

盐胁迫对水培海巴戟幼苗生理特性的影响

金 璨, 王 璇, 官树森, 孙正海, 吴 田*

西南林业大学园林园艺学院/云南省功能性花卉资源及产业化技术工程研究中心/国家林业和草原局西南风景园林工程技术研究中心, 云南昆明 650224

摘 要: 为明确海巴戟幼苗对盐的耐受范围及盐胁迫对海巴戟幼苗生长的影响, 以水培 180 d 的海巴戟苗为材料, 基本培养基为 1/8 MS 液体培养基, 其中分别加入质量分数为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 和 1.0% 的 NaCl 进行胁迫处理。结果表明: 随着 NaCl 胁迫浓度的增加与胁迫时间的推移, 海巴戟叶片相对含水量 (relative water content, RWC) 与生物量逐渐降低, 可溶性蛋白 (soluble protein, SP)、丙二醛 (MDA) 的含量以及超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、过氧化物酶 (POD) 活性均表现为先增加后减少的趋势。海巴戟幼苗的保护酶活性随着 NaCl 胁迫浓度的增加与胁迫时间的推移发生显著变化, 在 NaCl 浓度 0.8% 以下范围, 海巴戟可以通过调节渗透物质和抗氧化酶来减轻伤害, 保证生长; 当 NaCl 浓度在 0.8% 及以上范围时, 保护酶系统与细胞膜受损严重, 进而影响海巴戟生长。因此, 海巴戟幼苗可以在 0.8% 以下 NaCl 浓度范围的区域试种。

关键词: 海巴戟; 水培; 盐胁迫; 生理指标; 保护酶活性

中图分类号: S567.19

文献标识码: A

Effects of Salt Stress on Physiological Characteristics of *Morinda citrifolia* Seedlings in Hydroponics

JIN Can, WANG Xuan, GONG Shusen, SUN Zhenghai, WU Tian*

College of Landscape Architecture and Horticulture, Southwest Forestry University / Yunnan Functional Flower Resources and Industrialization Technology Engineering Research Center / State Forestry and Grassland Administration Southwest Landscape Architecture Engineering Technology Research Center, Kunming, Yunnan 650224, China

Abstract: In order to clarify the salt tolerance range of *Morinda citrifolia* seedlings and the effect of salt stress on the growth of *M. citrifolia* seedlings, the *M. citrifolia* seedlings cultured in water for 180 days were used as materials, and the basic medium was 1/8 MS liquid medium, in which NaCl with mass fractions of 0, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1.0% were added respectively for stress treatment. The results showed that with the increase of NaCl stress concentration and stress time, the relative water content (RWC) and biomass of *M. citrifolia* leaves gradually decreased, and the contents of soluble protein (SP), malondialdehyde (MDA) and the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbic acid peroxidase (APX) and peroxidase (POD) gradually increased first and then decreased. The protective enzyme activity of *M. citrifolia* seedlings changes significantly with the increase of NaCl stress concentration and the passage of stress time. In the range of NaCl concentration below 0.8%, *M. citrifolia* can reduce damage and ensure growth by regulating osmotic substances and antioxidant enzymes. When NaCl concentration is in the range of 0.8% or above, the protective enzyme system and cell membrane are seriously damaged, which affects the growth of *M. citrifolia*. Therefore, the seedlings of *M. citrifolia* can be tested in the area with NaCl concentration below 0.8%.

Keywords: *Morinda citrifolia*; hydroponics; salt stress; physiological indicators; protective enzyme activity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.01.012

收稿日期 2022-08-02; 修回日期 2022-11-14

基金项目 国家林业和草原局项目“诺丽果高产优质生产及加工技术推广示范”(No. [2019]27); 云南省科技厅重点研发计划项目“特色优势植物木蝴蝶、诺丽、红掌集成培育技术老挝示范推广”(No. 2019IB011)。

作者简介 金 璨 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 植物分子生物学。*通信作者 (Corresponding author): 吴 田 (WU Tian), E-mail: wutianpotato@swfu.edu.cn。

海巴戟 (*Morinda citrifolia* L.) 是一种常绿多年生阔叶小乔木、灌木, 茜草科巴戟天属植物, 原产于美国东南部^[1], 现广泛分布于南太平洋地区, 菲律宾, 以及中国海南岛、台湾岛、云南西双版纳、元江等地^[2]。海巴戟果实可食用, 作为天然药物已有上千年应用历史^[3], 属于珍贵资源。海巴戟含有 160 多种有效成分, 其中包括植物碱和多糖类活性成分^[4], 如黄酮^[5]、皂甙^[6-7]、熊果酸^[8]等, 可用于预防或改善各种慢性疾病, 包括活性氧 (ROS) 损伤、糖尿病、高血压和疟疾^[9], 此外还含有人体必需的大量矿物质和维生素^[10], 具有重要开发潜力和利用价值。

我国盐碱地分布广, 面积大, 全国覆盖有 3461 万 hm^2 盐碱地, 其中盐碱化的农业用地面积达 760 万 hm^2 , 占比 20%^[11]。土壤盐碱化已成为当今农业发展的主要阻碍因素之一, 有研究预测, 到 2050 年, 全球盐碱耕地比例将至 50%。盐碱土地是今后重要的潜力后备土地资源, 合理开发利用盐碱土地对于我国农业增产与发展作用不可小觑^[12]。目前, 许多研究利用生物改良法, 将耐盐性作物种植于盐碱地吸收土壤中多盐分降低耕作层的盐分, 并增加土壤中的有机质, 从而使盐碱土地得到改善。滨海盐渍土壤地区种植过紫花苜蓿的地块比空白地块的土壤可溶性盐含量明显降低, 并且土壤的有机质、肥力和氮含量都有一定程度的增加^[13]。海巴戟是一种典型的热带植物, 然而目前由于环境条件的制约, 当下产业化生产用的海巴戟只在热带沿海或雨林地区栽培, 海巴戟的自然分布与种植范围均较小且分散。从海巴戟广泛分布于太平洋南部诸岛屿这一特点上看^[14], 它能适应于 NaCl 含量浓度较高的海滩区生存, 理论上耐盐性较强。因此, 明确海巴戟对盐的耐受程度及了解海巴戟的耐盐机理是发展海巴戟产业同时利用与改善盐渍化土壤的有效途径之一。

本研究在前期建立的海巴戟水培体系的基础上, 以水培 180 d 的海巴戟苗为试验材料, 分别选取 5 个不同质量分数的 NaCl 溶液进行盐胁迫处理, 检测海巴戟幼苗根、茎、叶的生物量与叶片相对含水量 (relative water content, RWC)。测定可溶性蛋白 (soluble protein, SP)、丙二醛 (MDA)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 几个生理指标, 过氧化氢酶 (CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 2 个抗氧化酶。以了解在盐胁迫下的各个指标的变化, 明确海巴戟幼苗对 NaCl

的耐受范围, 为扩大海巴戟种植范围提供理论依据并为探究海巴戟的耐盐机理奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

海巴戟苗取自西南林业大学园林园艺学院组培室, 为无菌苗, 每 90 d 扩繁继代 1 次。预处理时留取海巴戟茎尖 3 cm 左右, 剪去其余部分。配制 MS 液体培养基, 稀释成 1/8 MS, 并添加生长素 0.2 mg/L NAA, 然后将上述海巴戟茎尖插于漂浮板上放入溶液中进行培养, 每 5 d 更换 1 次溶液, 培养 180 d。组培室的温度设定在 $(26 \pm 2)^\circ\text{C}$, 光照强度为 3000 lx, 光照时间为 12 h/d。试验用质量分数为 0 (CK)、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0% 的 NaCl 溶液对水培 180 d 的海巴戟苗进行处理, NaCl 溶于水培的溶液中, 每 5 d 更换 1 次, 每个处理 25 棵海巴戟苗, 各处理重复 3 次。

1.2 方法

1.2.1 水培盐胁迫海巴戟生物量测定 胁迫 20 d 后, 随机选取 3 株, 先将每株根茎叶的水分用滤纸吸干后, 再分别称量各株根茎叶的鲜重, 放入烘箱中 105°C 烘干 30 min, 然后 80°C 烘干至恒重, 并称量干重。

1.2.2 水培盐胁迫海巴戟叶片 RWC 测定 海巴戟叶片 RWC 采用烘干称重法测定^[15], 取 NaCl 胁迫 20 d 后的新鲜叶片测量鲜重 (W_0), 洗净叶片表面污物再将叶片没进蒸馏水中浸泡, 从叶片开始浸泡至浸泡结束, 期间每 15 min 进行 1 次重量测量, 测量至叶片重量无变化时停止浸泡, 此时叶片重量为叶片的饱和鲜重 (W_1), 然后在 105°C 烘箱中杀青 30 min, 70°C 下烘干至恒重, 称量叶片干重 (W_2)。

1.2.3 水培盐胁迫海巴戟叶片各指标测定 每 5 d 取样 1 次, 每次取样选取相同部位的叶片, 保存于 -80°C 的超低温冰箱中, 用于 SP、MDA、SOD、POD 生理指标的测定及 CAT、APX 抗氧化酶的测定, 重复 3 次。参照李合生^[16]的方法, SP 含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定, MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定, SOD 活性采用氮蓝四唑法测定, CAT 活性采用紫外吸收法测定, APX 活性测定采用 ASA 氧化法, POD 活性采用愈创木酚法测定。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行标准差数

据处理,使用 Dunnett-t 检验方法通过 SPSS 22 软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗生长的影响

2.1.1 水培条件下盐胁迫海巴戟的生长状况
20 d 胁迫结束后,0.2% NaCl 胁迫下的海巴戟幼苗的生长情况与对照组相比无显著差异(图 1)。随着 NaCl 胁迫浓度的增加,海巴戟幼苗株高、茎粗和叶片数降低,受盐害症状最快显著表现于叶片。因此,本试验对海巴戟幼苗生理指标的测定检测部位选择在叶片,越高浓度的 NaCl 胁迫下其叶片相对对照组越瘦小。NaCl 胁迫浓度为 0.8% 的海巴戟幼苗主根细短,侧根减少,残存叶片萎

焉,过半植株出现死亡现象,0.8%为海巴戟幼苗在 NaCl 胁迫下的半致死浓度,NaCl 胁迫浓度为 1.0%的海巴戟幼苗全部脱水死亡,因此,在相关生理指标检测中只测定了 1.0%及以下浓度的 NaCl 处理幼苗。

2.1.2 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗 RWC 的影响
经过不同 NaCl 浓度胁迫处理 20 d 以后,海巴戟叶片的 RWC 呈现下降趋势,NaCl 浓度越高下降越明显(表 1)。0.2% NaCl 胁迫下,叶片的 RWC 与 CK 组分别为 74.56%、74.30%,但无显著差异。0.4% NaCl 胁迫下,叶片的 RWC 开始呈现下降趋势,RWC 为 CK 组的 92.33%,且差异显著。随着 NaCl 浓度的增加,叶片的 RWC 均呈下降趋势,且均与 CK 组形成显著性差异,1.0% NaCl 胁迫下,叶片的 RWC 仅有 CK 组的 61.37%。

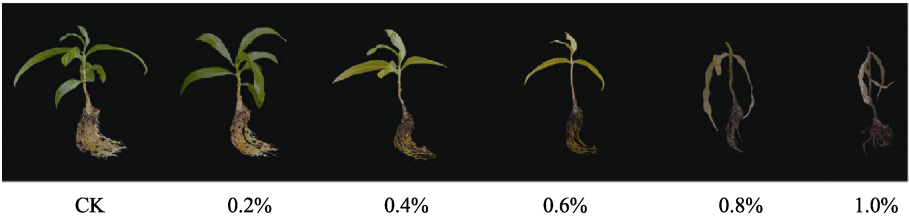


图 1 不同盐浓度胁迫 20 d 诺丽幼苗生长情况

Fig. 1 Growth of *M. citrifolia* seedlings under stress at different salt concentrations for 20 d

表 1 盐胁迫对海巴戟生物量与 RWC 的影响

Tab. 1 Effects of salt stress on biomass and relative water content of *M. citrifolia*

NaCl 浓度 NaCl concentration/%	相对含水量 RWC/%	单株根质量 Single root mass/g		单株茎质量 Single stem mass/g		单株叶质量 Single leaf quality/g	
		鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight
0(CK)	74.30 ^a	0.5967±0.0005 ^a	0.0812±0.0011 ^a	0.2978±0.0017 ^a	0.0742±0.0037 ^a	1.2998±0.0004 ^a	0.2695±0.0008 ^a
0.2	74.56 ^a	0.5983±0.0023 ^a	0.0813±0.0017 ^a	0.3004±0.0068 ^a	0.0746±0.0011 ^a	1.2994±0.0018 ^a	0.2698±0.0006 ^a
0.4	68.60 ^b	0.5889±0.0006 ^b	0.0796±0.0005 ^a	0.2887±0.0008 ^b	0.0718±0.0009 ^{ab}	1.2963±0.0006 ^a	0.2672±0.0001 ^b
0.6	62.85 ^c	0.5798±0.0017 ^c	0.0774±0.0013 ^b	0.2791±0.0008 ^c	0.0701±0.0006 ^{bc}	1.2862±0.0008 ^b	0.2628±0.0008 ^c
0.8	53.24 ^d	0.5732±0.0003 ^d	0.0758±0.0001 ^{bc}	0.2728±0.0006 ^d	0.0678±0.0008 ^{cd}	1.2645±0.0026 ^c	0.2548±0.0013 ^d
1.0	45.60 ^e	0.5643±0.0051 ^e	0.0741±0.0008 ^c	0.266±0.0020 ^e	0.0663±0.0003 ^d	1.2412±0.0038 ^d	0.2502±0.0013 ^e

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference (P<0.05).

2.1.3 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗生物量的影响
0.2% NaCl 胁迫下,海巴戟苗生物量的根茎叶部分分别比 CK 组高 0.12%、0.54%、0.11%,无显著差异(P>0.05)(表 1),说明低浓度的 NaCl 胁迫对海巴戟苗生长未造成胁迫伤害。随着 NaCl 浓度的增加,海巴戟根在 0.8%与 1.0% NaCl 胁迫下的生物量均显著低于其他浓度。CK 组下海巴戟叶片生物量占总生物量的 63.42%,各盐浓度下叶

片生物量分别占总生物量的 63.38%、63.83%、64.05%、63.96%、65.05%,可见,叶片生物量所占比例会随着 NaCl 胁迫浓度的增加而增大,说明盐胁迫下海巴戟苗生物量的积累优先表现于叶片。

2.2 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗生理指标的影响

2.2.1 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗 SP 含量的影响
从整体上看,随 NaCl 处理浓度与时间

的增加, 海巴戟叶片 SP 含量呈现先升高后降低的趋势 (图 2A), NaCl 胁迫浓度越高, SP 含量上升的幅度也相对较大。10 d 时, 1% NaCl 胁迫下 SP 含量达到最高, 与 CK 组相比, 其含量提高了 1.18 mg/g, 呈显著差异 ($P<0.05$), 后随着胁迫时间的增加, SP 含量呈下降趋势。NaCl 胁迫

下, 海巴戟幼苗 SP 含量最高时, 为其耐 NaCl 胁迫能力的范围极限, 这表明在超出一定的耐盐能力时, 海巴戟幼苗的生长受到伤害。1.0% NaCl 胁迫下, SP 含量在胁迫处理的各时间段与 CK 组相比分别提高 98.63%、176.1%、132.35%、84.00%。

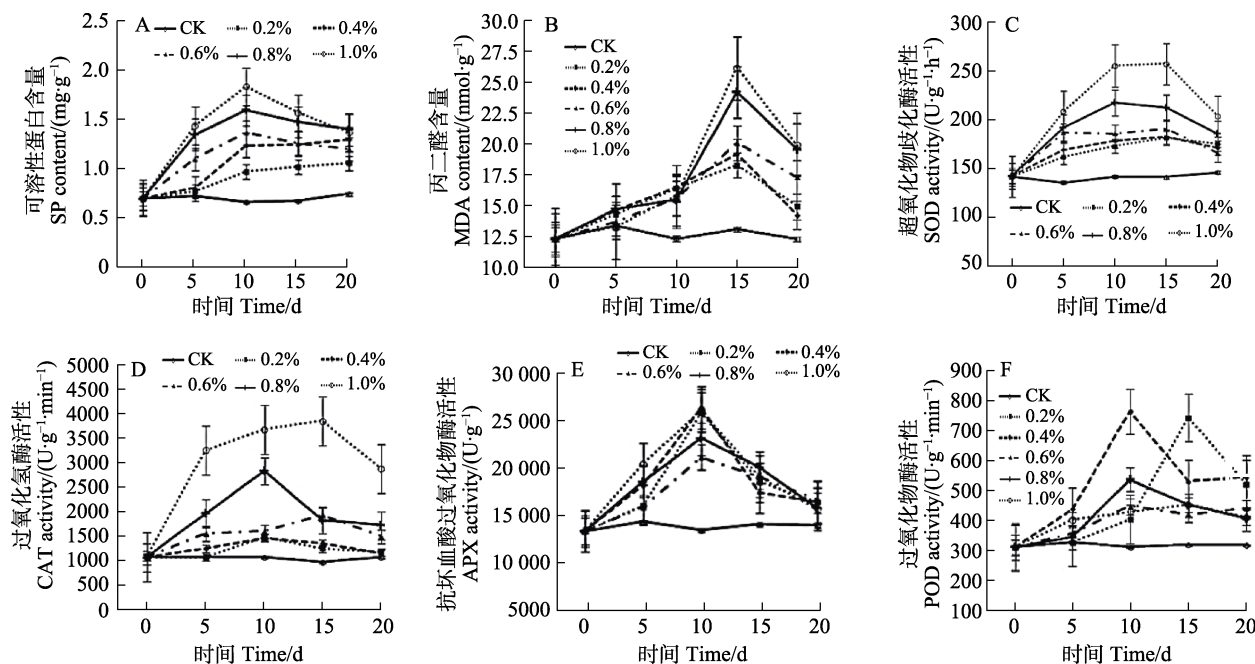


图 2 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗生理生化特性的影响

Fig. 2 Effects of salt stress on physiological and biochemical characteristics of *M. citrifolia* seedlings under hydroponics

2.2.2 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗 MDA 的影响 随着 NaCl 浓度的增加及胁迫时间的推移, 海巴戟叶片的 MDA 含量呈先上升后下降的趋势 (图 2B), 各盐浓度胁迫下 0~10 d 时的上升幅度明显低于 10~15 d, 从 15~20 d 呈下降趋势。NaCl 胁迫处理 10 d 时, 各 NaCl 浓度分别与 CK 组相比差异显著 ($P<0.05$)。NaCl 胁迫处理 15 d 时, MDA 含量出现最大值, 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%与 CK 组相比分别上升了 39.67%、46.81%、53.49%、85.03%、100.00%, MDA 含量增加较大的 NaCl 浓度分别为 0.8%、1.0%。随后 MDA 含量开始下降, 其中 1.0% NaCl 胁迫下降幅度最大, 20 d 时, 各 NaCl 浓度胁迫下的 MDA 含量与 CK 组相比均呈显著差异。表明随着 NaCl 浓度增加和胁迫时间的推移, 海巴戟叶片细胞膜的受损程度也在增加, 导致细胞膜脂质过氧化程度加大。

2.2.3 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗 SOD 活性的影响 1.0% NaCl 胁迫一段时间后, 海巴戟叶片的 SOD 活性随着时间的推移呈现先增加后

减少的趋势 (图 2C), 各时间段下 SOD 活性均显著高于 CK 组 ($P<0.05$)。0.8% NaCl 胁迫 10 d 时 SOD 活性达到最大值, 其余 NaCl 浓度胁迫下, SOD 活性均在 15 d 时达到最大值。15 d 时与 CK 相比, SOD 活性在 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0% NaCl 浓度胁迫下分别增加了 29.29%、30.00%、35.48%、50.12%、83.33%, 这表明一定程度的盐胁迫可使海巴戟叶片的 SOD 活性上升。随着胁迫时间的推移, SOD 的活性则呈下降趋势。在胁迫进行至 20 d 时, 各 NaCl 浓度下的 SOD 活性分别比 CK 组提高 20.46%、17.47%、13.79%, 27.59%、40.00%, 均差异显著。

2.2.4 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗 CAT 的影响 在 1.0% NaCl 胁迫下, 海巴戟叶片的过氧化氢酶活性随着胁迫时间的推移呈现先上升后下降趋势 (图 2D), 均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$), 15 d 时达到最大值, 随着胁迫时间的推移, CAT 活性呈下降趋势。各 NaCl 浓度在胁迫 10 d 时, 0.2%、0.4% NaCl 胁迫下的 CAT 活性无显著差异,

其余浓度下差异显著。胁迫 20 d 时, 0.2%与 0.4% NaCl 胁迫下的 CAT 活性差异不显著。0.2%和 0.4% NaCl 的整个胁迫时间段, 叶片中 CAT 活性变化幅度不大。综上所述, 海巴戟叶片在受到较高 NaCl 浓度胁迫时, CAT 活性上升的幅度相对较大, 但随着胁迫时间的推移, 超出植物一定的耐受限度, CAT 活性则下降。这说明海巴戟叶片可以在短期的盐胁迫下通过积累更多的 CAT 含量来增强自身的抗盐能力, 但随着胁迫时间的推移, 持续的盐胁迫则会对植物本身造成一定的伤害。

2.2.5 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗 APX 活性的影响 海巴戟叶片在不同的 NaCl 浓度胁迫下, APX 的活性随着 NaCl 浓度的增加及胁迫时间的推移呈先增加后降低的趋势(图 2E), 且与 CK 组相比均差异显著 ($P<0.05$)。0.4% NaCl 胁迫 10 d 时, 叶片的 APX 活性达到最高, 随着胁迫时间的推移活性降低。0.2% NaCl 胁迫下, 5 d 与 20 d 时的叶片 APX 活性无显著差异。各 NaCl 浓度胁迫 20 d 时, 与 CK 组相比, APX 的活性分别提高 17.89%、18.16%、19.41%、13.23%、12.56%; 0.2%、0.4%、0.8%、1.0% NaCl 胁迫下的 APX 活性无显著差异。

2.2.6 水培条件下盐胁迫对海巴戟幼苗 POD 活性的影响 在 0.2%、0.4% NaCl 胁迫下, 海巴戟叶片 POD 活性呈先增高后下降的趋势(图 2F), 其中 0.2% NaCl 胁迫下, POD 活性在 15 d 时达到最大值, 而后开始下降, 0.4% NaCl 胁迫 10 d 时, POD 活性达到最大值, 说明在 0.4% NaCl 胁迫下

POD 在 10 d 发挥着重要的抗氧化作用。0.4% NaCl 浓度与 CK 组相比, 不同时间段下 POD 均显著提高 ($P<0.05$)。2 个低浓度 NaCl 胁迫下 POD 活性达到最大值的时间不同, 说明 0.2% NaCl 胁迫下, 海巴戟前期受到的胁迫并未对细胞膜造成一定的伤害。各 NaCl 浓度胁迫 20 d 后, 0.8%、1.0% NaCl 胁迫下 POD 活性与 CK 组无显著差异, 其余浓度与 CK 均差异显著。

2.2.7 指标相关性分析 指标相关性分析(表 2)表明, 可溶性蛋白与 SOD、APX 及 MDA 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 CAT 呈显著正相关 ($P<0.05$), 与 RWC 呈极显著负相关; SOD 与 CAT、MDA 呈极显著正相关, 与 RWC 呈极显著负相关; CAT 与 RWC 呈极显著负相关; POD 与 APX 呈极显著正相关; MDA 与 RWC 呈极显著负相关。指标相关性分析说明, 当海巴戟幼苗受盐胁迫 RWC 减少时, 植株对非生物胁迫反应的相关生理指标与保护酶含量随之变化, 各生理指标与保护酶之间为抵抗盐胁迫伤害相互影响, 协同作用。证明海巴戟幼苗在可承受 NaCl 浓度及时间胁迫处理范围内, NaCl 浓度越高, 植株 RWC 越低, 水分减少; MDA 含量随 NaCl 胁迫浓度升高而增加导致细胞膜脂过氧化, 细胞酶活性降低, 细胞膜受损进而影响植株生长发育。同时, 海巴戟幼苗植株又通过植株内可溶性蛋白质以及 SOD、CAT、APX、POD 酶活性增加的协同作用保护质膜系统、减轻活性氧伤害来增强抗盐性, 提高生存能力。

表 2 指标的相关性分析
Tab. 2 Correlation analysis of metrics

指标 Index	SP	SOD	CAT	POD	APX	MDA	RWC
SP	1						
SOD	0.816**	1					
CAT	0.583*	0.844**	1				
POD	0.426	0.241	-0.202	1			
APX	0.612**	0.392	0.052	0.794**	1		
MDA	0.761**	0.591**	0.438	0.061	0.447	1	
RWC	-0.0771**	-0.0811**	-0.0886**	0.206	-0.143	-0.745**	1

注: *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论

水培海巴戟除了可以方便快捷地提高组培苗的移栽成活率和为胁迫试验方面提供基础外, 对海巴戟产业化发展还具有一定的促进作用。水培

海巴戟对于盐胁迫的生理响应机制包括多个方面, 本研究中, 海巴戟幼苗在没有盐胁迫的水培条件下生长健壮, 0.2%NaCl 胁迫下受盐害影响极小, 植株长势与 CK 几乎无差异。而在 0.2%NaCl

以上浓度胁迫下,海巴戟幼苗长势随 NaCl 浓度的增加而减缓,且盐害最先表现在叶片,这与杜运领等^[17]的研究结果一致。盐胁迫过程中,海巴戟幼苗 RWC 随 NaCl 胁迫浓度增加而减少,这与张春诗等^[18]对黑果腺肋花楸幼苗进行 NaCl 胁迫试验的结果一致。在盐胁迫下海巴戟幼苗叶片中可溶性蛋白质、MDA 含量以及 SOD、CAT、APX、POD 活性随 NaCl 浓度的增加呈先上升再下降的趋势,这与刘吉等^[19]对菠菜在 NaCl 胁迫下的研究中,3 种菠菜的 SOD、POD、CAT 活性随着 NaCl 浓度的增加,呈先增加后下降的结论相同。在洪森荣等^[20]对怀玉山三叶青与胡爱双等^[21]对不同耐盐性八棱海棠株系进行盐胁迫试验结果中发现,与本试验不同的是,以上 2 项试验结果均是随 NaCl 胁迫浓度的增加,植株内 MDA 含量均呈上升趋势,而本研究中海巴戟幼苗叶片 MDA 含量呈先上升再下降趋势,该项差异的原因是由于本试验中海巴戟幼苗在 0.8%与 1.0%NaCl 浓度胁迫下,胁迫时间超过海巴戟幼苗耐盐范围后植株死亡有关。随着胁迫时间的推移,海巴戟叶片的可溶性蛋白、抗氧化酶活性会发生显著性的变化,证明了海巴戟幼苗在盐胁迫下通过积极调节渗透物质和抗氧化酶来减轻伤害,促进生长。这说明海巴戟与其他植物一样在不同 NaCl 浓度胁迫下的适应主要与渗透物质的积累和活性氧清除能力的提高有关,证明了海巴戟幼苗对于盐胁迫具有一定的抵抗能力。

在土壤盐分超过 0.2%~0.5%时,一般植物会出现吸水困难现象,当盐分高于 0.4%时,植物体内水分易外渗^[22]。如徐千瑞等^[23]研究中表明,日本莢蒾仅能正常存活在 NaCl 浓度 0.15%及以下含盐量土壤环境中,无法长期存活在 NaCl 浓度 0.3%及以上含量土壤环境;崔卓越等^[24]的研究结果表明,紫丹参在盐胁迫环境中,当 NaCl 溶液浓度超过 0.7%时,紫丹参根部生长状况极差,植株出现死亡现象。而本研究中,海巴戟幼苗在 0.8%NaCl 浓度胁迫时才处于半致死状态,在 NaCl 胁迫浓度高达 1%时致死,这说明海巴戟相比其他植物耐盐性强,具有一定抗盐能力,在盐胁迫环境下存在着逆境响应机制。当植物遭受非生物胁迫时,会启动一系列基因表达调控进程,诱导相关的基因及其转录因子的激活表达^[25],而目前关于海巴戟与盐胁迫相关基因的信息尚未了解,本研究可为后续找到海巴戟存在与逆境胁迫相关控制其生理

指标变化的基因试验奠定基础。研究海巴戟耐盐机理与选育耐盐品种是优化与扩大海巴戟种植的重要手段。

4 结论

重度盐化土的土壤含盐量达 0.4%~0.6%,天然形成的盐碱地滨海地区的含盐主要以 NaCl 为主。本研究通过不同浓度 NaCl 溶液对水培海巴戟幼苗进行盐胁迫研究发现,海巴戟耐盐性较强,在 0.8%NaCl 溶液浓度下能通过保护酶系统积极调节渗透物质和抗氧化酶来减轻伤害,保证其存活生长。因此,可以尝试于热带滨海地区的盐渍地试种海巴戟,提高盐渍地区利用率。

参考文献

- [1] MARQUES T R, BRAG M A, CESAR P H, SOUZA N P. Evaluation of the Brazilian functional fruit *Morinda citrifolia* as phospholipases A2 and proteases modulator[J]. *Phytomedicine Plus*, 2021, 1(4): 100071.
- [2] 邹瑞,王青芬,吴田. 热带植物海巴戟抗寒株系选育[J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29(6): 634-641.
ZOU R, WANG Q F, WU T. Selective breeding of cold-resistant strain for tropical plant *Morinda citrifolia*[J]. *Journal of Tropical Subtropical Botany*, 2021, 29(6): 634-641. (in Chinese)
- [3] 刘金莲,张睿,刘晔斌,侯燕,王林元,王淳,张建军,高学敏. 诺丽的文献研究及中药药性理论探讨[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(5): 984-990.
LIU J L, ZHANG R, LIU Y B, HOU Y, WANG L Y, WANG C, ZHANG J J, GAO X M. Literature research and discussion of Chinese medicinal properties of *Morinda citrifolia*[J]. *Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2020, 45(5): 984-990. (in Chinese)
- [4] KOHEI K, YOHEI T, HANANI E, MANSUR U. New anthraquinone and iridoid from the fruits of *Morinda crifolia*[J]. *Chemical & Pharmaceutical Bulletin*, 2005, 53(12): 1597-1599.
- [5] JUNKO T, YOSHITSKA I, KANKI K. New constituents from the leaves of *Morinda citrifolia*. [J]. *Chemical & Pharmaceutical Bulletin*, 2007, 55(2): 343-345.
- [6] 孟蕲翊,崔孟媛,吴友根,杨东梅,张军锋. 诺丽营养器官内的总黄酮含量及消长规律[J]. *热带生物学报*, 2014, 5(3): 286-289.
MENG Q X, CUI M Y, WU Y G, YANG D M, ZHANG J F. Changes of total flavonoids of *Morinda citrifolia* (Noni) content in vegetative organs in different growth periods[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2014, 5(3): 286-289. (in Chi-

- nese)
- [7] KIM S W, JO B K, JEONG J H, CHOI S U. Induction of extracellular matrix synthesis in normal human fibroblasts by anthraquinone isolated from *Morinda citrifolia* (Noni) fruit[J]. Journal of Medicinal Food, 2005, 8(4): 552-555.
 - [8] LIU G M, HE K L, ZHU N Q. New unusual iridoids from the leaves of Noni[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 2003, 11(12): 2499-2502.
 - [9] ZHU H L, ZHANG J C, LI C F, LIU S X. *Morinda citrifolia* L. leaves extracts obtained by traditional and eco-friendly extraction solvents: relation between phenolic compositions and biological properties by multivariate analysis[J]. Industrial Crops and Products, 153(6): 112586.
 - [10] SU B N, PAWLUS A D, JUNG H A, KELLER W J. Chemical constituents of the fruits of *Morinda citrifolia* (Noni) and their antioxidant activity[J]. Journal of Natural Products, 2005, 68(4): 592-595.
 - [11] 张海欧, 师晨迪. 盐碱地治理技术浅析[J]. 农村经济与科技, 2021, 32(13): 7-9.
ZHANG H O, SHI C D. A brief analysis of saline land management technology[J]. Rural Economy and Science, 2021, 32(13): 7-9. (in Chinese)
 - [12] 李贵玲. 盐生植物耐盐机制概要及其在改良土壤中的作用[J]. 生物学通报, 2020, 55(9): 7-10.
LI G L. Research on the anti-salt mechanism and the application of the halophytes[J]. Bulletin of Biology, 2020, 55(9): 7-10. (in Chinese)
 - [13] 王静, 徐兴, 麻冬梅. 紫花苜蓿种质资源萌发期耐盐性鉴定[J]. 核农学报, 2018, 32(10): 1939.
WANG J, XU X, MA D M. Identification of salt-tolerant properties during germination period of *medicago sativa* L. germplasm resources[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(10): 1939. (in Chinese)
 - [14] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Flora of China Editorial Board, Chinese Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
 - [15] 赵海泉. 基础生物学实验指导植物生理学分册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
ZHAO H Q. Experimental guide to basic biology, plant physiology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009. (in Chinese)
 - [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
 - [17] 杜运领, 陈玉珍, 钱爱国, 郦建锋, 徐建强, 傅菁菁, 蔡鹭春, 孙元敏, 刘斌, 张飞, 郑滢, 林莉, 马勇, 汤坤贤, 李开河. 4 种典型滨海植物的耐盐能力[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(1): 106-116.
DU Y L, CHEN Y Z, QIAN A G, LI J F, XU J Q, FU Q Q, CAI L C, SUN Y M, LIU B, ZHANG F, ZHENG Y, LI L, MA Y, TANG K X, LI K H. Salt tolerance of four typical coastal plants[J]. Journal of Applied Oceanography, 2022, 41(1): 106-116. (in Chinese)
 - [18] 张春诗, 祖丽皮耶·托合提麦提, 艾力江·麦提提等. NaCl 胁迫对黑果腺肋花楸幼苗生长特性的影响[J/OL]. 分子植物育种, 2022: 1-21. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=TmrGBFWiZl2PoJWtUfyB_7ex4ZY-G5m6-HS-_EXY4LMdk_HUYjWSIzhhFsQur3BEkeO7HiNnVVhnYaOaRqESSHAErObvZ8BWBbVeXWakoOLaT3aOaeHIFe-3eguB0gaPm4SbUzhedpfQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
ZHANG C S, TUOHETUMAIMAITI Z, MAIMAITI A, NUER Y. Effects of NaCl stress on growth, photosynthetic performance and carbohydrate accumulation of *Aronia melanocarpa* seedlings[J/OL]. Molecular Plant Breeding, 2022: 1-21. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=TmrGBFWiZl2PoJWtUfyB_7ex4ZY-G5m6-HS-_EXY4LMdk_HUYjWSIzhhFsQur3BEkeO7HiNnVVhnYaOaRqESSHAErObvZ8BWBbVeXWakoOLaT3aOaeHIFe-3eguB0gaPm4SbUzhedpfQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
 - [19] 刘吉, 黄梦桑, 赵敏华, 葛晨辉, 王全华, 王小丽. NaCl 胁迫对菠菜萌发和苗期生理特性的影响[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2022, 51(1): 1-8.
LIU J, HUANG M S, ZHAO M H, GE C H, WANG Q H, WANG X L. Effects of NaCl stress on seed germination and the physiological characteristics of spinach[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences Edition), 2022, 51(1): 1-8. (in Chinese)
 - [20] 洪森荣, 陈轩宇, 李文丽, 张座栋, 刘军, 刘佳, 蔡红, 陈荣华. 盐胁迫对怀玉山三叶青 2 个栽培种试管苗生理特性和次生代谢产物的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(9): 38-45.
HONG S R, CHEN X Y, LI W L, ZHANG Z D, LIU J, LIU J, CAI H, CHEN R H. Effects of salt stress on physiological characteristics and secondary metabolites of two cultivated seedlings of *Trifolium trichocarpa* in Huaiyu Mountain[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(9): 38-45. (in Chinese)
 - [21] 胡爱双, 张小栋, 王文成, 李凯超, 孙宇. 盐胁迫对不同耐盐性八棱海棠株系生理特性的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(3): 335-343.

- HU A S, ZHANG X D, WANG W C, LI K C, SUN Y. Effects of salt stress on physiological characteristics of two strains of *Malus micromalus* Mak. with different salt tolerance[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(3): 335-343. (in Chinese)
- [22] 李晓燕, 宋占午, 董志贤. 植物的盐胁迫生理[J]. 西北师范大学学报, 2004, 40(3): 106-111.
- LI X Y, SONG Z W, DONG Z X. Plant physiology response to salt stress[J]. Journal of Northwest Normal University, 2004, 40(3): 106-111. (in Chinese)
- [23] 徐千瑞, 周星怡, 李贺鹏, 岳春雷. 土壤盐胁迫对日本茛苳生理生化特性的影响[J]. 浙江林业科技, 2022, 42(1): 24-30.
- XU Q R, ZHOU X Y, LI H P, YUE C L. Effect of different salt stress on physiological and biochemical properties of *viburnum japonicum*[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2022, 42(1): 24-30. (in Chinese)
- [24] 崔卓越, 徐皓, 田爱梅. 盐胁迫对紫丹参生长及生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(24): 70-74.
- CUI Z Y, XU H, TIAN A M. Effects of salt stress on growth and physiological characteristics of *Salvia miltiorrhiza bunge*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(24): 70-74. (in Chinese)
- [25] 郭仰东, 张磊, 李双桃, 曹芸运, 齐传东, 王晋芳. 蔬菜作物应答非生物逆境胁迫的分子生物学研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(6): 1167-1181.
- GUO Y D, ZHANG L, LI S T, CAO Y Y, QI C D, WANG J F. Progresses in research on molecular biology of abiotic stress responses in vegetable crops[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(6): 1167-1181. (in Chinese)