

盐度对水培海马齿生长和生理生化因子的影响

李卫林^{1,2}, 罗冬莲^{1,2*}, 杨芳^{1,2}, 郑惠东^{1,2}, 林琪¹

(1. 福建省水产研究所, 福建省海洋生物增殖与高值化利用重点实验室, 福建 厦门 361013; 2. 福建省海洋生物资源开发利用协同创新中心, 福建 厦门 361013)

摘要: 通过水培实验模拟生态浮床, 研究海马齿 (*Sesuvium portulacastrum* L.) 在不同盐度条件下生长及生理生化响应特征, 探讨海马齿盐度适应性和海马齿生态浮床修复技术推广的适宜盐度范围。结果表明: 在中、低盐度 (0~20) 条件下, 海马齿生长几乎不受影响, 而在高盐度 (25~35) 水体中, 其生长受到明显胁迫, 其中盐度 35 处理组中部分海马齿茎节出现腐烂溃败的现象, 苗种成活率下降。不同盐度处理组新根数呈现为低盐度组 (0~10) > 中盐度组 (15~20) > 高盐度组 (25~35), 且高盐组的新根表现为粗、短特征。培养 40 d 后, 海马齿植株鲜质量、干质量、相对生长量、水分含量、根系活力和根质量随盐度升高呈现先上升后下降的趋势, 各指标最大值均落在盐度 5~15 范围内, 其中根系活力和根质量最大值均出现在盐度 15 处理组中, 分别为 10.9 mg 氯化三苯基四氮唑/(g·h) 和 1.62 g, 表明适当的盐度可以促进水培海马齿的根系发育; 除可溶性糖外, 海马齿叶片丙二醛和叶绿素含量受盐度变化影响较小, 无显著差异 ($p>0.05$), 说明海马齿利用渗透压调节机制抵抗环境盐胁迫, 以保证细胞内其他各生理生化指标维持较稳定的状态。综合不同盐度条件下海马齿生长、表观形态特征和生理生化因子的响应, 可初步确定其适宜生长盐度范围为 0~15。

关键词: 海马齿; 盐胁迫; 生理生化响应; 生态修复

中图分类号: Q948.118 **文献标志码:** A

海马齿 (*Sesuvium portulacastrum* L.) 又名滨水菜、滨苋、海马齿苋、滨马齿苋, 属于番杏科 (Aizoonaceae) 海马齿属 (*Sesuvium*), 是一种生长在海边沙地及河流入海口两岸滩涂地带的多年生肉质草本植物, 具有耐盐特性^[1]。由于海马齿具有较强的耐盐特性以及发达的

收稿日期: 2017-03-19 **录用日期:** 2018-08-06

基金项目: 海洋公益性行业科研专项 (201305043-4); 福建省属公益类科研院所基本科研专项 (2016R1003-6)

***通信作者:** 295807046@qq.com

根系,近些年被广泛地应用在近岸污染水体的修复治理上,是海域生态修复中具有创新性的举措。海马齿不仅能有效地移除水体中氮、磷等营养盐,还可以通过吸附水体中悬浮颗粒物已达到净化水质的目的^[2]。大量繁殖的海马齿还可以美化被修复水体的景观,有利于在近岸养殖区构建生态景观^[3]。此外,海马齿作为一种偶食蔬菜,具有较高的营养价值,有较大的开发利用潜力^[4-6]。

基于当前环境现状而开发的生态浮床技术已经得到生态学界尤其是修复生态领域学者的广泛认可^[7-11];得益于该技术的可移植性,生态浮床已经被广泛地应用在近岸水产养殖区以及河口污染水体和滩涂的修复上。利用海马齿较强的生长能力、较广的生态适应性特征,结合生态浮床技术所构建的海马齿生态浮床是该领域的一大创举。海马齿生态浮床不仅具备传统生态浮床的优势,还具有更高的可移植性、生态安全性和景观价值。海马齿生态浮床的实际应用范围较广,不仅在河口区,还应用于离岸养殖区的水质净化,但是不同水体环境理化参数差异较大,温度、盐度以及 pH 等都是影响海马齿植株生长的重要因素。在近岸水体中,盐度随着陆地冲淡水而变化而波动。近十年,已有学者针对盐度对海马齿生长的影响展开了相应的研究,但大部分研究都采用单盐 (NaCl) 的形式模拟盐胁迫对植株生理特征的影响^[12-15]。利用单盐模式可以针对 K^+ 和 Na^+ 离子通道、亚细胞结构在盐胁迫下的反应做出较精确的判断,而在实际海区中,水体中存在大量的盐类,属于复盐状态,此类研究相对较少。杨成龙等^[16]以海水浇灌方式研究了海马齿耐盐的生理特性,但这一研究采用的土培方式,与生态浮床的水培模式亦有差异。关于海马齿生态浮床在不同盐浓度胁迫下的生长特性以及生态适应性的报道较少,对盐度是如何作用于海马齿整体生长的机制尚不明了。

本研究利用软体模拟生态浮床,用海水和淡水混合配制成不同盐度的 1/2 Hoagland 营养液培养海马齿。观察海马齿表观形态特征,测定不同盐处理组海马齿植株鲜重和干重等生长指标和叶绿素、含水量、丙二醛、可溶性糖和根系活力等主要生理生化指标,分析不同盐条件下海马齿的生长差异,探讨海马齿对盐度的生态适应性,为海马齿生态浮床技术和海水蔬菜的开发与应用提供相应的理论基础。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 海马齿

实验所用海马齿采自福建省东山县八尺门盐生植物修复示范基地。海马齿处理参考杨成龙等^[16]方法，具体操作为：选取生长旺盛、长势均匀的海马齿植株作为母本，从分枝顶部摘取含有4个节的茎段(约15 cm)，移除茎段下部3节叶片，每株重量约(2.6±0.3) g ($n=10$)。先用自来水清洗3次，将剥离叶片的茎段浸泡于饱和次氯酸钙溶液中，消毒5 min，再用Milli-Q去离子水清洗3次。

1.1.2 海水

取台湾海峡洁净海水，在室温条件下静置6个月形成陈化海水(盐度为33.5)，该海水中氮、磷和硅等营养盐浓度较低且微量元素含量稳定，满足本研究的要求。低盐度海水用陈化海水和Milli-Q去离子水混合配制而成，高盐度海水用陈化海水加适量盐卤配制而成。

1.1.3 化学试剂

所用化学试剂(分析纯以上)购自国药集团化学试剂有限公司(Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd)。

1.2 试验设计

根据海马齿生态修复技术潜在的推广应用环境(近岸及河口区)，配制表征低(0, 5和10)、中(15和20)、高(25, 30和35)8个盐度梯度的海水，并以此海水配制成不同盐度处理的1/2 Hoagland营养液^[17]。采用24个黑色塑料盆，分为8组，每组3盆，每盆种植10株海马齿。将处理好的海马齿茎段定植于载体(可发性聚乙烯泡沫板)上，往每个塑料盆中添加3.0 L相应盐度的营养液，并将载体置于塑料盆中保持漂浮状态，以此模拟生态浮床。将各处理组置于室温自然光照条件下培养，每天监测培养液的盐度，并适当添加去离子水以避免实验期间因水分挥发造成培养体系盐度波动；每周更换一次培养液以确保培养体系中各项营养盐充足。实验开始后每天观测各处理组海马齿新根数；培养40 d后采样，每个处理组采集3株，进行其他各项生理生化指标分析，每种分析重复3次。

1.3 测定指标及方法

实验前两周每天观测并记录海马齿植株根系生长状态，分析盐处理对根系生长发育的影响。40 d后，相同处理组选取长势一致海马齿植株，分析植株生长状态、鲜重和水分含量；同时取相同叶位(从顶端上往下数第3片叶)叶片，测定叶绿素、丙二醛和可溶性糖含量等生理生化指标，方法参考郑丙松^[18]文献。根系活力采用TTC(氯化三苯基四氮唑)法，具体操作参照郑坚等^[19]文献。用TU-1810DPC双光束可见分光光度计测定相关指标。

植株鲜重相对生长量 (Relative Growth Yield, RGY) 计算公式^[20]为:

$$RGY = (FW_2 - FW_1) / FW_1$$

其中 FW_1 、 FW_2 是实验前后植株鲜重。

1.4 统计分析

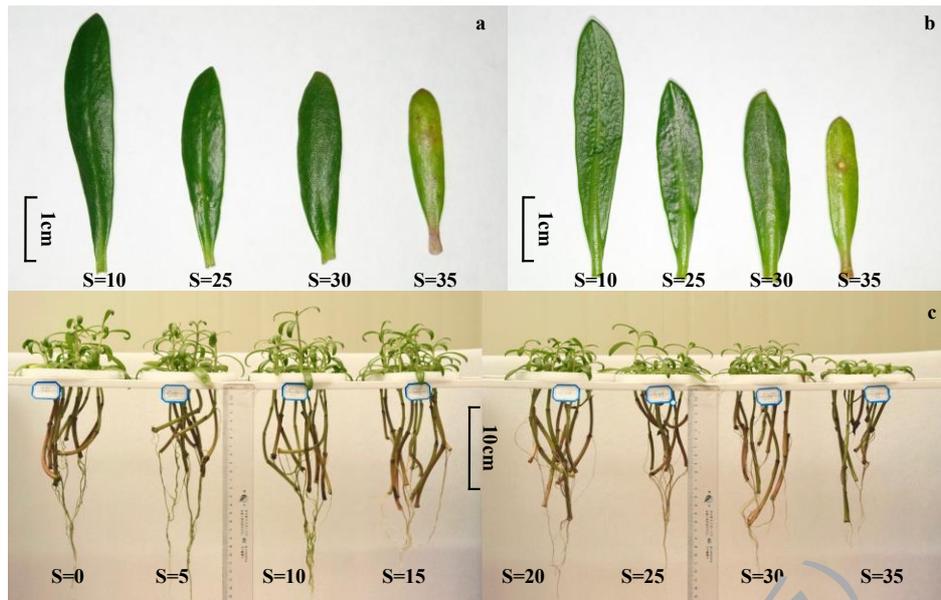
所有数据以平均值±标准差表示。采用 Excel 2013 软件对数据进行处理和作图。采用 SPSS 22.0 统计分析软件,通过单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)多重比较分析不同处理组海马齿植株形态和生理生化指标的差异,差异显著水平设置为 $p \leq 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 盐度对海马齿植株生长和形态的影响

2.1.1 植株形态

在不同盐度条件下培养 40 d, 海马齿植株长势、叶片形态、茎节长度和根系发育状况等均存在明显差异 (图 1)。在中、低盐度 (盐度 ≤ 20) 处理组中, 植株生长旺盛, 茎节较细, 节间较长; 叶片呈嫩绿色且肉质化程度低; 在高盐度 (25, 30 和 35) 处理组海马齿生长缓慢、植株矮小, 茎节长度较短, 叶片肉质化程度加重 (从顶端以下第二茎节第三叶位叶片为代表, 图 1(a)和(b))。在盐度 35 的处理组中, 部分茎节出现腐烂溃败的现象, 成活率不到 80% ($73\% \pm 15\%$)。



(a) 近轴面; (b) 远轴面; (c) 全株形态。

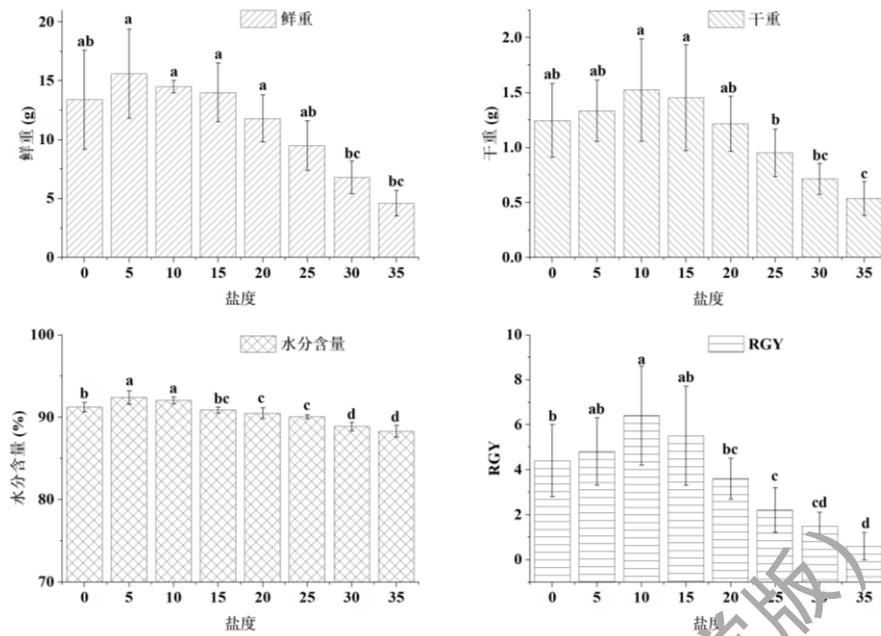
图 1 水培 40 d 后海马齿叶片和植株形态

Fig. 1 Morphology of *S. portulacastrum* under different environmental salt stress after 40 d hydroponic

2.1.2 植株质量和相对生长量

水培 40 d 后, 各处理组海马齿植株鲜质量随盐度上升呈现先上升后下降的趋势(图 2), 在中、低盐处理组中, 植株鲜质量无明显差异 ($p>0.05$); 而在盐度 30 以上的高盐处理组中植株鲜质量显著低于中盐度组 ($p<0.05$), 且盐度 35 处理组的单株鲜质量只有 (4.6 ± 1.1) g。

植株干质量和水分含量随盐度的变化趋势与鲜质量相似, 随着盐度的增加, 呈略微上升(图 2), 盐度 10 的处理组中海马齿干质量和水分含量均为最高值, 此后随盐度的升高而下降。植株鲜质量相对生长量也呈现相似的变化趋势(图 2), 盐度 10 处理组海马齿相对生长量最大 $(6.39 \pm 2.23\%)$, 而相对生长量最低值 (0.61 ± 0.57) 出现在盐度 35 处理组, 明显低于中、低盐度组 ($p<0.05$)。



上标小写字母不同表示差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

图2 海马齿植株鲜质量、干质量、水分含量和相对生长量随着盐度变化趋势 ($n=6$)

Fig. 2 The fresh weight, dry weight and water content of *S. portulacastrum* after 40 d hydroponic ($n=6$)

2.2 盐度对海马齿叶片叶绿素、丙二醛和可溶性糖含量的影响

2.2.1 叶绿素含量

如图3所示:不同盐度处理组中,海马齿总叶绿素和叶绿素b含量无明显差异($p > 0.05$),说明两者对环境盐度变化不敏感;而叶绿素a最高值均出现在盐度0处理组中,为(0.78 ± 0.17) mg/g,高于其他盐度处理组 ($p < 0.05$)。

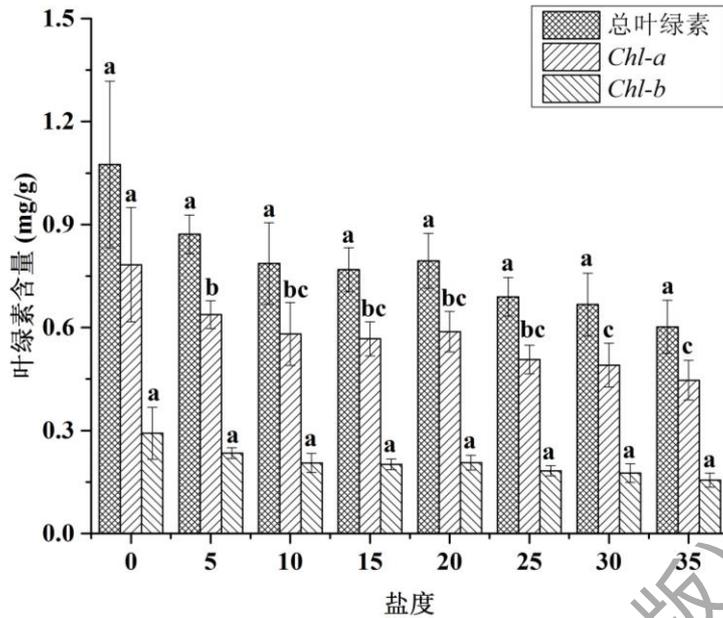


图3 海马齿叶片叶绿素含量对环境盐胁迫的响应 ($n=3$)

Fig. 3 The response of chlorophyll content in the leaves of *S. portulacstrum* to environmental salt stress ($n=3$)

如图4所示：环境盐度对叶绿素a和叶绿素b含量比值无明显影响 ($p>0.05$)，即盐度没有改变海马齿叶绿素的组分。

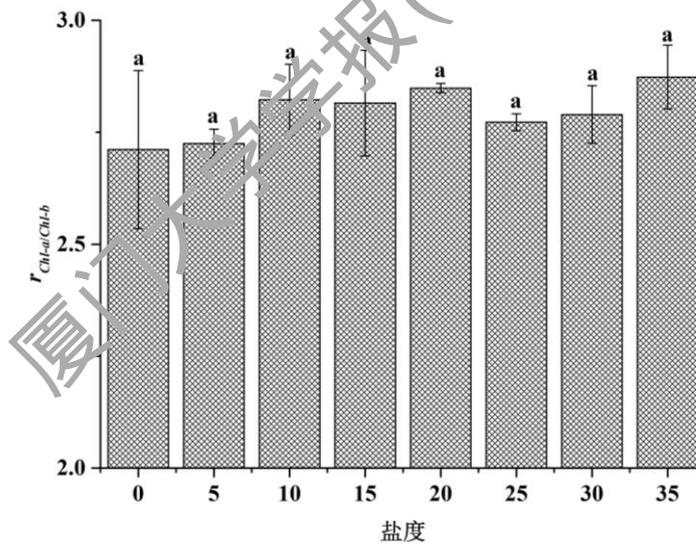


图4 海马齿叶片叶绿素a和叶绿素b含量比 ($n=3$)

Fig. 4 The ratio of chlorophyll a to chlorophyll b under different environmental salt stress ($n=3$)

2.2.2 丙二醛 (MDA) 和可溶性糖含量

如图5所示：不同盐度条件下海马齿叶片MDA含量差异不明显 ($p>0.05$)，即MDA对盐度响应不敏感。

随着环境盐度增加，海马齿叶片组织可溶性糖含量逐渐升高 (图5)，在盐度35处理组

中含量为(8.29±0.18) mg/g, 是淡水处理组的 2.3 倍, 说明盐胁迫能够诱导叶片细胞累积可溶性糖。

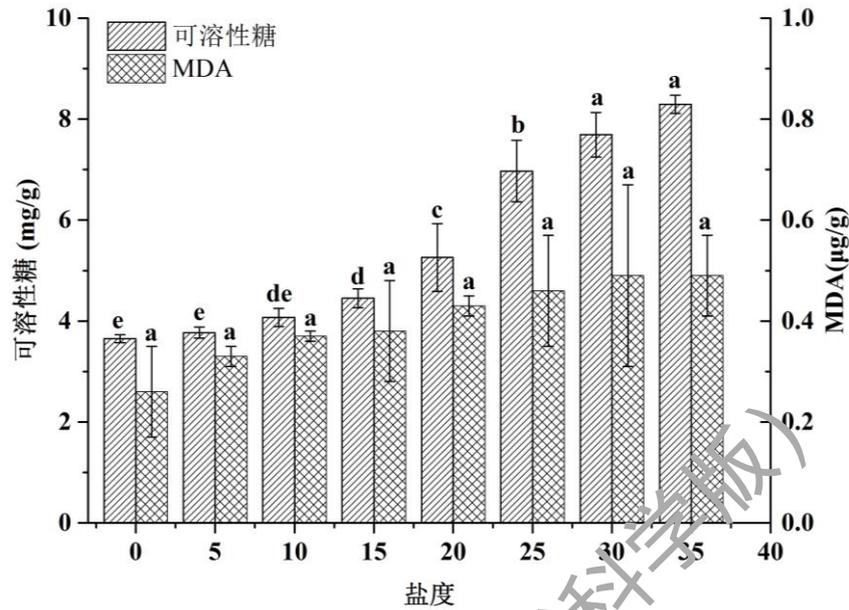


图5 水培40d后海马齿植株叶片丙二醛和可溶性糖含量 (n=3)

Fig. 5 MDA and soluble sugar contents in leaves of *S. portulacastrum* after 40 d hydroponic (n=3)

2.3 盐度对海马齿根系生长和发育的影响

2.3.1 根系发育

水培4d后, 在中、低盐度处理组中出现乳白色新根萌发, 而在高盐度组中新根萌发状态较差; 随着培养时间的延长, 各处理组新根数量逐渐增加, 呈现典型的“S”型增长曲线(图6); 6d后, 海马齿新根数表现为低盐度组(0~10) > 中盐度组(15和20) > 高盐度组(25~35)的趋势, 且高盐组新根表现为粗、短特征。

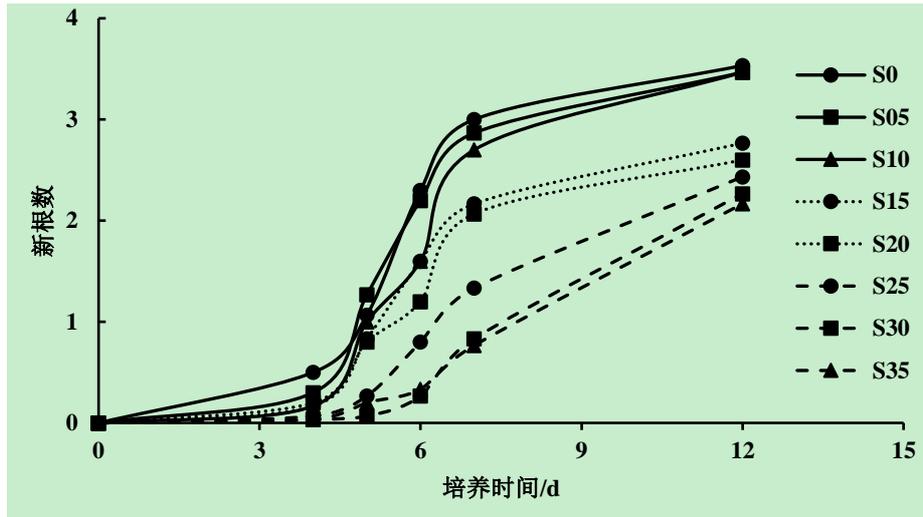


图 6 不同盐度梯度海马齿新根数随着培养时间的变化情况

Fig. 6 The variation of root numbers with culture time of *S. portulacstrum* under different gradients of salt stress

如图 7 所示：水培 40 d 后，盐度 15 处理中植株根质量最大，为 (1.62 ± 0.44) g；在盐度 35 处理组中，根质量仅为 (0.41 ± 0.18) g；且变化趋势与植株鲜质量（图 2）相似，随盐度上升表现出先上升后下降的趋势，表明适当的盐度可以促进海马齿根系的发育与生长，而高盐度则导致海马齿根系发育受限，产生胁迫效应。

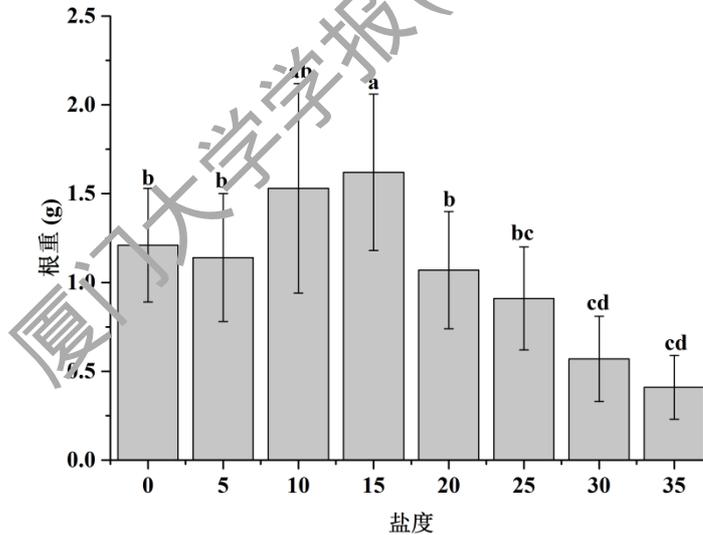


图 7 对盐胁迫处理 40d 后海马齿根质量 ($n=9$)

Fig. 7 Root weights of *S. portulacstrum* after 40 d hydroponic ($n=9$)

2.3.2 根系活力

根系活力是植株根系发育的关键生理指标，可以反应逆境中植物生长状态。随着盐度的升高，根系活力呈现先上升后下降的变化趋势（图 8），最大值出现在盐度 15 处理组中，为

(10.9 ± 0.3) mg TTC/(g · h)。盐度 20 和 25 处理组，根系活力较最高值下降了 12% 和 19%，降幅较小；盐度 35 处理组根系活力值仅为(5.9 ± 0.8) mg TTC/(g · h)，较盐度 0 和 15 处理组分别下降 30% 和 46% ($p < 0.05$)，表明在中、低盐度组中，海马齿根系活力较强，而高盐度胁迫则削弱根系活力。

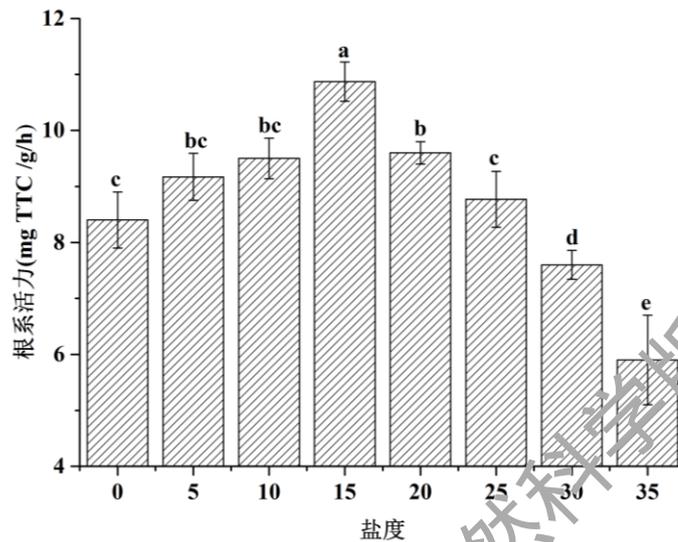


图 8 水培 40d 海马齿根系活力 ($n=3$)

Fig. 8 Root activities of *S. portulacastrum* for 40 d hydroponic ($n=3$)

3 讨论

海马齿是一种多年生肉质草本植物，是典型的盐生植物，在淡土和盐碱地都能完成其生活史；海马齿耐盐特性受多种因素综合的影响，是一种复杂的综合性状。海马齿虽然具有较强的耐盐能力，但在不同环境盐胁迫下所表现出来的形态结构、生长量和生理生化指标都存在明显的差异。杨成龙等^[16]以海水浇灌土培海马齿发现，1/2 全海水浇灌时海马齿叶片增大、变厚，而全海水浇灌则会抑制其生长。另一方面，Messedi 等^[21-23]研究结果表明海马齿在 400 mmol/L NaCl 溶液中（相当于盐度 23.4）能够很好地生长，而在高于此盐度则生长明显受到抑制。曾碧健研究海马齿表观生长特征与盐胁迫的关系时也指出海马齿在盐度 30 和 35 条件下生长受到明显抑制，茎节变短，叶片肉质化程度加重^[4]。在本研究中，随着水培环境盐胁迫加剧，尤其是盐度大于 20 的处理组，海马齿生长发生明显的变化，主要表现在节间变短、叶片增厚，生物量增长受抑制；海马齿植株鲜质量、干质量、水分含量和鲜质量相对生长量（RGY）随着盐度升高呈现略微上升后下降的趋势，且高盐度对表观生长指标均出现一定程度的抑制；在所有处理组中，叶片叶绿素 a/b 组成并没有产生明显差异，植株仍然能够正

常生长,由此可见,海马齿耐盐特性及盐胁迫下形状变化在土培和水培模式都存在,且模拟生态浮床的水培条件下盐胁迫导致的形态变化程度弱于土培方式。

可溶性糖作为许多非盐生植物的主要渗透调节剂,对维持细胞水分和酶正常代谢具有重要作用^[18]。本研究中海马齿叶片组织可溶性糖含量随着环境盐度升高而逐渐增加,这一结果与张艳琳等^[24]的研究结果相似,说明海马齿也能利用可溶性糖作为其渗透势调节机制,对水环境高盐胁迫产生一定抵抗作用。此外,钱大文等^[25]研究表明在 NaCl 胁迫下海马齿植株内游离脯氨酸合成累积,并表现出以谷氨酸-脯氨酸途径为主,鸟氨酸-脯氨酸途径为辅,且受 NaCl 胁迫的海马齿植株游离脯氨酸含量较对照组升高 14.5%~30.5%,同时结合本研究不同盐度处理的结果,说明海马齿在水培环境下,盐胁迫时能够启动可溶性糖和脯氨酸合成累积,与非盐生植物共享同样渗透势调节机制。

据王爱国等^[26]研究证实丙二醛(MDA)是细胞脂质过氧化作用的产物,其含量多少可以代表脂膜的损伤程度^[27]。MDA 的变化与膜透性构成一个矛盾的统一体,膜透性是直接反映脂膜损伤程度,MDA 是间接表示膜受损状态^[28]。本研究中海马齿叶片组织 MDA 含量随着环境盐胁迫加剧组间变化不显著,表明 MDA 对盐胁迫反应不敏感,即叶细胞未遭受脂膜损伤。

根是最早、最直接受到盐度胁迫的植物器官,根的发育与生长最终决定了植株能否健康生长。本研究中,以无性繁殖扦插处理的海马齿新根发育数随着培养时间呈现典型的“S”型曲线;培养一周后,不同处理组的新根数出现明显差异,低盐度组(0~10)>中盐度组(15和20)>高盐度组(25~35),且高盐组新根表现为粗、短特征;此外,根系活力表现为随盐度增加先升后降的趋势,与陈景明等^[29]和张艳琳等^[24]研究结论相似,最高值出现在盐度 15 的处理组中,表明在水培模式下,适当的盐度(≤ 15)能够促进海马齿的根系发育,提高其抗氧化能力,而高盐胁迫会抑制新根萌发、根须发育,进一步影响植株生长发育。

4 结 论

1) 在高盐度(25~35)条件下,海马齿生长缓慢、植株矮小,茎节长度较短,叶片肉质化程度加重,成活率下降。

2) 盐度会影响海马齿根系发育,高盐度导致根系活力和根质量下降,而适当的盐度(0~15)可以提高海马齿根系抗氧化能力,增强根系对环境胁迫的承受力。

3) 海马齿植株鲜质量、干质量、水分含量和相对生长量等表观生长指标最大值均出现在盐度 5~15 范围内, 而高盐对各指标均表现出抑制效应。

4) 除可溶性糖外, 海马齿叶片总叶绿素、叶绿素组成和丙二醛等生理生化指标对盐度变化不敏感, 不同处理间无明显差异。

综合不同盐度条件下海马齿形态学和各项生理生化指标, 可初步确定水培海马齿的生长适宜盐度范围为 0~15。本研究为海马齿生态浮床修复技术的推广和培育新型海水蔬菜提供了实践参考和理论基础。

致谢: 对刘小红、李丽芳和罗碧莲在海马齿培养中提供的帮助, 林永青和郑盛华在实验分析过程中给予的支持, 一并致谢。

参考文献:

- [1] 唐昌林. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1996, 26: 30-32.
- [2] 窦碧霞, 黄建荣, 李连春, 等. 海马齿对海水养殖系统中氮、磷的移除效果研究[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(5): 94-99.
- [3] 林栖凤. 耐盐植物研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 2: 34-35.
- [4] 曾碧健, 窦碧霞, 黎祖福, 等. 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[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(3): 568-575.
- [5] 范伟, 李文静, 付桂, 等. 一种兼具研究与应用开发价值的盐生植物——海马齿[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(6): 629-635.
- [6] LOKHANDE V H, NIKAM T D, SUPRASANNA P. *Sesuvium portulacastrum* (L.) a promising halophyte: cultivation, utilization and distribution in India[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2009, 56(5): 741-747.
- [7] 陈荷生, 宋祥甫, 邹国燕. 利用生态浮床技术治理污染水体[J]. 中国水利, 2005(5): 50-53.
- [8] 李先宁, 宋海亮, 朱光灿, 等. 组合型生态浮床的动态水质净化特性[J]. 环境科学, 2007, 28(11): 2448-2452.
- [9] 李伟, 李先宁, 曹大伟, 等. 组合生态浮床技术对富营养化水源水质的改善效果[J]. 中国给水排水, 2008, 24(3): 34-38.
- [10] HU G J, MIN Z, HOU H B, et al. An ecological floating-bed made from dredged lake sludge for purification

- of eutrophic water[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10): 1448-1458.
- [11] LI X N, SONG H L, WEI L L, et al. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 382-390.
- [12] HASEGAWA P M, BRESSAN R, ZHU J K, et al. Plant cellular and molecular responses to high salinity[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2000, 51(51): 463-499.
- [13] 李瑞梅, 周广奇, 符少萍, 等. 盐胁迫下海马齿叶片结构变化[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(2): 287-292.
- [14] LOKHANDE V H, NIKAM T D, PATADE V Y, et al. Effects of optimal and supra-optimal salinity stress on antioxidative defence, osmolytes and in vitro growth responses in *Sesuvium portulacastrum* L.[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 2011, 104(1): 41-49.
- [15] WANG D, WANG H, HAN B, et al. Sodium instead of potassium and chloride is an important macronutrient to improve leaf succulence and shoot development for halophyte *Sesuvium portulacastrum*[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 51(2): 53.
- [16] 杨成龙, 段瑞军, 李瑞梅, 等. 盐生植物海马齿耐盐的生理特性[J]. *生态学报*, 2010, 30(17): 4617-4627.
- [17] HOAGLAND D R, ARNON D I. The water-culture method for growing plants without soil[J]. *California Agricultural Experimental Station Circular*, 1950, 347(5406): 357-359.
- [18] 郑炳松. 现代植物生理生化研究技术[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 40-92.
- [19] 郑坚, 陈秋夏, 金川, 等. 不同TTC法测定枫香等阔叶树容器苗根系活力探讨[J]. *浙江农业科学*, 2008, 1(1): 39-42.
- [20] 邱念伟, 马宗琪, 王凤德, 等. 一种测定植物相对生长量的方法. *山东科学*, 2007, 20(2): 24-28.
- [21] MESSEDI D, LAABIDI N, GRIGNON C, et al. Limits imposed by salt to the growth of the halophyte *Sesuvium portulacastrum*[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005. 167(6): 720-725.
- [22] MESSEDI D, SLAMA I, LAABIDI N, et al. Effect of nitrogen deficiency, salinity and drought on proline metabolism in *Sesuvium portulacastrum*[J]. *Biosaline Agriculture and Salinity Tolerance in Plants*, 2006: 65-72.
- [23] MESSEDI D, SLEIMI N, ABDELLEY C. Some physiological and biochemical aspects of salt tolerance of *Sesuvium portulacastrum*[J]. *Springer Netherlands*, 2003, 16(18): 3605-3626.
- [24] 张艳琳, 范伟, 蔡元保, 等. 海马齿对不同比例淡水海水组培的生长和生理响应[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(6): 1240-1245.
- [25] 钱大文, 周鸿凯, 江大可, 等. 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[J]. 中国野生植物资源, 2013, 32(3): 35-39.

[26] 王爱国, 邵从本, 罗广华. 丙二醛作为植物脂质过氧化指标的探讨[J]. 植物生理学报, 1986(2): 57-59.

[27] 肖雯, 贾恢先. 几种盐生植物抗盐生理指标的研究[J]. 西北植物学报, 2000, 20(5): 818-825.

[28] FLOWERS T J, TROKE P F, YEO A R. The mechanism of salt tolerance in halophytes[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1977. 28(28): 89-121.

[29] 陈景明, 冯永丰, 李裕红, 等. 盐胁迫对海马齿根系活力及总抗氧化能力的影响[J]. 泉州师范学院学报, 2016, 34(2): 10-13.

Effects of Salinity on Growth, Physiology and Biochemistry of Hydroponic *Sesuvium portulacastrum* L.

LI Weilin^{1,2}, LUO Donglian^{1,2*}, YANG Fang^{1,2}, ZHENG Huidong^{1,2}, LIN Qi¹

(1. Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China; 2. Fujian Collaborative Innovation Center for Exploitation and Utilization of Marine Biological Resources, Xiamen 361013, China)

Abstract: *Sesuvium portulacastrum*, a typical halophyte, has been applied in ecological remediation of polluted waters combined with floating bed technology in recent years. The present investigation intended to study the growth and physiological responses of hydroponic *S. portulacastrum* under different environmental salt conditions, and explored the salinity adaptability of *S. portulacastrum* and suitable salinity range for promotion of this ecological floating bed technology. Results showed that *S. portulacastrum* could grow fast and healthy at low salinity ($S \leq 20$); However, the relative growth yield (RGY) slowed down, the internode became shorter and leaves more fleshy with the increase of environmental salinity, and the survival rate

decreased to less than 80% in the highest salt stress groups ($S=35$). With the increase of salinity, the soluble sugar and stem girth increased, while the fresh weight, roots weight and roots activity first increased then decreased. All the *S. portulacastrum* plants in the experimental group with salinity 15 displayed the strongest root activity (10.9 ± 0.3 mg TTC/(g•h)), the highest roots weight and grew better than others during the study, which indicated that the suitable salinity range for *S. portulacastrum* was 0 to 15. Our results suggest that appropriate salinity was conducive to the growth of *S. portulacastrum* compared to fresh water and sea water, and *S. portulacastrum* have high salt-tolerance, in which osmotic adjustment is one of the mechanisms of adaptation to the environmental salt stress.

Key words: *Sesuvium portulacastrum*; salt conditions; physiological responses; ecological remediation

廈門大學學報(自然科學版)