

文章编号: 1674-5566(2020)01-0055-09

DOI:10.12024/jsou.20181102436

盐度和水淹对海三棱藨草种子萌发及幼苗生长的影响

胡茜靛¹, 赵志森^{1,2}, 兰燕月¹, 张 筱¹, 徐成龙¹, 张饮江^{1,2}

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306)

摘 要: 研究海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)种子和幼苗在盐度和水淹时长作用下的生存机制,为长江口滨海湿地生态修复提供重要的科学依据。通过模拟潮汐控制不同水淹时长(8、10、12、14 h/d)和盐度(0、5、10、15)进行实验,分析其对发芽率、发芽指数、叶绿素、超氧化物歧化酶(SOD)和丙二醛(MDA)等生长生理指标的影响。结果表明:盐度对海三棱藨草种子发芽率、发芽指数和海三棱藨草幼苗 MDA 影响最大;盐度和水淹时长的交互作用对海三棱藨草幼苗叶绿素和 SOD 影响最大。在盐度为 0、水淹时长为 12 h/d 时发芽率最高;盐度 15 是海三棱藨草种子萌发的临界盐度;盐度为 10、水淹时长 12 h/d 分株数最高;叶绿素在 0 盐度和 12 h 水淹时长交互处理下最高;SOD 总活性在盐度为 10、8 h/d 水淹时长处理下最高;盐度为 10、12 h/d 水淹时长处理下 MDA 含量最低。这说明海三棱藨草在中等盐度(5、10)和中等水淹时长(10、12 h/d)时适应性最强。

关键词: 海三棱藨草; 盐胁迫; 水淹胁迫; 生理生态; 适应性

中图分类号: S 917.3; Q 945.17 **文献标志码:** A

海岸盐沼湿地是世界上最具生态和社会价值的生态系统之一,具有调节气候等功能^[1-2]。近年,在气候变化和人类活动影响下,盐水入侵等严重影响着生态系统结构和功能的稳定^[3]。水淹梯度和盐度梯度是影响水生植物生长和繁殖的关键压力因素^[4-9]。水淹所造成的低氧和低光照条件会对植物的生理生态产生重要影响^[10-12]。盐度对盐沼植物的光合速率和呼吸作用等产生直接的抑制作用影响盐沼植物的存活及生长^[10,13-15]。

海三棱藨草是我国特有的多年生盐沼植物,是长三角滨海区域重要的先锋物种^[16-18]。目前,针对海三棱藨草的研究主要集中在组织培养与繁殖、空间分布、种群相对竞争力分析、生态价值以及盐度阈值上,而在盐度和水淹时长交替作用下其不同生长阶段生理生态响应方面的研究甚少^[19-22]。

以海三棱藨草种子与幼苗为研究对象,深入分析其不同盐度(0~15)和水淹时长(8~14

h/d)交互作用下的株高和分株数等生长指标、叶绿素含量以及酶活变化等,旨在探索海三棱藨草幼苗耐水淹能力及其对盐度的适应性,为长江口滨海湿地生态修复提供科学依据。

1 研究区域概况

上海市南汇东滩湿地位于长江口与杭州湾的交汇处,北接浦东东滩,南接奉贤边滩,北邻九段沙与崇明东滩,总面积约 33 100 hm²,四季分明,属北亚热带季风气候,温暖湿润,常年多风,雨量充沛,年降水量 1 022 mm,年平均气温 15.3 °C。湿地内动植物丰富,是我国重要的滨海湿地之一。研究区位于南汇东滩促淤圈围工程南部,东海大桥东侧,地理坐标为 30°51'~30°52'N, 121°55'~121°56'E,总面积为 108 hm²。

2 材料与方法

2.1 实验材料

2017 年 10 月于南汇东滩海三棱藨草生长点

收稿日期: 2018-11-02 修回日期: 2019-01-30

基金项目: 上海市重点学科建设项目(Y11110,S30701)

作者简介: 胡茜靛(1994—),女,硕士研究生,研究方向为水域生态学。E-mail:huqianye@163.com

通信作者: 张饮江, E-mail:yjzhang@shou.edu.cn

采集成熟的种子,选择成熟饱满、大小相似的海三棱藨草种子清洗干净,置于4℃下保存、备用。

2018年6月6日从南汇东滩采集海三棱藨草幼苗,初始高度为(13±2)cm,采用规格为φ28cm×30cm的透明塑料桶,桶底铺设10cm厚底泥,底泥为南汇东滩海三棱藨草生境表层的海泥,实验用水为东海盐卤与自来水配置,使土壤表面湿润。每桶种植10株,将幼苗置于室外自然气候环境条件生长16d后[海三棱藨草株高为(15±2)cm]进行实验。

2.2 实验设计

2.2.1 种子萌发

实验于2018年3月20日至9月2日在上海海洋大学室外基地进行。随机选取大小相似的海三棱藨草种子,95%乙醇浸泡3min消毒处理后,用无菌水冲洗,每个处理选取20粒种子均匀种植于底泥厚度为10cm的塑料桶中,将塑料桶放置于规格为φ55cm×70cm的带盖大桶内。根据南汇东滩水域盐度以及不同滩涂高程下模拟潮汐淹没时间,实验设置4种盐度梯度和4种水淹时长梯度交互处理(表1),盐度分别为0、5、10、15,水淹时长分别为8、10、12、14h/d进行正交实验。塑料大桶下方设置水阀,以便模拟潮汐变化,每日上午8:00加入与底泥同高水位的实验用水,在下午16:00、18:00、20:00、22:00时将实验桶中水放出,为避免下雨天降水干扰,在雨天盖闭塑料桶遮雨。

表1 不同盐度与水淹时长梯度设置

Tab.1 Design of salinities and water flooding time

盐度 Salinity	水淹时间 Flooding time/(h/d)			
0	8	10	12	14
5	8	10	12	14
10	8	10	12	14
15	8	10	12	14

每日观察与记录突破土层的幼苗数量,计算发芽率与发芽指数,种子持续观测直至3日内无新的萌发为止。

2.2.2 幼苗生长

模拟海三棱藨草生长的自然环境,选取16桶海三棱藨草幼苗与种子进行相同处理,实验末期测定其株高、分株数等生长指标。每10天检测1次,共5次检测植株叶片叶绿素含量、超氧化

物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)含量等生理指标。

2.3 检测方法

每日记录种子发芽情况,对发芽率、发芽指数进行测定。

$$\text{发芽率} = \frac{\text{种子发芽数}}{\text{种子播种粒数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽指数}(G_t) = \sum G_t / D_t \quad (2)$$

式中: G_t 为 t 时间种子发芽数; D_t 为对应的发芽天数。

实验末期观察测量株高、分株数等外观生长状况。叶绿素测定:选择晴朗上午9:00,采用YF-YL01便携式叶绿素测定仪,对海三棱藨草第1片展开叶测定叶绿素a+b。植株叶片SOD活性测定采用分光光度法;MDA含量采用硫代巴比妥酸法。

2.4 数据处理

实验数据均由3次重复获得,应用SPSS 20.0软件分析差异显著性,运用最小显著性差数法(LSD)进行单因素方差分析,差异显著性水平均为 $P < 0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 盐度与水淹时长对海三棱藨草种子萌发的影响

发芽指数是种子的活力指标。发芽指数高,活力就高。利用发芽率、发芽指数、盐度和水淹时长进行方差分析,结果显示,盐度、水淹时长及两者的交互作用都对海三棱藨草种子发芽指数产生了极显著的影响($P < 0.05$),其中盐度的影响最大($F = 962.03, P < 0.05$),水淹时长次之($F = 87.036, P < 0.05$),盐度和水淹时长交互作用影响相对较小($F = 61.75, P < 0.05$)。盐度对海三棱藨草种子发芽率产生极显著的影响($P < 0.05$)。

图1显示海三棱藨草种子发芽率:在盐度为0、水淹时长12h/d时发芽率最高,为135%;在盐度为5、水淹时长12h/d时次之,为120%;在盐度为15、水淹时长14h/d时发芽率最低,为20%。发芽指数:在盐度为5、水淹时长12h/d时最高,为19.27;在盐度为5、水淹时长14h/d时次之,为17.94;在盐度为15、水淹时长14h/d时发芽指数最低,为1.57。在0~5盐度时,水淹时

长 12 h/d 的种子发芽率、发芽指数均为最高,说明低盐度情况下,海三棱藨草种子耐淹能力较强;在盐度 15 时海三棱藨草种子发芽率、发芽指

数明显低于其他盐度种子发芽率与发芽指数。由此说明,盐度增加会抑制海三棱藨草种子发芽。

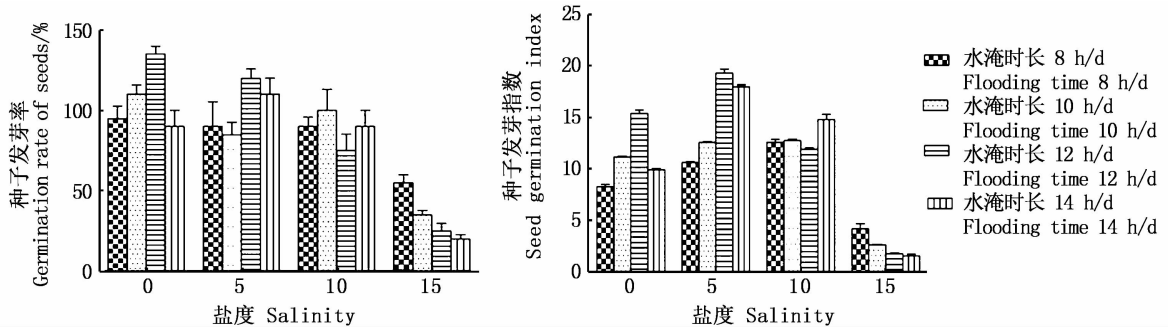


图 1 不同盐度和水淹时长下的种子萌发率和发芽指数

Fig.1 Different salinity and flooding time effects on seed germination rate and germination

3.2 盐度与水淹时长对海三棱藨草幼苗生长状况影响

比较不同盐度与水淹时长下幼苗主要生长状况(表 2)发现:海三棱藨草幼苗在盐度为 0 ~ 15 均能正常生长,在盐度 0 ~ 10 下,植株生长较好,株高较高,分株数较多。在盐度为 10、水淹时长为 12 h/d 时分株数最多;在盐度为 10、10 h/d 水淹时长时分株数次之;在盐度为 15 时,分株数明显少于其他处理组,株高得到抑制。

在盐度 0 ~ 10 时,随着水淹时长增加,幼苗分株数保持先增加后减少的趋势,在 12 h/d 达到最高值。在水淹时长为 8 h/d 时,随着盐度增加,海三棱藨草分株数逐渐减少,株高先增加后降低。在水淹时长为 10 h/d 时,随着盐度增加,分株数先降低后增加,在盐度为 10 时达到最大值为 16 个。在水淹时长为 12 h/d 和 14 h/d 时,分株数、株高均先增加后减少。结果表明,高盐度和长时间的水淹抑制海三棱藨草幼苗的生长。

表 2 不同盐度和水淹时长下幼苗生长状况

Tab.2 Growth status of seedling under different salinity and flooding time

盐度 Salinity	水淹时长 Flooding time /(h/d)	分株数 Division of suckers/个	株高 Plant height/cm
0	8	9	15 ~ 60
	10	13	13 ~ 25
	12	14	15 ~ 60
	14	6	15 ~ 25
5	8	8	12 ~ 60
	10	9	13 ~ 60
	12	14	15 ~ 60
	14	8	30 ~ 60
10	8	8	30 ~ 60
	10	16	10 ~ 60
	12	22	30 ~ 60
	14	8	30 ~ 60
15	8	2	11 ~ 30
	10	2	11 ~ 30
	12	1	13 ~ 25
	14	0	15 ~ 30

3.3 不同盐度和水淹时长对海三棱藨草幼苗叶绿素的影响

叶绿素含量水平是反映植物生长情况的直观指标^[23]。利用叶绿素 a + b、盐度和水淹时长进行方差分析,结果显示,盐度、水淹时长及两者的交互作用都对海三棱藨草幼苗叶绿素含量产生了极显著的影响($P < 0.05$),其中两者的交互作用的影响最大,盐度和水淹时长次之。海三棱藨草幼苗的叶绿素含量对盐度和水淹时长都比较敏感,而两者的交互作用对其影响更大。

图2显示:海三棱藨草幼苗叶绿素在0盐度和12 h/d水淹时长交互处理下最高,达到61.8 mg/g;在盐度10和14 h/d水淹时长交互处理下次之,达到44.5 mg/g。在盐度为0~10时,叶绿素含量差异不大;在盐度为15时,海三棱藨草叶绿素受到抑制。在盐度为0时,随着水淹时长的增加,海三棱藨草幼苗叶绿素含量先增加后减少;在盐度为5和10、水淹时长10 h/d和14 h/d时叶绿素含量较高;在盐度为15时,随着水淹时长的增加,叶绿素含量逐渐减少。

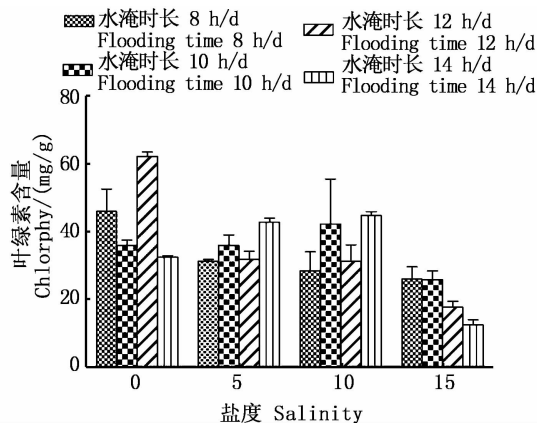


图2 不同盐度和水淹时长下的叶绿素含量
Fig. 2 Different salinity and flooding time effects on Chlorophyll content

3.4 不同盐度和水淹时长对海三棱藨草幼苗SOD的影响

超氧化物歧化酶(SOD)是植物防御活性氧伤害的重要酶。植物的逆境伤害大都与活性氧有关,而植物体往往通过提高自身SOD等酶的活性来清除由胁迫而产生的自由基,以增强其抗逆性^[24]。利用SOD总活性、盐度和水淹时长进行方差分析,结果显示,盐度、水淹时长及两者的交互作用都对海三棱藨草幼苗SOD总活性产生了

极显著的影响($P < 0.05$),其中两者交互作用的影响最大,盐度和水淹时长次之。

图3显示,随着盐度增加,海三棱藨草幼苗SOD活性总体表现较平稳。海三棱藨草幼苗SOD总活性在盐度10、8 h/d水淹时长处理下最高,在盐度15、14 h/d水淹时长处理下次之,在盐度为0、14 h/d水淹时长处理下最低。在盐度为0时,随水淹时长增加,SOD总活性逐渐减小;在盐度为5~15时,随水淹时长增加,SOD总活性先下降后升高。在水淹时长为8、10 h/d,盐度为10时SOD活性达到最大值;在水淹时长为14 h/d、盐度为15时SOD活性达到最大值。

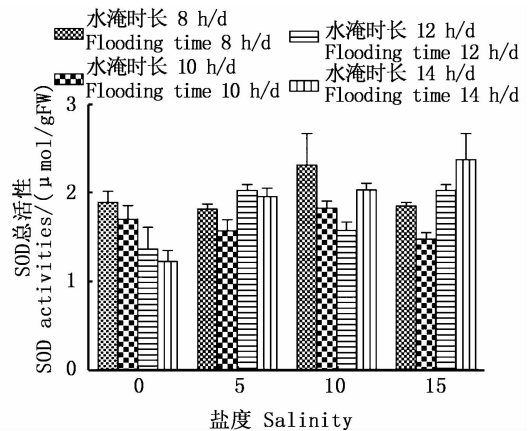


图3 不同盐度和水淹时长下的SOD总活性
Fig. 3 Different salinity and flooding time effects on SOD total activity

3.5 不同盐度和水淹时长对海三棱藨草幼苗MDA的影响

丙二醛(MDA)是植物在逆境胁迫过程中膜脂过氧化作用强弱的重要指标。MDA积累是活性氧毒害作用的表现^[25]。利用MDA含量、盐度和水淹时长进行方差分析,结果显示,盐度、水淹时长及两者的交互作用都对海三棱藨草幼苗MDA总活性产生了极显著的影响($P < 0.05$),其中盐度最大($F = 14.65, P < 0.05$),水淹时长($F = 4.91, P < 0.05$)和两者的交互作用($F = 2.891, P < 0.05$)的影响次之。

图4显示,在盐度和水淹时长的胁迫下,MDA总体较平稳。海三棱藨草幼苗MDA含量在盐度为0、水淹时长为8 h/d,达到0.15 μmol/g FW。在盐度为10、水淹时长为12 h/d处理下MDA含量最低,为0.086 μmol/g FW。在盐度为0和15时,随着水淹时长增加,MDA含量先降低

后增加;在盐度为 5 时,MDA 含量随水淹时长增加而降低;在盐度为 10 时,随着水淹时长增加,MDA 含量先升高后降低。在水淹时长为 8、12 和 14 h/d 时,随着盐度增加,MDA 含量先降低后升高。在水淹时长为 10 时,随着盐度增加,MDA 含量先增加后降低。

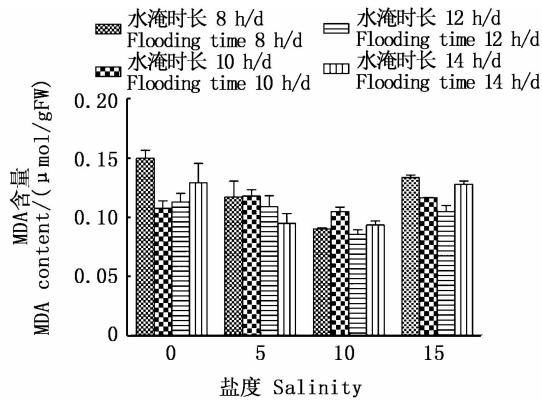


图 4 不同盐度和水淹时长下的 MDA 含量
Fig.4 Different salinity and flooding time effects on MDA content

4 讨论

4.1 不同盐度和水淹时长对海三棱藨草种子萌发分析

种子活力可以用发芽率和发芽指数表示,二者是衡量种子萌发程度的代表性指标。种子萌发是植物生长周期中最基础、最重要的阶段,而环境因子对种子的萌发起到非常关键的作用^[26]。植物种子是植物所有生命过程中对外界不良环境耐受力最强的阶段,较幼苗或者成年植株更能抵御盐胁迫。研究^[27]表明,适当低浓度的盐胁迫会促进植物种子的萌发,而过高浓度盐胁迫环境则会影响种子萌发过程中的吸水等过程,造成种子萌发率低,有的植物种子甚至被完全抑制,而不能萌发。海三棱藨草种子发芽率与发芽指数表现趋势整体一致,随盐度的增加呈现逐渐下降的趋势,这与卢昌义等在 2008 年盐度对拉贡木种子的研究结果一致。在盐度为 15 时,海三棱藨草种子萌发得到明显抑制,这可能是盐溶液浓度增大,致使种子胚细胞吸水困难,造成种子休眠或延迟萌发,而盐浓度过高,则会破坏细胞膜的完整性,造成种子死亡^[28]。

适宜的淹水对种子起到预浸的作用,有利于种子的萌发,水淹时长过短或过长均不利于种子发芽。水淹时长过短,种子吸水不足,种胚内部

的蛋白质、酶等大分子和细胞器活化慢,种子萌动受到影响;水淹时长过长,种子的无氧发酵现象比较严重,造成种子出苗率偏低^[29]。海三棱藨草种子发芽率与发芽指数总体上呈现 8 h/d、10 h/d、12 h/d 高于 14 h/d,这也与陈娟等^[30]在对辣椒种子的研究结果一致。水淹时长 8 h/d 和 10 h/d 的发芽率和发芽指数无明显变化,可能是因为淹水处理时间较短,只是对海三棱藨草种子起到了浸种的效果而未造成淹水伤害。水淹时长 14 h/d 时发芽率和发芽指数明显降低表明达到最佳浸种时间后,水淹时间的增加对种子造成的伤害就越大。本研究对种子萌发仅限于萌发率等指标,未对其影响方式进行探究,后续进行对海三棱藨草种子萌发恢复实验,对萌发生长影响机制进行进一步探讨。

4.2 不同盐度和水淹时长对海三棱藨草幼苗存活及生长分析

在水淹状态下,植物根系的大量矿质元素及重要中间产物淋溶丢失,细胞内自由基的产生与清除之间的平衡遭到破坏,自由基积累从而破坏膜的选择透性,以及在无氧呼吸中产生有毒物质,如乙醇、乙醛等使植物受害^[31]。盐分胁迫对植物的伤害作用主要通过盐离子的直接作用——离子胁迫和间接的脱水作用——渗透胁迫^[32]。在面对水淹逆境和盐胁迫环境下,功能性状的改变特别是植物的地上部分是其应对水淹最直观的表现,如株高、分株数、生物量的分配等。本研究中随着水淹时间增加,海三棱藨草幼苗遭受水淹后,未获得更多的氧气和阳光,加速植物的伸长生长,植物株高增加,以快速“逃离”水淹逆境^[33]。随着盐度的增加,海三棱藨草幼苗分株数先增加后减少,在盐度为 10 时达到最大值。

同时,植物体内积累物质减少,引起物质在各种生理过程中重新分配。不同水淹强度带来物质积累差异,进而影响植物生长指标变化。对不同水分胁迫环境,水生植物表现出不同的分株数、株高^[34]。海三棱藨草幼苗在 10 h/d 和 12 h/d 时比在 8 h/d 和 14 h/d 分株数多,其中在盐度为 10、水淹时长 12 h/d 分株数最高,达到 22 个。

4.3 不同盐度和水淹时长对海三棱藨草幼苗生理指标的影响

为了适应或抵抗水涝或盐胁迫等,植物体内

会产生一系列的生理生化反应来避免对植物组织造成的伤害。这些主要表现在植物的叶绿素含量、活性氧代谢以及抗氧化酶活性等方面,这些指标的响应可以减轻逆境对植物的伤害^[34]。叶绿素是光合作用的物质基础,叶绿素 a 和 b 是吸收、传递光能的主要色素,光合作用水平在一定程度上取决于叶绿素含量的高低,影响植物生长的因素必然会影响到植物的光合作用水平,因此植物叶片叶绿素含量是表征光和利用效率的最重要指标之一。本实验海三棱藨草幼苗随盐度升高,叶绿素含量总体保持平稳,到盐度为 15 时,叶绿素逐渐减少,说明 15 盐度不适宜海三棱藨草幼苗生长。

随着盐度的升高和水淹时长的增加,海三棱藨草幼苗启动 SOD 表达,增强自身抗性,减少对植物的伤害。海三棱藨草幼苗为了抵抗不同水淹时长对其生长的不利影响,不同程度启动 SOD 表达,过氧化物酶活性增加,清除厌氧胁迫过程中产生的 ROS,增强自身抗性,减少水分胁迫对植物的伤害。SOD 显示出极强的调节作用,增强了植株的抗逆性。海三棱藨草幼苗 SOD 总活性在盐度 10、8 h/d 水淹时长处理下最高,盐度 0、14 h/d 水淹时长处理下最低。结果说明,中盐度和中等水淹时长对海三棱藨草成长更有利。

植物生长环境受破坏时,膜脂发生过氧化,生物膜的正常功能受到破坏而使膜与壁分离。MDA 是膜脂过氧化过程的终产物,它在细胞中积累的多少可以判断过氧化的程度,且积累量越多,细胞膜系统受伤害的程度越大,透性也越大。盐胁迫下,盐度增高时 MDA 含量上升,在含盐量较低时 MDA 含量各组间变化不大。各盐度处理的 MDA 表现为 15 > 0 > 5 > 10。在水分胁迫环境下,MDA 积累量与含水量有关系,各水淹时长处理的 MDA 表现为 8 h/d > 14 h/d > 12 h/d > 10 h/d,说明海三棱藨草在中等盐度和中等水淹时长时适应性最强。

5 结论

海三棱藨草作为长江口滨海湿地的先锋物种,能够适应较大范围的水盐环境,并且在不同环境中,其生长状况不同,环境因子的影响程度也不同。盐度对海三棱藨草种子发芽率、发芽指数和海三棱藨草幼苗 MDA 影响最大;盐度和水

淹时长的交互作用对海三棱藨草幼苗叶绿素和 SOD 影响最大。

海三棱藨草幼苗能够通过调节形态特征和生理指标来适应不同的生存环境,对海三棱藨草种子发芽率与发芽指数分析指出,高盐度长时间水淹不适合海三棱藨草种子发芽。幼苗在 10 h/d 和 12 h/d 时比在 8 h/d 和 14 h/d 分株数多,其中在中等盐度和中等水淹时长分株数最高。分析海三棱藨草幼苗 SOD 总活性和 MDA 含量发现,中盐度和中等水淹时长对海三棱藨草成长更有利。本研究为人工模拟条件下的实验结果,在沿海滩涂湿地中,海三棱藨草种子和幼苗的生态生理状况受自然环境多种因子综合影响,需进行深入研究。

参考文献:

- [1] ENGELS J G, RINK F, JENSEN K. Stress tolerance and biotic interactions determine plant zonation patterns in estuarine marshes during seedling emergence and early establishment[J]. *Journal of Ecology*, 2011, 99(1): 277-287.
- [2] 杨泽华, 童春富, 陆健健. 盐沼植物对大型底栖动物群落的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4387-4393.
YANG Z H, TONG C F, LU J J. Effects of saltmarsh on the benthic macroinvertebrate community in Yangtze Estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4387-4393.
- [3] 陈中义. 长江口海三棱藨草的生态价值及利用与保护[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(2): 64-67.
CHEN Z Y. Ecological value of *Scirpus mariqueter* grassland and its utilization strategy in Yangtze river estuary [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2005, 26(2): 64-67.
- [4] ZHOU H X, LIU J E, ZHOU J, et al. Effect of an alien species *Spartina alterniflora* loisel on biogeochemical processes of intertidal ecosystem in the Jiangsu Coastal Region, China[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(1): 77-85.
- [5] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 营养物及水位变化对湿地植物的影响[J], *生态学杂志*, 2006, 25(1): 87-92.
XU Z G, HE Y, YAN B X, et al. Effects of nutrients and water level fluctuation on wetland plants[J], *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(1): 87-92.
- [6] 胡忠健, 马强, 曹浩冰, 等. 长江口滨海湿地原生海三棱藨草种群恢复的实验研究[J]. *生态科学*, 2016, 35(5): 1-7.
HU Z J, MA Q, CAO H B, et al. A trial study on revegetation of the native *Scirpus mariqueter* population in the coastal wetland of the Yangtze Estuary [J]. *Ecological*

- Science, 2016, 35(5): 1-7.
- [7] DAVY A J, BROWNE J H, MOSSMAN H L, et al. Colonization of a newly developing salt marsh: disentangling independent effects of elevation and redox potential on halophytes[J]. *Journal of Ecology*, 2011, 99(6): 1350-1357.
- [8] 李惠芳, 章光新. 水盐交互作用对莫莫格国家级自然保护区扁秆藨草幼苗生长的影响[J]. *湿地科学*, 2013, 11(2): 173-177.
- LI H F, ZHANG G X. Influence of water depth and salinity coupling on growth of *Scirpus planiculmis* seedlings in Momoge national nature reserve [J]. *Wetland Science*, 2013, 11(2): 173-177.
- [9] 张留恩, 廖宝文, 管伟. 模拟潮汐淹没对红树植物老鼠簕种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(10): 2165-2172.
- ZHANG L E, LIAO B W, GUAN W. Effects of simulated tide inundation on seed germination and seedling growth of mangrove species *Acanthus ilicifolius*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(10): 2165-2172.
- [10] 薛莲, 李秀珍, 闫中正, 等. 盐度和淹水对长江口滩涂盐沼植物碳储量的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 2995-3003.
- XUE L, LI X Z, YAN Z Z, et al. Effects of salinity and inundation on carbon storage of halophytes in the tidal salt marsh of the Yangtze River Estuary, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 2995-3003.
- [11] 陶燕东, 于克锋, 何培民, 等. 围垦后南汇东滩海三棱藨草的空间分布及其影响因子研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(7): 1032-1041.
- TAO Y D, YU K F, HE P M. Distribution of *scirpus mariqueter* on Nanhui coasts after reclamation and the associated affecting factors [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(7): 1032-1041.
- [12] 王宗星, 吴统贵, 虞木奎. 植物光合特性对水淹胁迫的响应机制[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(5): 20-24.
- WANG Z X, WU T G, YU M K. Response mechanism of plant photosynthesis characteristic to flooding stress [J]. *World Forestry Research*, 2010, 23(5): 20-24.
- [13] 桑子阳, 马履一, 陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(1): 109-115.
- SANG Z Y, MA L Y, CHEN F J. Growth and physiological characteristics of *Magnolia wufengensis* seedlings under drought stress [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sini*, 2011, 31(1): 109-115.
- [14] 关贵方. 红树植物对水分胁迫响应的生理生化特征及分子生态机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- GUAN G F. Physiological and biochemical characteristics and molecular ecological mechanism of mangrove response to water stress [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [15] 王卿. 长江口盐沼植物群落分布动态及互花米草入侵的影响[D]. 上海: 复旦大学, 2007.
- WANG Q. The dynamics of plant community distribution of the salt marshes in the Yangtze River estuary as influenced by *Spartina alterniflora* invasions [D]. Shanghai: Fudan University, 2007.
- [16] 丁文慧, 姜俊彦, 李秀珍, 等. 崇明东滩南部盐沼植被空间分布及影响因素分析[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 704-716.
- DING W H, JIANG J Y, LI X Z, et al. Spatial distribution of species and influencing factors across salt marsh in southern Chong-Ming Dongtan [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(7): 704-716.
- [17] 赵萌, 印春生, 厉成伟, 等. Miseq 测序分析围垦后海三棱藨草湿地土壤微生物群落多样性的季节变化[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(5): 718-727.
- ZHAO M, YIN C S, LI C W, et al. Using Miseq sequencing to analyze seasonal soil microbial community dynamics in reclaimed *Scirpus mariqueter* coastal wetlands [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(5): 718-727.
- [18] 章振亚. 崇明东滩湿地互花米草与芦苇、海三棱藨草根际固氮微生物多样性研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2012.
- ZHANG Z Y. Diversity survey in rhizosphere of diazotroph in the exotic invasive species *Spartina alterniflora* and two native species (*Phragmites australis* and *Scirpus mariqueter*) in the wetland Chongming Dongtan in the Yangtze River estuary [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2012.
- [19] 袁月. 崇明东滩湿地芦苇与互花米草种群间关系格局与影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- YUAN Y. Interspecific interactions of *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* and related factors in Chongming Dongtan wetland [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [20] 张群, 吕秀立, 何小丽, 等. 海三棱藨草的组织培养与快繁体系[J]. *植物学报*, 2016, 51(5): 684-690.
- ZHANG Q, LYU X L, HE X L, et al. A rapid propagation system for *scirpus mariqueter* [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2016, 51(5): 684-690.
- [21] 胡忠健. 新生滩涂湿地海三棱藨草种群恢复技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- HU Z J. A study on population restoration techniques of *Scirpus mariqueter* in the newly formed tidal marsh [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [22] 王亮, 李静, 杨娟, 等. 崇明东滩海三棱藨草生殖对策探讨[J]. *信阳师范学院学报: 自然科学版*, 2008, 21(4): 539-542.
- WANG L, LI J, YANG J, et al. Discussion about reproduction strategies of *Scirpus mariqueter* in Chongming Dongtan [J]. *Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition*, 2008, 21(4): 539-542.
- [23] 张饮江, 宋盈颖, 赵圆, 等. 针对浮萍暴发式生长的植物

- 源除草剂的筛选[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(4): 575-581.
- ZHANG Y J, SONG Y Y, ZHAO Y, et al. The influence of Chinese herb extracts addition on the growth of duckweed (*Soirodela polyrhiza*) under laboratory conditions [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(4): 575-581.
- [24] 黄雪方, 李冬林, 金雅琴, 等. 5种挺水植物对污水浸淹的生理反应及净水效果[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 66-70.
- HUANG X F, LI D L, JIN Y Q, et al. Physiological responses and purifying effects of five emerged plants under sewage submerging [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2012, 36(5): 66-70.
- [25] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(2): 84-90.
- CHEN S Y. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell[J]. Plant Physiology Communications, 1991, 27(2): 84-90.
- [26] RIIS T, HAWES I. Relationships between water level fluctuations and vegetation diversity in shallow water of New Zealand lakes[J]. Aquatic Botany, 2002, 74(2): 133-148.
- [27] 孙萍. 滨海重盐碱区几种水培植物的耐盐碱性及其净化氮磷效果的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- SUN P. Study on salt-alkaline resistance and removal efficiency of nitrogen and phosphorus by several hydroponic plants in coastal estuary heavy saline-alkali area [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [28] 常晖, 杨祎辰, 王二欢, 等. 水盐胁迫对黄精种子萌发的影响[J]. 种子, 2018, 37(3): 32-35.
- CHANG H, YANG Y C, WANG E H, et al. Effects of water and salt stress on seed germination of *Polygonatum sibiricum* red[J]. Seed, 2018, 37(3): 32-35.
- [29] 吴晓亮, 辛萍萍, 张志娥, 等. 水稻种子室温贮藏最适含水量及其热稳定蛋白的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(11): 2214-2219.
- WU X L, XIN P P, ZHANG Z E, et al. Studies on optimum moisture content and heat-stable protein of rice seeds stored at room temperature[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(11): 2214-2219.
- [30] 陈娟, 王静, 危革, 等. 淹水胁迫下辣椒种子生理生化响应研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(13): 68-75.
- CHEN J, WANG J, WEI G, et al. Physiological and biochemical responses of pepper seeds under waterlogging stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(13): 68-75.
- [31] 赵可夫. 植物对水涝胁迫的适应[J]. 生物学通报, 2003, 38(12): 11-14.
- ZHAO K F. Adaptation to waterlogging stress in plants[J]. Bulletin of Biology, 2003, 38(12): 11-14.
- [32] 欧阳妮. 水盐胁迫对红鳞蒲桃幼苗生长及生理特性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- OUYANG N. Effect of water and salt stress on the growth and physi-biochemical characteristics of *Syzygium hancei* seedlings [D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [33] 李文, 王鑫, 潘艺雯, 等. 不同水淹深度对鄱阳湖洲滩湿地植物生长及营养繁殖的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3014-3021.
- LI W, WANG X, PAN Y W, et al. Effects of different water depths on the growth and vegetative reproductive characteristics of wetland vegetation in Lake Poyang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3014-3021.
- [34] 付天飞, 曾波, 叶小齐, 等. 野古草(*Arundinella hirta*)对水淹逆境的生殖响应[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2005, 30(2): 325-328.
- FU T F, ZENG B, YE X Q, et al. The reproductive responses of *Arundinella hirta* individual to flooding [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2005, 30(2): 325-328.

Effects of salinity and duration of submergence on seed germination and seedling growth of *Scirpus mariqueter*

HU Qianye¹, ZHAO Zhimiao^{1,2}, LAN Yanyue¹, ZHANG Xiao¹, XU Chenglong¹, ZHANG Yinjiang^{1,2}

(1. College of Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Engineering Research Center for Water Environment Ecology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The survival mechanisms of seeds and seedlings of *Scirpus mariqueter* under the effect of salinity and flooding time were studied to provide an important scientific basis to the ecological restoration of coastal wetlands in the Yangtze Estuary. Different flooding time (8 h/d, 10 h/d, 12 h/d, 14 h/d) and salinity (0, 5, 10, 15) were controlled through the simulation of tidal, then the impact of physiological indexes, such as germination rate, germination index, chlorophyll, superoxide dismutase (SOD) and malondialdehyde (MDA) were analyzed. Among them, salinity had the greatest influence on germination rate, germination index and MDA of seedling. Chlorophyll and SOD were mostly influenced in the interaction between salinity and submergence. The results showed that the germination rate reached to the highest when the salinity at 0, and the flooding time at 8 h/d. The critical salinity of the seed germination was 15‰, and the number of turns was the highest at 10‰ and 12 h/d. Chlorophyll was the highest under the interactive treatment of salinity at 0‰ and flooding time of 12 h. What's more, the total activity of SOD was the highest at 10‰ of salinity and 8h/d of flooding time, and MDA was the lowest at 10‰ and 12 h/d. The results showed that the *Scirpus mariqueter* was most adaptable to moderate salinity (5, 10) and moderate flooding time (10 h/d, 12 h/d).

Key words: *Scirpus mariqueter*; salt stress; flooding environment; physiology and ecology; adaptive