

盐胁迫对5种草本植物生理生长特性的影响及耐盐性评价

王晓玲^{1,2} 杨洁^{1,3} 王思凡^{1,4} 林文波⁵ 郭萍萍⁵
刘芳⁶ 袁宗胜¹

(1. 闽江学院地理与海洋学院/福州海洋研究院, 福建 福州 350108; 2. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002; 3. 福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州 350108; 4. 福建农林大学未来技术学院, 福建 福州 350002; 5. 福建闽江河口湿地国家级自然保护区管理处, 福建 福州 350200; 6. 福建农林大学生命科学学院, 福建 福州 350002)

摘要: 以天门冬、蟛蜞菊、海马齿、厚藤和天人菊5种草本植物为研究对象, 采用根系与叶片两种盐胁迫方式研究5种供试植物生长和生理特性变化, 运用主成分分析和隶属函数分析方法综合评价其耐盐能力。结果表明: 5种植物生长均受到盐胁迫不同程度的抑制。在根系盐胁迫中, 0.1% (G_1) 盐浓度处理海马齿 RWC 高于 CK, 0.2% (G_2) 和 0.3% (G_3) 盐浓度处理蟛蜞菊 RWC 除第28天外均高于 CK, 各处理天人菊 POD 活性高于 CK, 蟛蜞菊、海马齿和天人菊 CAT 活性高于 CK; 叶片盐胁迫中, 0.2% (Y_1) 盐浓度处理海马齿 RWC 高于 CK, 蟛蜞菊和厚藤 POD 活性高于 CK, 0.3% (Y_2) 盐浓度处理天人菊 RWC 在处理第14、28天显著高于 CK, 蟛蜞菊 POD 活性高于 CK, 各处理蟛蜞菊、海马齿和厚藤 CAT 活性均高于 CK。2种盐胁迫方式下, 各处理, 5种供试植物 SPAD 值在盐处理14d后显著低于 CK, MDA 含量在整个盐胁迫阶段均高于 CK。综合评价5种供试植物耐盐性, 根系盐胁迫下5种供试植物耐盐能力强弱排序为海马齿>天门冬=天人菊>蟛蜞菊>厚藤, 叶片盐胁迫下5种供试植物耐盐能力强弱排序为蟛蜞菊>海马齿>天门冬>天人菊>厚藤。因此, 5种供试植物中海马齿、天门冬、蟛蜞菊在受到根系盐胁迫后耐盐性较强, 在受叶片盐胁迫后仅有海马齿和蟛蜞菊的耐盐性较强, 其中海马齿在受到根系和叶片盐胁迫后耐盐性均较强。

关键词: 草本植物; 生长生理; 盐胁迫; 耐盐性; 评价

中图分类号: Q945

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2025)05-0001-10

引文格式: 王晓玲, 杨洁, 王思凡, 等. 盐胁迫对5种草本植物生理生长特性的影响及耐盐性评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(5): 1-10. WANG Xiaoling, YANG Jie, WANG Sifan, et al. Evaluation of growth and physiological salt tolerance of 5 herbaceous plants[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(5): 1-10. DOI: [10.11929/j.swfu.202407010](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202407010)



Evaluation of growth and physiological salt tolerance of 5 herbaceous plants

WANG Xiaoling^{1,2}, YANG Jie^{1,3}, WANG Sifan^{1,4}, LIN Wenbo⁵, GUO Pingping⁵,
LIU Fang⁶, YUAN Zongsheng¹

(1. College of Geography and Oceanography, Minjiang University/Fuzhou Institute of Oceanography, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 4. College of Future Technology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 5. Fujian Minjiang River Estuary Wetland National Nature Reserve Management Office, Fuzhou, Fujian 350002, China; 6. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and

收稿日期: 2024-07-10; 修回日期: 2024-09-12

基金项目: 福州海洋研究院科技项目(2022F06)资助; 福建省林业科技项目(2023FKJ12)资助。

第1作者: 王晓玲(2001—), 女, 硕士研究生。研究方向: 资源利用与植物保护。Email: 15247434964@163.com。

通信作者: 袁宗胜(1976—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 资源与环境、微生物资源开发与利用。Email: yuanzs369@163.com。

Forestry University, Fuzhou, Fujian350002, China)

Abstract: Five species of herbs, including *Asparagus cochinchinensis*, *Wedelia chinensis*, *Sesuvium portulacastrum*, *Ipomoea pes-caprae*, *Gaillardia pulchella* were studied. The growth and physiological characteristics of 5 tested plants were studied by means of two salt stress methods of roots and leaves, and their salt tolerance was comprehensively evaluated by principal component analysis and membership function analysis, and salt-tolerant plants suitable for planting on coastal sandy soil were selected to provide references for the treatment of coastal sandy soil by phytoremediation. The results showed that the growth of the five plants was inhibited by salt stress to different degrees. Under root salt stress, the RWC of *Sesuvium portulacastrum* in 0.1%(G₁) salt concentration group was significantly higher than that of CK, the RWC of *Wedelia chinensis* in 0.2%(G₂) and 0.3%(G₃) salt concentration groups was significantly higher than that of CK except day 28. The POD activity of *Gaillardia pulchella* was higher than CK in all treatment groups. The CAT activity of *Wedelia chinensis*, *Sesuvium portulacastrum* and *Gaillardia pulchella* was higher than CK. Under leaf salt stress, the RWC of *Sesuvium portulacastrum* in 0.2%(Y₁) salt treatment group was higher than CK, POD activities of *Wedelia chinensi* and *Ipomoea pes-capra* were higher than CK, and the RWC of *Gaillardia pulchella* in 0.3%(Y₂) salt treatment group was significantly higher than CK at the 14th and 28th days, POD activities of *Wedelia chinensis* were higher than CK. The CAT activities of *Wedelia chinensis*, *Sesuvium portulacastrum* and *Ipomoea pes-capra* were higher than those of CK in all treatment groups. Under the two salt stress modes, SPAD value of 5 tested plants in each treatment group was significantly lower than CK after 14 days of salt treatment, and MDA content was higher than CK during the whole salt stress stage. The salt tolerance of the 5 tested plants was evaluated comprehensively. The salt tolerance of the 5 tested plants was evaluated comprehensively. The salt tolerance of the 5 tested plants under root salt stress was ranked as *Sesuvium portulacastru* > *Asparagus cochinchinensis* = *Gaillardia pulchella* > *Wedelia chinensis* > *Ipomoea pes-caprae*. The order of salt tolerance of the five plants under salt stress was *Wedelia chinensi* > *Sesuvium portulacastrum* > *Asparagus cochinchinensis* > *Gaillardia pulchella* > *Ipomoea pes-capra*. The comprehensive analysis showed that *Sesuvium portulacastru*, *Asparagus cochinchinensis* and *Wedelia chinensi* showed stronger salt tolerance after root salt stress, while only *Sesuvium portulacastru* and *Wedelia chinensi* showed stronger salt tolerance after leaf salt stress, and hippocampi showed stronger salt tolerance after root and leaf salt stress.

Key words: herbs; 111111; Salt stress; Salt tolerance; Comprehensive evaluation

滨海是我国盐渍地的主要分布区之一,以沙土为主,位于海陆交界地带。由于海水倒灌、含盐较多的水雾沉积等原因,该区域 80% 面积的土壤形成盐渍土,重度盐渍化土壤占该区域土地面积的 28.4%^[1]。土壤层 1 m 以内的含盐量都在 0.3% 左右,含盐量高处甚至可以达到 2% 乃至更高^[2]。土壤含盐量高,会对植物造成离子毒害以及氧化损伤,影响植物养分吸收、生长发育,随着盐浓度的增加,甚至会造成植株死亡。但在滨海盐碱地种植多样化的植物,对于生态可持续发展具有重要意义^[3]。因此,探究适宜生长在滨海盐碱地的植物是实现滨海盐碱地可持续利用的必要举措。

有众多研究发现多数植物在开垦盐碱土壤方面具有潜在用途^[1]。例如,宋延静等^[4]研究发现

枸杞 (*Lycium chinense*)、怪柳 (*Tamarix chinensis*) 和陆地棉 (*Gossypium hirsutum*) 可以提高盐渍土壤肥力,并将微生物群落由嗜盐类群转变为有机化合物降解类群。盐胁迫会影响植株的生长状态和生理功能,其外观特征和生长发育情况,是反映植株受盐害影响程度最直接的标志^[5]。Liu 等^[6]研究发现在盐胁迫条件下,桔梗的株高、叶片数量、茎长和地上部分干物质重量均呈现下降趋势,而地下部分的含水量和幼苗根长下降幅度相对较小。盐胁迫的耐受性通常与氧化胁迫有关,而受到盐胁迫的后果之一是就产生活性氧 (ROS)。为维持 ROS 稳定,植物进化出酶促防御系统,以缓解胁迫对植物带来的损伤,而主要的植物 ROS 清除酶包括超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT)

等^[7]。宿梅飞等^[8]研究发现种植于盐碱地的樱桃、番茄幼苗的 SOD、POD 活性经抗盐处理后高于不经抗盐处理，表明经抗盐处理后樱桃、番茄幼苗对盐碱的适应能力显著提高。

沙生植物作为滨海沙地生态系统的重要组成部分，在海岸带生态稳定中发挥着重要作用^[9]。但滨海地区由于海水侵灌以及水雾含盐分较多，成为抑制滨海植物生长的重要因素之一^[10]。天门冬（*Asparagus cochinchinensis*）广泛分布于华东、中南等地，在海拔 1750 米以下的坡地、路边、沙地等皆可生长^[11]。王巨媛等^[12]研究发现其具有一定的耐盐性。蟛蜞菊（*Wedelia chinensis*）广泛分布于东部沿海、岛屿和华南等地区，在陡壁、河滩等地方可通过快速的克隆生长迅速扩展^[13]。张彬等^[14]研究发现低浓度盐胁迫对本地蟛蜞菊生长有促进作用。海马齿（*Sesuvium portulacastrum*）具有耐盐碱、耐旱等特性^[15]。李雨欣等^[16]研究发现海马齿在盐胁迫下具有一定的耐盐性。厚藤（*Ipomoea pescaprae*）广泛分布于热带及亚热带沿海地区，有研究表明其有防风固沙和恢复生态等重要生态功能，在滨海生态恢复和重建过程具有重要应用价值^[17]。王正加等^[18]研究发现厚藤可以作为一种理想的耐盐植物。天人菊（*Gaillardia pulchella*）花期长且生性坚韧^[19]。白芙嘉等^[20]研究发现天人菊种子对低浓度盐胁迫具有一定的耐受性。5 种植物不仅均可种植于沙地，且均有一定的耐盐能力，但关于将其种植于滨海地区后其对盐胁迫响应的研究较为少见。本研究旨在通过模拟滨海沙地土壤对 5 种植物进行根系和叶片盐胁迫实验，评估其耐盐能力，以期为滨海沙地筛选更多适宜种植的耐盐植物，为稳定海岸带生态，达到防风固沙、生态修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

于 2023 年 7 月在福建农林大学菌物研究中心进行试验，选取天门冬、蟛蜞菊、海马齿、厚藤、天人菊 5 种草本植物为试验研究对象。其中天门冬、蟛蜞菊、天人菊购买自漳州苗木基地；海马齿、厚藤由福州海洋研究院提供。并用购自青岛海科通用海水素有限公司的海盐配置不同浓度盐水。

1.2 试验设计

选择健康且生长状况较为一致的植株种植于含有河沙：红壤土体积比均为 1：1 的盆栽基质的

花盆（外口径 20 cm、内口径 19 cm、底径 14.2 cm、高 17.3 cm，质量为 4 kg/盆）中，每盆种植 3 株，并对其进行胁迫处理。胁迫分为根系盐胁迫和叶片盐胁迫两种处理方式，具体设置见表 1，每组处理设置 3 个重复。

表 1 5 种供试植物盐胁迫试验处理
Table 1 Salt stress test treatment of 5 tested plants

处理	处理方式	盐浓度/%
CK	不施加盐溶液	0.0
G ₁	试验初期以灌根方式施加 1 次盐溶液	0.1（盐与栽培基质质量比）
G ₂	试验初期以灌根方式施加 1 次盐溶液	0.2（盐与栽培基质质量比）
G ₃	试验初期以灌根方式施加 1 次盐溶液	0.3（盐与栽培基质质量比）
Y ₁	每 7 d 采用叶面喷施方式施用 1 次盐溶液，每次喷施至有水滴落为准。	0.2（盐与蒸馏水质量比）
Y ₂	每 7 d 采用叶面喷施方式施用 1 次盐溶液，每次喷施至有水滴落为准。	0.3（盐与蒸馏水质量比）

胁迫周期共 4 周，将第 1 次进行胁迫处理记为第 0 天。试验期间每 7 天观测供试植物生长情况并进行赋值处理，并测定其叶片相对含水量（RWC）以及叶绿素相对含量（SPAD 值），每隔 14 d 测定其丙二醛（MDA）含量、过氧化物酶（POD）活性以及过氧化氢酶（CAT）活性。

1.3 指标测定方法

植株生长状态采用赋值法按照植物生长状态由好到差的顺序梯度，将植株生长状态赋予 0~5 的数值进行评价^[21]。5：正常；4.5：5% 叶片发黄；4：10% 叶片发黄、干枯；3.5：20% 叶片发黄；3：30% 叶片发黄、干枯并卷曲；2.5：50% 叶片发黄、下垂；2：70% 叶片发黄、干枯；1.5：80% 叶片出现发黄、下垂情况；1：几乎无绿叶；0.5：地上部死亡；0：植株死亡。

选取中上部长势良好、无病虫害的新鲜叶片，每个处理测定 3 株，每株选取 3 片叶片，用以下方法测定其叶片相对含水量、叶绿素相对含量、MDA 含量、POD 活性、CAT 活性，分别取平均值。

采用烘干法测定供试植株叶片相对含水量^[22]。采用 SPAD-502 Plus 手持叶绿素仪（Konica Minolta，日本）测定叶绿素相对含量^[23]。MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定^[24]，POD 活性采用愈创木酚显色法测定^[24]，CAT 活性采用紫外吸收法测定^[24]。

1.4 数据处理

运用 Excel 2007 进行前期数据整理统计，

SPSS 27.0 和 Origin 2024 进行单因素和双因素方差分析及多重比较 ($P < 0.05$), 并作图。根据测定的各项指标, 采用主成分分析和隶属函数值法进行综合评价^[25]。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对 5 种草本植物生长状态影响

由图 1 可知, 不同盐胁迫处理下 5 种供试植物生长均随着盐浓度增加受到抑制。G₁ 中, 海马齿的生长受到的抑制最小, 较 CK 降幅为 13.40%,

并在其受到盐胁迫处理 21 d 后与 CK 产生显著差异 ($P < 0.05$); G₂ 和 G₃ 中, 海马齿和厚藤的生长受到的抑制最小, 较 CK 降幅分别为 23.4%、26.6%, 并且 2 种供试植物均在其受到盐胁迫处理 14 d 后与 CK 产生显著差异 ($P < 0.05$); Y₁ 和 Y₂ 中, 蟛蜞菊、海马齿以及厚藤的生长受到的抑制最小, 在 Y₁ 中降幅均为 23.4%, Y₂ 中降幅均为 26.6%, 且 3 种供试植物都在其受到盐胁迫处理 21 d 后与 CK 产生显著差异 ($P < 0.05$)。

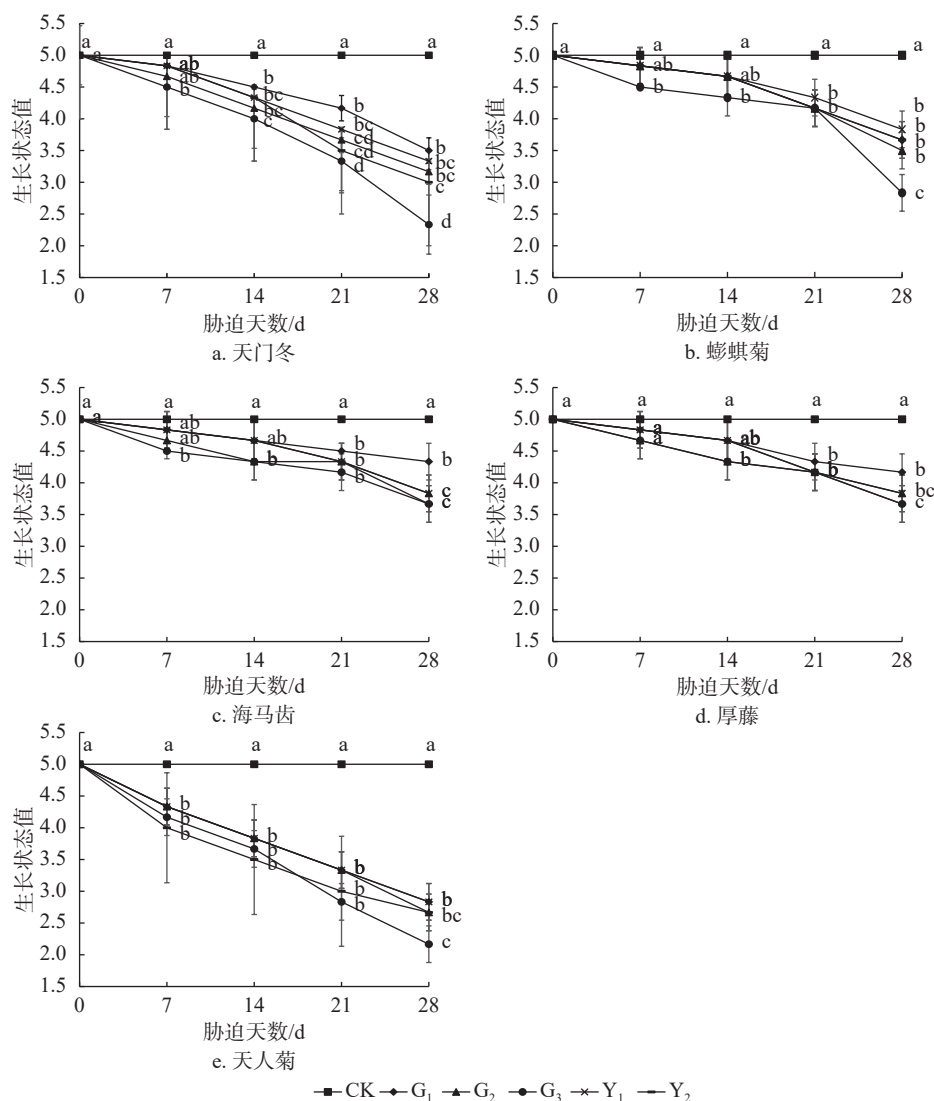


图 1 盐胁迫下各供试植物生长变化

Fig. 1 Growth changes of tested plants under root salt stress

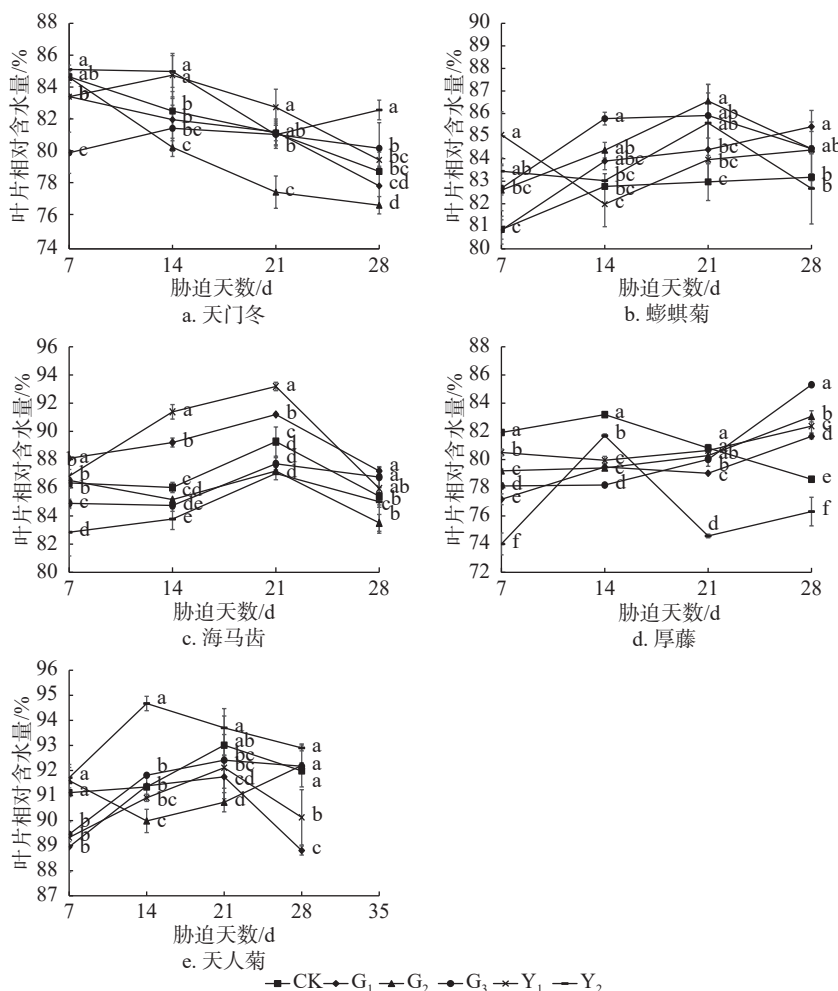
2.2 盐胁迫对供试植物叶片相对含水量的影响

由图 2 可知, 在整个盐胁迫阶段, G₁ 和 Y₁ 中, 5 种供试植物仅有海马齿 RWC 高于 CK, G₁ 与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$), Y₁ 仅在胁迫

第 14、21 天与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$); G₂ 和 G₃ 的则仅有蟛蜞菊 RWC 均高于 CK, G₂ 仅在胁迫第 21 天与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$), G₃ 则在胁迫第 14、21 天与 CK 有显著差异 ($P <$

0.05); Y_2 的天人菊 RWC 均高于 CK, 在胁迫第 14 天与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$)。对比胁迫第 28 天 5 种供试植物 RWC, G_1 、 G_2 、 G_3 中 5 种

供试植物中仅有蟛蜞菊和厚藤在受到胁迫后均较 CK 显著增加 ($P < 0.05$), 增幅分别为 2.69% 和 3.87%、1.51% 和 5.69%、1.51% 和 8.54%。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 盐胁迫对供试植物叶片相对含水量的影响

Fig. 2 Effect of root salt stress on the relative water content of plant leaves

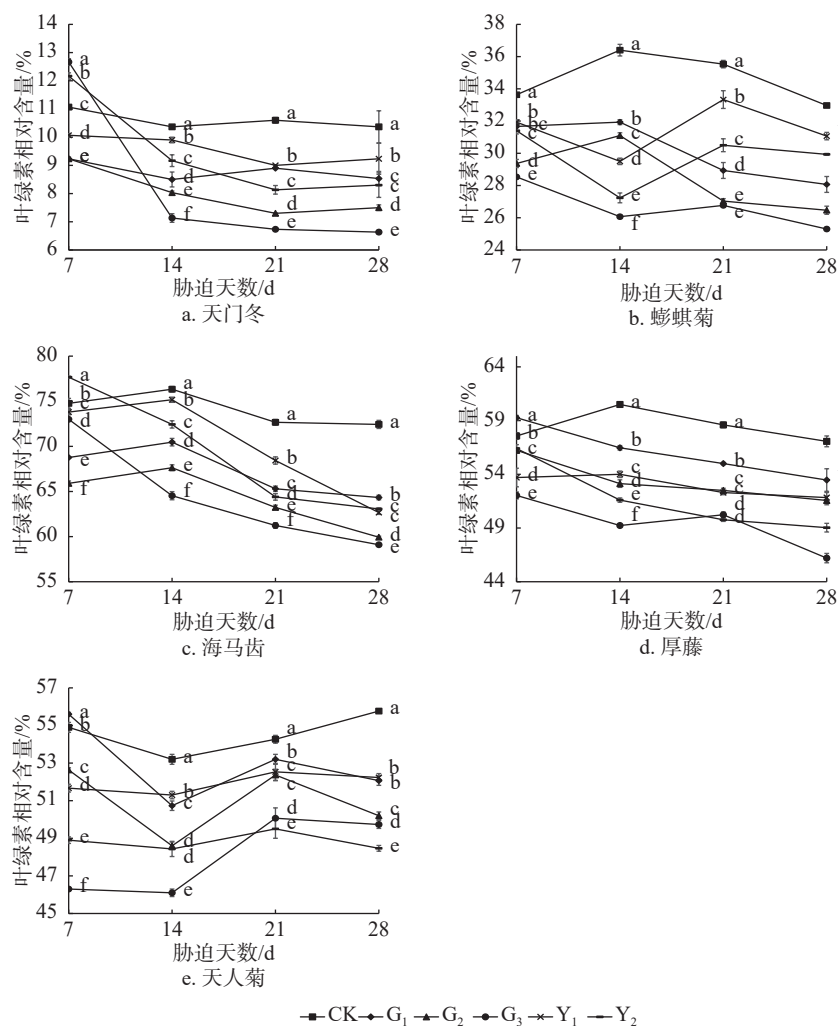
2.3 盐胁迫对供试植物叶绿素相对含量的影响

由图3可知, 根系盐胁迫处理后第7天, 各处理5种供试植物 SPAD 值均与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$), 其中 G_1 的厚藤和天人菊 SPAD 值较 CK 升高, 增幅分别为 2.95%、1.28%。 G_2 和 Y_1 的 5 种供试植物 SPAD 值均低于 CK; G_3 的天门冬 SPAD 值较 CK 升高, 增幅为 14.45%; Y_2 的天门冬和海马齿高于 CK, 增幅分别为 9.94%、3.88%。处理 14d 后随着盐浓度增加, 5 种供试植物 SPAD 值均呈下降趋势, 并且各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$)。

2.4 盐胁迫对供试植物 MDA 含量的影响

由图4可知, 5 种供试植物的 MDA 含量在各处理均高于 CK。盐胁迫处理第 14 天, G_1 和

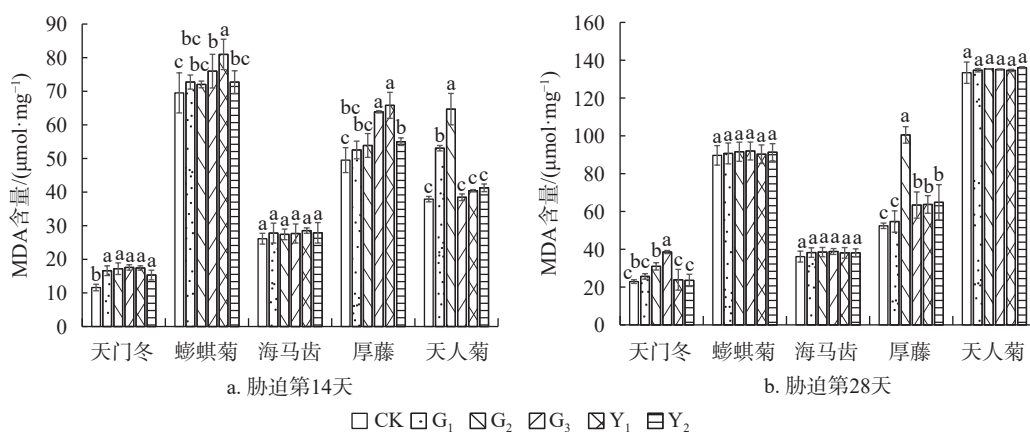
G_2 的天门冬和天人菊 MDA 含量与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 较 CK 增幅分别为 43.06%、40.00% 和 48.19%、70.64%; G_3 和 Y_1 的天门冬、蟛蜞菊和厚藤 MDA 含量与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 增幅分别为 51.39%、9.30%、28.99% 和 50.00%、16.47%、32.90%; Y_2 的厚藤 MDA 含量与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$), 增幅为 11.07%。盐胁迫第 28 天, G_1 的 5 种供试植物均与 CK 无差异显著 ($P < 0.05$); G_2 和 G_3 的天门冬和厚藤 MDA 含量与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 较 CK 增幅分别为 35.21%、91.69% 和 68.31%、20.92%; Y_2 和 Y_3 的厚藤 MDA 含量与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$), 增幅分别为 21.54%、23.69%。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 盐胁迫对供试植物叶绿素相对含量的影响

Fig. 3 Effect of root salt stress on relative chlorophyll content of tested plants



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 盐胁迫对供试植物MDA含量的影响

Fig. 4 Effect of root salt stress on MDA content of tested plants

2.5 盐胁迫对供试植物 POD 活性的影响

由图5可知,整个盐胁迫阶段,G₁、G₂、G₃的5种供试植物中只有天人菊POD活性高于CK,

第14天增幅分别为6.83%、15.36%、92.46%,第28天增幅分别为131.97%、8.80%、66.74%。在胁迫处理第14天中3个处理只与G₃和CK有

显著差异 ($P < 0.05$)，而胁迫处理第 28 天则只与 G_1 和 CK 有显著差异 ($P < 0.05$)； Y_1 只有蟛蜞菊和厚藤 POD 活性高于 CK，增幅分别为 89.58%、5.21% 和 14.49%、9.11%，2 种供试植物

均在第 14 天与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$)； Y_2 则只有蟛蜞菊 POD 活性高于 CK，增幅分别为 79.27%、16.36%，在处理第 14 天与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$)。

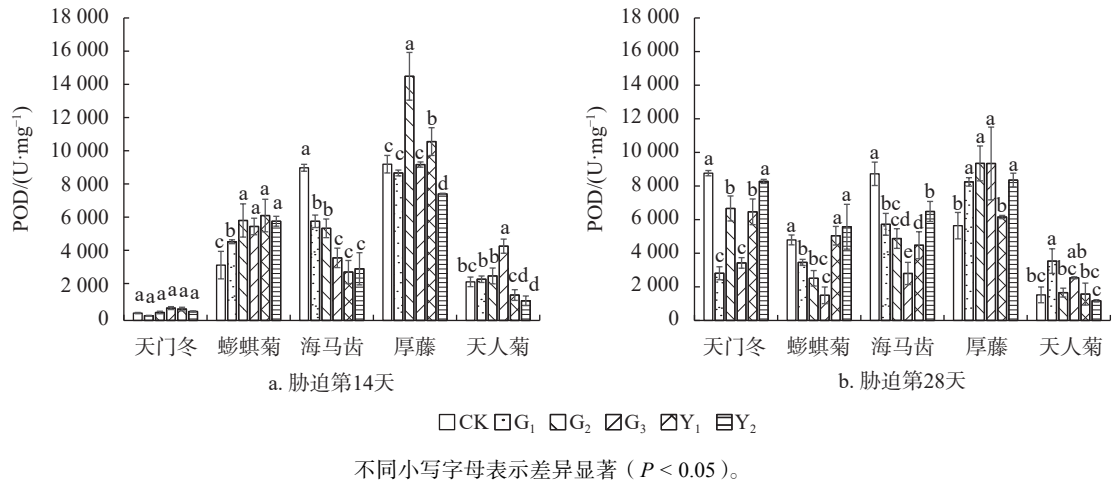


图 5 盐胁迫对供试植物 POD 活性的影响
Fig. 5 Effect of root salt stress on POD activity of tested plants

2.6 盐胁迫对供试植物 CAT 活性的影响

由图 6 可知，整个盐胁迫处理阶段， G_1 、 G_2 、 G_3 处理的 5 种供试植物中只有蟛蜞菊、海马齿和天人菊 CAT 活性均高于 CK，处理第 14 天和第 28 天增幅分别为 6.83%、15.36%、92.46% 和 131.97%、8.80%、66.74%，其中 3 种供试植物在胁迫处理第 14 天均与 G_3 和 CK 有显著差异 ($P < 0.05$)，第 28 天则均与 G_1 和 CK 有显著差异 ($P <$

0.05)。 Y_1 处理 5 种供试植 CAT 活性均高于 CK，其中在胁迫第 14 天只有天人菊 CAT 活性与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$)，增幅为 23.09%，胁迫第 28 天则只有蟛蜞菊 CAT 活性与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$)，增幅为 20.05%； Y_2 的蟛蜞菊、海马齿和厚藤 CAT 活性高于 CK，其中只有蟛蜞菊 CAT 活性与 CK 有显著差异 ($P < 0.05$)，增幅为 14.41%。

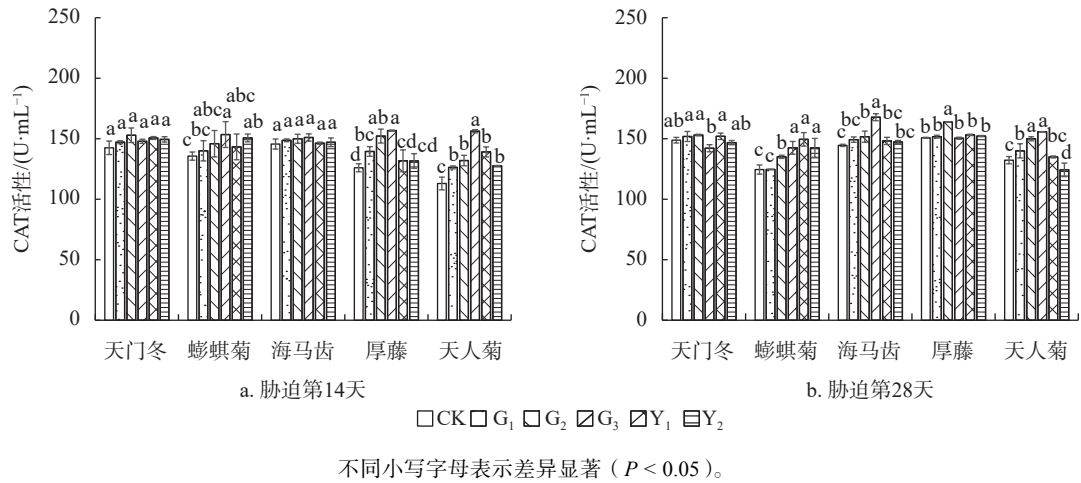


图 6 盐胁迫对供试植物 CAT 活性的影响
Fig. 6 Effect of root salt stress on CAT activity of tested plants

2.7 供试植物耐盐性综合评价

对 5 种供试植物盐处理后测定的 5 个指标进行主成分分析，提取出 3 个累积贡献率达 80% 的指标，对其余指标作充分概括 (表 2 ~ 3)。其中

根系盐胁迫下 3 个主成分权重分别占比 0.551、0.264、0.185；叶片盐胁迫下 3 个主成分权重分别占比 0.492、0.304、0.204。在此基础上，对其进行隶属函数分析，并计算综合指标 (D) 值发现，

根系盐胁迫下5种供试植物耐盐能力强弱排序为海马齿>天门冬和天人菊>蟛蜞菊>厚藤,其中海马齿、天门冬、天人菊、蟛蜞菊的 D 值均大于0.80(表4);叶片盐胁迫下五种供试植物耐盐能力强弱排序为蟛蜞菊>海马齿>天门冬>天人菊>厚藤,其中蟛蜞菊和海马齿的 D 值大于0.80(表5)。

表2 根系盐胁迫下各因子载荷矩阵、特征值及贡献率

Table 2 Load matrix, characteristic value and contribution rate of each factor under root salt stress

生长指标	主成分		
	1	2	3
叶片相对含水量	-0.882	-0.341	-0.067
叶绿素含量	0.604	-0.175	0.768
MDA含量	0.088	0.984	-0.020
POD活性	0.816	-0.107	-0.213
CAT活性	0.787	-0.247	-0.441
贡献率	48.70	23.74	16.69
累积贡献率	48.70	72.43	89.13
因子权重	0.55	0.27	0.19

表3 叶片盐胁迫下各因子载荷矩阵、特征值及贡献率

Table 3 Load matrix, characteristic value and contribution rate of each factor under leaf salt stress

生长指标	主成分		
	1	2	3
叶片相对含水量	0.096	0.193	0.873
叶绿素含量	-0.394	-0.159	0.300
MDA含量	0.159	0.621	0.052
POD活性	0.488	-0.061	-0.118
CAT活性	0.281	-0.535	0.300
贡献率	39.45	27.10	20.88
累积贡献率	39.45	66.54	87.42
因子权重	0.45	0.31	0.24

表4 根系盐胁迫下对5种供试植物进行隶属函数分析

Table 4 Principal components and membership functions of five tested plants were analyzed under root salt stress

物种名称	处理	隶属函数			D 值	均值	排序
		μ_1	μ_2	μ_3			
天门冬	G ₁	0.00	0.67	0.61	0.85	0.87	2
	G ₂	0.06	0.74	0.14	0.88		
	G ₃	0.04	0.81	0.34	0.87		
蟛蜞菊	G ₁	0.15	0.14	0.72	0.84	0.84	3
	G ₂	0.20	0.09	0.34	0.81		
	G ₃	0.19	0.15	0.00	0.87		
海马齿	G ₁	0.10	0.15	0.94	0.90	0.88	1
	G ₂	0.07	0.16	0.74	0.88		
	G ₃	0.10	0.13	0.66	0.85		
厚藤	G ₁	0.36	0.05	1.00	0.64	0.57	4
	G ₂	0.53	0.00	0.50	0.66		
	G ₃	0.35	0.34	0.31	0.42		
天人菊	G ₁	0.83	0.62	0.93	0.80	0.87	2
	G ₂	0.75	1.00	0.72	0.82		
	G ₃	1.00	0.02	0.07	0.99		

表5 叶片盐胁迫下对5种供试植物进行隶属函数分析

Table 5 Principal components and membership functions of five tested plants were analyzed under leaf salt stress

物种名称	处理	隶属函数			D 值	均值	排序
		μ_1	μ_2	μ_3			
天门冬	Y ₁	0.67	1.00	0.71	0.78	0.75	3
	Y ₂	0.61	0.89	0.72	0.72		
蟛蜞菊	Y ₁	0.83	0.24	0.89	0.66	0.85	1
	Y ₂	1.00	0.16	0.72	0.67		
海马齿	Y ₁	0.00	0.56	1.00	0.41	0.81	2
	Y ₂	0.02	0.40	0.46	0.24		
厚藤	Y ₁	0.54	0.77	0.58	0.62	0.62	5
	Y ₂	0.51	0.40	0.00	0.35		
天人菊	Y ₁	0.29	0.00	0.76	0.31	0.73	4
	Y ₂	0.33	0.53	0.74	0.49		

3 结论与讨论

3.1 供试植物对盐胁迫的形态响应

土壤盐渍化会影响植物的生长发育,对其根系的影响主要由于盐离子过量,盐度对土壤造成压力,阻止水分排出,养分无法到达根系吸收区,从而抑制其生长^[26]。对植物叶片的影响是由于盐离子在叶片表面沉积,被叶片角质层吸收和积累,使植物的形态和生理特征受到影响^[27]。植物外部形态和生长状况可以最直观的反映植物受盐害影响程度^[28]。同时有研究发现植物在受到盐胁迫后其地上部降幅要高于地下部分^[6]。本研究通过观察植物叶片生长情况发现,5种供试植物的生长在受到根系盐胁迫和叶片盐胁迫后均受到不同程度的抑制,其中对比5种供试植物发现天人菊的生长状态值降幅最大。在此之前也有研究发现在运用盐雾胁迫处理厚叶石斑木(*Rhaphiolepis umbellata*)等9种植物生长均受到抑制^[10]。该结果进一步证明了胁迫对植物生长有一定的抑制。

3.2 供试植物对盐胁迫的生理响应

盐胁迫会导致植物叶片受损,水分大量流失,叶绿素被降解,因此叶绿素含量和叶片相对含水量可直接体现植物受损程度^[29]。有研究发现盐胁迫下,植物还会增加对水分的吸收,将其储存在体内,使茎叶变得更加肉质化,提高组织含水量,以此稀释体内的盐分并降低盐浓度,减少盐胁迫对自身危害^[30]。RWC能够反映植物的保水能力,胁迫下RWC越高,说明植物耐盐性越强^[31]。本研究发现,G1处理在整个根系盐胁迫阶段只有海马齿RWC高于CK,G2和G3处理则只

有蟛蜞菊 RWC 高于 CK; Y1 处理在整个叶片盐胁迫阶段只有海马齿高于 CK, Y2 处理则只有天人菊 RWC 高于 CK。这表明根系盐胁迫下海马齿和蟛蜞菊的有一定稀盐能力, 叶片盐胁迫下海马齿和天人菊有一定的稀盐能力。有研究发现盐胁迫会破坏叶绿体结构, 使叶绿素含量降低^[32]。本研究发现在受到盐胁迫处理 14 天后, 5 种供试植物的叶绿素含量均显著低于 CK。姜超等^[33]研究发现受到盐胁迫后植株叶片叶绿素含量均下降, 与本研究结果一致。这可能是由于盐处理后盐离子渗入叶肉细胞, 造成细胞毒害, 激发了细胞内的叶绿素酶活性, 叶绿素降解加快, 叶绿素含量减少^[34]。

胁迫会打破原有活性氧产生与清除的动态平衡, 导致细胞膜脂过氧化作用加强, 膜系统受损。通过测定 MDA 含量高低可反映膜系统的受损程度^[35]。有研究测定了盐胁迫下白三叶等 8 种草本植物的 MDA 含量, 发现 8 种草本植物在受到胁迫处理后其 MDA 含量较 CK 均增加^[25]。同时有研究发现植物的抗胁迫能力与其抗氧化酶类有关^[36]。在受到环境胁迫时植物可通过渗透调节 POD 和 CAT 活性等增大细胞质的浓度, 提高保水能力来抵抗逆境影响^[37]。赵颖等^[38]的研究结果也表明, 对于盐胁迫产生的活性氧的清除主要依赖 CAT 和 POD 共同作用。本研究中, 5 种供试植物 MDA 含量受到盐胁迫后均高于 CK, 与上述两位学者研究结果一致, 其中根系盐胁迫下, 海马齿 MDA 含量在各处理较 CK 均增幅不大, 其 POD 活性虽较 CK 无增幅, 但其 CAT 活性与 CK 有较大增幅; 叶片盐胁迫下, 海马齿和天人菊 MDA 含量在各处理较 CK 均增幅不大, 其 POD 活性虽较 CK 无增幅, 但天人菊 CAT 活性在处理第 14 天较 CK 有较大增幅, 海马齿 CAT 活性在整个盐胁迫阶段较 CK 均有较大增幅。说明海马齿在整个盐胁迫过程中, 可以通过维持较高的 CAT 活性来抵御盐胁迫造成的伤害。

3.3 供试植物耐盐性综合评价

用单一指标来评价植物的耐盐性难免片面, 为避免此情况通常在此基础上对植物耐盐性进行综合评价。其中进行综合评价的分析方法有很多, 一般常用的主要为主成分分析法和隶属函数, 而两者结合使用可以提高科学性^[39]。这种分析方法也已经广泛应用与植物的耐盐性研究中^[40]。有研究在评价 80 份紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 引进品种萌发期的耐盐性时运用了主成分分析、隶属函数及聚类分析相结合的方法划分出

了五个耐盐级别^[41]。在本研究中利用主成分分析将 5 个指标进行降维处理, 之后运用隶属函数进行二次加权, 最终得到综合指标 D 值, 对 5 种草本植物的耐盐性进行综合评价。根系盐胁迫下 5 种供试植物耐盐能力强弱排序为海马齿 > 天门冬、天人菊 > 蟛蜞菊 > 厚藤; 叶片盐胁迫下五种供试植物耐盐能力强弱排序为蟛蜞菊 > 海马齿 > 天门冬 > 天人菊 > 厚藤。

综上, 5 种供试植物中海马齿、天门冬、蟛蜞菊在受到根系盐胁迫后耐盐性较强, 在受叶片盐胁迫后仅有海马齿和蟛蜞菊的耐盐性较强, 其中海马齿在受到根系和叶片盐胁迫后耐盐性均较强。因此利用海马齿在修复滨海盐渍地上有较大潜力, 本结果可为采用草本植物修复滨海盐渍化提供参考依据。但本研究主要通过叶片指标的测定评价了天门冬、蟛蜞菊、海马齿、厚藤和天人菊的耐盐性, 未对其根系指标进行测定, 后续可对种植于特定地区植物进行更多耐盐指标的测定, 以获得更加全面可靠的评价结果。

[参 考 文 献]

- [1] Ravindran K C, Venkatesan K, Balakrishnan V, et al. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(10): 2661–2664.
- [2] 徐恒刚. 中国盐生植被及盐渍化生态治理 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [3] 华建峰, 汤诗杰. 关于江苏滨海盐碱地植物生态修复与固碳增汇协同增效的思考与建议 [J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(12): 233–235.
- [4] 宋延静, 马兰, 张晓黎, 等. 滨海盐度梯度土壤中固氮菌和反硝化菌的分布特征 [J]. *土壤通报*, 2024, 55(2): 471–482.
- [5] 王伶珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展 [J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5565–5577.
- [6] Liu B S, Kang C L, Wang X, et al. Physiological and morphological responses of *Leymus chinensis* to saline-alkali stress [J]. *Grassland Science*, 2015, 61(4): 217–226.
- [7] 刘爱林, 伏春美, 罗中阳, 等. 干旱胁迫下云南干热河谷区 6 个乡土草种生理生化特性的比较分析 [J]. *西部林业科学*, 2023, 52(6): 47–54, 63.
- [8] 宿梅飞, 魏小红, 韩厅, 等. 抗盐锻炼对盐胁迫下樱桃番茄幼苗成活率及生理特性的影响 [J]. *北方园艺*, 2019(2): 8–14.
- [9] 金赞, 朱栗琼, 招礼军, 等. 滨海沙地植物厚藤叶片生

- 理特征的季节变化 [J]. *广西植物*, 2022, 42(8): 1284–1293.
- [10] 陈国军, 刘维刚, 徐迎春, 等. 9 种滨海植物盐雾的耐性评价 [J]. *森林与环境学报*, 2018, 38(3): 341–347.
- [11] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [12] 王巨媛, 张敏, 郑丽英, 等. 盐胁迫对天门冬根系生理指标的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2010, 38(4): 45–47.
- [13] 刘勇涛, 戴志聪, 薛永来, 等. 外来入侵植物南美蟛蜞菊在中国的适生区预测 [J]. *广东农业科学*, 2013, 40(14): 174–178.
- [14] 张彬, 何伟杰, 周羽新, 等. 外来植物南美蟛蜞菊对模拟盐胁迫的响应 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(4): 105–111.
- [15] 郝明梅, 李斌, 李焕军, 等. 不同盐度和氮磷浓度条件下海马齿对水体氮磷的吸收效果及其生长响应 [J]. *海洋湖沼通报*, 2024, 46(2): 125–133.
- [16] 李雨欣, 罗秀丽, 张婷婷, 等. 盐胁迫下海马齿生理指标变化及相关基因表达分析 [J]. *农业生物技术学报*, 2022, 30(7): 1279–1289.
- [17] Lee J T, Yen L Z, Chu M Y, et al. Growth characteristics and anti-wind erosion ability of three tropical fore-dune pioneer species for sand dune stabilization [J]. *Sustainability*, 2020, 12(8): 3353.
- [18] 王正加, 黄有军, 龚宁, 等. 厚藤耐盐生理指标研究 [J]. *江西农业大学学报*, 2006, 28(2): 264–267.
- [19] 姚彤, 胡晓龙, 贾永红, 等. 玉米秸秆生物炭对天人菊土壤理化性质及根际土壤真菌群落结构的影响 [J]. *南方农业学报*, 2021, 52(4): 942–950.
- [20] 白芙嘉, 孙涛, 谭阳, 等. NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对天人菊种子萌发的影响 [J]. *园艺与种苗*, 2023, 43(1): 46–48.
- [21] 陈慧英, 汤坤贤, 孙元敏, 等. 海岛植被修复中的耐旱植物筛选及抗旱技术研究 [J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(2): 223–228.
- [22] 国家气象局编定. 农业气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [23] Saeed M, Zhao H B, Chen Z Y, et al. Wax bayberry is a suitable rootstock for Chinese red bayberry cultivated in saline-alkali soil [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 323: 112463.
- [24] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [25] 梁鹏飞, 郭全恩, 魏少萍, 等. 盐胁迫对 8 种草本植物幼苗生长和生理特性的影响 [J]. *草原与草坪*, 2022, 42(3): 63–72.
- [26] Jayakumar M, Surendran U, Manickasundaram P. Drip fertigation program on growth, crop productivity, water, and fertilizer-use efficiency of bt cotton in semi-arid tropical region of India [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46(3): 293–304.
- [27] Kekere O. Responses of *Kyllinga peruviana* lam. to sea water spray [J]. *Journal of Plant Studies*, 2014, 3(2): 30–38.
- [28] 杜运领, 陈玉珍, 钱爱国, 等. 4 种典型滨海植物的耐盐能力 [J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(1): 15–24.
- [29] 江毅, 李晨, 刘凡凡, 等. 盐胁迫下不同野生草莓品种生理响应及耐盐性差异分析 [J]. *北方园艺*, 2024: 1–14.
- [30] 张金林, 李惠茹, 郭妹媛, 等. 高等植物适应盐逆境研究进展 [J]. *草业学报*, 2015, 24(12): 220–236.
- [31] 胡星, 胡纪龙, 张敏, 等. 外源 NO 对盐胁迫下八角金盘叶片生理特性及解剖结构的影响 [J]. *西南林业大学学报 (自然科学)*, 2024, 44(6): 1–10.
- [32] Chang J, Cheong B E, Natera S, et al. Morphological and metabolic responses to salt stress of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars which differ in salinity tolerance [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 144: 427–435.
- [33] 姜超, 李佳悦, 潘文喧, 等. 不同盐胁迫处理对高丹草幼苗生理特性的影响 [J]. *饲料研究*, 2024: 1–13.
- [34] 葛江丽, 石雷, 谷卫彬, 等. 盐胁迫条件下甜高粱幼苗的光合特性及光系统 II 功能调节 [J]. *作物学报*, 2007, 33(8): 1272–1278.
- [35] 王柏茗, 聂江力, 裴毅, 等. NaCl 与 NaHCO₃ 单盐胁迫下秋萍红树莓的光合及生理指标响应 [J]. *云南农业大学学报 (自然科学)*, 2023, 38(2): 252–261.
- [36] Prochazkova D, Sairam R K, Srivastava G C, et al. Oxidative stress and antioxidant activity as the basis of senescence in maize leaves [J]. *Plant Science*, 2001, 161(4): 765–771.
- [37] 刘叶, 莫世伦, 项丽晴, 等. 不同种质穿心莲萌发期耐盐性评价 [J]. *北方园艺*, 2023(4): 101–110.
- [38] 赵颖, 魏小红, 赫亚龙, 等. 混合盐碱胁迫对藜麦种子萌发和幼苗抗氧化特性的影响 [J]. *草业学报*, 2019, 28(2): 156–167.
- [39] 张健, 袁嘉玮, 王璐, 等. 玉米自交系萌发期耐盐性评价研究 [J/OL]. *江苏农业科学*, 1–7[2024–09–13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1214.S.20240307.0903.002.html>.
- [40] 孙现军, 姜奇彦, 胡正, 等. 小麦种质资源苗期耐盐性鉴定评价 [J]. *作物学报*, 2023, 49(4): 1132–1139.
- [41] 王宁, 万畅, 高山, 等. 80 份紫花苜蓿引进品种萌发期耐盐性评价 [J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(2): 17–25, 52.

(责任编辑 冯 雪)