

海南岛海马齿种质资源收集及耐盐性初步筛选

阮雪玉, 丁国华, 陈玉凯, 司婷婷, 欧苏曼, 赵芳, 郑文炜, 王旭初

(海南师范大学生命科学院, 海口 571158)

摘要: 为了对海南岛野生海马齿种质资源进行收集和系统评价, 沿海南岛东线和西线进行 5 次环岛采样, 从海南岛 11 个市县收集到 16 个代表性地区的野生海马齿种质材料, 并对这些海马齿种质的地理分布、生长环境及伴生植物等进行了系统性调查研究。通过对收集的海马齿种质资源分布特点进行分析, 发现海马齿主要分布在平均海拔 7.4 m 左右海陆交汇处的沙滩上, 主要位于海南本岛的 18°14'~20°05' N 和 108°39'~110°59' E 区域内。另外, 观察到海马齿的主要伴生植物共计 27 种。为了筛选耐盐性较强的海马齿种质, 进一步比较分析了这 16 个地区的野生海马齿在不同浓度盐胁迫下的形态和生理变化特性, 并运用主成分分析方法对这些海马齿的耐盐性进行综合评估, 发现海口市江南城和文昌市清澜港两处的海马齿耐盐性更强, 而从儋州市洋浦新英湾和陵水黎族自治县盐尽村两处获得的海马齿耐盐性较弱。据现有资料所知, 这是首次对海南岛野生海马齿种质资源进行系统性调查搜集和耐盐性比较评估, 研究结果为后续研究海马齿极端耐盐分子机制及挖掘优良耐盐基因提供了宝贵试验材料并奠定了研究基础。

关键词: 海马齿; 盐生植物; 海南岛; 种质资源; 地理分布; 耐盐生理

Collection of *Sesuvium portulacastrum* Germplasm in Hainan Island and Salt Tolerance Test

RUAN Xue-yu, DING Guo-hua, CHEN Yu-kai, SI Ting-ting, Ousmane Ahmat Souleymane,

ZHAO Fang, ZHENG Wen-wei, WANG Xu-chu

(College of Life Sciences, Hainan Normal University, Haikou 571158)

Abstract: In order to collect and evaluate the wild germplasm resource for *Sesuvium portulacastrum* (L.) L. in the Hainan Island, we conducted five times of sample investigation in the coastal areas around the Hainan Island through eastern and western lines. Sixteen wild populations of *S. portulacastrum* (L.) L. were found from 11 cities or counties. We further collected information of the geographical distribution, growth environment, and associated plants for these *S. portulacastrum* (L.) L. germplasms. By analyzing their distribution characteristics, we found that *S. portulacastrum* (L.) L. was mainly distributed in beach and coastal areas with an average elevation about 7.4 m, ranging from north latitude 18°14'-20°05' N to east longitude 108°39'-110°59' E. 27 associated plants for *S. portulacastrum* (L.) L. were observed. We further analyzed the morphological and physiological characteristics of these plants under different salt conditions, followed by the principal component analysis to evaluate their salt tolerance ability. The wild germplasms collecting from Jiangnancheng in Haikou City and Qinglan Port of Wenchang City showed higher salt tolerance, whereas the samples from Yangpu Xinyingwan in Danzhou City and Yanjin Village in Lingshui Li Autonomous County were more salt-sensitive. Altogether, this study achieved a systematic investigation of the wild *S. portulacastrum* (L.) L. germplasm resource in Hainan

收稿日期: 2021-10-29 修回日期: 2021-11-19 网络出版日期: 2021-12-24

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20211029001>

第一作者研究方向为海马齿种质资源收集及耐盐性生理指标分析, E-mail: ruanxueyu18@163.com

通信作者: 王旭初, 研究方向为植物蛋白质组与抗盐分子机理, E-mail: xchwanghainan@163.com

基金项目: 海南省重大科技计划项目 (ZDKJ202008); 海南省高层次人才项目 (2019RC200)

Foundation projects: Key Science and Technology Program of Hainan Province (ZDKJ202008), High-level Talent Project in Hainan Province (2019RC200)

Island, and found several wild germplasm resource which served as valuable materials to unlock the molecular mechanism for salt tolerance in *S. portulacastrum* (L.) L..

Key words: *Sesuvium portulacastrum* (L.) L.; halophytes; Hainan Island; germplasm resources; geographical distribution; salt-tolerant physiology

海马齿 (*Sesuvium portulacastrum* (L.) L.) 是番杏科 (Aizoaceae) 海马齿属 (*Sesuvium* L.) 植物, 主要生长在热带近海岸的海边沙地及河流入海口两岸滩涂地带^[1]。海马齿是一种多年生肉质草本植物, 茎多分支, 匍匐生长, 长 20~50 cm, 叶对生, 抱茎, 花单生于叶腋内, 花期 4-7 月, 蒴果卵形, 种子亮黑色, 顶端凸起^[2]。海马齿具有很强的耐盐性, 是一种常见的海南滨海红树林伴生真盐生植物^[3]。

海马齿有极强的耐逆境能力, 对盐离子和重金属离子均具有很强的耐受性, 且具有区隔化富集盐离子和重金属离子的特性^[4,6]。海马齿可在淡水至全海水 (0~600 mmol/L) 的各种盐浓度环境下生长并完成生活史^[7], 其耐盐范围较广, 且在一定程度上具有喜盐特征, 适当盐浓度可促进海马齿的生长发育, 其适宜生长盐浓度范围在 100~300 mmol/L 之间^[8-9]。据报道, 在 900 mmol/L 氯化钠盐浓度处理时, 海马齿的生长明显受到抑制^[10], 在 1000 mmol/L 氯化钠的极端高盐溶液下, 仍然能存活一段时间, 但生长严重受到抑制, 部分植株甚至会死亡^[11]。另外, 海马齿对重金属铅、锌、镉等都具有一定的耐受性^[12]。据报道, 海马齿对锌有较强移除作用, 吸收的锌则主要积累在植物体根部^[13]。另外, 也有研究发现海马齿表现出很强的耐汞和富集汞的特性, 低浓度 (5~10 $\mu\text{mol/L}$) 的汞甚至可以促进海马齿生长发育^[14]。因此, 海马齿具有较强的重金属污染环境修复潜力, 加上繁殖快、移栽方便、易成活、生长迅速、生物量大等特点, 可采用生态浮床技术对污染环境进行生物修复^[15]。此外, 海马齿的营养价值较高, 具有高蛋白、低脂肪的营养特点, 是一种具有开发利用潜力的野生海洋蔬菜新品种^[16]。近年来, 随着海马齿在逆境胁迫下的生理变化和抗逆分子机理研究的深入, 其耐盐分子机理被逐渐解析^[17], 更多的海马齿耐盐基因功能通过转基因技术得到验证^[18], 这些极端耐盐基因为后续耐盐作物分子育种提供了宝贵的候选基因资源。

海马齿主要生长于热带和温带沿海沙滩地区, 在海南岛四周海滩和河流入海口也有零星分布, 但目前对海马齿的研究主要利用某一地区的材料进行常规生长变化比较和基本生理生化分析, 并未对海

南岛的海马齿野生资源进行系统性收集整理, 对海马齿在海南岛具体分布位置和不同生态型的生物学特性也缺乏比较研究。本研究通过对海马齿在海南岛沿海地区的系统性资源调查, 并进行生存环境、生物学特性等方面的比较研究, 获得了不同生态型海马齿, 为海马齿资源保护与可持续利用提供了一定研究基础, 为进一步开发利用海马齿提供了宝贵的种质资源。

1 材料与方法

1.1 材料收集

根据海南岛环岛地形, 选择东线临海的海口市、文昌市、琼海市、万宁市、陵水县和三亚市, 以及西线的儋州市、澄迈县、乐东县、昌江县和东方市共 11 个市县作为采样地点。利用 GPS 测量植株所在地的经纬度、海拔高度等。对调查点的植株生长情况进行观察和拍照记录, 在野生海马齿群落边界 20 m 范围内, 调查其伴生植物的种类, 参照已有的分布报道及分类学资料^[1], 对研究区内伴生植物进行鉴定, 并采集野生海马齿样品, 在海南师范大学生态园内及时将其扦插成苗, 采用盆栽种植, 对其种质资源进行保存。按照调查方案于 2018 年 9 月至 2019 年 5 月共分 5 次进行环岛调查采样, 重点关注沿海地区的各县村镇, 最终从上述 11 个市县中的 16 个地区采集到野生海马齿, 具体采样地点分别为: 海口市的新埠港和江南城, 文昌市的清澜港和东坡港, 琼海市下岭村, 万宁市港北村, 陵水黎族自治县的盐尽村和水沟坡, 三亚市的海棠区和吉阳区, 乐东黎族自治县的望楼港村, 东方市海东方公园, 昌江黎族自治县海尾镇, 儋州市的新隆村和新英湾, 澄迈县的东水港码头渡口。

1.2 盐胁迫处理

选取生长旺盛、长势均匀的海马齿植株作为母本, 摘取含有 1 个节点和两片对生叶的茎段, 约 4 cm 长, 将处理好的海马齿茎段定植于载体 (泡沫板) 上, 并将载体置于烧杯中保持漂浮状态^[19], 放入清水培育 7 d, 待其长根后, 每隔 1 周更换 1/2 霍格兰德营养液^[10]。培育 7 周 (49 d) 后, 再将不同地区海马齿均用含有 600 mmol/L NaCl 的 1/2 霍

格兰德营养液进行胁迫处理,盐胁迫处理时间 15 d,每 5 d 换水 1 次以确保培养体系中各项营养盐充足。为确定适合用于海马齿耐盐性筛选的盐浓度,分别采用 0、200、400、600、800、1000 mmol/L NaCl 溶液对其中 5 个地区海马齿进行前期的预试验,通过测定后得出 600 mmol/L NaCl 处理胁迫下差异性较为明显,因此选择 600 mmol/L NaCl 处理溶液作为不同地区海马齿耐盐性鉴定的适宜浓度,以 1/2 霍格兰德营养液处理作为对照(CK)。记加盐处理的当天为第 1 天,处理后的第 16 天进行采样。

1.3 测定指标及方法

处理后的第 16 天,收集材料,相同处理选取长势一致植株进行采样收集叶片,进行生理指标分析,每种分析设置 3 个重复。参考杨成龙等^[20]、李小方等^[21]和高俊凤^[22]方法测定相对含水量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、丙二醛含量和叶绿素含量;株高、节间长度均采用直尺测量。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2010 进行原始数据整理并计算对照组及各处理性状的平均值和标准差,SPSS 24.0 进行主成分分析(PCA, principal component analysis)。

根据试验得到的原始数据,计算出对照组数据和胁迫组数据的平均值,用公式(1)计算单项指标耐盐系数^[23](STC, salt tolerance coefficient)。

$$STC = \frac{\text{盐胁迫处理的平均测定值}}{\text{对照组的平均测定值}} \quad (1)$$

通过主成分分析提取出的公因子,用公式(2)计算综合分值 D_n 。

$$D_n = \sum_{j=1}^m F_{jn} \times E_j \quad (2)$$

其中, D_n 为因子分析法得到的耐盐系数的综合分值; F_{jn} 为第 n 个样品第 j 个特征根大于 1 的公因子分值; m 为特征根大于 1 的公因子个数; E_j 为第 j 个公因子的方差贡献率。

2 结果与分析

2.1 海马齿地理分布与生境特征

据报道^[1],海马齿属在中国仅有 1 个种,即海马齿,其中海南岛沿海分布较多,主要散见于沿海沙滩和沟渠地带。此次实地调查范围遍布海南岛 11 个沿海市县(图 1),在中国的水平分布在 $18^{\circ}14' \sim 20^{\circ}05' N$, 垂直分布在 $108^{\circ}39' \sim 110^{\circ}59' E$, 在海南岛的分布主要位于沿海区域,而五指山市、定安县、屯昌县、白沙黎族自治县、保亭黎族苗族自治县



图 1 海南岛野生海马齿资源采集点

Fig.1 The collection points of wild-type *S. portulacastrum* (L.) L. around Hainan Island

治县、琼中黎族苗族自治县这些位于海南岛中部不靠海的市县内,则尚未发现野生海马齿。海南岛海马齿分布的最南端是三亚市半岛蓝湾,发现野生海马齿的地点纬度为18°14'N。海南岛野生海马齿分布的最北端是海口市新埠港,纬度为20°05'N。经过现场记录调查后,收集这16个地区有代表性野生繁殖材料带回海南师范大学生态园统一种植保存。

海南岛野生海马齿分布地调查结果表明(表1),海马齿多分布于气候湿润地带,其中海南岛东线环岛沿海分布较多,西部干旱地区较少。从温度变化方面来看,采集地气温变化幅度不大,年平均温度在24.08~25.62℃之间。根据中国气象数据网数据显示,采集的16个地区中,年平均温度最高的是陵水黎族自治县盐尽村,为25.62℃,其次是陵水黎族自治县黎安镇水沟坡,年平均温度为25.52℃,年平均温度最低的地区为文昌市翁田镇东坡港,为24.08℃,其次是海口市新埠港,年平均温度为24.20℃。东线市县年平均温度约为24.85℃,西线市县年平均温度为24.71℃,东西线温度相差较小,从气温的变化情况来看,海马齿具有耐

热不耐寒的特性,温度高的地区海马齿生长更为旺盛。海南岛海马齿分布区降水差异较为明显,年降水量在719~1895mm之间,降水量最高的地区为琼海市下岭村,为1895mm,其次是文昌市的清澜港和东坡港,均值约为1852mm,所有市县中年降水量最低的地区为儋州市光村镇的新隆村,为719mm。

海马齿通常生长在沿海附近的沙滩地带,喜温热,常密集分布于海岸河流入海口,茎平卧于沙地上,多分枝,成片成簇生长,不断蔓延,形成地毯状的地被(图2),稀生在路边干燥带,不择土壤,可生长于海滩沙地上及河道边,滩涂湿地上,甚至岩石缝中。此次研究在野外采集过程中发现,海马齿在其分布区,野生资源保护较好,有较多大面积生长的野生植株,一块样地均有大批植株的情况较多。此外,还发现海马齿多生长于人为影响因素较小的自然生态环境中,常见于阳光较为充足的沙地、海滩、滩涂等地,较少分布于岩石缝和杂草丛中。通过对生境土壤环境的观察研究表明,海马齿对土壤气候要求并不严格,较耐旱、耐高温,特别耐盐,既可在肥沃的土壤中生长,也能够沙土中维持生长。

表1 海马齿地理分布与生境特征

Table 1 Distribution areas and growth environment of *S. portulacastrum* (L.) L.

位置编号 Position number	分布地点 Locality	年平均温度(℃) Annual mean temperature	年降水量(mm) Annual precipitation	生境 Habitat
1	海口市新埠港	24.20	1569	海滩沙地上
2	海口市江南城	24.21	1566	海滩沙地上
3	文昌市翁田镇东坡港	24.08	1830	海滩沙地上
4	文昌市文城镇清澜港	24.46	1874	海滩沙地上
5	琼海市下岭村	24.55	1895	海滩沙地上
6	万宁市港北	25.17	1808	海滩沙地上
7	陵水黎族自治县黎安镇水沟坡	25.52	1542	海滩沙地上
8	陵水黎族自治县盐尽村	25.62	1520	水塘边
9	三亚市海棠区石尾	25.28	1455	河道边
10	三亚市吉阳区半岛蓝湾	25.45	1381	滩涂边
11	乐东黎族自治县九所镇望楼港村	25.48	1251	湿地边
12	东方市滨海北路海东方公园	24.97	1014	水塘边
13	昌江黎族自治县海尾镇	24.70	1016	海滩沙地上
14	儋州市洋浦新英湾	24.53	895	岩石缝
15	儋州市光村镇新隆村	24.32	719	海滩沙地上
16	澄迈县东水港码头渡口	24.26	1153	河流旁沙地



图 2 海马齿典型生境

Fig.2 Typical habitat of *S. portulacastrum* (L.) L.

2.2 海马齿分布区主要伴生植物种类

根据多次实地调查发现,海马齿的生长土壤类型主要以滨海沙土为主,在海滩的生长范围较广。研究得出组成群落的伴生植物主要有马鞭草科(Verbenaceae)、锦葵科(Malvaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)、禾本科(Gramineae)、豆科(Leguminosae)、菊科(Compositae)和旋花科(Convolvulaceae)等科的植物。由于近年沿海沙滩受人为开发活动影响,很多海马齿分布区植被已被破坏,部分地方仅剩工业化开发后的次生植物。

海南岛野生海马齿分布地伴生植物调查结果表明(表2),海马齿主要伴生植物共计27种,其中最常见乔木植物为木麻黄(*Casuarina equisetifolia* L.),最常见的灌木层植物有南方碱蓬(*Suaeda australis* (R. Br.) Moq.)及苦郎树(*Clerodendrum inerme* (L.) Gaertn.)。主要的伴生植物中草本植物共计17种,其中最常见的有补血草(*Limonium sinense* (Girard) Kuntze)、厚藤(*Ipomoea pes-caprae* (L.) R. Br.)、狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)、李花菊(*Wollastonia biflora* (L.) DC.)、土牛膝(*Achyranthes aspera* L.)和小刀豆(*Canavalia cathartica* Thouars)。

2.3 盐胁迫对海马齿种质材料各生理指标的影响

不同地区的海马齿经过在0 mmol/L(对照)和600 mmol/L NaCl浓度下处理15 d后,其植株长势、

叶片茎节长度等均存在较明显差异(图3)。在对照组,各个地方的植株生长相似,均有6~9片新叶,其中水沟坡、半岛蓝湾和新隆村3个地区的植株初始较矮,但其生长状况良好,叶片正常生长,叶片细长且呈鲜绿色。在600 mmol/L NaCl处理15 d后,16个地区的海马齿植株相较于对照组叶片均有蜷缩弯曲,光泽减弱,叶面积变小,部分地区植物的叶片出现腐烂掉落。如下岭村、水沟坡、盐尽村、半岛蓝湾、新英湾和东水港码头渡口这6个地区的海马齿,其叶片蜷缩弯曲明显,且有部分叶片掉落,植株萎缩,生长相较于对照组均明显缓慢;其中盐尽村和新英湾两地区海马齿植株相较于对照组株高茎节缩短,盐尽村地区海马齿处理组较对照组茎节缩短约0.44 cm,新英湾地区海马齿处理组较对照组茎节缩短约0.06 cm,且植株萎缩现象较明显,盐尽村地区其株高缩短量约为0.52 cm,新英湾地区海马齿其株高缩短量约为0.97 cm,由此可见其耐盐性较弱(图3、表3)。江南城与海东方公园地区海马齿植株在胁迫后,其生长状况相对较好,叶片掉落较少,叶片呈鲜绿色,其中江南城地区茎节较对照组增加了约0.17 cm,增长量较对照组下降了78.75%,其株高较对照组缩短了约1.00 cm,增长量较对照组下降了29.63%,海东方公园地区茎节较对照组缩短了0.08 cm,增长量较对照组下降了33.33%,其株高缩短了约0.77 cm,增长量较对照组下降了74.51%

表2 海马齿主要伴生植物

Table 2 The main plants growth around *S. portulacastrum* (L.) L.

种类 Companion plant	种 Species	属 Genus	科 Family	
木本植物 Woody plants	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i> L.	木麻黄属 <i>Casuarina</i> L.	木麻黄科 Casuarinaceae	
	绿玉树 <i>Euphorbia tirucalli</i> L.	大戟属 <i>Euphorbia</i> L.	大戟科 Euphorbiaceae	
	苦郎树 <i>Clerodendrum inerme</i> (L.) Gaertn.	大青属 <i>Clerodendrum</i> L.	马鞭草科 Verbenaceae	
	马缨丹 <i>Lantana camara</i> L.	马缨丹属 <i>Lantana</i> L.	马鞭草科 Verbenaceae	
	鹊肾树 <i>Streblus asper</i> Lour.	鹊肾树属 <i>Streblus</i> Lour.	桑科 Moraceae	
	白饭树 <i>Flueggea virosa</i> (Roxb. ex Willd.) Royle	白饭树属 <i>Flueggea</i> Willd.	大戟科 Euphorbiaceae	
	南方碱蓬 <i>Suaeda australis</i> (R. Br.) Moq.	碱蓬属 <i>Suaeda</i> Forssk. ex J. F. Gmel.	藜科 Chenopodiaceae	
	红海兰 <i>Rhizophora stylosa</i> Griff.	红树属 <i>Rhizophora</i> L.	红树科 Rhizophoraceae	
	单叶蔓荆 <i>Vitex trifolia</i> L.	牡荆属 <i>Vitex</i> L.	马鞭草科 Verbenaceae	
	赛葵 <i>Malvastrum coromandelianum</i> (L.) Garcke	赛葵属 <i>Malvastrum</i> A. Gray	锦葵科 Malvaceae	
	草本植物 Herbaceous	黄槿 <i>Hibiscus tiliaceus</i> L.	木槿属 <i>Hibiscus</i> L.	锦葵科 Malvaceae
		补血草 <i>Limonium sinense</i> (Girard) Kuntze	补血草属 <i>Limonium</i> Mill.	白花丹科 Plumbaginaceae
		台湾虎尾草 <i>Chloris formosana</i> (Honda) Keng ex B. S. Sun & Z. H. Hu	虎尾草属 <i>Chloris</i> Sw.	禾本科 Gramineae
红毛草 <i>Rhynchelytrum repens</i> (Willd.) C. E. Hubb.		红毛草属 <i>Rhynchelytrum</i> Nees	禾本科 Gramineae	
厚藤 <i>Ipomoea pes-caprae</i> (L.) R. Br.		番薯属 <i>Ipomoea</i> L.	旋花科 Convolvulaceae	
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> L.		鬼针草属 <i>Bidens</i> L.	菊科 Compositae	
红龙草 <i>Alternanthera ficoidea</i> (L.) P. Beauv.		虾钳菜属 <i>Alternanthera</i> Forssk.	苋科 Amaranthaceae	
龙爪茅 <i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd.		龙爪茅属 <i>Dactyloctenium</i> Willd.	禾本科 Gramineae	
海刀豆 <i>Canavalia rosea</i> (Sw.) DC.		刀豆属 <i>Canavalia</i> Adans.	豆科 Leguminosae	
龙珠果 <i>Passiflora foetida</i> L.		西番莲属 <i>Passiflora</i> L.	西番莲科 Passifloraceae	
土牛膝 <i>Achyranthes aspera</i> L.		牛膝属 <i>Achyranthes</i> L.	苋科 Amaranthaceae	
老鼠芳 <i>Spinifex littoreus</i> (Burm. f.) Merr.		鬘刺属 <i>Spinifex</i> L.	禾本科 Gramineae	
莲花菊 <i>Wollastonia biflora</i> (L.) DC.		螞蟥菊属 <i>Wedelia</i> Jacq.	菊科 Compositae	
飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> L.		泽兰属 <i>Eupatorium</i> L.	菊科 Compositae	
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.		狗牙根属 <i>Cynodon</i> Rich.	禾本科 Gramineae	
小刀豆 <i>Canavalia cathartica</i> Thouars	刀豆属 <i>Canavalia</i> Adans.	豆科 Leguminosae		
水竹 <i>Phyllostachys heteroclada</i> Oliv.	刚竹属 <i>Phyllostachys</i> Siebold & Zucc.	禾本科 Gramineae		



A: 海口市新埠港; B: 海口市江南城; C: 文昌市翁田镇东坡港; D: 文昌市文城镇清澜港; E: 琼海市下岭村; F: 万宁市港北; G: 陵水黎族自治县黎安镇水沟坡; H: 陵水黎族自治县盐尽村; I: 三亚市海棠区石尾; J: 三亚市吉阳区半岛蓝湾; K: 乐东黎族自治县九所镇望楼港村; L: 东方市滨海北路海东方公园; M: 昌江黎族自治县海尾镇; N: 儋州市洋浦新英湾; O: 儋州市光村镇新隆村; P: 澄迈县东水港码头渡口

A: Xinbu Port, Haikou City, B: Jiangnan City, Haikou City, C: Dongpo Port, Wengtian Town, Wenchang City, D: Qinglan Port, Wencheng Town, Wenchang City, E: Xialing Village, Qionghai City, F: Gangbei, Wanning City, G: Shuigoupo, Li'an Town, Lingshui Li Autonomous County, H: Yanjin Village, Lingshui Li Autonomous County, I: Shiwei, Haitang District, Sanya City, J: Peninsula Lanwan, Jiyang District, Sanya City, K: Wanglougang Village, Jiusuo Town, Ledong Li Autonomous County, L: Haidongfang Park, Binhai North Road, Dongfang City, M: Haiwei Town, Changjiang Li Autonomous County, N: Xinying Bay, Yangpu, Danzhou City, O: Xinlong Village, Guangcun Town, Danzhou City,

P: Dongshui Port Wharf Ferry, Chengmai County

图3 不同地区的海马齿对照与盐胁迫 15 d 后的生长情况

Fig.3 Growth of *S. portulacastrum* (L.) L. under control and salt stress in different regions after 15 days

表 3 不同地区的海马齿对照与盐胁迫 15 d 后的生长数据

Table 3 Growth data of *S. portulacastrum* (L.) L. under control and salt stress in different regions after 15 days (cm)

位置编号 Position number	分布地点 Locality	株高 Plant height		节间长度 Internode length	
		对照组 (0 mmol/L) Control group	盐处理组 (600 mmol/L) Salt treatment group	对照组 (0 mmol/L) Control group	盐处理组 (600 mmol/L) Salt treatment group
1	海口市新埠港	7.02 ± 0.37	6.40 ± 0.35	1.12 ± 0.10	1.11 ± 0.07
2	海口市江南城	9.66 ± 0.22	8.64 ± 0.72	1.53 ± 0.12	1.71 ± 0.14
3	文昌市翁田镇东坡港	10.10 ± 1.23	8.48 ± 0.40	1.96 ± 0.19	1.51 ± 0.12
4	文昌市文城镇清澜港	11.24 ± 0.63	11.24 ± 0.63	2.39 ± 0.29	2.26 ± 0.10
5	琼海市下岭村	8.00 ± 0.41	7.30 ± 0.94	1.28 ± 0.04	1.47 ± 0.17
6	万宁市港北	9.52 ± 0.76	7.21 ± 1.09	1.59 ± 0.19	1.28 ± 0.16
7	陵水黎族自治县黎安镇水沟坡	4.93 ± 0.19	4.68 ± 0.56	1.09 ± 0.07	0.91 ± 0.06
8	陵水黎族自治县盐尽村	6.30 ± 0.12	5.73 ± 0.51	1.73 ± 0.04	1.28 ± 0.10
9	三亚市海棠区石尾	8.84 ± 0.34	7.71 ± 0.31	1.49 ± 0.08	1.53 ± 0.06
10	三亚市吉阳区半岛蓝湾	5.49 ± 0.05	5.69 ± 0.26	1.30 ± 0.03	1.22 ± 0.07
11	乐东黎族自治县九所镇望楼港村	11.86 ± 0.79	10.70 ± 0.47	2.00 ± 0.14	1.81 ± 0.06
12	东方市滨海北路海东方公园	7.12 ± 0.43	6.34 ± 0.64	1.24 ± 0.09	1.16 ± 0.16
13	昌江黎族自治县海尾镇	7.21 ± 0.50	6.17 ± 0.29	1.33 ± 0.07	1.19 ± 0.11
14	儋州市洋浦新英湾	5.46 ± 0.48	4.56 ± 0.14	1.11 ± 0.08	1.07 ± 0.04
15	儋州市光村镇新隆村	4.84 ± 0.07	4.92 ± 0.29	1.16 ± 0.07	1.30 ± 0.17
16	澄迈县东水港码头渡口	9.66 ± 0.39	7.74 ± 0.71	1.44 ± 0.10	1.18 ± 0.11

± 前后数值表示平均值 ± 标准差

The values before and after ± represent mean ± standard deviation

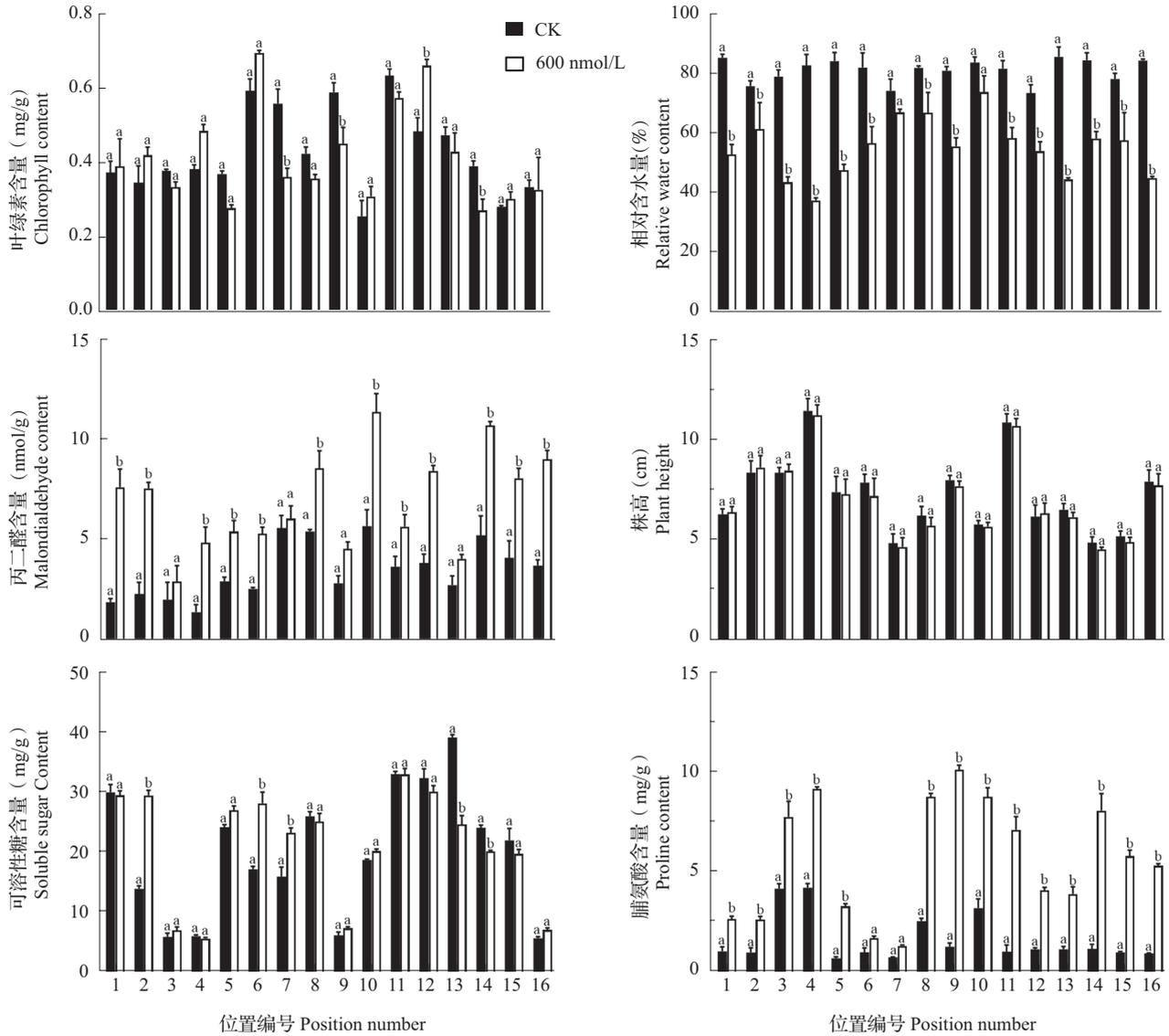
(表 3)。本次试验结果表明, 16 个不同分布地点的海马齿在进行相同的盐胁迫处理下, 所表现的形态有着一定的差异, 其中新英湾地区的海马齿处理后株高缩短量较大, 盐尽村地区的海马齿其萎缩现象较为明显, 江南城与海东方公园地区的海马齿在处理, 其生长状况较于其他地区良好。

盐胁迫会对植物产生重要影响, 造成各种胁迫应答生理指标变化。本研究对 16 个分布地区的海马齿进行 600 mmol/L NaCl 处理, 并比较了盐处理后各种生理指标变化, 发现盐处理后, 不同分布地点海马齿的变化有所不同, 但总体而言, 盐处理会导致海马齿叶片中相对含水量明显下降, 但丙二醛和脯氨酸含量均明显上升, 而总体植株高度变化不明显, 可能是处理时间只有 15 d, 时间太短, 变化不显著 (图 4)。

光合作用的关键色素为叶绿素, 其含量体现了光合效率的大小从而反映出植物光合作用强度。研究发现, 不同地区海马齿的叶绿素含量在盐胁迫后有增有减, 由图 4 可知, 600 mmol/L 的盐胁迫对

16 个不同分布地区野生海马齿叶绿素含量均产生了一定的影响, 与对照组叶绿素含量相比, 黎安镇水沟坡、海棠区石尾和洋浦新英湾地区的海马齿叶绿素含量显著下降, 而海东方公园地区海马齿的叶绿素含量显著高于对照组, 余下的 12 个地区海马齿种质其叶绿素含量在盐胁迫后有增有减, 且与对照差异不显著。其中黎安镇水沟坡在盐胁迫后, 叶绿素含量比对照组降低了 35.41%, 由此可见黎安镇水沟坡地区海马齿叶绿素含量在 600 mmol/L 的 NaCl 胁迫下较低, 其耐性较弱; 海东方公园在盐胁迫后, 叶绿素含量比对照提高了 36.45%, 由此可见 600 mmol/L 的 NaCl 仅对海东方公园地区海马齿叶绿素含量有促进作用。

相对含水量是反映植物渗透胁迫下叶片水分情况的重要指标, 渗透胁迫下其含量的下降快慢与植物的抗逆性有着极大的关联性。不同地区的海马齿盐胁迫后其相对含水量均降低, 除黎安镇水沟坡和吉阳区半岛蓝湾以外, 其他地区植株的相对含水量对照与处理组之间差异显著。其中海尾镇地区海马



横坐标位置编号同表 1。不同小写字母表示同一品种处理间差异显著 ($P < 0.05$)

The position number of the abscissa is the same as Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments of the same variety ($P < 0.05$)

图 4 不同地区的海马齿对照与盐胁迫 15 d 后各生理指标变化

Fig.4 Changes of physiological indicators of *S. portulacastrum* (L.) L. under control and salt stress in different regions after 15 days

齿在胁迫后其相对含水量显著降低 41.11%,由此可见海尾镇地区耐性较低。而江南城地区海马齿在盐胁迫后,相对含水量显著降低了 14.40%,由此可见江南城地区海马齿在 600 mmol/L 的 NaCl 胁迫下,其表现出较强的耐性。

丙二醛是由于植物在逆境下受伤害,其组织与器官发生过氧化反应而产生的,其含量由于氧自由基在脂膜中的积累而升高。本研究发现,所有地区的海马齿盐胁迫后其丙二醛含量均增大,除东坡港、水沟坡、海棠区石尾和海尾镇以外,其他地区植株对照与处理组之间差异均达到显著。其中水沟坡地区

海马齿在盐胁迫后丙二醛含量增加 7.55%,其增长量较低;而新埠港地区海马齿在盐胁迫后丙二醛含量较对照组显著增加 74.84%,说明丙二醛增量的变化可在一定程度上体现出海马齿在逆境下叶片的耐盐程度。

不同地区的海马齿盐胁迫后其株高变化有增有减,其盐处理组中,胁迫前与胁迫后的株高之间无明显差异,可能是 600 mmol/L 的盐浓度较低,对海马齿短期内株高影响较小。其中盐尽村地区的海马齿株高较胁迫前下降 8.19%,其株高的减少量较大,由此可见该地区海马齿耐性较差;而江南城地的海马

齿株高较胁迫前增加了 2.98%, 其株高增加量最大, 表现出其较强耐性。

本研究表明, 不同分布地点的海马齿叶片中可溶性糖含量在盐胁迫后有增有减, 其中江南城、港北和水沟坡地区海马齿盐胁迫后的可溶性糖含量显著增加, 而海尾镇和新英湾地区显著降低。海尾镇地区海马齿胁迫后含量显著下降, 较对照组减少了 14.46 mg/g; 而江南城地区海马齿盐胁迫后其可溶性糖含量上升较高, 较对照组增加了 15.47 mg/g, 由此可见, 江南城地区的海马齿表现出较强的耐性。

海马齿是一种高积累脯氨酸植物, 通常认为脯氨酸的积累与植物盐胁迫适应性为正相关, 脯氨酸的增加会使植物对渗透胁迫的耐受性增强。本研究发现, 所有地区的海马齿盐胁迫后脯氨酸含量均明显增加, 除港北和水沟坡以外, 其他地区植株对照组与处理组之间差异均达到显著水平。其中水沟坡地区海马齿盐胁迫后其脯氨酸增加量较低, 为 0.57 mg/g, 由此可见该地区海马齿耐性较弱; 而石尾地区海马齿盐胁迫后其脯氨酸含量显著上升, 为 8.83 mg/g, 其脯氨酸增长量较多, 说明 600 mmol/L

的盐胁迫对该地区海马齿脯氨酸含量的积累有促进作用。

2.4 不同地区海马齿耐盐综合评价

2.4.1 生理指标耐盐系数

计算各生理指标的耐盐系数得到盐胁迫下海马齿叶片相对含水量、叶绿素含量、丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量和株高的耐盐系数范围分别为 0.4510~0.9023、0.6459~1.3645、1.0816~3.9741、0.7159~2.8125、0.6305~2.1039 和 0.9141~1.0298 (表 4)。其中, 相对含水量、叶绿素含量和株高的耐盐系数平均值均小于 1, 说明在盐胁迫条件下, 这些指标相对于对照组是下降的。而脯氨酸含量、丙二醛含量和可溶性糖含量的耐盐系数平均值均大于 1, 表明盐胁迫对不同指标的影响程度不同。各指标耐盐系数变异较大, 其中株高的变异系数最小 (3.72%), 丙二醛含量的变异系数最大 (37.60%)。变异系数大小顺序为丙二醛含量 > 脯氨酸含量 > 可溶性糖含量 > 叶绿素含量 > 相对含水量 > 株高。上述结果说明盐胁迫对海马齿各个生理指标的影响程度不同, 单一指标不能全面反映不同分布地区海马齿的耐盐性。

表 4 海马齿盐胁迫下各指标耐盐系数描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of salt tolerance coefficient of each index under salt stress in *S. portulacastrum* (L.) L.

指标 Index	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV
相对含水量 Relative water content	0.4510	0.9023	0.6804	0.13	19.60
叶绿素含量 C Chlorophyll content	0.6459	1.3645	0.9822	0.22	22.28
丙二醛含量 Malondialdehyde content	1.0816	3.9741	2.1163	0.80	37.60
脯氨酸含量 Proline content	0.7159	2.8125	1.5035	0.48	31.83
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.6305	2.1039	1.1360	0.35	31.00
株高 Plant height	0.9141	1.0298	0.9727	0.04	3.72

2.4.2 主成分分析

采用 SPSS 24.0 软件, 以 6 个生理指标耐盐系数为变量, 采用主成分分析法对数据进行分析 (表 5)。以主成分特征值大于 1 作为提取标准, 共提取 2 个主成分因子, 其中主成分 1 方差贡献率为 45.706%, 主成分 2 方差贡献率为 26.063%, 前 2 个主成分因子的累积贡献率达到 71.769%, 因此可提取这 2 个主成分因子, 这样其原有的变量信息丢失较少, 所得的分析结果较为理想。采用这 2 个公因子代替原有的 6 个生理指标对海马

齿种质耐盐性进行综合评价。最终通过主成分分析将 6 个生理指标耐盐系数转换为 2 个独立的综合指标, 以用于下一步的耐盐综合评价分析。

2.4.3 耐盐性综合评价

计算得到 16 个地区海马齿种质耐盐系数的综合分值 D_n 并对其进行排序 (表 6)。耐盐性较好的海马齿采集地区为海口市江南城、文昌市文城镇清澜港, 而儋州市洋浦新英湾、陵水黎族自治县盐尽村的海马齿样品耐盐性较差, 其他地区种质耐盐性居中。

表 5 因子相关矩阵特征值

Table 5 Eigenvalues of factor correlation matrix

指标 Index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2
相对含水量 Relative water content	-0.527	0.713
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.785	0.277
丙二醛含量 Malondialdehyde content	0.821	0.185
脯氨酸含量 Proline content	0.909	-0.302
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.052	0.83
株高 Plant height	0.588	0.404
特征根 Eigenvalue	2.742	1.564
贡献率 (%) Contribution rate	45.706	26.063
累积贡献率 (%) Cumulative contribution rate	45.706	71.769

表 6 海马齿种质耐盐性综合得分及排序

Table 6 The comprehensive scores and rankings of the salt tolerance of *S. portulacastrum* (L.) L. germplasm

位置编号 Position number	分布地点 Locality	综合得分 Overall ratings	排序 Sort
1	海口市新埠港	0.833145293	3
2	海口市江南城	1.561136540	1
3	文昌市翁田镇东坡港	-0.042431007	8
4	文昌市文城镇清澜港	0.959578121	2
5	琼海市下岭村	-0.364962400	11
6	万宁市港北	0.175719566	7
7	陵水黎族自治县黎安镇 水沟坡	-0.731501269	13
8	陵水黎族自治县盐尽村	-0.858046877	15
9	三亚市海棠区石尾	-0.544820101	12
10	三亚市吉阳区半岛蓝湾	0.259159726	5
11	乐东黎族自治县九所镇 望楼港村	-0.326014917	10
12	东方市滨海北路海东方公园	0.775283761	4
13	昌江黎族自治县海尾镇	-0.734120740	14
14	儋州市洋浦新英湾	-0.924583780	16
15	儋州市光村镇新隆村	-0.249744875	9
16	澄迈县东水港码头渡口	0.212192959	6

3 讨论

3.1 海南岛海马齿环境分布情况

海马齿在海南岛沿海地区一直有零星分布,关于系统性野外资源调查及其耐盐性比较试验一直未见报道。海南岛海马齿分布具体位置及不同地区的海马齿材料有何异同等基础性问题一直没有一个明确的答案。海马齿作为红树林的伴生植物,是红树林生态系统的一部分^[3],而红树林的分布主要位于沿海地区河口港湾潮间带的滩涂上^[24]。本研究首次对海南岛野生海马齿进行系统性环岛采样调查,发现海南岛海马齿种质资源主要位于环岛沿海区域,与红树林的分布有着重叠之处^[25],本研究环岛所采集的样品主要分布在平均海拔为 7.4 m 的海边沙滩,在年平均温度为 24.08~25.62 °C、降水量为 719~1895 mm 的地区均大量生长,这一研究结果与唐梦楠等^[26]、王松等^[27]、漆光超等^[28]研究中所收集的海马齿材料生境相似。野生海马齿分布较分散,常位于河滩边、沙滩上、滩涂边、河岸附近,其常见的伴生植物中,红海兰为真红树植物,苦郎树与黄槿均为半红树植物^[24]。

3.2 盐胁迫下不同地区海马齿叶片生理指标的影响

叶绿素是光合作用的关键色素,它是植物与外界反应发生物质和能量交换的重要基础,其含量的高低影响植物光合作用效率的大小^[29]。Peng 等^[30]研究发现,海马齿在盐胁迫环境下,可以通过维持光系统 II 复合体的稳定性,提高光化学反应速率,增加固碳能力,增强光合作用从而促进其生长。Yi 等^[31]用 600 mmol/L 的 NaCl 处理,其叶绿体的形态发生了一定变化,盐积累后,细胞质能量生产系统有着显著地改善,不同的盐浓度对叶绿体和细胞质的光合作用程度有着不一样的影响。有研究表明,在淡水至全海水范围内(盐浓度为 0~600 mmol/L),海马齿叶片叶绿素的含量影响并不大^[7-8],本研究发现不同地区的海马齿在 600 mmol/L 的 NaCl 盐胁迫下,其叶片叶绿素的含量有增有减。说明本次研究中海南岛 16 个地区的野生海马齿叶片中的总叶绿素含量对 600 mmol/L 的 NaCl 处理不敏感。

叶片相对含水量是标志植物体内水分状况的重要指标^[32]。韩冰等^[10]研究中,海马齿在 600 mmol/L 的 NaCl 处理时含水量比对照组 0 mmol/L 低,且随着盐浓度的上升,有降低的趋势。Yi 等^[31]研究中得到,中等盐浓度(300 mmol/L NaCl)中,海马齿产

生的鲜重和苗高最大,且含水量及茎节长度最高,之后则随着盐浓度增加逐渐下降。本研究所有地区的海马齿在 600 mmol/L 的 NaCl 胁迫下,其相对含水量明显低于对照组,说明渗透胁迫下其叶片水分含量降低,这一结果与杨成龙等^[20]的研究结果一致。

丙二醛是膜脂过氧化作用的最终产物,是膜系统受到伤害的重要标志之一^[29]。梁胜伟等^[14]研究中发现,海马齿在高于 10 μ mol/L 汞胁迫下,丙二醛的含量急剧升高。本研究中所有地区的海马齿在 600 mmol/L NaCl 胁迫下,丙二醛的含量均高于对照组,这一研究结果与杨成龙等^[20]结果一致。因此,丙二醛含量可以作为海马齿在逆境下叶片耐盐程度方面评价的重要因子。

生物量是植物耐盐性的直接指标,且地上部分总的生物量可作为海马齿盐胁迫后生长影响的评价指标^[20]。Yi 等^[31]研究中,海马齿在 300 mmol/L 的 NaCl 盐胁迫下,其地上部高度最大,随着盐浓度的增加,地上部分高度逐渐降低。杨成龙等^[20]研究中发现,株高与海水浓度呈现负相关。本研究中,盐胁迫后海马齿的株高变化不明显,这一现象可能与盐胁迫的时间长短有关,也可能与初始植株的长度有关。

脯氨酸是植物细胞内重要的渗透调节物质,植物通过不断积累脯氨酸来适应不同的逆境环境^[29],植物在盐胁迫等逆境条件下积累脯氨酸是一种较普遍的现象^[33]。钱大文等^[34]研究表明海马齿属于一种高累计脯氨酸植物,海马齿在 600 mmol/L 的 NaCl 胁迫下其脯氨酸含量达到高积累值,而在之后的 800 mmol/L 的盐浓度下,其脯氨酸含量积累值显著降低。本研究中,在 600 mmol/L 的 NaCl 胁迫下,海马齿叶片中的脯氨酸含量均比对照组增加,用以适应盐分条件维持渗透调节系统的稳定,这与张艳琳等^[7]的研究成果较为一致。

可溶性糖在植物适应盐胁迫中提高细胞的渗透调节能力,从而降低因渗透失水而造成细胞膜的损伤^[35]。杨成龙等^[20]的研究发现,海马齿叶片在短时间(15 d)盐胁迫时,其可溶性糖含量减少,而长时间(30 d)的盐胁迫后,其可溶性糖含量较对照组增加。在本研究中,可溶性糖含量变化有增有减,其变化不一可能是与不同区域的种质有关。

3.3 盐胁迫下不同地区海马齿耐盐系数的主成分分析及综合评价

由于盐胁迫对植物生长的影响涉及到多个生理

途径和综合反应,因此植物的耐盐性是复杂的综合性状,对多种生理指标进行综合评价相对于单项指标评价更能准确地反映植物耐盐性的大小^[36]。目前的研究中,关于植物耐盐性分析较多采用模糊隶属函数法和主成分分析法,侯文焕等^[37]在对菜用黄麻种质进行耐盐性评价时,采用隶属函数法,利用各项测定指标对黄麻种质进行综合评价,再采用聚类分析依据耐盐性的强弱进行分级。主成分分析是通过降维的方法将原有的多个指标转化为较少且彼此之间独立的新综合指标的统计方法^[38],在不同的植物多性状综合评价上已经有了广泛的应用。张毅等^[39]在对有色大麦种质芽期耐盐性综合评价中,利用主成分分析将原有的 8 个指标转换为 3 个综合指标,再计算其综合评价值;张治振等^[40]基于主成分分析对幼苗期耐盐性水稻品种进行筛选与评价,通过多个生理指标进行综合评价,对生理特性的分析初步揭示了耐盐生理机制;李慧琴等^[41]以 270 份陆地棉花种质为试验材料,运用主成分分析将 12 个性状综合为 4 个主成分,从而对试验材料进行综合评价分析。海马齿在盐胁迫下,涉及到许多的生理生化反应,其耐盐性是一种复杂的综合性状^[42]。海马齿对盐适应性的必要条件是基于细胞机制以及整个植物的协调^[31],为更准确地评价海马齿的耐盐性,必须考虑到多种生理指标的共同作用。因此本研究中,基于 6 个生理指标降维后计算出的综合得分,作为衡量 16 个地区海马齿耐盐性强弱的标准。通过综合得分值对海马齿进行排序筛选,得到耐盐性较好的地区为海口市江南城、文昌市文城镇清澜港,而儋州市洋浦新英湾、陵水黎族自治县盐尽村的耐盐性较差。通过耐盐性综合评价,海南岛 16 个地区野生海马齿种质筛选出 2 个地区耐盐性较强材料和 2 个地区耐盐性较弱材料,筛选出的材料对于后续海马齿耐盐机理的研究有着重要的价值意义。

4 结论

本研究对海南岛野生海马齿种质资源及其耐盐性进行了初步分析,结果表明:(1)野生海马齿主要分布于海南岛的沿海区域,目前未在海南岛中部市县发现野生海马齿种质;(2)野生海马齿周围主要的伴生植物共计 27 种,最常见的有乔木植物木麻黄,草本植物厚藤、补血草、狗牙根、李花菊、小刀豆;(3)在 600 mmol/L NaCl 浓度处理后,在该盐浓度处理下测定了 16 个地区海马齿耐盐相关指标,利用

主成分分析方法对其进行综合评价,筛选出 2 处较强耐盐的海马齿种质,16 个地区海马齿耐盐性由强到弱依次为:海口市江南城、文昌市文城镇清澜港、海口市新埠港、东方市滨海北路海东方公园、三亚市吉阳区半岛蓝湾、澄迈县东水港码头渡口、万宁市港北、文昌市翁田镇东坡港、儋州市光村镇新隆村、乐东黎族自治县九所镇望楼港村、琼海市下岭村、三亚市海棠区石尾、陵水黎族自治县黎安镇水沟坡、昌江黎族自治县海尾镇、陵水黎族自治县盐尽村、儋州市洋浦新英湾。本研究为后续海马齿耐盐机理的研究奠定了一定的基础。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第二十六卷. 北京: 科学出版社, 1996: 30-32
Editorial Committee of the Flora of China of Chinese Academy of Science. Flora of China: Volume 26th. Beijing: Science Press, 1996: 30-32
- [2] Lonard R I, Judd F W. The biological flora of coastal dunes and wetlands. *Sesuvium portulacastrum* (L.) L. Journal of Coastal Research, 1997, 13(1): 96-104
- [3] Lokhande V H, Nikam T D, Superasanna P. *Sesuvium portulacastrum* (L.) L. a promising halophyte: Cultivation, utilization and distribution in India. Genetic Resources & Crop Evolution, 2009, 56(5): 741-747
- [4] Ramani B, Reeck T, Debez A, Stelzer R, Huchzermeyer B, Schmidt A, Papenbrock J. *Aster tripolium* L. and *Sesuvium portulacastrum* L.: Two halophytes, two strategies to survive in saline habitats. Plant Physiology & Biochemistry, 2006, 44(5-6): 395-408
- [5] Slama I, Ghnaya T, Hessini K, Messedi D, Savouré A, Abdelly C. Comparative study of the effects of mannitol and PEG osmotic stress on growth and solute accumulation in *Sesuvium portulacastrum*. Environmental and Experimental Botany, 2007, 61(1): 10-17
- [6] Ghnaya T, Nouairi I, Slama I, Messedi D, Grignon C, Abdelly C, Ghorbel M H. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. Journal of Plant Physiology, 2005, 162(10): 1133-1140
- [7] 张艳琳, 范伟, 蔡元保, 张治礼. 海马齿对不同比例淡水水组培的生长和生理响应. 西北植物学报, 2009, 29(6): 1240-1245
Zhang Y L, Fan W, Cai Y B, Zhang Z L. Growth and physiological responses of *Sesuvium portulacastrum* to hydroponics of different combinations of fresh and sea water. Acta Botanica Boreal-Occident Sinica, 2009, 29(6): 1240-1245
- [8] 李卫林, 罗冬莲, 杨芳, 郑惠东, 林琪. 盐度对水培海马齿生长和生理生化因子的影响. 厦门大学学报: 自然科学版, 2019, 58(1): 63-69
Li W L, Luo D L, Yang F, Zheng H D, Lin Q. Effects of salinity on growth, physiology and biochemistry of hydroponic *Sesuvium portulacastrum*. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2019, 58(1): 63-69
- [9] Wang D Y, Wang H Y, Han B, Wang B, Guo A P, Zheng D, Liu C J, Chang L L, Peng M, Wang X C. Sodium instead of potassium and chloride is an important macronutrient to improve leaf succulence and shoot development for halophyte *Sesuvium portulacastrum*. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 51: 53-62
- [10] 韩冰, 庞永奇, 常丽丽, 王东阳, 王旭初. 不同浓度的 NaCl 处理对海马齿叶片中 Na⁺ 和 K⁺ 含量的影响. 热带生物学报, 2012, 3(2): 166-173
Han B, Pang Y Q, Chang L L, Wang D Y, Wang X C. Effect of NaCl treatment on Na⁺ and K⁺ content in the leaves of *Sesuvium portulacastrum*. Journal of Tropical Organisms, 2012, 3(2): 166-173
- [11] Messedi D, Slemi N, Abdelly C. Some physiological and biochemical aspects of salt tolerance of *Sesuvium portulacastrum*. Springer Netherlands, 2003, 16(18): 3605-3626
- [12] 严廷良, 钟才荣, 刘强, 张颖. 海马齿对重金属 Pb、Zn 胁迫的生长及生理生化响应. 广西植物, 2015, 35(5): 668-672
Yan T L, Zhong C R, Liu Q, Zhang Y. Effects of Pb and Zn on the growth and physiological response of *Sesuvium portulacastrum*. Guihaia, 2015, 35(5): 668-672
- [13] 林彦彦, 高珊珊, 陈婧芳, 翟哲, 袁星, 黄建荣, 刘蔚秋, 黎祖福. 海马齿对锌的耐性与富集特征. 湿地科学, 2016, 14(4): 561-567
Lin Y Y, Gao S S, Chen J F, Zhai Z, Yuan X, Huang J R, Liu W Q, Li Z F. Tolerance and its Zinc bioaccumulation characteristic of *Sesuvium portulacastrum* to Zinc. Wetland Science, 2016, 14(4): 561-567
- [14] 梁胜伟, 胡新文, 段瑞军, 符少萍, 郭建春. 海马齿对无机汞的耐性和吸附积累. 植物生态学报, 2009, 33(4): 638-645
Liang S W, Hu X W, Duan R J, Fu S P, Guo J C. Mercury tolerance and accumulation in the halophyte *Sesuvium portulacastrum*. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 638-645
- [15] 杨芳, 杨妙峰, 郑盛华, 林永青, 郑惠东, 温凭, 李卫林, 罗冬莲. 东山海湾海马齿生态浮床原位修复效果研究. 渔业研究, 2019, 41(3): 225-233
Yang F, Yang M F, Zheng S H, Lin Y Q, Zheng H D, Wen P, Li W L, Luo D L. Study on the in-situ remediation effects of *Sesuvium portulacastrum* ecological floating beds in Dongshan Bay. Journal of Fisheries Research, 2019, 41(3): 225-233
- [16] 曾碧健, 窦碧霞, 黎祖福, 黄建荣. 海洋盐生植物海马齿 (*Sesuvium portulacastrum*) 对环境盐度胁迫的耐受性及营养价值综合评价. 海洋与湖沼, 2017, 48(3): 568-575
Zeng B J, Dou B X, Li Z F, Huang J R. Salt tolerance of environmental salinity stress and comprehensive evaluation of nutritional value of *Sesuvium portulacastrum*, an important halophyte. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(3): 568-575
- [17] 丁国华, 阮雪玉, 张雪妍, 王旭初. 滨海盐生植物海马齿耐盐机制解析及其在生态环保中应用研究. 中国科技成果, 2020, 21(7): 18-23
Ding G H, Ruan X Y, Zhang X Y, Wang X C. Analysis of

- salt tolerance mechanism of coastal halophytes *Sesuvium portulacastrum* and its application in ecological environment protection. China Science and Technology Achievements, 2020, 21(7): 18-23
- [18] 范亚飞, 周扬, 万舒敏, 莫春演, 江行玉. 过表达海马齿 *SpSOS1* 基因能增强转基因拟南芥的耐盐性. 分子植物育种, 2017, 15(4): 1347-1353
Fan Y F, Zhou Y, Wan S M, Mo C Y, Jiang X Y. Over-expression of a *Sesuvium portulacastrum* salt overly sensitive gene (*SpSOS1*) enhances salt tolerance of transgenic *Arabidopsis*. Molecular Plant Breeding, 2017, 15(4): 1347-1353
- [19] Lokhande V H, Nikam T D, Patade V Y, Suprasanna P. Morphological and molecular diversity analysis among the Indian clones of *Sesuvium portulacastrum* L.. Genetic Resources and Crop Evolution, 2009, 56(5): 705-717
- [20] 杨成龙, 段瑞军, 李瑞梅, 胡新文, 符少萍, 郭建春. 盐生植物海马齿耐盐的生理特性. 生态学报, 2010, 30(17): 4617-4627
Yang C L, Duan R J, Li R M, Hu X W, Fu S P, Guo J C. The physiological characteristics of salt-tolerance in *Sesuvium portulacastrum* L.. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4617-4627
- [21] 李小方, 张志良. 植物生理学实验指导. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2016: 192-213
Li X F, Zhang Z L. Plant physiology experiment guide. 5th ed. Beijing: China Higher Education Press, 2016: 192-213
- [22] 高俊凤. 植物生理学实验指导. 1版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 101-103
Gao J F. Plant physiology experiment guide. 1st ed. Beijing: China Higher Education Press, 2006: 101-103
- [23] Zeng L, Shannon M C, Grieve C M. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by multiple agronomic parameters. Euphytica, 2002, 127(2): 235-245
- [24] 廖宝文, 张乔民. 中国红树林的分布、面积和树种组成. 湿地科学, 2014, 12(4): 435-440
Liao B W, Zhang Q M. Area, distribution and species composition of mangroves in China. Wetland Science, 2014, 12(4): 435-440
- [25] 黄小兰, 张婷, 谭人纲. 海南红树林资源现状与预警研究. 江西师范大学学报: 自然版, 2018, 42(3): 236-241
Huang X L, Zhang T, Tan R G. The studies on current status and ore-warning mechanism of mangroves in Hainan. Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science, 2018, 42(3): 236-241
- [26] 唐梦楠, 刘强, 张颖. 耐盐相关 miRNA 在红树伴生植物海马齿中对高盐生境的响应. 分子植物育种, 2017, 15(3): 1137-1142
Tang M N, Liu Q, Zhang Y. The response of the six salt related miRNAs of *Sesuvium portulacastrum* under the salt stress. Molecular Plant Breeding, 2017, 15(3): 1137-1142
- [27] 王松, 杜建会, 秦晶, 张琪, 邵佳怡. 样品预处理方法对海岸典型沙生植物非结构性碳水化合物含量测定的影响. 广西植物, 2018, 38(10): 1290-1297
Wang S, Du J H, Qin J, Zhang Q, Shao J Y. Influence of sample pretreating methods on determination of non-structural carbohydrate contents in typical coastal psammophytes. Guihaia, 2018, 38(10): 1290-1297
- [28] 漆光超, 姜勇, 李丽香, 梁士楚. 广西海岸潮间带草本植物群落的研究. 广西科学院学报, 2018, 34(2): 114-120
Qi G C, Jiang Y, Li L X, Liang S C. Research on the herb communities in the intertidal zone along coast of Guangxi. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2018, 34(2): 114-120
- [29] 朱小龙, 李振基, 赖志华, 宋爱琴, 王建林, 关少华, 杨伟伟, 郑凌峰. 不同光照下土壤水分胁迫对长苞铁杉幼苗的作用. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 76-81
Zhu X L, Li Z J, Lai Z H, Song A Q, Wang J L, Guan S H, Yang W W, Zheng L F. Effects of water stress on *Tsuga longibracteata* seedlings under varied light intensity. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2): 76-81
- [30] Peng C Z, Chang L L, Yang Q, Tong Z, Wang D, Tan Y H, Sun Y, Yi X P, Ding G H, Xiao J H, Zhang Y, Wang X C. Comparative physiological and proteomic analyses of the chloroplasts in halophyte *Sesuvium portulacastrum* under differential salt conditions. Journal of Plant Physiology, 2019, 232: 141-150
- [31] Yi X P, Sun Y, Yang Q, Yang Q, Guo A P, Chang L L, Wang D, Tong Z, Jin X, Wang L M, Yu J L, Jin W H, Xie Y M, Wang X C. Quantitative proteomics of *Sesuvium portulacastrum* leaves revealed that ion transportation by V-ATPase and sugar accumulation in chloroplast played crucial roles in halophyte salt tolerance. Journal of Proteomics, 2014, 99: 84-100
- [32] 白宇清, 谢利娟, 王定跃, 孙延军. 毛棉杜鹃对不同光照及土壤排水条件的生长及生理响应. 林业科学, 2016, 52(1): 48-54
Bai Y Q, Xie L J, Wang D Y, Sun Y J. Influences of different light intensities and soil water drainage on branch increment and some physiological indexes in leaves of *Rhododendron moulmainense*. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(1): 48-54
- [33] Messedi D, Slama I, Laabidi N, Ghnaya T, Savoure A, Soltani A, Abdelly C. Effect of nitrogen deficiency, salinity and drought on proline metabolism in *Sesuvium portulacastrum*. Biosaline Agriculture and Salinity Tolerance in Plants. Berlin: Springer, 2006: 65-72
- [34] 钱大文, 周鸿凯, 江大可, 孙泽荣, 陈晓宏, 袁建活. NaCl 胁迫下海马齿 (*Sesuvium portulacastrum* L.) 植株内游离脯氨酸的合成积累途径. 中国野生植物资源, 2013, 32(3): 35-39
Qian D W, Zhou H K, Jiang D K, Sun Z R, Chen X H, Yuan J H. Pathways of proline synthesis and accumulation in *Sesuvium portulacastrum* under the stress of NaCl. Chinese Wild Plant Resources, 2013, 32(3): 35-39
- [35] 杨宏伟, 刘文瑜, 沈宝云, 李朝周. NaCl 胁迫对藜麦种子萌发和幼苗生理特性的影响. 草业学报, 2017, 26(8): 146-153
Yang H W, Liu W Y, Shen B Y, Li C Z. Seed germination and physiological characteristics of *Chenopodium quinoa* under salt stress. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(8): 146-153
- [36] 张则宇, 李雪, 王焱, 常巍, 高雪芹, 伏兵哲. 59份苜蓿种质材料苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选. 草地学报, 2020, 28(1): 112-121
Zhang Z Y, Li X, Wang Y, Chang W, Gao X Q, Fu B Z. Salt tolerance evaluation and salt tolerance index screening of 59 alfalfa germplasm materials at seeding stage. Acta Agresia Sinica, 2020, 28(1): 112-121

- [37] 侯文焕,赵艳红,唐兴富,廖小芳,李初英.菜用黄麻种质萌发期耐盐性评价.植物遗传资源学报,2019,20(2):309-320
Hou W H, Zhao Y H, Tang X F, Liao X F, Li C Y. Assessment for salt tolerance in vegetable Jute germplasm at the germination stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(2): 309-320
- [38] 郑云霄,刘文斯,赵永锋,贾晓艳,祝丽英,黄亚群,陈景堂,郭晋杰.玉米种质资源的抗倒伏性评价及鉴定指标筛选.植物遗传资源学报,2019,20(6):1588-1596
Zheng Y X, Liu W S, Zhao Y F, Jia X Y, Zhu L Y, Huang Y Q, Chen J T, Guo J J. Evaluation of lodging resistance and selection of identification indexes of maize germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(6): 1588-1596
- [39] 张毅,侯维海,冯西博,韩玉娥,马跃峰,负民政,王建林.有色大麦种质芽期耐盐性鉴定.植物遗传资源学报,2019,20(3):564-573
Zhang Y, Hou W H, Feng X B, Han Y E, Ma Y F, Yun M Z, Wang J L. Evaluation of salt tolerance of colored barley germplasm during germination. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(3): 564-573
- [40] 张治振,李稳,周起先,孙伟,郑崇珂,谢先芝.不同水稻品种幼苗期耐盐性评价.作物杂志,2020,36(3):92-101
Zhang Z Z, Li W, Zhou Q X, Sun W, Zheng C K, Xie X Z. Salt tolerance evaluation of different rice varieties at seedling stage. Crops, 2020, 36(3): 92-101
- [41] 李慧琴,于娅,王鹏,刘记,胡伟,鲁丽丽,秦文强.270份陆地棉种质资源农艺性状与品质性状的遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2019,20(4):903-910
Li H Q, Yu Y, Wang P, Liu J, Hu W, Lu L L, Qin W Q. Genetic diversity analysis of the main agronomic and fiber quality characteristics in 270 upland cotton germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(4): 903-910
- [42] Lokhande V H, Nikam T D, Penna S. Biochemical, physiological and growth changes in response to salinity in callus cultures of *Sesuvium portulacastrum* L. Plant Cell Tissue & Organ Culture, 2010, 102(1): 17-25