DOI: 10.3724/EE.1672-9250.2026.54.019 CSTR: 32253.14.EE.1672-9250.2026.54.019

# 厦门高盐度海岛滩涂不同苗龄白骨壤(*Avicennia marina*)的生理特征研究

吴一凡[1]，艾 瑶[1]，孙 方[2]，董洪雨[2]，李宏宾[2]，黄 琳[3]，张 立[3]，梁丰收[3]，丁振华[1,*]

(1.厦门大学 环境与生态学院,福建 厦门 361102; 2. 中交第三航务工程局第六工程(厦门)有限公司,福建 厦门 361006; 3. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司,武汉 430060)

**摘 要**：由于宜林滩涂的减少,一些风浪大盐度高的海岛滩涂也成为红树林生态修复备选地,选择合适的苗木是造林成功的一大关键。本文通过在厦门一海岛滩涂上种植不同苗龄的白骨壤容器苗,定期现场测定其白骨壤成活率、株高、基径和光合作用参数,实验室测定叶绿素及酶等指标,以期为今后类似岛屿滩涂红树林生态修复提供参考。研究发现,(1)两年生白骨壤苗(Am2)的半年成活率最高为80%,一年生白骨壤(Am1)成活率54%,三年生白骨壤(Am3)成活率44%;(2)Am2、Am3在种植的次年完成了开花结果并且实现自我繁殖,株高增量Am1>Am2>Am3;基径增量Am3>Am2>Am1;(3)不同苗龄白骨壤幼苗的叶绿素含量、光合作用参数和抗氧化酶等指标没有明显的规律性变化;(4)白骨壤的株高增量(△H)、基径增量(△D)都与盐度、月蒸发量呈现极显著正相关;除一年生苗外,二年生和三年生白骨壤幼苗的株高增量和基径增量都与丙二醛(MDA)呈现显著的负相关关系。但叶绿素和光合因子间没有显著的相关性。

**关键词**：红树林;白骨壤;成活率;生理生化特征;厦门;海岛

**中图分类号**：S79 **文献标识码**：A

红树林是由热带、亚热带潮间带的木本植物组成的滨海生态系统,具有多种重要生态功能和服务价值[1-2]。因为认识不足和人为活动影响,上世纪50年代到上世纪末,我国红树林面积不断减少。本世纪以来,国家持续的保护政策尤其是南红北柳、红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)等使我国红树林面积得以扩大,红树林湿地生态系统的结构和功能也得到改善[3-4]。同时,科研人员在红树林育苗、种源筛选、宜林指标、种植技术和标准制定等方面取得大量成果[5]。

温度、盐度、底质等是影响红树林生态修复成效的关键环境因子。温度直接影响红树林的分布范围,尽管红树植物可以在很大的盐度范围内生存,但不同红树植物抗盐的机制和最适宜生长的盐度范围也不同[6-7],高盐度海滩通常是指非雨季海水盐度超过25‰的海滩立地条件(困难立地红树林造林技术规程LY/T 2972—2018)。当环境盐度过高时,红树植物的组织结构就会受到影响或破坏,从而抑制红树植物的生长发育[6]。强的风浪不仅妨碍泥沙淤积过程[8-9],而泥沙淤积有利于红树植物的生长,同时风浪还会直接影响幼苗生长和定植过程[10]。底质(沉积物)的土壤肥力直接影响红树林树高和生长发育[11]。

白骨壤(*Avicennia marina*)具有泌盐功能,是我国耐盐性最强的红树植物之一,分布也极为广泛,是红树林的先锋树种,耐盐耐低温,在我国红树林生态修复中具有重要作用[12]。许多学者作过白骨壤的生理生态研究[13-14],但关于白骨壤在高盐度海岛滩涂的种植研究还很少,本研究主要进行了不同苗龄白骨壤在海岛滩涂野外生长状况和生理生态指标的测定,为高盐度海岛滩涂大规模种植红树林积累经验和参考。

**收稿日期**：2025–10–23;**改回日期**：2026–01–20

**基金项目**：国家重点研发计划(2022YFC3106103、2017FY100701)和厦门市自然资源和规划局项目(厦资源规划合字C(2020)0020号)。

**第一作者简介**：吴一凡(1998—),女,硕士,研究方向为湿地生态修复与评估。email: 963491369@qq.com。

***通信作者**：丁振华(1966—),男,博士,教授,研究方向为污染生态学与修复生态学。email: dzh@xmu.edu.cn。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY–NC–ND license.

# 1 材料和方法

## 1.1 研究区域概况

厦门位于福建省南部,亚热带海洋性季风气候,年平均气温在21 ℃左右,最冷月集中在1—2月。年平均降雨量在1 200 mm左右,春夏季降雨量较多,潮汐为规则半日潮。试验地点位于厦门东北一无居民海岛滩涂上,滩涂的基本理化性质见表1,周边海水除雨水外没有淡水补给。海水盐度为27‰~30‰,该处平均超差为4.13 m。

## 1.2 试验材料与试验方法

2020年10月底分别选择健壮的长势良好的一年生(Am1)、两年生(Am2)和三年生(Am3)白骨壤容器苗进行试验种植,Am1和Am2的土球直径约25 cm,Am3的土球直径约30 cm。Am1和Am2的株距行距均为0.5 m×0.5 m, Am3 的株距行距均为0.8 m×0.8 m。每种树苗种植面积为4 m×4 m,设3个重复。

试验幼苗种植两个月后开始按月统计红树植物幼苗的成活率,直至半年后白骨壤能够稳定生长。3个月起(即从2021年1月)开始每月定期调查不同苗龄白骨壤的生理生态指标,包括白骨壤的株高、基径、光合特性以及成熟叶片的叶绿素(Chl)含量、丙二醛(MDA)含量和抗氧化酶(超氧化物歧化酶 SOD,过氧化氢酶CAT和过氧化物酶POD)活性。

株高(H)、基径(D)分别使用卷尺和数显游标卡尺进行所有植株的现场测量,每株幼苗测量3次,取平均值作为测量值,并据此计算幼苗的株高增量(△H)、基径增量(△D)及生长率(RGR)。计算公式如下:

$$\triangle H = H_t - H_0 \text{或} \triangle D = D_t - D_0 \quad (1)$$

$$RGR_H = (H_t - H_0)/H_0 \text{或} RGR_D = (D_t - D_0)/D_0 \quad (2)$$

式中:$H_0$和$D_0$分别为1月份测量的株高和基径;$H_t$和$D_t$为其他各次测量得到的基径;$RGR_H$和$RGR_D$为株高和基径的相对生长率。

光合因子测定:使用 Li–6800便携式光合作用测定仪测定叶片的净光合速率(Pn)、胞间$CO_2$浓度(Ci)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)等光合参数,每月低潮期选择天气晴朗的日子在上午9:00~11:00现场测量,设定固定光强1 400 μmol/($m^2$·s)。

叶绿素组分(Chl)测定:采集的白骨壤幼苗叶片鲜样去除主脉,剪碎、混匀,取0.1 g叶片加入10 mL丙酮–乙醇混合液(1∶1)研磨,匀浆后室温下于暗处浸提,离心,取上层浸提液,分别测定663、645和652 nm波长处的吸光值。按照公式计算得出叶绿素总含量、叶绿素a、叶绿素b含量以及叶绿素a/b值[15]。

SOD、CAT、POD活性测定:使用试剂盒测定叶片上清液,试剂盒由上海吉至生化科技有限公司生产。去除主脉的白骨壤幼苗叶片鲜样,剪碎、混匀,取0.1 g叶片加入1 mL提取液,8 000 r/min 4 ℃离心10 min,取上清液,置冰上待测。分光光度计预热30 min以上,蒸馏水调零,根据说明书依次加入2~4种工作液(测定前配制),调节波长至560 nm(SOD)、240 nm(CAT)和470 nm(POD)测定不同时刻的吸光值,同时测定空白和对照样品,按公式计算酶的活性值。

MDA含量的测定:取去除主脉的白骨壤叶片0.5 g加5%的TCA溶液5 mL,研磨、匀浆、离心。取2 mL上清液加入0.67%的TBA溶液2 mL,混匀后100 ℃水浴30 min,冷却后再次离心,分别在450、532和600 nm处测定吸光度值,按照公式计算单位鲜样组织中的MDA含量(μmol/g)[16]。

因Am1长势较差且叶片很少,2021年3月份之前没有测定其生理生化指标,另外,9月和11月由于管控无法上岛,这两个月的所有指标均未测定。

## 1.3 质量控制措施和数据处理

为了保证数据的可比性,选择若干能够代表整体株高水平且长势良好的幼苗进行挂牌、编号,专门用于光合因子测定。因白骨壤幼苗冠幅较小,每次测量时每种苗龄的白骨壤选择3株幼苗,在幼苗的东、南、西3个方位各选择1片成熟叶子进行测量,取其平均值作为测定值。

另选长势相近且有代表性的植株,采摘不同方位的叶子,装入自封袋,冰袋保存带回实验室尽快测定白骨壤成熟叶片的叶绿素及酶。同时测定3个平行样,取平均值。利用Excel处理各指标的测定结果及绘图,利用SPSS 20.0进行相关性分析。

**表1 滩涂沉积物的基本理化性质**

**Table 1** Properties of sediments in experimental mudflat

| pH | 盐度/‰ | 有机质 | 总氮 | 水解氮 | 速效钾 | 总磷 | 容重/(g/$cm^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | g/kg | | mg/kg | | | |
| 7.69±0.08 | 3.86±0.40 | 3.83±0.96 | 1.84±0.51 | 77.67±3.51 | 1 400±10 | 296.7±57.35 | 0.75±0.05 |

## 2 结果与分析

### 2.1 不同红树植物生长特征

#### 2.1.1 成活率

3种苗龄白骨壤幼苗的成活率逐月下降，半年后趋于稳定(表2)。种植两个月后(12月)，Am1的成活率最低(68%)，Am2最高(88%)，Am3(78%)介于二者之间。1—2月是当地一年之中气温较低的月份，各苗龄白骨壤的成活率继续降低。到4月份，Am1的成活率为54%，Am2的成活率最高为80%，Am3的成活率最低为44%。此后各苗龄白骨壤进入稳定生长阶段，不再统计其成活率。

#### 2.1.2 生长增量

幼苗的△H和△D显示了白骨壤在野外困难立地条件下的适应能力和生长状况。2021年1月份测量时不同苗龄白骨壤的株基径见表3。3种苗龄白骨壤△H和△D如图1所示。Am1的△H占优势，而Am3的基径生长优于Am1和Am2。5月份后，Am1、Am2和Am3的△H出现明显分化，Am1的△H显著高于Am2和Am3($p<0.05$)，而Am2和Am3的△H差异不显著($p>0.05$)。3种苗龄白骨壤的△D从3月份开始出现分化，5月份Am3的△D显著高于Am1的△D。8月份3种苗龄白骨壤的△D表现为Am3>Am2>Am1，彼此间均有显著性差异。8月之后，Am2和Am3的△D又变得差异不显著。

经过1年的生长，Am1的平均△H(28.8 cm)显著高于Am2(20.2 cm)和Am3(13.80 cm)，而Am2和Am3之间没有明显差异；Am1的平均△D(5.6 mm)显著低于Am2(7.4 cm)和Am3(8.9 cm)。

据野外现场观测，到8月份Am2、Am3长出了指状

**表2 不同苗龄白骨壤种植后的成活率**

**Table 2** Survival rate of *Avicennia marina* at different ages

| 项目 | 成活率/% | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 2个月 | 3个月 | 4个月 | 5个月 | 6个月 |
| Am1 | 100 | 68±8.3 | 68±0 | 56±7.5 | 54±1.5 | 54±0 |
| Am2 | 100 | 88±10.2 | 88±0 | 80±6.3 | 80±0 | 80±0 |
| Am3 | 100 | 78±13.2 | 66±9.8 | 58±6.4 | 48±12.5 | 44±3.7 |

**表3 不同苗龄白骨壤的初始株高（$H_0$）和初始基径（$D_0$）**

**Table 3** Hight ($H_0$) and basic diameter ($D_0$) of *Avicennia marina* in the beginning of experiment

| 项目 | Am1 | Am2 | Am3 |
|---|---|---|---|
| 株高/cm | 38.8±4.3c | 93.9±7.6b | 113.0±10.8a |
| 基径/mm | 5.9±0.8c | 9.6±0.9b | 11.3±1.4a |

注：不同字母表示差异显著。

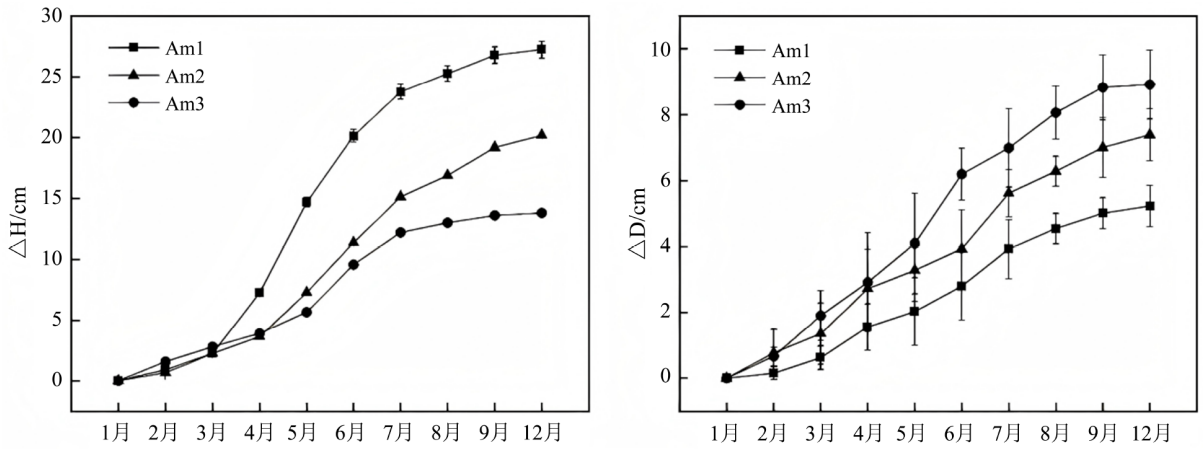



图1 不同苗龄白骨壤△H和△D变化

Fig. 1 Changes of △H and △D of *Avicennia marina* seedlings with different ages

呼吸根并且已开花结果，10月份有果实落地萌发，而Am1既没有指状呼吸根也没有开花。

**2.1.3** 生长速率

不同苗龄白骨壤的相对增长速率见表4。从中可以很明显地看出，3—8月是白骨壤株高的快速生长期，而10月到次年2月白骨壤生长缓慢，苗龄越大，其相对增长速率越慢；而基径即使在株高生长缓慢的时期也有较明显的增长，同样的，苗龄越大，增长速率越慢。

**2.2 不同苗龄白骨壤的生理指标**

**2.2.1** 叶绿素含量

白骨壤叶绿素总含量和叶绿素a含量具有类似的不规律变化(图2a–b)。不同苗龄白骨壤叶片总叶绿素和叶绿素a含量的峰值出现时间有所不同，Am2的峰值出现在3月份，Am1和Am3的峰值出现在5月份。多数时间中不同苗龄白骨壤叶片的叶绿素总含量和叶绿素a含量间没有显著差异，且Am2略高于Am3；只是在8月份Am1、Am2、Am3的总叶绿素含量和叶绿素a含量才出现显著差异。

1—12月Am1、Am2和Am3的叶绿素a/b值变化较为稳定，多数时间Am2、Am3与Am1的叶绿素a/b值差异明显(图2c)。上半年(1—6月)的叶绿素a/b值略低于下半年(7—12月)，这与环境因素的变化有关。据《厦门经济特区年鉴2021》，当年1—5月厦门月均气温14.9~25 ℃，5个月平均18.2 ℃；6—12月厦门月均气温16~29.5 ℃，7个月平均25 ℃[17]。冬季气温低光照弱，叶绿素a/b值上升；随着气温升高，光照增强，叶片叶绿素a/b值出现降低。

**2.2.2** 光合因子

由于条件困难，Am1植株矮小，本研究只测定Am2和Am3的光合因子Pn、Tr、Gs和Ci。

由图3a所示，多数时间Am2的Pn要高于Am3，但没有显著差异；仅在5月份和12月份Am2的Pn显著高于Am3。1—3月份Am2和Am3的Pn值都比较低，4月开始，Pn值显著升高($P<0.05$)。Am2和Am3的Pn峰值分别出现于8月和7月，但二者没有显著差异。10月份Pn开始下降，但12月份Pn又有所上升，Am2保持着较高的Pn，显著高于Am3。

多数月份中，Am2和Am3的Ci无显著差异。总体上Am2和Am3的Ci呈现先降低后升高的趋势(图3b)，与Pn的变化趋势相反。7、8月份气温高光照强，大量的$CO_2$被用于光合作用，Ci值也就处于全年最低的时期。

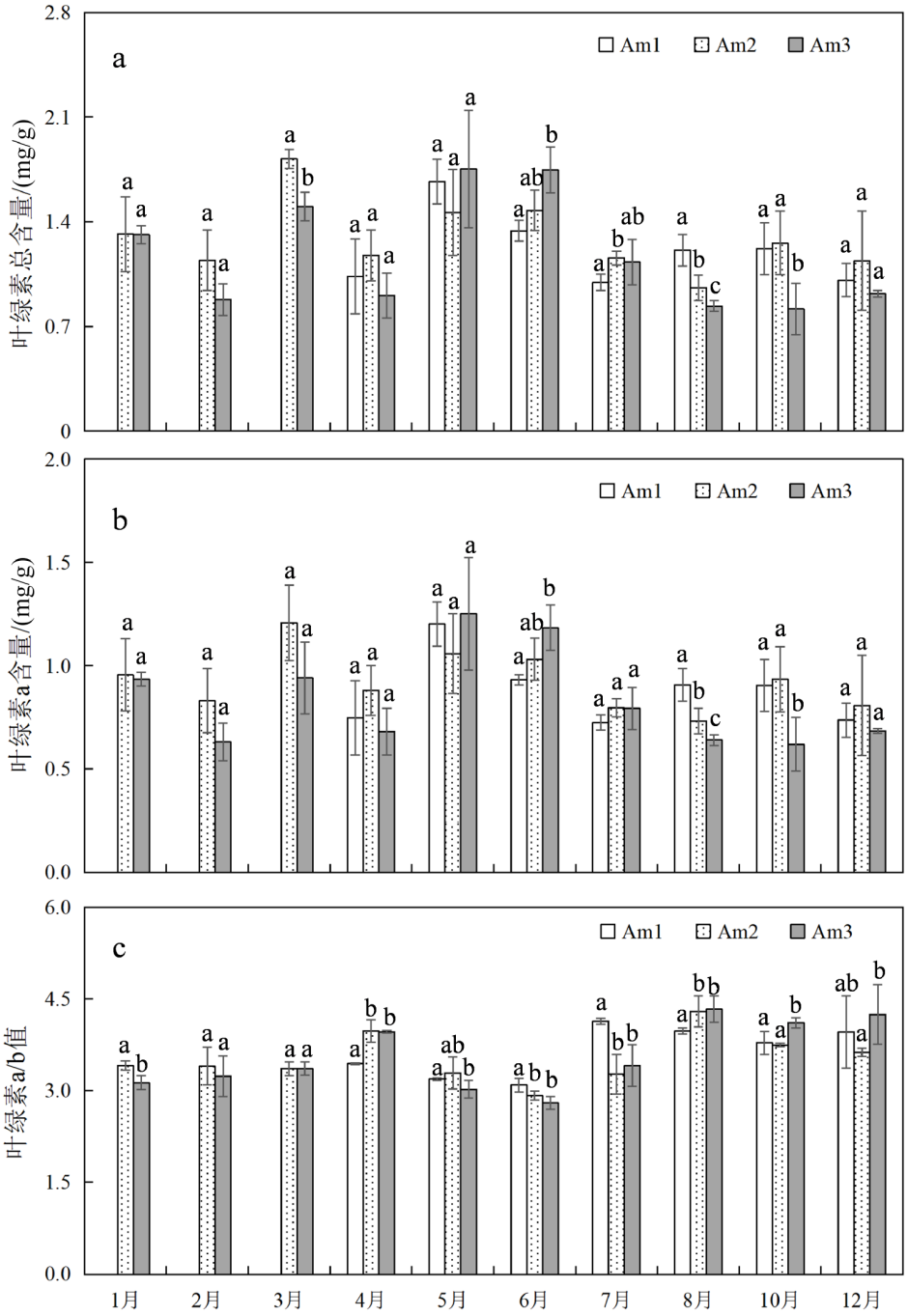
Am2的Gs在7月出现了峰值，显著高于其他月份($p<0.05$)。Am3的Gs在4月出现了第一个峰值，7月出现了第二个峰值，这两个峰值没有显著差异，但都与其他月份的Gs值存在显著差异(图3c)。除7月份外，Am2和Am3的Tr值较低，均与7月的值有显著差异($P<0.05$，图3d)。

**表4 不同苗龄白骨壤的相对生长速率**

**Table 4** Relative growth rate of *Avicennia marina* with different ages

| 月份 | 株高相对增长速率/% | | | 基径相对增长速率/% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Am1 | Am2 | Am3 | Am1 | Am2 | Am3 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 2.3 | 0.7 | 1.4 | 2.6 | 8.0 | 5.9 |
| 3 | 5.8 | 2.4 | 2.5 | 10.6 | 14.2 | 16.8 |
| 4 | 18.7 | 3.9 | 3.5 | 26.3 | 28.4 | 25.8 |
| 5 | 37.8 | 7.7 | 5.0 | 34.3 | 34.3 | 36.2 |
| 6 | 51.9 | 12.1 | 8.5 | 47.3 | 41.0 | 54.6 |
| 7 | 61.2 | 16.1 | 10.8 | 66.2 | 58.6 | 61.7 |
| 8 | 65.1 | 18.0 | 11.5 | 76.7 | 65.6 | 71.2 |
| 9 | - | - | - | - | - | - |
| 10 | 69.0 | 20.4 | 12.0 | 84.5 | 73.1 | 77.9 |
| 11 | - | - | - | - | - | - |
| 12 | 70.2 | 21.5 | 12.2 | 88.2 | 77.1 | 78.7 |

注：-表示未测定。




不同字母表示差异显著。下同。

图2 不同月份Am1、Am2和Am3的叶绿素含量

Fig. 2 Chlorophyll contents of Am1, Am2 and Am3 in different months

### 2.2.3 MDA含量

MDA由植物组织或器官膜脂质发生过氧化反应而产生，是衡量植物抗逆性的生理指标之一[18]。图4显示了不同苗龄的白骨壤MDA含量，呈现“升–降–升”的变化趋势。前4个月白骨壤的MDA含量较高，可能与这一阶段气温较低有关；6—8月白骨壤生长旺盛，MDA含量较低；10月气温开始降低时，MDA含量有所升高，但不同苗龄白骨壤MDA变化并不同步。

### 2.2.4 抗氧化酶活性

抗氧化酶系统可以维持植物细胞内活性氧产生和清除的动态平衡[19-22]，图5显示了不同苗龄白骨壤的CAT、POD和SOD活性水平。CAT活性整体呈现“升–

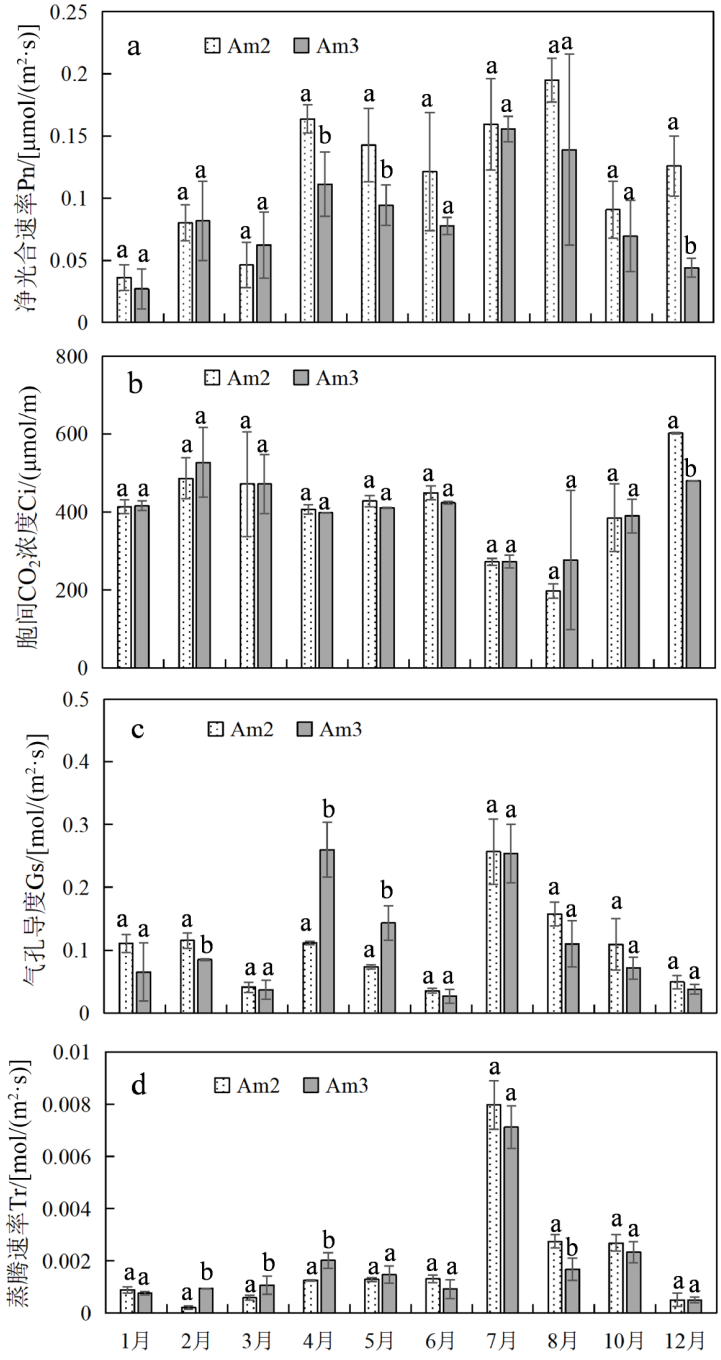



图3 不同月份Am2和Am3光合因子含量图

Fig. 3 Photosynthetic parameters of Am2 and Am3 in different months

降–升–降–升”的变化趋势(图5a)。3—5月份当地浒苔大范围出现,影响白骨壤幼苗的生长,造成白骨壤叶片被缠绕、植株被拉弯的情况,CAT活性增高;冬季的低温也可能导致CAT活性增高。多数时间苗龄对白骨壤叶片的CAT没有显著影响。

不同苗龄白骨壤叶片的POD呈现不规律的升降变化,8月份Am1、Am2和Am3的POD活性均处于最低水平(图5b)。由于缺少Am1前3个月的数值,Am2和Am3的POD变化趋势类似,但它们的最大值和最小值出现时间不同:Am2和Am3的 POD活性最大值分别出现在5月和10月,分别为6 719和6 492 U/g鲜重;但它们的最小值均出现在8月,分别为521和864 U/g鲜重(图5c)。Am1、Am2和Am3的SOD活性均呈现出 1—5 月明显高于 6—12月的特征,6月后 SOD活性稳定下降(图5c)。

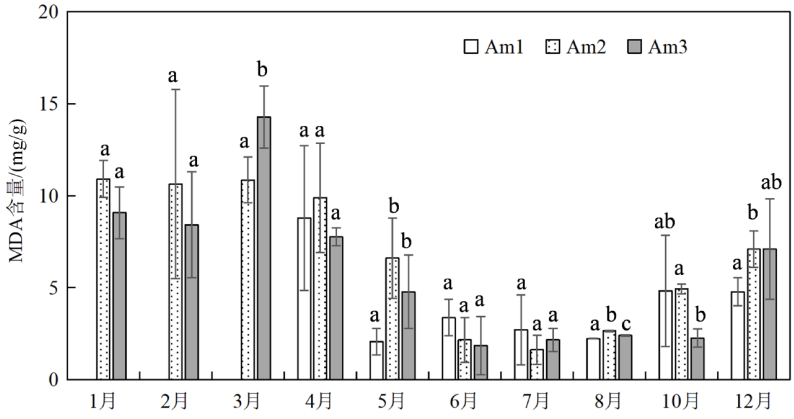



图4 不同月份Am1、Am2和Am3 的MDA含量

Fig. 4 MDA contents of Am1, Am2 and Am3 in different months

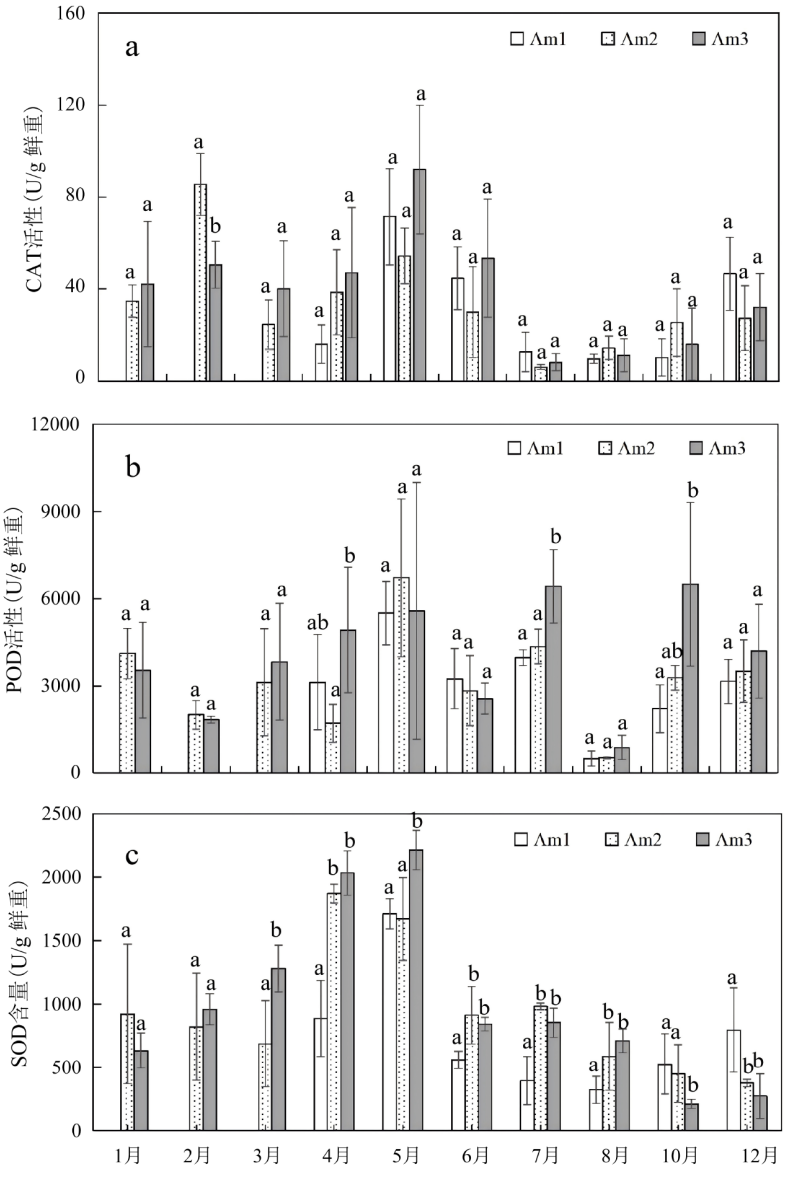



图5 不同月份Am1、Am2和Am3的抗氧化酶活性

Fig. 5 Antioxidase activities levels of Am1, Am2 and Am3 in different months

# 3 讨论

## 3.1 影响白骨壤成活率的因素

成活率是衡量红树植物造林成功与否的重要指标。高海燕[23]于2004年5月在厦门枫林湾不同高程滩涂移植两年生白骨壤苗,6个月的成活率介于62.5%~97.8%,高程(淹水时长)是影响成活率的主要因素。相对于枫林湾,本研究的实验地点更靠近外海,风浪大、气温低、盐度高,所有样地高程几乎相同,因此种苗本身生长状况可能是影响其成活率的最主要因素。本研究中不同苗龄白骨壤的成活率以Am2为最高(80%),Am1次之(54%),Am3成活率低至44%。从种苗本身来说,Am3虽然植株较高,但由于土团大小受容器所限,加上为防止红树植物根系发育造成移植时成活率低,苗圃会不时更换位置,导致营养不足,整个苗木纤细柔弱;Am1苗虽然不受容器土团限制,但生长时间短,植株矮小,仅有2~3对叶,加之种植时间较晚,不利于幼苗的快速发育,二者抵御风浪和盐度胁迫的能力较差,只有Am2的株高、基径都比较壮实,抗逆境能力较强。本次实验白骨壤幼苗移植时间较晚可能也是造成成活率低的原因之一。

## 3.2 生态因子对白骨壤生理生化特征的影响

表5~8列出了不同苗龄白骨壤各生长指标与盐度、气象参数间的相关性。白骨壤的△H、△D、株高相对增长速率、基径相对增长速率都与盐度、月蒸发量呈现极显著正相关,但气温参数与不同苗龄的相关性明显不同。两年生白骨壤的株高增量和各气温参数都没有显著的相关性,而一年生和三年生白骨壤出现不同程度的显著正相关。红树植物都属于嗜热植物,通常气温越高越利于红树植物的生长。在一定的盐度范围内,白骨壤的株高和生物量随盐度的升高而增加[24-25]。

叶绿素是构成叶绿体的主要物质,叶绿素含量反映了植物在一定时期内光合作用能力的强弱、对各种环境因素的综合适应能力[26],叶绿素a/b值减小有利于光能吸收;叶绿素a/b值升高,光合速率加快。大量研究认为低温会抑制叶绿素的合成,加速叶绿素的破坏,杨盛昌和林鹏[27]发现红树植物秋茄和桐花树在低温时叶绿素含量也比较低,但冬季和秋季相差不大。雍石泉[28]也发现气温降低会引起红树植物(秋茄、无瓣海桑、拉贡木)叶绿素含量降低,但不同种类在出现时间上可能会有延迟。黄丽[13]发现漳江口白骨壤成熟叶片叶绿素总量和叶绿素a含量在四季表现为春季(4—5月)到夏季(8月)呈上升趋势,夏季到秋季(11月)下降,秋季到冬季(1—2月)上升。但本文结果与黄丽的发现明显不同,无论是叶绿素总量还是叶绿素a含量的峰值均出现在5—6月份。

高温会导致一些酶活性降低甚至丧失,影响植物光合作用进程,抑制植物生长发育[29-32]。Pernetta[33]认为气温高于35 ℃时,大多数红树植物的光合作用会剧烈下降,高温会导致红树幼苗叶绿素含量及叶绿素a/b值降低,但不同种源的红树植物变化幅度明显不同[34]。Andrzej等[35]发现低温下罗勒(*Ocimum basilicum*)幼苗叶绿素a/b值明显高于高温情况。本研究中上半年(1—6月)叶绿素a/b值相对较低,而下半年相对较高,可能与气温和光照水平有关。

表6~8分别列出了3种不同苗龄白骨壤生理生化指标间的相关性,从中可以明显看出其相关性有明显差异。一年生白骨壤只有SOD、CAT、POD存在显著正相关,两年生白骨壤各种酶之间没有任何显著的相关性,

**表5 盐度及气象参数与不同苗龄白骨壤生长指标间的相关性**

**Table 5** Correlation coefficient among salinity, meteorological factors and growth parameters of *Avicennia marina*

| 指标 | △H1 | △H2 | △H3 | RGH1 | RGH2 | RGH3 | △D1 | △D2 | △D3 | RGD1 | RGD2 | RGD3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sal | 0.719** | 0.785** | 0.767** | 0.719** | 0.785** | 0.767** | 0.810** | 0.811** | 0.756** | 0.810** | 0.811** | 0.756** |
| AT | 0.648* | 0.537 | 0.610* | 0.648* | 0.537 | 0.610* | 0.536 | 0.526 | 0.592* | 0.536 | 0.526 | 0.591* |
| AHT | 0.610* | 0.497 | 0.574 | 0.610* | 0.497 | 0.574 | 0.496 | 0.486 | 0.552 | 0.496 | 0.486 | 0.551 |
| ALT | 0.673* | 0.566 | 0.635* | 0.673* | 0.565 | 0.635* | 0.563 | 0.552 | 0.618* | 0.563 | 0.552 | 0.617* |
| EHT | 0.392 | 0.270 | 0.357 | 0.391 | 0.269 | 0.357 | 0.272 | 0.270 | 0.337 | 0.272 | 0.270 | 0.337 |
| ELT | 0.586* | 0.474 | 0.545 | 0.586* | 0.474 | 0.545 | 0.474 | 0.462 | 0.526 | 0.474 | 0.462 | 0.526 |
| P | –0.334 | –0.415 | –0.377 | –0.334 | –0.415 | –0.377 | –0.399 | –0.392 | –0.373 | –0.398 | –0.392 | –0.373 |
| E | 0.785** | 0.733** | 0.783** | 0.785** | 0.732** | 0.783** | 0.732** | 0.727** | 0.756** | 0.732** | 0.727** | 0.756** |

注:sal–盐度,AT–月平均气温,AHT–月平均高气温,ALT–月平均低气温,EHT–月极端高气温,ELT–月极端低气温,P–月降水量,E–月蒸发量;△H–株高增量,△D–基径增量, RGH–株高相对增长速率,RGD–基径相对增长速率,其后数字代表苗龄。**在0.01级别相关性显著,*在0.05级别相关性显著。下同。

**表6 一年生白骨壤幼苗的生理生化指标间的相关性**

**Table 6** Correlation coefficient among physiological and biochemical indices of one-year *Avicennia marina*

| 指标 | △H1 | △D1 | Chl1 | MDA1 | CAT1 | POD1 | SOD1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| △H1 | 1 | | | | | | |
| △D1 | 0.984** | 1 | | | | | |
| Chl1 | –0.219 | –0.397 | 1 | | | | |
| MDA1 | –0.521 | –0.284 | –0.500 | 1 | | | |
| CAT1 | –0.212 | –0.349 | 0.680 | –0.300 | 1 | | |
| POD1 | –0.428 | –0.539 | 0.408 | –0.086 | 0.709 | 1 | |
| SOD1 | –0.555 | –0.577 | 0.672 | –0.005 | –0.805* | 0.757* | 1 |

注: Chl–叶绿素;MDA–丙二醛含量;CAT–过氧化氢酶含量;POD–过氧化物酶含量;SOD–超氧化物歧化酶含量,下同。

**表7 两年生白骨壤幼苗的生理生化指标间的相关性**

**Table 7** Correlation coefficient among physiological and biochemical indices of two-year *Avicennia marina*

| 指标 | △H2 | △D2 | Chl2 | MDA2 | CAT2 | POD2 | SOD2 | Pn2 | Gs2 | Ci2 | Tr2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| △H2 | 1 | | | | | | | | | | |
| △D2 | 0.991** | 1 | | | | | | | | | |
| Chl2 | –0.416 | –0.443 | 1 | | | | | | | | |
| MDA2 | –0.766** | –0.731* | 0.301 | 1 | | | | | | | |
| CAT2 | –0.589 | –0.567 | 0.016 | 0.573 | 1 | | | | | | |
| POD2 | –0.054 | –0.076 | 0.420 | 0.006 | 0.069 | 1 | | | | | |
| SOD2 | –0.495 | –0.402 | 0.094 | 0.199 | 0.297 | 0.285 | 1 | | | | |
| Pn2 | 0.526 | 0.600 | –0.584 | –0.644* | –0.298 | –0.208 | 0.296 | 1 | | | |
| Gs2 | 0.202 | 0.210 | –0.587 | –0.407 | –0.308 | –0.099 | 0.038 | 0.415 | 1 | | |
| Ci2 | –0.205 | –0.209 | 0.375 | 0.543 | 0.464 | 0.251 | –0.087 | –0.513 | –0.740* | 1 | |
| Tr2 | 0.440 | 0.435 | –0.301 | –0.672* | –0.596 | 0.128 | –0.009 | 0.452 | 0.862** | –0.677* | 1 |

注:Pn–净光合速率;Gs–气孔导度;Ci–胞间CO2浓度;Tr–蒸腾速率,下同。

**表8 三年生白骨壤幼苗的生理生化指标间的相关性**

**Table 8** Correlation coefficient among physiological and biochemical indices of three-year *Avicennia marina*

| 指标 | △H3 | △D3 | Chl3 | MDA3 | CAT3 | POD3 | SOD3 | Pn3 | Gs3 | Ci3 | Tr3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| △H3 | 1 | | | | | | | | | | |
| △D3 | 0.995** | 1 | | | | | | | | | |
| Chl3 | –0.306 | –0.277 | 1 | | | | | | | | |
| MDA3 | –0.722* | –0.708* | 0.093 | 1 | | | | | | | |
| CAT3 | –0.560 | –0.500 | 0.658* | 0.258 | 1 | | | | | | |
| POD3 | 0.201 | 0.223 | 0.057 | –0.139 | –0.006 | 1 | | | | | |
| SOD3 | –0.500 | –0.458 | 0.426 | 0.238 | 0.701* | 0.152 | 1 | | | | |
| Pn3 | 0.363 | 0.319 | –0.188 | –0.519 | –0.299 | 0.061 | 0.293 | 1 | | | |
| Gs3 | –0.010 | –0.031 | –0.232 | –0.215 | –0.091 | 0.421 | 0.520 | 0.733* | 1 | | |
| Ci3 | –0.508 | –0.474 | 0.139 | 0.635* | 0.523 | –0.179 | 0.040 | –0.744* | –0.541 | 1 | |
| Tr3 | 0.355 | 0.291 | –0.139 | –0.426 | –0.478 | 0.539 | 0.000 | 0.719* | 0.701* | –0.697* | 1 |

MDA和Pn、Tr间存在显著负相关,光合因子间存在不同程度的相关性;三年生白骨壤的CAT和叶绿素、SOD显著正相关,MDA和Ci显著正相关,同样的,其光合因子间存在更复杂的相关关系。除一年生苗外,两年生和三年生白骨壤幼苗的株高增量和基径增量都与MDA呈现显著的负相关关系。

光合作用是植物最基本的生命活动,但影响光合作用的环境因子很多,包括光照强度、水分、温度、$CO_2$浓度、土壤等[36],其中,温度和湿度对光合作用影响很大[37],温度过高或者过低都会降低植物的光合速率[38-39]。本研究中4—8月白骨壤幼苗的Pn较大,符合光照较强净光合作用速率较大的一般规律,而低温阶段Am2的Pn也高于Am3。本文未发现叶绿素与光合作用因子之间存在明显的相关关系,红树叶绿素含量变化与其净光合季节变化规律并不完全同步,也不能完全反映光合能力的差异[13]。

丙二醛(MDA)含量过高会引起细胞膜受损,造成膜脂过氧化[40]。SOD、CAT和POD是常见的抗氧化酶,它们尽可能使植物细胞内活性氧的产生和清除处于动态平衡状态,维持植物正常的生长发育。气温过高或过低都会引起植物丙二醛含量的显著增加,影响植物细胞中自由基的产生和清除平衡[40-42]。而抗氧化酶有助于植物抵抗非生物逆境胁迫的影响,这些胁迫包括极端温度、盐度、水分、光、环境污染、肥力不足或过多等[43]。

由于本文没有对一年生白骨壤进行光合因子测定,同时缺失9月和11月的测定数据,所得结论具有一定的局限性。

## 4 结论

本研究通过对海岛滩涂红树林为期1年的野外监测,得出如下结论:

1)在高盐度强风浪困海岛难立地条件下两年生白骨壤容器苗半年成活率可达到80%,一年生和三年生白骨壤的半年成活率分别为54%和44%,两年生白骨壤苗适合作为困难立地红树林种苗。

2)两年生和三年生白骨壤在次年开花结果并且实现自我繁殖,经过1年的生长,△H的增长顺序为Am1>Am2>Am3,△D的增长顺序为Am3>Am2>Am1。

3)不同苗龄白骨壤幼苗的叶绿素含量、光合作用参数和抗氧化酶等指标没有明显的规律性变化。白骨壤叶片MDA和CAT呈现升–降–升的变化趋势,叶绿素、POD呈现不规律的升降变化,而SOD全年呈现先升后降的变化。

4)白骨壤的△H、△D、株高相对增长速率、基径相对增长速率都与盐度、月蒸发量呈现极显著正相关,但气温参数与不同苗龄的相关性明显不同。除一年生苗外,两年生和三年生白骨壤幼苗的株高增量和基径增量都与MDA呈现显著的负相关关系。不同年份白骨壤各参数间的相关性不同。但叶绿素和光合因子间没有显著的相关性。

## 参 考 文 献


[1] Alongi D M. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2008, 76(1): 1–13.

[2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3–15.

[3] 贾明明, 王宗明, 毛德华, 等. 面向可持续发展目标的中国红树林近50年变化分析[J]. 科学通报, 2021, 66(30): 3886–3901.

[4] Duan H B, Zhang H, Huang Q F, et al. Characterization and environmental impact analysis of sea land reclamation activities in China[J]. Ocean & Coastal Management, 2016, 130: 128–137.

[5] 彭逸生, 周炎武, 陈桂珠. 红树林湿地恢复研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 786–797.

[6] 廖岩, 陈桂珠. 盐度对红树植物影响研究[J]. 湿地科学, 2007, 5(3): 266–273.

[7] Parida A K, Jha B. Salt tolerance mechanisms in mangroves: a review[J]. Trees, 2010, 24(2): 199–217.

[8] Rhodes B P, Kirby M E, Jankaew K, et al. Evidence for a mid-Holocene tsunami deposit along the Andaman coast of Thailand preserved in a mangrove environment[J]. Marine Geology, 2011, 282(3/4): 255–267.

[9] 陈一宁, 陈鹭真, 蔡廷禄, 等. 滨海湿地生物地貌学进展及在生态修复中的应用展望[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(5): 1055–1065.

[10] 刘亮, 范航清. 红树林宜林因子研究[J]. 湿地科学与管理, 2010, 6(2): 57–60.

[11] 盘远方, 潘良浩, 邱思婷, 等. 中国沿海红树林树高变异与环境适应机制[J]. 植物生态学报, 2024, 48(4): 483–495.

[12] 林鹏, 张宜辉, 杨志伟. 厦门海岸红树林的保护与生态恢复[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005, 44(S1): 1–6.

[13] 黄丽. 福建省漳江口秋茄、桐花树、白骨壤和木榄光合作用季节动态研究[J]. 湿地科学, 2013, 11(1): 82–89.

[14] 何斌源, 赖廷和, 陈剑锋, 等. 两种红树植物白骨壤(*Avicennia marina*)和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)的耐淹性[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1130–1138.

[15] 张宪政. 植物叶绿素含量测定: 丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986(3): 26–28.
[16] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1–442.
[17] 厦门市政府. 厦门经济特区年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
[18] 杨盛昌, 李云波, 林鹏. 冷胁迫下红树植物白骨壤和桐花树叶片热值的变化[J]. 台湾海峡, 2003, 22(1) :46–52.
[19] Alscher R G, Erturk N, Heath L S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(372): 1331–1341.
[20] Jaleel C A, Riadh K, Gopi R, et al. Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2009, 31(3): 427–436.
[21] Feierabend J. Catalases in plants: molecular and functional properties and role in stress defence[M]. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2005.
[22] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55: 373–399.
[23] 高海燕. 不同高程下秋茄和白骨壤幼苗生长的动态研究[J]. 科技信息: 科学教研, 2007(33): 212–214.
[24] Khan M A, Aziz I. Salinity tolerance in some mangrove species from Pakistan[J]. Wetlands Ecology and Management, 2001, 9(3): 229–233.
[25] Guo Z J, Wei M Y, Zhong Y H, et al. Leaf sodium homeostasis controlled by salt gland is associated with salt tolerance in mangrove plant Avicennia marina[J]. Tree Physiology, 2023, 43(5): 817–831.
[26] Takahashi S, Murata N. How do environmental stresses accelerate photoinhibition? [J]. Trends in Plant Science, 2008, 13(4): 178–182.
[27] 杨盛昌, 林鹏. 红树植物秋茄和桐花树抗寒力的越冬变化[J]. 应用生态学报, 1997, 8(6): 561–565.
[28] 雍石泉. 3种红树植物幼苗对低温胁迫和互花米草水浸液化感作用的响应[D]. 福州: 福建师范大学, 2012.
[29] Allakhverdiev S I, Kreslavski V D, Klimov V V, et al. Heat stress: an overview of molecular responses in photosynthesis[J]. Photosynthesis Research, 2008, 98(1): 541–550.
[30] Rochaix J D. Regulation and dynamics of the light-harvesting system[J]. Annual Review of Plant Biology, 2014, 65: 287–309.
[31] Long S, Humphries S, Falkowski P G. Photoinhibition of photosynthesis in nature[J]. Annual Review of Plant Biology, 1994, 45(1): 633–662.
[32] Duke N C, Kovacs J M, Griffiths A D, et al. Large-scale dieback of mangroves in Australia′s Gulf of Carpentaria: a severe ecosystem response, coincidental with an unusually extreme weather event[J]. Marine & Freshwater Research, 2017, 68(10): 1816–1829.
[33] Pernetta J C. Mangroves forests, climate change and sea level rise: hydrological influences on community structure and survival, with examples form the Indo-West Pacific[M]. Gland, Switzerland: IUCN, 1993.
[34] 张小燕, Alison Kim Shan Wee, Tadashi Kajita, 等. 两种红树植物不同种源幼苗对模拟高温热浪的光合生理响应差异[J]. 植物科学学报, 2021, 39(4): 424–432.
[35] Kalisz A, Jezdinský A, Pokluda R, et al. Impacts of chilling on photosynthesis and chlorophyll pigment content in juvenile basil cultivars[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2016, 57(4): 330–339.
[36] 呼和牧仁, 周梅, 翟洪波, 等. 影响树木光合作用因素的研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 287–291.
[37] 杨盛昌, 林鹏, 中须贺常雄. 5℃夜间低温对红树幼苗光合速率和蒸腾速率的影响[J]. 植物研究, 2001, 21(4): 587–591.
[38] 宋雪梅, 谢寅峰, 魏晓东, 等. 光氧化对不同超级粳稻品种光合特性的影响[J]. 云南农业大学学报, 2023, 38(9): 746–754.
[39] 尹鹏龙, 王祖光, 李爽, 等. 干旱胁迫对苹果不同中间砧及其上嫁接品种光合特性和抗氧化酶活性的影响[J]. 云南农业大学学报, 2023, 38(1): 104–111.
[40] Campos P S, Quartin V N, Ramalho J C, et al. Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of *Coffea* sp. plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(3): 283–292.
[41] 柯世省, 金则新, 李钧敏. 浙江天台山茶树光合日变化及光响应[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(2): 159–164.
[42] 胡娜, 陈思, 侯世星, 等. 华北地区4个品种樱花温度抗逆性研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(3): 116–122.
[43] 廖振锋, 刘寒, 沈瑗瑗, 等. 逆境胁迫下药用植物抗氧化酶系统响应研究进展[J/OL]. 分子植物育种, 1–18[2026–01–23]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230613.1233.006.

# Study on Physiological Properties of *Avicennia marina* Seedlings with Different Age in High Salinity Island Mudflat Near Xiamen

WU Yifan[1], AI Yao[1], SUN Fang[2], DONG Hongyu[2], LI Hongbin[2], HUANG Lin[3], ZHANG Li[3], LIANG Fengshou[3], DING Zhenhua[1,*]

(1.College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen Fujian 361102, China; 2. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., 6th Engineering Co., Ltd., Xiamen Fujian 361006, China; 3. CCCC Second Harbor Consulants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

**Abstract:** With the reduction of suitable mudflat for afforestation, island mudflats with strong waves and high salinity are becoming alternative sites for mangrove ecological restoration. The selection of appropriate seedlings is the crucial for the success of afforestation efforts. To provide a scientific reference for future ecological restoration of mangroves in similar island mudflat environments, a field planting experiment was conducted on a non- residential island, and physiological and biochemical parameters of *Avicennia marina* (*A. marina*) were measured in this study. The conclusions drawn are as follows: (1) The survival rate of two-year-old seedlings is the highest among three different ages of *A. marina* seedlings. The survival rates are 54% for one-year seedlings (Am1), 80% for two-year seedlings (Am2), and 44% for three-year seedlings (Am3). (2) Am2 and Am3 have completed their life cycle. One-year seedlings exhibit the most prominent in height increment (△H) and basal diameter increment (△D), with height increment following the order Am1>Am2>Am3 and base diameter increment following the order Am3>Am2>Am1. (3) No significant trends were observed in the chlorophyll content, photosynthetic parameters, and antioxidant enzymes levels of *A. marina* seedlings across different ages. (4) The △H and △D of *A. marina* are significantly positively correlated with salinity and monthly evaporation. Except for one-year-old seedlings, the △H and △D of two-year-old and three-year-old *A. marina* seedlings were significantly negatively correlated with MDA. No significant correlations were found between chlorophyll content and photosynthetic factors.

**Keywords:** mangrove; *Avicennia marina*; survival rate; physiological and biochemical characteristics; Xiamen; island