

浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林的种群结构及动态特征

刘孟兰¹, 祁政宇¹, 朱明栋², 陈磊², 施展¹, 徐娜娜^{1,①}

(1. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022; 2. 浙江大学舟山海洋研究中心, 浙江 舟山 316021)

摘要:以浙江西门岛上林龄 21 和 66 a 的秋茄树(*Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong)人工林为研究对象,基于野外样方调查结果,对其种群结构、生命过程、生存力、动态变化进行分析,并进行种群个体数时间序列预测,以期为中国红树成功引种北缘秋茄树种群有效保护与恢复及红树北扩引种提供基础资料和科学依据。结果表明:21 和 66 a 秋茄树人工林种群的高度结构相似,株高主要集中在 1.0~1.5 m,平均株高分别为 1.31 和 1.37 m。但 2 个种群的密度和径级[根据基径(D)划分]结构差异明显,21 a 种群密度(3.11 m^{-2})约是 66 a 种群的 4 倍,前者径级以 II 级($2\text{ cm}\leq D<6\text{ cm}$)为主,后者以 III 级($6\text{ cm}\leq D<10\text{ cm}$)至 VI 级($18\text{ cm}\leq D<22\text{ cm}$)为主。2 个种群的存活曲线均符合 Deevey-II 型,存活个体数随径级增大呈下降趋势,各径级死亡率均偏高,且 66 a 种群的死亡率明显小于 21 a 种群。2 个种群的生存率和死亡密度随径级增大而下降,累计死亡率和危险率随径级增大而上升,且 66 a 种群的这 4 个指标均从径级 V 级($14\text{ cm}\leq D<18\text{ cm}$)开始趋于稳定。2 个种群的动态指数变化很大,忽略外部干扰时的种群动态指数(V_{pi})和考虑外部随机干扰时的种群动态指数(V_{pi}')均大于 0,总体呈增长趋势,种群对外部随机干扰所承担的风险概率极大值(P_{max})分别为 16.67% 和 9.09%,表明这 2 个种群对外界环境较为敏感。在未来 4 和 6 个径级时间后,21 a 种群各径级个体数均增加;在未来 2、4、6、8、10 个径级时间后,66 a 种群 V 级至 XI 级($38\text{ cm}\leq D<42\text{ cm}$)个体数整体上逐渐增多, I 级($D<2\text{ cm}$)至 IV 级($10\text{ cm}\leq D<14\text{ cm}$)个体数减少,种群增长难以长期维持。21 a 种群的幼苗、小树和 66 a 种群的小树呈聚集分布,而 21 a 种群的大树和 66 a 种群的大树、老树呈均匀分布。基于上述研究结果,建议加强对浙江西门岛秋茄树人工林种群的保护与管理,如对 21 a 种群进行幼苗间伐并减少人类活动干扰,对 66 a 种群进行幼苗补种,从而促进种群的更新和良性发展。

关键词:红树林; 秋茄树人工林; 种群结构; 种群动态; 空间分布格局

中图分类号: Q948.15; S718.54 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)06-0001-10
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.06.01

Population structure and dynamic characteristics of *Kandelia obovata* plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province LIU Menglan¹, QI Zhengyu¹, ZHU Mingdong², CHEN Lei², SHI Zhan¹, XU Nana^{1,①} (1. College of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Ocean Research Center of Zhoushan, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(6): 1-10

Abstract: Taking *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at the stand ages of 21 and 66 a in Ximen Island of Zhejiang Province as research objects, their population structure, life process, survivability, and dynamic variations were analyzed based on field plot survey results, and time sequence prediction for number of individuals of populations was conducted to provide fundamental data and scientific basis for effective conservation and restoration of *K. obovata* populations in northern margin

收稿日期: 2025-06-27

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LTGS23C030004); 国家自然科学基金项目(32201380)

作者简介: 刘孟兰(1997—),女,安徽临泉人,硕士研究生,主要从事海洋植物生态学研究。

①通信作者 E-mail: xunn@zjou.edu.cn

引用格式: 刘孟兰, 祁政宇, 朱明栋, 等. 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林的种群结构及动态特征[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(6): 1-10.

of artificial mangrove forest in China and for northward expansion of mangroves. The results show that the height structures of the 21 and 66 a populations of *K. obovata* plantations are similar, with plant heights mainly concentrated in 1.0–1.5 m, and their average heights are 1.31 and 1.37 m, respectively. However, the density and diameter class [division on basal diameter (D)] structure of the two populations are obviously different, the density of the 21 a population (3.11 m^{-2}) is approximately four times that of the 66 a population, the former is dominated by diameter class II ($2 \text{ cm} \leq D < 6 \text{ cm}$), while the latter is dominated by class III ($6 \text{ cm} \leq D < 10 \text{ cm}$) to class VI ($18 \text{ cm} \leq D < 22 \text{ cm}$). The survival curves of both populations conform to the Deevey-II type, the number of surviving individuals shows a tendency to decrease as the diameter class increases, the mortality rate of each diameter class is relatively high, and the mortality rate of the 66 a population is evidently lower than that of the 21 a population. The survival rate and mortality density of both populations decrease with the increase of diameter class, the cumulative mortality rate and hazard rate increase with the increase of diameter class, and the four indexes of the 66 a population tend to be stable starting from diameter class V ($14 \text{ cm} \leq D < 18 \text{ cm}$). The dynamic indexes of the two populations vary greatly, the population dynamic index ignoring external disturbances (V_{pi}) and population dynamic index considering external random disturbance (V_{pi}') are both greater than 0, indicating an overall growth tendency, and the maximum value of risk probability of the population to external random disturbance (P_{\max}) are 16.67% and 9.09%, respectively, indicating that the two populations are relatively sensitive to external environment. After next 4 and 6 diameter class time, the number of individuals in each diameter class of the 21 a population increases; after next 2, 4, 6, 8, and 10 diameter class time, the numbers of individuals in class V to class XI ($38 \text{ cm} \leq D < 42 \text{ cm}$) of the 66 a population generally increase, while the numbers of individuals in class I ($D < 2 \text{ cm}$) to class IV ($10 \text{ cm} \leq D < 14 \text{ cm}$) decrease, indicating that population growth would be difficult to maintain in the long term. Seedlings and small trees of the 21 a population and small trees of the 66 a population show clumped distribution, while big trees of the 21 a population and big and old trees of the 66 a population show uniform distribution. Based on the above research results, it is recommended to strengthen the conservation and management of *K. obovata* plantations in Ximen Island of Zhejiang Province, such as seedling thinning for the 21 a population and reduce human disturbance, and supplement seedlings for the 66 a population, thereby promoting population regeneration and healthy development.

Key words: mangrove forest; *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantation; population structure; population dynamic; spatial distribution pattern

红树林生态系统是地球上生产力最高的生态系统之一,同时也是地球上受到威胁最大的生态系统之一,是国际上生物多样性保护和湿地生态系统保护的重要对象^[1-2]。受环境污染、围垦建设等人类活动的影响,中国红树林面积从20世纪50年代的42 001.0 hm^2 迅速减少到2000年的22 024.9 hm^2 ,此后中国政府实施了一批红树林生态恢复和修复工程项目,红树林面积又快速增加到2013年的34 472.14 hm^2 ^[3]。2000年至2013年,中国红树林面积扩张以人工种植新增面积为主,而大力种植红树林导致红树林宜林滩涂减少,随后人工种植红树林面积新增比例下降,自然恢复新增面积比例上升^[4]。

浙江省是中国红树林人工种植的北界,经历了20世纪50年代末至60年代初、20世纪80年代中后期、20世纪90年代至21世纪初3轮红树林引种造林高潮,温州、台州、宁波、舟山均开展了红树林引种造林实践,引种和栽培的主要树种为秋茄树(*Kandelia*

obovata Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong),造林保留至今的面积约30 hm^2 。2013年进入红树林造林发展的新阶段,海洋部门应用海洋生态补偿和生态修复专项资金开展了红树林造林,在台州、温州等地造林约300 hm^2 ^[5]。《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》(https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/29/content_5538354.htm)要求浙江省在5年内新植红树林200 hm^2 。温州乐清西门岛(北纬 $28^{\circ}19'50'' \sim 28^{\circ}21'33''$ 、东经 $121^{\circ}09'22'' \sim 121^{\circ}12'13''$)是中国红树林人工引种存活、能够自我繁衍的北界。1957年,乐清从海南岛引种秋茄树成功,后遭人类活动破坏,当年引种的秋茄树林仅在西门岛留存0.2 hm^2 ;1998—1999年在母树外围进行人工扩种移植和保护,秋茄树林面积达到2 hm^2 ;2002年,在西门岛周边滩涂成功引种栽培秋茄树13.3 hm^2 ^[6];2005年,西门岛海洋特别保护区建立后,在西门岛周边滩涂又多次开展秋茄树种植和补种。西门岛成功引种秋茄树

后,滩涂底栖生物资源变得丰富^[7-8],这些红树林生态系统以调节服务和支持服务为主,其中单项服务以维护生物多样性、促淤造陆、防风消浪、科研教育等价值为主,具有较高的服务产出^[9]。

然而,由于纬度高、气温低等原因,西门岛人工引种的秋茄树林与中国红树林主产区的生境存在明显差异。因此,评估中国红树成功引种北缘区西门岛秋茄树人工林种群对环境的适应性,认识种群内个体在空间中的配置模式或分布规律具有重要意义。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^[10-11]。种群空间分布格局反映种群个体在空间上的配置状况,其形成与物种本身的繁殖特性、种间种内关系以及环境因子等密切相关^[12-13]。鉴于此,笔者于2023年5月对乐清西门岛林龄21和66a的2个秋茄树人工林开展野外调查,比较分析2个不同林龄秋茄树人工林种群的生存现状、种群结构动态及空间分布格局,探究不同林龄秋茄树人工林种群的天然更新潜力和稳定发展能力,以期为西门岛秋茄树种群有效保护与恢复及红树北扩引种提供基础资料和科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

西门岛位于浙江省乐清市雁荡镇乐清湾北部,属中亚热带海洋型季风气候,年平均气温17.9℃,极端最低和最高气温分别为-5.8和37.2℃,无霜期258d,年平均光照时数1713.9h,年平均降水量1556.3mm。乐清湾北部潮汐属于不规则半日潮,最大潮差8.34m,平均潮差5.15m,海水盐度为26.4‰~29.3‰,滩涂主要是淤泥质^[14]。供试秋茄树人工林的21a种群(北纬28°20′52.20″、东经121°10′28.34″)和66a种群(北纬28°20′55.80″、东经121°10′43.12″)均位于西门岛国家级海洋特别保护区内。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置和植株调查 根据地形特征和林地面积,分别在林龄21和66a的秋茄树人工林内设置3个调查样方,样方面积均为20m×20m。21a人工林内3个样方间隔至少20m;66a人工林因面积过小,3个样方紧邻。观察样方内的人为干扰状况,计算样方内的密度、郁闭度^[15]。因林内秋茄树密度过

大难以行走,故在每个调查样方内均匀设置9个面积2m×2m的小样方,小样方距邻近的大样方边界3m,小样方间隔4m,对样方内秋茄树进行每木检尺,测定秋茄树植株的株高、基径、冠幅(树冠东西向和南北向距离的平均值)等生长指标。

1.2.2 径级和高度级划分 参考何东进等^[16]的方法,将秋茄树的基径(D)划分为11个等级,分别为Ⅰ级($D < 2$ cm)、Ⅱ级(2 cm $\leq D < 6$ cm)、Ⅲ级(6 cm $\leq D < 10$ cm)、Ⅳ级(10 cm $\leq D < 14$ cm)、Ⅴ级(14 cm $\leq D < 18$ cm)、Ⅵ级(18 cm $\leq D < 22$ cm)、Ⅶ级(22 cm $\leq D < 26$ cm)、Ⅷ级(26 cm $\leq D < 30$ cm)、Ⅸ级(30 cm $\leq D < 34$ cm)、Ⅹ级(34 cm $\leq D < 38$ cm)、Ⅺ级(38 cm $\leq D < 42$ cm)。根据径级将种群划分为幼苗(Ⅰ级)、小树(Ⅱ级至Ⅲ级)、大树(Ⅳ级至Ⅶ级)和老树(Ⅷ级至Ⅺ级)4个发育阶段。将株高(h)划分为6个等级,分别为H1($h < 0.5$ m)、H2(0.5 m $\leq h < 1.0$ m)、H3(1.0 m $\leq h < 1.5$ m)、H4(1.5 m $\leq h < 2.0$ m)、H5(2.0 m $\leq h < 2.5$ m)和H6($h \geq 2.5$ m)。

1.2.3 静态生命表编制与曲线分析 采用空间代替时间的方法,以径级代替龄级,按人工林不同径级的个体数编制静态生命表。由于种群处于动态变化中,编制生命表时会出现死亡率为负的情况,采用拟合方程对各径级的个体数进行匀滑修正,得到匀滑后存活个体数(a_x^*),再编制种群静态生命表,绘制种群的死亡率曲线、消失率曲线和存活曲线^[17-18]。存活曲线分为Deevey-Ⅰ型(凸型)、Deevey-Ⅱ型(对角线型)、Deevey-Ⅲ型(凹型)3种类型,采用指数函数 $N_x = N_0 e^{-bx}$ 和幂函数 $N_x = N_0 x^{-b}$ 检验秋茄树种群存活曲线的类型^[19]。式中, N_x 、 N_0 分别表示 x 径级的存活个体数和种群形成初期的个体数, b 为死亡率。根据决定系数 R^2 和 F 检验确定最优模型^[20]。

1.2.4 种群生存力分析 采用生存率函数、累计死亡率函数、死亡密度函数以及危险率函数对西门岛秋茄树人工林进行种群生存力分析^[21]。根据4个函数值分别绘制相应的曲线。

1.2.5 种群数量动态量化分析 根据种群各径级存活个体数,计算种群内2个相邻径级间的动态指数(V_n)、忽略外部干扰时的种群动态指数(V_{pi})、考虑外部随机干扰时的种群动态指数(V_{pi}')以及种群对外部随机干扰所承担的风险概率极大值(P_{max})^[22]。其中, V_n 、 V_{pi} 、 V_{pi}' 正值表示种群增长,负值表示种群衰退,0表示种群稳定; P_{max} 值越小,表明种群对外部干

扰越敏感。

1.2.6 时间序列分析 根据种群各径级存活个体数,采用一次移动平均法^[23]预测各径级在未来2、4、6、8和10个径级时间后的个体数。

1.2.7 空间分布格局 采用聚集度指标综合分析2个林龄秋茄树人工林种群的空间分布格局的动态变化,包括扩散系数(C)、丛生指数(I)、平均拥挤度(m^*)、聚块性指数(PAI)、负二项参数(k)和Cassie指标(C_a),具体计算方法参照文献^[24]。聚块性指数定义为平均拥挤度与平均密度的比率。

1.3 数据处理和分析

使用EXCEL 2021和IBM SPSS Statistics 27软件进行数据统计分析和方程拟合,采用独立样本 t 检验对秋茄树生长数据进行比较。使用Origin pro 2024软件制图。

2 结果和分析

2.1 种群结构分析

调查发现,2个林龄秋茄树种群的人为干扰程度不同,21 a种群人类活动较多,生活垃圾也较多;66 a

种群偶有人类活动,且仅为科普调查。从生长情况(表1)来看,21 a种群的密度在0.01水平上显著高于66 a种群,冠幅和基径在0.001水平上显著小于66 a种群;2个种群的郁闭度和株高无显著差异。2个种群株高主要集中在1.0~1.5 m,该高度范围的个体数在21和66 a种群中的占比分别为68.5%和54.0%;21 a种群无株高2.0 m及以上的植株,66 a种群中株高2.0 m及以上的个体数占12.4%(图1)。2个种群的径级结构具有明显差异(图2):21 a种群最大径级为Ⅵ级($18\text{ cm} \leq D < 22\text{ cm}$),且仅有1株,主要径级是Ⅱ级($2\text{ cm} \leq D < 6\text{ cm}$)(277株),接下来依次为Ⅲ级($6\text{ cm} \leq D < 10\text{ cm}$)、Ⅰ级($D < 2\text{ cm}$)和Ⅳ级($10\text{ cm} \leq D < 14\text{ cm}$),分别有31、25和2株,无Ⅴ级($14\text{ cm} \leq D < 18\text{ cm}$);66 a种群最大径级为Ⅺ级($38\text{ cm} \leq D < 42\text{ cm}$),无Ⅰ级,主要径级Ⅲ级至Ⅵ级的个体数占总数的84.1%。

2.2 种群生命过程分析

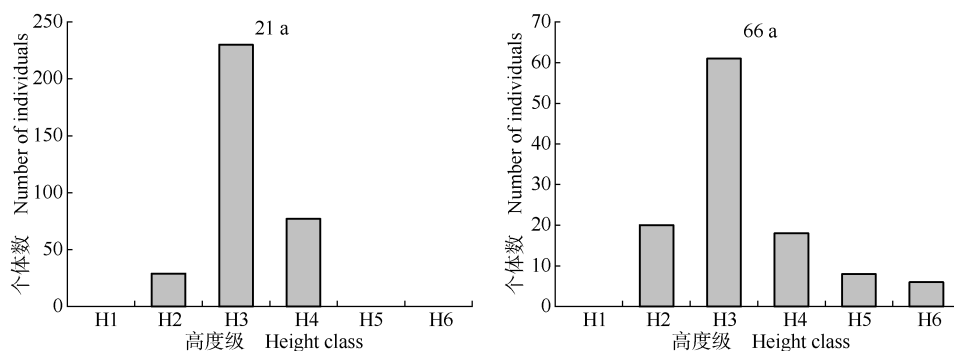
由2个林龄秋茄树种群静态生命表(表2)可知:2个种群存活个体数均随着径级增大呈减少趋势。21 a种群存活个体数波动很大,Ⅰ级($D < 2\text{ cm}$)和Ⅱ级($2\text{ cm} \leq D < 6\text{ cm}$)死亡率均超过0.9,Ⅲ级($6\text{ cm} \leq D < 10\text{ cm}$)死亡率为0.857;平均期望寿命随着径级增

表1 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的生长情况($\bar{x} \pm SE$)¹⁾

Table 1 Growth status of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province ($\bar{x} \pm SE$)¹⁾

林龄/a Stand age	密度/ m^{-2} Density	郁闭度/% Canopy density	冠幅/m Crown width	株高/m Height	基径/cm Basal diameter
21	$3.11 \pm 0.39^{**}$	49.34 ± 2.66	0.52 ± 0.01	1.31 ± 0.01	3.87 ± 0.10
66	0.79 ± 0.12	57.03 ± 6.13	$1.08 \pm 0.04^{***}$	1.37 ± 0.05	$14.52 \pm 0.70^{***}$

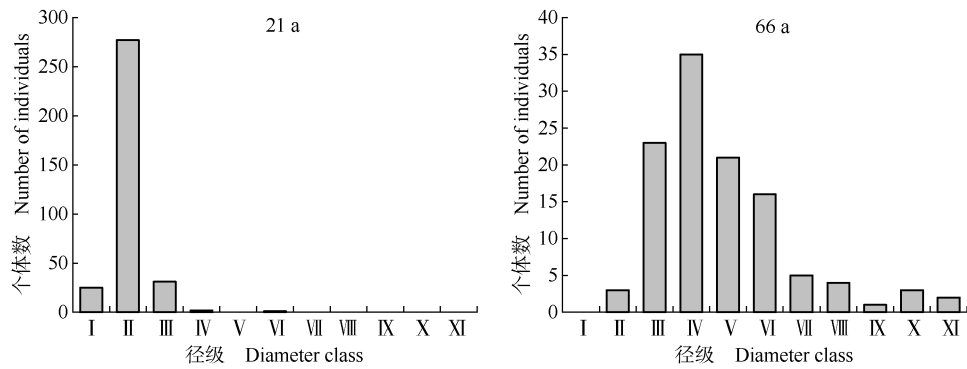
¹⁾ **和***分别表示2个林龄种群间在0.01和0.001水平上存在显著差异** and *** represent significant differences between two stand age populations at 0.01 and 0.001 levels, respectively.



H1: $h < 0.5\text{ m}$; H2: $0.5\text{ m} \leq h < 1.0\text{ m}$; H3: $1.0\text{ m} \leq h < 1.5\text{ m}$; H4: $1.5\text{ m} \leq h < 2.0\text{ m}$; H5: $2.0\text{ m} \leq h < 2.5\text{ m}$; H6: $h \geq 2.5\text{ m}$. h : 株高 Height.

图1 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的高度结构

Fig. 1 Height structure of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province



I : $D < 2$ cm; II : $2 \text{ cm} \leq D < 6$ cm; III : $6 \text{ cm} \leq D < 10$ cm; IV : $10 \text{ cm} \leq D < 14$ cm; V : $14 \text{ cm} \leq D < 18$ cm; VI : $18 \text{ cm} \leq D < 22$ cm; VII : $22 \text{ cm} \leq D < 26$ cm; VIII : $26 \text{ cm} \leq D < 30$ cm; IX : $30 \text{ cm} \leq D < 34$ cm; X : $34 \text{ cm} \leq D < 38$ cm; XI : $38 \text{ cm} \leq D < 42$ cm. D : 基径 Basal diameter.

图 2 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的径级结构
 Fig. 2 Diameter class structure of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province

表 2 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的静态生命表¹⁾

Table 2 Static life table of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province¹⁾

径级 Diameter class	21 a 种群的静态生命表 Static life table of 21 a population									66 a 种群的静态生命表 Static life table of 66 a population								
	a_x^*	l_x	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	p_x	K_x	a_x^*	l_x	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	p_x	K_x
I	3 575	1 000	915	0.915	543	594	0.594	0.085	2.465	213	1 000	437	0.437	782	1 785	1.785	0.563	0.574
II	304	85	78	0.918	46	51	0.600	0.082	2.497	120	563	248	0.440	439	1 003	1.782	0.560	0.581
III	26	7	6	0.857	4	5	0.714	0.143	1.946	67	315	137	0.435	247	564	1.790	0.565	0.571
IV	2	1	—	—	1	1	1.000	—	—	38	178	79	0.444	139	317	1.781	0.556	0.587
V	0	0	—	—	—	—	—	—	—	21	99	43	0.434	78	178	1.798	0.566	0.570
VI	0	0	—	—	—	—	—	—	—	12	56	23	0.411	45	100	1.786	0.589	0.529
VII	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	33	14	0.424	26	55	1.667	0.576	0.552
VIII	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	19	10	0.526	14	29	1.526	0.474	0.747
IX	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	9	4	0.444	7	15	1.667	0.556	0.588
X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	5	0	0.000	5	8	1.600	1.000	0.000
XI	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	5	—	—	—	—	—	—	—

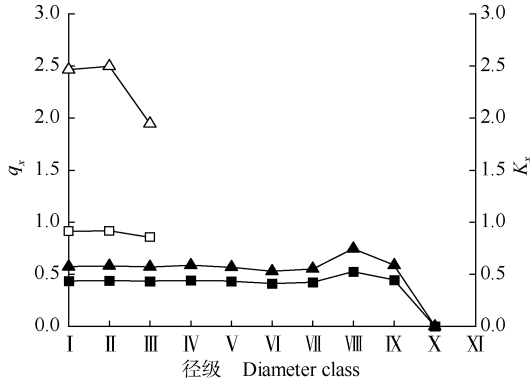
¹⁾ I : $D < 2$ cm; II : $2 \text{ cm} \leq D < 6$ cm; III : $6 \text{ cm} \leq D < 10$ cm; IV : $10 \text{ cm} \leq D < 14$ cm; V : $14 \text{ cm} \leq D < 18$ cm; VI : $18 \text{ cm} \leq D < 22$ cm; VII : $22 \text{ cm} \leq D < 26$ cm; VIII : $26 \text{ cm} \leq D < 30$ cm; IX : $30 \text{ cm} \leq D < 34$ cm; X : $34 \text{ cm} \leq D < 38$ cm; XI : $38 \text{ cm} \leq D < 42$ cm. D : 基径 Basal diameter. a_x^* : 匀滑后 x 径级的存活个体数 Survival number of individuals at x diameter class after smoothing; l_x : x 径级的标准化存活个体数 Standardized survival number of individuals at x diameter class; d_x : 从 x 到 $x+1$ 径级间隔期内标准化死亡个体数 Standardized death number of individuals in the interval from x to $x+1$ diameter class; q_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的死亡率 Mortality rate from x to $x+1$ diameter class; L_x : 从 x 到 $x+1$ 径级间隔期间的存活个体数 Survival number of individuals in the interval from x to $x+1$ diameter class; T_x : 大于或等于 x 径级的个体总数 Total individual number greater than or equal to x diameter class; e_x : x 径级的平均期望寿命 Average life expectancy at x diameter class; p_x : x 径级的存活率 Survival rate at x diameter class; K_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的消失率 Vanishing rate from x to $x+1$ diameter class. —: 无数据 No datum.

大逐渐增加,表明个体从幼苗发育到小树后生理活动更为旺盛。66 a 种群各径级的死亡率明显较 21 a 种群低,但也仍处于较高水平(均超过 0.4),VIII 级 ($26 \text{ cm} \leq D < 30 \text{ cm}$) 为死亡高峰(死亡率为 0.526)。66 a 种群各径级的平均期望寿命明显高于 21 a 种群,其平均期望寿命随径级增大而波动变化,在 I 级至 VI 级 ($18 \text{ cm} \leq D < 22 \text{ cm}$) 基本稳定在 1.78 以上,从 VII 级 ($22 \text{ cm} \leq D < 26 \text{ cm}$) 开始有所下降,在 XI 级 ($38 \text{ cm} \leq D < 42 \text{ cm}$) 急剧下降至 0.600,说明随着径级增大,秋茄树的生存力和对环境的适应能力逐渐下降, VIII 级及以上存活个体数少于 5 株。

从死亡率曲线和消失率曲线(图 3)可以看出: 21 a 种群的死亡率随径级增大较为稳定,消失率在 III 级大幅降低;66 a 种群的死亡率和消失率在 I ~ VII 级波动不大,在 VIII 级有一定升高,之后迅速下降。

由图 4 可见: 2 个林龄秋茄树种群的存活曲线均近似于对角线型,即 Deevey- II 型,标准化存活个体数的自然对数 ($\ln l_x$) 随径级增大以较为恒定的比例下降,21 a 秋茄树种群 $\ln l_x$ 随径级增大下降更急剧。21 a 种群因其林龄较小且径级数较少无法拟合出具统计学意义的存活曲线方程。66 a 种群指数函数和幂函数模型对存活曲线拟合均达到极显著水平 ($P <$

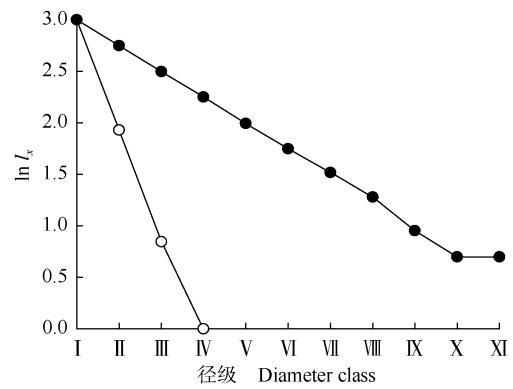
0.001), 其中方程 $y = 3.989e - 0.155x$ 的 R^2 (0.962) 较方程 $y = 4.233x - 0.622$ 的 R^2 (0.781) 更趋近于 1, 说明此模型的拟合效果更优, 种群存活曲线更符合 Deevey-II 型。



—□—: 21 a 种群的 q_x q_x of 21 a population; —■—: 66 a 种群的 q_x q_x of 66 a population; —△—: 21 a 种群的 K_x K_x of 21 a population; —▲—: 66 a 种群的 K_x K_x of 66 a population. q_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的死亡率 Mortality rate from x to $x+1$ diameter class; K_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的消失率 Vanishing rate from x to $x+1$ diameter class.

I: $D < 2$ cm; II: $2 \text{ cm} \leq D < 6$ cm; III: $6 \text{ cm} \leq D < 10$ cm; IV: $10 \text{ cm} \leq D < 14$ cm; V: $14 \text{ cm} \leq D < 18$ cm; VI: $18 \text{ cm} \leq D < 22$ cm; VII: $22 \text{ cm} \leq D < 26$ cm; VIII: $26 \text{ cm} \leq D < 30$ cm; IX: $30 \text{ cm} \leq D < 34$ cm; X: $34 \text{ cm} \leq D < 38$ cm; XI: $38 \text{ cm} \leq D < 42$ cm. D : 基径 Basal diameter.

图3 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的死亡率和消失率曲线
Fig. 3 Curves of mortality rate and vanishing rate of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province



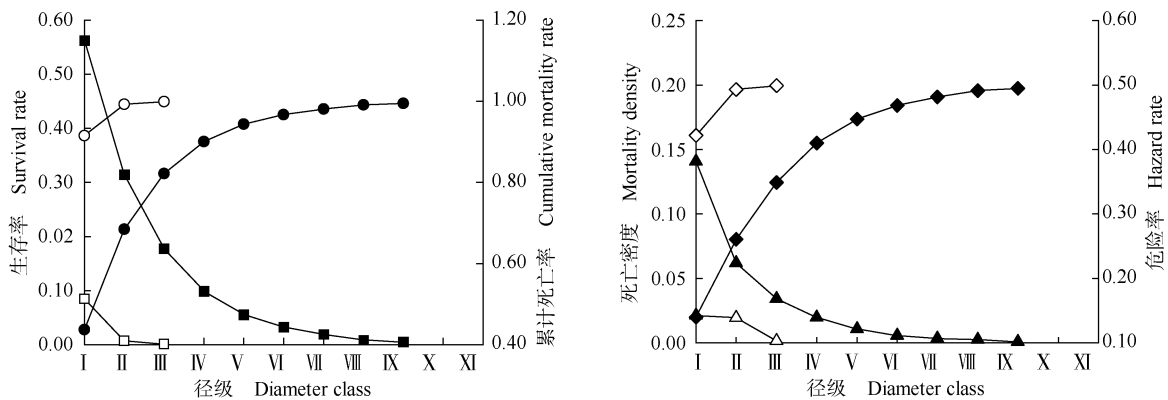
—○—: 21 a 种群 21 a population; —●—: 66 a 种群 66 a population.

I: $D < 2$ cm; II: $2 \text{ cm} \leq D < 6$ cm; III: $6 \text{ cm} \leq D < 10$ cm; IV: $10 \text{ cm} \leq D < 14$ cm; V: $14 \text{ cm} \leq D < 18$ cm; VI: $18 \text{ cm} \leq D < 22$ cm; VII: $22 \text{ cm} \leq D < 26$ cm; VIII: $26 \text{ cm} \leq D < 30$ cm; IX: $30 \text{ cm} \leq D < 34$ cm; X: $34 \text{ cm} \leq D < 38$ cm; XI: $38 \text{ cm} \leq D < 42$ cm. D : 基径 Basal diameter. $\ln l_x$: x 径级标准化存活个体数的自然对数 Natural logarithm of standardized survival number of individuals at x diameter class.

图4 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的存活曲线
Fig. 4 Survival curves of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province

2.3 生存力分析

生存力分析结果(图5)显示: 2个种群的生存率和死亡密度随径级增加而下降, 累计死亡率和危险率随径级增加而上升, 变化趋势互补。66 a 种群 I 级 ($D < 2$ cm) 至 IV 级 ($10 \text{ cm} \leq D < 14$ cm) 4 个函数值变



—□—: 21 a 种群的生存率 Survival rate of 21 a population; —■—: 66 a 种群的生存率 Survival rate of 66 a population; —○—: 21 a 种群的累计死亡率 Cumulative mortality rate of 21 a population; —●—: 66 a 种群的累计死亡率 Cumulative mortality rate of 66 a population; —△—: 21 a 种群的死亡密度 Mortality density of 21 a population; —▲—: 66 a 种群的死亡密度 Mortality density of 66 a population; —◇—: 21 a 种群的危险率 Hazard rate of 21 a population; —◆—: 66 a 种群的危险率 Hazard rate of 66 a population.

I: $D < 2$ cm; II: $2 \text{ cm} \leq D < 6$ cm; III: $6 \text{ cm} \leq D < 10$ cm; IV: $10 \text{ cm} \leq D < 14$ cm; V: $14 \text{ cm} \leq D < 18$ cm; VI: $18 \text{ cm} \leq D < 22$ cm; VII: $22 \text{ cm} \leq D < 26$ cm; VIII: $26 \text{ cm} \leq D < 30$ cm; IX: $30 \text{ cm} \leq D < 34$ cm; X: $34 \text{ cm} \leq D < 38$ cm; XI: $38 \text{ cm} \leq D < 42$ cm. D : 基径 Basal diameter.

图5 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的生存力分析
Fig. 5 Survivability analysis of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province

化幅度较大,从 V 级 ($14\text{ cm} \leq D < 18\text{ cm}$) 往后趋于稳定;且仅在 I 级时生存率高于累计死亡率,其余均表现出累计死亡率高于生存率;种群在 I 级时死亡密度最大(0.141),危险率最小(0.140)。4 个函数值均说明 66 a 秋茄树人工林种群幼小阶段个体死亡率较高。22 a 种群从 I 级开始累计死亡率大于生存率,在 I 级时死亡密度最大(0.021 3),危险率最小(0.421 7)。

2.4 种群动态变化分析

对 2 个林龄秋茄树人工林种群的动态指数进行分析,结果(表 3)显示:21 和 66 a 种群的动态指数变化很大,尤其是 66 a 种群,说明 2 个种群处于关键和敏感时期,对当地的生存环境适应性较差。2 个种群的忽略外部干扰时的种群动态指数 (V_{pi}) 和考虑外部随机干扰时的种群动态指数 (V_{pi}') 均大于 0,且 V_{pi} 值

大于 V_{pi}' 值,种群对外部随机干扰所承担的风险概率极大值 (P_{max}) 分别为 16.67% 和 9.09%,表明 2 个种群秋茄树个体数总体呈增长趋势,但对外界干扰敏感度很高,且 66 a 种群较 21 a 种群更敏感,如果处于不利的生长环境中种群增长将会受到严重影响。

2.5 种群数量时间序列预测

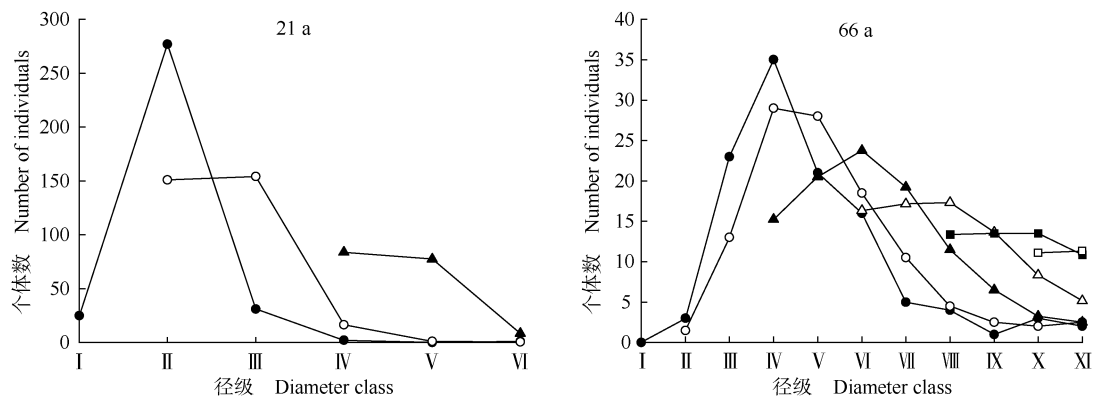
结果(图 6)显示:21 a 种群在未来 2 个径级时间后,除 II 级 ($2\text{ cm} \leq D < 6\text{ cm}$) 个体数减少近一半,III 级 ($6\text{ cm} \leq D < 10\text{ cm}$) 和 IV 级 ($10\text{ cm} \leq D < 14\text{ cm}$) 个体数增加, V 级 ($14\text{ cm} \leq D < 18\text{ cm}$) 至 VI 级 ($18\text{ cm} \leq D < 22\text{ cm}$) 个体数稳定或略有增加;在未来 4、6 个径级时间后,种群各径级的个体数均大幅增加。66 a 种群在未来 2 个径级时间后,II 级至 IV 级、X 级 ($34\text{ cm} \leq D < 38\text{ cm}$) 的个体数减少,其余径级个体数均小幅增加;在

表 3 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的动态指数¹⁾

Table 3 Dynamic indexes of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province¹⁾

林龄 Stand age	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	V_8	V_9	V_{10}			
21 a	-90.97	88.81	93.55	100.00	-100.00	—	—	—	—	—	75.90	12.65	16.67
66 a	-100.00	-86.96	-34.29	40.00	23.81	68.75	20.00	75.00	-66.67	33.33	21.48	1.95	9.09

¹⁾ V_1 至 V_{10} 分别为 I 级 ($D < 2\text{ cm}$) 至 XI 级 ($38\text{ cm} \leq D < 42\text{ cm}$) 相邻 2 个径级间的动态指数 V_1 至 V_{10} are dynamic indexes of two adjacent diameter classes from class I ($D < 2\text{ cm}$) to class XI ($38\text{ cm} \leq D < 42\text{ cm}$). D : 基径 Basal diameter. V_{pi} : 忽略外部干扰时的种群动态指数 Population dynamic index ignoring external disturbances; V_{pi}' : 考虑外部随机干扰时的种群动态指数 Population dynamic index considering external random disturbance; P_{max} : 种群对外部随机干扰所承担的风险概率极大值 Maximum value of risk probability of the population to external random disturbance. —: 无数据 No datum.



—●—: 当前 At present; —○—: 未来 2 个径级时间后 After next two diameter class time; —▲—: 未来 4 个径级时间后 After next four diameter class time; —△—: 未来 6 个径级时间后 After next six diameter class time; —■—: 未来 8 个径级时间后 After next eight diameter class time; —□—: 未来 10 个径级时间后 After next ten diameter class time.

I: $D < 2\text{ cm}$; II: $2\text{ cm} \leq D < 6\text{ cm}$; III: $6\text{ cm} \leq D < 10\text{ cm}$; IV: $10\text{ cm} \leq D < 14\text{ cm}$; V: $14\text{ cm} \leq D < 18\text{ cm}$; VI: $18\text{ cm} \leq D < 22\text{ cm}$; VII: $22\text{ cm} \leq D < 26\text{ cm}$; VIII: $26\text{ cm} \leq D < 30\text{ cm}$; IX: $30\text{ cm} \leq D < 34\text{ cm}$; X: $34\text{ cm} \leq D < 38\text{ cm}$; XI: $38\text{ cm} \leq D < 42\text{ cm}$. D : 基径 Basal diameter.

图 6 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的数量动态时间序列预测

Fig. 6 Quantitative dynamic time sequence prediction of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province

未来4个径级时间后,除IV级个体数减少,V级个体数维持稳定,其余径级的个体数小幅增加;在未来6个径级时间后,除VI级个体数维持稳定,其余径级的个体数小幅增加;在未来8、10个径级时间后,各径级的个体数均增加。由此可知,在未来2、4、6、8、10个径级时间后,21 a种群幼苗和小树个体数较多,未来种群个体数趋于增加;66 a种群V级至XI级($38\text{ cm} \leq D < 42\text{ cm}$)个体数增多,I级($D < 2\text{ cm}$)至IV级个体数则下降,种群增长难以长期维持。

表4 浙江西门岛不同林龄秋茄树人工林种群的空间分布格局¹⁾

Table 4 Spatial distribution pattern of populations of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu et J. W. H. Yong plantations at different stand ages in Ximen Island of Zhejiang Province¹⁾

发育阶段 Developmental stage	21 a种群的空间分布格局 Spatial distribution pattern of 21 a population						66 a种群的空间分布格局 Spatial distribution pattern of 66 a population					
	<i>C</i>	<i>I</i>	<i>m</i> *	<i>PAI</i>	<i>k</i>	<i>C_a</i>	<i>C</i>	<i>I</i>	<i>m</i> *	<i>PAI</i>	<i>k</i>	<i>C_a</i>
幼苗 Seedling	2.98	1.98	2.91	3.14	0.47	2.14	—	—	—	—	—	—
小树 Small tree	4.51	3.51	14.92	1.31	3.25	0.31	1.64	0.64	1.60	1.66	1.51	0.66
大树 Big tree	0.92	-0.08	0.03	0.31	-1.44	-0.69	0.82	-0.18	2.64	0.94	-15.71	-0.06
老树 Old tree	—	—	—	—	—	—	0.69	-0.31	0.03	0.08	-1.08	-0.92

¹⁾ *C*: 扩散系数 Diffusing coefficient; *I*: 丛生指数 Clumping index; *m**: 平均拥挤度 Mean crowding; *PAI*: 聚块性指数 Patchiness index; *k*: 负二项参数 Negative binomial parameter; *C_a*: Cassie 指数 Cassie index. —: 无数据 No datum.

3 讨 论

3.1 浙江西门岛秋茄树人工林种群结构特征

秋茄树是中国分布纬度最广且最耐寒的真红树植物,是浙江省主要的红树造林物种,并且其成林均为秋茄树纯林^[25]。浙江西门岛是国内潮差值最大的海域,低高程使滩涂被海水淹没的时间相对较长,同时沉积物中的碱解氮、有效磷、速效钾、有机质和盐含量也相对较高^[25],但海水淹没时长仍在秋茄树最佳淹水时间之内^[26]。研究表明:低温使红树林植物枯黄、落叶,扰乱植物营养吸收^[27-29],降低叶片的光合速率^[30-31]等。当秋茄树幼苗遭受12℃低温胁迫后,长势会减弱;当秋茄树幼苗遭受5℃低温胁迫后,存活率会降低^[32]。根据浙江省气候中心资料记录,1951—2012年浙江省冬季平均气温不超过9℃,大部分年份冬季平均气温为5~8℃^[33]。因此,冬季低温可能是影响西门岛21和66 a秋茄树人工林个体生长发育和种群发展的主要因子。与低纬度地区的秋茄树人工林^[34-36]和天然林^[11,35,37-39]相比,西门岛秋茄树人工林的植株更为矮小。如66 a种群秋茄树平均株高为1.37 m,不足福建九龙江口48 a种群平

2.6 空间分布格局分析

对2个林龄秋茄树种群不同发育阶段的聚集度指标进行分析,结果(表4)显示:21 a种群幼苗、小树及66 a种群小树的扩散系数和聚块性指数大于1,丛生指数、负二项参数和Cassie指数大于0,说明此类种群个体呈聚集分布;21 a种群大树和66 a种群大树、老树的扩散系数和聚块性指数小于1,丛生指数、负二项参数和Cassie指数小于0,说明此类种群个体呈均匀分布。

均株高(7.12 m)^[34]的1/5,约是福建福鼎7 a种群平均株高(1.80 m)^[35]的3/4。西门岛秋茄树人工林的密度更高,尤其是21 a种群密度达到3.11 m⁻²,是福建九龙江口24 a种群和福鼎7 a种群密度(1.54和1.02 m⁻²)^[34-35]的2倍多。密度过高会影响秋茄树树冠的发展,如西门岛21 a种群秋茄树的平均冠幅(0.52 m)是福鼎7 a种群(1.10 m)^[35]的1/2左右。有研究表明:秋茄树的种群密度与基径呈显著负相关,密度增加使得个体间的竞争加剧,尤其是对光照和空间的竞争,导致基径增长受限^[36]。与福鼎7 a种群^[35]相比,西门岛21 a种群密度为其2倍以上,平均基径约为其1/3,而西门岛66 a种群与福鼎7 a种群密度相近,二者的平均基径差异不明显,径级结构也较为相似。因此,西门岛21 a种群密度过高不利于秋茄树生长。

3.2 浙江西门岛秋茄树人工林种群动态变化

年龄结构是反映植物种群动态的重要指标,年龄结构变化直接影响种群的更新和稳定^[40]。在植物生活史中,幼苗阶段既是个体生长最为脆弱、对外界环境变化最为敏感的时期,也是种群数量变化最大的时期,幼苗能否成功定居并生长发育为成熟植株是影响种群发展方向的关键^[12,41-42]。西门岛21 a秋茄树人

工林种群的幼苗和小树个体数较多,而66 a秋茄树人工林种群的幼苗和小树个体数较少,大树个体数最多。在21 a秋茄树人工林中幼苗和小树成长为大树时的死亡率超过85%,这可能是种群密度过大,种内激烈竞争所致。66 a种群各龄级死亡率相对稳定,种群存活曲线符合Deevey-II型,与广西红树混生林内的秋茄树种群存活曲线一致^[11],与福建福鼎秋茄树天然林种群的存活曲线(Deevey-III型)不一致^[16],说明西门岛秋茄树人工林虽然不存在其他红树物种的竞争,但其生存环境不如天然分布区域,存活个体径级增大后死亡率仍很高。从种群动态指数分析可得,西门岛2个林龄秋茄树人工林种群整体呈增长趋势,但对当地的生存环境适应性不强,对外界干扰敏感度较高,若是处于不利的生长环境中,种群增长将会受到严重影响。秋茄树虽适应了西门岛的生存环境并且成林,但2个种群的幼苗死亡率过高。有研究发现,受乐清湾内强潮差、极端天气及藤壶(*Balanus* spp.)的影响,西门岛秋茄幼苗的存活率随高程降低而明显下降,幼苗长势也逐渐变差,在高程1.03 m处株龄3 a的秋茄树幼苗全部死亡^[26]。66 a秋茄树人工林种群时间序列预测显示:未来V级($14\text{ cm} \leq D < 18\text{ cm}$)至XI级($38\text{ cm} \leq D < 42\text{ cm}$)个体数逐渐增多,I级($D < 2\text{ cm}$)至IV级($14\text{ cm} \leq D < 18\text{ cm}$)个体数则下降,种群维持长期的增长性比较困难。笔者在野外方调查中发现长有胚轴的成树比例约5.4%。如果胚轴能够成功发育成幼苗,则该种群仍具有一定的更新潜力。因此,后续可开展秋茄树胚轴育苗研究。

3.3 浙江西门岛秋茄树人工林种群空间分布格局

植物种群空间分布格局是种群生态学的核心内容之一,反映了种群对环境的适应和自然选择的结果。种群空间分布格局是多种生态过程共同作用的结果,如生境异质性、扩散限制、密度制约和随机作用等^[43]。对广西、福建等红树天然混生林中的秋茄树种群空间分布格局研究发现,在较强的种间竞争下秋茄树种群多呈现聚集分布格局^[38,44]。西门岛秋茄树人工林21 a种群的幼苗和小树及66 a种群的小树呈现聚集分布格局,而21 a种群的大树及66 a种群的大树和老树则呈现均匀分布格局。相对于秋茄树天然的纯林和混生林,西门岛秋茄树人工林在种植时会人为地控制幼苗间距,使得种群幼苗个体在空间配置上较为规则均匀。但随着幼苗对环境的适应和自然选择,强潮差、极端低温、污损生物藤壶^[26]、人为干扰

和种群内的个体竞争等导致幼苗大量死亡,存活的幼苗及长成的小树逐渐趋于聚集分布。然而,在长期的冬季低温影响下,聚集分布的小树会出现大量个体生长限制甚至死亡,随后大树和老树在空间上呈现出随机均匀分布。

3.4 浙江西门岛秋茄树人工林保护对策

2个林龄的秋茄树人工林种群位于西门岛海洋特别保护区,鉴于2个种群属于增长型群体,且对环境干扰敏感度较高,建议加强科学养护。2个种群的幼苗死亡率均较高,但种群结构及其动态变化有较大差异,建议对21 a种群加强保护,减少人类活动干扰,在林内植株聚集程度较高处适当间伐幼苗以减小种内竞争,给幼苗生长留出更多的空间;对于66 a种群,应在相对空旷的滩涂适当补种幼苗,并可适当修复潮沟等微生境条件促使胚轴能够自然萌发和生长。同时,还需要进一步加强跟踪研究,监测种群个体生长动态和幼苗个体生长情况,为秋茄树人工林的后续营造和管理提供指导。

参考文献:

- [1] SANDILYAN S, KATHIRESAN K. Mangrove conservation: a global perspective[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2012, 21: 3523-3542.
- [2] ROMAÑACH S S, DEANGELIS D L, KOH H L, et al. Conservation and restoration of mangroves: global status, perspectives, and prognosis[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2018, 154: 72-82.
- [3] 但新球, 廖宝文, 吴照柏, 等. 中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(7): 1237-1243.
- [4] 张涛, 何芸, 尤淑撑, 等. 卫星遥感监测服务中国红树林生态系统保护与修复[J]. *卫星应用*, 2023(11): 14-19.
- [5] 陈秋夏, 杨升, 王金旺, 等. 浙江红树林发展历程及探讨[J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(7): 1177-1181.
- [6] 牟友爱, 刘际建, 杨建青, 等. 我国最北缘秋茄红树林引种试验调查[J]. *防护林科技*, 2005(增刊1): 6-8.
- [7] 李文君, 饶义勇, 林怡雯, 等. 西门岛潮间带秋茄与互花米草生境秋季大型底栖动物群落比较[J]. *泉州师范学院学报*, 2017, 35(2): 1-7.
- [8] 朱慧兰, 郭玉清, 吴成业, 等. 浙江西门岛红树林湿地小型底栖动物的研究[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2020, 25(4): 241-247.
- [9] 曹明兰, 宋豫秦, 李亚东. 浙南红树林的生态服务价值研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(11): 157-160.
- [10] 张亚芳, 李登武, 王梅, 等. 黄土高原不同地区杜松种群结构与动态[J]. *林业科学*, 2015, 51(2): 1-10.
- [11] 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.

- [12] 梁士楚, 蒋潇潇, 李 峰. 广西英罗港红树植物木榄种群年龄结构的研究[J]. 海洋学研究, 2008, 26(4): 35-40.
- [13] 罗 西, 郭秋菊, 姚 兰, 等. 濒危植物鹅掌楸的天然种群结构特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(7): 115-123.
- [14] 金彬明, 陈少波, 艾为民. 浙江温州红树林湿地资源及其保护开发[J]. 水利渔业, 2005, 25(2): 61-63.
- [15] 王雪峰, 陆元昌. 现代森林测定法[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013; 21-22.
- [16] 何东进, 肖石红, 李晓景, 等. 中国红树林北缘区秋茄树种群空间分布格局和结构特征分析[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(2): 41-47.
- [17] 李乃伟, 吴宝成, 庄维兵, 等. 江苏宝华山宝华玉兰种群结构与动态特征分析[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(5): 98-105.
- [18] 杨 彪, 张全建, 龚 旭, 等. 雅砻江冬麻豆(*Salweenia bouffordiana*)种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1184-1194.
- [19] HETT J M, LOUCKS O L. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock[J]. Journal of Ecology, 1976, 64(3): 1029-1044.
- [20] 陈科屹, 张会儒, 张 博, 等. 长白山北坡天然次生林典型建群种的种群结构及动态特征[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5142-5152.
- [21] 王兴龙, 程建军, 张 庆, 等. 牯牛降自然保护区浙江桂生境群落及种群结构特征[J]. 生态学报, 2024, 44(19): 8844-8853.
- [22] 姜在民, 和子森, 宿 昊, 等. 濒危植物羽叶丁香种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2471-2480.
- [23] 朱美菲, 韩政伟, 雷春英, 等. 准噶尔盆地荒漠绿洲过渡带地下水埋深对人工梭梭林年龄结构及动态特征的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(19): 8688-8698.
- [24] 雷 颖, 何雪娜, 王佳敏, 等. 重庆喀斯特生境中桢楠种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4903-4911.
- [25] 吴伟志, 赵志霞, 杨 升, 等. 浙江省红树林分布和造林成效分析[J]. 热带海洋学报, 2022, 41(6): 67-74.
- [26] 仇建标, 黄 丽, 陈少波, 等. 强潮差海域秋茄生长的宜林临界线[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1252-1257.
- [27] WANG W Q, YOU S Y, WANG Y B, et al. Influence of frost on nutrient resorption during leaf senescence in a mangrove at its latitudinal limit of distribution[J]. Plant and Soil, 2011, 342: 105-115.
- [28] 林益明, 林建辉, 林 鹏. 红树植物秋茄次生木质部生态解剖学的比较[J]. 台湾海峡, 1998, 17(2): 219-223.
- [29] 陈鹭真, 王文卿, 张宜辉, 等. 2008年南方低温对我国红树植物的破坏作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 186-194.
- [30] 杨盛昌, 林 鹏, 李振基, 等. 夜间低温对红树幼苗光合特性的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1999, 38(4): 617-622.
- [31] KAO W Y, SHIH C N, TSAI T T. Sensitivity to chilling temperatures and distribution differ in the mangrove species *Kandelia candel* and *Avicennia marina*[J]. Tree Physiology, 2004, 24: 859-864.
- [32] 林 捷. 秋茄幼苗对低温胁迫的生理响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014: 12-15.
- [33] 张 青. 浙江省近百年气温变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015: 11-13, 37-38.
- [34] 金 亮, 卢昌义. 秋茄中龄林和成熟林凋落物量及其动态特征[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(4): 611-616.
- [35] 李晓景. 闽东沿海秋茄红树林天然林生态学特征及其与人工林的比较研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010: 16.
- [36] NGUYEN T K C, HA T H. Stand structure and above ground biomass of *Kandelia obovata* Sheue, H. Y. Liu & J. Yong mangrove plantations in Northern, Viet Nam [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 483: 118720.
- [37] 廖宝文, 管 伟, 章家恩, 等. 珠海市淇澳岛红树林群落发展动态研究[J]. 华南农业大学学报, 2008, 29(4): 59-64.
- [38] 廖雨霞, 潘良浩, 阎 冰, 等. 广西廉州湾红树林群落分布特征及物种多样性分析[J]. 广西科学院学报, 2020, 36(4): 361-370.
- [39] 王佳燕. 海南东寨港几种红树植物主要生长特征因子间的关系研究[D]. 海口: 华南热带农业大学, 2007: 14.
- [40] 卢 晶, 马宗祺, 高鹏斐, 等. 祁连山区演替先锋物种西藏沙棘的种群结构及动态对海拔梯度的响应[J]. 植物生态学报, 2022, 46(5): 569-579.
- [41] 王燕玲, 招礼军, 朱栗琼, 等. 广西天然红鳞蒲桃种群幼苗数量特征及动态分析[J]. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1278-1286.
- [42] 吴语嫣, 李守中, 孙睦涛, 等. 长汀水土流失区侵蚀劣地马尾松种群动态[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2082-2089.
- [43] 温智峰, 魏识广, 李 林, 等. 亚热带不同纬度森林群落物种空间分布格局[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9153-9164.
- [44] 吴 筠. 福建漳江口红树林数量特征及其退化机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008: 18-19.

(责任编辑: 吴芯夷)