

DOI: 10.5846/stxb201811012359

张丽, 杨小波, 农寿千, 李东海, 李苑菱, 宋佳昱. 两种不同保护模式下坡垒种群发育特征比较研究. 生态学报, 2019, 39(10): - .
Zhang L, Yang X B, Nong S Q, Li D H, Li Y L, Song J Y. Comparative study on population development characteristics of *Hopea hainanensis* base in two different protection modes. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

两种不同保护模式下坡垒种群发育特征比较研究

张丽¹, 杨小波¹, 农寿千², 李东海^{1,*}, 李苑菱², 宋佳昱¹

¹ 海南大学热带农林学院, 海口 570228

² 海南省林业科学研究所, 海口 571100

摘要: 自上个世纪 60 年代以来, 坡垒种群的保护与恢复一直是海南地方林业工作者关注的内容, 采用的保护与恢复方式主要有原地保护和迁地保护, 历经 50 多年, 该种群在原生境发育状况一直得不到有效的改善, 一直被列为国家 I 级保护植物, IUCN 的极危种群, 2012 年又列入国家种极小种群(全国 120 种)。因此, 该种群的有效保护方式一直在探索中。本文通过野外调查和数据统计分析, 比较研究了海南霸王岭自然保护区野生坡垒种群与枫木林场迁地保护后形成的坡垒种群的发育状况。结果表明, 迁地保护与原地保护的种群均属于增长型, 幼龄个体占优势, 中龄和老龄个体相对较少, 迁地保护的种群存活曲线趋于 Deevey-I 型, 原地保护的种群存活曲线趋于 Deevey-III 型; 时间序列预测分析表明, 枫木迁地保护种群具备一定的恢复潜能, 霸王岭种群正常更新难以维持, 种群面临衰退。据生命表分析其主要原因是种群第 I 龄级幼苗死亡率高达 99.5%, 生境对第 I 龄级个体的环境筛选作用强, 幼苗阶段数量仅 0.17% 能过渡到幼树阶段, 迁地保护形成的小种群第 I 龄级幼苗死亡率为 90.3%, 但幼苗阶段数量的 8.85% 能过渡到幼树阶段, 具有充足的幼树个体数量, 能够维持坡垒种群的稳定性, 枫木林场地区更适宜坡垒的生存。因此, 在原地保护的保护区内模拟迁地保护的环境特点, 创造出适合的海南坡垒种群发育的环境条件, 或许能缓解野生坡垒濒危状态。

关键词: 坡垒; 种群结构; 存活曲线; 动态指数; 时间序列; 生存分析

Comparative study on population development characteristics of *Hopea hainanensis* base in two different protection modes

ZHANG Li¹, YANG Xiaobo¹, NONG Shouqian², LI Donghai^{1,*}, LI Yuanling², SONG Jiayu¹

¹ College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, 570228, China

² Hainan Provincial Forestry Science Research Institute, Haikou, 571100, China

Abstract: *Hopea hainanensis* is one of the National Key Protected Plants in China and was classified as an Extremely Small Population (120 in total in the country) in 2012. It was also classified as a Critically Endangered Population by the International Union for Conservation of Nature (IUCN). The protection and restoration patterns of *H. hainanensis* populations has been the focus of local forestry work in Hainan Province since the 1960s. Traditional methods are mainly in-situ and ex-situ conservation, which have been used over 50 years but still have little effect on improving the original habitat of the population. Therefore, exploring effective population protection modes is of great significance to change this predicament. In this paper, we compared the development status of two *Hopea hainanensis* populations: the in-situ population from Bawangling Preserve and the ex-situ population in Fengmu Woodland, based on field investigations and statistical analysis. Our study revealed that the populations under both ex-situ and in-situ protections the growth type: young individuals made up the overwhelming majority, while middle-aged and elderly individuals were relatively few. Further, ex-

基金项目: 国家自然科学基金(31760170); 国家重点研发计划项目(2016YFC0503100)

收稿日期: 2018-11-01; 修订日期: 2019-02-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dhlye@163.com

situ protection population survival curves tended to be Deevey-I type, while the in-situ population survival curves tended to be Deevey-III. Time-series prediction analysis showed that the ex-situ population of Maple had a certain recovery potential, while in-situ population regeneration of the Bawangling population was difficult to maintain and is, thus, facing decline. According to analysis results, habitat has a strong environmental screening effect on the I age individuals and thus resulted in seedling mortality rates up to 99.5%—meaning only 0.17% can transition to young tree stage. Despite high seedling mortality rates (90.3%) in ex-situ populations, 8.85% seedlings can transition to the young tree stage, demonstrating a more stable population. Therefore, Fengmu Woodland is a more suitable option for the survival of *Hopea hainanensis* populations. We suggest simulating the environmental conditions of ex-situ conservation in in-situ conservation areas to create a suitable environment to alleviate the endangered state of *Hopea hainanensis* populations in Hainan Province.

Key Words: *Hopea hainanensis*; population structure; survival curve; dynamic index; time series; survival analysis

坡垒 (*Hopea hainanensis*) 为龙脑香科 (Dipterocarpaceae) 坡垒属 (*Hopea*) 常绿高大乔木, 植株高约 25—30m, 仅分布在中国海南和越南北部, 是中国热带雨林的 대표种之一^[1], 其木材优质, 为中国特类木材。目前在海南的吊罗山、黎母山、鹦哥岭、五指山、尖峰岭、霸王岭等热带雨林区海拔 400—800m 的山地沟谷、溪旁和山坡上仍见其踪迹^[2], 但因其木材优质, 被人类采伐严重, 导致其种群数量急速下降, 在野生状态下, 其种群数量恢复缓慢, 已经从热带雨林的 대표树种转变为偶见种^[3-5]。尽管自上个世纪 60 年代以来, 坡垒种群的保护与恢复一直是海南地方林业工作者关注的内容, 最早采用的保护与恢复方式为迁地保护和建立保护区进行原地保护, 历经 50 多年, 但该种群在原生境发育状况一直得不到有效的改善, 被列为国家 I 级保护植物, IUCN 的极危种群, 2012 年又列入国家种极小种群 (全国 120 种)^[6]。目前与坡垒种群特征相关的研究报道主要集中在地理分布格局^[7]、幼苗分布与母树关系^[8]、苗木分级^[9]等方面, 与坡垒保护生物学相关的研究报道主要集中在迁地保护^[10]和种苗繁育^[11]等方面, 基本回答了坡垒在海南的分布状况、野生种子传播及幼苗生长、迁地保护的环境选择及种苗的培育等问题。植物迁地保护工作是一个长期过程, 由于资源条件有限, 迁地保护的个体数量受到限制而形成小种群^[12], 关于野生种群与迁地保护种群的比较研究已有相关报道, 如刘梦婷比较了濒危植物黄梅秤锤树野生与迁地保护种群的果实性状^[13], 骆文华比较了广西火桐自然种群和迁地保护种群的遗传多样性^[14], 而有关坡垒种群在原地保护模式下和迁地保护模式下的种群结构和动态特征比较研究还未见相关报道, 本文通过对在霸王岭原地保护和枫木迁地保护两种保护模式下的坡垒种群调查, 采用种群年龄结构、静态生命表、存活曲线和时间序列预测模型分析等方法^[15-19], 从种群各龄级的实际生存个体数、死亡数及存活趋势, 预测同龄级种群未来变化的波动状态等, 旨在揭示坡垒种群的生存现状及动态趋势, 探讨保护模式与种群之间的关系及野生坡垒濒危的原因, 为野生坡垒的保护、种群恢复方式和途径提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

海南霸王岭国家级自然保护区位于海南岛西南部山区, 地理坐标为 18°52′—19°12′N, 108°53′—109°20′E, 属森林生态系统类型的自然保护区。保护区总面积 29980hm², 属于热带季风气候, 干湿季节明显。海拔在 100—1700m 之间, 土壤类型为砖红壤和山地红壤^[20]。该地区分布最广的两个主要植被类型为低地雨林和山地雨林, 低地雨林受人为干扰强度较大, 优势种为野荔枝 (*Litchi chinensis*) 和青梅 (*Vatica mangachapoi*)。山地雨林分布海拔较高, 人为干扰强度较小, 优势种为陆均松 (*Dacrydium plerrei*)、鸡毛松 (*Podocarpus imbricatus*)^[21]。

枫木实验林场位于海南省屯昌县枫木镇, 地理坐标为 19°08′—19°31′N, 109°45′—110°15′E, 林场辖区总面积为 1.8 万亩, 现园内收集树种 600 余种, 隶属 83 科 244 属。属热带季风气候, 春常有干旱, 夏高温高湿, 夏

秋多台风,冬凉有阴雨。一年四季光照充足,年平均日照在 1990—2100h 之间。年平均气温 23.5℃,最高平均气温 28.3℃,最低平均气温 16—18℃。极端气温最高为 39℃,最低 -0.6℃。雨水充足,年平均降雨量 1960mm—2400mm 之间,平均日降雨量在 0.1mm 以上的雨日在 180d 左右。年平均蒸发量为 1847mm,年平均相对湿度 84%。土壤类型有松散草原砂壤土、丘陵粘土质松芒箕质砂壤土、丘陵棕色粘壤土、山地灰棕色砂壤土等。枫木林场在 1962 年及 1965 年各种植一批野生坡垒,共 68 株,长势良好平均胸径 20.5cm,平均树高 16.0m;种植间距 5m,期间无人管理,让其自由生长,虽然坡垒生长较慢,但至今已发展到 1258 株,形成正常的种群年龄结构。

1.2 研究方法

1.2.1 调查方法

由于坡垒分布区域狭窄,分布面积较小,种群数量稀少可以直接计数,因此采用“实测法”进行调查。在整个霸王岭自然保护区和枫木林场苏木林全面调查坡垒种群个体,对坡垒个体进行每木调查,测定其胸径、树高、冠幅、坐标等,记录高度小于 0.33m 的幼苗数量。本次调查发现霸王岭坡垒有 3090 株,其中幼苗 2979 株,幼树 16 株,成树 95 株;枫木林场迁地保护的坡垒有 1258 株,其中幼苗 1082 株,幼树 105 株,成树 72 株。

1.2.2 径级划分

对于数量较少的濒危乔木树种,在较难获取其年龄的情况下,大多数学者采用径级结构代替年龄级结构进行种群结构特征分析,效果良好^[22-23]。参考李丹等^[24]的划分标准将坡垒种群划分为 5 个大小级:高度 <0.33m 或胸径 <2.5cm,为龄级 I 阶段(幼苗);胸径 ≥2.5cm 以上,按其胸径大小分级:2.5cm ≤ D < 7.5cm 为龄级 II 阶段(幼树)、7.5cm ≤ D < 22.5cm 为龄级 III 阶段(小树)、22.5cm ≤ D < 40.5cm 为龄级 IV 阶段(中树)、D ≥ 40.5cm 为龄级 V 阶段(大树)。以上述划分为标准,统计每个龄级坡垒个体数,建立种群静态生命表。

1.2.3 种群动态量化方法

种群动态数量化方法采用文献^[16]的方法,定量描述种群动态:

$$V_n = \frac{S_n - S_{n+1}}{\max(S_n, S_{n+1})} \times 100\% \quad (1)$$

$$V_{pi} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{k-1} S_n} \sum_{n=1}^{k-1} (S_n V_n) \quad (2)$$

式中, V_n 为种群从 n 到 $n+1$ 级的个体数量变化; V_{pi} 为整个种群结构的数量变化动态指数; S_n 、 S_{n+1} 分别为第 n 和 $n+1$ 级种群个体数; k 为种群大小级数量。式(2)仅适用于不考虑未来外部环境干扰的种群结构动态的比较,当考虑未来的外部干扰时,则种群结构动态还与大小级数量(k)及各大小级个体数(S)两因素相关,因此将式(2)修正为:

$$V_{pi}' = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} S_n V_n}{\min(S_1, S_2, S_3, \dots, S_k) k \sum_{n=1}^{k-1} S_n} \quad (3)$$

$$P_{极大} = \frac{1}{k \min(S_1, S_2, S_3, \dots, S_k)} \quad (4)$$

式中, V_n 、 V_{pi} 和 V_{pi}' 分别反映种群个体数量的增长、衰退和稳定的动态关系。

1.2.4 种群静态生命表建立和生存分析

依据文献^[15-16,24]的方法,综合调查个体存活数据编制坡垒种群的静态生命表并绘制种群的存活曲线,进行种群分析。

为了更好地揭示坡垒种群的动态变化规律,在种群静态生命表的基础上,引入生存分析中的 4 个函数,即种群生存率函数 S_x 、积累死亡率函数 F_x 、死亡密度函数 f_x 和危险率函数 λ_x ,参考易雪梅^[25]的公式进行计算。

1.2.5 种群数量动态的时间序列预测

时间序列分析是时间数列预测和回归预测方法的综合形式,该方法不用于分析因果关系,而侧重于根据

时间序列过去的变化和变动规律推测今后的趋势^[26]。本文采用时间序列分析的一次移动平均法对坡垒的种群龄级结构进行模拟和预测^[27]。

$$M_t^{[1]} = \frac{1}{n} \sum_{k=t-n+1}^t X_k$$

式中, n 表示需要预测的未来时间年限, $M_t^{[1]}$ 表示未来 n 年时 t 龄级的种群大小, X_k 为当前 k 龄级的种群大小。本文分别对未来 2、4、6 个龄级的坡垒种群数量进行时间序列预测。

2 结果和分析

2.1 坡垒种群结构特征

本文以龄级为横坐标, 株数百分比为纵坐标, 绘制种群龄级结构图(图 1)。结果显示, 霸王岭种群和枫木迁地保护种群的种群结构均呈现不规则金字塔型, 种群径级均无个体缺失, 坡垒幼苗均较丰富, 个体数量充足; 霸王岭种群幼苗占比高达 96.41%, 第 II 龄级个体数占比非常少, 仅占总数的 0.52%, 说明霸王岭坡垒种群所处自然环境无法满足幼苗的生长和发育, 导致种群出现严重的更新障碍, 仅有极小量的幼苗个体能够进入幼树阶段生长, 因此表现为幼苗—幼树的转化率极低的现象, 不利于种群的稳定生长。而枫木迁地保护种群幼苗占比为 85.94%, 第 II 龄级个体数较多, 是霸王岭种群的 6.56 倍。两个坡垒种群的中老龄个体数均较少, 其中, 霸王岭种群中老龄个体数总体趋势较为稳定, 波动较小, 第 III 龄级、第 IV 龄级、第 V 龄级个体数分别为 33 株、37 株、25 株; 而枫木迁地保护种群中老龄个体数总体均呈下降趋势, 第 III 龄级、第 IV 龄级、第 V 龄级个体数分别为 44 株、26 株、1 株。

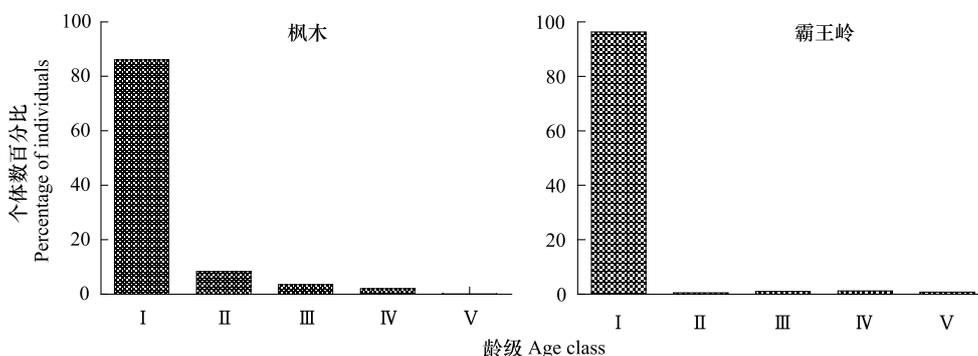


图 1 坡垒种群径级结构

Fig.1 Size structure of *Hopea hainanensis* population

为了对坡垒的种群结构特征进行更准确的评价, 本研究采用了种群动态量化方法分析其种群相邻大小级的结构动态变化。分析结果表明, 霸王岭种群整体呈现“增长-衰退-增长”波动的结构动态关系(表 1), 其中, V_1 大于 0, 说明第 I 龄级至第 II 龄级呈增长的结构动态关系, 且第 I 龄级的动态指数值 V_1 最大, 高达 99.46%, 表明第 I 龄级幼苗数量较多; V_2 至 V_3 小于 0, 表明幼树、中树个体呈衰退的结构动态关系; V_4 大于 0, 大树个体呈增长的结构动态关系, 但数值较低, 说明该龄级个体数不足。而枫木迁地保护种群 V_1 至 V_5 均大于 0, 呈现增长的结构动态关系(表 1)。种群总体动态变化指数分析结果表明, 种群总体动态变化指数 V_{pi} 均大于 0, 霸王岭种群及枫木迁地保护种群整体结构均为增长型种群, 霸王岭种群的 V_{pi} 值高于枫木迁地保护种群, 但当考虑外部干扰时其 V_{pi} 值极低, 仅为 0.0125, 种群稳定性差, 种群抗干扰能力低, 说明干扰是其种群退化的主要驱动因素。两类型坡垒的种群结构对随机干扰的敏感性指数即随机干扰风险极大值 $P_{极大}$ 分别为 0.1 和 0.01, 说明两类型坡垒种群对外界随机干扰均具有较高的敏感性。

2.2 坡垒种群静态生命表及存活曲线

静态生命表分析结果表明, 霸王岭种群存活数 (l_x) 随着年龄的增加, 先急剧减少后逐渐增加的波动结构

关系(表 2)。在第 I 龄级向第 II 龄级转化的过程中,种群数量急剧下降,具有高达 99.5%的死亡率,仅有 0.17%的个体能进入到第 II 龄级生长,表明坡垒幼年个体向成年阶段发育的不连续性。枫木迁地保护种群存活数(l_x)随着年龄的增加,呈现减小的结构关系,与霸王岭种群一样,种群在第 I 龄级向第 II 龄级转化的过程中,种群数量急剧下降,具有高达 90.3%的死亡率,但有 8.85%的个体能进入到第 II 龄级生长,幼树个体数量较霸王岭种群充足。生命期望 e_x 反映的是 x 级个体平均生存能力。两种保护类型坡垒种群都在第 II 龄级最大,表明坡垒在第 II 龄级阶段生存质量最高,是其生理活动的旺盛期。

表 1 坡垒种群动态变化指数

Table 1 Dynamic indices of *Hopea hainanensis* population

种群动态指数级 Dynamic index	动态指数值 Dynamic index value/%		种群动态指数级 Dynamic index	动态指数值 Dynamic index value/%	
	枫木 Fengmu	霸王岭 Bawangling		枫木 Fengmu	霸王岭 Bawangling
V1	90.30	99.46	V_{pi}	85.99	96.68
V2	58.10	-51.52	V_{pi}'	8.59	1.25
V3	40.91	-10.81	P 极大	0.10	0.01
V4	96.15	32.43			

表 2 坡垒静态生命表

Table 2 The static life table of *Hopea hainanensis* population

	龄级 Age class	A_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x	S_x
枫木	I	1082	1000	6.908	903	0.903	548	661	0.661	2.333	0.097
	II	105	97	4.575	56	0.577	68	113	1.164	0.870	0.423
	III	44	41	3.705	17	0.418	32	45	1.107	0.526	0.582
	IV	26	24	3.179	23	0.957	12	13	0.541	2.565	0.043
	V	2	2	0.614	-	-	1	1	0.541	-	-
霸王岭	I	2979	1000	6.908	995	0.995	502	535	0.535	5.298	0.005
	II	16	5	1.609	-6	-1.200	8	33	6.600	-0.788	2.200
	III	33	11	2.398	-1	-0.091	11	24	2.182	-0.087	1.091
	IV	37	12	2.485	4	0.333	10	14	1.167	0.405	0.667
	V	25	8	2.079	-	-	4	4	0.500	-	-

x : 龄级 Age class; A_x : x 龄级开始时的实际存活数; l_x : x 龄级开始时的标准化存活数; d_x : 从 x 到 $x+1$ 龄级的标准化死亡数; q_x : x 龄级的个体死亡率; L_x : 从 x 到 $x+1$ 龄级的平均存活个体数; T_x : x 龄级及以上各龄级的存活个体数; e_x : 进入 x 龄级个体的平均生命期望; K_x : 种群消失率; S_x : 种群存活率

本文以龄级为横坐标, $\ln l_x$ 为纵坐标, 绘制坡垒种群存活曲线(图 2)。结果表明霸王岭种群的存活曲线在 Deevey-II 型曲线和 Deevey-III 型曲线之间, 为进一步确定其存活曲线类型, 用 Hett 和 Loucks 的数学模型检验方程进行检验^[28], 建立其相应模型得到, $N_x = 4.8313e^{-0.197x}$ ($R^2 = 0.3122$), $N_x = 4.8022X^{-0.61}$ ($R^2 = 0.485$); 幂函数模型的 R^2 值大于指数模型的 R^2 值, 因此霸王岭种群存活曲线更趋向于 Deevey-III 型, 呈凹形曲线, 其幼年期死亡率很高, 种群斜率较大, 但生活到某一年龄阶段, 死亡率呈下降趋势。枫木迁地保护种群的存活曲线趋于 Deevey-I 型, 说明该种群的绝大部分个体都能活到物种年龄, 早期死亡率较低, 但到达一定生理年龄后, 短期内几乎全部死亡, 其老龄个体死亡率高达 96.5%。以龄级为横坐标, q_x 、 K_x 为纵坐标作死亡率和消

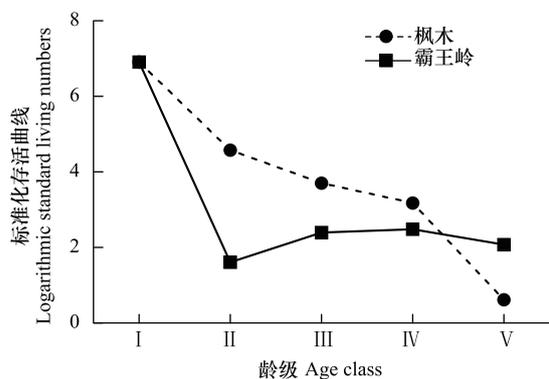


图 2 坡垒种群存活曲线

Fig.2 Survival curve of *Hopea hainanensis* population

失率曲线作图(图3)。结果表明两种类型种群的死亡率和消失率曲线标化趋势大体一致,反应了种群的一般规律。其中,枫木迁地保护种群的死亡率和消失率呈现出先急剧降低再急剧增长的趋势,迁地保护种群存在2个消亡高峰,分别发生在第I龄级和第IV龄级,其中第IV龄级的死亡率和消失率较高。这可能是由于大多数老龄个体的生理生长达到了极限,生存竞争能力减弱,对光照、水分、土壤等环境资源的竞争能力下降,导致个体逐渐衰老死亡;而霸王岭种群则呈先急剧降低再逐渐增长的趋势,其幼龄个体的死亡率和消失率高于中老龄个体死亡率,说明在第I龄级遭受了强烈的环境筛选。

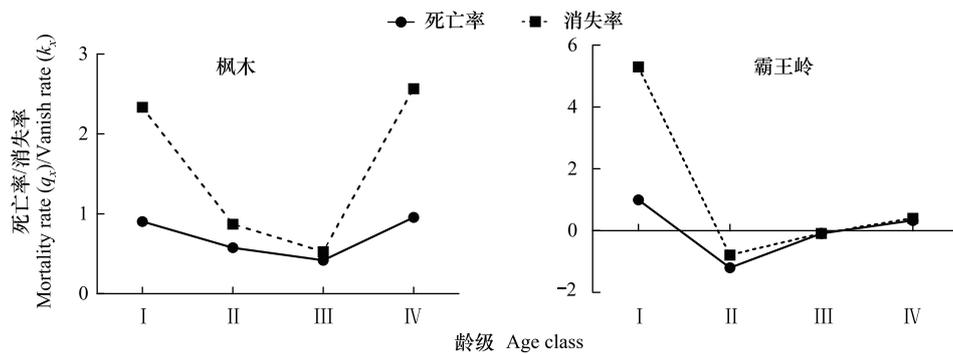


图3 坡垒种群死亡率和消失率曲线

Fig.3 Mortality and vanish rate of *Hopea hainanensis* population

2.3 坡垒种群的生存分析

依据4个生存函数的估计值(表3),以龄级为横坐标,生存率函数值、累计死亡率函数值为纵坐标绘制生存率曲线、累计死亡率曲线作图(图4)。结果表明,坡垒的生存率和累计死亡率为互补关系。随着龄级的增加,霸王岭原地保护种群生存率曲线先增后减,累计死亡率曲线先减后增,而枫木迁地保护种群生存率曲线单调递减,累计死亡率曲线单调递增;枫木迁地保护种群生存率下降及累计死亡率上升的趋势都为前期较大,后期较为稳定,说明种群在第II龄级达到了平衡。霸王岭种群的生存率极低,趋向于0;累计死亡率极高,趋向于1,说明霸王岭种群有衰退趋势。综合死亡密度函数和危险率函数分析,霸王岭种群死亡率前期较高,种群动态前期衰退较快。

表3 生存分析函数估算值

Table 3 Estimated values of survival analysis function

龄级 Age class	枫木 Fengmu				霸王岭 Bawangling			
	S	F	f	λ	S	F	f	λ
I	0.097	0.903	-0.065	0.329	0.005	0.995	-0.439	0.396
II	0.041	0.959	-0.032	0.162	0.011	0.989	0.222	-0.150
III	0.024	0.976	0.108	0.106	0.012	0.988	0.085	-0.017
IV	0.001	0.999	0.009	0.367	0.008	0.992	0.133	0.080

S、F、f、 λ 分别为各龄级的种群生存率 Survival rate、积累死亡率 Cumulative death rate、死亡密度 Mortality density、危险率 Hazard rate

2.4 坡垒种群数量的时间序列分析

坡垒种群数量动态变化的时间序列预测是以坡垒种群个龄级株数为原始数据,按照一次平行移动平均法预测出各龄级在未来2、4、6个龄级时间后的个体数(表4)。分析结果显示,在经历2、4、6个龄级时间后,霸王岭种群整体呈下降趋势,但种群数量存在一定的波动,前期波动幅度较大,后期较为稳定;第II龄级在经历2个龄级时间后,个体数增长了93.6倍,这与霸王岭目前情况下幼苗丰富,种群维持有较充足的后备资源是一致的;但第III—IV龄级经过2个龄级时间后个体数分别下降了24.24%和5.41%。这表明坡垒种群严重缺乏幼龄个体即第II龄级个体数。综合霸王岭种群整个发展趋势来看,其坡垒种群的正常更新存在难以维持的现象,在未来可能会不同程度地趋于衰退,甚至濒危。在经历2、4、6个龄级时间后,枫木迁地保护种群从IV龄级

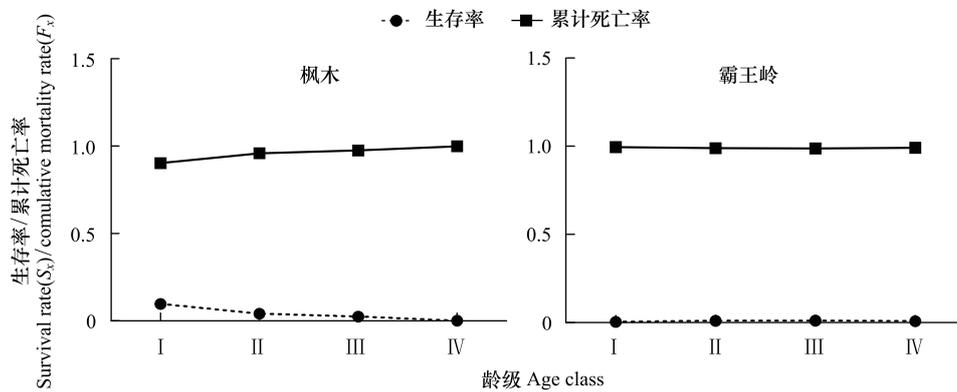


图4 坡垒种群生存率和累计死亡率曲线

Fig.4 Survival rate and cumulative mortality rate of *Hopea hainanensis* population

之后的个体数呈增加趋势,说明迁地保护坡垒种群的幼龄个体所占比例较高,能补充种群生长中后期的个体数量。

表4 坡垒种群动态变化的时间序列分析

Table 4 Time sequence analysis of age structure of *Hopea hainanensis*

龄级 Age class	枫木 Fengmu				霸王岭 Bawangling			
	原始数据 Primary data	M2 ⁽¹⁾	M4 ⁽¹⁾	M6 ⁽¹⁾	原始数据 Primary data	M2 ⁽¹⁾	M4 ⁽¹⁾	M6 ⁽¹⁾
I	1082				2979			
II	105	594			16	1498		
III	44	75			33	25		
IV	26	35	315		37	35	767	
V	2	14	45	252	25	31	28	618

3 结论和讨论

植物种群结构可以反映种群个体数量动态、空间上的配置以及发展趋势,并且可以反映立地条件优劣、植物对环境的适应性及其在群落中的地位和作用^[23];种群结构特征中的径级结构可以较好的反映种群的动态变化^[29]。本文对霸王岭种群和枫木迁地保护种群的年龄结构及种群结构动态指数分析的综合结果显示,霸王岭种群整体为增长型,但幼苗个体占优势,幼树个体严重缺乏,中老年个体数目较少,种群结构呈不稳定状态,其种群数量总体呈衰减趋势;而枫木迁地保护种群结构为增长型结构。从霸王岭种群结构来看,幼苗数量显著高于后几个龄级的个体数,幼树的个体数量稀少,霸王岭种群第 I 龄级幼苗具有高达 99.5% 的死亡率,仅有 0.17% 的个体能进入到第 II 龄级生长,说明生境对第 I 龄级个体的环境筛作用较强,幼苗阶段难以过渡到幼树阶段。坡垒种子属于顽拗性种子,在自然状态下易萌发,坡垒种子活力强,颗粒大、饱满的种子发芽率高达 90.2%^[30],且林下的荫蔽环境适宜坡垒幼苗生长,因此坡垒具有丰富的幼苗;调查时发现野生坡垒叶片被昆虫啃食的比例较高,坡垒母株周围的幼苗密度较大,更易受到昆虫啃食,大量叶片被昆虫啃食导致幼苗植株生长缓慢甚至死亡^[31];因坡垒自身的生物学特性,耐阴性的幼苗随着苗龄的增长需光性逐渐增强,而热带雨林的森林郁闭度通常较高,无法为坡垒幼苗提供充足的光照^[2],导致坡垒幼苗个体难以通过强烈的环境筛选进入种群的更替层。而幼龄个体的数量是维持种群稳定性的基础^[32],霸王岭种群幼树的严重缺乏导致种群稳定性较差,种群易衰退。枫木迁地保护种群的年龄结构呈不规则金字塔型,种群径级均无个体缺失,第 I 龄级幼苗也具有高达 90.3% 的死亡率,但有 8.85% 的个体能进入到第 II 龄级生长,幼树个体数量较霸王岭种群充足,能够维持坡垒种群的稳定性,有利于坡垒种群的发育。

生命表是判断植物种群发展趋势的重要指标之一,分析植物种群的生命表和存活曲线能够反映种群的现实状况、反应植物种群和环境之间的竞争关系,对珍稀濒危植物的保护及利用有重要意义^[33-34]。根据坡垒种群存活曲线分析,霸王岭原地保护种群的存活曲线更趋向于 Deevey-III 型;枫木迁地保护种群趋向 Deevey-I 型。霸王岭种群死亡率先急剧下降后逐渐上升,死亡率在第 I 龄级时最高;生命期望在第 II 龄级最高,该龄级之后生命期望随着年龄的增长而下降,说明这些龄级植物的平均生存能力较强,但由于人为因素影响较大,导致植株大规模死亡,更新困难,种群衰退加剧,这与种群的动态量值结果也是一致的。枫木迁地保护种群死亡率在第 IV 龄级最高,但在第 I 龄级的死亡率也高达 90.3%,第 IV 龄级死亡率高是由于大多数老龄个体的生理生长达到了极限,生存竞争能力减弱,对光照、水分、土壤等环境资源的竞争能力下降,导致个体逐渐衰老死亡。第 I 龄级的高死亡率可能是由于坡垒幼年期生存竞争能力不强,且随着坡垒径级的增加,对环境资源的需求增多,种群内和种群间的资源竞争加剧,导致大量个体死亡。生存函数能很好地说明种群的结构和动态变化,生存函数是任意时刻的函数,在种群生命表分析中具有很高的实际应用价值^[35]。生存分析表明,由于存在幼苗的密度制约,两种保护方式下的坡垒种群的累计死亡率都相对较高,均高于 90%,但霸王岭原地保护种群的累计死亡率显著高于枫木迁地保护种群;时间序列分析显示,由于缺乏幼树个体的补充,霸王岭原地保护种群未来的发展趋于衰退,这也是小范围、片段化分布的濒危植物天然种群必然经历的发展过程^[33,35-37],而枫木迁地保护种群幼树充足,具备一定的恢复潜能,其现有的生境有利于幼年期到成年期的生长。

综合上述分析,野生坡垒幼树的缺乏是导致其濒危的主要原因,幼树的严重缺失不仅与坡垒种群自身的更新机制有关,生存环境的破坏也具有很大的影响,调查发现,中老龄坡垒植株所处生境有大量裸石覆盖,导致坡垒所处生境破碎化严重,中老龄坡垒数量较低。此外,坡垒多分布于海拔为 200—800m 的山地,人为干扰较大,易破坏坡垒所处的自然环境,进一步加重生境的破碎化,不仅加剧坡垒幼树幼苗的死亡,也限制了其中老龄植株的生长,导致坡垒生存受到极大的威胁。因此,需进一步加强对野生坡垒种群的保护。保护濒危物种的关键是保护其现有种群^[38],通过进一步研究影响坡垒种群发育的环境因子,在原地保护的自然保护区内模拟迁地保护的环境特点,创造出适合海南坡垒种群发育的环境条件,或许能有效缓解野生坡垒的濒危局面。

参考文献 (References):

- [1] Satiraphan M, Pamonsinlapatham P, Sotanaphun U, Sittisombut C, Raynaud F, Garbay C, Michel S, Cachet X. Lupane triterpenes from the leaves of the tropical rain forest tree *Hopea odorata* Roxb. and their cytotoxic activities. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2012, (44): 407-412.
- [2] 陈侯鑫, 黄川腾, 何芬, 郑伟, 冯家平. 坡垒研究进展综述. *热带林业*, 2015, 43(4): 4-6.
- [3] 王发国, 张荣京, 邢福武, 吴世捷, 叶育石, 陈焕强. 海南鹦哥岭自然保护区的珍稀濒危植物与保育. *武汉植物学研究*, 2007, 25(3): 303-309.
- [4] 凡强, 廖文波, 苏文拔, 李意生, 吴昌魁. 五指山自然保护区的保护植物和珍稀濒危植物. *热带林业*, 2003, 31(2): 25-29, 21-21.
- [5] 莫锦华, 李意德, 许涵, 陈德祥. 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. *热带林业*, 2007, 35(4): 22-24, 16-16.
- [6] 孙卫邦, 韩春艳. 论极小种群野生植物的研究及科学保护. *生物多样性*, 2015, 23(3): 426-429.
- [7] 陈彧, 方燕山, 方发之, 韩东苗, 吴钟亲, 陈修仁. 海南霸王岭坡垒分布格局初步研究. *热带林业*, 2016, 44(3): 40-42.
- [8] 裴学军, 周晓芳, 刘娜, 洪小江, 周照骊, 成克武. 野生极小种群植物坡垒幼苗分布与母树的关系. *河北农业大学学报*, 2015, 38(3): 46-51.
- [9] 方发之, 杨众养, 吴钟亲, 陈彧, 韩东苗, 陈修仁. 坡垒种苗分级标准研究. *热带林业*, 2016, 44(1): 22-25.
- [10] 杨德军, 邱琼. 海南坡垒引种初报. *江西林业科技*, 2007, (2): 27-29.
- [11] 李璟, 段宗亮. 海南坡垒扦插育苗试验. *河北林业科技*, 2012, (6): 21-21, 33-33.
- [12] Enßlin A, Sandner T M, Matthies D. Consequences of ex situ cultivation of plants: Genetic diversity, fitness and adaptation of the monocarpic *Cynoglossum officinale* L. in botanic gardens. *Biological Conservation*, 2011, 144(1): 272-278.
- [13] 刘梦婷, 魏新增, 江明喜. 濒危植物黄耆秤锤树野生与迁地保护种群的果实性状比较. *植物科学学报*, 2018, 36(3): 354-361.

- [14] 骆文华, 代文娟, 刘建, 胡兴华, 李祥军, 黄仕训. 广西火桐自然种群和迁地保护种群的遗传多样性比较. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(2): 66-71.
- [15] 张志祥, 刘鹏, 蔡妙珍, 康华靖, 廖承川, 刘春生, 楼中华. 九龙山珍稀濒危植物南方铁杉种群数量动态. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1146-1156.
- [16] 张婕, 上官铁梁, 段毅豪, 郭微, 刘卫华, 郭东罡. 灵空山辽东栎种群年龄结构与动态. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3125-3130.
- [17] 李博. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [18] 何平. 珍稀濒危植物保护生物学. 重庆: 西南师范大学出版社, 2005.
- [19] 洪伟, 王新功, 吴承祯, 何东进, 廖成章, 程煜, 封磊. 濒危植物南方红豆杉种群生命表及谱分析. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1109-1112.
- [20] Hu Y J, Ding X Q. A study on the plant species diversity of tropical natural forest in Bawangling, Hainan Island. Biodiversity Science, 2000, 8(4): 370-377.
- [21] 陈玉凯, 杨琦, 莫燕妮, 杨小波, 李东海, 洪小江. 海南岛霸王岭国家重点保护植物的生态位研究. 植物生态学报, 2014, 38(6): 576-584.
- [22] 何亚平, 费世民, 蒋俊明, 陈秀明, 张旭东, 何飞. 不同龄级划分方法对种群存活分析的影响——以水灾迹地油松和华山松种群生存分析为例. 植物生态学报, 2008, 32(2): 448-455.
- [23] 康华靖, 陈子林, 刘鹏, 郝朝运, 韦福民. 大盘山自然保护区香果树种群结构与分布格局. 生态学报, 2007, 27(1): 389-396.
- [24] 李丹, 张萱蓉, 杨小波, 李东海, 林泽钦, 李苑菱. 自然保护区对濒危植物种群的保护效果探索——以海南昌江县青梅种群为例. 林业资源管理, 2016, (1): 118-125.
- [25] 易雪梅, 张悦, 王远遐, 姬兰柱, 吴培莉. 长白山水曲柳种群动态. 生态学报, 2015, 35(1): 91-97.
- [26] 韩路, 王家强, 王海珍, 宇振荣. 塔里木河上游胡杨种群结构与动态. 生态学报, 2014, 34(16): 4640-4651.
- [27] 申仕康, 马海英, 王跃华, 王博轶, 申国柱. 濒危植物猪血木(*Euryodendron excelsum* H. T. Chang)自然种群结构及动态. 生态学报, 2008, 28(5): 2404-2412.
- [28] Silvertown J W. Introduction to Plant Population Ecology. London; Longman, 1982.
- [29] Arista M. The structure and dynamics of an *Abies pinsapo* forest in southern Spain. Forest Ecology and Management, 1995, 74(1/3): 81-89.
- [30] 陈青度, 宋学之, 杨军, 王东馥. 不同温度贮藏对坡垒(*Hopea hainanensis*)种子活力的影响. 热带林业科技, 1982, (1): 47-50.
- [31] Bebb D, Brown N, Speight M. Drought and root herbivory in understorey *Parashorea Kurz* (Dipterocarpaceae) seedlings in borneo. Journal of Tropical Ecology, 2002, 18(5): 795-804.
- [32] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 张海娜, 李善家. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4272-4279.
- [33] 杨小林, 王秋菊, 兰小中, 李春燕. 濒危植物大花黄牡丹(*Paeonia ludlowii*)种群数量动态. 生态学报, 2007, 27(3): 1242-1247.
- [34] 姜在民, 和子森, 宿昊, 赵涵, 蔡靖. 濒危植物羽叶丁香种群结构与动态特征. 生态学报, 2018, 38(7): 2471-2480.
- [35] 杨凤翔, 王顺庆, 徐海根, 李邦庆. 生存分析理论及其在研究生命表中的应用. 生态学报, 1991, 11(2): 153-158.
- [36] 谢伟东, 陈建华, 赖家业, 石海明, 林少芳, 刘宝, 黎向东. 珍稀濒危植物蒜头果种群生命表分析. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(2): 73-76.
- [37] 刘海燕, 杨乃坤, 李媛媛, 洪江, 邹天才. 稀有濒危植物长柱红茶种群特征及数量动态研究. 植物科学学报, 2016, 34(1): 89-98.
- [38] 刘海洋, 金晓玲, 沈守云, 张日清. 湖南珍稀濒危植物——珙桐种群数量动态. 生态学报, 2012, 32(24): 7738-7746.