

福建古田会址风水林小叶红豆种群结构与动态特征

蔡晨^{1a}, 李珂佳^{1a}, 凌书伟^{1a}, 阮广鸣², 陈泽平^{1a}, 潘标志³, 郑世群^{1b, ①}

[1. 福建农林大学: a. 林学院, b. 菌草与生态学院(碳中和学院), 福建 福州 350002; 2. 龙岩市园林绿化中心, 福建 龙岩 364000; 3. 福建省林业调查规划院, 福建 福州 350003]

摘要: 对福建省古田会址风水林 77 个样方中的珍稀濒危植物小叶红豆 (*Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen) 种群进行调查, 对其种群结构和动态特征进行分析。结果表明: 77 个样方中共有小叶红豆 273 株, 根据株高 (h) 和胸径 (DBH) 可分为 10 个径级, 其中 I ($h \leq 50$ cm) 级的幼苗个体最多 (112 株), 但从 I 级到 II (50 cm $< h \leq 100$ cm) 级死亡率为 60.7%, 表明幼苗的个体生存能力差; 幼树至小树阶段 [II 级至 V 级 (10 cm \leq DBH < 15 cm)] 生长情况较为平稳, 从中树至大树阶段 [VI (15 cm \leq DBH < 20 cm) 级至 X (DBH ≥ 35 cm) 级] 仅有少数个体能够存活, 个体数总体逐渐减少; 从高度级结构看, 小叶红豆种群在 7 个高度级均有个体分布, 具有一定的完整性和稳定性。小叶红豆种群的动态指数 (V_{pi}) 为 40.67%, 随机干扰动态指数 (V_{pi}') 为 1.36%, 随机干扰风险概率 (P_{max}) 为 3.33%, 表明小叶红豆种群为增长型种群, 但增长不明显, 抗干扰能力较弱。小叶红豆种群存活曲线趋向于 Deevey-II 型的 B_1 亚型; 随着径级增加, 小叶红豆种群整体生存率函数 ($S(t)$) 呈降低趋势, 而累积死亡率函数 ($F(t)$) 则呈升高趋势, 小叶红豆种群死亡密度函数 ($f(t)$) 和危险率函数 ($\lambda(t)$) 从 IV (5 cm \leq DBH < 10 cm) 级至 V 级明显升高, 反映种群有向衰退方向发展的趋势。时间序列预测结果显示: 总体上看, 经过未来 2、4、6、8 径级时间后, 小叶红豆种群各径级个体数均有增加, 种群发展潜力较好。综合研究结果显示: 小叶红豆种群整体上呈现增长趋势, 但稳定性和抵抗力较弱, 小叶红豆自身抗干扰能力弱以及在资源竞争过程中处于劣势是限制小叶红豆种群增长和种群稳定性差的主要原因, 建议采取就地保护的同时, 通过适当疏伐和施肥以及加强种子培养等手段增加个体数量, 提高种群的竞争力和稳定性。

关键词: 小叶红豆; 种群结构; 静态生命表; 存活曲线; 生存分析

中图分类号: Q948.15; S718.54 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)01-0061-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.01.07

Population structure and dynamic characteristics of *Ormosia microphylla* in geomancy forest of Gutian Meeting Site in Fujian CAI Chen^{1a}, LI Kejia^{1a}, LING Shuwei^{1a}, RUAN Guangming², CHEN Zeping^{1a}, PAN Biaozi³, ZHENG Shiqun^{1b, ①} [1. Fujian Agriculture and Forestry University: a. College of Forestry, b. College of JunCao Science and Ecology (College of Carbon Neutrality), Fuzhou 350002, China; 2. Longyan City Landscaping Centre, Longyan 364000, China; 3. Fujian Forestry Survey and Planning Institute, Fuzhou 350003, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(1): 61-69

Abstract: The population of the rare and endangered plant *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen in 77 sample plots of geomancy forest of Gutian Meeting Site in Fujian was investigated, and the population structure and dynamic characteristics of this population were analyzed. The results show that there are a total of 273 *O. microphylla* individuals in 77 sample plots, based on height (h) and diameter at breast height (DBH), they can be divided into 10 diameter classes, among which the seedling individuals of class I ($h \leq 50$ cm) are the most (112), but the mortality rate from class I to class II (50 cm $< h \leq$

收稿日期: 2024-08-05

基金项目: 龙岩城区公园绿地日常维护改造(含应急抢险)工程项目([350801]LYCG[CS]2023015); 福建省特色林木种质资源评价与监测信息应用项目(2021FKJ17)

作者简介: 蔡晨(2000—), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事珍稀植物保护与利用方面的研究。

①通信作者 E-mail: fizesq@126.com

引用格式: 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.

100 cm) is 60.7%, indicating that the individual survival ability of seedlings is poor; the growth status from sapling to small tree stage [class II to class V ($10\text{ cm} \leq \text{DBH} < 15\text{ cm}$)] is relatively stable, but only a few individuals can survive from medium tree to large tree stage [class VI ($15\text{ cm} \leq \text{DBH} < 20\text{ cm}$) to class X ($\text{DBH} \geq 35\text{ cm}$)], and the individual number gradually decreases in general; in terms of height class structure, the individuals of *O. microphylla* population is distributed across all 7 height classes, demonstrating a certain degree of integrity and stability. The dynamic index (V_{pi}) of *O. microphylla* population is 40.67%, the random disturbance dynamic index (V_{pi}') is 1.36%, and the random disturbance risk probability (P_{\max}) is 3.33%, indicating that the *O. microphylla* population is a growing population, but the growth is not obvious, and its ability to resist disturbances is relatively weak. The survival curve of *O. microphylla* population tends to be of B_1 subtype of Deevey-II type; with the increase of diameter class, the overall survival rate function [$S(t)$] of *O. microphylla* population shows a tendency to decrease, while the cumulative mortality rate function [$F(t)$] shows a tendency to increase, and the death density function [$f(t)$] and hazard rate function [$\lambda(t)$] of *O. microphylla* population evidently increase from class IV ($5\text{ cm} \leq \text{DBH} < 10\text{ cm}$) to class V, indicating a trend towards population decline. The time-series prediction result shows that, in general, after the next 2, 4, 6, and 8 diameter class time, the number of individuals at each diameter class of *O. microphylla* population will increase, indicating a good potential for population development. The comprehensive research results indicate that the *O. microphylla* population shows a growth tendency overall, but the stability and resistance are relatively weak, and the weak ability of *O. microphylla* to resist disturbances and its disadvantage in competing for resources are the main reasons for limiting its population growth and causing poor population stability. It is recommended to adopt *in situ* conservation and simultaneously increase the number of individuals through means including appropriate thinning and fertilization, and enhanced seed cultivation to improve the competitiveness and stability of population.

Key words: *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen; population structure; static life table; survival curve; survival analysis

种群结构和动态特征是种群生态学研究的重要内容^[1]。种群结构涵盖个体数量、高度、年龄及空间分布情况^[2]；种群动态是种群在整个生命周期内数量的变化。静态生命表编制、存活曲线绘制、模型分析拟合以及生存分析等方法不仅能有效量化种群的结构和动态特征,还能为濒危物种的管理以及合理开发、利用提供坚实的理论支撑。

小叶红豆 (*Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen) 为豆科 (Fabaceae) 红豆属 (*Ormosia* Jacks.) 落叶乔木, 已被纳入《国家储备林树种目录》(2019年修订版) (https://lyj.ah.gov.cn/ahlq/ssfcl/39980625.html?ivk_sa=1024320u), 并被列为 A 类珍贵资源树种, 在 2021 年公布的《国家重点保护野生植物名录》(<https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkml/11057.jhtml>) 中列为国家一级重点保护野生植物。小叶红豆的木材纹理通直、坚重并具独特光泽, 是珍贵优质用材, 其根部还可入药, 是一种多功能且价值高的植物^[3]。小叶红豆种子种皮坚硬、致密且脆性, 透水性极差, 休眠期长, 发芽率低, 导致现存野生资源稀缺; 此外, 长期的掠夺性采伐加剧了其种群数量的减少, 影响了整个群落的动态特征^[4]。目前, 关于小叶

红豆的研究报道较少, 主要集中在分布格局^[5]、最佳生境^[6]、与同属不同物种叶绿体基因组的序列比较^[7]、资源分布^[8]和繁殖技术^[9]等方面, 但在生态学方面尚无系统报道, 对小叶红豆种群发展趋势无法准确判断, 不利于实施科学合理的保护措施。

福建古田会址风水林历史悠久, 林内树种的生长和保存状况良好, 小叶红豆在其中分布较为普遍, 龄级完整, 为近自然生长状态, 是研究小叶红豆种群的理想场所。本文对该风水林群落中小叶红豆种群开展调查, 分析其种群结构及动态特征变化, 以为小叶红豆濒危机制研究及制定针对性的保护措施提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

古田会址风水林位于福建省上杭县古田镇 (北纬 $25^{\circ}13'15.27''$ 、东经 $116^{\circ}49'29.71''$), 研究区属于亚热带湿润季风气候, 温暖多雨, 冬暖夏凉, 年平均气温 $17.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量 $1\ 857\text{ mm}$, 年均日照时数 $4\ 133\text{ h}$, 无霜期 262 d ; 平均海拔 690 m , 地势较为平

坦;土壤为红壤,呈微酸性,土层浅薄,肥力一般。风水林面积约 33 000 m²,为针阔混交林,物种组成丰富,样地内分布有长苞铁杉[*Nothotsuga longibracteata* (W. C. Cheng) Hu ex C. N. Page]、小叶红豆等珍稀濒危树种。乔木层主要有新木姜子[*Neolitsea aurata* (Hayata) Koidz.]、长苞铁杉、弯蒴杜鹃(*Rhododendron henryi* Hance)、木荷(*Schima superba* Gardner et Champ.)、米楮[*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata]、栲(*Castanopsis fargesii* Franch.)、桂北木姜子(*Litsea subcoriacea* Yen C. Yang et P. H. Huang)、黄杞(*Engelhardia roxburghiana* Wall.)、毛竹[*Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz.]、枫香树(*Liquidambar formosana* Hance)等;灌木层主要有变叶树参[*Dendropanax proteus* (Champ.) Benth.]、牛耳枫(*Daphniphyllum calycinum* Benth.)、日本五月茶(*Antidesma japonicum* Siebold et Zucc.)、狗骨柴[*Diplospora dubia* (Lindl.) Masam.]、山矾(*Symplocos sumuntia* Buch.-Ham. ex D. Don)、红皮糙果茶(*Camellia crapnelliana* Tutcher)等;草本层主要有倒挂铁角蕨(*Asplenium normale* Don)、弓果黍[*Cyrtococcum patens* (Linn.) A. Camus]、淡竹叶(*Lophatherum gracile* Brongn.)、红盖鳞毛蕨[*Dryopteris erythrosora* (D. C. Eaton) Kuntze]、钝角金星蕨[*Parathelypteris angulariloba* (Ching) Ching]等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置和调查 通过实地踏查来估算小叶红豆的种群结构,界定其所在生物群落的维度,即长度(东西向)和宽度(南北向)。在长度和宽度的中点附近,分别建立 x 轴(东西向)和 y 轴(南北向),2 轴相交处为坐标原点。从原点开始,沿 x 轴和 y 轴的 2 个方向以 20 m 为间隔布设连续的方格网,每个方格代表 1 个面积 20 m×20 m 的样方。共选 77 个样方。每个样方划分为 4 个面积 10 m×10 m 的乔木小样方,在样方四角设置 4 个面积 5 m×5 m 的灌木小样方。对乔木小样方内胸径大于或等于 5 cm 的小叶红豆植株进行调查,采用测距仪(精度 1 mm)测量坐标,采用胸径尺(精度 1 cm)测量胸径,采用测高仪(精度 1 cm)测量株高,记录株数和冠幅(东西向和南北向距离的乘积);对灌木小样方内所有小叶红豆植株进行调查,采用测高仪测量株高,记录株数和冠幅。

1.2.2 径级和高度级划分 使用空间代替时间,以径级代替龄级,采用标准的分级方法^[10],基于株高

(h)和胸径(DBH),将样地内小叶红豆的年龄划分为 10 个径级: I ($h \leq 50$ cm)、II ($50 \text{ cm} < h \leq 100$ cm)、III ($h > 100$ cm, DBH < 5 cm)、IV ($5 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 10$ cm)、V ($10 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 15$ cm)、VI ($15 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 20$ cm)、VII ($20 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 25$ cm)、VIII ($25 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 30$ cm)、IX ($30 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 35$ cm)、X (DBH ≥ 35 cm),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、IX 级和 X 级为大树。参考李雯等^[11]的方法对小叶红豆种群高度级进行分级,分为 H1 ($h < 4$ m)、H2 ($4 \text{ m} \leq h < 8$ m)、H3 ($8 \text{ m} \leq h < 12$ m)、H4 ($12 \text{ m} \leq h < 16$ m)、H5 ($16 \text{ m} \leq h < 20$ m)、H6 ($20 \text{ m} \leq h < 24$ m)、H7 ($h \geq 24$ m)共 7 个高度级,统计各径级及各高度级个体数,绘制径级结构图和高度级结构图。

1.2.3 种群数量动态分析 参考陈晓德^[12]的植物种群动态量化方法,采用种群内相邻径级间的动态指数(V_n)、不考虑外界环境和人为干扰情况下种群的动态指数(V_{pi})、考虑外界环境和人为干扰情况下种群的随机干扰动态指数(V_{pi}')分析小叶红豆种群径级结构动态。 V_{pi} 和 V_{pi}' 值大于 0 均反映种群结构关系增长,小于 0 均反映种群结构关系衰退,等于 0 均反映种群结构关系稳定^[12]。随机干扰风险概率(P_{\max})为种群对外界干扰面临的风险极大值,可用于衡量种群年龄结构对外界干扰的敏感性, P_{\max} 值越大,对外界干扰越敏感^[13]。

1.2.4 静态生命表及曲线绘制 基于小叶红豆种群不同径级和高度级的存活个体数编制小叶红豆种群的静态生命表。以径级(x)为自变量,以标准化存活个体数(l_x)的自然对数($\ln l_x$)、死亡率(q_x)和消失率(K_x)为因变量,分别绘制小叶红豆种群的存活曲线、死亡率曲线和消失率曲线。根据文献[14-15]中的方法对存活曲线进行检验和判断。

1.2.5 生存分析 选择生存率函数[$S(t)$]、累积死亡率函数[$F(t)$]、死亡密度函数[$f(t)$]和危险率函数[$\lambda(t)$]4 个相关函数^[16],对小叶红豆种群进行生存分析。

1.2.6 时间序列预测 根据小叶红豆种群各径级个体数量,采用时间序列分析的移动平均法^[17-18],预测小叶红豆种群经过未来 2、4、6、8 个径级时间后各径级的个体数量。

1.3 数据处理和分析

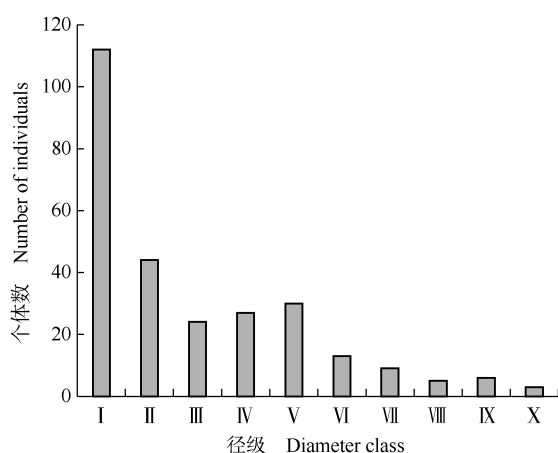
使用 EXCEL 2021 和 SPSS 27 软件进行数据处

理和分析,使用 EXCEL 2021 软件绘图。

2 结果和分析

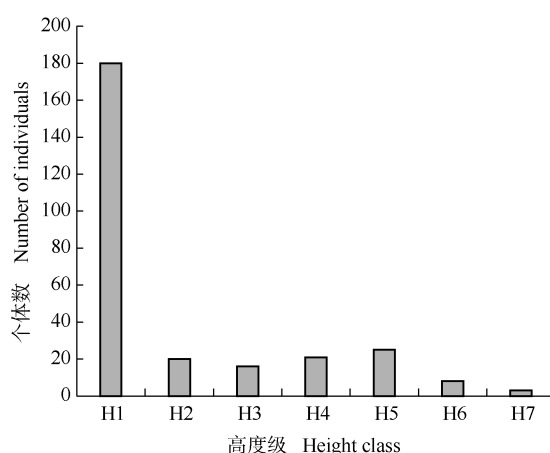
2.1 小叶红豆种群径级与高度级结构

调查结果显示:福建古田会址风水林 77 个样方中共有小叶红豆 273 株。从径级结构(图 1)看,小叶红豆种群 I [株高(h) ≤ 50 cm]级的个体最多,有 112 株,占总株数的 41.0%; II (50 cm $<h\leq 100$ cm)级的个体数急剧减少,仅有 44 株,占总株数的 16.1%, III [$h>100$ cm,胸径(DBH) <5 cm]级有 24 株,占总株数的 8.8%; IV (5 cm \leq DBH <10 cm)级和 V (10 cm \leq DBH <15 cm)级共有 57 株,占总株数的 20.9%; VI (15 cm \leq DBH <20 cm)级和 VII (20 cm \leq DBH <25 cm)级共有 22 株,占总株数的 8.1%; VIII (25 cm \leq DBH <30 cm)级至 X (DBH ≥ 35 cm)级共有 14 株,占总株数的 5.1%。



总体上看,小叶红豆在幼苗阶段的个体最多,但在幼苗至幼树阶段死亡率较高,幼树至小树阶段生长情况较为平稳,从中树至大树阶段仅有少数个体能够存活,个体数逐渐减少。表明小叶红豆种群在成长过程中对资源竞争处于劣势,幼苗对环境适应能力较差,仅有少数幼苗能成长为大树。

从高度级结构(图 1)看,福建古田会址风水林小叶红豆种群 H1 ($h<4$ m)级的个体最多,共 180 株,占总株数的 65.9%; H2 (4 m $\leq h<8$ m)级个体数急剧下降,仅有 20 株,占总株数的 7.3%; H3 (8 m $\leq h<12$ m)级至 H5 (16 m $\leq h<20$ m)级个体数基本维持稳定,分别有 16、21、25 株; H6 (20 m $\leq h<24$ m)级个体数又有所下降,有 11 株,占总株数 4.0%; H7 ($h\geq 24$ m)级的个体数最少,仅 3 株。总体上看,小叶红豆种群在 7 个高度级均有个体分布,具有一定的完整性和稳定性。



I: $h\leq 50$ cm; II: 50 cm $<h\leq 100$ cm; III: $h>100$ cm, DBH <5 cm; IV: 5 cm \leq DBH <10 cm; V: 10 cm \leq DBH <15 cm; VI: 15 cm \leq DBH <20 cm; VII: 20 cm \leq DBH <25 cm; VIII: 25 cm \leq DBH <30 cm; IX: 30 cm \leq DBH <35 cm; X: DBH ≥ 35 cm. H1: $h<4$ m; H2: 4 m $\leq h<8$ m; H3: 8 m $\leq h<12$ m; H4: 12 m $\leq h<16$ m; H5: 16 m $\leq h<20$ m; H6: 20 m $\leq h<24$ m; H7: $h\geq 24$ m. h : 株高 Height; DBH: 胸径 Diameter at breast height.

图 1 福建古田会址风水林小叶红豆种群径级和高度级结构

Fig. 1 Diameter class and height class structures of *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen population in geomancy forest of Gutian Meeting Site in Fujian

2.2 小叶红豆种群数量动态变化

基于小叶红豆种群径级结构,通过各相邻径级间的动态指数(V_n)分析种群动态变化,结果见表 1。结果显示:福建古田会址风水林小叶红豆种群 V_3 、 V_4 和 V_8 小于 0,其余各径级间的动态指数均大于 0,说明 III [株高(h) >100 cm,胸径(DBH) <5 cm]级向 IV (5 cm \leq DBH <10 cm)级、IV级向 V (10 cm \leq DBH <15 cm)级以及 VIII (25 cm \leq DBH <30 cm)级向 IX (30 cm \leq

DBH <35 cm)级过渡时小叶红豆表现出个体数减少的趋势,而其余径级间则表现为增长趋势,种群内部小叶红豆个体数波动变化。小叶红豆种群动态指数(V_{pi})为 40.67%,大于 0,表明种群为增长型种群;随机干扰动态指数(V_{pi}')为 1.36%,接近 0,表明小叶红豆种群虽然为增长型种群,但增长不明显,结构趋于稳定。此外,小叶红豆种群随机干扰风险概率(P_{max})为 3.33%,表明小叶红豆种群对外界干扰具有一定的敏感度。

表 1 福建古田会址风水林小叶红豆种群动态指数¹⁾
Table 1 Dynamic indexes of *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen population in geomancy forest of Gutian Meeting Site in Fujian¹⁾

动态指数级 Dynamic index class	动态指数/% Dynamic index	动态指数级 Dynamic index class	动态指数/% Dynamic index
V ₁	60.71	V ₇	44.44
V ₂	45.45	V ₈	-16.67
V ₃	-11.11	V ₉	50.00
V ₄	-10.00	V _{pi}	40.67
V ₅	56.67	V _{pi} '	1.36
V ₆	30.77		

¹⁾ V₁, V₂, V₃, V₄, V₅, V₆, V₇, V₈, V₉: 分别表示从 I ($h \leq 50$ cm) 到 II ($50 \text{ cm} < h \leq 100$ cm)、II 到 III ($h > 100$ cm, DBH < 5 cm)、III 到 IV ($5 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 10$ cm)、IV 到 V ($10 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 15$ cm)、V 到 VI ($15 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 20$ cm)、VI 到 VII ($20 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 25$ cm)、VII 到 VIII ($25 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 30$ cm)、VIII 到 IX ($30 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 35$ cm)、IX 到 X (DBH ≥ 35 cm) 径级的动态指数 Representing dynamic indexes of diameter classes from I ($h \leq 50$ cm) to II ($50 \text{ cm} < h \leq 100$ cm), II to III ($h > 100$ cm, DBH < 5 cm), III to IV ($5 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 10$ cm), IV to V ($10 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 15$ cm), V to VI ($15 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 20$ cm), VI to VII ($20 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 25$ cm), VII to VIII ($25 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 30$ cm), VIII to IX ($30 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 35$ cm), IX to X (DBH ≥ 35 cm) respectively. h : 株高 Height; DBH: 胸径 Diameter at breast height. 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.

2.3 小叶红豆种群的静态生命表

根据径级结构分级结果, 编制福建古田会址风水林小叶红豆种群静态生命表(表 2)。结果显示: 总体上看, I [株高(h) ≤ 50 cm] 级至 III [$h > 100$ cm, 胸径 (DBH) < 5 cm] 级的幼年时期个体数明显多于 VIII (25 cm \leq DBH < 30 cm) 级至 X (DBH ≥ 35 cm) 级的大树个体数。在 X 级时, 死亡率(q_x) 和消失率(K_x) 均达到最大值, 分别为 1.000 和 3.288, 表明老年个体由于生

理衰老和外界环境压力, 存活率极低, 几乎全部死亡。平均期望寿命(e_x) 在 I 级至 III 级、VII (20 cm \leq DBH < 25 cm) 级至 VIII 级呈升高趋势, 在 IV (5 cm \leq DBH < 10 cm) 级至 V (10 cm \leq DBH < 15 cm) 级、VI (15 cm \leq DBH < 20 cm) 级至 VII 级、VIII 级至 IX (30 cm \leq DBH < 35 cm) 级呈降低趋势, 在 III 级平均期望寿命达到最高 (4.375), 表明在该径级时个体具有较高的生命质量。

2.4 小叶红豆种群的存活曲线、死亡率曲线和消失率曲线

福建古田会址风水林小叶红豆种群在 I [株高 (h) ≤ 50 cm] 级至 II (50 cm < $h \leq 100$ cm) 级的个体数急剧下降, 因此不符合 Deevey-I 型, Deevey-II 型和 Deevey-III 型存活曲线的拟合结果见表 3。结果显示: 2 种模型拟合结果的 P 值均达到了极显著水平 ($P < 0.001$), 其中 Deevey-II 型存活曲线的指数函数的 R^2 值更趋近于 1, 说明该模型的拟合效果更好。因此, 小叶红豆种群的存活曲线更符合 Deevey-II 型。

结果(图 2)显示: 小叶红豆种群存活曲线中标准化存活个体数的自然对数($\ln l_x$) 随着径级增加总体呈降低趋势, 其中, I 级至 III ($h > 100$ cm, DBH < 5 cm) 级逐渐降低, 反映了小叶红豆在幼年时期(幼苗和幼树) 面临较高的死亡率, III 级至 V (10 cm \leq DBH < 15 cm) 级以及 VIII (25 cm \leq DBH < 30 cm) 级至 IX (30 cm \leq DBH < 35 cm) 级略有升高。小叶红豆种群的死亡率(q_x) 和消失率(K_x) 曲线变化趋势基本一致, 随着径级增加呈波动的变化趋势, 在 III 级、IV (5 cm \leq DBH < 10 cm) 级和 VIII 级的 q_x 和 K_x 值较低。

表 2 福建古田会址风水林小叶红豆种群静态生命表¹⁾
Table 2 Static life table of *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen population in geomancy forest of Gutian Meeting Site in Fujian¹⁾

径级 Diameter class	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x
I ($h \leq 50$ cm)	112	1 000	6.908	607	0.607	696	1 710	1.710	0.934
II (50 cm < $h \leq 100$ cm)	44	393	5.973	179	0.455	304	1 241	3.159	0.606
III ($h > 100$ cm, DBH < 5 cm)	24	214	5.367	-27	-0.125	228	938	4.375	-0.118
IV (5 cm \leq DBH < 10 cm)	27	241	5.485	-27	-0.111	254	455	1.889	-0.105
V (10 cm \leq DBH < 15 cm)	30	268	5.590	152	0.567	192	455	1.700	0.836
VI (15 cm \leq DBH < 20 cm)	13	116	4.754	36	0.308	98	263	2.269	0.368
VII (20 cm \leq DBH < 25 cm)	9	80	4.386	36	0.444	63	165	2.056	0.588
VIII (25 cm \leq DBH < 30 cm)	5	45	3.799	-9	-0.200	49	103	2.300	-0.182
IX (30 cm \leq DBH < 35 cm)	6	54	3.981	27	0.500	40	54	1.000	0.693
X (DBH ≥ 35 cm)	3	27	3.288	27	1.000	13	13	—	3.288

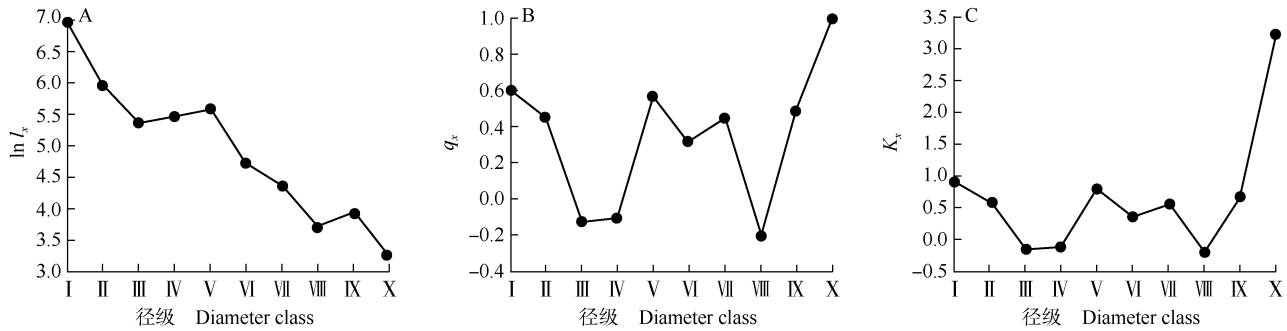
¹⁾ h : 株高 Height; DBH: 胸径 Diameter at breast height. a_x : 存活个体数 Survival number of individuals; l_x : 标准化存活个体数 Standardized survival number of individuals; $\ln l_x$: 标准化存活个体数的自然对数 Natural logarithm of standardized survival number of individuals; d_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的死亡个体数 Death number of individuals 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 $x+1$ 径级的存活个体数 Survival number of individuals from x to $x+1$ diameter class; T_x : 大于或等于 x 级的个体总数 Total individual number greater than or equal to x diameter class; e_x : 平均期望寿命 Average life expectancy; 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.

表3 福建古田会址风水林小叶红豆种群存活曲线的检验模型
Table 3 Test models of survival curves of *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen population in geomancy forest of Gutian Meeting Site in Fujian

曲线类型 Curve type	方程 Equation	R^2	F	P
Deevey-II	$y = 7.239 2e^{-0.072 3x}$	0.933	111.013	<0.001
Deevey-III	$y = 7.445 1x^{-0.285}$	0.830	38.936	<0.001

2.5 小叶红豆种群生存分析

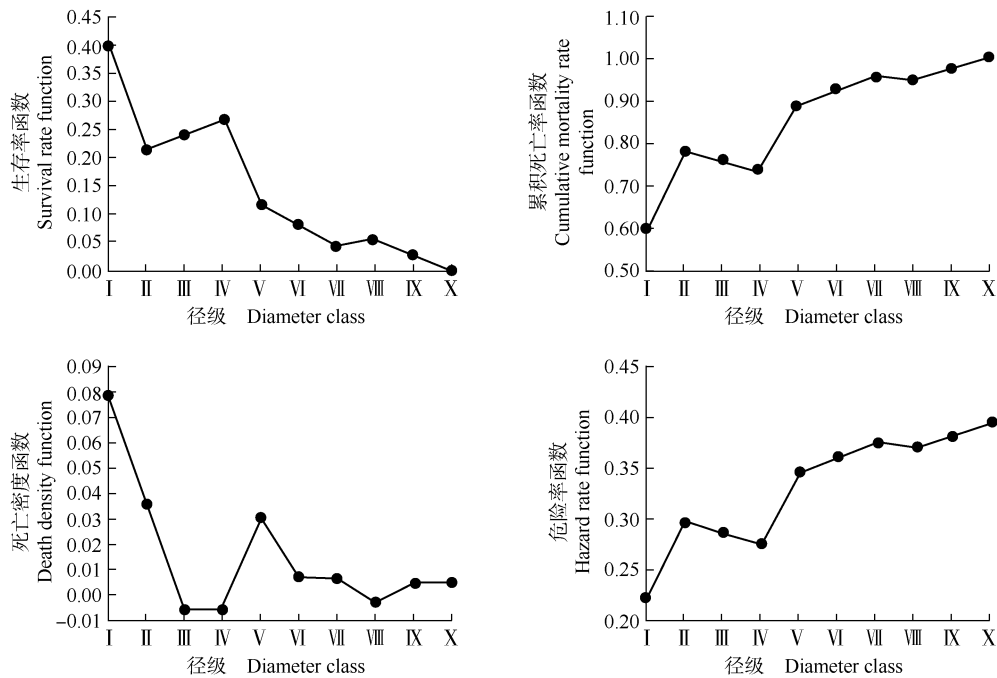
结果(图3)显示:总体上看,福建古田会址风水林小叶红豆种群生存率函数[$S(t)$]和累积死亡率函数[$F(t)$]呈相反的变化趋势, $F(t)$ 值上升, $S(t)$ 值则下降,2个函数值在相同径级的和均为1。 $S(t)$ 值在II[50 cm<株高(h)≤100 cm]级至IV[5 cm≤胸径



$\ln I_x$: 标准化存活个体数的自然对数 Natural logarithm of standardized survival number of individuals; 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: $h \leq 50$ cm; II: $50 \text{ cm} < h \leq 100$ cm; III: $h > 100$ cm, $DBH < 5$ cm; IV: $5 \text{ cm} \leq DBH < 10$ cm; V: $10 \text{ cm} \leq DBH < 15$ cm; VI: $15 \text{ cm} \leq DBH < 20$ cm; VII: $20 \text{ cm} \leq DBH < 25$ cm; VIII: $25 \text{ cm} \leq DBH < 30$ cm; IX: $30 \text{ cm} \leq DBH < 35$ cm; X: $DBH \geq 35$ cm. h : 高度 Height; DBH: 胸径 Diameter at breast height.

图2 福建古田会址风水林小叶红豆种群存活曲线(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 *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen population in geomancy forest of Gutian Meeting Site in Fujian



I: $h \leq 50$ cm; II: $50 \text{ cm} < h \leq 100$ cm; III: $h > 100$ cm, $DBH < 5$ cm; IV: $5 \text{ cm} \leq DBH < 10$ cm; V: $10 \text{ cm} \leq DBH < 15$ cm; VI: $15 \text{ cm} \leq DBH < 20$ cm; VII: $20 \text{ cm} \leq DBH < 25$ cm; VIII: $25 \text{ cm} \leq DBH < 30$ cm; IX: $30 \text{ cm} \leq DBH < 35$ cm; X: $DBH \geq 35$ cm. h : 高度 Height; DBH: 胸径 Diameter at breast height.

图3 福建古田会址风水林小叶红豆种群的生存分析

Fig. 3 Survival analysis on *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen population in geomancy forest of Gutian Meeting Site in Fujian

(DBH) <10 cm]级呈升高趋势,在V(10 cm \leq DBH <15 cm)级至X(DBH ≥ 35 cm)级呈缓慢波动降低的趋势。各径级的死亡密度函数 $[f(t)]$ 均在0.08以下,在I($h \leq 50$ cm)级至III($h > 100$ cm, DBH < 5 cm)级急剧降低,表明在该阶段的个体数量锐减,在IV级至V级有所回升,VI(15 cm \leq DBH < 20 cm)级后变化趋于平缓。各径级的危险率函数 $[\lambda(t)]$ 均在0.40以下,随径级增加总体呈前期波动升高、后期趋于平缓的趋势,说明小叶红豆种群前期易受影响,稳定性一般,后期危险率函数稳中有升,种群面临死亡风险。

2.6 小叶红豆种群的时间序列预测

结果(表4)显示:福建古田会址风水林小叶红豆种群在未来2个径级时间后,II(50 cm $<$ 株高(h) ≤ 100 cm)级和VI(15 cm \leq 胸径(DBH) < 20 cm)级个体数增幅较大,分别为77.3%和69.2%;在未来4个径级时间后,VII(20 cm \leq DBH < 25 cm)级和VIII(25 cm \leq DBH < 30 cm)级的个体数增幅较大,分别为122.2%和180.0%;在未来6和8个径级时间后,VI级、VII级、VIII级、IX(30 cm \leq DBH < 35 cm)级和X(DBH ≥ 35 cm)级个体数均增加,增幅范围分别为150.0%~266.7%和233.3%~560.0%,种群呈增长趋势。

表4 福建古田会址风水林小叶红豆种群数量动态时间序列预测¹⁾
Table 4 Time-series prediction of number dynamics of *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen population in geomancy forest of Gutian Meeting Site in Fujian¹⁾

径级 Diameter class	n	n_2	n_4	n_6	n_8
I ($h \leq 50$ cm)	112				
II (50 cm $<$ $h \leq 100$ cm)	44	78			
III ($h > 100$ cm, DBH < 5 cm)	24	34			
IV (5 cm \leq DBH < 10 cm)	27	26	52		
V (10 cm \leq DBH < 15 cm)	30	29	31		
VI (15 cm \leq DBH < 20 cm)	13	22	24	42	
VII (20 cm \leq DBH < 25 cm)	9	11	20	25	
VIII (25 cm \leq DBH < 30 cm)	5	7	14	18	33
IX (30 cm \leq DBH < 35 cm)	6	6	8	15	20
X (DBH ≥ 35 cm)	3	5	6	11	15

¹⁾ h : 高度 Height; DBH: 胸径 Diameter at breast height. n : 原始个体数 Initial number of individuals; n_2, n_4, n_6, n_8 : 分别为未来2、4、6、8径级时间后的个体数 Number of individuals after the next 2, 4, 6 and 8 diameter class time respectively.

3 讨论和结论

3.1 小叶红豆种群径级结构特征

本研究结果显示:福建古田会址风水林小叶红豆种群个体数随着径级增加总体呈减少趋势。I[株

高(h) ≤ 50 cm]级个体数占比(41.0%)较大,表明幼苗个体数量丰富,为种群提供了较大的更新潜力。虽然幼苗基数大,但小叶红豆种群的存活率却很低,幼苗死亡率高达60.7%,表明幼苗阶段是其生存和发展的“瓶颈”,个体生存能力差,种群密度降低。这与张金峰等^[19]对紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)种群以及秦爱丽等^[20]对峨眉含笑(*Michelia wilsonii* Finet et Gagnep.)的研究结果一致。说明树木幼苗是比较脆弱的阶段^[21],随着林分内植株生长,密度制约效应开始显现,使得幼苗难以顺利过渡到同龄个体阶段^[22]。当小叶红豆种群的个体高度跨越了临界值(4 m)之后,种群展现出明显的环境适应能力,能够有效抵御并克服外界环境带来的压力,具有一定的生长态势。穆振北等^[23]对猴头杜鹃(*Rhododendron simiarum* Hance)种群的研究结果显示:猴头杜鹃种群为增长型和稳定型,但由于森林环境不够稳定,种群整体面临激烈的生存竞争,种群结构略失衡。本研究中,小叶红豆种群的动态指数(V_{pi})大于0,随机干扰动态指数(V_{pi}')接近0,随机干扰风险概率(P_{max})为3.33%,说明小叶红豆种群虽然为增长型种群,但增长不明显,抗干扰能力较弱^[13]。说明环境因子在一定程度上影响种群稳定性^[24]。随着小叶红豆种群从低龄级生长到同龄级,其对空间和资源的需求逐渐增加,有限的生存空间和资源条件成为制约种群增长的主要因素^[25]。对外界环境干扰适应能力较差导致小叶红豆种群在整个生长周期中面临高水平的死亡风险。这种不稳定的结构动态进一步证明了小叶红豆群落内环境压力对种群生长的不利影响。

3.2 小叶红豆种群动态特征

静态生命表作为评估植物种群动态与发展趋势的关键工具,直观展现了种群当前的生存状况与年龄结构,可为珍稀濒危植物的保护策略制定与资源可持续利用提供不可或缺的科学依据和前瞻视角^[26]。由于采用径级代替龄级的方法,数据中可能会出现死亡率为负值的情况,通过数据平滑技术可以解决^[27]。但Proctor^[28]指出,尽管负值与数学假设相悖,这些数据仍能提供有价值的生态学信息,表明种群是动态变化的,可能呈现出增长或衰退的趋势。小叶红豆种群在III[株高(h) > 100 cm,胸径(DBH) < 5 cm]级和IV(5 cm \leq DBH < 10 cm)级的死亡率(q_x)为负值,在V(10 cm \leq DBH < 15 cm)级时个体数量有所增加,死亡率又变为正值。这可能是由于小叶红豆在生长过程

中,经历了某些适应性变化,使其生存能力增强^[29]。平均期望寿命(e_x)随着径级增加呈波动变化趋势,其中,在Ⅲ级最大,表明种群在经历环境筛选后,生存能力得到提升;但从Ⅳ级开始,平均期望寿命开始波动,可能是由于种间竞争和种内竞争或环境因子^[30]导致小叶红豆种群个体存活数上下浮动。其他指标也在不同径级间出现波动,说明小叶红豆种群可能受到多种内外因子的共同影响,也进一步表明小叶红豆种群结构的不稳定性^[31]。

存活曲线通常分为 Deevey - I 型(凸线型)、Deevey - II 型(对角线型)和 Deevey - III 型(凹线型) 3 种类型,其中,Deevey - II 型可进一步分为 3 个亚型, B_2 亚型为标准的对角直线型,种群各个年龄的死亡率基本相同, B_1 和 B_3 亚型为曲线围绕对角线波动, B_1 亚型种群各时期存活率相差较大, B_3 亚型种群幼年期的死亡率较高,而成年以后的死亡率则降低^[15]。龚笑飞等^[31]对乌溪江流域山蜡梅(*Chimonanthus nitens* Oliv.)种群的研究结果显示种群的存活曲线趋于 Deevey - I 型。贾淇宇等^[32]对野生植物狭叶坡垒(*Hopea chinensis* (Merr.) Hand.-Mazz.)种群的分析结果显示种群存活曲线表现为 Deevey - II 型,且由于狭叶坡垒不同龄级个体死亡率有较大差异,种群存活曲线符合 Deevey - II 型的 B_1 亚型。本研究结果显示小叶红豆种群的存活曲线更符合 Deevey - II 型;从死亡率看,死亡率随着径级增加呈波动的变化趋势,说明小叶红豆种群存活曲线趋向于 Deevey - II 型的 B_1 亚型。此外,种群数量动态分析中,动态指数(V_{pi})大于 0 表明小叶红豆种群正处于增长状态。这种增长趋势可能是由于种群在一段时间内能够实现自我更新,从而维持群落内个体的生长和发育。时间序列预测的结果也与这一结论相吻合。

生存函数可以进一步直观反映种群结构与动态变化情况,具有较高的实际应用价值^[33]。分析生存率函数 $[S(t)]$ 发现,随着径级的增加,小叶红豆种群整体生存率函数呈降低的趋势,而累积死亡率函数 $[F(t)]$ 则呈升高的趋势,小叶红豆种群死亡密度函数 $[f(t)]$ 和危险率函数 $[\lambda(t)]$ 从Ⅳ级至Ⅴ级明显升高,种群有向衰退方向发展的趋势。说明大多数小叶红豆种群生命质量较差,容易被环境筛选淘汰,仅少量幼苗可成长为幼树,小叶红豆种群在中、幼龄阶段可能面临着与其他物种激烈竞争生存资源和空间的风险^[34]。

3.3 小叶红豆种群发展趋势

时间序列预测结果显示:总体上看,经过未来 2、4、6、8 径级时间后,小叶红豆种群各径级个体数有所增加,该种群发展潜力较好。在小叶红豆种群中,高径级个体数较少,但他们占据了较大的生存空间。从群落角度来看,这些老龄个体的消亡可能为其他植物个体提供进入上层空间的机会,从而促进群落的发展^[35]。时间序列分析仅能预测生境和种群结构相对稳定的种群的未来发展趋势,若生境和种群结构遭受破坏,种群的增长趋势很可能被打断,甚至出现衰退的现象。本文调查数据显示:小叶红豆幼苗在成长过程中大量死亡,幼苗向幼树、幼树向小树转换过程中存在增补限制^[32],制约种群发展,这可能是其濒危的重要原因。为确保小叶红豆种群数量的稳定增长,必须采取切实有效的保护措施^[8]。

3.4 小叶红豆种群的保护和恢复

针对小叶红豆目前面临的濒危状态,本研究建议在制定该地区种群保护与恢复策略时,应综合考虑以下 2 个方面:

1) 风水林外围区域的人为破坏(如踩踏植物和随意丢弃垃圾等)已对种群的生存构成了较大威胁,且种群稳定性较低,对外界干扰的抵抗能力较弱。因此,建议实施就地保护措施,以减少对其栖息地的人为破坏;加大幼年时期小叶红豆的保护力度,对严重影响小叶红豆生存的物种进行疏伐,或适量施肥、增加营养物质吸收^[36],促进幼苗存活与生长,维持种群稳步增长。此外,加强宣传力度,增强群众保护意识,为小叶红豆种群营造稳定的生存环境。

2) 增加科研力量和育苗形式,如加强种子培养、培育发芽率高的种子、开展实生苗繁育、向风水林内撒种育苗^[37]等,在一定程度上缓解小叶红豆数量稀少的情况,提高种群生存力。

参考文献:

- [1] FROST I, RYDIN H. Spatial pattern and size distribution of the animal-dispersed tree *Quercus robur* in two spruce-dominated forests [J]. *Écoscience*, 2000, 7(1): 38-44.
- [2] 刘文婷, 张金峰, 刘琪璟. 长白山东坡白桦-长白落叶松林优势种群结构与动态特征 [J]. *生态学报*, 2023, 43(18): 7462-7473.
- [3] 肖周宏. 湖南小叶红豆资源调查与育苗技术初探[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023: 1-4.
- [4] 伍铭凯, 杨汉远, 王定江, 等. 剑河县九虎村小叶红豆群落初步研究[J]. *凯里学院学报*, 2017, 35(3): 68-75.

- [5] LIU B, WENG H Y, YE X Z. Simulation of potential geographical distribution and migration pattern with climate change of *Ormosia microphylla* Merr. et H. Y. Chen[J]. *Forests*, 2024, 15(7): 1209.
- [6] WEI L J, WANG G H, XIE C P, et al. Predicting suitable habitat for the endangered tree *Ormosia microphylla* in China[J]. *Scientific Report*, 2024, 14: 10330.
- [7] TANG J M, ZOU R, WEI X, et al. Complete chloroplast genome sequences of five *Ormosia* species; molecular structure, comparative analysis, and phylogenetic analysis[J]. *Horticulturae*, 2023, 9(7): 796.
- [8] 杨汉远, 冯邦贤, 袁茂琴, 等. 珍稀濒危植物小叶红豆种群格局及濒危原因分析[J]. *种子*, 2013, 32(6): 52-54.
- [9] 蓝仕庆, 刘 勋, 石 健. 小叶红豆容器育苗造林[J]. *中国林业*, 2010(21): 53.
- [10] 王春晖, 陈 昕, 王本忠, 等. 湖南高望界国家级自然保护区雪峰山梭罗种群结构与动态特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(3): 57-64.
- [11] 李 雯, 乔 璐, 李潇晗, 等. 人类活动干扰下云南油杉群落物种组成及多样性研究[J]. *林业调查规划*, 2023, 48(5): 56-60.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] HETT J M, LOUCKS O L. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock[J]. *Journal of Ecology*, 1976, 64(3): 1029-1044.
- [15] 戈 峰. 现代生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 114.
- [16] 杨凤翔, 王顺庆, 徐海根, 等. 生存分析理论及其在研究生命表中的应用[J]. *生态学报*, 1991, 11(2): 153-158.
- [17] LEAK W B. Age distribution in virgin red spruce and northern hardwoods[J]. *Ecology*, 1975, 56(6): 1451-1454.
- [18] 赵 阳, 杨萌萌, 刘锦乾, 等. 冶力关林区紫果云杉天然林种群结构特征[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(4): 37-44.
- [19] 张金峰, 葛树森, 梁金花, 等. 长白山阔叶红松林紫椴种群结构与动态特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(13): 5381-5390.
- [20] 秦爱丽, 马凡强, 许格希, 等. 珍稀濒危树种峨眉含笑种群结构与动态特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4445-4454.
- [21] 张 婕, 上官铁梁, 段毅豪, 等. 灵空山辽东栎种群年龄结构与动态[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3125-3130.
- [22] DIMOBE K, WALA K, DOURMA M, et al. Disturbance and population structure of plant communities in the wildlife reserve of Oti-Mandouri in Togo (West Africa)[J]. *Annual Research and Review in Biology*, 2014, 4: 2501-2516.
- [23] 穆振北, 陈 妍, 王李睿, 等. 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃天然种群数量动态和稳定性分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2021, 30(1): 44-51, 68.
- [24] 王立龙, 王 亮, 张丽芳, 等. 不同生境下濒危植物裸果木种群结构及动态特征[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(10): 980-989.
- [25] 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.
- [26] 杨小林, 王秋菊, 兰小中, 等. 濒危植物大花黄牡丹(*Paonia ludlowii*)种群数量动态[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1242-1247.
- [27] 张维伟, 赵 忠, 刘金良, 等. 桥山林区3种麻栎群落类型的种群动态与幼苗特征[J]. *林业科学*, 2021, 57(7): 1-10.
- [28] PROCTOR M C F. Field and laboratory exercises in ecology[J]. *Journal of Ecology*, 1981, 69(3): 1074.
- [29] 巩亚梅, 谢功良, 刘 森, 等. 铁心杉种群结构与动态特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2024, 44(2): 138-145.
- [30] 王林津, 杨 瑞, 韩继怀, 等. 贵州大沙河国家级自然保护区野生银杉种群结构和动态分析[J]. *热带亚热带植物学报*, 2024, 32(5): 571-578.
- [31] 龚笑飞, 余水生, 张川英, 等. 人为干扰对乌溪江流域山蜡梅种群结构与动态的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2022, 31(6): 73-83.
- [32] 贾淇宇, 刘雄盛, 廖南燕, 等. 极小种群野生植物狭叶坡垒种群结构与动态特征[J]. *西南农业学报*, 2024, 37(5): 1078-1086.
- [33] 匡 旭, 邢丁亮, 张昭臣, 等. 长白山北坡云冷杉林和落叶松林物种组成与群落结构[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2149-2157.
- [34] 赵 阳, 刘锦乾, 陈学龙, 等. 洮河上游紫果云杉种群结构特征[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(3): 266-276.
- [35] 王泳腾, 黄治昊, 王 俊, 等. 燕山山脉黄檗种群结构与动态特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(7): 2826-2834.
- [36] 徐高福, 彭方有, 方红军, 等. 千岛湖区马尾松次生林疏伐后阔叶树生长和群落恢复研究[J]. *防护林科技*, 2023(5): 46-49.
- [37] 侯 顺. 小叶红豆调查[J]. *湖南林业科技*, 1985(1): 43-44.

(责任编辑: 郭严冬)