

◆研究类◆

红树林人工幼林与天然成熟林叶经济谱的区别和联系*

盘远方^{1,2}, 邱广龙^{1,2}, 苏治南^{1,2}, 邱思婷^{1,2}, 潘良浩^{1,2}, 范航清^{1,2**}

(1. 广西科学院, 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:为揭示红树林人工幼林与天然成熟林叶经济谱的区别及关联, 加深理解红树林人工幼林与天然成熟林对环境的适应机制。本研究以人工造林满1年的红树林人工幼林[木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、秋茄(*Kandelia obovata*)和白骨壤(*Avicennia marina*)]和天然成熟林(桐花树和秋茄)为研究对象, 通过对人工幼林和天然成熟林叶功能性状[叶干物质含量(Leaf Dry Matter Content, LDMC)、比叶面积(Specific Leaf Area, SLA)、叶组织密度(Leaf Tissue Density, LTD)、叶厚度(Leaf Thickness, LT)、叶面积(Leaf Area, LA)和叶体积(Leaf Volume, LV)]的测定, 分析人工幼林和天然成熟林不同叶功能性状的差异和关联情况。结果表明:(1)除LV外, 其余叶功能性状在人工幼林和天然成熟林间均存在显著差异($P < 0.05$)。其中, LDMC、SLA、LTD和LA为天然成熟林显著大于人工幼林, 而LT则相反。(2)在人工幼林中仅有LV与LT、LA呈显著正相关, 其他叶功能性状之间相关性不显著; 在天然林中, SLA与LDMC、LTD与SLA、LA呈显著负相关, 而LTD与LDMC、LV与LT、LA呈显著正相关。(3)人工幼林对红树林叶片所有性状进行投资, 而成熟天然林主要侧重对LDMC、LTD和SLA的投资。本研究结果有助于理解红树林人工幼林与天然成熟林在生态适应过程、生长策略和资源分配方面的差异, 为我国东南沿海红树林修复与造林工作提供了科学依据。

关键词:红树林; 人工幼林; 天然林; 叶功能性状; 主成分分析

中图分类号: Q945.79 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2024)03-0241-07

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20241108.003

红树林被誉为“海上森林”, 是热带、亚热带潮间带一种特殊的木本植物群落, 处于海陆交错带敏感地带的红树林对海岸地区防风消浪、生物多样性保护、

促淤造陆、净化水体和科学研究等具有特殊的意义^[1-3]。20世纪60年代, 由于城市建设和经济发展需求, 沿海城市大量兴建码头、围海造田和围塘养殖

收稿日期: 2024-03-02

修回日期: 2024-04-25

*“G228 丹东至东兴广西滨海公路大风江大桥红树林恢复”项目(2021G228-0953)资助。

【第一作者简介】

盘远方(1994—), 男, 研究实习员, 主要从事红树林和海草生态学研究, E-mail: yuanfangpan124@163.com。

【**通信作者简介】

范航清(1964—), 男, 研究员, 主要从事红树林保护修复与可持续利用研究, E-mail: fanhq666@126.com。

【引用本文】

盘远方, 邱广龙, 苏治南, 等. 红树林人工幼林与天然成熟林叶经济谱的区别和联系[J]. 广西科学院学报, 2024, 40(3): 241-247.

PAN Y F, QIU G L, SU Z N, et al. Differences and Connections of Leaf Economic Spectrum between Mangrove Sapling Plantation and Natural Mature Forest [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2024, 40(3): 241-247.

等不合理的开发利用导致我国大面积的红树林天然林遭到严重破坏和退化,我国沿海红树林面积从4万平方公里锐减至1.4万平方公里^[4]。从红树林资源日益减少的现状以及沿海防护林体系建设的需求出发,红树林修复工作在国内外受到广泛重视,然而天然红树林远远不能满足生态修复需求,造林工作势在必行。近年来,我国沿海各省陆续进行大面积的红树林造林工作,取得了很大成效,但面临的成活率低和结构单一问题依然没有得到改善。据统计,我国红树林造林成活率普遍较低,一般为20%—30%,甚至很多地方造林成活率为0^[5-6]。

由于未达到稳定状态且株高较矮,与成熟林相比,红树林人工幼林受潮汐浸淹时间更长。研究表明,绝大多数植物地上器官对淹水敏感,浸淹状态下植株体内的气体扩散速率、光合速率会显著降低,养分运输等受到严重阻碍;另外,红树林幼苗在浸淹时处于低光和缺氧状态,而解除浸淹后叶片再次暴露在空气中,在短时间内会产生氧化胁迫导致脱水现象^[7,8]。因此推测红树林人工幼林与天然成熟林在叶片形态和生理结构上存在差异,并对叶经济谱(Leaf economics spectrum)产生不同的选择。叶经济谱总结并量化了植物叶片性状的变化规律及相互关联情况,是植物根据生境条件对自身资源进行配置、补偿和平衡从而减轻环境对其消极影响的表现^[9]。同种植物在不同发育阶段或不同环境中的叶经济谱可能完全不同,主要分为叶寿命长、资源利用成本高、氮含量低、光合速率低的缓慢生长型物种和叶寿命短、资源利用成本低、氮含量高、光合速率高的快速生长型物种两种^[9-11]。国内外大部分生态系统已开展植物叶经济谱研究,如中国青藏高原植物^[12]、中国三峡消落带植物^[13]、中国主要森林树种^[14]、欧洲山地植物^[15]、亚北极植物^[16]等研究均证实了叶经济谱的普遍性。但国内关于红树林植物叶经济谱的研究十分缺乏,尤其是缺少红树林人工林或人工林-天然林生态系统的案例。

目前,针对红树林叶功能性状的研究主要集中于共同适应特征的描述^[17-20],而关于人工林和天然林叶功能性状的对比研究较少。不同发育阶段的红树林在枝叶数量、根系发达情况、林分树冠郁闭度、植株高度和森林环境稳定等方面均有所差异,因此人工幼林与天然成熟林叶片的形态和结构也不同。而开展红树林人工幼林与天然林叶经济谱研究,对深入理解红树林人工幼林定植机制具有重要意义。因此,本研究

以人工造林满1年的人工幼林[木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、秋茄(*Kandelia obovata*)、白骨壤(*Avicennia marina*)]和天然成熟林(桐花树、秋茄)为研究对象,分析人工幼林和天然成熟林叶功能性状[叶干物质含量(Leaf Dry Matter Content, LDMC)、比叶面积(Specific Leaf Area, SLA)、叶组织密度(Leaf Tissue Density, LTD)、叶厚度(Leaf Thickness, LT)、叶面积(Leaf Area, LA)和叶体积(Leaf Volume, LV)]之间的差异和关联,旨在揭示红树林在人工幼林阶段与天然成熟林阶段叶片性状上的异同,对深入理解人工幼林与天然成熟林的生态适应过程、生长策略及资源分配模式具有重要意义,同时也为红树林的恢复和保护、红树林造林成活率的提高提供一定的理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于广西壮族自治区北海市合浦县城西北部的西场镇安乐村(108°59′23.70″—108°59′29.11″E, 21°36′03.23″—21°36′09.81″N)。研究区东临沙岗镇,南临北部湾、与北海市区隔海相望,西至大风江。该区域属于亚热带季风型海洋性气候区,日照强烈,雨量充沛,年均降水量1670 mm,降雨主要集中在6—8月,年均蒸发量为1400 mm,年均温度为22.9℃。该区域潮汐类型为全日潮,年均潮差为2.24—2.77 m。气候受季风环流控制,盛行风向有明显的季节性转换,每年晚春至初秋有昼夜交替的海陆风出现。

人工幼林位于国道G228丹东至东兴广西滨海公路大风江大桥红树林保护与修复工程——北海红树林修复区内,于2021年8—10月完成造林,造林面积为40亩(1亩≈666.67 m²)。主要造林树种有木榄、桐花树、秋茄和白骨壤,均为2年生幼苗。其中,木榄和秋茄的造林间距为1.0 m×1.0 m,桐花树和白骨壤为0.5 m×1.0 m。天然成熟林为距离人工林东边2 km处的成熟红树林(树龄约为30年),天然成熟林树种有桐花树和秋茄。根据野外水位器(Onset Computer Corp., Bourne, MA, USA)记录的数据,发现人工幼林内淹水时间为(5.9±1.4) h,淹水(没顶)深度为(1.0±0.4) m;而天然成熟林内淹水时间为(5.9±1.3) h,但是天然成熟林平均树高在2.6 m左右,因此最高潮位未没过树顶。

1.2 样地设置与样品取样

2022年10月,根据造林树种的分布,在人工幼林内设置17个样方(木榄、桐花树和秋茄分别为4个样方,白骨壤为5个样方),在天然成熟林内设置4个样方,样方大小为5.0 m×5.0 m,共计21个样方。物种个体水平的叶功能性状样品取样方法如下:对每个5.0 m×5.0 m样方内的所有植株进行个体采样,选取并采集每个植株个体接近冠层顶部10—15片完全展开、健康、成熟、无病虫害的叶片,放入自封袋内并贴好标签,置于便携式冷藏箱内储存,随后带回实验室进行叶功能性状测定。测定LDMC($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、SLA($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)、LTD($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、LT(mm)、LA(cm^2)和LV(cm^3)等6个功能性状。

1.3 叶功能性状的测定

测定前先用吸水纸去除叶片表面的水分、污泥和盐分等,再去除叶柄。随后用便携式叶面积仪(Yaxin-1241,北京雅欣理仪科技有限公司)扫描每片叶片的LA。接着用精度为0.01 mm的电子数显卡尺测量LT,测量时沿主脉方向尽量避开主脉和二级脉均匀选取上、中、下3个点,此3个点的均值为该叶片的LT。最后用电子分析天平(精度0.000 1 g)称量叶

片鲜重后,将叶片样品放入对应编号的信封内置于80℃烘箱中烘干至恒重,称量并记录叶片干重。其中,叶干物质含量(LDMC)=叶干重(g)/叶鲜重(g)、比叶面积(SLA)=叶面积(cm^2)/叶干重(g)、叶组织密度(LTD)=叶干重(g)/叶体积(cm^3)、叶体积(LV)=叶面积(cm^2)×叶厚度(cm)。

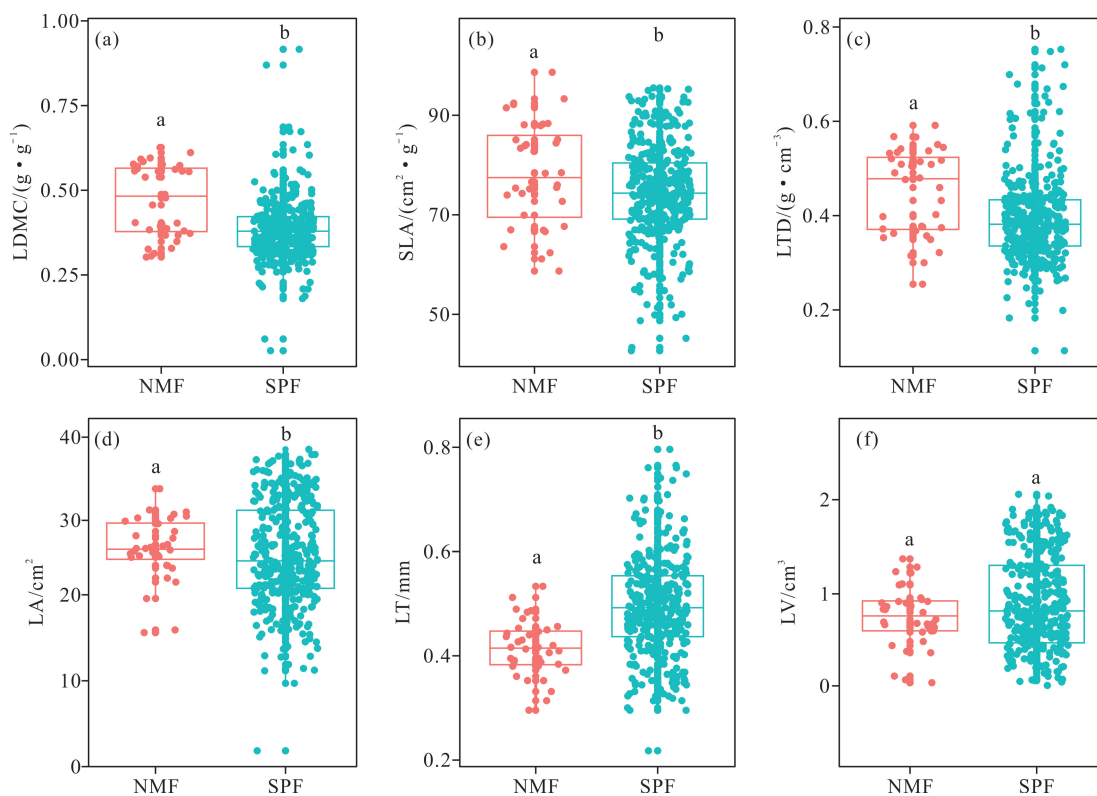
1.4 统计分析

在数据处理前,首先对所有数据进行Shapiro-Wilk函数正态分布检验,对不满足正态分布的数据进行对数转化。采用Wilcoxon符号秩检验方法对人工幼林和天然成熟林的叶功能性状进行差异性检验。为了区分人工幼林与天然成熟林功能性状之间相关性的差异,采用Pearson相关分析对人工幼林和天然成熟林的叶功能性状进行分析,显著性采用Student's *t* 检验。采用主成分分析(PCA)方法研究人工幼林与天然成熟林对叶片的投资策略。上述所有统计分析与制图均在R 4.2.0软件中完成。

2 结果与分析

2.1 人工幼林与天然成熟林叶经济谱的区别

Wilcoxon符号秩检验结果(图1)表明,成熟天然



NMF: natural mature forest; SPF: sapling plantation forest; different lowercase letters indicate significant differences.

图1 红树林人工幼林和天然成熟林叶功能性状的比较

Fig. 1 Comparison of leaf functional traits between mangrove sapling plantation and natural mature forest

林叶片的 LDMC、SLA、LTD 和 LA 显著大于人工幼林 ($P < 0.05$), 人工幼林的 LT 显著大于天然成熟林 ($P < 0.05$), 而人工幼林与天然成熟林的 LV 差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.2 人工幼林与天然成熟林叶经济谱的关联

Pearson 相关分析结果表明, 在人工幼林中, LV 与 LT、LA 呈显著正相关; 其余叶功能性状之间的相关性不显著 [图 2(a)]。在天然成熟林中, SLA 与 LDMC、LTD 与 SLA、LA 呈显著负相关; 而 LTD 与

LDMC、LV 与 LT、LA 呈显著正相关; 其余叶功能性状之间的相关性不显著 [图 2(b)]。

人工幼林叶功能性状负相关关系为 11 对、正相关关系为 4 对, 而天然成熟林叶功能性状负相关关系的对数为 9 对、正相关关系的对数为 6 对。尽管人工幼林叶功能性状之间负相关关系的对数较多, 但其相关性较弱, 且在 4 对正相关关系中有 2 对为显著正相关。总体来说, 人工幼林以正相关关系为主, 而天然成熟林叶功能性状之间主要以负相关关系为主。

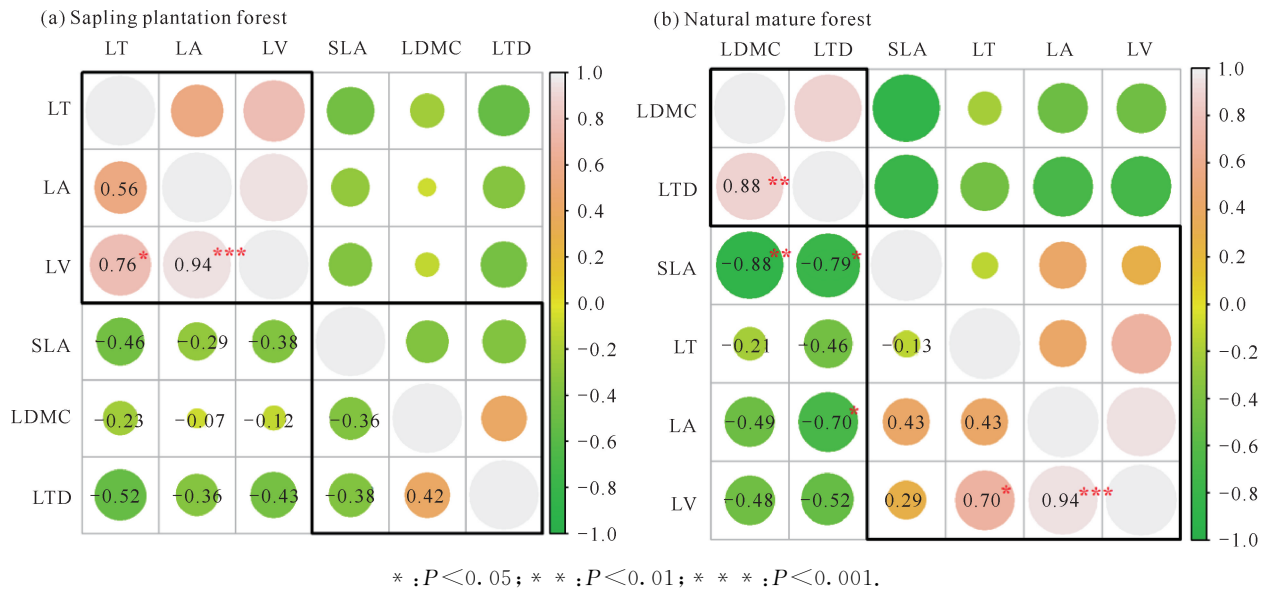


图2 人工幼林与天然成熟林叶功能性状关联

Fig. 2 Correlation between leaf functional traits of mangrove sapling plantation and natural mature forest

2.3 人工幼林与天然成熟林叶经济谱的主成分分析

主成分分析结果表明, 人工幼林对红树林叶片所有性状进行投资, 而天然成熟林主要侧重对 LDMC、LTD 和 SLA 的投资 [图 3(a)]。表明人工幼林尚不稳定, 为了在光合竞争中获取更大的优势, 将更多的光合产物较均衡投资于各性状当中。前 2 个 PCA 轴的累计方差解释率为 79.3% [图 3(b)]。其中, 人工幼林的 LA、LT 和 LV 对前 2 个主成分贡献较高; 而天然成熟林的 LDMC、LTD 和 SLA 对前 2 个主成分贡献较高。

3 讨论

3.1 人工幼林与天然成熟林叶经济谱的差异分析

叶片是植物光合固碳的主要场所, 也是初级生产者将自然的能量进行转换和利用的纽带^[21]。植物 SLA 主要反映植物对碳的获取与利用的平衡关系, 植物相对生长速率和资源利用的紧密关系, 而 LDMC 表征叶片在自然状态下的含水率状况, 主要反映

植物对养分的保有能力^[22,23]。本研究发现天然成熟林的 LDMC、SLA、LTD 和 LA 均比人工幼林高 (图 1), 表明天然成熟林在资源获取、利用效率及养分保存上相对于人工幼林具有更大的优势, 这在主成分分析中也得到了很好的印证——天然成熟林主要注重对植物 LDMC、SLA 和 LTD 的投资 (图 3)。这可能与天然成熟林发育较成熟, 其林木郁闭度较高、根系发达、养分获取能力强、林木环境稳定有关^[24,25]。有研究表明, 幼林处于生长旺盛阶段, 光合产物主要投资于株高和胸径的增加, 以提高植物在群落中的竞争能力, 但人工幼林植株矮小, 根系尚未完全发育; 而对于成熟林来说, 其有较多的叶片, 具有更大的光合作能力和固碳能力, 但收益可能小于损失, 因为成树具有一定的稳定性和竞争力, 不需要大量光合产物投资于株高和胸径的增加, 而是更多投资在叶片数量和面积的增加上^[26], 所以天然成熟林的 LDMC、SLA、LTD 和 LA 高于人工幼林。另外, 植物从幼年期向成年期转化时, 其 LA、叶片形状、叶生物量和 LT 等都会发

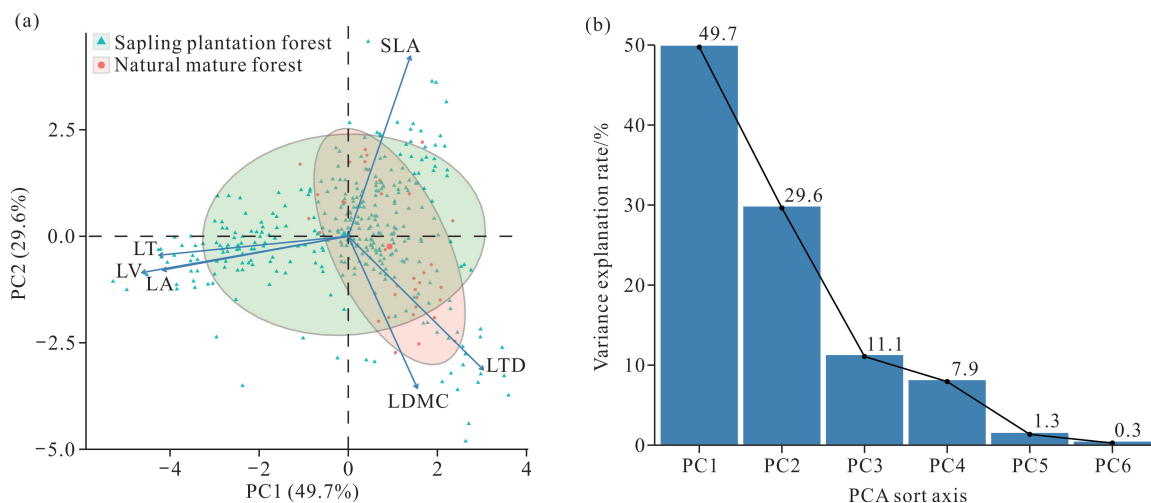


图3 人工幼林叶与天然成熟林经济谱的主成分分析

Fig. 3 PCA of the leaf economics spectrum of mangrove sapling plantation and natural mature forest

生明显的变化。如 Fernández-Ocaña 等^[27]对 不同时期油橄榄 (*Canarium oleosum*) 叶片形态的研究发现, 幼年时期油橄榄叶片比成年时期叶片小和圆, 且枝条上被催化的芽数量比成年树多。人工幼林的 LT 显著大于天然林 (图 1), 表明人工幼林整体较矮小、枝条和叶片数量较少, 其通过增加叶片厚度以增加水分从植物叶片内向叶片表面扩散的距离和阻力, 从而降低植物叶片蒸腾速率, 提高植物的保水率和存活率^[28,29]。另外, 人工幼林的林冠层尚未郁闭, 除涨潮和夜晚外, 人工幼林在 5—10 月 (广西) 基本处于高温和太阳暴晒下, 植物往往通过减少 LA 和增加 LT 来适应高温与强光条件, 从而减少因叶片蒸腾作用而导致的水分散失, 避免木质部发生栓塞, 有效地维持体内水分平衡^[7,8,11]。所以红树林人工幼林采用较大的 LT 以及较低的 LDMC、SLA、LA 和 LTD 来适应当前的造林环境。

3.2 人工幼林与天然成熟林叶经济谱的关联分析

植物在长期适应环境的过程中, 各功能性状并不是独立发挥作用, 而是通过内部不同功能之间的调整 and 平衡, 形成一系列适应环境的性状组合^[30]。这种组合或权衡在不同群落间、群落内乃至功能群内的种内与种间的植物功能性状表现中普遍存在。SLA 和 LTD 作为植物资源分配利用的重要指标, 均能够反映植物对环境的水分利用策略^[21,22]。通常认为, 植物 SLA 与 LTD 或 LDMC 呈负相关, 即植物叶片 SLA 增大时, LTD 或 LDMC 则会变小。本研究发现, 在人工幼林和天然成熟林中 SLA 均与 LTD、LDMC 呈负相关 (图 2), 原因可能是红树林生长于潮间带滩涂上, 而滩涂长期受到潮汐浸泡加之海水盐度较

高等, 造成红树林植物体内产生生理干旱等现象, 使得植物将更多的光合产物投资于叶片防御上以增加 LTD 和 LDMC^[30,31], 从而提高红树林植物对水分的利用效率以及碳同化能力。无论在人工幼林还是天然成熟林中, LV 与 LT、LA 均呈显著正相关 (图 2)。这与红树林本身特有的生物学特性以及红树林生长的特殊环境有关^[8,17-19]。冷冰等^[32]认为, 尽管红树林生境水资源丰富, 但是环境中的盐分会限制根系从环境中获得水分和营养, 导致红树林实际处于干旱胁迫。在干旱胁迫条件下部分红树林种类存在叶片吸水、树体储水、夜间补水和水分再分配的现象, 如白骨壤可以通过叶片盐腺吸收液态水并储存水分, 另外, 白骨壤叶片还能通过反向蒸腾吸收空气中的水分^[33]。所以秋茄、木榄以及白骨壤等红树植物通常会进化出较肥厚的叶片, 即 LV 和 LT 较大。一方面, LT 的增加有助于减少红树林植物叶片的蒸腾速率, 提高水分利用效率; 另一方面, LV 的增加有助于红树林植物在叶片上储存更多的水分, 以便在夜间将水分分配至缺水的器官中, 从而适应特殊的生存环境^[18,22]。

4 结论

通过对红树林人工幼林和天然成熟林叶经济谱的差异和关联性分析, 发现天然成熟林的 LDMC、SLA、LTD 和 LA 普遍高于人工幼林, 表明天然成熟林具有较高的养分吸收、利用以及保存能力; 尽管幼林通常处于生长旺盛时期, 但是由于人工幼林种植时间较短、植株尚未定植成功、根系尚未发达, 加之分枝和叶片数量较少, 所以其生长速率远不如天然成熟

林。在红树林叶功能性状的关联分析中,天然成熟林叶功能性状之间显著正相关和显著负相关关系的对数相同,而人工幼林叶功能性状之间主要表现为显著正相关,表明天然成熟林林冠层郁闭度较高,林分密度处于过饱和状态以及养分等资源有限,在资源有限的环境下,不同树种之间或同种树种内对光照、养分资源竞争存在差异。

参考文献

- [1] TOMLINSON P B. The botany of mangroves [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [2] 王文卿,王瑁. 中国红树林[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [3] 陈鹭真,王文卿,林鹏. 潮汐淹水时间对秋茄幼苗生长的影响[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 141-147.
- [4] 范航清,王文卿. 中国红树林保育的若干重要问题[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(3): 323-330.
- [5] 廖宝文,郑德璋,郑松发,等. 我国华南沿海红树林造林现状及其展望[J]. 防护林科技, 1996(4): 30-34.
- [6] 王文卿,赵萌莉,邓传远,等. 福建沿岸地区红树林的种类与分布[J]. 台湾海峡, 2000, 19(4): 534-540.
- [7] 黄贝佳,朱静,何晨阳,等. 潮汐对秋茄叶表型塑造及叶经济谱的影响[J]. 林业科学, 2021, 57(4): 63-72.
- [8] YEUNG E, VAN VEEN H, VASHISHT D, et al. A stress recovery signaling network for enhanced flooding tolerance in *Arabidopsis thaliana* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(26): E6085-E6094.
- [9] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. Nature, 2004, 428: 821-827.
- [10] REICH P B, WALTERS M B, ELLSWORTH D S. From tropics to tundra: global convergence in plant functioning [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(25): 13730-13734.
- [11] READ Q D, MOORHEAD L C, SWENSON N G, et al. Convergent effects of elevation on functional leaf traits within and among species [J]. Functional Ecology, 2014, 28(1): 37-45.
- [12] 马建静,吉成均,韩梅,等. 青藏高原高寒草地和内蒙古高原温带草地主要双子叶植物叶片解剖特征的比较研究[J]. 中国科学:生命科学, 2012, 42(2): 158-172.
- [13] 揭胜麟,樊大勇,谢宗强,等. 三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1723-1733.
- [14] 姬明飞. 中国主要森林树种功能性状变化规律以及驱动力的研究[D]. 兰州:兰州大学, 2011.
- [15] GRIGULIS K, LAVOREL S, KRAINER U, et al. Relative contributions of plant traits and soil microbial properties to mountain grassland ecosystem services [J]. Journal of Ecology, 2013, 101(1): 47-57.
- [16] FRESCHET G T, CORNELISSEN J H C, VAN LOGTESTIJN R S P, et al. Evidence of the 'plant economics spectrum' in a subarctic flora [J]. Journal of Ecology, 2010, 98(2): 362-373.
- [17] 张晓婷,王俊杰. 红树植物功能性状对盐和铜胁迫的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(3): 1284-1297.
- [18] 王萌,孙争争,何志东,等. 基于无人机高光谱遥感的淇澳岛红树林冠层叶片功能性状反演[J]. 热带地理, 2023, 43(11): 2146-2154.
- [19] 武锋. 广东省红树植物多样性及主要树种叶功能性状研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2020.
- [20] 张珊. 养殖污染影响下秋茄功能性状及红树群落功能多样性变化规律[D]. 厦门:厦门大学, 2020.
- [21] DONOVAN L A, MAHERALI H, CARUSO C M, et al. The evolution of the worldwide leaf economics spectrum [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2011, 26(2): 88-95.
- [22] WESTOBY M. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme [J]. Plant Soil, 1998, 199(2): 213-227.
- [23] 宝乐,刘艳红. 东灵山地区不同森林群落叶功能性状比较[J]. 生态学报, 2009, 27(7): 3692-3703.
- [24] LAIHO R, PRESCOTT C E. Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in northern coniferous forests: a synthesis [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(4): 763-777.
- [25] HARMON M E, SEXTON J. Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems [M]. Seattle, WA: LTER Network Office, University of Washington, 1996.
- [26] LIU M D, NIKLAS K J, NIINEMETS Ü, et al. Comparison of the scaling relationships of leaf biomass versus surface area between spring and summer for two deciduous tree species [J]. Forests, 2020, 11(9): 1010.
- [27] FERNÁNDEZ-OCAÑA A, GARCÍA-LÓPEZ M C, JIMÉNEZ-RUIZ J, et al. Identification of a gene involved in the juvenile-to-adult transition (JAT) in cultivated olive trees [J]. Tree Genetics & Genomes, 2010, 6(6): 891-903.
- [28] GONZALEZ-PALEO L, RAVETTA D A. Relationship between photosynthetic rate, water use and leaf structure in desert annual and perennial forbs differing in their growth [J]. Photosynthetica, 2018, 56(4): 1177-1187.
- [29] 于文英,高燕,逢玉娟,等. 山东银莲花叶片形态结构对异质生境和海拔变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4413-4420.

- [30] 施宇,温仲明,龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6805-6814.
- [31] 郭茹,温仲明,王红霞,等. 延河流域植物叶性状间关系及其在不同植被带的表达[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3627-3633.
- [32] 冷冰,曹坤芳. 红树植物水分关系研究进展[J]. 植物科学学报, 2020, 38(4): 574-584.
- [33] NGUYEN H T, MEIR P, SACK L, et al. Leaf water storage increases with salinity and aridity in the mangrove *Avicennia marina*: integration of leaf structure, osmotic adjustment and access to multiple water sources [J]. Plant Cell and Environment, 2017, 40(8): 1576-1591.

Differences and Connections of Leaf Economic Spectrum between Mangrove Sapling Plantation and Natural Mature Forest

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

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

Abstract: Revealing the difference and correlation of leaf economic spectrum between mangrove sapling plantation and natural mature forest can deepen the understanding of the adaptation mechanism of mangrove sapling plantation and natural mature forest to the environment. In this study, mangrove sapling plantation (*Bruguiera gymnorhiza*, *Aegiceras corniculatum*, *Kandelia obovata* and *Avicennia marina*) with one year of artificial afforestation and natural mature forests (*Aegiceras corniculatum* and *Kandelia obovata*) were studied. The leaf functional traits [Leaf Dry Matter Content (LDMC), Specific Leaf Area (SLA), Leaf Tissue Density (LTD), Leaf Thickness (LT), Leaf Area (LA) and Leaf Volume (LV)] of sapling plantation and natural mature forest were measured. The differences and correlations of different leaf functional traits between sapling plantation and natural mature forest were analyzed. The results showed that: (1) Except for LV, the other leaf functional traits were significantly different between sapling plantation and natural mature forest ($P < 0.05$). Among them, LDMC, SLA, LTD and LA in natural mature forests were significantly larger than those in sapling plantation, while LT was the opposite. (2) In sapling plantation, only LV was significantly positively correlated with LT and LA, and the correlation between other leaf functional traits was not significant. In natural forests, SLA was negatively correlated with LDMC, LTD was negatively correlated with SLA and LA, while LTD was positively correlated with LDMC, LV was positively correlated with LT and LA. (3) Sapling plantation invested in all traits of mangrove leaf, while mature natural forests mainly focused on the investment in LDMC, LTD and SLA. The results of this study are helpful to understand the differences in ecological adaptation process, growth strategy and resource allocation between mangrove sapling plantation and natural mature forest, and provide a scientific basis for mangrove restoration and afforestation in southeastern coastal areas of China.

Key words: mangrove; sapling plantation; natural mature forest; leaf functional traits; principal component analysis

责任编辑: 梁 晓