

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2022.50627

王世彤, 李玲丽, 徐耀粘, 谷志容, 王业清, 于桂清, 陈振法, 杨存存, 张娥, 王永超, 江明喜. 极小种群野生植物长果安息香种群结构与动态特征[J]. 植物科学学报, 2022, 40(5): 627-636

Wang ST, Li LL, Xu YZ, Gu ZR, Wang YQ, Yu GQ, Chen ZF, Yang CC, Zhang E, Wang YC, Jiang MX. Population structure and dynamic characteristics of extremely small populations of *Changiostyrax dolichocarpa* C. J. Qi[J]. *Plant Science Journal*, 2022, 40(5): 627-636

极小种群野生植物长果安息香种群结构与动态特征

王世彤^{1,2}, 李玲丽^{1,2}, 徐耀粘^{1,2,3}, 谷志容⁴, 王业清⁵, 于桂清⁶,
陈振法⁶, 杨存存⁶, 张娥⁵, 王永超⁵, 江明喜^{1,2,3*}

(1. 中国科学院武汉植物园, 中国科学院水生植物与流域生态重点实验, 武汉 430074; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院核心植物园保护生物学中心, 武汉 430074; 4. 湖南八大公山国家级自然保护区管理处, 湖南桑植 427100; 5. 湖北后河国家级自然保护区管理局, 湖北五峰 443400; 6. 湖南壶瓶山国家级自然保护区管理局, 湖南石门 415300)

摘要: 本研究对分布于湖南桑植和石门、湖北五峰和秭归 4 个现存区域的极小种群野生植物长果安息香 (*Changiostyrax dolichocarpa* C. J. Qi) 群落进行了调查, 并绘制种群结构图, 建立静态生命表, 绘制存活曲线进行生存分析, 利用时间序列预测分析种群未来发展趋势。结果显示: 桑植、石门和五峰种群均属增长型, 秭归种群属衰退型, 这 4 个区域长果安息香种群对外界干扰均具有较高的敏感性; 存活曲线都趋向于 Deevey-II 型, 死亡率在前期相对稳定, 但后期逐渐上升; 生存分析结果表明, 桑植和秭归种群较早进入衰退期, 主要受环境压力的影响, 石门和五峰种群进入衰退期相对较晚, 主要受生理衰退的影响; 时间序列分析显示, 在未来 2~8 个龄级时间内, 桑植、石门和五峰种群的幼龄个体数量会减少, 中老龄个体数量会增加, 秭归种群幼龄和中龄个体逐渐减少, 老龄个体先增加后逐渐减少, 须采取适当的抚育措施, 以避免种群衰退。针对长果安息香的生存现状, 建议加强对原生境的保护和人工繁殖技术的研究, 以促进种群数量的稳定增长。

关键词: 静态生命表; 存活曲线; 动态指数; 生存分析; 时间序列预测

中图分类号: S718.54

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2022)05-0627-10

Population structure and dynamic characteristics of extremely small populations of *Changiostyrax dolichocarpa* C. J. Qi

Wang Shi-Tong^{1,2}, Li Ling-Li^{1,2}, Xu Yao-Zhan^{1,2,3}, Gu Zhi-Rong⁴, Wang Ye-Qing⁵, Yu Gui-Qing⁶,
Chen Zhen-Fa⁶, Yang Cun-Cun⁶, Zhang E⁵, Wang Yong-Chao⁵, Jiang Ming-Xi^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center of Conservation Biology, Core Botanical Gardens, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 4. Badagongshan National Nature Reserve, Sangzhi, Hunan 427100, China; 5. Houhe National Nature Reserve, Wufeng, Hubei 443400, China; 6. Hupingshan National Nature Reserve, Shimen, Hunan 415300, China)

Abstract: We investigated the communities of *Changiostyrax dolichocarpa* C. J. Qi, a wild plant with extremely small populations distributed in four extant regions of China (Sangzhi, Shimen, Wufeng, and Zigui). We first constructed a population structure map and established a static life table, then plotted survival curves for survival analysis and predicted future development trends of the populations using time series analysis. Results showed that the

收稿日期: 2022-03-02, 修回日期: 2022-03-23。

基金项目: 生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006); 国家自然科学基金(31870510)。

This work was supported by grants from the Biodiversity Survey and Assessment Project of the Ministry of Ecology and Environment of China (2019HJ2096001006), and National Natural Science Foundation of China (31870510)。

作者简介: 王世彤(1993-), 女, 博士研究生, 研究方向为保护生物学(E-mail: 1004919114@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: mxjiang@wbcas.cn)。

Sangzhi, Shimen, and Wufeng populations were all increasing, but the Zigui population was declining. However, all four populations were sensitive to external disturbance. The population survival curves tended to be Deevey-II type, showing a decrease in the early stage, stabilization in the middle stage, and recession in the late stage. Survival analysis showed that the Sangzhi and Zigui populations entered the declining stage early, mainly due to environmental pressure, while the Shimen and Wufeng populations entered the declining stage relatively late, mainly due to physiological decline. Time series analysis indicated that the number of young individuals in the Sangzhi, Shimen, and Wufeng populations will decrease, while the number of middle-aged and old individuals will increase in the future 2 – 8 age classes. For the Zigui population, the number of young and middle-aged individuals will gradually decrease, while the number of old individuals will first increase and then decrease. Results suggest that strengthening the protection of the original habitat and research on artificial propagation technology may help promote population growth.

Key words: Static life table; Survival curve; Dynamic index; Survival analysis; Time series analysis

中国是世界上生物多样性最丰富的国家之一^[1], 拥有的植物类群谱系约占全球总数的8% ~ 12%^[2], 其中特有种比例高达54.1%^[3, 4]。然而, 资源过度开发造成的自然栖息地丧失以及全球气候变化^[5, 6], 导致生物多样性丧失的进程加快^[7], 目前有很大比例的物种处于濒危状态。极小种群野生植物作为国家重点保护濒危植物, 由于分布区域狭窄且长期受到外界干扰, 种群数量持续减少, 已经低于稳定存活界限, 灭绝风险极高, 是生物多样性优先保护的焦点对象。

种群结构是种群的基本特征, 决定种群的发展动态^[8]。种群生命表和存活曲线以及生存分析可以反映种群的存活状态及影响因素^[9], 结合种群动态数量分析和时间序列预测还可以阐明种群的受干扰状况, 预测种群未来的发展趋势^[10]。自国家林业和草原局提出极小种群野生植物保护工程以来, 全国范围内已经开始了有关极小种群野生植物种群结构与动态方面的研究, 包括东北红豆杉 (*Taxus cuspidate* Sieb. et Zucc)^[11]、景东翅子树 (*Pterospermum kingtungense* C. Y. Wu ex Hsue)^[12]、峨眉含笑 (*Michelia wilsonii* Finet et Gagnep)^[13]、对开蕨 (*Phyllitis scolopendrium* Akasawa)^[14]、铁竹 (*Ferocalamus strictus* Hsueh et Keng f)^[15]、黄梅秤锤树 (*Sinojackia huangmeiensis* J. W. Ge & X. H. Yao)^[16]、银杉 (*Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang)^[17]等。这些研究有助于理解极小种群野生植物的种群现

状及成因, 有利于探索科学有效的种群保护方案。

长果安息香 (*Changiostyrax dolichocarpa* C. J. Qi) 为安息香科长果安息香属落叶乔木, 国家Ⅱ级保护植物^[18], 也是我国120种极小种群野生植物之一。自1981年被发现以来, 已经对其开展了一系列研究工作, 主要集中在种群及群落生态学^[19-21]、保育遗传学^[22-24]、迁地保护^[25]等方面。早期认为长果安息香仅分布于湖南省的石门县和桑植县, 关于种群结构和动态方面的研究也只涉及这两个区域^[20]。近年来, 研究人员在湖南桑植云头山和湖北五峰后河发现了长果安息香的新分布点, 且种群个体数量较多, 生长良好, 具有重要的研究价值。此外, 湖北省秭归县也发现了长果安息香的野生分布。为全面了解长果安息香的生存状况, 本研究对分布于湖南桑植和石门、湖北五峰和秭归的长果安息香种群进行了全面调查, 旨在阐明两个问题: 长果安息香的种群结构和特征如何? 其生存现状以及影响因素是什么? 研究结果以期对长果安息香种群的保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于湖南省桑植县和石门县、湖北省五峰县和秭归县等4个地区, 地理坐标为29°34' ~ 30°46' N, 109°54' ~ 110°57' E, 海拔

250 ~ 654 m, 覆盖了当前已知长果安息香天然种群的集中分布区(图 1)。研究区域地处武陵山脉, 属典型的亚热带季风湿润气候, 热量充足, 降水丰沛, 年均温 13.1°C ~ 17.5°C, 最热月 23.6°C ~ 29.0°C, 最冷月 4°C ~ 6.3°C, 年均降水量 1061 ~ 1500 mm, 年均日照 1095 ~ 1770 h, 无霜期 210 ~ 330 d^[26]。长果安息香常生长于峡谷溪流两侧的砾质土壤中, 沿溪流零星分布在海拔 200 ~ 700 m 的常绿阔叶林中, 伴生乔木树种有宜昌润楠 (*Machilus ichangensis* Rehd. et Wils)、灯台树 (*Cornus controversa* Hemsley)、南酸枣 (*Choerospondias axillaris* (Roxb.) B. L. Burtt & A. W. Hill)、云和新木姜子 (*Neolitsea aurata* var. *paraculata* (Nakai) Yang et P. H. Huang)、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) Oersted) 等, 林下灌木有苧麻 (*Boehmeria nivea* (L.) Gaudich)、短序荚蒾 (*Viburnum brachybotryum* Hemsl)、粗糠柴 (*Mallotus philippensis* (Lam.) Muell. Arg)、蜡莲绣球 (*Hydrangea strigose* Rehd) 等, 草本植物有披针新月蕨 (*Pronephrium penangianum* (Hook.) Holtt)、楼梯草 (*Elatostema involucreatum* Franch. et Sav)、卷柏 (*Selaginella tamariscina* (P. Beauv.) Spring) 等。

五峰 8 个, 秭归 1 个。根据地势和地形, 每个样地面积为 100 ~ 400 m², 共计 7900 m²。在每个样地内设置 1 ~ 4 个 10 m × 10 m 的样方, 记录样方内所有长果安息香的个体数、胸径、树高、冠幅等指标, 对有分蘖的长果安息香, 选择最粗的一株作为主径, 其余记为萌株。

1.2.2 径级划分

本研究采用胸径 (DBH, Diameter at breast height) 大小作为标准划分径级结构, 以胸径代替龄级分析长果安息香的年龄结构特征。根据样地内长果安息香胸径的分布状况, 将 DBH < 2.5 cm 的个体作为第 I 级, 之后以 5 cm 为间隔, 将植株划分为 11 个龄级, 分别为: 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: 37.5 cm ≤ DBH < 42.5 cm; X: 42.5 cm ≤ DBH < 47.5 cm; XI: DBH ≥ 47.5 cm。

1.2.3 种群动态量化

计算长果安息香种群年龄结构的动态指数^[27], 公式如下:

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

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

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

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

式中: S_n 为第 n 龄级的个体数; K 为种群大小级数量; V_n 为种群龄级间的动态指数; V_{pi} 为种群年龄结构的数量变化动态指数; V'_{pi} 为考虑外部干扰时的种群年龄结构的数量动态变化指数; P_{max} 表示种群对外界随机干扰所承担的最大风险概率。

1.2.4 种群静态生命表和存活曲线

根据不同径级的长果安息香株数编制静态生命表^[28]。为避免死亡率为负值, 与数学假设不符,

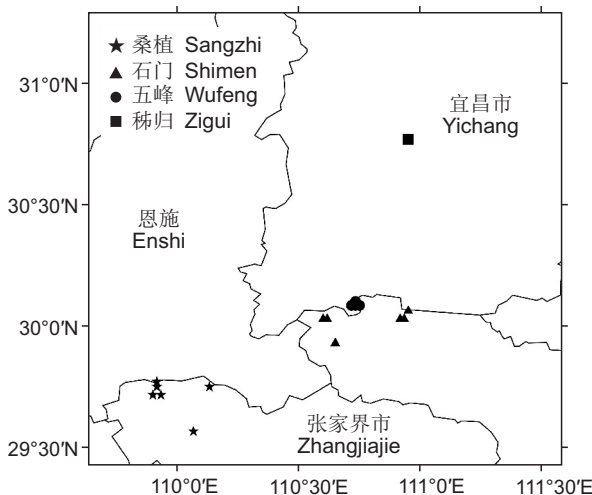


图 1 长果安息香样地示意图

Fig. 1 Sketch map of *Changiostyrax dolichocarpa*

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

于 2019 - 2020 年, 在 4 个分布区域的典型地段共设置 27 个样地, 其中桑植 6 个, 石门 12 个,

采用匀滑技术对数据 A_x 进行处理^[29]。

采用指数方程 $N_x = N_0 e^{-bx}$ 和幂函数方程 $N_x = N_0 x^{-b}$ 对长果安息香种群的存活曲线进行检验, 分别描述 Deevey-II 和 Deevey-III 型存活曲线^[30]。

1.2.5 生存分析和时间序列预测

为更好地揭示长果安息香种群的动态变化规律, 引入生存分析的生存函数 ($S_{(t)}$)、累计死亡率函数 ($F_{(t)}$)、死亡密度函数 ($f_{(t)}$) 和危险率函数 ($\lambda_{(t)}$)^[31], 公式如下:

$$S_{(t)} = S_1 \times S_2 \times S_3 \times \dots \times S_t \quad (5)$$

$$F_{(t)} = 1 - S_{(t)} \quad (6)$$

$$f_{(t)} = \frac{(S_{(t-1)} - S_{(t)})}{h_t} \quad (7)$$

$$\lambda_{(t)} = \frac{2(1 - S_t)}{h_t(1 + S_t)} \quad (8)$$

式中 S_t 为存活频率, $S_t = l_{t+1} / l_t$, h_t 为龄级宽度。

采用一次移动平均法预测长果安息香种群的年龄结构^[32], 公式如下:

$$M_t^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{k=t-n+1}^t X_k \quad (9)$$

式中 n 为需要预测的时间, t 为龄级, X_k 为 k 龄级内的个体数量, $M_t^{(1)}$ 表示经过未来 n 个龄级时间后 t 龄级的种群大小。

2 结果与分析

2.1 种群龄级结构和动态变化

本次调查长果安息香共计 273 株, 最大胸径 51.48 cm。石门种群的个体数量最多, 有 142 株, 桑植和五峰种群分别有 73 株和 50 株, 秭归种群的个体数量最少, 仅 8 株。4 个区域长果安息香种群的龄级结构均呈不规则金字塔型(图 2)。桑植、石门和五峰地区的种群个体主要集中在 II、III 龄级, 占比分别为 71.23%、54.23% 和 56%, 中龄和幼龄个体充足。秭归种群个体主要集中在 V 龄级, 占比达 50%, I 和 II 龄级个体数仅占总数的 12.5%, 且 I 龄级缺失, 严重缺乏幼龄个体。桑植种群从 III 龄级后急剧减少, VI 龄级之后龄级缺失, 秭归种群从 V 龄级之后龄级缺失, 说明这两个种群相对年轻。

4 个区域长果安息香种群的动态变化指数 V_t 均 < 0 , 说明在 I 龄级呈现衰退的结构动态, 桑植种群 $V_2 \sim V_5$ 均 > 0 , 呈现增长的结构动态; 石门种群 $V_2 \sim V_6$ 均 > 0 , $V_8 \sim V_{10}$ 均 ≤ 0 , 呈现“衰退-增长-衰退”的结构动态; 五峰种群 $V_2 \sim V_5$ 均 > 0 , V_6 和 V_8 均 < 0 , 也呈现“衰退-增长-衰退”的结构动态; 秭归种群 $V_2 = 0$, 呈现稳定的结构动态, $V_3 \sim V_4$ 均 < 0 , 呈现衰退的结构动态(表 1)。

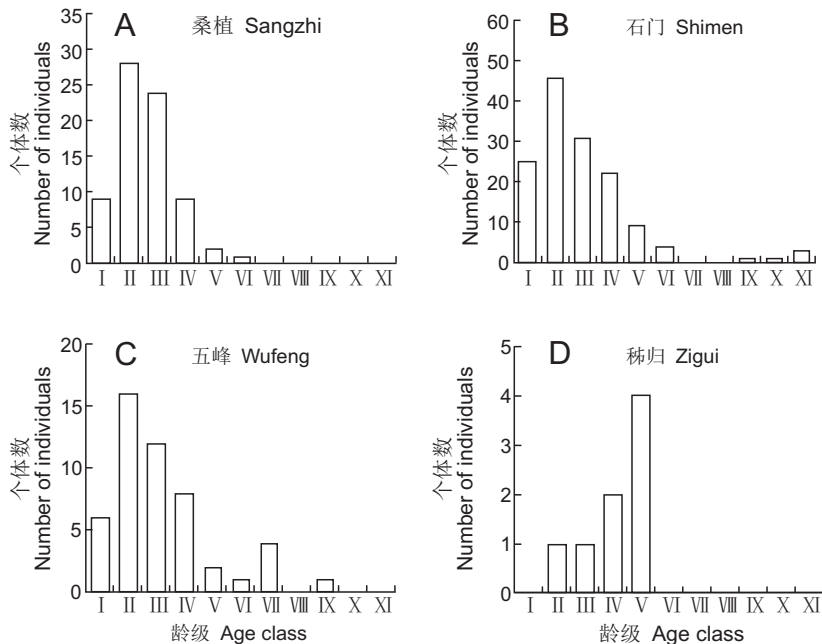


图 2 长果安息香种群的年龄结构

Fig. 2 Age structure of *Changiostyrax dolichocarpa* populations

表 1 长果安息香种群动态变化指数
Table 1 Dynamic indices of *Changiosyrax dolichocarpa* populations / %

种群动态指数级 Dynamic index	桑植 Sangzhi	石门 Shimen	五峰 Wufeng	秭归 Zigui
V_1	-67.86	-45.65	-62.50	-100.00
V_2	14.29	32.61	25.00	0.00
V_3	62.50	29.03	33.33	-50.00
V_4	77.78	59.09	75.00	-50.00
V_5	50.00	55.56	50.00	-
V_6	-	100.00	-75.00	-
V_7	-	-	100.00	-
V_8	-	-100.00	-100.00	-
V_9	-	0.00	-	-
V_{10}	-	-66.67	-	-
V_{pi}	29.02	24.40	29.59	-37.50
V'_{pi}	4.84	2.22	3.29	-7.50
P_{max}	0.17	0.09	0.11	0.20

注： $V_1 \sim V_{10}$ ，种群龄级间的数量动态变化指数； V_{pi} ，忽略外部干扰时种群年龄结构的数量动态变化指数； V'_{pi} ，考虑外部干扰时的种群年龄结构的数量动态变化指数； P_{max} ，随机干扰风险极大值；“-”代表空值。

Notes: $V_1 - V_{10}$, Dynamic indices of the population between age classes; V_{pi} , Dynamic index of the population when without considering the external disturbance; V'_{pi} , Population age structure dynamic index considering external disturbance; P_{max} , Maximum risk with random disturbance; “-” means null values.

进一步计算 4 个区域长果安息香种群总体的数量动态变化指数 V_{pi} (忽略外部干扰) 和 V'_{pi} (考虑外部干扰)，结果表明，桑植、石门和五峰种群的 V'_{pi} 和 V_{pi} 均大于 0，说明这 3 个种群都为增长型种群，秭归种群的 V'_{pi} 和 V_{pi} 均小于 0，说明该种群为衰退型种群。桑植，石门和五峰这 3 个种群的 V_{pi} 值相似且较高，当考虑外部干扰时，桑植种群的 V'_{pi} 值最高，石门种群的 V'_{pi} 值最小。桑植和秭归种群的随机干扰风险极大值 P_{max} 相对较高，石门和五峰种群相对较低，但这 4 个种群的 P_{max} 值都接近 0，说明这对外界干扰均具有较高的敏感性(表 1)。

2.2 种群静态生命表和存活曲线

随着龄级的增加，长果安息香存活数量(l_x)逐渐减少，个体的期望寿命(e_x)逐渐降低(附表 1¹⁾)。4 个区域长果安息香种群的生存曲线变化趋势相似，在 I ~ V 龄级均呈平缓下降的趋势，随着龄级的增长下降速度也相应加快(图 3)。4 个种群的指数模型 R^2 值均大于幂函数模

型，且达到显著水平，说明各区域群长果安息香种群的存活曲线都趋近于 Deevey-II 型(表 2)。4 个区域长果安息香种群死亡率和消失率的变化趋势一致，均随龄级的增长逐渐增加，在后期达到最高值，但桑植种群整体的波动相对较大(图 4)。

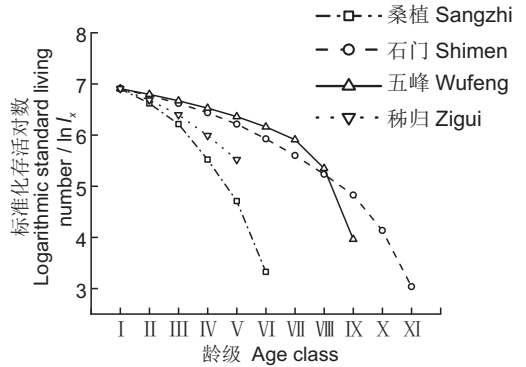


图 3 长果安息香种群存活曲线
Fig. 3 Survival curve of *Changiosyrax dolichocarpa* populations

表 2 长果安息香种群存活曲线的检验模型
Table 2 Test models of survival curves of *Changiosyrax dolichocarpa* populations

种群 Population	方程 Equation	R^2	F	P
桑植 Sangzhi	$y = 8.710e^{-0.137x}$	0.873	27.516	0.006
	$y = 7.853x^{-0.343}$	0.686	8.731	0.042
石门 Shimen	$y = 8.253e^{-0.069x}$	0.824	42.167	0.000
	$y = 8.249x^{-0.258}$	0.590	12.948	0.006
五峰 Wufeng	$y = 7.857e^{-0.054x}$	0.720	17.981	0.004
	$y = 7.662x^{-0.172}$	0.505	7.129	0.032
秭归 Zigui	$y = 7.424e^{-0.056x}$	0.968	91.312	0.002
	$y = 7.110x^{-0.130}$	0.844	16.245	0.027

2.3 种群生存分析

长果安息香种群的生存率和累计死亡率呈互补状态，随着龄级的增加，种群生存率逐渐下降，累计死亡率逐渐上升。桑植种群在 II 龄级达到平衡，石门种群在 IV 龄级达到平衡，五峰种群在 V 龄级达到平衡，秭归种群在 2.5 龄级处达到平衡，表明桑植和秭归种群更早进入衰退期(图 5)。4 个区域长果安息香种群死亡密度曲线和危险率曲线的变化趋势基本一致，均随龄级的增加呈现前期下降，中期稳定，后期上升的趋势；死亡密度曲

1) 如需查阅附表内容请登录《植物科学学报》网站 (<http://www.plantscience.cn>) 查看本期文章。

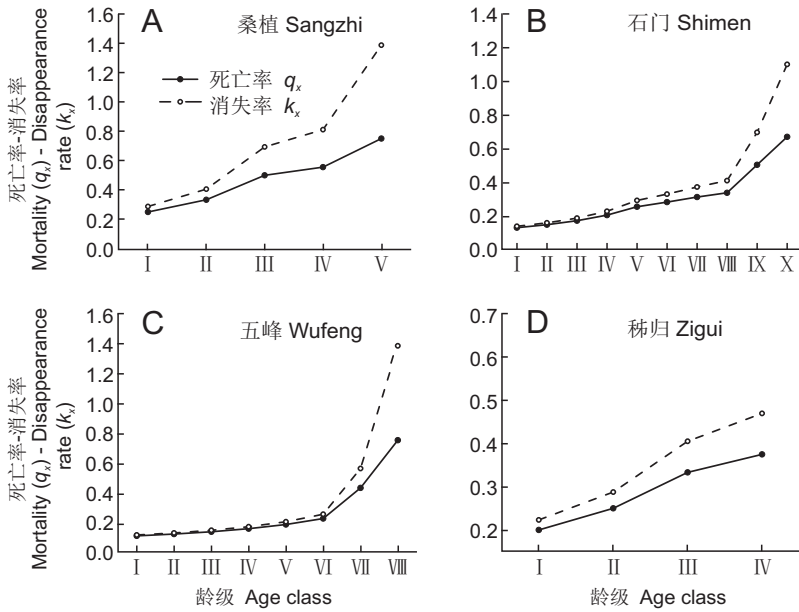


图 4 长果安息香种群死亡率和消失率曲线

Fig. 4 Mortality and disappearance rates of *Changiostyrax dolichocarpa* populations

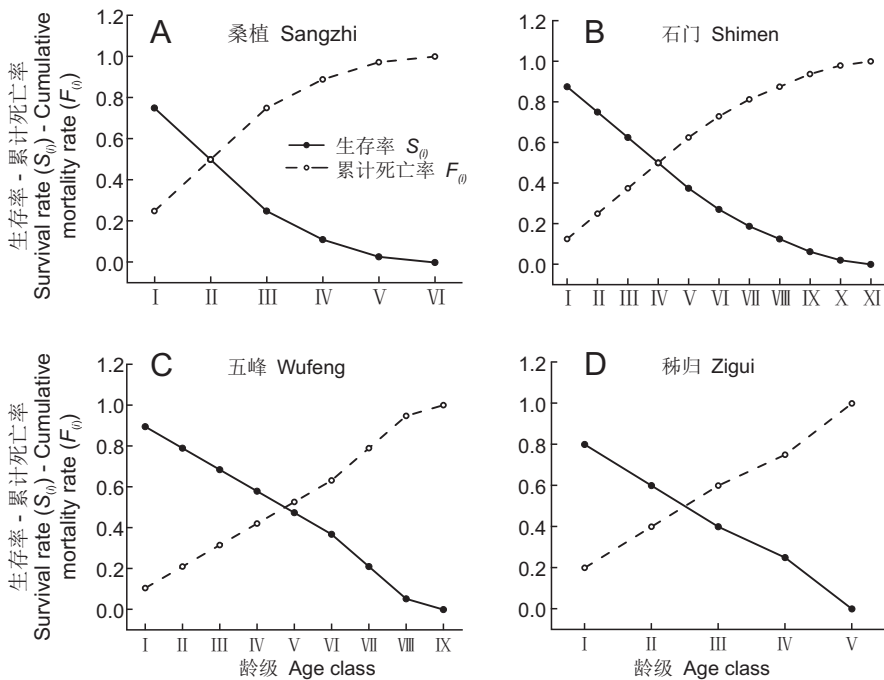


图 5 长果安息香种群生存率和累计死亡率曲线

Fig. 5 Survival rate and cumulative mortality rate of *Changiostyrax dolichocarpa* populations

线的走势较为平稳，变化范围在 0.15 以下，桑植和秭归种群的危险率曲线在 IV 龄级出现陡增拐点，石门和五峰种群分别在 VIII 和 VI 龄级出现陡增拐点(图 6)。

2.4 种群时间序列预测

经过 II、IV、VI、VIII 个龄级后，桑植、石

门和五峰种群的 II 龄级个体数量减少，从 III 龄级开始个体数量呈增加趋势；秭归种群在 II ~ V 龄级个体数量呈减少趋势，II ~ VI 个龄级之后，出现 VI ~ IX 龄级个体，但这几个龄级的个体数量在未来也都呈下降或稳定的趋势 (表 3)。

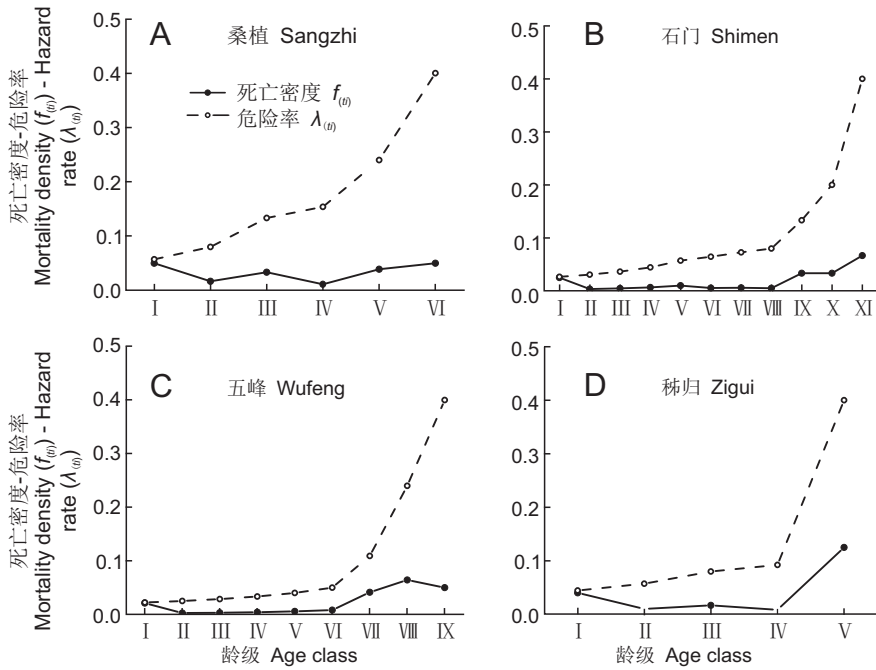


图6 长果安息香种群死亡密度和危险率曲线
Fig. 6 Mortality density and hazard rate of *Changiostyrax dolichocarpa* populations

表3 长果安息香种群动态变化的时间序列分析
Table 3 Time sequence analysis of age structure of *Changiostyrax dolichocarpa* populations

龄级 Age class	桑植 Sangzhi				石门 Shimen					五峰 Wufeng					秭归 Zigui					
	原始数据 Primary data	$M_2^{(1)}$	$M_4^{(1)}$	$M_6^{(1)}$	$M_8^{(1)}$	原始数据 Primary data	$M_2^{(1)}$	$M_4^{(1)}$	$M_6^{(1)}$	$M_8^{(1)}$	原始数据 Primary data	$M_2^{(1)}$	$M_4^{(1)}$	$M_6^{(1)}$	$M_8^{(1)}$	原始数据 Primary data	$M_2^{(1)}$	$M_4^{(1)}$	$M_6^{(1)}$	$M_8^{(1)}$
I	9					25					6					0				
II	28	19				46	36				16	11				1	1			
III	24	26				31	39				12	14				1	1			
IV	9	17	18			22	27	31			8	10	11			2	2	1		
V	2	6	16			9	16	27			2	5	10			4	3	2		
VI	1	2	9	12		4	7	17	23		1	2	6	8		0	2	2	1	
VII	0	1	3	11		0	2	9	19		4	3	4	7		0	0	2	1	
VIII	0	0	1	6	9	0	0	3	11	17	0	2	2	5	6	0	0	1	1	1
IX	0	0	0	2	8	1	1	1	6	14	1	1	2	3	6	0	0	0	1	1

注： M_2 、 M_4 、 M_6 、 M_8 分别表示经过 2、4、6、8 龄级时间后种群大小的预测值；(1)：一次移动平均法标识。
Notes: M_2 , M_4 , M_6 , and M_8 represent predicted population size after 2, 4, 6, and 8 age class times, respectively; (1): Identity of single moving average method.

3 讨论

3.1 长果安息香种群的结构特征

植物种群龄级结构是其自身的生物学特性和环境因素共同作用的结果，可以较为直观地反映种群的动态变化及其对环境的适应^[33]。本研究结果表明，4 个区域长果安息香种群的龄级结构均呈不规则金字塔型，桑植和秭归种群缺乏老龄个体，种群相对年轻。动态指数分析结果显示，桑植、石门和

五峰种群为增长型种群，而秭归种群为衰退型种群，秭归种群个体数量较少，龄级结构不完整，严重缺乏幼龄个体，各龄级呈稳定或衰退状态，种群的长期稳定难以维持。张程等^[20]对湘西北长果安息香种群特征的研究表明，石门县壶瓶山景观门和桑植县龙潭坪长果安息香种群均为衰退型，并分析认为长果安息香虽然有一定的萌蘖繁殖能力，但无法满足种群发展的需求，种子萌发率降低是幼龄个体缺乏的主要原因。长果安息香喜湿润的环境，土

壤以砂质壤土为佳^[25]。在自然条件下,种子通过流水冲刷,在砂土中旋回,利于削薄木质化的种皮,促进种子的萌发,但修路等人为活动截断沟谷,致使溪流量减小或溪流改道,破坏了长果安息香的生境,从而降低了种子萌发率^[20]。本研究发现,桑植和石门种群都是增长型种群,可能与本次调查范围较广有关,特别是位于桑植县云头山的长果安息香种群所受的人为干扰较小,生境保存较为完好,存在较多数量的幼龄个体。

3.2 长果安息香种群的动态趋势

生命表是判断植物种群发展趋势的重要指标,通过静态生命表、存活曲线和生存分析不仅可以反映种群的生长现状和动态特点,结合时间序列分析还可以对种群的未来趋势做出预测^[34, 35]。本研究发现,4个区域长果安息香种群的死亡率和消失率均随龄级的增长逐渐增加,在后期达到最高值,期望寿命逐渐降低。存活曲线分析结果显示,不同长果安息香种群的存活曲线均趋近于Deevey-II型,死亡率在前期相对稳定,后期逐渐上升,与静态生命表分析相似,表明种群具有前期减少,中期稳定,后期衰退的特点。这与濒危植物羽叶丁香(*Syringa pinnatifolia* Hemsley)^[36]和紫纹兜兰(*Paphiopedilum purpuratum* (Lindl.) Stein)^[37]中的研究结论一致,可能是由于生长早期受到环境筛选以及竞争压力,随着年龄的增长进入衰老期,老龄个体生理生长到达极限,死亡率升高。

生存分析发现,桑植和秭归种群较早进入衰退期,危险率波动幅度较大,在IV龄级危险率出现陡增,说明这两个种群受环境压力的影响较大^[38]。石门和五峰种群进入衰退期相对较晚,危险率在前期波动幅度较小,分别在VI和VIII龄级危险率出现陡增,说明这两个种群受环境压力的影响相对较小,在后期主要受生理衰退的影响,数量逐渐减少^[39]。时间序列预测显示,在未来2~8个龄级时间内,桑植、石门和五峰种群的幼龄个体数量将会减少,中老年个体数量会增加,而秭归种群各龄级个体都将缺乏补充,种群结构难以维持。因此,如果幼龄个体得不到及时补充,长果安息香各种群都将趋于衰退,这与李敏敏等^[40]对濒危植物澜沧黄杉(*Pseudotsuga forrestii* Craib)的研究结论一致,可能也是小范围分布的濒危植物天然种群必然的发展过程^[36]。

3.3 长果安息香种群的保护和恢复措施

长果安息香具有一定的萌蘖能力,种子繁殖也是其种群更新的方式之一。本研究结果显示,桑植、石门和五峰长果安息香种群的幼龄个体数量相对丰富,短期内不会出现毁灭性的衰退;而秭归种群个体数量较少,龄级结构不完整,且严重缺乏幼龄个体,种群结构难以维持,须尽快采取适当的抚育措施,以避免种群衰退。此外,4个区域长果安息香种群的个体数量都较少,且对环境具有较高的敏感性,均需采取进一步的保护措施来避免种群灭绝。鉴于此,我们提出以下几点保护措施:(1)加大对原生境的保护力度,避免破坏性干扰,促进种群稳步增长;(2)利用人工辅助措施,促进幼苗的存活与生长,提高种群的更新能力;(3)加快繁殖技术的研究,促进个体数量的增加;(4)管理部门同相关科研单位合作,进行引种和迁地保护。

参考文献:

- [1] Volis S. Securing a future for China's plant biodiversity through an integrated conservation approach [J]. *Plant Diversity*, 2018, 40(3): 91-105.
 - [2] Zhang LB, Gilbert MG. Comparison of classifications of vascular plants of China [J]. *Taxon*, 2015, 64(1): 17-26.
 - [3] Ali M, Kennedy CM, Kiesecker J, Geng Y. Integrating biodiversity offsets within Circular Economy policy in China [J]. *J Clean Prod*, 2018, 185: 32-43.
 - [4] Meng HH, Zhou SS, Li L, Tan YH, Li JW, Li J. Conflict between biodiversity conservation and economic growth: insight into rare plants in tropical China [J]. *Biodivers Conserv*, 2019, 28(2): 523-537.
 - [5] Bachman SP, Nic Lughadha EM, Rivers MC. Quantifying progress toward a conservation assessment for all plants [J]. *Conserv Biol*, 2018, 32(3): 516-524.
 - [6] Huang YZ, Fu J, Wang WR, Li J. Development of China's nature reserves over the past 60 years: an overview [J]. *Land Use Policy*, 2019, 80: 224-232.
 - [7] Huang JH, Chen B, Liu CR, Lai JS, Zhang JL, Ma KP. Identifying hotspots of endemic woody seed plant diversity in China [J]. *Divers Distrib*, 2012, 18(7): 673-688.
 - [8] 李俊清. 森林生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 300-303.
 - [9] 杨飞翔, 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 [J]. *生态学报*, 1991, 11(2): 153-158.
- Yang FX, Wang SQ, Xu HG, Li BQ. The theory of survival analysis and its application in the study of life table [J].

- Acta Ecologica Sinica*, 1991, 11(2): 153–158.
- [10] 马闯, 杨美玲, 张云秀, 阎国荣, 许正. 新疆野苹果 (*Malus sieversii*) 种群年龄结构及其动态特征 [J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 156–164.
Ma C, Yang ML, Zhang YX, Yan GR, Xu Z. Age composition and dynamic characteristics of the main populations of endangered *Malus sieversii* [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(1): 156–164.
- [11] Long T, Wu XL, Wang Y, Chen J, Xu C, et al. The population status and threats of *Taxus cuspidata*, a plant species with extremely small populations in China [J]. *Glob Ecol Conserv*, 2021, 26: e01495.
- [12] Yuan CM, Zhang SS, Yang GP, Chen J, Geng YF, et al. Effects of habitat fragmentation on the demography of the critically endangered tree *Pterospermum kingtungense* (Sterculiaceae) in Yunnan, China [J]. *Trop Ecol*, 2021, 62(1): 27–33.
- [13] 肖书礼, 付梦媛, 杨科, 陈小红. 极小种群野生植物峨眉含笑种群结构与数量动态 [J]. 西北植物学报, 2019, 39(7): 1279–1288.
Xiao SL, Fu MY, Yang K, Chen XH. Population structure and quantitative dynamics of an extremely small population, *Michelia wilsonii* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(7): 1279–1288.
- [14] 黄祥童, 尹航, 黄启健, 崔凯峰, 赵莹, 等. 极小种群野生植物对开蕨种群结构特征和群落物种多样性 [J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2481–2492.
Huang XT, Yin H, Huang QJ, Cui KF, Zhao Y, et al. Characteristics of population structure and community species diversity of an extremely small population of protected *Phyllitis scolopendrium* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(7): 2481–2492.
- [15] 喻丁香, 杜凡, 石明, 杨聪, 代俊. 云南墨江极小种群物种铁竹的种群结构与群落特征 [J]. 植物生态学报, 2018, 42(9): 938–945.
Yu DX, Du F, Shi M, Yang C, Dai J. Community characteristics and population structure of *Ferrocalamus strictus*, a rare species in Mojiang, Yunnan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(9): 938–945.
- [16] 王世彤, 吴浩, 刘梦婷, 张佳鑫, 刘检明, 等. 极小种群野生植物黄梅秤锤树群落结构与动态 [J]. 生物多样性, 2018, 26(7): 749–759.
Wang ST, Wu H, Liu MT, Zhang JX, Liu JM, et al. Community structure and dynamics of a remnant forest dominated by a plant species with extremely small population (*Sinojackia huangmeiensis*) in central China [J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(7): 749–759.
- [17] Qian SH, Yang YC, Tang CQ, Momohara A, Yi SR, et al. Effective conservation measures are needed for wild *Cathaya argyrophylla* populations in China: insights from the population structure and regeneration characteristics [J]. *Forest Ecol Manag*, 2016, 361: 358–367.
- [18] 傅立国, 金鉴明. 中国植物红皮书: 稀有濒危植物 (第1册) [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 638–639.
- [19] 姚小洪, 叶其刚, 康明, 黄宏文. 秤锤树属与长果安息香属植物的地理分布及其濒危现状 [J]. 生物多样性, 2005, 13(4): 339–346.
Yao XH, Ye QG, Kang M, Huang HW. Geographic distribution and current status of the endangered genera *Sinojackia* and *Changiostyrax* [J]. *Biodiversity Science*, 2005, 13(4): 339–346.
- [20] 张程, 彭重华, 刘晖, 曹铁如. 湘西北长果安息香种群数量与分布格局 [J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2011, 37(6): 615–620.
Zhang C, Peng ZH, Liu H, Cao TR. The population quantity and distribution pattern of the endangered plant *Changiostyrax raxdolichocarpa* [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition)*, 2011, 37(6): 615–620.
- [21] 张程, 彭重华, 刘晖, 曹铁如. 湘西北长果安息香群落区系组成与特征 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2012, 36(3): 144–148.
Zhang C, Peng ZH, Liu H, Cao TR. Study on flora composition and species diversity of *Changiostyrax raxdolichocarpa* communities in northwestern Hunan Province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2012, 36(3): 144–148.
- [22] Cao PJ, Yao QF, Ding BY, Zeng HY, Zhong YX, et al. Genetic diversity of *Sinojackia dolichocarpa* (Styracaceae), a species endangered and endemic to China, detected by inter-simple sequence repeat (ISSR) [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2006, 34(3): 231–239.
- [23] Yao XH, Ye QG, Fritsch PW, Cruz BC, Huang HW. Phylogeny of *Sinojackia* (Styracaceae) based on DNA sequence and microsatellite data: implications for taxonomy and conservation [J]. *Ann Bot-London*, 2008, 101(5): 651–659.
- [24] Cai XL, Wang JH, Zhao KK, Zhu ZX, Wang HF. Complete plastome sequence of *Changiostyrax dolichocarpa* (Styracaceae): an endangered (EN) plant species endemic to China [J]. *Mitochondrial DNA B*, 2018, 3(2): 1031–1032.
- [25] 叶其刚, 王诗云, 徐惠珠, 王畅. 长果秤锤树保护现状的初步研究 [J]. 生物多样性, 1996, 4(3): 135–138.
Ye QG, Wang SY, Xu HZ, Wang C. A preliminary study on the conservative status of *Sinojackia dolichocarpa* [J]. *Chinese Biodiversity*, 1996, 4(3): 135–138.
- [26] 陈功锡, 廖文波, 敖成齐, 刘蔚秋, 张宏达. 武陵山地区种子植物区系特征与性质研究 [J]. 植物研究, 2001, 21(4): 527–535.

- Chen GX, Liao WB, Ao CQ, Liu WQ, Zhang HD. Studies on character and feature of seed plants flora of Wuling-shan region[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2001, 21(4): 527-535.
- [27] 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.
- Chen XD. A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structural dynamics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2): 214-217.
- [28] 江洪. 云杉种群生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 8-50.
- [29] Wratten SD, Fry GLA. *Field and Laboratory Exercises in Ecology*[M]. London: Edward Arnold, 1980: 27-35.
- [30] Hett JM, Loucks OL. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock[J]. *J Ecol*, 1976, 64(3): 1029-1044.
- [31] 冯士雍. 生存分析(Ⅲ)[J]. *数学的实践与认识*, 1983, 13(1): 70-76.
- [32] 吴承祯, 洪伟. 林木生长的多维时间序列分析[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(4): 395-398.
- Wu CZ, Hong W. Multidimensional time series analysis on tree growth [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(4): 395-398.
- [33] Svensson JS, Jeglum JK. Structure and dynamics of an undisturbed old-growth Norway spruce forest on the rising Bothnian coastline [J]. *Forest Ecol and Manag*, 2001, 151: 67-79.
- [34] 张晓鹏, 于立忠, 杨晓燕, 黄佳琪, 殷有. 辽东山区天然更新红松幼苗种群结构与动态[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 289-296.
- Zhang XP, Yu LZ, Yang XY, Huang JQ, Yin Y. Population structure and dynamics of *Pinus koraiensis* seedlings regenerated from seeds in a montane region of eastern Liaoning Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(2): 289-296.
- [35] 张金峰, 葛树森, 梁金花, 李俊清. 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.
- Zhang JF, Ge SS, Liang JH, Li JQ. Population structure and dynamic characteristics of *Tilia amurensis* in broad-leaved pine mixed forest in Changbai Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(13): 5381-5390.
- [36] 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[J]. *生态学报*, 2018, 38(7): 2471-2480.
- Jiang ZM, He ZS, Su H, Zhao H, Cai J. Population structure and dynamic characteristics of endangered *Syringa pinnatifolia* Hemsl [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(7): 2471-2480.
- [37] 潘发光, 叶钦良, 李玉峰, 钟智明, 陈红锋, 易绮斐. 珍稀濒危植物紫纹兜兰的种群结构和数量动态[J]. *热带亚热带植物学报*, 2020, 28(4): 375-384.
- Pan FG, Ye QL, Li YF, Zhong ZM, Chen HF, Yi QF. Population structure and quantitative dynamics of rare and endangered plant *Paphiopedilum purpuratum* [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2020, 28(4): 375-384.
- [38] 王进, 姚兰, 艾训儒, 朱江, 刘松柏. 鄂西南不同区域亮叶桦种群结构与动态特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 357-365.
- Wang J, Yao L, Ai XR, Zhu J, Liu SB. Structure and dynamic characteristics of *Betula luminifera* populations in different regions of Southwest Hubei Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2): 357-365.
- [39] 吉也, 曹孟岩, 白楚锋, 金林琦, 李畅, 李萍. 峨眉山杪椴种群结构与动态特征[J]. *西北植物学报*, 2019, 39(3): 543-551.
- Ji Y, Cao MY, Bai CF, Jin LQ, Li C, Li P. Population structure and dynamics of *Alsophila spinulosa* in Mount Emei [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(3): 543-551.
- [40] 李敏敏, 刘鹏程, 孔维民, 马方莲, 李帅锋, 王萌. 濒危植物澜沧黄杉种群结构及动态特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(13): 5504-5515.
- Li MM, Liu PC, Kong WM, Ma FL, Li SF, Wang M. Population structure and dynamic characteristics of the endangered *Pseudotsuga forrestii* Craib [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(13): 5504-5515.

(责任编辑: 李惠英)