

海马齿生态适应能力与修复应用研究

刘 炜^{1,3}, 熊怡然¹, 郜晓峰¹, 刘金林¹, 孙 彬^{1,2}, 何培民^{1,2*}

1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海水域生态环境工程高校研究中心, 上海 201306; 3. 温州科技职业学院农业与生物技术学院, 浙江温州 325006

摘 要: 海马齿生态修复技术在福建等地的应用效果显著, 但能否应用于杭州湾成为值得探讨的问题。杭州湾水域的主要问题是富营养化, 海马齿在快速生长过程中能够吸收大量氮、磷, 从而移除水体中过剩的营养盐。本文通过研究海马齿对不同光强、盐度和温度的生态适应能力, 并对低温和高盐 2 种生态逆境及复合逆境进行进一步研究, 以满足实际情况中海马齿修复杭州湾湿地或水域所面对的逆境状况。结果表明: (1) 海马齿对光强耐受范围较广, 光饱和点为 $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 不耐受强光照射, 但强光对相对电子传递效率抑制较低。(2) 海马齿对盐度耐受范围较宽, 低盐和淡水条件下均可生长, 能耐受 25 以上高盐; 盐度在 15 以下时生长状态最佳, 相对生长率显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 适宜的盐处理能促进根系生长发育。(3) 海马齿对温度耐受范围广但不耐受低温。高温下海马齿依然保持较高生长率, 25°C 时生长状态最佳, 生长率显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 表现为干物质积累较快, 植物的株高、根长增长较快, 叶片数量增加。 5°C 时遭受低温胁迫, 该胁迫可逆, 升温后植物可恢复生长, 0°C 时约 24 d 植株完全死亡。(4) 复合逆境实验结果显示, 5°C 时淡水组出现植株死亡, 但盐度 25 时存活率为 100%, 0°C 盐度 25 时存活率为 40%, 淡水组植株全部死亡, 表明盐胁迫处理时长可能有利于低温下植物抵御胁迫。室外实验表明, 海马齿能够适应杭州湾气候, 但仍需考虑极端天气的影响。综上, 海马齿生态修复技术基本能应用于杭州湾, 研究结果将为杭州湾生态治理提供新的思路。

关键词: 海马齿; 杭州湾; 生态适应性; 胁迫; 生态修复

中图分类号: X171.4; X173 文献标识码: A

Ecological Adaptation and Restoration Application of *Sesuvium portulacastrum* L.

LIU Wei^{1,3}, XIONG Yiran¹, GAO Xiaofeng¹, LIU Jinlin¹, SUN Bin^{1,2}, HE Peimin^{1,2*}

1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai University Research Center of Water Environment Ecological Engineering, Shanghai, 201306, China; 3. College of Agriculture and Biotechnology, Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou, Zhejiang 325006, China

Abstract: The technology of planting *Sesuvium portulacastrum* for ecological restoration has been widely used in Fujian and other places with remarkable results. It is worth discussing whether it can be applied in Hangzhou Bay with eutrophication. The rapid growth of *S. portulacastrum* can absorb large amounts of nitrogen and phosphorus and remove excess nutrients from water. In this paper, the ecological adaptability of *S. portulacastrum* to different light intensity, salinity and temperature were studied, and the low temperature and high salinity stress and compound stress were studied further, which is to meet the actual restoration necessary of Hangzhou Bay wetland or water area using *S. portulacastrum*. *S. portulacastrum* had a wide tolerance to light intensity, with a light saturation point of $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and was intolerant to high light irradiation, but the inhibition of high light on relative electron transfer efficiency was low. *S. portulacastrum* had a wide range of tolerance to salinity, which could grow in low salinity or fresh water, and the spe-

收稿日期 2022-03-09; 修回日期 2022-06-28

基金项目 国家科技支撑计划项目 (No. 2012BAC07B03); 上海市海洋局科研项目 (沪海科 2015-02)。

作者简介 刘 炜 (1995—), 男, 硕士, 研究方向: 植物生态学与生态修复。*通信作者 (Corresponding author): 何培民 (HE Peimin), E-mail: pmhe@shou.edu.cn。

cies can tolerate high salt stress more than 25. It grew better in salinity 15 than those of all treatment groups ($P < 0.05$). Appropriate salt treatment could promote root growth and development. *S. portulacastrum* could tolerate a wide range of temperature expect for very low temperature. *S. portulacastrum* still maintained a high growth rate in high temperature, 25°C was the best status for the species growth, and the growth rate was significantly higher than that of other treatment group ($P < 0.05$) with accumulation of dry matter faster, plant height, root length grew rapidly and leaf number increased. Low temperature stress in 5°C was reversible and the plant could grow when temperature rose. But the plant was completely dead under 0°C in about 24 days. The plants in the fresh water group died at 5°C, but the survival rate of salinity 15 was 100% at 25°C, the survival rate of salinity 25 was 40% at 0°C, and all plants in the fresh water group died, indicating that salt stress may be beneficial to plant resistance to low temperature stress. Outdoor experiments showed that *S. portulacastrum* could adapt to Hangzhou Bay climate, but the effect of extreme weather needs to be considered. In conclusion, the ecological restoration technology of *S. portulacastrum* could be applied in Hangzhou Bay basically, and the study would provide a new idea for the ecological restoration of Hangzhou Bay.

Keywords: *Sesuvium portulacastrum*; Hangzhou Bay; ecological adaptability; stress; ecological restoration

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.02.023

海马齿 (*Sesuvium portulacastrum*) 又叫滨水菜, 属于番杏科海马齿属, 是一种多年生肉质草本植物^[1], 分布于福建、台湾、广东 (台山)、海南 (南部) 及东沙岛等热带和亚热带海岸, 由于其独特的生理特性和良好的生态修复功能, 厦门大学黄凌风团队应用该植物在浙江梅山湾进行生态修复, 植株顺利过冬 (尚未发表)。海马齿常见与红树林伴生于河口泥滩、沼泽、盐滩、石灰岩海岸带等盐碱地, 是具有稳定盐渍土作用的兼性盐生植物, 被用于我国南方海域生态修复工程中^[2]。国内外早期对该植物的研究较关注其耐盐能力, MESSEDDI 等^[3]发现海马齿在高至 600~1000 mmol/L 的 NaCl 溶液中其生长才受到抑制, 由此, 很多学者陆续开展了其耐盐机制与相关基因组学、转录组学等研究^[4-6], 并由此开展了盐碱地生态修复工程的应用研究。近年来对海马齿耐重金属的研究较多, 发现其对铅^[7]、锌^[8]、无机汞^[9]、镍^[10]、铜^[11]等重金属具有良好的耐性与富集作用, 具有极强的逆境适应性, 开始用于废弃矿区修复, 并逐步扩大到其他污染环境的修复。福建水产研究所与厦门大学率先应用海马齿生态浮床对富营养化海域进行原位生态修复^[12], 在筲笕湖、八尺门海域等地修复效果良好, 但面临技术应用推广的难题^[13], 因此, 亟需确定海马齿生态适应能力和应用区域等问题。

杭州湾位于浙江省北部、上海市南部, 东临舟山群岛, 西有钱塘江汇入, 是全国唯一的河口型海湾, 处于副热带季风性气候区^[14]。该区域经济活跃, 自然和旅游资源丰富, 区位优势明显。但随着人类活动和不合理的围填海等, 2001—

2018 年杭州湾全海域水质为劣四类, 主要污染物为无机氮、活性磷酸盐和油类, 海水呈富营养化, 浮游植物密度较高, 海洋生态系统总体不健康, 生态系统功能受到严重损害^[15]。由于杭州湾呈喇叭状, 半日潮水文条件, 湾内水体扩散条件差; 河口海湾淡水咸水相互作用, 加上长江径流带来的营养盐叠加, 该生态系统难以完成自我净化^[16], 因此, 亟待对杭州湾海域进行人工生态修复。

海马齿对磷的半饱和和吸收常数达 0.9593 mg/L, 高于多数植物对磷的半饱和吸收常数, 氮的半饱和和吸收常数为 0.4455 mg/L^[17], 富营养化控制能力极强, 对磷具有较高耐受性, 对多环芳烃类、重金属等也具有较好的耐受能力与富集能力^[18], 适用于杭州湾水体的修复工程。海马齿生态浮床技术是较为成熟的水域生态修复手段之一^[19], 已应用于福建、广东、浙江等地的水域生态修复, 由于海水限制使浮床形成物理隔离, 使得海马齿生态风险极低, 并不会造成生物入侵风险, 并且其根系能够为水生生物提供栖息场所。海马齿是原生于热带亚热带地区的植物, 探究海马齿的低温极限和对逆境环境的适应性, 对海马齿修复技术的示范推广和确定海马齿的生态修复区域十分必要。本研究通过室内温度、盐度模拟实验和野外滨海栽培海马齿, 阐明海马齿能适应的低温极限, 单一胁迫和盐、低温双重胁迫下海马齿的生态适应能力, 并据此研究海马齿生态修复技术在杭州湾应用的可行性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杭州湾地处副热带季风气候区, 风向表现为

季风特征, 冬季一般为偏北风, 夏季一般为偏南风, 气候特征是冬夏季季风交替, 四季分明, 阳光充足, 气候湿润, 雨热同期, 该区域 5—10 月有台风活动, 且集中在夏季 7—9 月, 大风、暴雨、风暴潮等突发性小范围灾害性天气时有发生。实验区域如图 1 所示, 位于杭州湾北岸上海市南汇东滩湿地, 位于长江口以南, 杭州湾海区 121°50'E 以东区域。

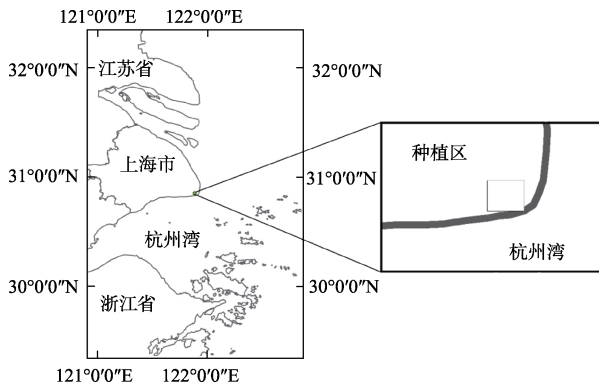


图 1 研究区域地理位置
Fig. 1 Location of study area

1.2 方法

1.2.1 材料预处理 实验使用的海马齿由福建水产研究所提供, 海马齿培养液采用霍格兰营养液^[20], 按照李卫林等^[21]的方法, 取生长旺盛、长势均匀的海马齿, 从上向下数 4 个茎节, 移除下方 2 个茎节叶片, 自来水清洗 3 次, 再用去离子水清洗 3 次, 用饱和 $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ 溶液消毒 5 min, 再用去离子水清洗 3 次, 定植在载体上 (聚乙烯泡沫板)。

1.2.2 室内实验设计 (1) 光响应实验。取海马齿植株 20 株, 暗适应 20 min, 在室温下, 通过调制叶绿素荧光仪 Dual-PAM 100 测定不同光照强度下的相对电子传递效率 ($rETR$), 光合有效辐射 (PAR) 设定为 0、7、15、33、91、169、211、327、498、756、1175 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 同一植株测定 3 次, 记录每次的光合速率 (P_n), 即 $rETR$ 。将结果均值根据 PLANTT 等 1980 年研究的拟合曲线, 光曲线模拟式如下:

$$P_n = P_m \times (1 - e^{-\alpha \times \text{PAR}/P_m}) e^{-b \times \text{PAR}/P_m}$$

式中, P_n 为光合速率, 即 $rETR$; P_m 为最大电子传递效率 $rETR_{\text{max}}$, α 为初始斜率, b 为光抑制参数, $I_k = P_m/\alpha$, 即半饱和光强。

(2) 盐度实验。在塑料盆内加入 0、5、10、

15、20、25、30 共 7 个盐度梯度霍格兰营养液 3 L, 每个载体上定植 5 株海马齿, 使载体漂浮在盆中, 模拟生态浮床, 置于恒温培养箱中, 设置光照强度 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光暗比为 12 h : 12 h, 每隔 2 d 补充 1 次纯水维持盐度不变, 每周更换 1 次培养液, 连续培养 35 d, 记录培养前后的鲜重、株高、根长, 相对生长率为鲜重差和培养天数的比值, 株高增长量是株高差。

(3) 温度实验。在塑料盆内加入 3 L 霍格兰培养液, 培养液由纯水配置, 其他条件同盐度实验, 分别放置在温度为 0、5、10、15、20、25、30、35、40°C 的培养箱中, 每周更换 1 次培养液, 连续培养 35 d, 记录培养前后的鲜重、叶片数、根长。

(4) 盐、寒复合胁迫实验。在塑料盆内分别设置盐度为 0 的淡水和 25 的海水, 加入适量且等量霍格兰溶液, 体积为 3 L, 每盆定植海马齿植物 5 株, 分别置于 0、5、25°C 的恒温培养箱中进行培养, 3 盆重复, 共计 18 盆 90 株, 即 $T_0\text{-}S_0$ 、 $T_0\text{-}S_{25}$ 、 $T_5\text{-}S_0$ 、 $T_5\text{-}S_{25}$ 、 $T_{25}\text{-}S_0$ 、 $T_{25}\text{-}S_{25}$ 六组, 每隔 2 d 补充 1 次纯水维持盐度, 每周更换 1 次培养液, 光强和光暗比同盐度实验, 连续培养 35 d, 35 d 后恢复温度为 25°C, 测算植株的存活率。

1.2.3 野外栽培实验 在杭州湾北岸湿地设置 10 m × 10 m 的栽培区, 植株淹没期约 8 h。于 2020 年 10 月 4 日栽种海马齿 200 株, 2020 年 11 月 4 日记录气温和植株存活数, 计算存活率, 至 2021 年 1 月 20 日实验结束。

1.3 数据处理

采用 Excel 软件 (2016 版, 美国华盛顿) 进行数据预处理, 生物数据采用 SPSS 软件 (19.0 版, 美国纽约) 进行 one-way ANOVA 分析, 显著水平为 $P < 0.05$, 并采用 SPSS 19.0 软件进行光响应曲线模拟, 输出拟合值后采用 Origin 软件 (8.0 版, 美国马萨诸塞州) 作图。

2 结果与分析

2.1 海马齿的光响应模型

2019 年 12 月 18 日, 对采集的海马齿暗适应后进行光响应曲线测定, 10 个重复数据在不同光合有效辐射 (PAR) 的均值得到其光响应曲线 (图 2)。按照公式进行拟合后, R^2 为 0.9910, 拟合效果良好。

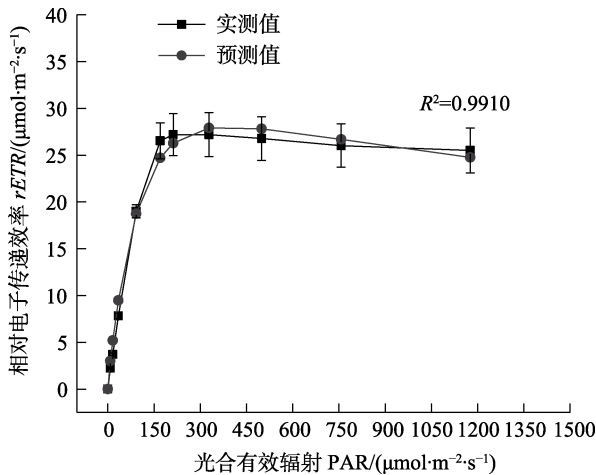


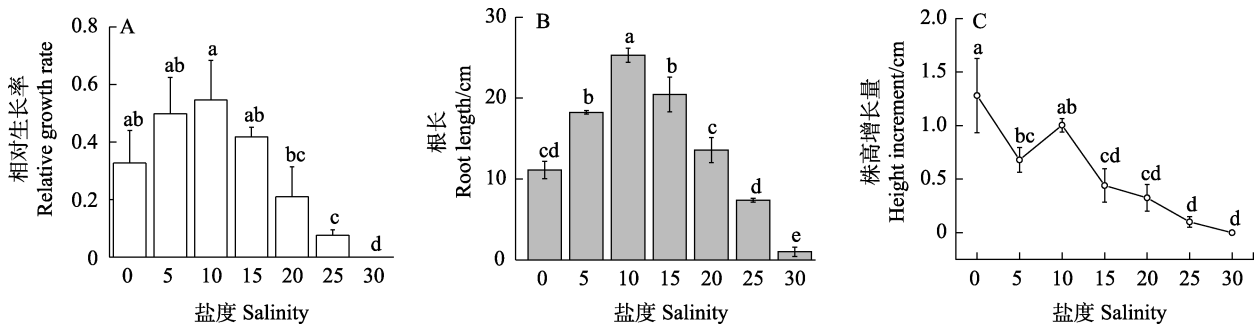
图 2 光响应曲线与模型预测
Fig. 2 Light curve and model

样本数据模拟出的曲线有明显的先上升后下降的趋势，表明在低光强时，光合能力随着光强增加而增强，达到一定光强时则会下降，即出现了

光抑制现象。由模拟计算得出该时间段内采集到的海马齿半饱和光强为 $96.28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，饱和光强为 $384.05 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，由于 Dual-PAM 100 无法测定暗呼吸且为了方便实验设计，将 $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 确定为本批次样品最适光强，此时未出现光抑制，植物光合系统活跃。

2.2 海马齿的耐盐实验

如图 3 所示，海马齿在淡水和海水中均能成活，当海水盐度达到 30 后，海马齿丧失调节能力，在长时间培养中存活率较低。在盐度 0~25 水域中可以生根生长，并且在盐度 10 时获得最大相对生长率，通过对比可知，海马齿在盐度为 0 的培养液培养时，株高增加最快，而其相对生长率与盐度为 10 处理组差异并不显著，两组根长差异显著，表明一定浓度的盐处理会促进海马齿植株的根系发育。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 3 不同盐度处理对海马齿生长的影响

Fig. 3 Effects of different salinity treatments on the growth of *S. portulacastrum*

2.3 海马齿的温度适应性

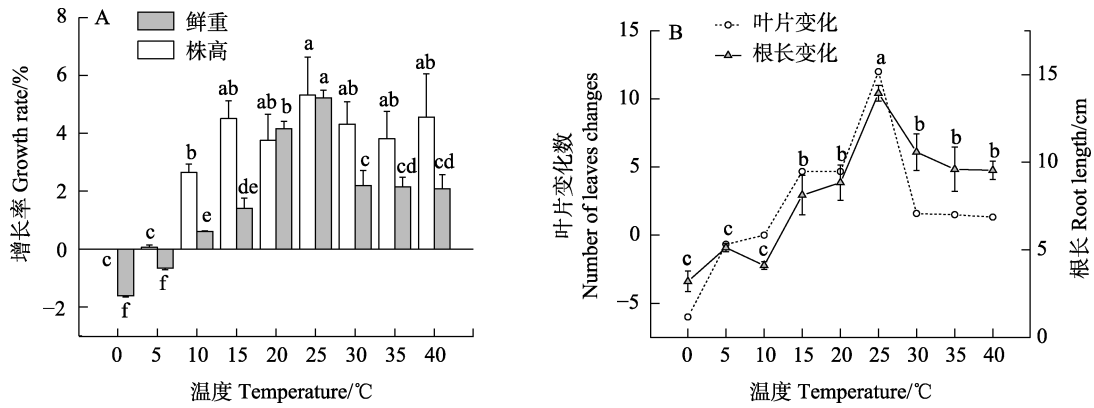
温度是影响植物生长的重要环境因子，在本研究中更关注低温状态下植株的生长生存情况。如图 4 所示， 25°C 处理组表现出良好的生长情况，鲜重增长率最高，与其他温度处理组相比差异显著 ($P < 0.05$)，为 $5.20\% \pm 0.04\%$ ；而且该处理组株高增长最快，但相对于 15、20、30、35、 40°C 处理组差异不显著 ($P > 0.05$)；该组叶片数增加最多，高于其他处理组。低温状态下， 5°C 和 0°C 时出现负增长，植物鲜重下降，株高生长几乎停滞。 0°C 处理组表型变化为 3 d 后出现叶片局部发黑，叶片失水皱缩，大约 15 d 左右出现茎节软化，自水下部分逐渐溃烂，大约 24 d 左右，植株基本死亡； 5°C 处理组表型变化为叶片失水严重，指压留有痕迹，植物茎节软化，难以保持挺立，但

当 35 d 实验周期结束后，温度恢复至 25°C 时，植物恢复生长。

根是植物的重要器官之一，对环境因子的变化十分敏感^[22]。由图 4 可知， 25°C 处理组根长较其他处理组更长，差异显著 ($P < 0.05$)，低温状态下根系生长有限， 0°C 时平均根长为 $(3.20 \pm 1.01)\text{cm}$ 。

2.4 室内复合胁迫实验与野外实验结果

杭州湾是典型的湾区，水域盐度处于中盐水平，年均气温在 0°C 以上，但实际应用时海马齿面临盐、寒双胁迫，需对盐、寒复合胁迫下海马齿的生态适应性进行研究。通过复合胁迫得出(图 5)， 25°C 条件下，盐度为 0 和 25 时海马齿的存活率均为 100%； 5°C 时，盐度 25 处理组的存活率为 100%，盐度 0 处理组的存活率为 80%； 0°C 时，



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 4 不同温度处理对马海齿生长的影响

Fig. 4 Effects of different temperature treatments on the growth of *S. portulacastrum*

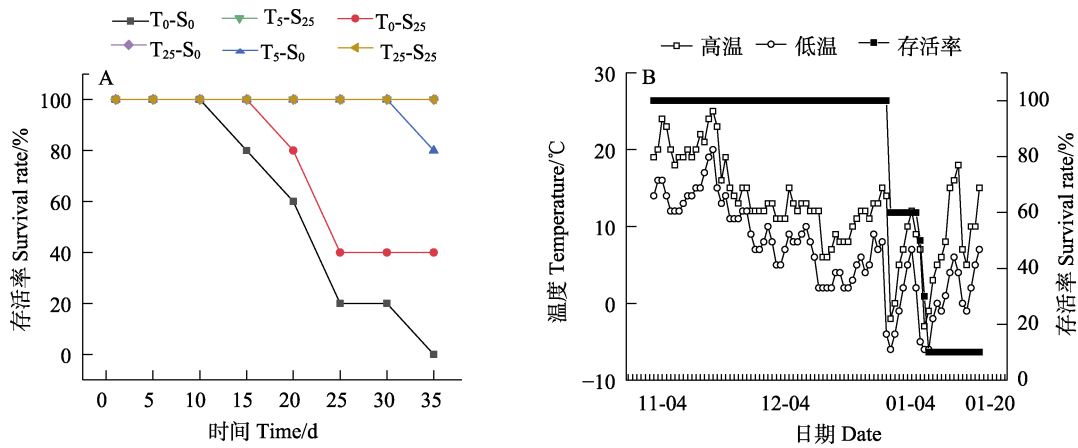


图 5 室内复合胁迫与野外实验的存活率

Fig. 5 Survival rate under indoor compound stress and field experiment

出现较高的死亡率,盐度 0 处理组植株全部死亡,盐度 25 处理组的存活率为 40%。

海马齿在杭州湾实验区能正常度过秋季,但需对冬季严寒时间段进行监测。野外栽培开始时间为 2020 年 11 月 4 日,结束时间为 2021 年 1 月 20 日,最终存活率为 10%。其中经历了 2 次寒潮,最低气温为 -6°C ,远远超出海马齿低温忍耐极限,造成海马齿种群数量 2 次锐减。2021 年 3 月海马齿恢复生长,种群数量上升。

3 讨论

3.1 海马齿的生态适应性

本研究中,海马齿由福建采集运送至实验室时,植株可能遭受了一定程度的伤害,从海马齿的光响应曲线可以看出,此时海马齿对高光强不具有特殊的耐受能力,在室内长期培养后发现海马齿半饱和光强与光饱和点显著提升,光饱和点

近乎消失。对于植物光饱和点的研究^[23],有人认为冬小麦有时光饱和点会很大,甚至消失^[24],但在遭受干旱胁迫时,光饱和点会下降,即会产生光抑制现象^[25]。因此,本研究中采用 2 种光饱和点确定方法,一是有光抑制时,则曲线中的 P_m 对应的光强即光饱和点,另一种是没有光抑制时,则理论上没有光饱和点,可通过模型模拟出的 P_m 为标准,认为达到其一定比例即达到光饱和点。但本研究旨在确定实验所用批次海马齿的最适光强的范围,确定 $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 作为最适光强,此时海马齿的生活状态良好,光合作用活跃,并且较低光强下能够生长,表明海马齿耐阴能力强,在杭州湾大规模应用时,一定程度上需考虑植物的光照条件。

杨成龙等^[26]用海水浇灌海马齿,发现海马齿在低于 1/2 海水浇灌下生长旺盛,根部 Na^+/K^+ 离子交换能力很强,全海水浇灌时生长抑制。曾碧

健等^[27]发现海马齿盐度 35 下长期培养,存活率仅为 30%左右。本研究在恒温培养箱中进行,蒸发量较大,盐度产生短时波动,与前人研究基本一致。海马齿对盐度具有较强的适应能力,盐度 30 约为 27.6 g/L NaCl 溶液,此时植株出现死亡,盐度 25 时,海马齿仍能维持正常的生理过程,并保持植株生长;淡水时,海马齿同样具有较高的生理活性,表明海马齿具有较广的盐度适应范围,能够在多种水域环境生存。在盐度 10 时的各生长指标均最高,仅株高生长量较淡水培养的低,说明适当的盐度能促进海马齿的生长和发育,特别是根系的发育,表明海马齿具有作为近海、河口水体生态修复种的潜力。海马齿根系发达,能够对富营养化水域氮、磷等营养盐进行同化吸收,对颗粒物有吸附和沉降作用,同时根系为微生物群落提供生存环境^[28],脱氮微生物具有较大丰度,根系越长则反硝化作用越大。就杭州湾而言,其盐度适合海马齿生态浮床的大规模应用,并且该水域盐度对海马齿生长具有促进作用。

温度是海马齿在杭州湾应用的最大障碍,也是海马齿生态浮床技术推广面临的难题。研究表明,25℃时海马齿达到最大生长速率,鲜重增长和平均根长显著高于其他处理组,理论上此时的海马齿生态修复能力最强。面对高温,海马齿生长状态良好,具有较强的耐高温能力,但在低温状态下表现一般,5℃时,海马齿生长基本停滞,叶片和茎节软化,鲜重小幅下降,但温度恢复时,植株恢复生长,此时海马齿遭受的低温伤害可逆。

低温可以直接减缓植物的新陈代谢,降低细胞膜流动性,进而限制膜功能,导致离子转运、电子传递等功能难以进行^[29],蛋白质稳定性遭受干扰^[30],抗氧化酶系统钝化^[31],最终造成植物死亡。实验中 0℃时,植株受冻害严重,鲜重下降剧烈,植株生长停滞,叶片发黑皱缩,茎节溃烂,最终死亡,持续时间约 24 d。可见海马齿生态适应能力较强,基本能够适应杭州湾水域的光照条件、盐度条件和温度条件。

3.2 低温与盐胁迫的关系

在盐、寒复合实验中,0℃淡水组存活率为 0%,0℃盐度 25 处理组未完全死亡,且 5℃盐度 25 处理组存活率 100%,淡水组出现死亡,表明一定的盐度处理能够协助植物抵御低温胁迫。孙港等^[32]对甜瓜幼苗的研究表明,低温和盐胁迫的协同作用即双重胁迫对植株危害更大。本研究结

果产生差异可能时因为采用的水培方式,海水在 0℃时并不会结冰,植株此时仍能进行水分运输,淡水则表层结冰,对植株根系生长产生压力;也有可能是海马齿作为红树伴生植物,长期适应盐胁迫,适度的盐处理能协助植株维持渗透势,而淡水处理组可吸收离子较少,难以维持渗透势,胞内水分外流结晶,造成植株死亡;还有就是可能盐处理组植株体内抗氧化酶系统十分活跃,大量的抗氧化酶不断清除植物体内活性氧(ROS),当低温胁迫产生 ROS 时,已有的大量抗氧化酶与 ROS 反应,从而更好地维持了膜系统的稳定,其中具体的植物生理过程需作更深入的研究。张腾国等^[33]发现在盐胁迫和低温胁迫诱导下,油菜的活性氧和抗氧化酶活性均出现升高,有证据表明 NADPH 氧化酶、MAPK 激酶级联途径与 H₂O₂ 信号分子均参与了相关调控,低温和盐胁迫可能存在交叉对话。赵远伟等^[34]发现,室温下小麦在盐胁迫与低温下的盐胁迫抗氧化机制并不一样,并且低温下的小麦受伤害较室温下弱,其结果与本研究结果一致,低温和盐胁迫间存在补偿或拮抗关系。

3.3 野外实验

野外实验地点选择在杭州湾北岸南汇东滩湿地,小规模种植,由研究结果可知,海马齿在短时低温 0℃时并不会出现死亡,但气温下降至-6℃时植株会死亡,造成种群数量锐减。上海市最寒冷的时间即 1 月,历年来平均气温大多在 0℃以上,但本次研究中可见,在杭州湾北岸实施海马齿生态浮床时,应充分考虑极端恶劣天气带来的不利影响,特别是寒潮。因此,海马齿应用于杭州湾时,可以考虑采用物理方法对植物种群实施保温措施,同时对海马齿耐寒基因进行挖掘与研究,通过红树伴生植物海马齿的向北移种,对构建北方红树林生境和红树林保护具有重要的参考意义。

4 结论

本研究对海马齿生态浮床技术在杭州湾的应用进行了室内实验与野外实验,明晰了海马齿应用的温度、盐度范围和适用的光照强度,海马齿生态浮床技术在杭州湾基本可以进行应用,但需考量极端恶劣天气的影响。基于全球气候变暖的大背景下,应用可行性不断提高,本研究对于杭州湾富营养化水域的生态修复工程具有重要价值。

参考文献

- [1] 唐昌林. 中国植物志: 第 26 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 93-158.
TANG C L. Flora of China: Vol. 26[M]. Beijing: Science Press, 1996: 93-158. (in Chinese)
- [2] HUANG L F, ZHUO J F, GUO W D, ROBERT G M, ZHANG Z Y, XU J. Tracing organic matter removal in polluted coastal waters via floating bed phytoremediation[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 71(1/2): 74-82.
- [3] MESSEDDI D, SLEIMI N, ABDELLY C. Salt tolerance in *Sesuvium portulacastrum*[M]/Plant Nutrition. Springer Netherlands, 2001.
- [4] LOKHANDE V H, NIKAM T D, PENNA S. Biochemical, physiological and growth changes in response to salinity in callus cultures of *Sesuvium portulacastrum* L.[J]. Plant Cell Tissue & Organ Culture, 2010, 102(1): 17-25.
- [5] RAMANIAN B, REECK T, DEBEZ A, STELZER R, HUCHZERMAYER B, SCHMIDT A, PAPANBROCK J. *Aster tripolium* L. and *Sesuvium portulacastrum* L.: two halophytes, two strategies to survive in saline habitats[J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2006, 44(5): 395-408.
- [6] 出怡汝. 海马齿对干旱、盐及水淹胁迫适应性的分子机制[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
CHU R Y. Molecular mechanisms of *Sesuvium portulacastrum* in the adaptation to drought, salinity and waterlogging stresses[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018. (in Chinese)
- [7] ZAIER H, GHNAYA T, LAKHDAR A, BAIQUI R, GHABRICHE R, MNASRI M, SGHAIR S, LUTTS S, ABDELLY C. Comparative study of Pb-phytoextraction potential in *Sesuvium portulacastrum* and *Brassicajuncea*: tolerance and accumulation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1/3): 609-615.
- [8] 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[J]. 广西植物, 2015, 35(5): 668-672.
YAN Y L, ZHONG C R, LIU Q, ZHANG Y. Effects of Pb and Zn on growth and physiological response of *Sesuvium portulacastrum*[J]. Guihaia, 2015, 35(5): 668-672. (in Chinese)
- [9] 梁胜伟, 胡新文, 段瑞军, 郭建春. 海马齿对无机汞的耐性和吸附积累[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 638-645.
LIANG S W, HU X W, DUAN R J, GUO J C. Mercury tolerance and accumulation of halophyte *Sesuvium portulacastrum*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 638-645. (in Chinese)
- [10] FOURATI E, WALI M, VOGEL-MIKUS K, ABDELLY C, GHNAYA T. Nickel tolerance, accumulation and subcellular distribution in the halophytes *Sesuvium portulacastrum* and *Cakile maritima*[J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2016, 108: 295-303.
- [11] LOKHANDE V H, PATADE V Y, SRIVASTAVA S, SUPRASANNA P, SHRIVASTAVA M, AWASTHI G. Copper accumulation and biochemical responses of *Sesuvium portulacastrum* (L.)[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 31: 679-684.
- [12] 杨芳, 杨妙峰, 郑盛华, 林永青, 郑惠东, 温凭, 李卫林, 罗冬莲. 东山湾海马齿生态浮床原位修复效果研究[J]. 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 effect of *Sesuvium portulacastrum* ecological floating beds in Dongshan Bay[J]. Journal of Fisheries Research, 2019, 41(3): 225-233. (in Chinese)
- [13] 农业农村部渔业渔政管理局. 水生生物资源养护先进技术系列连载(十七): 海马齿生态修复技术[R/OL]. (2020-07-01)[2022-02-10]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202007/t20200701_6347623.htm.
Fishery and Fishery Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Series of advanced technologies for aquatic biological resources conservation: ecological restoration technology of *Sesuvium portulacastrum*[R/OL]. (2020-07-01)[2022-02-10]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202007/t20200701_6347623.htm. (in Chinese)
- [14] 王力彦, 邢喆, 侯辰, 章任群, 张苗苗, 杨慧贤. 1990—2017 年杭州湾大陆岸线时空变迁分析[J]. 海洋通报, 2020, 39(4): 481-487.
WANG L Y, XING Z, HOU C, ZHANG R Q, ZHANG M M, YANG H X. The spatio-temporal change analysis of mainland coastline in Hangzhou Bay from 1990 to 2017[J]. Marine Science Bulletin, 2020, 39(4): 481-487. (in Chinese)
- [15] 王莉波. 杭州湾海域生态环境污染防治对策研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
WANG L B. Study on countermeasures of ecological environment pollution prevention in the sea area of Hangzhou Bay[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [16] 李楠. 杭州湾滨海湿地长时间尺度遥感动态监测及生态评估[D]. 南京: 南京林业大学, 2020.
LI N. Long-term remote sensing dynamic monitoring and ecological assessment of coastal wetland in Hangzhou Bay[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [17] 刘好真, 焦海峰, 史西志, 王一农, 尤仲杰. 基于模拟退火优化的海马齿生长参数确定[J]. 海洋学报, 2019, 41(4): 109-118. (in Chinese)
LIU H Z, JIAO H F, SHI X Z, WANG Y N, YOU Z J. Parameter determination of *Sesuvium portulacastrum* based on simulated annealing[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(4): 109-118.

- [18] 张开秀, 杨芳, 姜丹, 林施泉, 黄凌风. 水培海马齿对海水菲污染修复作用的初步研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 618-625.
ZHANG K X, YANG F, JIANG D, LIN S Q, HUANG L F. A preliminary study on phytoremediation by a marine halophyte *Sesuvium portulacastrum* Linn. in hydroponic cultures[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(3): 618-625. (in Chinese)
- [19] PENG G G, ZHOU X J, XIE B, HUANG C, UDDIN M M, CHEN X X, HUANG L F. Ecosystem stability and water quality improvement in a eutrophic shallow lake via long-term integrated biomanipulation in Southeast China[J]. Ecological Engineering, 2021, 159: 106-119.
- [20] HOAGLAN D R, ARNON D I. The water culture methods for growing plants without soil[M]. California: University of California Agricultural Experiment Station, 1950.
- [21] 李卫林, 罗冬莲, 杨芳, 郑惠冬, 林琪. 盐度对水培海马齿生长和生理生化因子的影响[J]. 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*[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2019, 58(1): 63-69. (in Chinese)
- [22] 席本野. 杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 37-49.
XI B Y. Morphology, distribution, dynamic characteristics of poplar roots and its water uptake habits[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 37-49. (in Chinese)
- [23] 康华靖, 陶月良, 权伟, 王伟, 欧阳竹. 北方冬小麦旗叶光饱和点探讨[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(6): 1252-1257.
KANG H J, TAO Y L, QUAN W, WANG W, OUYANG Z. Study on light saturation point of winter wheat flag leaf in north China[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(6): 1252-1257. (in Chinese)
- [24] 于沪宁. 农业生态系统的水热耗散过程与节水调控[J]. 地理科学进展, 2000(1): 1-8.
YU H N. The process of water-heat dissipation and water-saving regulation in agroecosystem[J]. Progress in Geography, 2001(1): 1-8. (in Chinese)
- [25] GRIECO M, ROUSTAN V, DERMENDJIEV G, RANTALA S, JAIN A, LEONARDELLI M, NEUMANN K, BERGER V, ENGELMEIER D, BACHMANN G, EBERSBERGER I, ARO E M, WECKWERTH W, TEIGE M. Adjustment of photosynthetic activity to drought and fluctuating light in wheat[J]. Plant, Cell & Environment, 2020, 43(6): 1484-1500.
- [26] 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[J]. 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*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4617-4627. (in Chinese)
- [27] 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[J]. 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 stress and comprehensive evaluation of nutritional value of *Sesuvium portulacastrum*, an important halophytes[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(3): 568-575. (in Chinese)
- [28] LIU X H, PU X M, LUO D L, LU J, LIU Z L. Model assessment of nutrient removal via planting *Sesuvium portulacastrum* in floating beds in eutrophic marine waters: the case of aquaculture areas of Dongshan Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(12): 91-100.
- [29] KREPS J A, WU Y, CHANG H S, ZHU T, WANG X, HARPER J F. Transcriptome changes for *Arabidopsis* in response to salt, osmotic, and cold stress[J]. Plant Physiology, 2002, 130(4):2129-2141.
- [30] SIDDIQUI K S, CAVICCHIOLI R. Cold-adapted enzymes[J]. Annual Review of Biochemistry, 2006, 75(1): 403-433.
- [31] RUELLAND E, VAULTIER M N, ZACHOWSKI A, HURRY V. Cold signalling and cold acclimation in plants[J]. Advances in Botanical Reserch, 2009, 49: 35-150.
- [32] 孙港, 路雅顺, 李亚, 胡克玲. 盐低温双重胁迫对甜瓜幼苗生长和叶绿素荧光参数的影响[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(Z1): 31-34.
SUN G, LU Y S, LI Y, HU K L. Effects of low temperature and salt stress on growth and chlorophyll fluorescence parameters on melon seedlings[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(Z1): 31-34. (in Chinese)
- [33] 张腾国, 胡馨丹, 李萍, 刁志宏, 王娟, 郑晟. 盐及低温胁迫对油菜 ROS 和抗氧化酶活性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 497-505.
ZHANG T G, HU X D, LI P, DIAO Z H, WANG J, ZHENG S. Effects of low temperature and salt stress on the activity of ROS and antioxidant enzyme in *Brassica campestris* seedlings[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2019, 55(4): 497-505. (in Chinese)
- [34] 赵远伟, 刘小京, 李存东, 喻琼, 谢志霞. 温度对盐胁迫小麦抗氧化机制的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(12): 1460-1468.
ZHANG Y W, LIU X J, LI C D, YU Q, XIE Z X. Effect of temperature on antioxidant mechanism of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings under salt stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(12):1460-1468. (in Chinese)