

# 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木的种群结构及动态特征

王 如<sup>a,b</sup>, 廖立国<sup>a,b</sup>, 杨 佳<sup>a,b</sup>, 王小燕<sup>a,b</sup>, 段左俊<sup>a,b</sup>, 张碧嘉<sup>a,b,①</sup>

[海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院): a. 海南省热带林业资源监测与应用重点实验室,  
b. 海口市湿地保护工程技术研究开发中心, 海南海口 571100]

**摘要:** 为探究濒危植物海南紫荆木(*Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How)的种群结构与动态特征,以海南岛尖峰岭林区内天然分布的海南紫荆木种群为研究对象,在充分野外调查的基础上,基于胸径(DBH)分析了种群的年龄结构,并分析了种群的动态指数、静态生命表、存活曲线、死亡率曲线、消失率曲线、生存力和空间分布格局。结果表明:Ⅱ级(2.5 cm≤DBH<7.5 cm)和Ⅲ级(7.5 cm≤DBH<12.5 cm)个体数明显多于其他径级,V级(17.5 cm≤DBH<22.5 cm)和Ⅵ级(22.5 cm≤DBH<27.5 cm)个体数较多。从种群动态指数看,该海南紫荆木种群呈现“衰退—增长—衰退”的动态变化趋势;忽略外界干扰时的种群动态指数( $V_{pi}$ )和考虑外界干扰时的种群动态指数( $V_{pi}'$ )分别为17.86%和0.44%,种群对外界随机干扰所承担的最大风险概率( $P_{max}$ )为2.78%,说明该种群呈增长趋势,且对外界随机干扰的敏感性强。该种群的生命期望随着径级增大而降低,且存活曲线趋近于Deevey-Ⅱ型。种群的死亡率和消失率整体上随径级增大而升高,而存活个体数量则随着径级增大而减少。生存力分析结果显示:该种群在幼龄期易受到外界的影响,并在生长中后期面临较高的死亡风险,种群生存力较低。另外,从空间分布格局看,该种群呈聚集分布。综上所述,海南岛尖峰岭林区的海南紫荆木种群缺少幼苗个体,种群稳定性较差,易受外界干扰,建议通过原地保护、扩繁及人工补植幼苗等方式实现种群更新和恢复。

**关键词:** 海南紫荆木; 濒危植物; 种群结构; 静态生命表; 生存力分析; 空间分布格局

中图分类号: Q948.15; S792.99; X176 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)06-0011-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.06.02

**Population structure and dynamic characteristics of *Madhuca hainanensis* in Jianfengling forest area of Hainan Island, China** WANG Ru<sup>a,b</sup>, LIAO Ligu<sup>a,b</sup>, YANG Jia<sup>a,b</sup>, WANG Xiaoyan<sup>a,b</sup>, DUAN Zuojun<sup>a,b</sup>, ZHANG Bijia<sup>a,b,①</sup> [Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove): a. Key Laboratory of Tropical Forestry Resources Monitoring and Application of Hainan Province, b. Haikou Wetland Protection Engineering Technology Research and Development Center, Haikou 571100, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(6): 11-19, 31

**Abstract:** To investigate the population structure and dynamic characteristics of the endangered plant *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How, the population of *M. hainanensis* naturally distributed in Jianfengling forest area of Hainan Island, China was taken as the research object. Based on sufficient field investigations, the age structure of the population was analyzed using diameter at breast height (DBH). Furthermore, the population dynamic indexes, static life table, survival curve, mortality rate curve, disappearance rate curve, viability, and spatial distribution pattern were analyzed. The results show that the number of individuals in class Ⅱ (2.5 cm≤DBH<7.5 cm) and class Ⅲ (7.5 cm≤DBH<12.5 cm) is significantly higher than that in other diameter classes, that in class V (17.5 cm≤DBH<22.5 cm) and class Ⅵ (22.5 cm≤DBH<27.5 cm) is relatively high. In terms of population dynamic indexes, the population of *M. hainanensis* exhibits a dynamic trend of “decline-growth-decline”. The population

收稿日期: 2025-03-21

基金项目: 海南省省属科研院所技术创新项目(KYYSLK2023-013)

作者简介: 王 如(1989—),女,黎族,海南五指山人,本科,工程师,主要从事珍稀濒危植物保育研究。

①通信作者 E-mail: zbjia1998@163.com

引用格式: 王 如, 廖立国, 杨 佳, 等. 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木的种群结构及动态特征[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(6): 11-19, 31.

dynamic index without considering external disturbance ( $V_{pi}$ ) and that considering external disturbance ( $V_{pi}'$ ) are 17.86% and 0.44%, respectively. The maximum risk probability of the population to external random disturbance ( $P_{max}$ ) is 2.78%, indicating that the population is in a growth trend and extremely sensitive to external random disturbance. The life expectancy of the population decreases with the increase of diameter class, and the survival curve approaches Deevey-II type. The mortality rate and disappearance rate of the population generally increase with the increase of diameter class, while the number of surviving individuals decreases with the increase of diameter class. Viability analysis results show that the population is vulnerable to external disturbance in its juvenile stage, and faces relatively high mortality risks in the mid-to-late growth stages, so the population viability is relatively low. Additionally, the population exhibits an aggregated distribution from the perspective of spatial distribution pattern. In summary, the population of *M. hainanensis* in Jianfengling forest area of Hainan Island lacks juvenile individuals, has a poor population stability, and is susceptible to external disturbance. It is recommended to promote population renewal and restoration by *in situ* conservation, expanding propagation, artificial planting of seedlings, etc.

**Key words:** *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How; endangered plant; population structure; static life table; viability analysis; spatial distribution pattern

种群结构是种群内个体与外界环境相互作用的结果,包括种群内个体的年龄、数量及空间分布情况,能够反映种群的现状与未来趋势<sup>[1-2]</sup>。种群动态是指种群大小和数量结构随着时间延续的变化规律,能够预测种群的未来发展趋势<sup>[3-4]</sup>。基于静态生命表、存活曲线、空间分布格局等不仅能够揭示植物种群的生存现状及其对环境的适应度,还能有效量化种群受干扰程度,预测种群未来发展趋势<sup>[5]</sup>。根据种群生活史理论,植物种群动态变化既受内部生物因子影响,也受外部环境因子制约<sup>[6-7]</sup>。在全球背景下,温度和降水量等的变化可能会显著影响植物的种群动态<sup>[8]</sup>。随着全球气候变暖加剧,地球生境遭到严重破坏,增加了物种灭绝的风险<sup>[9]</sup>。近年来,关于濒危植物的研究与保护越来越受到人们的关注和重视<sup>[10-11]</sup>。开展濒危植物种群结构与动态特征研究,有助于深入了解相关植物种群的数量特征、存活现状及未来发展趋势等,对珍稀濒危植物有效保护策略的制定和实施具有重要意义。

海南紫荆木(*Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How)为山榄科(Sapotaceae)紫荆木属(*Madhuca* J. F. Gmel.)常绿乔木,主要分布于海南省的三亚、乐东等地,个体数量少,属极小种群植物<sup>[12]</sup>。海南紫荆木为海南省特有种<sup>[13]</sup>和国家二级重点保护野生植物<sup>[14]</sup>,被世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)评为易危种(<https://www.iucnredlist.org>),并在《中国生物多样性红色名录—高等植物卷(2020)》<sup>[15]</sup>中被列为易危(VU)等级。目前关于海南紫荆木的研究报道较少,且主要集

中在种子萌发特征<sup>[16]</sup>、遗传多样性<sup>[17]</sup>和种间联结性<sup>[18]</sup>等方面,尚未见关于其种群结构动态特征和空间分布格局方面的研究报道。研究发现,海南紫荆木的果实为浆果,易脱水失活,种子存活率低且种子传播距离有限,导致其野生资源越来越稀缺<sup>[16]</sup>。此外,根据笔者所在项目团队的多年调查研究结果,受生境恶化及人类活动加剧的影响,海南紫荆木的野生种群数量锐减,野外生存面临巨大威胁(数据未发表)。

鉴于此,以海南紫荆木分布较为普遍的海南省热带雨林国家公园尖峰岭林区为研究区域,在充分野外调查的基础上,采用典型抽样法,从种群数量统计学角度深入探究海南紫荆木的种群结构和数量动态变化趋势,旨在明确海南紫荆木种群的生存现状、动态变化趋势和空间分布格局,以期为保护和恢复海南紫荆木种群提供理论依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区域为海南省热带雨林国家公园尖峰岭林区(北纬 18.23°~18.82°、东经 108.36°~109.05°),位于海南岛西南部,属于中国大陆性岛屿型热带雨林区。受印度洋季风、东亚季风及西北太平洋季风的影响,该区域属于典型的热带季风气候,旱雨季明显,年均降水量 2 500 mm,光照充足,年均气温 19.7~25.2 °C,年均空气相对湿度 88%<sup>[19]</sup>。尖峰岭林区是中国物种多样性较为丰富的地区之一,共有 233 科 988 属 2 287 种野生维管植物<sup>[20]</sup>。调查区域(海拔

250~1 000 m 的高山区域) 植被以常绿阔叶林为主, 且分布有海南紫荆木等珍稀濒危植物。乔木层种类有海南紫荆木、竹叶青冈[ *Quercus neglecta* (Schottky) Koidz.]、青梅( *Vatica mangachapoi* Blanco)、岭南山竹子( *Garcinia oblongifolia* Champ. ex Benth.)、白颜树( *Gironniera subaequalis* Planch.)、荔枝叶红豆( *Ormosia semicastrata* f. *litchiifolia* F. C. How)、红鳞蒲桃( *Syzygium hancei* Merr. et L. M. Perry)、华润楠[ *Machilus chinensis* (Champ. ex Benth.) Hemsl.]等; 灌木层种类有黄叶树( *Xanthophyllum hainanense* Hu)、显脉新木姜子( *Neolitsea phanerophlebia* Merr.)、粗毛野桐( *Hancea hookeriana* Seem.)、厚壳桂[ *Cryptocarya chinensis* (Hance) Hemsl.]、贡甲[ *Maclurodendron oligophlebium* (Merrill) T. G. Hartley]、丛花山矾( *Symplocos poilanei* Guill.)等; 草本层种类有露兜草( *Pandanus austrosinensis* T. L. Wu)、粗脉桂( *Cinnamomum validinerve* Hance)、尖蕾狗牙花( *Tabernaemontana bufalina* Lour.)、糙叶卷柏( *Selaginella scabrifolia* Ching et Chu H. Wang)、海南雀舌木[ *Leptopus hainanensis* (Merr. et Chun) Pojark.]、海南海金沙[ *Lygodium circinnatum* (Burm. f.) Sw.]等。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置及调查方法 在调查区域内共设置 21 个面积 20 m×20 m 的典型样地; 将每个样地划分成 4 个面积 10 m×10 m 的样方, 合计 84 个样方。使用集思宝 G639 GPS 手持机(北京合众思壮科技股份有限公司)测量每个样地的经度、纬度、海拔, 使用指

南针确定坡向, 根据树冠投影面积统计林分郁闭度, 并根据物种重要值确定各层次的优势种。各调查样地的基本情况见表 1。

于 2023 年 12 月至 2024 年 1 月, 对样方内胸径大于或等于 2.5 cm 的海南紫荆木进行每木检尺, 主要测量胸径和树高, 并统计胸径小于 2.5 cm 的海南紫荆木个体数。使用胸径尺(精度 1 cm)测量距地面 1.3 m 处树干的直径, 即胸径; 使用测高仪(精度 1 cm)测量树干基部到树冠顶部的距离, 即树高。

1.2.2 龄级划分 采用径级代替龄级的方法<sup>[21-22]</sup>分析海南紫荆木种群的年龄结构。根据样地内海南紫荆木胸径(DBH)的调查数据, 划分成 I (DBH<2.5 cm)、II (2.5 cm≤DBH<7.5 cm)、III (7.5 cm≤DBH<12.5 cm)、IV (12.5 cm≤DBH<17.5 cm)、V (17.5 cm≤DBH<22.5 cm)、VI (22.5 cm≤DBH<27.5 cm)、VII (27.5 cm≤DBH<32.5 cm)、VIII (32.5 cm≤DBH<37.5 cm)、IX (DBH≥37.5 cm) 9 个龄级, 其中, I 级为幼苗, II 级和 III 级为幼树, IV 级和 V 级为小树, VI 级和 VII 级为中树, VIII 级和 IX 级为大树。统计每个径级的个体数, 据此进行后续分析。

1.2.3 种群动态分析 参考陈晓德<sup>[23]</sup>的方法, 采用相邻径级的种群动态指数( $V_n$ )、忽略外界干扰时的种群动态指数( $V_{pi}$ )、考虑外界干扰时的种群动态指数( $V_{pi}'$ )和种群对外界随机干扰所承担的最大风险概率( $P_{max}$ )进行种群动态分析。前 3 个指数为正值、负值、零时分别表征种群个体数增加、减少、稳定。 $P_{max}$  值越大, 表明种群对外界干扰的敏感性越强。

表 1 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群调查样地的基本情况<sup>1)</sup>

Table 1 Basic situation of survey plots of *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How population in Jianfengling forest area of Hainan Island, China<sup>1)</sup>

样地 Plot	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	郁闭度/% Crown density	乔木层优势种 Dominant species in tree layer	灌木层优势种 Dominant species in shrub layer	草本层优势种 Dominant species in herb layer
P01	N18.68°	E108.86°	688	东北 Northeast	70	Cf	Xh, Mc	
P02	N18.68°	E108.88°	616	东北 Northeast	70	Qn		
P03	N18.71°	E108.87°	902	南 South	70	Cc1	Np, Dm	
P04	N18.67°	E108.88°	749	北 North	75	Ct	Hh	Pa
P05	N18.72°	E108.94°	473	北 North	80	Os	Cc2	
P06	N18.70°	E108.93°	507	东北 Northeast	85	Xh		
P07	N18.69°	E108.92°	581	北 North	80	Mh		
P08	N18.68°	E108.94°	575	东北 Northeast	85	Vm	Np, Of	
P09	N18.76°	E108.87°	929	南 South	65	Lf, Qb	Mo, Od	Aa
P10	N18.74°	E108.87°	994	东北 Northeast	75	Sc1, Cf	Sa, En	Cv
P11	N18.80°	E108.89°	843	西 West	75	Pm	Sc2	Ss1, Ph
P12	N18.80°	E108.90°	837	南 South	73	Mh, Qn	Sp, Mt	Ps, Aa

续表1 Table 1 (Continued)

样地 Plot	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	郁闭度/% Crown density	乔木层优势种 Dominant species in tree layer	灌木层优势种 Dominant species in shrub layer	草本层优势种 Dominant species in herb layer
P13	N18.77°	E108.98°	535	西北 Northwest	81	Qn, Mh	Mz, Ss2	Gt
P14	N18.77°	E108.96°	376	东南 Southeast	67	Qn, Vm	Mc, St1	St2
P15	N18.77°	E108.97°	428	西 West	75	Vm, Qn	Oi, Mz	Vm, Tb
P16	N18.75°	E108.99°	254	西北 Northwest	76	Mh, Vm	Os, Tm	Ss3, Ps
P17	N18.76°	E108.97°	284	东 East	71	Vm, Mh	Mz, St1	Es, Hl
P18	N18.78°	E108.99°	758	东 East	78	Dp, Ah	Ac, Od	
P19	N18.78°	E108.92°	615	南 South	68	Mc, Pi	Mz, Xh	Lh
P20	N18.78°	E108.97°	569	东 East	76	Mh, Ls	Go, Gc	Hc, St2
P21	N18.74°	E108.95°	594	北 North	82	Vm, Sh	Hh, Aq	Lc, Aa

<sup>1)</sup> Cf: 蕈蕨 *Castanopsis fissa* (Champ. ex Benth.) Rehder et E. H. Wilson; Xh: 黄叶树 *Xanthophyllum hainanense* Hu; Mc: 华润楠 *Machilus chinensis* (Champ. ex Benth.) Hemsl.; Qn: 竹叶青冈 *Quercus neglecta* (Schottky) Koidz.; Cc1: 米槠 *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata; Np: 显脉新木姜子 *Neolitsea phanerophlebia* Merr.; Dm: 柬埔寨子楝树 *Decaspermum montanum* Ridl.; Ct: 公孙锥 *Castanopsis tonkinensis* Seemen; Hh: 粗毛野桐 *Hancea hookeriana* Seem.; Pa: 露兜草 *Pandanus austrosinensis* T. L. Wu; Os: 荔枝叶红豆 *Ormosia semicastrata* f. *litchifolia* F. C. How; Cc2: 厚壳桂 *Cryptocarya chinensis* (Hance) Hemsl.; Mh: 海南紫荆木 *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How; Vm: 青梅 *Vatica mangachapoi* Blanco; Of: 肥荚红豆 *Ormosia fordiana* Oliv.; Lf: 红柯 *Lithocarpus fenzelianus* A. Camus; Qb: 栲子青冈 *Quercus blakei* Skan; Mo: 贡甲 *Maclurodendron oligophlebium* (Merrill) T. G. Hartley; Od: 异株木樨榄 *Olea dioica* Roxb.; Aa: 射毛悬竹 *Ampelocalamus actinotrichus* (Merr. et Chun) S. L. Chen, T. H. Wen et G. Y. Sheng; Se1: 子凌蒲桃 *Syzygium championii* (Benth.) Merr. et L. M. Perry; Sa: 腺叶山矾 *Symplocos adenophylla* Wall.; En: 细齿叶柃 *Eurya nitida* Korth.; Cv: 粗脉桂 *Cinnamomum validinerve* Hance; Pm: 多萼核果茶 *Pyrenaria multiseptata* (Merr. et Chun) H. Keng; Sc2: 厚梗柴木树 *Saprosma crassipes* H. S. Lo; Ss1: 山竹仔 *Semiarundinaria shapoensis* McClure; Ph: 海南大头茶 *Polyspora hainanensis* (Hung T. Chang) C. X. Ye ex Bartholomew et Ming; Sp: 丛花山矾 *Symplocos poilanei* Guill.; Mt: 野桐 *Mallotus tenuifolius* Pax; Ps: 单叶新月蕨 *Pronephrium simplex* (Hook.) Holttum; Mz: 香润楠 *Machilus zuihoensis* Hayata; Ss2: 木荷 *Schima superba* Gardner et Champ.; Gt: 黑莎草 *Gahnia tristis* Nees; St1: 方枝蒲桃 *Syzygium tephrodes* (Hance) Merr. et L. M. Perry; St2: 高秆珍珠茅 *Scleria terrestris* (Linn.) Fassett; Oi: 金莲木 *Ochna integerrima* (Lour.) Merr.; Tb: 尖蕾狗牙花 *Tabernaemontana bufalina* Lour.; Tm: 白花苦灯笼 *Tarenna mollissima* (Hook. et Arn.) B. L. Rob.; Ss3: 糙叶卷柏 *Selaginella scabrifolia* Ching et Chu H. Wang; Es: 凤轮桐 *Epiprinus siletianus* (Baill.) Croizat; Hl: 银叶树 *Heritiera littoralis* Dryand.; Dp: 陆均松 *Dacrydium pectinatum* de Laub.; Ah: 海南豆蔻 *Amomum hainanense* Y. S. Ye, J. P. Liao et P. Zou; Ac: 朱砂根 *Ardisia crenata* Sims; Pi: 假鹊肾树 *Pseudostreblus indicus* Bureau; Lh: 海南雀舌木 *Leptopus hainanensis* (Merr. et Chun) Pojark.; Ls: 大叶蒲葵 *Livistona saribus* (Lour.) Merr. ex A. Chev.; Go: 岭南山竹子 *Garcinia oblongifolia* Champ. ex Benth.; Gc: 红算盘子 *Glochidion coccineum* (Buch.-Ham.) Müll. Arg.; Hc: 大众耳草 *Hedyotis communis* W. C. Ko; Sh: 红鳞蒲桃 *Syzygium hancei* Merr. et L. M. Perry; Aq: 罗伞树 *Ardisia quinqueгона* Blume; Lc: 南海金沙 *Lygodium circinnatum* (Burm. f.) Sw.

1.2.4 静态生命表编制及曲线分析 对各径级的实际存活个体数进行匀滑处理,据此编制海南紫荆木种群静态生命表。以径级为自变量,各径级的标准化存活个体数的自然对数、死亡率、消失率为因变量,分别绘制种群存活曲线、死亡率曲线和消失率曲线。根据 Hett 等<sup>[24]</sup>提出的 Deevey-Ⅱ和 Deevey-Ⅲ型曲线,检验海南紫荆木种群的存活曲线类型。

1.2.5 生存力分析 为更好地揭示海南紫荆木种群的动态变化规律,采用生存率函数、累计死亡率函数、死亡密度函数和危险率函数进行生存力分析<sup>[25]</sup>。

1.2.6 空间分布格局分析 参照郑元润<sup>[26]</sup>和雷颖等<sup>[27]</sup>的方法,采用扩散系数( $C$ )判断海南紫荆木种群的空间分布格局,同时使用负二项参数( $K$ )、丛生指数( $I$ )、平均拥挤度( $M^*$ )、斑块聚集指数( $PAI$ )和 Cassie 指数( $C_a$ )进行分析。

### 1.3 数据分析

使用 EXCEL 2016 软件进行数据整理和统计分析;使用 R 5.1.1 软件进行模型拟合;使用 Origin 2024 软件绘图。

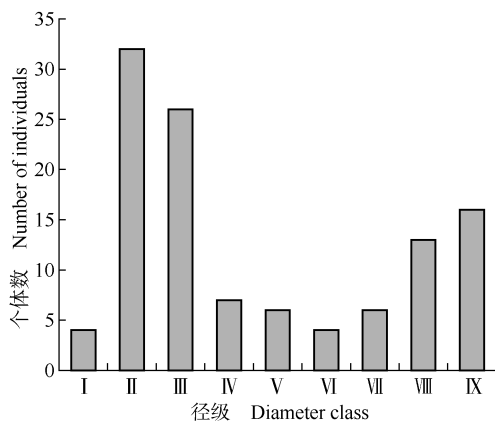
## 2 结果和分析

### 2.1 种群径级结构及动态变化分析

统计结果(图1)显示:I级( $DBH < 2.5$  cm)和VI级( $22.5$  cm  $\leq$   $DBH < 27.5$  cm)个体数相等且最少,种群个体主要集中在II级( $2.5$  cm  $\leq$   $DBH < 7.5$  cm)和III级( $7.5$  cm  $\leq$   $DBH < 12.5$  cm),共有58株,总占比达50.9%;IV级( $12.5$  cm  $\leq$   $DBH < 17.5$  cm)个体数较III级急剧减少;V级( $17.5$  cm  $\leq$   $DBH < 22.5$  cm)和VI级个体数逐渐减少,VII级( $27.5$  cm  $\leq$   $DBH < 32.5$  cm)至IX级( $DBH \geq 37.5$  cm)个体数明显回升。比较来看,该海南紫荆木种群的幼树较多,幼苗、小树和中树较少,说明该种群严重缺乏幼苗,在幼树成长过程中个体死亡率较高,且在对资源的竞争上处于劣势。

从种群动态指数(表2)看, $V_1$ 、 $V_6$ 、 $V_7$ 和 $V_8$ 均小于0%,说明海南紫荆木种群从I级向II级、VI级向VII级、VII级向VIII级( $32.5$  cm  $\leq$   $DBH < 37.5$  cm)、VIII级向IX级过渡时个体数减少; $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 、 $V_5$ 均大于0%,说

明该种群从 II 级向 III 级、III 级向 IV 级、IV 级向 V 级、V 级向 VI 级过渡时个体数增多。整体来看,海南岛尖峰岭林区的海南紫荆木种群动态变化呈现“衰退—增长—衰退”的趋势。该种群忽略外界干扰时的种群动态指数 ( $V_{pi}$ ) 和考虑外界干扰时的种群动态指数 ( $V_{pi}'$ ) 分别为 17.86% 和 0.44%, 二者均大于 0%, 且  $V_{pi}$  值为  $V_{pi}'$  值的 40 余倍, 说明该种群呈增长趋势; 种群对外界随机干扰所承担的最大风险概率 ( $P_{max}$ ) 为 2.78%, 说明该种群对外界随机干扰的敏感性强。



I : DBH<2.5 cm; II : 2.5 cm≤DBH<7.5 cm; III : 7.5 cm≤DBH<12.5 cm; IV : 12.5 cm≤DBH<17.5 cm; V : 17.5 cm≤DBH<22.5 cm; VI : 22.5 cm≤DBH<27.5 cm; VII : 27.5 cm≤DBH<32.5 cm; VIII : 32.5 cm≤DBH<37.5 cm; IX : DBH≥37.5 cm. DBH: 胸径 Diameter at breast height.

图 1 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的径级结构  
Fig. 1 Diameter class structure of *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How population in Jianfengling forest area of Hainan Island, China

表 3 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的静态生命表<sup>1)</sup>

Table 3 Static life table of *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How population in Jianfengling forest area of Hainan Island, China<sup>1)</sup>

径级 Diameter class	$a_x$	$l_x$	$\ln l_x$	$d_x$	$q_x$	$L_x$	$T_x$	$e_x$	$K_x$	$S_x$
I (DBH<2.5 cm)	24	1 000	6.908	42	0.042	979	4 708	4.708	0.043	0.994
II (2.5 cm≤DBH<7.5 cm)	23	958	6.865	125	0.130	896	3 729	3.891	0.140	0.980
III (7.5 cm≤DBH<12.5 cm)	20	833	6.725	125	0.150	771	2 833	3.400	0.163	0.976
IV (12.5 cm≤DBH<17.5 cm)	17	708	6.563	125	0.176	646	2 063	2.912	0.194	0.970
V (17.5 cm≤DBH<22.5 cm)	14	583	6.369	125	0.214	521	1 417	2.429	0.241	0.962
VI (22.5 cm≤DBH<27.5 cm)	11	458	6.128	125	0.273	396	896	1.955	0.318	0.948
VII (27.5 cm≤DBH<32.5 cm)	8	333	5.809	125	0.375	271	500	1.500	0.470	0.919
VIII (32.5 cm≤DBH<37.5 cm)	5	208	5.339	83	0.400	167	229	1.100	0.511	0.904
IX (DBH≥37.5 cm)	3	125	4.828	—	—	—	63	0.500	—	—

<sup>1)</sup>  $a_x$ : 匀滑后  $x$  级的存活个体数 Number of surviving individuals after smoothing at class  $x$ ;  $l_x$ :  $x$  级的标准化存活个体数 Number of standardized surviving individuals at class  $x$ ;  $\ln l_x$ :  $x$  级标准化存活个体数的自然对数 The natural logarithm of number of standardized surviving individuals at class  $x$ ;  $d_x$ : 从  $x$  级到  $x+1$  级的死亡个体数 Number of mortality individuals from class  $x$  to class  $x+1$ ;  $q_x$ : 从  $x$  级到  $x+1$  级的死亡率 Mortality rate from class  $x$  to class  $x+1$ ;  $L_x$ : 从  $x$  级到  $x+1$  级的存活个体数 Number of surviving individuals from class  $x$  to class  $x+1$ ;  $T_x$ :  $x$  及以上级的存活个体总数 Total number of surviving individuals at  $x$  and above class;  $e_x$ :  $x$  级的生命期望 Life expectancy at class  $x$ ;  $K_x$ : 从  $x$  级到  $x+1$  级的消失率 Disappearance rate from class  $x$  to class  $x+1$ ;  $S_x$ : 从  $x$  级到  $x+1$  级的存活率 Survival rate from class  $x$  to class  $x+1$ . DBH: 胸径 Diameter at breast height. —: 无数据 No datum.

表 2 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群动态指数分析<sup>1)</sup>

Table 2 Analysis on dynamic indexes of *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How population in Jianfengling forest area of Hainan Island, China<sup>1)</sup>

动态指数 Dynamic index	数值/% Value	动态指数 Dynamic index	数值/% Value
$V_1$	-87.50	$V_7$	-53.85
$V_2$	18.75	$V_8$	-18.75
$V_3$	73.08	$V_{pi}$	17.86
$V_4$	14.29	$V_{pi}'$	0.44
$V_5$	33.33		
$V_6$	-33.33	$P_{max}$	2.78

<sup>1)</sup>  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8$ : 分别为 I 级 (DBH<2.5 cm) 到 II 级 (2.5 cm≤DBH<7.5 cm)、II 级到 III 级 (7.5 cm≤DBH<12.5 cm)、III 级到 IV 级 (12.5 cm≤DBH<17.5 cm)、IV 级到 V 级 (17.5 cm≤DBH<22.5 cm)、V 级到 VI 级 (22.5 cm≤DBH<27.5 cm)、VI 级到 VII 级 (27.5 cm≤DBH<32.5 cm)、VII 级到 VIII 级 (32.5 cm≤DBH<37.5 cm)、VIII 级到 IX 级 (DBH≥37.5 cm) 的动态指数 Dynamic indexes from class I (DBH<2.5 cm) to class II (2.5 cm≤DBH<7.5 cm), class II to class III (7.5 cm≤DBH<12.5 cm), class III to class IV (12.5 cm≤DBH<17.5 cm), class IV to class V (17.5 cm≤DBH<22.5 cm), class V to class VI (22.5 cm≤DBH<27.5 cm), class VI to class VII (27.5 cm≤DBH<32.5 cm), class VII to class VIII (32.5 cm≤DBH<37.5 cm), class VIII to class IX (DBH≥37.5 cm), respectively. DBH: 胸径 Diameter at breast height.  $V_{pi}$ : 忽略外界干扰时的种群动态指数 Population dynamic index without considering external disturbance;  $V_{pi}'$ : 考虑外界干扰时的种群动态指数 Population dynamic index considering external disturbance;  $P_{max}$ : 种群对外界随机干扰所承担的最大风险概率 The maximum risk probability of the population to external random disturbance.

## 2.2 种群静态生命表分析

从静态生命表(表 3)看,该海南紫荆木种群中 I 级(DBH<2.5 cm)至 III 级(7.5 cm≤DBH<12.5 cm)的存活个体数( $a_x$ )明显多于 VIII 级(32.5 cm≤DBH<37.5 cm)至 IX 级(DBH≥37.5 cm)。各龄级的标准化存活个体数( $l_x$ )及其到下一龄级的存活率( $S_x$ )均随着龄级增大而减少,各龄级到下一龄级的死亡率( $q_x$ )和消

失率( $K_x$ )则随着龄级增大而升高;从各龄级的生命期望( $e_x$ )看, I 级的  $e_x$  值最大, 为 4.708, 并且,  $e_x$  值随着龄级增大而逐渐降低。说明该种群中的老年个体更易受到外界环境干扰, 存活率低。

### 2.3 种群存活曲线及死亡率和消失率曲线分析

根据存活曲线模型检验结果(表 4), Deevey- II 和 Deevey- III 模型的拟合结果均达到极显著水平( $P < 0.001$ ); 比较而言, Deevey- II 模型的决定系数( $R^2$ )明显大于 Deevey- III 模型, 表明该海南紫荆木种群的存活曲线更趋近于 Deevey- II 型, 该种群在各生长发育阶段的死亡率基本相同。

从海南紫荆木种群的存活曲线(图 2)及死亡率和消失率曲线(图 3)看, 随着径级的增大, 海南紫荆木种群存活的个体数逐渐减少, 而死亡率和消失率却逐渐升高, 且均在 VIII 级(32.5 cm  $\leq$  DBH < 37.5 cm)达到最大值。

表 4 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的存活曲线检验模型<sup>1)</sup>  
Table 4 Test models of survival curves of *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How population in Jianfengling forest area of Hainan Island, China<sup>1)</sup>

模型 Model	方程 Equation	$R^2$	F 值 F value	P 值 P value
Deevey- II	$a_x = 27.212e^{0.263x}$	0.995	14.170	<0.001
Deevey- III	$a_x = 27.733x^{0.524}$	0.740	7.389	<0.001

<sup>1)</sup>  $x$ : 径级 Diameter class;  $a_x$ : 匀滑后  $x$  级的存活个体数 Number of surviving individuals after smoothing of class  $x$ .  $R^2$ : 决定系数 Coefficient of determination.

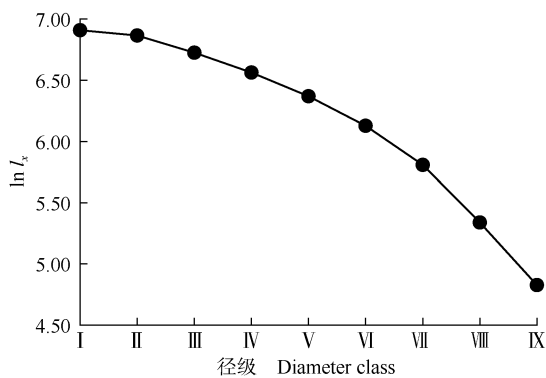
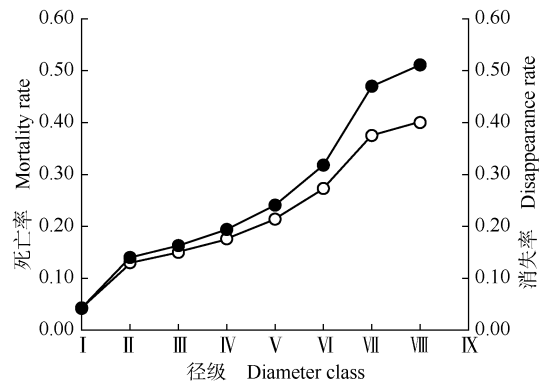


图 2 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的存活曲线  
Fig. 2 Survival curve of *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How population in Jianfengling forest area of Hainan Island, China



—○—: 死亡率 Mortality rate; —●—: 消失率 Disappearance rate. I: DBH < 2.5 cm; II: 2.5 cm  $\leq$  DBH < 7.5 cm; III: 7.5 cm  $\leq$  DBH < 12.5 cm; IV: 12.5 cm  $\leq$  DBH < 17.5 cm; V: 17.5 cm  $\leq$  DBH < 22.5 cm; VI: 22.5 cm  $\leq$  DBH < 27.5 cm; VII: 27.5 cm  $\leq$  DBH < 32.5 cm; VIII: 32.5 cm  $\leq$  DBH < 37.5 cm; IX: DBH  $\geq$  37.5 cm. DBH: 胸径 Diameter at breast height.

图 3 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的死亡率和消失率曲线  
Fig. 3 Mortality rate and disappearance rate curves of *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How population in Jianfengling forest area of Hainan Island, China

### 2.4 种群生存力分析

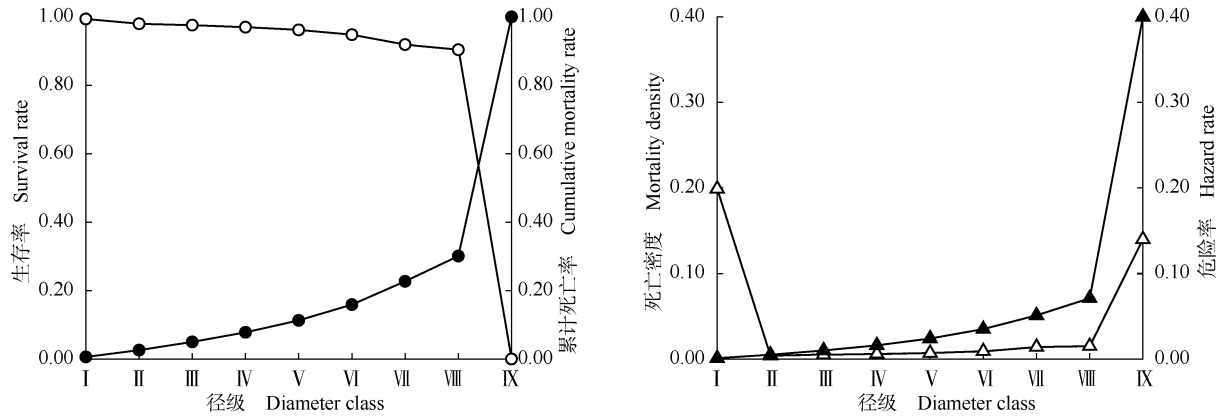
生存力分析结果(图 4)显示:海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的生存率呈现在 I 级(DBH < 2.5 cm)到 VIII 级(32.5 cm  $\leq$  DBH < 37.5 cm)缓慢下降、在 VIII 级到 IX 级(DBH  $\geq$  37.5 cm)大幅下降的趋势;累计死亡率的变化趋势与之完全相反。各个龄级的死亡密度均在 0.20 以下, 且在 I 级达到最大值, 在 I 级到 II 级(2.5 cm  $\leq$  DBH < 7.5 cm)急剧下降, 之后随着龄级的增大总体呈缓慢上升趋势, 且在 VIII 级大幅上升。该种群各径级的危险率均在 0.40 以下, 在 I 级到 VIII 级缓慢上升, 且在 IX 级大幅上升并达到最大值, 而且, 除 IX 级外, 其余龄级的危险率均保持在较低水平且均小于对应龄级的生存率。说明该海南紫荆木种群在幼龄期易受到外界的影响, 并在生长中后期存在较高的死亡风险, 呈现“前期锐减、中后期衰退”的特征, 整体来看, 种群的生存力较低。

### 2.5 种群空间分布格局分析

空间分布格局分析结果(表 5)显示:所有检测指标均大于 0, 且种群总体的 Cassie 指数( $C_a$ )为 9.44, 说明海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群呈聚集分布。扩散系数( $C$ )、丛生指数( $I$ )、平均拥挤度( $M^*$ )均在 II 级(2.5 cm  $\leq$  DBH < 7.5 cm)最大, 在 III 级(7.5 cm  $\leq$  DBH < 12.5 cm)次之;斑块聚集指数( $PAI$ )也在 II 级最大(11.63), 在 IX 级(DBH  $\geq$  37.5 cm)和 VIII 级(32.5

cm ≤ DBH < 37.5 cm) 较大, 在 I 级 (DBH < 2.5 cm) 和 VI 级 (22.5 cm ≤ DBH < 27.5 cm) 最小, 均仅为 3.00, 说明径级为 II 级时种群的聚集强度最大;  $C_a$  与 PAI 值在

各径级的变化规律一致。从上述指数看, 该海南紫荆木种群的聚集强度整体呈现“增大—减小—增大”的趋势, 且在径级为 II 级时最大。



—○—: 生存率 Survival rate; —●—: 累计死亡率 Cumulative mortality rate; —△—: 死亡密度 Mortality density; —▲—: 危险率 Hazard rate. I: DBH < 2.5 cm; II: 2.5 cm ≤ DBH < 7.5 cm; III: 7.5 cm ≤ DBH < 12.5 cm; IV: 12.5 cm ≤ DBH < 17.5 cm; V: 17.5 cm ≤ DBH < 22.5 cm; VI: 22.5 cm ≤ DBH < 27.5 cm; VII: 27.5 cm ≤ DBH < 32.5 cm; VIII: 32.5 cm ≤ DBH < 37.5 cm; IX: DBH ≥ 37.5 cm. DBH: 胸径 Diameter at breast height.

图 4 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的生存力分析

Fig. 4 Viability analysis of *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How population in Jianfengling forest area of Hainan Island, China

表 5 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的空间分布格局

Table 5 Spatial distribution pattern of *Madhuca hainanensis* Chun et F. C. How population in Jianfengling forest area of Hainan Island, China

径级 <sup>1)</sup> Diameter class <sup>1)</sup>	扩散系数 Coefficient of diffusion ( $C$ )	负二项指数 Negative binomial distribution index ( $K$ )	丛生指数 Clumping index ( $I$ )	平均拥挤度 Mean crowding ( $M^*$ )	斑块聚集指数 Patch aggregation index (PAI)	Cassie 指数 Cassie index ( $C_a$ )
I (DBH < 2.5 cm)	3.00	0.50	2.00	3.00	3.00	2.00
II (2.5 cm ≤ DBH < 7.5 cm)	29.33	0.09	28.33	31.00	11.63	10.63
III (7.5 cm ≤ DBH < 12.5 cm)	23.40	0.12	22.40	25.00	9.62	8.62
IV (12.5 cm ≤ DBH < 17.5 cm)	5.60	0.30	4.60	6.00	4.29	3.29
V (17.5 cm ≤ DBH < 22.5 cm)	4.80	0.32	3.80	5.00	4.17	3.17
VI (22.5 cm ≤ DBH < 27.5 cm)	3.00	0.50	2.00	3.00	3.00	2.00
VII (27.5 cm ≤ DBH < 32.5 cm)	4.50	0.43	3.50	5.00	3.33	2.33
VIII (32.5 cm ≤ DBH < 37.5 cm)	11.82	0.11	10.82	12.00	10.15	9.15
IX (DBH ≥ 37.5 cm)	14.67	0.10	13.67	15.00	11.25	10.25
总体 Total	17.06	0.11	16.06	17.76	10.44	9.44

<sup>1)</sup> DBH: 胸径 Diameter at breast height.

### 3 讨论和结论

#### 3.1 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的结构及数量动态特征

植物种群结构特征是自身生物学特性与长期适应环境共同作用的结果, 径级结构能够反映植物种群的动态变化<sup>[28-29]</sup>。供试海南岛尖峰岭林区内的海南紫荆木种群幼苗个体较少, 说明该种群严重缺乏幼苗

个体, 种群在成长过程中对资源竞争处于劣势, 暗示该种群更新困难<sup>[10]</sup>。供试海南紫荆木种群 I 级 (DBH < 2.5 cm) 到 II 级 (2.5 cm ≤ DBH < 7.5 cm)、VI 级 (22.5 cm ≤ DBH < 27.5 cm) 到 VII 级 (27.5 cm ≤ DBH < 32.5 cm)、VII 级到 VIII 级 (32.5 cm ≤ DBH < 37.5 cm)、VIII 级到 IX 级 (DBH ≥ 37.5 cm) 的种群动态指数均为负值, 说明幼苗及大树个体减少是海南紫荆木种群呈现衰退特征的主要原因。值得注意的是, 忽略外界干扰时的种群动态指数 ( $V_{pi}$ ) 明显大于 0%, 而考虑外界干

扰时的种群动态指数 ( $V_{pi}'$ ) 略大于 0%, 且种群对外界随机干扰所承担的最大风险概率 ( $P_{max}$ ) 也大于 0%, 说明海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群为易受外界干扰的增长型种群, 种群结构不稳定且抗干扰能力弱。比较来看, 该海南紫荆木种群的  $P_{max}$  值 (2.78%) 明显高于中卫香山和贺兰山甘沟的羽叶丁香 (*Syringa pinnatifolia* Hemsl.) 种群 ( $P_{max}$  值分别为 0.09% 和 0.05%)<sup>[10]</sup> 以及吊罗山的美丽火桐 (*Firmiana pulcherrima* H. H. Hsue) 种群 ( $P_{max}$  值为 1.82%)<sup>[30]</sup>, 说明海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的稳定性较低且抗干扰能力较弱。另外, 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的死亡率和消失率曲线进一步佐证了该种群的抗干扰能力弱。以上研究结果表明: 海南岛尖峰岭林区的海南紫荆木种群幼苗个体较少, 生存能力差, 种群更新困难, 难以维持种群的长期稳定。分析认为, 导致海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群幼苗个体缺乏可能与其种子难以萌发或幼苗对生长环境不适应有关<sup>[31-32]</sup>。

静态生命表和存活曲线能够直观地展现植物种群的年龄结构, 评估种群生存现状及种群个体对环境的适应性, 为珍稀濒危植物保护策略的制定提供科学依据和理论参考<sup>[33-34]</sup>。海南紫荆木种群从Ⅷ级到Ⅸ级的死亡率和消失率均最大, I 级的生命期望最大, 并且生命期望随着径级增大而减小。说明海南岛尖峰岭林区的海南紫荆木种群结构不稳定, 且随着龄级增大, 种群个体对环境的适应能力越来越弱, 究其原因可能是该种群所在群落中的竹叶青冈、青梅、白颜树等高大乔木与海南紫荆木争夺光照和水分资源, 不利于海南紫荆木生长, 致使海南紫荆木种群出现林分自疏现象<sup>[35]</sup>。根据种群存活曲线模型检验结果, 海南岛尖峰岭林区的海南紫荆木种群的存活曲线趋近于 Deevey - II 型, 表现为随着径级增大, 种群内存活的个体数缓慢减少, 推测可能是生境保护不力, 幼苗更新不足所致<sup>[36]</sup>。此外, 该海南紫荆木种群的死亡率和消失率均随着径级增大呈缓慢上升趋势, 说明海南岛尖峰岭林区的海南紫荆木种群个体在生长过程中逐渐衰亡, 推测这可能是生长环境与种群自我调节综合作用的结果<sup>[27]</sup>, 具体原因有待进一步深入研究。值得注意的是, 海南紫荆木属于喜光树种, 其在生长发育过程中对养分及光照的需求会越来越大<sup>[37]</sup>, 而海南岛尖峰岭林区内海南紫荆木种群所在林分的平均郁闭度达 75%, 说明该海南紫荆木种群处于高郁

闭度环境条件, 种群内个体的生长受到严重抑制, 导致部分竞争力较弱的成年个体无法进入林冠层<sup>[27]</sup>, 从而在一定程度上限制了种群的更新, 种群发展面临严峻挑战。

研究发现, 植物种群的年龄结构及数量动态特征与其生长环境中的养分、气候等因子密切相关<sup>[8,31]</sup>。生存函数能够直观地反映种群的结构与动态特征<sup>[38]</sup>。种群生存力分析结果表明: 海南紫荆木种群整体生存率呈不断降低的趋势, 累计死亡率则呈持续升高的趋势, 死亡密度和危险率从Ⅱ级开始缓慢升高, 具有“前期锐减、中后期衰退”的特点, 说明该种群有向衰退方向发展的趋势, 种群生存力低, 易被淘汰; 而且, 该种群中的幼龄个体易受到外界影响, 需要与其他物种争夺养分资源, 存在种群衰退风险<sup>[39]</sup>。

种群空间分布格局在很大程度上受到植物自身繁殖方式及环境因子的双重影响<sup>[27]</sup>。供试海南紫荆木种群的空间分布格局整体呈聚集分布, 这可能主要与海南紫荆木种子的散布方式有关。海南紫荆木果实呈卵球形至近球形, 种子为长圆状椭圆形<sup>[16]</sup>, 主要依靠风力传播, 传播距离不会太远, 多散布在母树周围, 形成聚集分布<sup>[40]</sup>。并且, 小径级个体生存所需资源较少, 竞争能力有限, 聚集分布有利于种群的稳定发展<sup>[40-41]</sup>。海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群不同发育阶段的聚集强度不同, 整体呈现“增大—减小—增大”的趋势。该海南紫荆木种群在Ⅱ级的聚集强度最大, 之后随着龄级增大而减小, 推测这是因为种群内个体为捕获更多的光照、水分等环境资源, 种间和种内竞争持续加剧, 导致个体数锐减、种群密度降低, 出现自疏与他疏现象<sup>[42-43]</sup>。但该海南紫荆木种群在Ⅷ级的聚集强度又开始增大, 这可能与取样面积有关。杜华强等<sup>[44]</sup>认为, 植株的空间格局随着尺度变化而变化, 具有强烈的尺度依赖性。本研究虽然布设了 21 个样地, 但样地面积仅 20 m×20 m, 且样地之间的距离较大, 可能对种群空间分布格局随龄级变化的结果造成一定的影响。综上, 由于生长繁殖机制、竞争机制、生境异质性等的影响, 海南岛尖峰岭林区的海南紫荆木种群在空间分布格局上有所差异。

### 3.2 海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群的保护策略

针对海南岛尖峰岭林区海南紫荆木种群以上现状, 建议从以下几个方面制定种群保护策略: 1) 采取原地保护措施, 并在原地保护的基础上进行科学管理。通过实施适度干扰管理措施 (如林窗构建、林下

灌丛清除等),构建有利于海南紫荆木幼苗定居的微生物条件,解除幼苗生长空间限制,以增强海南紫荆木种群的自然更新潜力。同时,将部分幼苗从聚集地移植到其他区域,以减轻种群内部的生存竞争,待幼苗长成小树后,再移植到适宜的野外区域,进而扩大海南紫荆木种群资源。2)加大科研力度。积极开展海南紫荆木种群的实生苗繁育工作(实生苗种子需从原生种群采集,避免出现遗传多样性降低等风险<sup>[45]</sup>),采取有效措施向原生种群中输入一定数量的实生苗,是快速保护和恢复海南紫荆木种群的一个关键措施。此外,还可围绕海南紫荆木开展生理生态学等领域的基础科学研究,分析其个体与种群的生长发育规律,揭示其濒危机制,为有效保护海南紫荆木种群多样性奠定理论基础。

### 3.3 结论

海南岛尖峰岭林区的海南紫荆木种群缺少幼苗个体,这可能是该种濒危的一个主要原因。另外,该种群虽然呈增长趋势,但种群稳定性较差,易受外界干扰,面临着严峻的生存风险,建议采取原地保护、扩繁及人工补植幼苗等方式实现种群更新和恢复。

#### 参考文献:

- [1] MASAKI T, OTA T, SUGITA H, et al. Structure and dynamics of tree populations within unsuccessful conifer plantations near the Shirakami Mountains, a snowy region of Japan [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 194: 389-401.
- [2] OMEILKO 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.
- [3] CHHETRI P K, BISTA R, CAIRNS D M. Population structure and dynamics of *Abies spectabilis* at treeline ecotone of Barun Valley, Makalu Barun National Park, Nepal [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36: 269-274.
- [4] 庞江豪,王业清,唐云龙,等. 濒危植物小勾儿茶及其变种毛柄小勾儿茶的种群结构与动态特征 [J]. *广西植物*, 2025, 45(1): 108-120.
- [5] 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.
- [6] YANOVIK S P, GORA E M, BITZER P M, et al. Lightning is a major cause of large tree mortality in a lowland neotropical forest [J]. *New Phytologist*, 2020, 225(5): 1936-1944.
- [7] STEARS A E, ADLER P B, BLUMENTHAL D M, et al. Water availability dictates how plant traits predict demographic rates [J]. *Ecology*, 2022, 103(11): e3799.
- [8] BUCKLEY Y M, PUY J. The macroecology of plant populations from local to global scales [J]. *New Phytologist*, 2022, 233(3): 1038-1050.
- [9] JONGEJANS E, DE KROON H, TULJAPURKAR S, et al. Plant populations track rather than buffer climate fluctuations [J]. *Ecology Letters*, 2010, 13: 736-743.
- [10] 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.
- [11] 王雨婷,刘旭婧,唐驰飞,等. 神农架极小种群植物庙台榭群落特征及种群动态 [J]. *植物生态学报*, 2024, 48(1): 80-91.
- [12] 莫锦华,李意德,许涵,等. 海南尖峰岭国家级自然保护区部分珍稀濒危植物的分布、生态与保护研究 [J]. *热带林业*, 2007, 35(4): 22-24, 16.
- [13] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第六十卷第一分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 56.
- [14] 国家林业和草原局,农业农村部. 国家重点保护野生植物名录 [EB/OL]. (2021-09-07) [2025-08-11]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content\\_5636409.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content_5636409.htm).
- [15] 生态环境部,中国科学院. 中国生物多样性红色名录: 高等植物卷(2020) [EB/OL]. (2023-05-18) [2025-08-11]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202305/W020230522536560832337.pdf>.
- [16] 段左俊,林波,陈飞飞,等. 海南紫荆木的种子发芽试验研究 [J]. *热带林业*, 2017, 45(1): 12-15.
- [17] WANG Y, WANG H T, CHEN Y K, et al. The complete chloroplast genome of *Madhuca hainanensis* (Sapotaceae), an endemic and endangered timber species in Hainan Island, China [J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2021, 6(3): 755-757.
- [18] 李婧涵,张顺卫,杨小波,等. 海南紫荆木群落物种组成及种间关联性 [J]. *南方农业学报*, 2024, 55(5): 1405-1415.
- [19] 周璋. 海南尖峰岭热带山地雨林小气候特征研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009: 18-20.
- [20] 许涵. 海南尖峰岭热带天然林物种多样性时空变化规律研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010: 15-20.
- [21] WU J X, ZHANG X M, DENG C Z, et al. Characteristics and dynamics analysis of *Populus euphratica* populations in the middle reaches of Tarim River [J]. *Journal of Arid Land*, 2010, 2(4): 250-256.
- [22] 王明彬,韦小丽,韦忆,等. 川黔地区濒危植物红豆树种群结构与数量动态特征 [J]. *广西植物*, 2024, 44(1): 179-192.
- [23] 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*, 1998, 18(2): 214-217.
- [24] HETT J M, LOUCKS O L. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock [J]. *Journal of Ecology*, 1976, 64(3): 1029-1044.
- [25] 林春惠,顾惠怡,叶钦良,等. 珍稀濒危植物大苞山茶种群结构与动态特征 [J]. *植物生态学报*, 2023, 47(12): 1684-1692.
- [26] 郑元润. 不同方法在沙地云杉种群分布格局分析中的适用性研究 [J]. *植物生态学报*, 1997, 21(5): 480-484.

海南韶子 <i>N. topengii</i> (1)	野牡丹属 <i>Melastoma</i>	黄皮属 <i>Clausena</i>	莲桂属 <i>Dehaasia</i>
五加科 <i>Araliaceae</i>	毛柃 <i>M. sanguineum</i> (94)	假黄皮 <i>C. excavata</i> (53)	莲桂 <i>D. hainanensis</i> (3)
鹅掌柴属 <i>Heptapleurum</i>	谷木属 <i>Memecylon</i>	山小橘属 <i>Glycosmis</i>	木姜子属 <i>Litsea</i>
鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i> (2)	天蓝谷木 <i>M. caeruleum</i> (9)	山小橘 <i>G. pentaphylla</i> (1)	黄丹木姜子 <i>L. elongata</i> (3)
五列木科 <i>Pentaphylacaceae</i>	棱果谷木 <i>M. octocostatum</i> (9)	贡甲属 <i>Maclurodendron</i>	潺槁木姜子 <i>L. glutinosa</i> (2)
柃属 <i>Eurya</i>	细叶谷木 <i>M. scutellatum</i> (1)	贡甲 <i>M. oligophlebium</i> (70)	润楠属 <i>Machilus</i>
细齿叶柃 <i>E. nitida</i> (134)	叶下珠科 <i>Phyllanthaceae</i>	小芸木属 <i>Micromelum</i>	短序润楠 <i>M. breviflora</i> (20)
心翼果科 <i>Cardiopteridaceae</i>	银柴属 <i>Aporosa</i>	大管 <i>M. falcatum</i> (30)	尖峰润楠 <i>M. monticola</i> (4)
琼榄属 <i>Gonocaryum</i>	银柴 <i>A. dioica</i> (171)	九里香属 <i>Murraya</i>	梨润楠 <i>M. pomifera</i> (14)
琼榄 <i>G. lobbianum</i> (2)	黑面神属 <i>Breynia</i>	九里香 <i>M. exotica</i> (7)	柳叶润楠 <i>M. salicina</i> (4)
杨柳科 <i>Salicaceae</i>	黑面神 <i>B. fruticosa</i> (2)	吴茱萸属 <i>Tetradium</i>	楠属 <i>Phoebe</i>
刺篱木属 <i>Flacourtia</i>	土蜜树属 <i>Bridelia</i>	椴叶吴萸 <i>T. glabrifolium</i> (12)	乌心楠 <i>P. tavoyana</i> (29)
刺篱木 <i>F. indica</i> (1)	禾串树 <i>B. balansae</i> (1)	花椒属 <i>Zanthoxylum</i>	紫草科 <i>Boraginaceae</i>
天料木属 <i>Homalium</i>	土蜜树 <i>B. tomentosa</i> (2)	箭欏花椒 <i>Z. avicennae</i> (11)	基及树属 <i>Carmora</i>
毛天料木 <i>H. mollissimum</i> (14)	算盘子属 <i>Glochidion</i>	樟科 <i>Lauraceae</i>	基及树 <i>C. microphylla</i> (3)
广南天料木 <i>H. paniculiflorum</i> (9)	红算盘子 <i>G. coccineum</i> (2)	樟属 <i>Camphora</i>	紫葳科 <i>Bignoniaceae</i>
箭柃属 <i>Scolopia</i>	圆果算盘子 <i>G. sphaerogynum</i> (6)	黄樟 <i>C. parthenoxylon</i> (11)	菜豆树属 <i>Radermachera</i>
黄杨叶箭柃 <i>S. buxifolia</i> (8)	余甘子属 <i>Phyllanthus</i>	桂属 <i>Cinnamomum</i>	美叶菜豆树 <i>R. frondosa</i> (23)
广东箭柃 <i>S. saeva</i> (1)	余甘子 <i>P. emblica</i> (7)	钝叶桂 <i>C. bejolghota</i> (1)	海南菜豆树 <i>R. hainanensis</i> (2)
野牡丹科 <i>Melastomataceae</i>	芸香科 <i>Rutaceae</i>	阴香 <i>C. burmanni</i> (2)	

括号内数值为个体数 The values in the parentheses are the number of individuals.

(上接第 19 页 Continued from page 19)

- [27] 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.
- [28] BIERZYCHUDEK P. Plant biodiversity and population dynamics [M] // MONSON R K. Ecology and the Environment; The Plant Science 8. New York: Springer Science+Business Media, 2014: 29-65.
- [29] 段昌群, 苏文华, 杨树华, 等. 植物生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020: 167-168.
- [30] 桂慧颖, 方发之, 黎肇家, 等. 海南吊罗山濒危植物美丽火桐种群结构与动态特征[J]. 广西植物, 2025, 45(1): 197-206.
- [31] 李宁, 白冰, 鲁长虎. 植物种群更新限制: 从种子生产到幼树建成[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6624-6632.
- [32] 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.
- [33] 杨小林, 王秋菊, 兰小中, 等. 濒危植物大花黄牡丹 (*Paeonia ludlowii*) 种群数量动态[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1242-1247.
- [34] 包崇寅, 孙永玉, 李敏敏, 等. 不同生境濒危植物龙棕种群结构及其动态特征[J]. 西北植物学报, 2024, 44(3): 479-490.
- [35] 袁志忠, 包维楷, 何丙辉. 川西地区岷江柏种群生命表与生存分析[J]. 云南植物研究, 2004, 26(4): 373-381.
- [36] 刘海洋, 金晓玲, 沈守云, 等. 湖南珍稀濒危植物: 珙桐种群数量动态[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7738-7746.
- [37] LAPORTE M M, DELPH L F. Sex-specific physiology and source-sink relations in the dioecious plant *Silene latifolia*[J]. Oecologia, 1996, 106: 63-72.
- [38] 吴其超, 臧凤岐, 李呈呈, 等. 濒危树种五莲杨种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5016-5025.
- [39] 蔡晨, 李珂佳, 凌书伟, 等. 福建古田会址风水林小叶红豆种群结构与动态特征[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(1): 61-69.
- [40] 何斌, 张萍, 李青, 等. 珍稀濒危植物黄杉种群结构与空间分布格局[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(4): 461-471.
- [41] 李肇晨, 陈永富, 洪小江, 等. 海南霸王岭陆均松种群年龄结构与点格局分布特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1507-1515.
- [42] 蔡飞. 杭州西湖山区青冈种群结构和动态的研究[J]. 林业科学, 2000, 36(3): 67-72.
- [43] 刘浩栋, 陈巧, 徐志扬, 等. 珍稀濒危树种陆均松天然种群结构与空间分布格局[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2985-2995.
- [44] 杜华强, 汤孟平, 周国模, 等. 天目山物种多样性尺度依赖及其与空间格局关系的多重分形[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5038-5049.
- [45] 丁剑敏, 张向东, 李国梁, 等. 濒危植物居群恢复的遗传学考量[J]. 植物科学学报, 2018, 36(3): 452-458.

(责任编辑: 佟金凤)