

广西茅尾海海域优势红树种群结构和动态变化特征

宁秋云^{a,b}, 赖廷和^{a,b}, 何斌源^{a,b,①}, 黄中坚^{a,b}, 朱婷^{a,b}, 张桂顺^{a,b}, 龙云宇^{a,b}, 马日宇^{a,b}

(广西壮族自治区海洋研究院: a. 自然资源部广西海洋检测中心, b. 广西壮族自治区海洋灾害应急中心, 广西 南宁 530022)

摘要: 为了解广西茅尾海海域红树林群落现状,对茅尾海海域红树种群存活状况进行实地调查,并对优势桐花树 [*Aegiceras corniculatum* (Linn.) Blanco] 和秋茄树 (*Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong) 种群的结构和动态变化特征进行了分析。结果表明:广西茅尾海海域 15 个样方内共有红树植物 10 240 株,其中,桐花树和秋茄树分别占红树植物个体总数的 96.2% 和 3.1%。桐花树种群和秋茄树种群幼苗资源丰富(个体数量分别占各自种群个体总数的 82.8% 和 61.6%),更新状态较为理想,整个种群结构较为稳定。2 种红树种群的种群动态指数(V_{pi})和随机干扰动态指数(V_{pi}')均大于 0,对外界环境较为敏感。2 种红树种群存活曲线均为 Deevey-II 型。2 种红树种群的累积死亡率函数值总体随着径级的增大而增大,死亡密度函数值和危险率函数值总体随着径级的增大呈波动降低趋势。在经过未来 2、4、6、8 个径级时间后,2 种红树种群幼苗能够不同程度地补充较大径级的个体,均属于增长型种群。综上所述,现阶段红树种群能很好地适应茅尾海海域环境,桐花树种群稳定性高于秋茄树种群,前者抵抗自然风险的能力高于后者,应持续加强红树林生态系统的保护与修复工作。

关键词: 红树种群; 静态生命表; 种群动态; 时间序列; 茅尾海

中图分类号: Q948.15; S718.54 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)05-0090-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.05.09

Structure and dynamic variation characteristics of dominant mangrove populations in Maowei Sea area of Guangxi NING Qiuyun^{a,b}, LAI Tinghe^{a,b}, HE Binyuan^{a,b,①}, HUANG Zhongjian^{a,b}, ZHU Ting^{a,b}, ZHANG Guishun^{a,b}, LONG Yunyu^{a,b}, MA Riyu^{a,b} (Guangxi Academy of Oceanography: a. Guangxi Marine Testing Center, Ministry of Natural Resources, b. Guangxi Marine Disaster Emergency Center, Nanning 530022, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(5): 90-97

Abstract: To understand the current status of mangrove forest community in Maowei Sea area of Guangxi, a field survey was conducted on the survival status of mangrove populations in Maowei Sea area, and the structures and dynamic variation characteristics of the dominant populations of *Aegiceras corniculatum* (Linn.) Blanco and *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong were analyzed. The results show that there are a total of 10 240 mangrove individuals in 15 plots in Maowei Sea area of Guangxi, in which, *A. corniculatum* and *K. obovata* account for 96.2% and 3.1% of the total number of mangrove plants, respectively. The *A. corniculatum* population and *K. obovata* population are rich in seedling resources (individual numbers account for 82.8% and 61.6% of the total number of individuals in respective populations, respectively), the regeneration status is relatively ideal, and the overall population structure is relatively stable. The population dynamic index (V_{pi}) and random disturbance dynamic index (V_{pi}') of both mangrove populations are greater than zero, indicating that they are relatively sensitive to external environment. The survival curves of both mangrove populations belong to the Deevey-II type. The values of cumulative mortality rate function of both mangrove populations increases with the increase of diameter class in general, while the values of death density function and hazard rate function show a fluctuating decrease tendency with the increase of diameter class in general.

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42366009); 防城港核电厂红树林生态项目(4600021727); 广西重点研发计划项目(2022AB20070)

作者简介: 宁秋云(1988—),女,广西桂林人,硕士,高级工程师,主要从事红树林群落与海洋生态保护修复方面的研究。

①通信作者 E-mail: hebinyuan2008@126.com

引用格式: 宁秋云, 赖廷和, 何斌源, 等. 广西茅尾海海域优势红树种群结构和动态变化特征[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(5): 90-97.

After the next two, four, six, and eight diameter class time, seedlings of both mangrove populations will be able to replenish individuals of larger diameter classes to different degrees, and both populations belong to the growth type. In conclusion, the mangrove populations are well adapted to the environment of Maowei Sea area at present, the *A. corniculatum* population is more stable than the *K. obovata* population, the former has a higher ability to resist natural risks than the latter, and the protection and restoration work of the mangrove forest ecosystem should be continuously strengthened.

Key words: mangrove population; static life table; population dynamics; time sequence; Maowei Sea

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带,受周期性潮水浸淹的潮滩湿地木本植物群落^[1],是全球生物多样性保护、湿地保护和可持续利用的重要对象,支撑着热带、亚热带近海生物多样性和生态安全^[2]。红树林湿地在提升海洋碳汇增量、缓解全球变暖、降低风暴潮损失、提高海洋生产力、维持近海渔业和生物多样性、净化水体、调节区域气候等方面具有较高的生态和经济价值^[3]。

茅尾海位于广西南部,属于广西钦州湾内湾,是钦江、茅岭江两大河流的入海口,为广西红树林群落的重要分布区。随着广西西部陆海新通道建设的深入推进,平陆运河(广西综合性战略项目)将经茅尾海入海,运河开凿建设会造成地貌地质条件、物理性质和化学成分改变,进而影响生物生长,导致生态环境问题扩散化和复杂化。项目的施工和运营涉及到红树林这一生态敏感资源,因此,茅尾海海域红树种群受到的影响应引起高度重视。

种群结构动态分析是研究植物种群生态学的核心内容和基础科学问题^[4],通过种群龄级划分、静态生命表、数量动态分析、生存分析和时间序列预测等能够反映植物种群数量特征,有效评估种群对生存环境的适应性^[5-6],可为针对性地提出有效保护措施提供参考。目前,关于茅尾海海域红树林的研究多集中在生物量^[7]、根际土壤^[8]、遥感^[9]、重金属^[10]和生物多样性^[11]等方面,尚未有针对红树种群结构的相关报道。研究茅尾海海域优势红树种群数量动态变化特征,有助于了解该海域红树林群落结构,有效评估红树种群对生存环境的适应性。

鉴于此,本文以广西茅尾海海域红树林群落集中分布区为研究区域,依托海岸特征、红树种群分布特征与种群结构现状,对茅尾海海域红树种群存活状况进行实地调查,分析该海域优势红树种群结构和动态变化特征。以期为茅尾海海域红树种群的有效保护和红树林群落可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

茅尾海海域形似一个瓶状内湾,落潮流速大于涨潮流速。地貌特征主要有潮间浅滩、潮沟、河口沙坝、潮流冲刷深槽等。该地区属亚热带向热带过渡的海洋季风气候,多年平均气温 22.1 °C,季节平均水温在 13.47 °C ~ 30.21 °C 之间,水温年变化较为明显。茅尾海的红树林集中分布于顶部河口区、龙门和七十二泾,主要的红树种群包括桐花树 [*Aegiceria corniculatum* (Linn.) Blanco]、秋茄树 (*Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong)、老鼠簕 (*Acanthus ilicifolius* Linn.)、白骨壤 [*Avicennia marina* (Forssk.) Vierh.]、榄李 (*Lumnitzera racemosa* Willd.)、海漆 (*Excoecaria agallocha* Linn.)、卤蕨 (*Acrostichum aureum* Linn.)、木榄 [*Bruguiera gymnorhiza* (Linn.) Savigny]、红海榄 (*Rhizophora stylosa* Griff.)、无瓣海桑 (*Sonneratia apetala* Buch.-Ham.) 和海桑 [*Sonneratia caseolaris* (Linn.) Engl.]^[12]。茅尾海海域顶部分布着广西面积最大、由地方种与红树林组成的乔灌木-盐沼草本植物的独特湿地植物群落景观。

1.2 方法

1.2.1 样地设置与调查方法 于 2019 年 11 月,考虑平陆运河在茅尾海海域的影响范围,选择茅尾海海域内红树林群落集中分布区,沿海岸线设置 15 个面积 10 m×10 m 样方(表 1),开展典型野外红树林群落调查。调查每个样方内红树的种类、株数,并记录各样方的经纬度。使用卷尺(精度 1 mm)测量所有植株的株高(植株冠顶距地面的高度)、基周长(地面处植株基干的周长)、树冠投影的最长长度(l)及其垂直方向的树冠投影的最宽宽度(b),并计算冠幅(冠幅= $l \times b$)、平均密度(株数与样方面积的比值)、基径(基周长与 π 的比值)和重要值[重要值=(相对密度+相对频度+相对盖度)/3]^[13]。以优势种^[13]为代

表1 广西茅尾海海域红树种群各样方的基本情况
Table 1 Basic information of each plot of mangrove populations in Maowei Sea area of Guangxi

样方编号 No. of plot	经度 Longitude	纬度 Latitude	红树种群 ¹⁾ Mangrove population ¹⁾
1	E108°31'28"	N21°45'30"	AC, KO, AM
2	E108°29'35"	N21°51'28"	AC, SA
3	E108°29'42"	N21°51'28"	AC, KO, SA
4	E108°31'52"	N21°53'39"	AC, KO, SA
5	E108°32'01"	N21°53'36"	AC, KO, SA
6	E108°33'52"	N21°53'20"	AC
7	E108°34'05"	N21°53'12"	AC, KO, SA, AI
8	E108°35'11"	N21°51'28"	AC, KO
9	E108°35'13"	N21°51'32"	AC, KO
10	E108°35'07"	N21°51'31"	AC, KO
11	E108°37'38"	N21°53'10"	AC, KO
12	E108°34'43"	N21°48'15"	AC, KO
13	E108°34'43"	N21°48'06"	AC
14	E108°34'48"	N21°48'07"	AC
15	E108°35'10"	N21°44'34"	AC, KO, AM

¹⁾ AC: 桐花树 *Aegiceras corniculatum* (Linn.) Blanco; KO: 秋茄树 *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong; AM: 白骨壤 *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.; SA: 无瓣海桑 *Sonneratia apetala* Buch.-Ham.; AI: 老鼠簕 *Acanthus ilicifolius* Linn.

表进行红树种群结构和动态特征分析。

1.2.2 径级划分 采用径级代替龄级的方法^[14-15], 株高(h)小于1 m的植株根据株高进行分级, 株高大于或等于1 m的植株根据基径(BD)进行分级^[16]。共划分8个径级: I ($h < 0.5$ m)、II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m)、III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4 \text{ cm}$)、IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7 \text{ cm}$)、V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10 \text{ cm}$)、VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13 \text{ cm}$)、VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16 \text{ cm}$)和VIII ($\text{BD} \geq 16 \text{ cm}$)。对不同径级种群进行划分^[17], I级和II级为幼苗, III级和IV级为小树, V级和VI级为中树, VII级和VIII级为大树。

1.2.3 种群数量动态分析 根据调查数据, 参考文献[5, 18]中的方法, 利用红树种群的动态指数分析种群数量动态变化趋势。推导红树种群相邻径级间的动态指数(V_n), 对种群动态指数(V_{pi})、随机干扰动态指数(V_{pi}')、随机干扰风险概率(P_{\max})进行定量分析。

1.2.4 静态生命表及曲线绘制 根据研究区红树种群不同径级个体的分布特征, 编制静态生命表, 由于调查的红树种群是天然种群, 为避免出现死亡率为负数的情况, 匀滑处理茅尾海海域红树种群各径级个体数量^[19]。同时, 以径级为横坐标, 将标准存活数以10为底的对数值($\lg l_x$)、期间死亡率(q_x)、消失率(K_x)作为纵坐标分别绘制红树种群的存活曲线、死亡率曲

线和消失率曲线。

1.2.5 生存分析 以静态生命表为基础, 采用生存率函数[$S(i)$]、积累死亡率函数[$F(i)$]、死亡密度函数[$f(ti)$]和危险率函数[$\lambda(ti)$]分析红树种群的生存规律^[20]。

1.2.6 时间序列预测 根据红树种群各径级个体数量的调查数据, 采用时间序列分析法^[21]对红树种群经过未来2、4、6、8个径级时间后的各径级发展趋势进行预测。

1.3 数据处理

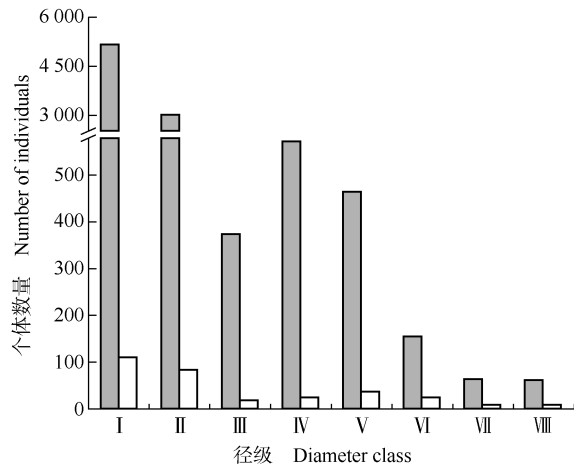
采用 EXCEL 2016 软件处理数据, 采用 Origin 2024 软件制图。

2 结果和分析

2.1 红树种群径级分布及结构特征

调查结果显示: 广西茅尾海海域 15 个样方内共有红树植物 10 240 株, 其中, 桐花树 9 849 株、秋茄树 320 株、无瓣海桑 34 株、老鼠簕 34 株、白骨壤 3 株。桐花树出现在 15 个样方中, 在各样方重要值的最大值、最小值和平均值分别为 100.0%、16.5% 和 55.5%; 秋茄树出现在 11 个样方中, 仅次于桐花树, 在各样方重要值的最大值、最小值和平均值分别为 50.8%、6.0% 和 31.3%。桐花树和秋茄树的重要值明显高于其他红树种类, 为茅尾海海域优势种。桐花树种群平均密度为 6.6 m^{-2} , 秋茄树种群平均密度为 0.2 m^{-2} 。

从径级结构(图1)看, 广西茅尾海海域桐花树的幼苗数量最多, I [株高(h) < 0.5 m] 级和 II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0 \text{ m}$) 级的个体数量共占种群个体总数的 82.8%; III [$1 \text{ cm} \leq \text{基径}(\text{BD}) < 4 \text{ cm}$] 级和 IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7 \text{ cm}$) 级的小树数量占种群个体总数的 9.6%; V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10 \text{ cm}$) 级和 VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13 \text{ cm}$) 级的中树数量占种群个体总数的 6.3%; VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16 \text{ cm}$) 级和 VIII ($\text{BD} \geq 16 \text{ cm}$) 级的大树数量占种群个体总数的 1.3%。秋茄树的幼苗数量最多, 占种群个体总数的 61.6%; 小树数量占种群个体总数的 13.4%; 中树数量占种群个体总数的 19.4%; 大树数量占种群个体总数的 5.6%。总体上看, 这 2 种红树种群在更新层(幼苗)最为丰富, 小树、中树数量较多, 大树数量较少。由于桐花树种群的幼苗数量明显高于秋茄树种群, 桐花树种群更新能力更强、更为稳定。



■: 桐花树 *Aegiceras corniculatum* (Linn.) Blanco; □: 秋茄树 *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong.

I: $h < 0.5$ m; II: $0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m; III: $1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4$ cm; IV: $4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7$ cm; V: $7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10$ cm; VI: $10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13$ cm; VII: $13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16$ cm; VIII: $\text{BD} \geq 16$ cm. h : 株高 Height; BD: 基径 Basal diameter.

图 1 广西茅尾海海域优势红树种群的径级结构
Fig. 1 Diameter class structure of dominant mangrove populations in Maowei Sea area of Guangxi

2.2 优势红树种群数量动态分析

结果(表 2)显示:广西茅尾海海域桐花树和秋茄树种群各相邻径级间的动态指数 (V_n) 波动幅度较大。桐花树种群除 III [$1 \text{ cm} \leq \text{基径}(\text{BD}) < 4 \text{ cm}$] 级到 IV [$4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7 \text{ cm}$] 级的 V_3 值外,其余动态指数均

表 2 广西茅尾海海域优势红树种群的动态指数¹⁾
Table 2 Dynamic indexes of dominant mangrove populations in Maowei Sea area of Guangxi¹⁾

种群 Population	动态指数/% Dynamic index							$V_{pi}'/\%$	$V_{pi}'/\%$	P_{\max}
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7			
桐花树 <i>Aegiceras corniculatum</i>	41.7	87.4	-34.1	18.5	66.7	58.7	4.7	53.0	0.3	0.005
秋茄树 <i>Kandelia obovata</i>	22.5	79.1	-28.0	-32.4	32.4	64.0	0.0	36.5	1.9	0.053

¹⁾ $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7$: 分别表示从 I ($h < 0.5$ m) 到 II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m)、II 到 III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4$ cm)、III 到 IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7$ cm)、IV 到 V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10$ cm)、V 到 VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13$ cm)、VI 到 VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16$ cm)、VII 到 VIII ($\text{BD} \geq 16$ cm) 径级的动态指数 Representing dynamic indexes of diameter classes from I ($h < 0.5$ m) to II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m), II to III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4$ cm), III to IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7$ cm), IV to V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10$ cm), V to VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13$ cm), VI to VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16$ cm), VII to VIII ($\text{BD} \geq 16$ cm), respectively. h : 株高 Height; BD: 基径 Basal diameter. V_{pi} : 种群动态指数 Population dynamic index; V_{pi}' : 随机干扰动态指数 Random disturbance dynamic index; P_{\max} : 随机干扰风险概率 Random disturbance risk probability.

从死亡率曲线(图 2-B)和消失率曲线(图 2-C)看,桐花树和秋茄树种群的死亡率曲线与消失率曲线的变化趋势存在较大差异。桐花树种群的期间死亡率和消失率均在 III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4$ cm) 级和 VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13$ cm) 级出现峰值,且在 III 级较大(分别为 0.70 和 1.22),在这 2 个径级内个体大量死亡,而 VII

大于 0,说明桐花树种群个体由 III 级向 IV 级过渡时受阻,出现较高的死亡率。秋茄树种群中, V_3 值以及 IV 级到 V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10$ cm) 级的 V_4 值均小于 0,说明该种群从 III 级到 IV 级以及 IV 级到 V 级过渡时受到阻碍,出现较高的死亡率;从 VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16$ cm) 级过渡到 VIII ($\text{BD} \geq 16$ cm) 级时达到稳定 (V_7 值为 0.0)。2 种红树种群的种群动态指数 (V_{pi}) 和随机干扰动态指数 (V_{pi}') 均大于 0,说明 2 种红树种群处于关键和敏感时期。2 种红树种群的随机干扰风险概率 (P_{\max}) 较小,且桐花树种群的随机干扰风险概率 (0.005) 低于秋茄树种群 (0.053),说明这 2 种红树种群对外界干扰较为敏感,且秋茄树种群更为敏感、更易受外界干扰。

2.3 优势红树种群的静态生命表及存活曲线、死亡率曲线和消失率曲线

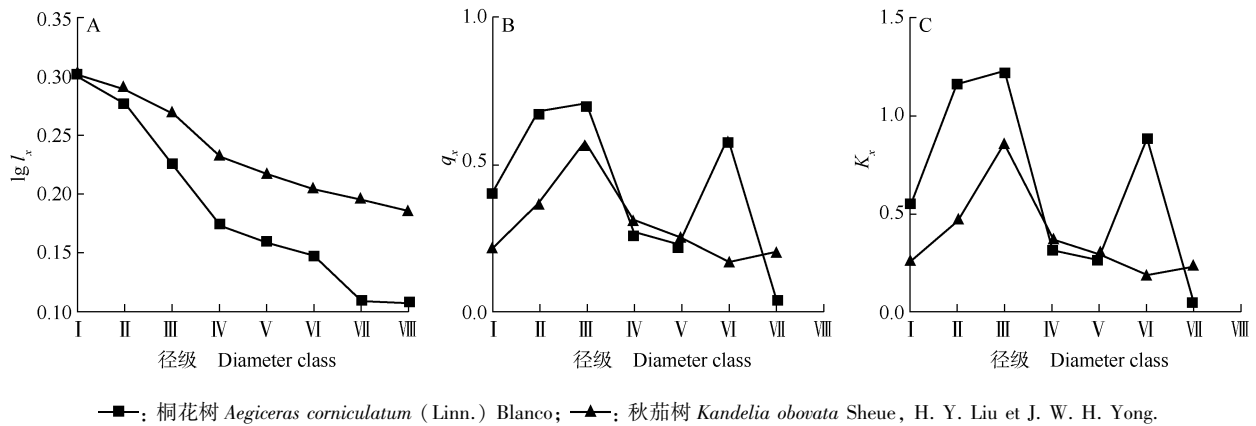
广西茅尾海海域优势红树种群的静态生命表见表 3。结果显示:广西茅尾海海域桐花树和秋茄树种群的标准存活数 (l_x) 随径级的增大而减少。期望寿命 (e_x) 均在 IV [$4 \text{ cm} < \text{基径}(\text{BD}) < 7 \text{ cm}$] 级达到最大值(分别为 2.24 和 2.50),其后随着径级的增大而减少,说明这 2 种红树种群在小树时期生存质量较高。按照存活曲线的类型 (Deevey - I 型为凸形线, Deevey - II 型为对角线, Deevey - III 型为凹形线)^[22],判断桐花树种群和秋茄树种群的存活曲线接近对角线型(图 2-A),属于 Deevey - II 型。

($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16$ cm) 级的期间死亡率和消失率急剧减小至接近 0 (均为 0.05)。秋茄树种群的期间死亡率和消失率均在 III 级出现峰值(分别为 0.57 和 0.85),在 VII 级的期间死亡率和消失率(分别为 0.20 和 0.22) 高于桐花树种群,说明秋茄树种群在大树阶段更快进入生理衰退期。

表3 广西茅尾海海域优势红树种群的静态生命表¹⁾
Table 3 Static life table of dominant mangrove populations in Maowei Sea area of Guangxi¹⁾

径级 Diameter class	a_x	a_x^*	l_x	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x
桐花树 <i>Aegiceras corniculatum</i>									
I ($h < 0.5$ m)	5 151	5 151	1 000	417	0.42	791	1 412	1.41	0.54
II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m)	3 003	3 003	583	401	0.69	382	621	1.06	1.17
III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4 \text{ cm}$)	377	936	182	128	0.70	118	238	1.31	1.22
IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7 \text{ cm}$)	572	277	54	15	0.27	46	120	2.24	0.32
V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10 \text{ cm}$)	466	202	39	9	0.23	35	74	1.89	0.26
VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13 \text{ cm}$)	155	155	30	18	0.59	21	39	1.31	0.88
VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16 \text{ cm}$)	64	64	12	1	0.05	12	18	1.45	0.05
VIII ($\text{BD} \geq 16 \text{ cm}$)	61	61	—	—	—	—	—	—	—
秋茄树 <i>Kandelia obovata</i>									
I ($h < 0.5$ m)	111	111	1 000	225	0.23	887	2 383	2.38	0.26
II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m)	86	86	775	288	0.37	631	1 495	1.93	0.47
III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4 \text{ cm}$)	18	54	486	279	0.57	347	865	1.78	0.85
IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7 \text{ cm}$)	25	23	207	63	0.30	176	518	2.50	0.36
V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10 \text{ cm}$)	37	16	144	36	0.25	126	342	2.38	0.29
VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13 \text{ cm}$)	25	12	108	18	0.17	99	216	2.00	0.18
VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16 \text{ cm}$)	9	10	90	18	0.20	81	117	1.30	0.22
VIII ($\text{BD} \geq 16 \text{ cm}$)	9	8	—	—	—	—	—	—	—

¹⁾ h : 株高 Height; BD: 基径 Basal diameter. a_x : 存活数 Survival number; a_x^* : 匀滑后存活数 Survival number after smoothing; l_x : 标准存活数 Standardized survival number; d_x : 期间标准死亡数 Interval standardized death number; q_x : 期间死亡率 Interval mortality rate; L_x : 期间标准存活数 Interval standardized survival number; T_x : 标准存活总数 Standardized total survival number; e_x : 期望寿命 Life expectancy; K_x : 消失率 Vanish rate. —: 数据无法计算 The data cannot be calculated.



l_x : 标准存活数 Standardized survival number; q_x : 期间死亡率 Interval mortality rate; K_x : 消失率 Vanish rate. I: $h < 0.5$ m; II: $0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m; III: $1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4 \text{ cm}$; IV: $4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7 \text{ cm}$; V: $7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10 \text{ cm}$; VI: $10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13 \text{ cm}$; VII: $13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16 \text{ cm}$; VIII: $\text{BD} \geq 16 \text{ cm}$. h : 株高 Height; BD: 基径 Basal diameter.

图2 广西茅尾海海域优势红树种群的存活曲线(A)、死亡率曲线(B)和消失率曲线(C)

Fig. 2 Curves of survival (A), mortality rate (B), and vanishing rate (C) of dominant mangrove populations in Maowei Sea area of Guangxi

2.4 优势红树种群生存分析

结果(表4)显示:广西茅尾海海域桐花树种群和秋茄树种群的生存率函数[$S(i)$]均在I[株高(h) < 0.5 m]级为最大值,明显大于其他径级,而后在II($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m)级急剧下降,秋茄树种群的 $S(i)$ 值波动幅度较大。桐花树种群的积累死亡率函数

[$F(i)$]从IV[$4 \text{ cm} < \text{BD}$ (基径) $< 7 \text{ cm}$]级开始增加至0.95以上,秋茄树种群的 $F(i)$ 值在VIII($\text{BD} \geq 16 \text{ cm}$)级前均未超过0.95,这与桐花树种群更新层(幼苗)个体数量更多有关。2种红树种群的死亡密度函数[$f(i)$]随着径级的增大总体递减,秋茄树种群的 $f(i)$ 值波动幅度大于桐花树种群,表明秋茄树种群

表 4 广西茅尾海海域优势红树种群的生存分析¹⁾
Table 4 Survival analysis on dominant mangrove populations in Maowei Sea area of Guangxi¹⁾

径级 Diameter class	$S(i)$	$F(i)$	$f(ti)$	$\lambda(ti)$
桐花树 <i>Aegiceras corniculatum</i>				
I ($h < 0.5$ m)	0.583	0.417	0.583	0.527
II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m)	0.182	0.818	0.401	1.050
III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4$ cm)	0.054	0.946	0.043	0.362
IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7$ cm)	0.039	0.961	0.005	0.104
V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10$ cm)	0.030	0.970	0.003	0.088
VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13$ cm)	0.012	0.988	0.006	0.277
VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16$ cm)	0.012	0.988	0.000	0.016
VIII ($\text{BD} \geq 16$ cm)	0.000	1.000	—	—
秋茄树 <i>Kandelia obovata</i>				
I ($h < 0.5$ m)	0.775	0.225	0.775	0.254
II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m)	0.486	0.514	0.288	0.457
III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4$ cm)	0.207	0.793	0.093	0.268
IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7$ cm)	0.144	0.856	0.021	0.120
V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10$ cm)	0.108	0.892	0.012	0.095
VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13$ cm)	0.090	0.910	0.006	0.061
VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16$ cm)	0.072	0.928	0.006	0.074
VIII ($\text{BD} \geq 16$ cm)	0.000	1.000	—	—

¹⁾ h : 株高 Height; BD: 基径 Basal diameter. $S(i)$: 生存率函数 Survival rate function; $F(i)$: 积累死亡率函数 Cumulative mortality rate function; $f(ti)$: 死亡密度函数 Death density function; $\lambda(ti)$: 危险率函数 Hazard rate function. —: 数据无法计算 The data cannot be calculated.

受环境影响更明显。2 种红树种群的危险率函数 [$\lambda(ti)$] 均从 III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4 \text{ cm}$) 级开始减少, 桐花树种群的 $\lambda(ti)$ 值在 VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13 \text{ cm}$) 级出现 1 个小峰值, 秋茄树种群的 $\lambda(ti)$ 值在 VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16 \text{ cm}$) 级略有升高。总体上看, 桐花树种群相较秋茄树种群更为稳定。

2.5 优势红树种群的时间序列预测

结果(表 5)显示: 经过未来 2、4、6、8 个径级时间后, 广西茅尾海海域桐花树和秋茄树种群各径级个体数量增幅差异较大。桐花树种群经过未来 2 个径级时间后, 在 III [$1 \text{ cm} \leq \text{基径}(\text{BD}) < 4 \text{ cm}$] 级的个体数量增幅最大(348%), 在 IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7 \text{ cm}$) 级出现个体数量减少的现象(降幅为 17%); 经过未来 4 个径级时间后, 在 VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16 \text{ cm}$) 级的个体数量增幅最大(391%); 经过未来 6 个径级时间后, 在 VII 级的个体数量增幅最大(1 108%); 经过未来 8 个径级时间后, 在 VIII ($\text{BD} \geq 16 \text{ cm}$) 级的个体数量增幅为 1 918%。秋茄树种群经过未来 2 个径级时间后, 在 III 级的个体数量增幅最大(189%), 在 IV 级和 V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10 \text{ cm}$) 级均出现个体数量减少的现象

表 5 广西茅尾海海域优势红树种群的时间序列预测¹⁾
Table 5 Time sequence prediction of dominant mangrove populations in Maowei Sea area of Guangxi¹⁾

径级 Diameter class	M_0	M_2	M_4	M_6	M_8
桐花树 <i>Aegiceras corniculatum</i>					
I ($h < 0.5$ m)	5 151				
II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m)	3 003	4 077			
III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4$ cm)	377	1 690			
IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7$ cm)	572	475	2 276		
V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10$ cm)	466	519	1 105		
VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13$ cm)	155	311	393	1 621	
VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16$ cm)	64	110	314	773	
VIII ($\text{BD} \geq 16$ cm)	61	63	187	283	1 231
秋茄树 <i>Kandelia obovata</i>					
I ($h < 0.5$ m)	111				
II ($0.5 \text{ m} \leq h < 1.0$ m)	86	99			
III ($1 \text{ cm} \leq \text{BD} < 4$ cm)	18	52			
IV ($4 \text{ cm} \leq \text{BD} < 7$ cm)	25	22	60		
V ($7 \text{ cm} \leq \text{BD} < 10$ cm)	37	31	42		
VI ($10 \text{ cm} \leq \text{BD} < 13$ cm)	25	31	26	50	
VII ($13 \text{ cm} \leq \text{BD} < 16$ cm)	9	17	24	33	
VIII ($\text{BD} \geq 16$ cm)	9	9	20	21	40

¹⁾ h : 株高 Height; BD: 基径 Basal diameter. M_0 : 原始个体数 Original number of individuals; M_2 : 经过未来 2 个径级时间后的个体数量 Number of individuals after the next two diameter class time; M_4 : 经过未来 4 个径级时间后的个体数量 Number of individuals after the next four diameter class time; M_6 : 经过未来 6 个径级时间后的个体数量 Number of individuals after the next six diameter class time; M_8 : 经过未来 8 个径级时间后的个体数量 Number of individuals after the next eight diameter class time.

(降幅分别为 12% 和 16%); 经过未来 4 个径级时间后, 在 VII 级的个体数量增幅最大(167%); 经过未来 6 个径级时间后, 在 VII 级的个体数量增幅最大(267%); 经过未来 8 个径级时间后, 在 VIII ($\text{BD} \geq 16 \text{ cm}$) 级的个体数量增幅为 344%。可以预测, 桐花树种群的 IV 级个体数量在经过未来 2 个径级时间后表现出降低的现象; 秋茄树种群的 IV 级和 V 级在经过未来 2 个径级时间后出现个体数量减少, 随着时间推移 2 种红树种群能够得到不同程度的补充。表明 2 种红树种群在未来有一定的更新能力, 桐花树种群的个体数补充能力优于秋茄树种群。

3 讨论和结论

通过植株胸径反映种群的龄级结构可以简化种群生态学的研究过程, 种群龄级结构反映种群动态信息^[23-24], 因此种群龄级结构分析是揭示种群生存状况和更新策略的重要途径之一^[25]。乔木优势种的动态变化不仅能直接反映植物群落的演替状况, 而且能

决定群落的构建和特征^[26]。早期研究结果^[27-28]表明:桐花树种群在茅尾海海域分布最普遍、面积最大,秋茄树种群通常与桐花树种群组成复层结构群丛。实地调查发现,桐花树(9 849株)和秋茄树(320株)为广西茅尾海海域的优势红树种群,分别占红树植物个体总数的96.2%和3.1%,与已有研究结果^[27-28]一致。本文中的桐花树种群和秋茄树种群的径级结构变化趋势总体一致,Ⅰ[株高(h)<0.5 m]级的个体数量最多,Ⅱ(0.5 cm< h <1.0 cm)级次之,Ⅲ[1 cm≤基径(BD)<4 cm]级、Ⅳ(4 cm≤BD<7 cm)级和Ⅴ(7 cm≤BD<10 cm)级的个体数量也较多,Ⅵ(10 cm≤BD<13 cm)级、Ⅶ(13 cm≤BD<16 cm)级和Ⅷ(BD≥16 cm)级的个体数量较少,表明桐花树种群和秋茄树种群的幼苗数量较多,大树数量较少。调查发现茅尾海海域红树林群落的更新层(幼苗)有桐花树和秋茄树,这与该海域红树林群落中桐花树和秋茄树重要值较大的研究结果一致,表明未来几年桐花树和秋茄树仍为该海域主要的建群树种,红树林群落类型变化不大。幼苗数量对种群演替具有决定性的作用^[29],且更新层的多样性研究可以作为预测红树林群落类型变化的依据^[24]。因此,虽然桐花树种群和秋茄树种群的小树和中树占比均不超过20%,但2种红树种群的更新层资源较为丰富,更新状态较为理想,2种红树种群整体能够增长。

种群数量动态分析可反映种群生活史不同阶段的动态特征及其与环境间的相互关系^[30]。本研究结果显示:桐花树种群各相邻径级间的动态指数(V_n)仅Ⅲ级到Ⅳ级的 V_3 值小于0,其余径级间的个体数量均呈增长趋势,种群数量整体呈“增长—衰退—增长”的波动变化。秋茄树种群的 V_3 值和Ⅳ级到Ⅴ级的 V_4 值小于0,Ⅶ级到Ⅷ级的 V_7 值为0.0,种群数量整体呈“增长—衰退—增长—稳定”的波动变化。可以看出,桐花树种群较秋茄树种群更为稳定。从2种红树种群的随机干扰风险概率看,2种红树种群均易受外界干扰,种群一旦处于不利的生长环境中将受到严重影响,秋茄树种群对外界随机干扰的敏感性更高。2种红树种群的种群动态指数和随机干扰动态指数均大于0,反映出桐花树种群和秋茄树种群具有在非完全随机干扰下的增长潜力,能很好地适应茅尾海海域当前的生长环境。目前对植物群落优势种的量化分析的研究结果^[31-33]表明:植物种群在对外界环境干扰较为敏感的情况下形成了良好的生存策略,

丰富的幼苗个体数量可以满足种群的生存繁衍需求。本文的研究结果支持以上观点。

植物种群的发展主要受种内和种间竞争以及种群与环境间适应性的影响^[34]。研究认为,植物从幼龄到老龄,种群生长发育受限可能是其自身生理机制造成的^[35],植株死亡主要是由种群种内和种间竞争导致^[36]。本研究结果显示:桐花树种群和秋茄树种群的幼苗个体数量较多,小树生存质量较高,大树个体数量较少,种群趋于稳定。2种红树种群的存活曲线均为Deevey-Ⅱ型,表示种群各径级个体有相对一致的死亡率。2种红树种群的期间死亡率和消失率均从Ⅰ级的较低值随径级增大逐渐上升,在Ⅲ级出现峰值,说明2种红树种群由于幼龄阶段出现种内和种间竞争,致使整个种群在小树期间就开始进入生理衰退期。2种红树种群的积累死亡率函数值总体随径级增大而增大,死亡密度函数和危险率函数值总体随径级增大呈波动降低趋势,桐花树种群稳定性高于秋茄树种群,前者抵抗自然风险的能力高于后者。在经过未来2、4、6、8个径级时间后,桐花树种群中树和大树个体数量增加,秋茄树种群大树的个体数量增加,说明幼龄个体数量较多的2种红树种群在未来有一定的更新能力,可及时补充较大径级个体数量的损失,2种红树种群均属于增长型种群。也反映出在未来种群发展过程中,2种红树种群的幼苗对较大径级个体的更新将持续保持在一个较好的水平,符合增长型种群在时间序列模型预测未来个体数量基本呈现增长趋势的结论^[37-39]。

综上所述,广西茅尾海海域优势红树种群桐花树和秋茄树均以幼苗为主,小树、中树个体数量较多,大树个体数量较少,种群更新能力较好,属于增长型种群,能很好适应当前的环境,但对外界环境仍较为敏感,桐花树种群抵抗自然风险的能力略高于秋茄树种群。因此,在茅尾海入海的平陆运河经济带的良性发展的前提下,建议:1)在受影响区域的茅尾海海域的红树林保护过程中,需要通过人为干扰(如抚育间伐等)增强桐花树种群和秋茄树种群抵抗自然风险的能力;2)充分利用红树林群落种内和种间竞争规律,使红树林群落在水平结构和垂直结构上达到合理配置,保护桐花树种群和秋茄树种群幼苗资源,确保桐花树种群和秋茄树种群保持良好增长;3)积极开展红树林资源保护宣传工作,加强周边群众的保护意识,降低人为干扰。

参考文献:

- [1] 赵萌莉,林鹏. 红树植物多样性及其研究进展[J]. 生物多样性, 2000, 8(2): 192-197.
- [2] 王友绍. 红树林生态系统评价与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1.
- [3] 何斌源,范航清,王瑁,等. 中国红树林湿地物种多样性及其形成[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4859-4870.
- [4] OMELKO A, UKHVATKINA O, ZHMERENETSKY A, et al. From young to adult trees: how spatial patterns of plants with different life strategies change during age development in an old-growth Korean pine-broadleaved forest[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 411: 46-66.
- [5] 陈晓德. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究[J]. 生态学报, 1999, 18(2): 214-217.
- [6] 申仕康,马海英,王跃华,等. 濒危植物猪血木(*Euryodendron excelsum* H. T. Chang)自然种群结构及动态[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2404-2412.
- [7] 谭雨欣,田义超,黄卓梅,等. 北部湾茅尾海无瓣海桑红树林地上生物量反演: 基于 XGBoost 机器学习算法[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4674-4688.
- [8] 李菲,李喆,胡文进,等. 广西茅尾海红树林土壤放线菌多样性及功能酶活性研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(2): 88-97.
- [9] 罗新正,孟宏伟. 基于相对海平面变化的广西茅尾海红树林面积稳定性评估[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(6): 881-887.
- [10] 耿俊杰,黄亮亮,吴志强,等. 茅尾海红树林表层沉积物重金属含量分布特征及评价[J]. 生态科学, 2015, 34(1): 38-43.
- [11] 常涛,吴志强,黄亮亮,等. 茅尾海红树林水域仔稚鱼群落结构及与主要环境因子关系[J]. 应用海洋学学报, 2015, 34(2): 219-226.
- [12] 刘秀,蒋毓,陈乃明,等. 钦州湾红树林资源现状及发展对策[J]. 广西林业科学, 2009, 38(4): 259-260.
- [13] 邓贤兰,曹裕松,梁瑶琴,等. 井冈山山顶矮林乔木层优势种的生态位研究[J]. 植物资源与环境学报, 2016, 25(1): 88-93.
- [14] 尤禄祥,陈志伟,王华辰,等. 安徽黄山风景区微毛樱桃萌枝种群动态研究[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(2): 83-89.
- [15] 高贤明,王巍,杜晓军,等. 北京山区辽东栎林的径级结构、种群起源及生态学意义[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 673-678.
- [16] 胡刚,黎洁,覃盈盈,等. 广西北仑河口红树植物种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3022-3034.
- [17] 唐风,邹天才,杨乃坤,等. 稀有濒危植物贵州红山茶种群结构及数量动态变化的研究[J]. 广西植物, 2022, 42(3): 520-529.
- [18] 黄冬柳,梁士楚,姜勇. 桂林岩溶石山青冈种群数量动态[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 663-671.
- [19] 李玲,张光富,王锐,等. 天目山自然保护区银杏天然种群生命表[J]. 生态学杂志, 2011, 30(1): 53-58.
- [20] 冯士雍. 生存分析(I)[J]. 数学的实践与认识, 1982(3): 72-80.
- [21] 肖宜安,何平,李晓红,等. 濒危植物长柄双花木自然种群数量动态[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 252-257.
- [22] DEEVEY E S, Jr. Life tables for natural populations of animals[J]. Quarterly Review of Biology, 1947, 22: 283-314.
- [23] 梁士楚. 广西红树植物群落特征的初步研究[J]. 广西科学, 2000, 7(3): 210-216.
- [24] 张晓晨,杨国栋,陈昕,等. 江苏宝华山植物群落结构及其环境解释[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(4): 77-83.
- [25] 钟军弟,陈燕,刘锴栋,等. 雷州半岛徐闻红树林植物群落的结构和动态特征[J]. 桉树科技, 2017, 34(1): 26-31.
- [26] 韩文衡,向悟生,叶铎,等. 广西木论保护区喀斯特常绿落叶阔叶混交林优势种空间格局及其相关性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2769-2776.
- [27] 梁士楚. 广西北海海岸沙生白骨壤种群分布格局研究[J]. 广西科学, 2001, 8(1): 57-60, 69.
- [28] 李丽凤,刘文爱. 广西竹山红树林群落及种群分布格局研究[J]. 林业资源管理, 2013(4): 72-76.
- [29] 赵宝珠. 辽宁省实验林场天然柞林更新演替趋势的调查研究[J]. 辽宁林业科技, 1996(2): 19-23.
- [30] 刘海燕,杨乃坤,邹天才,等. 贵州特有植物贵州槭的种群结构及动态研究[J]. 广西植物, 2016, 36(5): 548-556.
- [31] 周赛霞,彭焱松,詹选怀,等. 庐山黄山松种群结构及数量动态研究[J]. 广西植物, 2020, 40(2): 247-254.
- [32] 吴邦利,龙翠玲,秦随涛. 茂兰喀斯特森林不同地形部位青冈种群结构与分布格局研究[J]. 广西植物, 2018, 38(1): 48-56.
- [33] 吴律欣,杨小波,李东海,等. 海南铜鼓岭鸭脚木种群动态特征研究[J]. 广西植物, 2020, 40(8): 1101-1110.
- [34] 王进,姚兰,艾训儒,等. 鄂西南不同区域亮叶桦种群结构与动态特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 357-365.
- [35] 李娟,邹琳,吕亚媚,等. 狭域特有植物元江素馨的种群结构及动态特征[J]. 广西植物, 2019, 39(9): 1271-1280.
- [36] COOMES D A, SAFKA D, SHEPHERD J, et al. Airborne laser scanning of natural forests in New Zealand reveals the influences of wind on forest carbon[J]. Forest Ecosystems, 2018, 5: 10.
- [37] 韩路,王家强,王海珍,等. 塔里木河上游胡杨种群结构与动态[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4640-4651.
- [38] 宁秋云,赖廷和,曹庆先,等. 广西珍珠湾红树种群结构与动态特征[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(1): 42-52.
- [39] 范繁荣,潘标志,马祥庆,等. 白桂木的种群结构和空间分布格局研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(2): 176-181.

(责任编辑:郭严冬)