



•研究报告•

生境片段化对濒危植物景东翅子树种群结构与动态的影响

杨国平¹, 吴涛^{2,3,4}, 耿云芬^{2,3,4}, 李小双², 郝佳波^{2,3,4}, 袁春明^{2,3,4*}

1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303; 2. 云南省林业和草原科学院, 昆明 650204; 3. 国家林业和草原局云南珍稀濒危森林植物保护和繁育重点实验室, 昆明 650204; 4. 云南省森林植物培育与利用重点实验室, 昆明 650204

摘要: 生境的破坏及其片段化是生物多样性丧失的主要原因, 了解生境片段化对植物种群动态的影响十分必要。本文比较分析了不同大小生境片段(5 ha和15 ha)和连续森林中濒危植物景东翅子树(*Pterospermum kingtungense*)种群的结构与动态, 目的是明确影响景东翅子树种群动态的关键生活史阶段及其种群保护的目标, 为濒危植物种群保护和管理策略的制定提供科学依据。在上述3种生境中分别设立3个50 m × 100 m的1.5 ha固定样地, 调查景东翅子树所有个体的胸径(其中幼苗和幼树为地径)和高度、个体的存活及幼苗的补充情况。基于上述统计参数, 建立预测种群动态的Lefkovich矩阵模型, 同时应用矩阵模型的弹性分析方法量化种群统计参数对种群增长率的相对贡献。结果表明: (1)在5 ha和15 ha生境片段及连续森林各1.5 ha的样地中, 2018年首次调查到景东翅子树的个体数分别为34、82和88株, 2019年复查时的个体数分别为33、82和87株。3种生境中景东翅子树种群的年龄结构均以幼树为主, 但5 ha生境片段森林缺乏幼苗和大树(包括成树和亚成树), 而15 ha生境片段森林幼苗较丰富。(2)在3种生境中景东翅子树种群的增长率等于1 (15 ha生境片段)或趋近于1 (5 ha生境片段和连续森林), 说明不同生境中的景东翅子树种群比较稳定, 这主要是因为其各生活史阶段的存活率均较高。(3)景东翅子树成树和亚成树阶段的存活率对种群增长率的贡献最大, 是影响其种群动态的关键生活史阶段。因此对于大树(包括成树和亚成树)的保护是极度濒危植物景东翅子树种群维持的关键。研究结果揭示小生境片段降低了景东翅子树种群的数量, 改变了种群的结构, 但对种群动态的影响效应尚未显现。因此对于这些小生境片段中濒危植物种群的保护和恢复是可行的, 也是有价值的。

关键词: 生境片段化; 种群动态; Lefkovich矩阵模型; 种群增长率; 弹性分析

杨国平, 吴涛, 耿云芬, 李小双, 郝佳波, 袁春明 (2021) 生境片段化对濒危植物景东翅子树种群结构与动态的影响. 生物多样性, 29, 449–455. doi: 10.17520/biods.2020397.

Yang GP, Wu T, Geng YF, Li XS, Hao JB, Yuan CM (2021) Effects of habitat fragmentation on population structure and dynamics of the endangered plant *Pterospermum kingtungense*. Biodiversity Science, 29, 449–455. doi: 10.17520/biods.2020397.

Effects of habitat fragmentation on population structure and dynamics of the endangered plant *Pterospermum kingtungense*

Guoping Yang¹, Tao Wu^{2,3,4}, Yunfen Geng^{2,3,4}, Xiaoshuang Li², Jiabo Hao^{2,3,4}, Chunming Yuan^{2,3,4*}

1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

2 Yunnan Academy of Forestry and Grassland, Kunming 650204

3 Key Laboratory of Rare and Endangered Forest Plants of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650204

4 Key Laboratory for Forest Silviculture and Resources Development of Yunnan Province, Kunming 650204

ABSTRACT

Aims: Habitat destruction and fragmentation are the leading cause of biodiversity loss. Therefore, it is necessary to understand the effect of fragmentation on plant population dynamics. The present study compared the population structure and dynamics of the endangered plant *Pterospermum kingtungense* in fragmented habitats of different sizes (5-ha and 15-ha) and continuous forests. We sought to identify the key life history stages that affect the population dynamics of *P. kingtungense*, with the goal of the providing a scientific basis for the formulation of endangered plant

收稿日期: 2020-10-12; 接受日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(31760176)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yuanchunming1017@163.com

protection and management strategies.

Methods: Censuses were conducted over a one-year (2018–2019) period in three 50 m × 100 m sampling plots in each of the three habitats. All *P. kingtungense* plants were measured for DBH (diameter at breast height, but ground diameter for seedlings and saplings), height, survival, and seedling replenishment. Based on the investigated demographic parameters, annual transition matrices were established for each habitat to predict the population dynamics, and the relative contribution of the population demographic parameters to the population growth rate was quantified by the elastic analysis method of the matrix model.

Results: Across the two years, we recorded an average of 33.5, 82 and 87.5 *P. kingtungense* individuals in the 5-ha fragment, 15-ha fragment and continuous forest plots, respectively. Saplings dominated in the three habitats, but seedlings and big trees (comprising subadult and adult) are scarce in the 5-ha forest fragment, while seedlings are abundant in the 15-ha forest fragment. The population growth rate of *P. kingtungense* was equal to (15-ha fragment) or approaching (5-ha fragment and continuous forests) one, suggesting that *P. kingtungense* populations were stable in different size fragments and continuous forests. This stability is mainly due to the high survival rates of the populations in each life cycle stages. The survival rates of adult and subadult stages contribute substantially to the population growth rate, and these are the key life cycle stages affecting population dynamics in this species. Thus the protection of large trees (i.e., adults and subadults) is key to maintaining populations of the endangered plant *P. kingtungense*.

Conclusion: Our findings reveal that the population size of *P. kingtungense* decreased and its population structure altered in the small fragmented habitat, but the effect on the population dynamics may not yet have shown themselves. Therefore, it is feasible and valuable to protect and restore the endangered plant populations even in small, fragmented habitats.

Key words: habitat fragmentation; population dynamics; Lefkovitch matrix models; population growth rate; elasticity analysis

生境的破坏及其片断化(或破碎化)是自然种群生存的一个主要威胁因素(Ewers & Didham, 2006; Melo et al, 2013)。生境片断化导致生境面积减少、种群隔离程度及生境边缘长度增加,造成种群个体数量减少,直接增加了局域种群灭绝的风险(Ewers & Didham, 2006)。有关森林片断化对植物种群影响的研究表明,与片断化相关的生物和非生物因子的改变可以显著地影响残存种群的繁殖、生长和存活(Bruna et al, 2009)。由于人口的不断增长和人为活动的加剧,生境的片断化日益严重。因此,为了保护这些残存片断生境中的濒危物种,对其种群的数量和动态开展研究是十分必要的。

种群的衰退或灭绝从根本上来讲是一个种群统计学过程(张大勇和姜新华, 1999; Bruna et al, 2009),因此了解自然种群的动态变化可以揭示种群生活史阶段中的薄弱环节及其濒危的原因(林永慧等, 2011)。矩阵模型是动植物种群动态研究应用的主要模型(Morris & Doak 2002; Crone et al, 2011),其中Leslie (1945)矩阵模型以等距年龄分组划分种群,而Lefkovitch (1965)矩阵模型以不等距的大小或发育阶段划分,在生活史复杂的种群以及个体年龄难以获取的研究对象如树木等的研究中应用更为广泛(Hueneke & Marks, 1987; 胡玉佳和王寿松,

1988; 尤海梅和小池文人, 2011; Aschero et al, 2016)。与此同时,研究方法上新的工具或手段也已建立起来,如弹性分析(Caswell, 1984; de Kroon et al, 1986)已成为种群统计学和保护生物学中扰动分析的主要方法(Crouse et al, 1987; Silvertown et al, 1993)。弹性分析主要用于评价和比较种群特定生活史阶段生存、生长和繁殖等种群参数对种群增长率的相对贡献(de Kroon et al, 2000; Heppell et al, 2000)。

景东翅子树(*Pterospermum kingtungense*)属梧桐科翅子树属,为云南特有种,主要分布在景东彝族自治县川河流域。由于其分布区域狭窄、植株稀少,属极小种群物种,已被列为国家二级保护植物。袁春明等(2011, 2012)基于4个种群的不完全调查初步分析了景东翅子树种群的分布、年龄结构、动态及萌生特征,罗忠华等(2011)对景东翅子树种群的结构及分布进行了较为系统的调查研究。根据第二次国家野生保护植物调查,该物种有12个空间或地理上分隔的种群,分布在不同大小的片断或连续森林中(数据未发表)。本文基于不同大小的片断和连续森林中景东翅子树种群统计参数的调查,建立了预测种群动态的Lefkovitch矩阵模型,同时应用矩阵模型的弹性分析方法量化了种群统计参数

对种群增长率的相对贡献。试图回答以下3个问题: (1)不同大小片断和连续森林中景东翅子树种群数量与结构怎样? (2)不同大小片断和连续森林中景东翅子树种群增长率如何? (3)哪类种群参数(即生存、生长和繁殖)对种群增长率的贡献最大? 目的是明确片断化生境中影响景东翅子树种群动态的关键生活史阶段及其种群保护的目标, 为濒危植物保护和管理策略的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地点位于云南景东彝族自治县川河流域。根据景东彝族自治县气象站的统计资料, 该地年平均气温18.3℃, 最冷月平均气温10.9℃, 最热月平均气温23.2℃; 年平均降水量1,086.7 mm, 5–10月为雨季, 其降水量占全年降水的84.1%。研究区域自然植被主要为松林和山地常绿阔叶林。常绿阔叶林主要分布在山体的下部, 由于人为干扰破坏如开垦、修路等, 造成了这些常绿阔叶林的片断化。

景东翅子树主要分布在海拔1,400 m左右的山地常绿阔叶林中, 该类森林其他乔木树种还有滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、滇润楠(*Machilus yunnanensis*)、粗糠柴(*Mallotus philippensis*)、蒙自合欢(*Albizia bracteata*)、滇菜豆树(*Radermachera yunnanensis*)、梔子皮(*Itoa orientalis*)、密花树(*Rapanea neriifolia*)、绒毛崖豆(*Millettia velutina*)、越南安息香(*Styrax tonkinensis*)等, 灌木主要有羽萼木(*Colebrookea oppositifolia*)、米团花(*Leucoscepterum canum*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、红皮水锦树(*Wendlandia tinctoria*)、杜茎山一种(*Maesa* sp.)、清香木(*Pistacia weinmannifolia*)等。

1.2 样地设置与调查

选择3种类型的生境, 包括5 ha和15 ha的森林片断各1个, 以及2个大片的连续森林(表1)。因为坡

陡(甚至为悬崖), 不便于样地调查, 大片的连续森林选择了2个地点。5 ha生境片断与其中一个连续森林相邻, 但被一条溪流隔开, 而15 ha生境片断距离两个连续森林均超过50 km。所选择的残存森林片断大约是20世纪80年代农业开垦活动后形成的, 由于坡陡和裸露的岩石不适合耕种, 也和连续森林一样得到了较好的保护。在每一种生境中分别建立3个50 m × 100 m的固定样地(共9个), 其中片断生境中的样地尽可能靠近片断中心, 连续森林中的样地则设置在远离森林边缘的位置。

2018年1–2月对样地内景东翅子树的所有个体进行全面调查并挂牌编号, 记录胸径(DBH) (胸径位置用油漆进行标注)和高度, 其中幼苗和幼树测定其地径。2019年1–2月进行复查, 对每一个体跟踪记录其生长状况(胸径或地径、树高)的变化、是否死亡, 以及新增幼苗个体等情况。

1.3 Lefkovitch矩阵模型的建立

景东翅子树个体的开花数与其胸径大小显著相关, 观察到的最小开花个体的胸径为12.1 cm, 但其开花数仅10朵左右, 也只有几个果实, 95.8%的开花结实个体的胸径大于15 cm (Yuan et al, 2021)。本文据此及相关的调查方法人为地将其种群生活史简化为幼苗(树高 $h < 50$ cm)、幼树($h \geq 50$ cm且 $DBH < 5$ cm)、小树($5 \text{ cm} \leq DBH < 10$ cm)、亚成树($10 \text{ cm} \leq DBH < 15$ cm)和成树($DBH \geq 15$ cm) 5个阶段, 其生活史模式如图1。在2018–2019年调查时间段内, 一个个体在其某个生活史阶段*i*存活并进入到下一个生活史阶段*i + 1*, 记为*G*, 或者存活并留存在某个生活史阶段, 记为*S*, 还有可能移出种群, 即死亡(死亡的概率 $D = 1 - S - G$)。根据景东翅子树种群统计参数的调查结果, 建立Lefkovitch矩阵模型(*M*) (Lefkovitch, 1965), 其中繁殖率*F*根据样地内幼苗的个体数除以成树的个体数再乘以成树存活的概率

表1 不同生境景东翅子树种群样地情况

Table 1 Sampling plots of the investigated *Pterospermum kingtungense* populations in different habitats

生境类型 Habitat type	地理位置 Geographic location	海拔 Altitude (m)	土壤类型 Soil type	林冠高度 Canopy height (m)	郁闭度 Canopy density	样方数 No. of plots
5 ha生境片断 5-ha fragmented habitat	100°41' E, 24°38' N	1,440	黄壤 Yellow soil	20	0.85	3
15 ha生境片断 15-ha fragmented habitat	101°05' E, 24°17' N	1,352	红壤 Red soil	12	0.70	3
连续森林 Continuous forest	100°40' E, 24°38' N	1,485	黄壤 Yellow soil	20	0.92	2
	100°38' E, 24°43' N	1,430	黄壤 Yellow soil	18	0.90	1

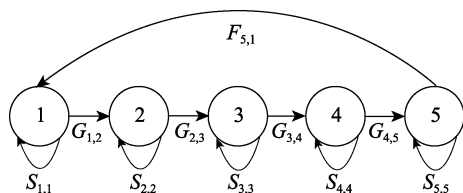


图1 景东翅子树种群生活史。图中数字1–5分别代表景东翅子树生活史的5个阶段， F 为繁殖率， $G_{i,i+1}$ 表示一个调查时间段内(本调查为2018–2019年)一个个体在生活史阶段*i*存活并进入到下一个生活史阶段*i* + 1的概率， $S_{i,i}$ 表示一个个体存活并留存在生活史阶段*i*的概率。

Fig. 1 Life history model of *Pterospermum kingtungense* populations. The figures represent the different stages (1, seedling; 2, sapling; 3, small tree; 4, subadult; 5, adult), F , Fertility; $G_{i,i+1}$, Probability of survival and growth from a give stage to a large one; $S_{i,i}$, Probability of surviving and remaining in the same stage over the one-year period (2018–2019).

$$M = \begin{pmatrix} S_{1,1} & 0 & 0 & 0 & F_{5,1} \\ G_{1,2} & S_{2,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{2,3} & S_{3,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{3,4} & S_{4,4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{4,5} & S_{5,5} \end{pmatrix} \quad (1)$$

估算(Caswell, 1989)。

1.4 弹性分析

首先计算灵敏度(sensitivity)，它表示一个矩阵元素 a_{ij} 的变化引起的增长率 λ 的变化：

$$S_{ij} = \frac{\partial \lambda}{\partial a_{ij}} = \frac{w_i v_j}{\langle wv \rangle} \quad (2)$$

式中， S_{ij} 为灵敏度， λ 为周限增长率， a_{ij} 为转移矩阵中的元素， w_i 为种群稳定阶段的分布(即不同生活史阶段个体数所占比例)组成的向量中的第*i*个元素(此向量也称为矩阵 M 的右向量)， v_j 为种群不同生活史阶段的繁殖值组成的向量中的第*j*个元素(此向量也称为矩阵 M 的左向量，它是通过矩阵 M 的转置矩阵 M^T 的右向量求得)， $\langle wv \rangle$ 为此2个向量的积，为一标量。

由于各种群参数的单位不一致导致其可比性不强，需进一步计算弹性值(elasticity value, e_{ij})，它代表种群参数(a_{ij})对种群增长率(λ)的相对贡献率，其合计值为1 (de Kroon et al, 1986)。

$$e_{ij} = \frac{a_{ij}}{\lambda} \times \frac{\partial \lambda}{\partial a_{ij}} = \frac{a_{ij} S_{ij}}{\lambda} \quad (3)$$

1.5 数据统计分析

由于景东翅子树为极小种群，个体数量较少，

因此本文汇总了同一类生境中3个样方的数据来分析种群的数量和结构，并分别建立3种不同生境的种群矩阵模型。这种处理的好处是在有限的样方面积中可以弥补有的径级小而可能没有分布的情况。

种群的动态表述为 $n_{t+1} = Mn_t$ ，式中 M 为转移矩阵， n_{t+1} 和 n_t 分别为时间*t*+1和*t*时种群的大小分布(为一个列向量，由不同生活史阶段种群的个体数组成)。种群增长率、弹性分析等的计算应用R软件共享包popbio完成(Stubben & Milligan, 2007)，其中迭代次数设为100。

2 结果

2.1 种群数量与年龄结构

在5 ha和15 ha生境片断及连续森林各1.5 ha的样地中，2018年首次调查到的景东翅子树个体数分别为34、82和88株，2019年复查时的个体数分别为33、82和87株。15 ha生境片断和连续森林中景东翅子树的个体数量分别是5 ha生境片断中的2.4和2.6倍。3种生境中景东翅子树种群的年龄结构均以幼树为主，但5 ha生境片断缺乏幼苗和大树(包括成树和亚成树)，而15 ha生境片断幼苗较丰富。调查期间3种生境种群数量变化不大，个体间生活史阶段的转移主要发生在幼苗、幼树和小树之间(图2)。

2.2 种群增长率

2018–2019年间不同生境中景东翅子树种群的Lefkovitch矩阵如表2。由表2可知，15 ha生境片断中，景东翅子树种群的增长率等于1，说明该种群是稳定的；5 ha生境片断中，种群的增长率为 $0.9999 < 1$ ，表明该种群以每年0.01%的速度呈几何级数减少；连续森林中，种群的增长率为 $1.0172 > 1$ ，表明该种群以每年1.72%的速度呈几何级数增长。

2.3 弹性值

不同生境中景东翅子树种群不同生活史阶段的弹性值如表3所示(弹性值合计应为1，如大于或小于1是因为四舍五入的缘故)。5 ha生境片断中，亚成树阶段种群存活率的弹性值最大，成树阶段次之，分别为0.8889和0.1111。15 ha生境片断中，成树阶段种群存活率的弹性值最大达0.9242，占据较大的优势。连续森林中，成树阶段种群存活率的弹性值也最高，但所占比例不占优势，其值为0.5958，幼树阶段存活率的弹性值次之，为0.2250。

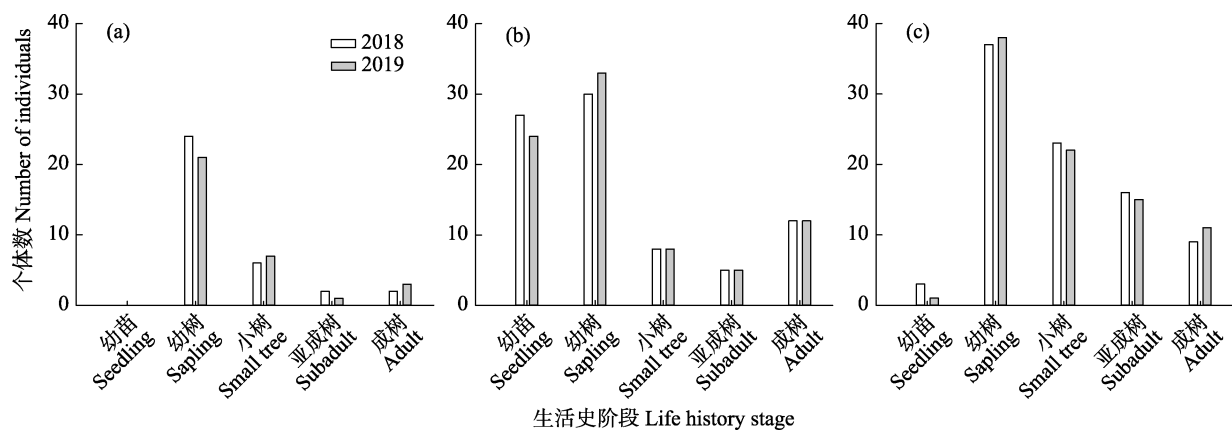


图2 不同生境中景东翅子树种群的年龄结构。(a) 5 ha生境片段; (b) 15 ha生境片段; (c)连续森林。
Fig. 2 Age structure of *Pterospermum kingtungense* populations in different habitats. (a) 5-ha fragmented habitat; (b) 15-ha fragmented habitat; (c) Continuous forest.

表2 不同生境中景东翅子树种群转移矩阵
Table 2 Transition matrices of *Pterospermum kingtungense* populations in different habitats

生境 Habitat	矩阵 Matrix					特征向量 Eigen vector	种群增长率 λ
5 ha生境片段	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999
5-ha fragmented habitat	0.0000	0.8750	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
	0.0000	0.0417	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	
	0.0000	0.0000	0.50000	1.0000	0.0000	0.8889	
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.1111	
	0.8519	0.0000	0.0000	0.0000	0.1667	0.1618	1.0000
15 ha生境片段	0.1111	0.9667	0.0000	0.0000	0.0000	0.5386	
15-ha fragmented habitat	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0959	
	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0599	
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.1438	
	0.3333	0.0000	0.0000	0.0000	0.0909	0.0387	1.0172
	0.6667	0.9730	0.0000	0.0000	0.0000	0.5837	
连续森林	0.0000	0.0270	0.8696	0.0000	0.0000	0.1069	
	0.0000	0.0000	0.0435	0.8750	0.0000	0.0327	
	0.0000	0.0000	0.0000	0.1250	1.0000	0.2381	
	0.0000	0.0000	0.0000	0.1250	1.0000	0.2381	

3 讨论

与连续森林和15 ha生境片段相比, 5 ha生境片段中景东翅子树种群的数量较低, 并且种群年龄结构不合理(缺乏成树、亚成树和幼苗)。5 ha生境片段面积小、边缘效应作用明显, 边缘生物和非生物因子的改变可能导致该生境中大树的死亡(Laurance et al, 2000), 并进一步降低景东翅子树的繁殖产出, 如由于成树个体数少造成的开花率降低甚至隔年或多年才开花的现象等, 导致幼苗补充率下降, 因此种群中幼苗缺乏(Yuan et al, 2021)。连续森林中景东翅子树种群幼苗的补充率虽然也不高, 但其幼苗的更新具有连续性, 因而种群结构趋于稳定。这是因为景东翅子树生长缓慢, 属演替后期的物种, 其

幼苗具有一定的耐阴性(Yuan et al, 2021)。从稳定阶段种群的年龄结构来看, 5 ha生境片段中亚成树应占有较大的比例, 而15 ha生境片段和连续森林中幼树占有较大的比例(表2)。

在不同大小片段和连续森林中景东翅子树种群的增长率等于1 (15 ha生境片段)或趋近于1 (5 ha生境片段和连续森林), 说明不同生境中景东翅子树种群是稳定的, 这主要是因为种群各生活史阶段的存活率均较高(图2, 表2)。此结果与巴西大西洋森林中3种棕榈科植物的种群统计结果相似(Quitete Portela et al, 2010)。本研究中, 尽管5 ha生境片段中种群数量减少, 但其降低的速度非常缓慢, 而连续森林中种群数量的增加也较慢。这是因为不同生境

表3 不同生境中景东翅子树种群生活史阶段参数的弹性值矩阵

Table 3 Elasticity matrices of life history stage's parameters for *Pterospermum kingtungense* populations in different habitats

生境 Habitat	生活史阶段 Life history stage	幼苗 Seedling	幼树 Sapling	小树 Small tree	亚成树 Subadult tree	成树 Adult tree
5 ha生境片断 5-ha fragmented habitat	幼苗 Seedling	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	幼树 Sapling	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	小树 Small tree	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	亚成树 Subadult tree	0.0000	0.0000	0.0000	0.8889	0.0000
	成树 Adult tree	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1111
15 ha生境片断 15-ha fragmented habitat	幼苗 Seedling	0.0058	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	幼树 Sapling	0.0008	0.0226	0.0000	0.0000	0.0000
	小树 Small tree	0.0000	0.0000	0.0329	0.0000	0.0000
	亚成树 Subadult tree	0.0000	0.0000	0.0000	0.0128	0.0000
	成树 Adult tree	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9242
连续森林 Continuous forest	幼苗 Seedling	0.0050	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	幼树 Sapling	0.0102	0.2250	0.0000	0.0000	0.0000
	小树 Small tree	0.0000	0.0102	0.0602	0.0000	0.0000
	亚成树 Subadult tree	0.0000	0.0000	0.0102	0.0629	0.0000
	成树 Adult tree	0.0000	0.0000	0.0000	0.0102	0.5958

中景东翅子树种群的死亡率和种子萌发率均较低,其幼苗幼树的死亡与幼苗补充相互抵消,使种群处于相对平衡状态。


景东翅子树成树和亚成树阶段的存活率对种群增长率(λ)的贡献最大,是影响其种群动态的关键生活史阶段。这一结果与其他长寿命树种研究结果一致(如Kwit et al, 2004; Paludo et al, 2016)。15 ha片断森林和连续森林中成树阶段的弹性值均最大(分别达0.9242和0.5958),表明成树阶段是影响种群动态的关键生活史阶段。但连续森林中成树阶段的弹性值不占绝对优势,其幼树阶段也占一定的份额(占0.2352),说明幼树阶段对该种群动态也有一定的调节作用。5 ha片断森林中亚成树阶段的弹性值最大,说明亚成树阶段对该种群的贡献率最大(占总贡献率的88.89%),因而是影响该种群动态的关键生活史阶段。虽然亚成树阶段不具备繁殖能力,但一旦进入到成树阶段后其繁殖行为应当会发生。

本研究结果对于濒危物种的保护具有重要参考作用: (1)尽管生境片断化降低了小片断生境中景东翅子树种群的数量,改变了种群的年龄结构,但其种群还是趋于稳定的,这表明小片断生境在濒危物种保护中也可以起到重要的作用。如果忽视对这些片断生境的保护和管理,那么特定分布在这些生境中的濒危物种局域种群将会丧失。(2)弹性分析表明成树和亚成树阶段是影响种群动态的关键生活史阶段,因此对于大树(包括成树和亚成树)的保护

是极度濒危植物景东翅子树种群维持的关键。最后必须指出,应用Lefkovitch矩阵模型的前提是假定不同大小级或生活史阶段间的转移概率是不变的,但由于环境随机性的影响,实际情况并非如此。因此,为了提高种群动态预测的准确性,还需要开展长期及更为深入的研究(如考虑环境的影响等)。

致谢: 野外调查工作得到哀牢山无量山国家级自然保护区景东管理局袁小龙、魏启军、鲁成荣,以及护林员罗正文、汪大志、施啟明、施江等同志的大力支持,特此致谢!

ORCID

袁春明  <https://orcid.org/0000-0001-6914-3921>

参考文献

Aschero V, Morris WF, Vázquez DP, Alvarez JA, Villagra PE (2016) Demography and population growth rate of the tree *Prosopis flexuosa* with contrasting grazing regimes in the Central Monte Desert. *Forest Ecology and Management*, 369, 184–190.

Bruna EM, Fiske IJ, Trager MD (2009) Habitat fragmentation and plant populations: Is what we know demographically irrelevant? *Journal of Vegetation Science*, 20, 569–576.

Caswell H (1984) Optimal life histories and age-specific costs of reproduction: Two extensions. *Journal of Theoretical Biology*, 107, 169–172.

Caswell H (1989) *Matrix Population Models: Construction Analysis and Interpretation*. Sinauer Associates, Sunderland.

Crone EE, Menges ES, Ellis MM, Bell T, Bierzychudek P,

- Ehrlén J, Kaye TN, Knight TM, Lesica P, Morris WF, Oostermeijer G, Quintana-Ascencio PF, Stanley A, Ticktin T, Valverde T, Williams JL (2011) How do plant ecologists use matrix population models? *Ecology Letters*, 14, 1–8.
- Crouse DT, Crowder LB, Caswell H (1987) A stage-based population model for loggerhead sea turtles and implications for conservation. *Ecology*, 68, 1412–1423.
- de Kroon H, Plaisier A, van Groenendaal J, Caswell H (1986) Elasticity: The relative contribution of demographic parameters to population growth rate. *Ecology*, 67, 1427–1431.
- de Kroon H, van Groenendaal J, Ehrlén J (2000) Elasticities: A review of methods and model limitations. *Ecology*, 81, 607–618.
- Ewers RM, Didham RK (2006) Confounding factors in the detection of species responses to habitat fragmentation. *Biological Reviews*, 81, 117–142.
- Heppell SS, Pfister CA, de Kroon H (2000) Elasticity analysis in population biology: Methods and applications. *Ecology*, 81, 605–606.
- Hu YJ, Wang SS (1988) A matrix model of population growth of dominant tropical rain forest species *Vatica hainanensis* in Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 8, 104–110. (in Chinese with English abstract) [胡玉佳, 王寿松 (1988) 海南岛热带雨林优势种——青梅种群增长的矩阵模型. *生态学报*, 8, 104–110.]
- Hueneke LF, Marks PL (1987) Stem dynamics of the shrub *Alnus incana* ssp. *rugosa*: Transition matrix models. *Ecology*, 68, 1234–1242.
- Kwit C, Horvitz CC, Platt WJ (2004) Conserving slow-growing, long-lived tree species: Input from the demography of a rare understory conifer, *Taxus floridana*. *Conservation Biology*, 18, 432–443.
- Laurance WF, Delamônica P, Laurance SG, Vasconcelos HL, Lovejoy TE (2000) Rainforest fragmentation kills big trees. *Nature*, 404, 836.
- Lefkovich LP (1965) The study of population growth in organisms grouped by stages. *Biometrics*, 21, 1–18.
- Leslie PH (1945) On the use of matrices in certain population mathematics. *Biometrics*, 33, 183–212.
- Lin YH, He XB, Tian QJ, Hu WY, Chen L, He P (2011) Numeric dynamics of endangered plant *Euonymus chloranthoides* populations after habitat fragmentation. *Bulletin of Botanical Research*, 31, 443–450. (in Chinese with English abstract) [林永慧, 何兴兵, 田启建, 胡文勇, 陈玲, 何平 (2011) 生境破碎化后濒危植物缙云卫矛种群的数量动态. *植物研究*, 31, 443–450.]
- Luo ZH, Xie YN, Lu ZJ, Luo YY, Luo Y, Wang BY (2011) Survey on populations and distribution of *Pterospermum kingtungense* in Jingdong County of Yunnan Province. *Journal of West China Forestry Science*, 40(4), 41–47. (in Chinese with English abstract) [罗忠华, 谢有能, 卢宗菊, 罗有勇, 罗尧, 王博轶 (2011) 景东翅子树的居群结构及分布动态研究. *西部林业科学*, 40(4), 41–47.]
- Melo FPL, Arroyo-Rodríguez V, Fahrig L, Martínez-Ramos M, Tabarelli M (2013) On the hope for biodiversity-friendly tropical landscapes. *Trends in Ecology and Evolution*, 28, 462–468.
- Morris WF, Doak DF (2002) *Quantitative Conservation Biology: Theory and Practice of Population Viability Analysis*. Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Paludo GF, Lauterjung MB, dos Reis MS, Mantovani A (2016) Inferring population trends of *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae) using a transition matrix model in an old-growth forest. *Southern Forests*, 78, 137–143.
- Quitete Portela RdC, Bruna EM, Santos FAM (2010) Demography of palm species in Brazil's Atlantic forest: A comparison of harvested and unharvested species using matrix models. *Biodiversity and Conservation*, 19, 2389–2403.
- Silvertown J, Franco M, Pisanty I, Mendoza A (1993) Comparative plant demography—Relative importance of life-cycle components to the finite rate of increase in woody and herbaceous perennials. *Journal of Ecology*, 81, 465–476.
- Stubben CJ, Milligan BG (2007) Estimating and analyzing demographic models using the popbio package in R. *Journal of Statistical Software*, 22(11), 1–23.
- You HM, Koike F (2011) Population dynamics of *Oxalis griffithii* using the Lefkovich matrix model. *Journal of Zhejiang A & F University*, 28(1), 66–71. (in Chinese with English abstract) [尤海梅, 小池文人 (2011) 基于Lefkovich矩阵模型的山酢浆草种群动态分析. *浙江农林大学学报*, 28(1), 66–71.]
- Yuan CM, Sima YK, Geng YF, Hao JB, Mao YL, Wei DK, He QJ (2011) Population distribution, age structure and its dynamics feature of endangered species *Pterospermum kingtungense*. *Journal of Northeast Forestry University*, 39(5), 15–16, 33. (in Chinese with English abstract) [袁春明, 司马永康, 耿云芬, 郝佳波, 毛云玲, 魏大坤, 何琪金 (2011) 濒危植物景东翅子树种群的分布、年龄结构及其动态特征. *东北林业大学学报*, 39(5), 15–16, 33.]
- Yuan CM, Sima YK, Geng YF, Hao JB, Mao YL, Luo ZH, Lu CR, Yuan DC (2012) Sprouting traits of endangered plant *Pterospermum kingtungense*. *Journal of Northeast Forestry University*, 40(3), 113–114, 122. (in Chinese with English abstract) [袁春明, 司马永康, 耿云芬, 郝佳波, 毛云玲, 罗忠华, 鲁成荣, 袁德财 (2012) 濒危植物景东翅子树的萌生特征. *东北林业大学学报*, 40(3), 113–114, 122.]
- Yuan CM, Zhang SS, Yang GP, Chen J, Geng YF, Li XS, Yang WZ (2021) Effects of habitat fragmentation on the demography of the critically endangered tree *Pterospermum kingtungense* (Sterculiaceae) in Yunnan, China. *Tropical Ecology*, 62, 27–33.
- Zhang DY, Jiang XH (1999) Progress in studies of genetic diversity and conservation biology of endangered plant species. *Chinese Biodiversity*, 7, 31–37. (in Chinese with English abstract) [张大勇, 姜新华 (1999) 遗传多样性与濒危植物保护生物学研究进展. *生物多样性*, 7, 31–37.]

(责任编辑: 臧润国 责任编辑: 黄祥忠)