19.65%,贝壳杉降 18.09%。相对含水量降幅越大,其耐盐性越差。4 种植物幼苗的相对含水量降幅均不大,这与它们叶片小且革质,植株本身含水量不高有关。

表 2 盐胁迫对 4 种南洋杉科植物幼苗生长指标的影响

植物 Species	株高增量 (mm) Increment of plant height		茎粗增量 (mm) Increment of stem diameter		相对含水量 /% Relative water content	
	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl
肯氏南洋杉 <i>Araucaria cunninghamii</i>	2.94±1.69a	-4.97±1.86b	0.50±0.17a	-0.19±0.14b	78.67±3.00a	64.90±3.41b
异叶南洋杉 <i>A. heterophylla</i>	1.97±0.86a	-0.51±0.38b	0.36±0.06a	-0.05±0.04b	72.07±1.06a	56.25±1.65b
大叶南洋杉 <i>A. bidwillii</i>	5.29±1.10a	-5.07±2.79b	0.35±0.07a	-0.04±0.08b	85.51±1.64a	68.71±2.45b
贝壳杉 <i>Agathis dammara</i>	3.26±0.63a	-2.40±1.35b	0.21±0.06a	-0.01±0.06b	72.35±2.22a	59.34±1.35b

数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。CK: 对照。下同
Data followed different letters indicate significant differences at 0.05 level. CK: Control. The same below

2.3 盐胁迫对植物叶绿素含量的影响

从图 3 可见,盐胁迫后 4 种南洋杉科植物的叶绿素总量,除肯氏南洋杉与 CK 相比显著下降了 23.6% 外,其余 3 种均与 CK 无显著差异,说明肯氏南洋杉的叶绿素对盐胁迫最敏感。

2.4 盐胁迫对植物光合荧光参数的影响

F_v/F_m 为光合系统 II (PS II) 最大光化学效率,即植物的光合潜能,通常用 F_v/F_m 下降幅度大小来反映胁迫对植株叶片的伤害程度,耐盐性强的植物在盐胁迫下 F_v/F_m 值的变化较小。从图 4 可见,4 种植物在盐胁迫后 F_v/F_m 均比 CK 显著下降,说明叶片出现较为严重的光抑制。其中,异叶南洋杉的降幅最大,达 43.76%;其次为大叶南洋杉(33.86%)、肯氏南洋杉(20.19%)、贝壳杉(20.14%)。

光化学反应猝灭系数(q_p)反映了植物光合活性的高低,其值越大,说明 PS II 的光合活性越大,耐

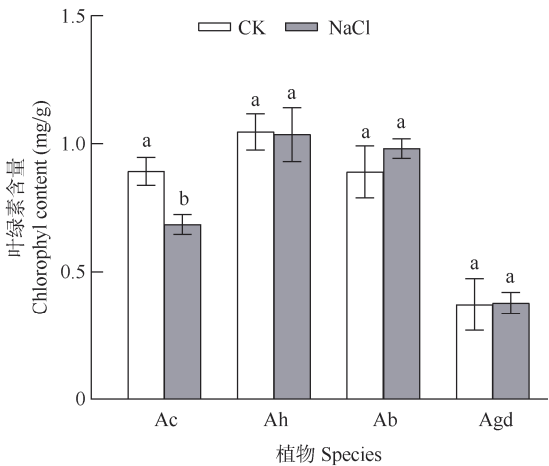


图 3 盐胁迫对 4 种南洋杉科植物叶绿素含量的影响。Ac: 肯氏南洋杉; Ah: 异叶南洋杉; Ab: 大叶南洋杉; Agd: 贝壳杉。下同

Fig. 3 Effect of salt stress on chlorophyll content of 4 Araucaceae species. Ac: *Araucaria cunninghamii*; Ah: *A. heterophylla*; Ab: *A. bidwillii*; Agd: *Agathis dammara*. The same below

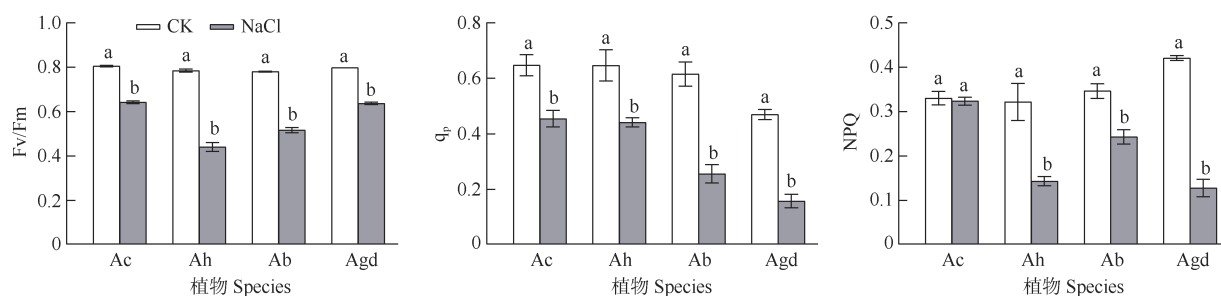


图 4 盐胁迫对 4 种南洋杉科植物叶绿素含量及光合荧光参数的影响

Fig. 4 Effect of salt stress on photosynthetic fluorescence parameters of 4 Araucariaceae species

盐性强的植物在盐胁迫下 q_p 的变化较小。4 种植物在盐胁迫后 q_p 均比 CK 显著下降, 说明盐胁迫使叶片光合活性都降低了。其中, 贝壳杉的降幅最大, 达 66.38%; 其次为大叶南洋杉(58.44%)、异叶南洋杉(31.68)、肯氏南洋杉(29.78%)。

非光化学反应猝灭系数(NPQ)反映的是植物耗散过剩光能为热的能力。盐胁迫后, 除了肯氏南洋杉的 NPQ 与 CK 没有显著差异外, 其余 3 种植物均比 CK 显著下降。植物的 NPQ 变化与其耐盐性之间的关系并不是绝对的, 因此不能作为评价植物耐盐性的指标, 但可以解释 F_v/F_m 与 q_p 的变化。

2.5 盐胁迫对植物 K^+/Na^+ 和渗透调节物质的影响

K^+/Na^+ 是反映林木耐盐特性的良好指标, K^+/Na^+ 越高说明植物体选择性吸收 K^+ 、截留 Na^+ 的能力越

强, 耐盐性也越强。由图 5 可见, 盐胁迫后 4 种植物叶片中的 K^+/Na^+ 均比 CK 显著降低。其中, 肯氏南洋杉的降幅最大(93.22%), 异叶南洋杉的降幅次之(90.23%), 大叶南洋杉的降幅为 89.50%, 贝壳杉的降幅为 86.75%。

盐胁迫后 4 种植物叶片中的可溶性糖含量均升高, 除肯氏南洋杉与 CK 相比无显著差异外, 其余 3 种均显著增大。其中, 大叶南洋杉的增幅最大, 达 158.57%; 贝壳杉次之(99.83%); 异叶南洋杉增幅为 80.38%。盐胁迫后除大叶南洋杉外, 其余 3 种植物叶片中的脯氨酸含量均显著高于 CK。其中增幅最大的是异叶南洋杉, 高达 5113.65%; 其次为肯氏南洋杉(2753.42%); 贝壳杉的增幅为 917.92%。可溶性糖、脯氨酸的增幅越大, 说明植物的抗逆性越强。

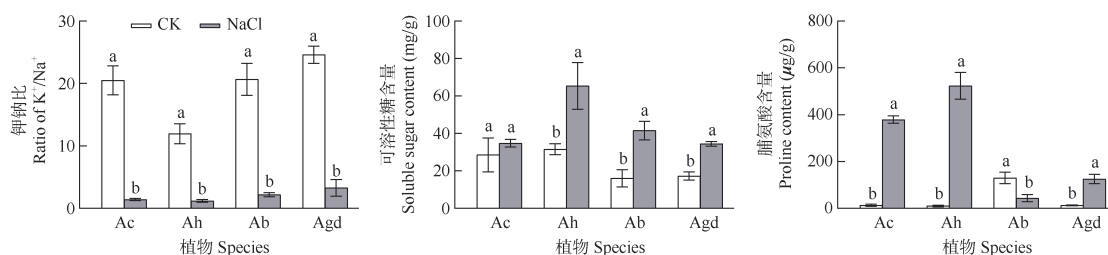


图 5 盐胁迫对 4 种南洋杉科植物 K^+/Na^+ 和渗透调节物质的影响

Fig. 5 Effect of salt stress on K^+/Na^+ and osmoregulatory substances in 4 Araucariaceae species

2.6 盐胁迫对生理指标的影响

由图 6 可见, 盐胁迫后, 肯氏南洋杉、大叶南洋杉的 MDA 含量与 CK 相比有增大但无显著差异, 说明质膜并未受到严重影响; 贝壳杉的 MDA 含量与 CK 相比下降但无显著差异, 而异叶南洋杉的 MDA 含量与 CK 相比出现显著下降。

盐胁迫后, 肯氏南洋杉和异叶南洋杉叶片中的 POD 活性均增大, 且与 CK 差异显著, 肯氏南洋杉

的增幅最大(193.47%), 异叶南洋杉次之(123.94%); 贝壳杉也有增大, 但与 CK 差异不显著; 大叶南洋杉则出现下降, 但与 CK 差异不显著。

盐胁迫后, 4 种植物叶片中的 SOD 活性均呈增大趋势, 但均与 CK 无显著差异。

2.7 耐盐性综合评价

盐胁迫下, 植物体内叶绿素含量、光合荧光参数、渗透调节物质含量、盐离子含量等变化均可在

一定程度上反映该植物的抗盐能力。4 种植物的耐盐方式和机理有所不同, 细胞或组织内的生理代谢和生化反应也有差异, 各种单一耐盐指标的评价结果不完全一致, 因此将各指标结合起来, 综合评价耐盐性大小更为合理。参考前人经验, 本研究选择了与耐盐能力相关性较强的相对含水量、盐害指数、 K^+/Na^+ 比值、叶绿素含量、 F_v/F_m 比值、 q_p 值、

可溶性糖、脯氨酸、MDA 含量、SOD 和 POD 活性等 11 个主要指标, 采用隶属函数法对 4 种植物的耐盐性进行综合评价, 结果见表 3。肯氏南洋杉、异叶南洋杉、大叶南洋杉、贝壳杉的隶属函数综合评价值(平均值)分别为 0.263、0.618、0.533 和 0.554, 可见在盐胁迫下, 4 种植物的耐盐性依次为异叶南洋杉>贝壳杉>大叶南洋杉>肯氏南洋杉。

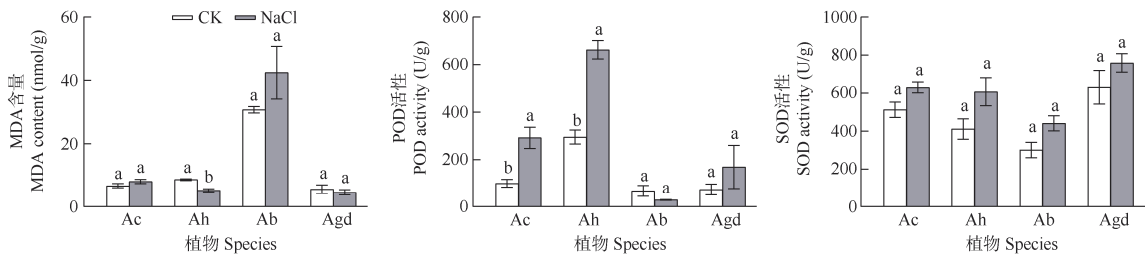


图 6 盐胁迫对 4 种南洋杉科植物生理指标的影响

Fig. 6 Effect of salt stress on physiological indexes of 4 Araucariaceae species

表 3 4 种南洋杉科植物耐盐性指标隶属度及综合评价

指标 Index	肯氏南洋杉 <i>Araucaria cunninghamii</i>	异叶南洋杉 <i>A. heterophylla</i>	大叶南洋杉 <i>A. bidwillii</i>	贝壳杉 <i>Agathis dammara</i>
盐害指数 Salt damage index	0	0.429	1	0.143
相对含水量 Relative water content	1	0	0.518	0.893
叶绿素含量 Chlorophyll content	0	0.700	1	0.780
钾钠比 K^+/Na^+	0	0.463	0.575	1
最大光化学效率 F_v/F_m	0.002	1	0.581	0
光化学猝灭系数 q_p	0	0.052	0.217	1
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0	0.428	1	0.571
脯氨酸含量 Proline content	0.544	1	0	0.190
MDA	0.252	1	0	0.764
POD	1	0.724	0	0.754
SOD	0.095	1	0.969	0
隶属度平均值 Membership mean	0.263	0.618	0.533	0.554
排序 Rank	4	1	3	2

3 讨论和结论

盐胁迫是限制植物生长发育的主要环境因素之一, 可以导致植物生长缓慢、产量降低甚至植株死亡。盐胁迫下植物体内的主要生理生化过程, 如水分吸收、光合作用、能量和物质代谢等均会受到不同程度的抑制^[15]。植物耐盐性受到生理生化多方面因素的影响, 是一个由多基因控制的极为复杂的过程, 也是综合性状的表现^[16]。

盐胁迫条件下, 叶绿体是最敏感的细胞器之一。盐胁迫通过抑制光合色素合成或促进叶绿素分

解, 进而导致光能捕获效率降低, 用于光化学反应中心的能量减少, 最终使光合能力下降^[16]。对叶片的叶绿素荧光参数进行分析能够反映胁迫条件下植物光合器官的伤害程度^[17]。 F_v/F_m 表示光合机构把吸收的光能用作光化学反应的最大效率, 与光合作用的净产率呈正相关, 任何影响 PS II 效能的环境胁迫均会使 F_v/F_m 降低^[18], 当植物光合机构吸收的光能超过所能利用的量时, 会导致光合效率下降, 发生光抑制^[16], F_v/F_m 降幅越大说明叶绿体受到的伤害越严重。 q_p 则反映了 PS II 反应中心吸收光能用于光化学电子传递的份额, q_p 降幅越大, 说明

PS II 反应中心的开放程度越低,从天线色素上捕获的光能用于光化学反应的比例越小^[19-20]。本研究中,肯氏南洋杉的叶绿素对盐胁迫最敏感,叶绿素含量下降最明显, F_v/F_m 、 q_p 和NPQ的降幅却很小;异叶南洋杉的光抑制现象最严重, F_v/F_m 降幅最大,但叶绿素含量与 q_p 的降幅却很小;而贝壳杉的光合活性受损最严重, q_p 和NPQ的降幅最大,但叶绿素含量和 F_v/F_m 降幅却很小,说明肯氏南洋杉叶绿素降解降低了光能吸收,但是光能转化并没有受到大的影响;而其他3种植物则在光能吸收能力上不变,而光能转化受到影响。异叶南洋杉虽然能维持光合作用,但是盐胁迫影响了热耗散能力,使植物承受了较大的光损害;大叶南洋杉和贝壳杉更主要表现为光合作用能力降低,但是能缓解植物在光损害上的影响。可见,盐胁迫后不同的南洋杉科植物存在不同的损伤机制。

渗透胁迫是盐胁迫对植物造成伤害的重要原因之一,植物通过对无机离子的选择性吸收,以及积累对细胞无毒的有机溶质来完成渗透调节^[21],以减轻盐害。因此,渗透调节是植物抵御盐胁迫的重要生理机制。盐胁迫环境下,植物种类不同其抵御渗透胁迫的机制也存在差异。耐盐植物通常具有较强的渗透调节能力,盐胁迫下可以吸收和积累大量 Na^+ 、 Cl^- 等盐离子作为自身的渗透调节物质^[22],同时选择性吸收 K^+ 以维持细胞质中 K^+/Na^+ 平衡,减少盐胁迫的损伤程度。本研究中,4种植物在盐胁迫后均吸收了一定量的 Na^+ 和 K^+ ,而贝壳杉的 K^+/Na^+ 降幅最小,推测其对 K^+ 的吸收与运输更加高效,大叶南洋杉 K^+/Na^+ 的降幅也较小,推测其块茎对 Na^+ 有一定的截留作用。

可溶性糖、脯氨酸是逆境下重要的有机渗透调节物质。可溶性糖的积累可以降低植物体内的渗透势,使植物维持体内正常的细胞膨压和水分需求,还对细胞膜和酶类起稳定和保持作用^[21]。脯氨酸除调渗功能以外,它还具有稳定细胞蛋白质结构,防止酶变性失活和保持氮含量的作用^[23]。可溶性糖和脯氨酸的积累是植物对抗盐胁迫的一种保护生理应激措施^[24-25]。本研究中,4种植物叶片中的可溶性糖和游离脯氨酸含量总体呈上升趋势,说明盐胁迫促进植物体内这2种渗透调节剂物质的积累,调节、维持细胞正常吸水,以减少盐胁迫对植物叶片的伤害。盐胁迫下植物会产生大量的活性氧对自身造成毒害,MDA是膜脂氧化的主要产物之一,也

是组织衰老特征的重要指标,其含量高低可代表细胞膜受损伤程度的大小,在一定程度上也反映植物抗盐性的强弱^[15]。一般对盐分敏感的植物膜脂过氧化程度较大,膜脂伤害程度相对较严重,MDA含量增幅大,而耐盐植物的膜脂过氧化程度较轻,MDA含量增幅小,对盐胁迫有一定的耐受力^[21]。本研究中,仅异叶南洋杉的MDA含量与对照组相比出现显著下降,说明其对盐胁迫的耐受力较强。SOD、POD和CAT等抗氧化系统酶可以清除活性氧,减缓或抵御盐害对植物的伤害^[26]。研究表明,许多植物在盐胁迫下均表现出抗氧化酶活性不同程度的增加^[21]。抗氧化酶活性越高,清除活性氧的能力越强,从而起到保护膜结构的作用^[27]。本研究中,4种植物叶片中的SOD含量的升高无显著变化,但POD活性均显著增大,说明在植物膜系统保护和修复过程中POD起主导作用。

综上,4种南洋杉科植物均具有较强的耐盐性,其中,异叶南洋杉的耐盐能力最优异,贝壳杉次之,再次为大叶南洋杉、肯氏南洋杉。目前,异叶南洋杉已在我国福建省平潭海岛地区的防风林建设中显示了良好的绿化效果,肯氏南洋杉也有少量的应用,且生长良好,耐盐性比肯氏南洋杉更强的大叶南洋杉、贝壳杉也可以在我国华南沿海地区进行试种、推广,以增加华南沿海地区耐盐绿化树种的多样性。

参考文献

- [1] WANG L Y, PIAN J, YANG Y, et al. The fertility effects of salt-tolerant herbaceous plants on coastal saline soil [J]. *Pratac Sci*, 2014, 31(10): 1833-1839. [王立艳, 潘洁, 杨勇, 等. 滨海盐碱地种植耐盐草本植物的肥土效果 [J]. *草业科学*, 2014, 31(10): 1833-1839. doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0290.]
- [2] CHEN X, ZHANG Z W, WU B. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of naked oat (*Avena nuda* L.) at germination stage [J]. *Sci Agric Sin*, 47(10): 2038-2046. [陈新, 张宗文, 吴斌. 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(10): 2038-2046. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2014.10.018.]
- [3] FARJON A. A Handbook of the World'S Conifers [M]. Leiden: Brill, 2010.
- [4] Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae, Agendae Academiae Sinicae Editta. Flora Reipublicae Popularis Sinicae, Tomus 7 [M]. Beijing: Science Press, 1978: 26-31. [中国科学院中国植物志编辑委

- 员会. 中国植物志, 第7卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 26–31.]
- [5] LIANG Y Q. Effects of salt stress on growth and ion distribution of *Araucaria cunninghamii* seedlings [J]. J Xiamen Univ (Nat Sci), 2023, 62(1): 144–150. [梁育勤. 盐胁迫对肯氏南洋杉幼苗生长及离子分布的影响 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2023, 62(1): 144–150. doi: 10.6043/j.issn.0438-0479.202204034.]
- [6] LIANG Y Q. Study on salt tolerance and mechanism of seed of *Agathis dammara* (Lamb.) Rich. & A. Rich. [J]. J Fujian For Sci Technol, 2024, 51(3): 12–17. [梁育勤. 贝壳杉种子耐盐性及耐盐机理探究 [J]. 福建林业科技, 2024, 51(3): 12–17. doi: 10.13428/j.cnki.fjlk.2024.03.003.]
- [7] MEN L Z, WANG Y, CAO Y E, et al. Salt tolerance indexes screening of different cucumber cultivars at seedling stage and construction of its evaluation system [J]. China Veget, 2013(22): 20–26. [门立志, 王毅, 曹云娥, 等. 不同黄瓜品种苗期耐盐性指标筛选与评价体系构建 [J]. 中国蔬菜, 2013(22): 20–26. doi: 10.3969/j.issn.1000-6346.2013.22.005.]
- [8] ZHU G S, LIN Q, QIU C Y, et al. Salt tolerance test and identification of six mulberry varieties [J]. Newsl Seric Sci, 2021, 41(4): 1–8. [朱光书, 林强, 邱长玉, 等. 6个桑树品种的耐盐性鉴定试验 [J]. 蚕学通讯, 2021, 41(4): 1–8. doi: 10.3969/j.issn.1006-0561.2021.04.001.]
- [9] HUA J F, DU L J, WANG X F, et al. Effect of mixed salt stress on growth of common greening species in coastal area of Jiangsu Province and evaluation of their salt tolerance [J]. J Plant Res Environ, 2015, 24(3): 41–49. [华建峰, 杜丽娟, 王苒丰, 等. 混合盐胁迫对江苏省沿海常用绿化树种生长的影响及耐盐性评价 [J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(3): 41–49. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.03.06.]
- [10] ZHANG Y S, HUANG X, CHEN Y F. Experimental Course in Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. [张以顺, 黄霞, 陈云凤. 植物生理学实验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.]
- [11] WANG W H, HE E M, CHEN J, et al. The reduced state of the plastoquinone pool is required for chloroplast-mediated stomatal closure in response to calcium stimulation [J]. Plant J, 2016, 86(2): 132–144. doi: 10.1111/tpj.13154.
- [12] YANG S, LIU Z X, ZHANG H X, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening identification indexes for three tree species [J]. Sci Silv Sin, 2013, 49(1): 91–98. [杨升, 刘正祥, 张华新, 等. 3个树种苗期耐盐性综合评价及指标筛选 [J]. 林业科学, 2013, 49(1): 91–98. doi: 10.11707/j.1001-7488.20130114.]
- [13] YANG J X, LI Q W, GUO Z Y, et al. Comprehensive evaluation on salt tolerance of three *Prunus mume* varieties [J]. J NW A&F Univ (Nat Sci), 2019, 47(8): 65–74. [杨佳鑫, 李庆卫, 郭子燕, 等. 3个梅花品种幼苗耐盐性综合评价 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 65–74. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.08.009.]
- [14] LU R K, YANG Z M, DAI Z G, et al. Evaluation for salt tolerance of 50 jute (*Corchorus olitorius* L.) germplasm resources [J]. J Plant Genet Res, 2017, 18(6): 1055–1066. [卢瑞克, 杨泽茂, 戴志刚, 等. 50份长果黄麻种质资源耐盐性鉴定评价 [J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(6): 1055–1066. doi: 10.13430/j.cnki.jpgr.2017.06.008.]
- [15] KONG Q, MA X H, GONG L X, et al. Growth and physiological responses of *Taxodium mucronatum* × *Cryptomeria fortunei* under different salt stress conditions [J]. J SW For Univ, 2019, 39(2): 179–183. [孔强, 马晓华, 宫莉霞, 等. 不同盐胁迫条件下东方杉的生长及生理响应研究 [J]. 西南林业大学学报, 2019, 39(2): 179–183. doi: 10.11929/j.swfu.201807021.]
- [16] ZHANG M X. Salt tolerance analysis of different *Ulmus pumila* strains in coastal saline-alkali land [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019. [张梦璇. 滨海盐碱地不同白榆品系的耐盐性分析 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.]
- [17] HANNACHI S, VAN LABEKE M C. Salt stress affects germination, seedling growth and physiological responses differentially in eggplant cultivars (*Solanum melongena* L.) [J]. Sci Hort, 2018, 228: 56–65. doi: 10.1016/j.scienta.2017.10.002.
- [18] XU Q R, GU J C, LI H P, et al. Effect of salt spray stress on photosynthetic physiology of *Viburnum japonicum* with extremely small population [J]. J Trop Subtrop Bot, 2023, 31(2): 241–248. [徐千瑞, 顾嘉诚, 李贺鹏, 等. 盐雾胁迫对极小种群植物日本荚蒾光合生理的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(2): 241–248. doi: 10.11926/jtsb.4568.]
- [19] FU Q Q, SUN Y J, ZHAI H, et al. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics in grape rootstock of interspecific F_1 hybrids [J]. Plant Physiol J, 2017, 53(9): 1640–1648. [付晴晴, 孙永江, 翟衡, 等. 盐胁迫对葡萄种间杂交砧木 F_1 株系光合特性的影响 [J]. 植物生理学报, 2017, 53(9): 1640–1648. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2017.0069.]
- [20] WANG X T, LU Q W, CANG J, et al. Effects of cold acclimation on chlorophyll fluorescence characteristics and antioxidant enzyme activity in winter wheat [J]. Plant Physiol J, 2016, 52(12): 1959–1969. [王秀田, 卢秋巍, 苍晶, 等. 低温驯化对冬小麦叶绿素荧光特性及抗氧化酶活性的影响 [J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1959–1969. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2016.0352.]
- [21] CHENG T L, LI H Y, WU H W, et al. Comparison on osmotic accumulation of different salt-tolerant plants under salt stress [J]. For Res, 2015, 28(6): 826–832. [成铁龙, 李焕勇, 武海雯, 等. 盐胁迫下4种耐盐植物渗透调节物质积累的比较 [J]. 林业科学研究, 2015, 28(6): 826–832. doi: 10.3969/j.issn.1001-1498.2015.06.010.]

- [22] MARTÍNEZ-BALLESTA M C, MARTÍNEZ V, CARVAJAL M. Osmotic adjustment, water relations and gas exchange in pepper plants grown under NaCl or KCl [J]. *Environ Exp Bot*, 2004, 52(2): 161–174. doi: 10.1016/j.envexpbot.2004.01.012.
- [23] ZHANG X F, YANG X R, JIAO Z W. Research progress of salt tolerance evaluation in plants and tolerance evaluation strategy [J]. *J Biol*, 2018, 35(6): 91–94. [张相锋, 杨晓绒, 焦子伟. 植物耐盐性评价研究进展及评价策略 [J]. *生物学杂志*, 2018, 35(6): 91–94. doi: 10.3969/j.issn.2095-1736.2018.06.091.]
- [24] KOCA H, BOR M, ÖZDEMİR F, et al. The effect of salt stress on lipid peroxidation, antioxidative enzymes and proline content of sesame cultivars [J]. *Environ Exp Bot*, 2007, 60(3): 344–351. doi: 10.1016/j.envexpbot.2006.12.005.
- [25] WANG X M, MAI Q J, ZHOU H K, et al. Effects of salt stress on resistance physiology of four rice germplasms [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2019, 27(2): 149–156. [王旭明, 麦绮君, 周鸿凯, 等. 盐胁迫对 4 个水稻种质抗性生理的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(2): 149–156. doi: 10.11926/jtsb.3920.]
- [26] SANADA Y, UEDA H, KURIBAYASHI K, et al. Novel light-dark change of proline levels in halophyte (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) and glycophytes (*Hordeum vulgare* L. and *Triticum aestivum* L.) leaves and roots under salt stress [J]. *Plant Cell Physiol*, 1995, 36(6): 965–970. doi: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a078867.
- [27] RAYCHAUDHURI S S, DENG X W. The role of superoxide dismutase in combating oxidative stress in higher plants [J]. *Bot Rev*, 2000, 66(1): 89–98. doi: 10.1007/BF02857783.