

濒危海草贝克喜盐草种子萌发与幼苗生长的最佳环境条件

邱思婷^{1,2}, 盘远方^{1,2}, 苏治南^{1,2}, 邱广龙^{1,2*}

(1. 广西海洋科学院(广西红树林研究中心)、广西红树林保护与利用重点实验室, 广西北海 536000;

2. 自然资源部北部湾滨海湿地生态系统野外科学观测研究站, 广西北海 536015)

摘要: 贝克喜盐草 (*Halophila beccarii*) 被世界自然保护联盟 (IUCN) 列为易危 (VU) 种, 近年来全球贝克喜盐草资源的快速衰退受到了广泛的关注, 其种子萌发和幼苗生长对受损海草床的规模化修复具有重要意义。为了探讨贝克喜盐草种群建成初期的关键环境条件, 本研究通过野外原位实验及室内培养实验相结合的方法, 比较分析了不同温度、盐度、硫化物浓度及种子埋深对贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明: 泥质的沉积物类型、温度 20 °C、盐度 5、硫化物浓度 30 μmol/L、埋深 2 cm 是贝克喜盐草种子萌发条件的最佳组合, 种子 60 天后萌发率为 35.00%, 90 天后达到 73.33%。20~30 °C 是贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的适合温度范围; 盐度在 5~15 之间有利于幼苗存活和生长; 高浓度的硫化物不利于种子的萌发; 埋深过大会抑制种子的萌发, 最适合其幼苗生长的埋深范围是 1~3 cm。研究贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的环境因子不仅有助于理解贝克喜盐草长期的生态适应性, 而且对于预测种群更新和制定海草床恢复策略具有重要的现实意义。

关键词: 贝克喜盐草; 种子萌发; 幼苗生长; 最优环境

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240420001

中图分类号: P735

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2025)-04-0664-09

贝克喜盐草 (*Halophila beccarii*) 隶属水鳖科, 喜盐草属 (*Halophila*), 是典型的潮间带海草^[1-2], 并被世界自然保护联盟 (IUCN) 列为易危 (VU) 种。生物学上它具有“年纪老”、形态小、生长快、雌雄同株、雌蕊先熟、遗传多样性低、一年生和多年生生活史并存的特征^[3-5]; 生态学上它具有“开拓种”“先锋种”的特征, 通常被干扰后能快速恢复^[6]。贝克喜盐草海草床具有相对较高的初级生产力, 可为底栖动物提供栖息场所, 也可通过被直接摄食或以碎屑的形式直接或间接为海草床及其邻近海洋生态系统提供能量来源, 但由于其分布范围有限、种群周转快、形态小而易被沉积物覆盖, 贝克喜盐草及其重要性并不被人熟知。潮间带地区高强度的人为活动对贝克喜盐草造成了极大的威胁。近年来全球贝克喜盐草资源快速衰退, 具有相对较高的灭绝风险。研究发现海草

种子对斑块海草床的建立起决定性作用, 但因其其在自然海域的萌发率和幼苗建成率较低, 严重制约了种子在受损海草床规模化修复中的应用^[7]。现阶段有关海草有性繁殖、休眠与萌发、幼苗生长及其影响因素等的研究还相当匮乏, 相关环境因子影响海草种子萌发和幼苗生长的研究仍是海草研究的热点问题之一。

种子的生产和传播是植物种群动态和基因流动的关键过程, 影响种子萌发的环境因素主要有温度、盐度、种子埋深以及休眠特性等^[8-9]。喜盐草属的种子具有坚硬的种皮, 且有明显的休眠期^[1]。贝克喜盐草种子能否在合适的时间和地点萌发对贝克喜盐草进行幼苗建植和种群建成至关重要。海草种子终止休眠或开始萌发通常受到温度、光照、水分、盐分和生境干扰程度等综合因素的影响, 而环境因子对海

收稿日期: 2024-05-08

资助项目: 国家自然科学基金 (32170399); 自治区直属公益性科研院所基本科研业务费 (2022GMRC-02)

作者简介: 邱思婷 (1996—), 女, 硕士, 助理研究员; E-mail: qstin1996@126.com

* 通讯作者: 邱广龙 (1978—), 男, 博士, 研究员; E-mail: gqiu@gxams.ac.cn

草种子萌发的影响存在种间特异性, 各环境因子之间常存在交互作用^[10]。对于贝克喜盐草种子来说, 遮光条件下种子萌发率更高^[11]。此外, 低盐度和适中的温度对其萌发有促进作用^[11-12]。研究表明较高的硫化物浓度会抑制海草的生长^[13], 而贝克喜盐草生长在潮间带泥质或砂质的含有潜在的有毒硫化物的沉积物中^[5,14], 沉积物粒径的差异和硫化物胁迫的程度对贝克喜盐草种子萌发和生长有一定的影响。埋深是一种综合生态因子, 种子周围的环境条件因埋深不同而产生差异, 适当的埋深促进种子萌发、幼苗出土和生长^[15-16]。目前, 关于贝克喜盐草, 虽然报道了其开花特性、繁殖结构、种子产量、土壤种子库等繁殖生物学、生态学方面的研究^[1-3,5,17-18], 但是我们对很多相关的关键过程及其制约因素仍不清楚, 如何促进种子萌发等问题仍有待我们深入了解。本研究通过野外原位实验与室内培养实验(正交设计和单因素相结合)的方法探讨了影响贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的环境条件, 以了解贝克喜盐草对环境的响应机制, 为制定贝克喜盐草修复措施提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 种子的采集

实验材料采用的贝克喜盐草种子来自海南省澄迈县花场湾贝克喜盐草海草床的土壤种子库。2023年9月, 用滤网采集海南省花场湾贝克喜盐草海草床沉积物, 去除贝类、石子等杂质; 经淘洗去除大部分泥土后, 将种子带回实验室。如图1所示, 选用成熟饱满、大小一致的种子(平均横径约为1.50 mm, 平均纵径约为0.80 mm, 千粒重约为0.50 g), 用于种子培养实验。



图1 贝克喜盐草种子

Fig. 1 Seed of *H. beccarii*

1.2 实验设计

1.2.1 野外实验设计

同时在海南花场湾和钦州茅尾海两地进行贝克喜盐草种子在不同埋深下的30天野外原位萌发实

验。实验设置3种埋深: 2、5和7 cm, 每组处理50粒种子, 设置3个重复。根据结果筛选出合适的埋深和盐度范围进行后续实验。

1.2.2 室内正交试验设计

设置五因素四水平正交试验: ①沉积物类型分别为泥、砂质泥、泥质砂和砂; ②种子埋藏深度分别为0、2、4、6 cm; ③盐度分别为0、5、10、15; ④温度分别为10、20、30、40 °C; ⑤硫化物浓度分别为0、30、60、90 μmol/L。本研究的正交试验共16个处理组, 每组处理20粒种子, 设置3个重复。根据结果筛选出最佳的条件组合, 用于后续实验。

1.2.3 室内单因素实验设计

以正交试验法得出的最优条件组合为基础, 设置不同温度、盐度、硫化物浓度和埋深的多组单因素控制实验, 每组处理20粒种子, 设置3个重复。

1.3 实验过程

实验开始前对培养基质、容器和种子消毒。用海盐、分析纯九水合硫化钠($\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$)和蒸馏水混合配制不同盐度以及硫化物浓度的培养液各2 L, 贴标签备用。选用灭菌河泥作为泥质沉积物、鱼缸造景底砂(粒径范围为1~2 mm)作为砂质沉积物, 二者按2:1和1:2的体积比分别混合为砂质泥和泥质砂沉积物。将高锰酸钾(分析纯)固体, 按0.1 g:1 kg的比例分别与4种沉积物混合均匀, 用水浇灌至沉积物上层达到饱和。密封静置一晚后, 水洗沉积物3遍, 将沉积物放进鼓风干燥箱(70 °C)中烘干备用。

选用高度为14.2 cm、直径为12.7 cm的透明塑料量杯为培养容器, 消毒后烘干, 底部铺上厚度为2 cm的沉积物, 放上装了20粒种子的无纺布茶布袋, 盖上厚度分别为0、2、4、6 cm的相应沉积物, 注入相应的培养液(液面高于沉积物约2 cm), 放在对应温度环境的培养箱中, 持续培养90天, 每日观察培养液液面是否保持在沉积物上面2 cm刻度线处, 及时补充培养液。

培养结束后, 将种苗筛选出来分别平铺于方格纸上(精度1 mm), 用数码相机(型号: IM015)垂直于方格纸进行俯拍, 将照片导入AutoCAD 2020, 测量苗高和叶面积。

1.4 数据处理

采用萌发率量化种子的萌发情况, 计算公式如下:

$$\text{萌发率} = \frac{\text{实际萌发数}}{\text{种子总数}} \times 100\% \quad (1)$$

采用统计分析软件SPSS17.0对数据进行极差

分析和方差分析, 显著水平为 0.05, 并用 Origin 2024 软件进行作图分析。

2 结果

2.1 野外原位不同生境和埋深下贝克喜盐草种子的萌发率差异

本研究分别在海南花场湾 (盐度: 24.62 ± 0.48) 和钦州茅尾海 (盐度: 9.03 ± 2.36) 进行了贝克喜盐草种子在不同埋深 (2、5、7 cm) 下的 30 天野外原位萌发实验。结果显示, 贝克喜盐草种子在钦州茅尾海的萌发率比海南花场湾高 ($P < 0.05$, 图 2)。两种生境中的贝克喜盐草种子在 7 cm 埋深下的萌发率均为 0, 而且 2 cm 埋深萌发率高于 5 cm 埋深。对不同埋深下的种子萌发率进行非参数检验, 结果显示贝克喜盐草种子不同埋深下的萌发率有显著性差异 ($P < 0.05$, 图 2)。根据此次野外原位萌发实验结果, 选择埋深 < 7 cm 和盐度 < 25 的培养条件进行后续室内正交试验。

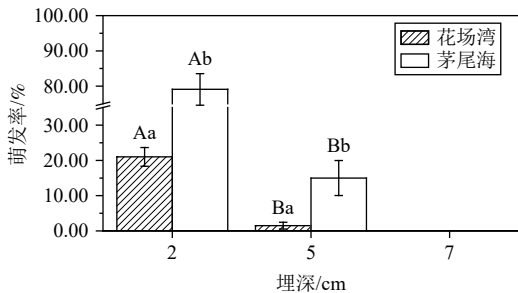


图 2 花场湾和茅尾海不同埋深处理下贝克喜盐草种子的萌发率

Fig. 2 Germination rates of *H. beccarii* seeds under different burial depth treatments in Huachang Bay and Maowei Sea
大写字母不同代表不同地点之间的萌发率差异显著 ($P < 0.05$),
小写字母不同代表不同埋深处理下的萌发率差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 室内培养下不同环境因子对贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的影响

正交试验的因素与水平见表 1, 正交试验结果见表 2, 极差分析和方差分析结果分别见表 2 和表 3。根据极差 (R) 值可知: 各因素对贝克喜盐草种子萌发率的影响大小排序是: 沉积物类型 $>$ 温度 $>$ 盐度 $>$ 硫化物浓度 $>$ 埋深, 最优组合为: A1B2C2D2E2, 即泥质沉积物、埋深 2 cm、盐度 5、温度 20 °C、硫化物浓度 30 $\mu\text{mol/L}$ 。方差分析结果表明, 影响贝克喜盐草种子萌发率的因素大小为: 温度 $>$ 沉积物类型 $>$ 盐度 $>$ 硫化物浓度 $>$ 埋深, 与极差分析结果基本一致。

本研究为探究不同环境因子对贝克喜盐草幼

表 1 正交试验的因素与水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experiments

水平	因素				
	沉积物类型	埋深/cm	盐度	温度/°C	硫化物浓度/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$
1	泥	0	0	10	0
2	砂质泥	2	5	20	30
3	泥质砂	4	10	30	60
4	砂	6	15	40	90

表 2 正交试验结果极差分析

Tab. 2 Range analysis of orthogonal experiments

实验号	A	B	C	D	E	萌发率/%
1	泥	0.00	0.00	10.00	0.00	15.00
2	泥	2.00	5.00	20.00	30.00	73.33
3	泥	4.00	10.00	30.00	60.00	25.00
4	泥	6.00	15.00	40.00	90.00	5.00
5	砂质泥	0.00	5.00	30.00	90.00	20.00
6	砂质泥	2.00	0.00	40.00	60.00	0.00
7	砂质泥	4.00	15.00	10.00	30.00	5.00
8	砂质泥	6.00	10.00	20.00	0.00	12.50
9	泥质砂	0.00	10.00	40.00	30.00	5.00
10	泥质砂	2.00	15.00	30.00	0.00	5.00
11	泥质砂	4.00	0.00	20.00	90.00	30.00
12	泥质砂	6.00	5.00	10.00	60.00	5.00
13	砂	0.00	15.00	20.00	60.00	0.00
14	砂	2.00	10.00	10.00	90.00	0.00
15	砂	4.00	5.00	40.00	0.00	0.00
16	砂	6.00	0.00	30.00	30.00	7.50
K_1	29.58	10.00	13.13	6.25	8.13	
K_2	9.38	19.58	24.58	28.96	22.71	
K_3	11.25	15.00	10.63	14.38	7.50	
K_4	1.88	7.50	3.75	2.50	13.75	
R	27.71	12.08	20.83	26.46	15.21	

注: K_1 至 K_4 表示各因素水平下累计萌发率的平均值; R 表示极差; A 为沉积物类型, B 为埋深, C 为盐度, D 为温度, E 为硫化物浓度。

苗生长的影响, 统计测算了种子萌发实验结果中高度 ≥ 1 mm 的幼苗的苗高和叶面积 (对长度 $<$

表 3 正交试验方差分析

Tab. 3 Variance analysis for orthogonal experiments

方差来源	离差平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性
A	4 918.229	3	1 639.41	10.854	0.00	*
B	1 622.396	3	540.799	3.580	0.02	*
C	2 601.562	3	867.187	5.741	0.00	*
D	5 209.896	3	1 736.632	11.498	0.00	*
E	1 626.562	3	542.187	3.590	0.02	*
误差	4 833.333	32	151.042			
总计	26 775	48				

注: 表中“*”代表数据在0.05水平上有显著性。

1 mm 的胚芽不做统计), 得到了 7 组统计结果, 分别为: 第 1 组(A1B1C1D1E1)、第 2 组(A1B2C2D2E2)、第 3 组(A1B3C3D3E3)、第 4 组(A2B1C2D3E4)、第 5 组(A3B2C4D3E1)、第 6 组(A3B3C1D2E4)、第 7 组(A4B4C1B3E2)(图 3)。结果表明种子萌发率最高(73.33%)的第 2 组(A1B2C2D2E2), 平均苗高为 13.76 mm, 显著高于第 1 组(A1B1C1D1E1)和第 4 组(A2B1C2D3E4)($P < 0.01$), 低于第 6 组(A3B3C1D2E4), 但二者之间无显著性差异($P > 0.05$)。除此之外, 仅第 2 组(A1B2C2D2E2)的种子幼苗在实验期间长出了叶片。

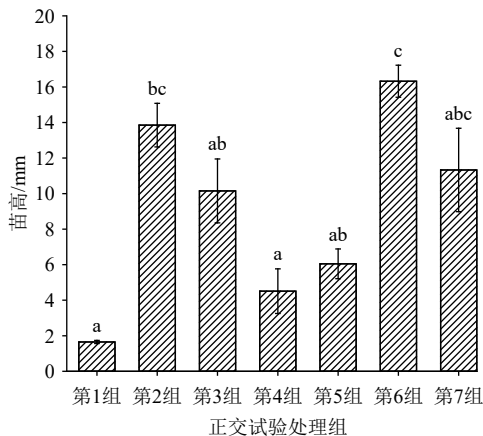


图 3 正交试验不同处理组贝克喜盐草幼苗的高度

Fig. 3 Heights of *H. beccarii* seedling under different orthogonal experiments

图中数据为均值±标准误差, 小写字母不同代表不同处理组之间的苗高差异显著($P < 0.05$)。

为了验证贝克喜盐草种子的最佳萌发条件和进一步探究贝克喜盐草幼苗生长的最优环境条件, 本研究以正交试验结果为基础, 按表 4 所示, 设置了为

表 4 单因素实验结果

Tab. 4 Results of single-factor experiments

实验编号	埋深/cm	盐度	温度/℃	硫化物浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	萌发率/%
1	2	5	20	30	35.00
2	0	5	20	30	15.00
3	1	5	20	30	6.67
4	3	5	20	30	7.50
5	4	5	20	30	5.00
6	5	5	20	30	7.50
7	2	0	20	30	5.00
8	2	10	20	30	7.50
9	2	15	20	30	20.00
10	2	20	20	30	20.00
11	2	25	20	30	15.00
12	2	5	10	30	7.50
13	2	5	30	30	15.00
14	2	5	40	30	7.50
15	2	5	20	0	15.00
16	2	5	20	60	10.00
17	2	5	20	90	15.00

期 60 天的多组单因素实验: 将对照组(埋深 2 cm、盐度 5、温度 20 ℃、硫化物浓度 30 $\mu\text{mol/L}$)与不同埋深、盐度、温度和硫化物浓度的实验组的种子萌发率、幼苗生长情况进行对比。结果发现, 单因素实验结果与正交试验结果基本一致, 对照组的种子萌发率最高(35.00%), 幼苗平均高度为 8.64 mm, 最大值为 12.60 mm; 平均叶面积为 2.29 mm^2 (图 4)。

0~5 cm 埋深条件下, 种子萌发率介于 3.33%~35.00% 之间, 2 cm 埋深处理的种子萌发率显著高于其他埋深处理的萌发率($P < 0.01$)。埋深为 0 cm 的种子萌发率可达 15%, 但幼苗苗高和叶面积均较小。1~5 cm 埋深范围内苗高随埋深增加而降低。1 cm 埋深处理的苗高和叶面积最大, 埋深 > 2 cm 的处理组幼苗未见叶片, 埋深 > 3 cm 的处理组幼苗高度不足 2 mm。由此可见最适合贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的种子埋深范围为 1~3 cm。

在盐度为 0~25 处理下, 盐度为 5 处理的种子萌发率显著高于其他处理组的萌发率($P < 0.01$), 而

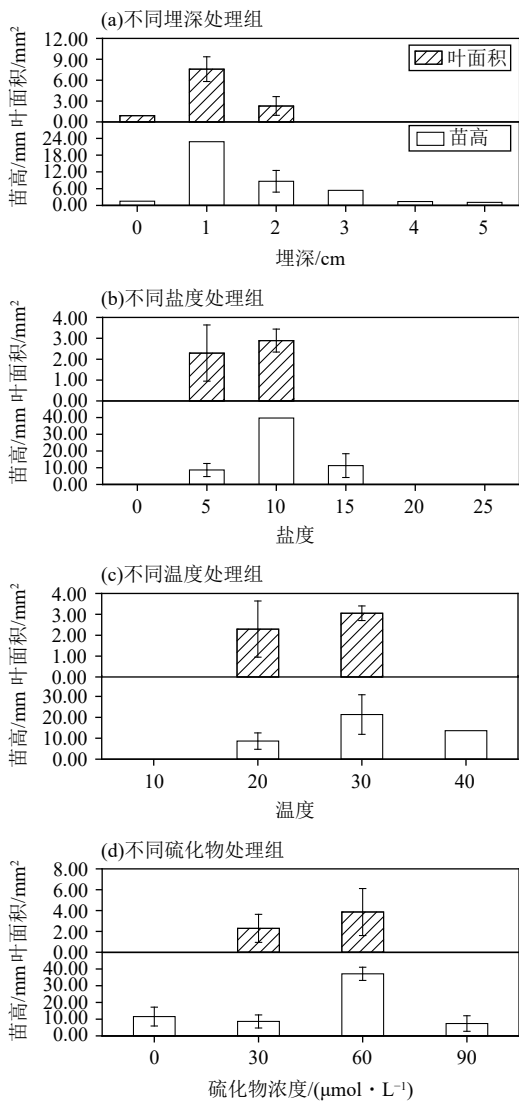


图4 不同处理组贝克喜盐草幼苗的叶面积和高度

Fig. 4 Leaf surface areas, and seedling heights of *H. beccarii* under different treatments

盐度为 0 处理的种子萌发率显著低于盐度为 15 和 20 的处理组 ($P < 0.01$)。盐度为 0、20 和 25 的处理组未见高度 ≥ 1 mm 的幼苗。盐度在 5 ~ 15 之间有利于贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长。盐度为 5 时种子萌发率最高；盐度为 10 时苗高和叶面积最大。

在 10 ~ 40 °C 温度条件下, 20 °C 温度处理下的种子萌发率显著高于其他温度处理组 ($P < 0.01$), 但苗高小于 30 °C 和 40 °C 的温度处理组, 叶面积小于 30 °C 温度处理组。10 °C 温度处理下的种子虽有少量萌发 (7.50%), 但其长出的胚芽长度均不足 1 mm。

当培养液的硫化物浓度在 0 ~ 90 $\mu\text{mol/L}$ 之间变化时, 种子在 30 $\mu\text{mol/L}$ 硫化物浓度的培养环境中的萌发率显著高于其他处理组 ($P < 0.01$), 但苗高小于 0 $\mu\text{mol/L}$ 和 60 $\mu\text{mol/L}$ 硫化物浓度的处理组, 叶面积

小于 60 $\mu\text{mol/L}$ 硫化物浓度处理组。

3 讨论

种子萌发是一个复杂的生理过程, 是植物生活史最重要和最脆弱的阶段, 是对外部环境变化最为敏感的时期^[19-22]。一般来说, 种子萌发需要两个基本条件: 一是种子具有活力, 二是萌发环境合适^[10]。在不适宜幼苗生长的环境中, 种子会进入休眠状态以降低灭绝风险。合适的萌发环境不仅能增加种子萌发率, 也能增大幼苗后期的存活率^[23]。海草种子终止休眠或开始萌发通常受到温度、光照、水分、盐分和生境干扰程度等综合因素的影响, 而环境因子对海草种子萌发的影响存在种间特异性^[10]。例如, 光虽然是恩氏喜盐草 (*Halophila engelmannii*) 和毛叶喜盐草 (*Halophila decipiens*) 种子萌发的一个重要诱因^[24], 但从本研究的结果来看, 光照并非贝克喜盐草种子萌发的必要条件。此前也有研究表明贝克喜盐草种子在黑暗条件下具有较好的萌发效果^[11], 这种现象也出现在大叶藻 (*Zostera marina*) 的萌发实验中^[25]。

基质是种子萌发的基础, 是种子迅速恢复活性、完成胚发育生长、为幼苗生长做准备的必要条件^[23]。对于贝克喜盐草的萌发环境来说, 这几个方面值得关注: 沉积物类型、温度、培养液的盐度和硫化物浓度。本研究发现贝克喜盐草种子在砂质沉积物中的萌发率几乎为 0, 在泥质沉积物中萌发率最高, 这与它的野外生长习性相符 (贝克喜盐草普遍生长在泥质的沉积环境)。温度是影响植物种子休眠和萌发的重要环境因子之一, 它改变种子内部酶的活性, 导致种皮破裂, 改变透水性。温度过高或过低均可导致种子内部酶活性的降低或失活, 影响种子正常的生理代谢活动, 最终影响种子萌发和出苗^[26]。野外观测表明, 尽管贝克喜盐草植株可以在夏季 40 °C 的高温下存活, 但已有研究表明过高或过低的温度对其种子的萌发均有抑制作用, 种子累积萌发率和萌发指数一般在 25 °C 时达到最高值^[11]。本研究发现 20 ~ 30 °C 是贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的最合适温度范围, 10 °C 和 40 °C 处理的种子有少量萌发 (萌发率为 7.50%), 但前者均为长度小于 1 mm 的胚芽, 后者虽然没有长出叶, 但其幼苗高度大于 20 °C 处理组。这个结果证实了贝克喜盐草对温度的上限有相对较大的忍耐力, 而对于温度的下限忍耐力相对较小这一结论^[14]。种子萌发对温度的需求具有物种特异性, 贝克喜盐草种子萌发的最佳温度

为 20 ℃, 大叶藻种子的最佳萌发温度为 10 ℃^[25], 而且研究发现大叶藻在自然环境变温、变光的条件下的萌发时间最短、萌发率最高。变温能够促进或抑制某些物种种子的萌发, 一些物种需要变温来促进酶的活性、改变种子膜透性、膜结合蛋白的活力、促进种皮发生机械变化利于透气透水等, 从而促进种子萌发^[22]。贝克喜盐草所生长的潮间带环境, 每日要经历涨潮和退潮, 这种周期性的潮汐运动造成了温度、盐度等环境因子的较大波动^[14]。在未来的研究中, 我们应该考虑潮汐和变温对贝克喜盐草种子萌发的影响。

有研究认为, 温度对海草种子萌发的影响受到盐度条件的限制^[10], 盐度是影响海草种子萌发最重要的环境因子^[12]。也有研究认为, 盐度对海草种子的萌发没有显著影响^[27]。本研究结果显示盐度对贝克喜盐草种子萌发有影响, 但小于温度的影响。不考虑实验中其他条件的影响, 低温 (10 ℃) 条件下, 种子萌发率随着盐度升高而降低; 20 ℃ 和 30 ℃ 条件下, 种子萌发率随着盐度升高而先升高后降低, 种子萌发的最佳盐度条件分别是 5 和 10; 高温 (40 ℃) 条件下, 种子萌发率随着盐度升高而升高。总的来说, 低温时, 低盐度条件利于种子萌发; 而高温时, 偏高一点的盐度利于种子萌发。这一方面可能是因为高温条件下, 种子中的酶活性受抑制, 物质分解代谢受阻, 胚无法吸收利用足够的营养来完成萌发, 这时施加低浓度盐胁迫可促进细胞膜的渗透调节, 从而促进细胞吸水, 同时微量的盐离子对呼吸酶有促进作用, 从而有利于种子萌发。而种子中的淀粉酶活性在低于 30 ℃ 的条件下具有较高水平, 这时降低盐度更有利于种子萌发。低盐度促进海草种子的萌发在很多海草种类中也有报道^[10-11, 25, 28-29]。本研究发现盐度在 5 ~ 15 之间有利于贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长, 盐度为 0、20 和 25 的处理组种子有萌发, 但没有长出高度 ≥ 1 mm 的幼苗。由此可见淡水处理尽管能促进种子快速萌发, 但对后续发育的幼苗存活和生长并无促进效果^[28, 30]。大多数研究结果称海草幼苗存活和生长的适宜盐度范围在 10 ~ 40 之间^[10], 与这些结果不同的是, 本研究发现盐度 > 15 的培养环境不利于贝克喜盐草幼苗的生长, 表明贝克喜盐草偏好盐度偏低的生境, 例如河口或其他有淡水注入的生境。

海草有时会生长在高度还原性的沉积物中, 其中会含有潜在的有毒硫化物^[31]。硫化物对植物的光合作用、好氧代谢、生长发育和养分吸收等方面都有

负面影响^[13]。已经有多项研究证明硫化物会抑制海草的生长, 降低其生物量^[32-33]。但本研究发现培养液中硫化物浓度 $\leq 60 \mu\text{mol/L}$ 时, 贝克喜盐草种子萌发率与幼苗生长情况较好, 硫化物浓度升高导致了贝克喜盐草幼苗高度和叶面积均变小的结果, 说明对环境施加低浓度的硫化物刺激可能促进了贝克喜盐草种子的萌发和生长, 高浓度的硫化物对贝克喜盐草的生长有害。低浓度硫化物刺激贝克喜盐草种子的萌发和生长的机理有待进一步研究。

埋深是一种综合生态因子, 种子周围的环境条件因埋深不同而产生差异。适当的埋深通过调节光照、土壤温度和湿度、厌氧微生物数量、增加根系固着能力等方面促进种子萌发、幼苗出土和幼苗生长; 但是埋深过深时, 又会因土壤透气性变差、温度不合适而抑制种子萌发和幼苗出土^[15-16]。本研究所有处理均在避光条件下进行 (即埋深不通过影响光照来影响萌发率或幼苗生长), 发现最适合贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的埋深范围是 1 ~ 3 cm。就野外实验结果来说, 埋深为 7 cm 的实验组结果几乎都是种子死亡腐烂, 这可能是埋深过大 (> 3 cm) 形成的厌氧环境造成了种子活性下降甚至是死亡的结果。虽然有研究表明厌氧条件能够促进海草种子的萌发^[34], 但也有研究证明海草种子在厌氧环境中存活率非常低^[35]。Churchill 对比了厌氧和有氧条件下的大叶藻幼苗生长状况, 发现其子叶下胚轴虽然在厌氧条件下显著增长, 但胚芽和子叶鞘等其他生态学指标均在有氧环境中表现比较好^[36]。这可能是由于海草种子萌发时候, 呼吸作用强度显著增大, 需要大量氧气供应。但当氧气供应不足时, 种子内部各类脱氢酶诱导产生的有害产物会降低海草种子萌发率。对于贝克喜盐草种子来说, 当环境条件中的溶解氧浓度有限时, 胚容易发育不良, 发芽率低, 进而降低出苗率。不过这需要相关的贝克喜盐草种子生理生态学方面的实验结果来证明。本研究对实验材料所用的种子没有进行活力检测, 而且对各环境因子缺少交互作用的分析, 这部分内容是未来的研究重点。

4 结论

通过正交试验, 得到有利于贝克喜盐草种子萌发的最佳组合条件为: 泥质沉积物、温度 20 ℃、盐度 5、硫化物浓度 30 $\mu\text{mol/L}$ 、埋深 2 cm。20 ~ 30 ℃ 是贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的最合适温度范围, 盐度在 5 ~ 15 之间有利于贝克喜盐草幼苗的存

活和生长,高浓度的硫化物刺激不利于贝克喜盐草种子的萌发和生长,最适合其生长的埋深范围是1~3 cm。研究贝克喜盐草种子萌发和幼苗生长的

最佳环境因子组合有助于我们更深入地理解贝克喜盐草种群的长期生态适应性,对这一濒危物种的保护、管理及恢复具有重要的科学意义。

参考文献 (References):

- [1] 邱广龙,范航清,李宗善,等. 濒危海草贝克喜盐草的种群动态及土壤种子库研究:以广西珍珠湾为例[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6163-6172.
QIU G L, FAN H Q, LI Z S, et al. Population dynamics and seed banks of the threatened seagrass *Halophila beccarii* in Pearl Bay, Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6163-6172.
- [2] 邱广龙,苏治南,钟才荣,等. 濒危海草贝克喜盐草在海南东寨港的分布及其群落基本特征[J]. *广西植物*, 2016, 36(7): 882-889.
QIU G L, SU Z N, ZHONG C R, et al. Distribution and community characteristics of threatened seagrass *Halophila beccarii* in Dongzhai Harbor, Hainan[J]. *Guihaia*, 2016, 36(7): 882-889.
- [3] PARTHASARATHY N, RAVIKUMAR K, RAMAMURTHY K. Floral biology and ecology of *Halophila beccarii* Aschers. (Hydrocharitaceae)[J]. *Aquatic Botany*, 1988, 31(1/2): 141-151.
- [4] PHAN T T H, DE RAEYMAEKER M, LUONG Q D, et al. Clonal and genetic diversity of the threatened seagrass *Halophila beccarii* in a tropical lagoon: resilience through short distance dispersal[J]. *Aquatic Botany*, 2017, 142: 96-104.
- [5] ZAKARIA M H, BUJANG J S, ARSHAD A. Flowering, fruiting and seedling of annual *Halophila beccarii* Aschers in Peninsular Malaysia[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2002, 71(3): 1199-1205.
- [6] SHORT F T, COLES R, WAYCOTT M, et al. *Halophila beccarii*. The IUCN red list of threatened species[EB/OL]. [2024-04-20]. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2010-3.RLTS.T173342A6995080.en>.
- [7] ORTH R J, MARION S R, GRANGER S, et al. Evaluation of a mechanical seed planter for transplanting *Zostera marina* (eelgrass) seeds[J]. *Aquatic Botany*, 2009, 90(2): 204-208.
- [8] GRIME J P, MASON G, CURTIS A V, et al. A comparative study of germination characteristics in a local flora[J]. *The Journal of Ecology*, 1981, 69(3): 1017-1059.
- [9] GUTTERMAN Y. Environmental factors and survival strategies of annual plant species in the Negev Desert, Israel[J]. *Plant Species Biology*, 2000, 15(2): 113-125.
- [10] 张沛东,孙燕,牛淑娜,等. 海草种子休眠、萌发、幼苗生长及其影响因素的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 3060-3066.
ZHANG P D, SUN Y, NIU S N, et al. Research progress in seagrass seed dormancy, germination, and seedling growth and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 3060-3066.
- [11] 韦梅球. 潮间带海草贝克喜盐草种子储存与萌发影响因素的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
WEI M Q. Influential factors of the storage and germination of seed of intertidal seagrass *Halophila beccarii*[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [12] ORTH R J, HARWELL M C, BAILEY E M, et al. A review of issues in seagrass seed dormancy and germination: implications for conservation and restoration[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 200: 277-288.
- [13] 张玉,赵鹏,张晓梅,等. 硫化物胁迫对海草影响的研究进展[J]. *海洋科学*, 2020, 44(11): 123-131.
ZHANG Y, ZHAO P, ZHANG X M, et al. A review of the effects of sulfide stress on seagrass[J]. *Marine Science*, 2020, 44(11): 123-131.
- [14] 邱广龙,苏治南,范航清,等. 贝克喜盐草的生物学和生态学特征及其保护对策[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(1): 121-126.
QIU G L, SU Z N, FAN H Q, et al. Biological and ecological characteristics of intertidal seagrass *Halophila beccarii* and its conservation counter-measures[J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39(1): 121-126.
- [15] 杨慧玲,曹志平,董鸣,等. 沙埋对无芒雀麦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2007(11): 2438-2443.
YANG H L, CAO Z P, DONG M, et al. Effects of sand burying on caryopsis germination and seedling growth of *Bromus intermis* Leys[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007(11): 2438-2443.
- [16] VLEESHOUWERS L M. Modelling the effect of temperature, soil penetration resistance, burial depth and seed weight on pre-emergence growth of weeds[J]. *Annals of Botany*, 1997, 79(5): 553-563.
- [17] ZAKARIA M H, SIDIK B J, HISHAMUDDIN O. Flowering, fruiting and seedling of *Halophila beccarii* Aschers. (Hydrocharitaceae) from Malaysia[J]. *Aquatic Botany*, 1999, 65(1/2/3/4): 199-207.
- [18] 韦梅球,招礼军,邱广龙,等. 潮间带贝克喜盐草土壤种子库空间分布及其生物影响因素[J]. *广西科学院学报*, 2017, 33(2): 93-101.
WEI M Q, ZHAO L J, QIU G L, et al. Spatial distribution of the soil seed banks of seagrass *Halophila beccarii* at intertidal zone and the biological influential factors[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2017, 33(2): 93-101.
- [19] RAJJOUL L, DUVAL M, GALLARDO K, et al. Seed germination and vigor[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2012, 63: 507-533.
- [20] BHATT A, BHAT N R, SANTO A, et al. Influence of temperature, light and salt on the germination of *Deverra triradiata* seeds[J]. *Seed Science*

and Technology, 2019, 47(1): 25-31.

- [21] CHAUHAN B S, ALI H H, FLORENTINE S. Seed germination ecology of *Bidens pilosa* and its implications for weed management[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 16004.
- [22] BASKIN C, BASKIN J. Seeds ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination[M]. 2nd ed. Academic Press: San Diego, 2014.
- [23] 高圆圆, 王煜贤. 不同基质播种及激素对宽叶绿绒蒿种子萌发的影响[J]. 农业与技术, 2023, 43(9): 49-54.
- [24] MORITA T, KAKINUMA M, MIZUNO G, et al. Morphological characteristics of annual *Zostera marina* shoots at various germination temperatures[J]. *Aquatic Botany*, 2010, 92(1): 49-54.
- [25] 王明, 郭馨, 唐学玺, 等. 大叶藻种子萌发环境条件研究[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(3): 540-548.
WANG M, GUO X, TANG X X, et al. Optimal condition for seed germination of *Zostera marina*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(3): 540-548.
- [26] BRÄNDEL M. The role of temperature in the regulation of dormancy and germination of two related summer-annual mudflat species[J]. *Aquatic Botany*, 2004, 79(1): 15-32.
- [27] CONACHER C A, POINER I R, BUTLER J, et al. Germination, storage and viability testing of seeds of *Zostera capricorni* Aschers. from a tropical bay in Australia[J]. *Aquatic Botany*, 1994, 49(1): 47-58.
- [28] 田璐, 张沛东, 牛淑娜, 等. 不同处理对大叶藻种子萌发和幼苗建成的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2408-2413.
TIAN L, ZHANG P D, NIU S N, et al. Effects of different treatments on seed germination and seedling establishment of eelgrass *Zostera marina* L. [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(9): 2408-2413.
- [29] 刘云龙, 张学雷. 盐度对大叶藻种子萌发和幼苗发育的影响[J]. 海洋学报, 2016, 38(2): 104-111.
LIU Y L, ZHANG X L. The effects of salinity on seed germination and seedling development of the seagrass, *Zostera marina* L. [J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(2): 104-111.
- [30] 张海鹏, 许玉甫, 高文彬, 等. 大叶藻种子萌发与幼苗培育、种植方法的初步研究[J]. 河北渔业, 2015(4): 6-8.
ZHANG H P, XU Y F, GAO W B, et al. Preliminary study on seed germination, seedling cultivation and planting methods of the seagrass, *Zostera marina* L. [J]. *Hebei Fishery*, 2015(4): 6-8.
- [31] TERRADOS J, DUARTE C M, KAMP-NIELSEN L, et al. Are seagrass growth and survival constrained by the reducing conditions of the sediment?[J]. *Aquatic Botany*, 1999, 65(1/2/3/4): 175-197.
- [32] BORUM J, PEDERSEN O, GREVE T M, et al. The potential role of plant oxygen and sulphide dynamics in die-off events of the tropical seagrass, *Thalassia testudinum*[J]. *Journal of Ecology*, 2005, 93(1): 148-158.
- [33] MASCARÓ O, VALDEMARSEN T, HOLMER M, et al. Experimental manipulation of sediment organic content and water column aeration reduces *Zostera marina* (eelgrass) growth and survival[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, 373(1): 26-34.
- [34] MOORE K A, ORTH R J, NOWAK J F. Environmental regulation of seed germination in *Zostera marina* L. (eelgrass) in Chesapeake Bay: effects of light, oxygen and sediment burial[J]. *Aquatic Botany*, 1993, 45(1): 79-91.
- [35] HOOTSMANS M J M, VERMAAT J E, VAN VIERSSEN W. Seed-bank development, germination and early seedling survival of two seagrass species from the Netherlands: *Zostera marina* L. and *Zostera noltii* hornem[J]. *Aquatic Botany*, 1987, 28(3/4): 275-285.
- [36] CHURCHILL A C. Growth characteristics of *Zostera marina* seedlings under anaerobic conditions[J]. *Aquatic Botany*, 1992, 43(4): 379-392.

Optimal environmental condition for seed germination and seedling growth of the vulnerable seagrass *Halophila beccarii*

QIU Siting^{1,2}, PAN Yuanfang^{1,2}, SU Zhinan^{1,2}, QIU Guanglong^{1,2*}

(1. Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Academy of Marine Sciences (Guangxi Mangrove Research Center), Beihai 536000, China; 2. Observation and Research Station of Coastal Wetland Ecosystem in Beibu Gulf, MNR, Beihai 536015, China)

Abstract: *Halophila beccarii* is listed as vulnerable (VU) species on the IUCN Red List. The rapid reduction in area of seagrass bed of *H. beccarii* has received widespread attention in recent years, and the germination and growth of its seeds are important for large-scale restoration of damaged seagrass beds. To investigate the key environmental conditions during initial population establishment phase of *H. beccarii*, we combined field experiments with laboratory cultivation for the study. We comparatively analyzed the effects of different temperatures, salinities,

sulfide concentrations, and seed burial depths on the seed germination and seedling growth of *H. beccarii*. Results indicate that the optimal combination for the seed germination is muddy sediment type under temperature 20 °C, salinity 5 and sulfide concentration 30 μmol/L at burial depth of 2 cm. Under the condition, the seed germination rate reached 35.00% in 60 days and 73.33% in 90 days. The optimum temperatures for both seed germination and seedling growth were 20 °C to 30 °C. Salinities between 5 and 15 were favored for seedling survival and growth. High sulfide concentrations inhibited seed germination. Excessive burial depth suppressed seed germination, with the optimal range for seedling growth being 1 cm to 3 cm. Studying the environmental factors affecting seed germination and seedling growth of *H. beccarii* not only helps to understand the long-term ecological adaptations, but also provides important practical significance for predicting population regeneration and formulating restoration strategies.

Key words: *halophila beccarii*; seed germination; seedling growth; optimal environment

DOI: [10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240420001](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240420001)

* Corresponding author (E-mail: gqiu@gxams.ac.cn)

(责任编辑: 高众勇)