

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.011

论文标题： 中国特有濒危植物大果青杆种群结构与动态

作　　者： 车宗菊，张继强，王三英，等

收稿日期： 2025-02-11

引文格式： 车宗菊,张继强,王三英,等.中国特有濒危植物大果青杆种群结构与动态[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):112-120.

CHE Z J, ZHANG J Q, WANG S Y, et al. Population structure and dynamics of *Picea neoveitchii*, a plant endemic endangered in China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):112-120.

相关论文推荐

Recommended articles

白龙江濒危树种大果青杆优势种群种间关系

Interspecific correlations among dominant populations of the natural forest of *Picea neoveitchii* in the Bailongjiang river

藏东南江达柳灌丛种群结构与种内关系

Population structure and intraspecific relationships of *Salix gyamdaensis* shrubs in southeast Xizang

大兴安岭次生林区优势种群落叶松种内联结和关联性分析

Intraspecific association and correlation analysis of *Larix gmelinii* in the secondary forests of the Daxin'an mountains

云冷杉红松林内优势种群的空间格局及种间关联性

Spatial pattern and interspecific correlation of dominant population in Spruce-fir-Korean pine forest

洮河上游紫果云杉群落主要乔木生态位、种间关系及群落稳定性

Interspecific association, niche and community stability of the main tree species in *Picea purpurea* community in upstream of Taohe river

小兴安岭南部2种红松天然林优势树种的空间结构和生态位特征

Spatial structure and niche characteristics of dominant species in natural *Pinus koraiensis* forest in southern Xiaoxing'an mountains

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.011 http: //qks.csuft.edu.cn

中国特有濒危植物大果青杆种群结构与动态

车宗菊[1, 2]，张继强[3]，王三英[3]，芦 娟[3]，林 琳[3]，孙学彦[4]

（1. 甘肃省白龙江林业科学研究所，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃白龙江森林生态系统定位观测研究站，甘肃 舟曲 746300；3. 甘肃省林业科学研究院，甘肃 兰州 730020；4. 舟曲县林业和草原技术综合服务站，甘肃 舟曲 746300）

摘 要：【目的】探讨濒危植物大果青杆 *Picea neoveitchii* 野外种群结构，揭示大果青杆种群的现状及发展趋势，为大果青杆天然种群的维持和保护提供参考依据。【方法】对分布于甘肃舟曲和天水 2 个现存区域的大果青杆种群进行群落调查，采用种群生态学方法，从种群龄级结构、数量动态、生存力等方面进行统计分析，并利用时间序列模型对种群数量结构特征进行预测。【结果】1）舟曲种群幼苗和幼树数量相对丰富，年龄结构近似钟形，属于稳定型种群，天水种群呈残存状态，个体数量不足 10 株，幼苗个体数量稀少，潜在更新能力不足，属于衰退型种群，2 个种群均对外界干扰表现出较高的敏感性，抗干扰能力较弱；2）大果青杆种群的存活曲线呈 Deevey- Ⅱ型，各龄级个体具有近似的死亡率，种群处于相对稳定状态。存活曲线在第Ⅱ径级和第Ⅵ径级出现 2 次消亡高峰；3）生存分析函数表明，随着径级的增加，大果青杆种群生存率（S_t）整体呈下降趋势，累计死亡率（F_t）整体呈上升趋势，在Ⅳ径级之后，大果青杆种群的生存率和累计死亡率达到平衡，死亡密度曲线（f_{ti}）和危险率曲线（λ_{ti}）的变化趋势基本一致，总体呈上升趋势，在Ⅱ～Ⅳ径级上升幅度有所放缓，在Ⅳ径级之后，增幅较为明显；4）时间序列模型预测结果显示，大果青杆种群在经历未来 2、3、4、5、6 和 7 径级后，各径级的个体数总体呈上升趋势，且同一径级经历时间越长个体数增加越明显，在不考虑外界因素的条件下，大果青杆种群为增长型种群，但正常更新难以长期维持。【结论】大果青杆种群群落稳定性差，对环境敏感性高，抗外界干扰能力弱。建议将其纳入极小种群保护工程，设立保护小区；增加科研力量的投入，对种群动态进行长期、系统的监测和评估；探索人工改造和干预适用技术的研发，构建符合大果青杆特性的适宜生境；建立大果青杆持续生存的就地保护示范区，开展野外回归关键技术研究与示范。

关键词：大果青杆；甘肃；自然保护小区；种群大小；种群

中图分类号：S718.54 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)06-0112-09

Population structure and dynamics of *Picea neoveitchii*, a plant endemic endangered in China

CHE Zongju[1,2], ZHANG Jiqiang[3], WANG Sanying[3], LU Juan[3], LIN Lin[3], SUN Xueyan[4]

(1. Institute of Forestry Science, Bailong River Forestry Management Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2.Gansu Bailongjiang Forest Ecosystem Observation and Research Station, Zhouqu 746300, Gansu, China; 3. Gansu Forestry Science and Technology Research Academy, Lanzhou 730020, Gansu, China; 4. Zhouqu County Forestry and Grassland Technology Integrated Service Station, Zhouqu 746300, Gansu, China)

Abstract:【Objective】In order to provide a reference for the maintenance and protection of the natural population of *Picea neoveitchii*, this study discussed the structure and development trend of *Picea neoveitchii* in the field, revealing the current situation and development trend.【Method】This study investigated the population of *Picea neoveitchii* in two existing areas, Zhouqu and Tianshui, Gansu. Utilizing population ecology methods, statistical analyses are performed on aspects such as the age-class structure, population dynamics, and viability of the populations. Additionally, a time series model was employed to predict the characteristics of the population quantity structure.【Result】The results showed that: 1) The population in Zhouqu had a relatively abundant number of seedlings and saplings,

收稿日期（Received）：2025-02-11 **修订日期**（Revised）：2025-05-28

基金项目：中央财政林业和草原项目（甘林规发〔2025〕543 号）；甘肃省林业和草原局自列科技计划项目（2024kj020）；甘肃省级财政林业草原科技创新项目（KJCX202407）。

第一作者：车宗菊（gszhjq@126.com），高级工程师。 **通信作者：**张继强（258610205@qq.com），正高级工程师。

引文格式：车宗菊 , 张继强 , 王三英 , 等 . 中国特有濒危植物大果青杆种群结构与动态 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(6):112-120.
CHE Z J, ZHANG J Q, WANG S Y, et al. Population structure and dynamics of *Picea neoveitchii*, a plant endemic endangered in China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):112-120.

with an age structure approximating a bell shape, indicating a stable population. The population in Tianshui was in a remnant state, with fewer than 10 individuals and scarce seedlings, suggesting insufficient potential for regeneration and classifying it as a declining population. Both populations were highly sensitive to external disturbances and had weak anti-disturbance capabilities; 2) The survival curve of the *Picea neoveitchii* population followed Deevey-II, with equal mortality rates at all age groups. The population was in a relatively stable state , and the survival curve showed two peaks of extinction occurring in the II and VI age groups; 3) The survival analysis function indicated that the survival rate (S_i) decreased with increasing age, while the cumulative mortality rate (F_i) increased with increasing age. After diameter class IV, the survival rate of the *Picea neoveitchii* population balances with its cumulative mortality rate, and the changes in the mortality density curve (f_{ti}) and hazard rate curve (λ_{ti}) were basically consistent, showing an overall upward trend, the upward trend slowed down in age groups II to IV, and the increase was more significant after age group IV; 4) The analysis based on the time series prediction model revealed that after undergoing periods of 2, 3, 4, 5, 6, and 7 diameter classes in the future, the number of individuals across all diameter classes of the *Picea neoveitchii* population was projected to show an overall upward trend. Moreover, the longer the time span within the same diameter class, the more significant the increase in the number of individuals becomes. The population was a growth population, but normal updates were difficult to maintain in the long term without considering external factors.【Conclusion】This study suggested that the population stability of *Picea neoveitchii* was poor, it was highly sensitive to the environment, and its ability to resist external interference was weak. It is recommended that the species be included in conservation programs for extremely small populations, with protected areas established. Increased investment in scientific research is needed to enable long-term, systematic monitoring and evaluation of population dynamics. Explore the research and development of artificially modified and intervention-applicable technologies to construct suitable habitats that align with the characteristics of *Picea neoveitchii*; establish in-situ conservation demonstration zones and conduct research and demonstration of key techniques for wild reintroduction.

Keywords: *Picea neoveitchii*; Gansu Province; small nature reserve; population size; population

种群生态学是植物保护的重要理论基础 [1]，濒危植物保护最基础的研究从种群生态学开始。种群结构和动态是其研究的核心内容 [2]，不仅反映了种群数量在时间和空间上的变动规律，同时也体现了种群在群落中的作用、地位以及种群与栖息环境的相互关系。种群的年龄结构是深入分析种群动态的依据，生命表结构分析是解释种群变化的基础，通过对种群生命表结构的分析与存活曲线的绘制，从数量变化的角度直观展现种群生存规律，辅以生存分析和时间序列预测 [3-4]，可以揭示种群的生存状态、干扰因素 [5] 和发展趋势 [6]，对种群和群落的维持、更新和生态恢复都具有指导意义 [7]。

大果青杆 *Picea neoveitchii* 为我国特有的秦岭系植物，属国家Ⅱ级重点保护野生植物 [8]，被世界自然保护联盟（IUCN）列为濒危物种（VU），具有较高的经济、科研和保护价值。由于过度砍伐、自身特性和自然因素等影响，大果青杆残存林木极少，纯林基本消失，以单株或者零散分布，濒危形势十分严重 [9]。目前仅在湖北西部、陕西南部、甘肃天水和白龙江流域零散分布 [10-12]。目前对大果青杆的研究主要见于资源残存与地理分布 [9,12]、资源保护与开发 [13-14] 和濒危机制探讨 [10] 等方面，大果青杆群落特征 [15]、种间关系 [16]、生态位 [17] 亦有少量报道，对大果青杆野外种群结构和动态的研究相对较少。早期研究 [18-19] 认为，大果青杆在甘肃仅分布于舟曲县白龙江流域，最近研究人员在天水市麦积区发现了大果青杆的新分布点，虽然种群个体数量较少，但生长状况良好，具有重要的研究价值。为了全面了解大果青杆在我省的生存现状，本研究对分布于舟曲和天水的大果青杆种群进行全面调查，运用种群统计学和数量生态学的原理和方法，分析大果青杆的种群结构及动态的变化规律，探讨种群的濒危机制，预测种群的未来发展趋势，以期为其保护和管理提供一定的科学理论依据，为进一步阐明大果青杆物种濒危机制奠定基础。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究地位于甘肃南部的舟曲县插岗乡和天水市麦积区境内，地理坐标 104°09′ ～ 106°07′ E，33°29′ ～ 34°31′N。研究区地处秦岭西端南部和北侧的山地，该区域属暖温带季风气候区 [20]，气候温和，年均气温 9 ～ 11.8 ℃，极端最低温 -15.8 ℃，极端最高温 38.2 ℃；降水适中，雨热同期，年降水量 689 ～ 960 mm，主要集中在 5—9 月；年日照时数 1 950.6 ～ 1 980.2 h，年平均无霜期 210 d。大果青杆主要生长在海拔 1 300 ～ 2 000 m 沟谷底部或山坡上以及岩石缝隙中，土壤有机质含量丰富，腐殖质深厚，土壤中性至微碱性。调查区大果青杆属于群落的上层木，主要伴生的乔木树种包括华山松 *Pinus armandi*、铁杉 *Tsuga chinensis*、油松 *Pinus tabuliformis*、青杆 *Picea wilsonii*、蒙古栎 *Quercus mongolica*、鹅耳枥 *Carpinus turczaninovii* 和五裂槭 *Acer oliverianum* 等。

表 1 甘肃濒危植物大果青杆种群样地信息
Table 1 Information on the study plots of the endangered plant *P. wilsonii* population in Gansu Province

样地 Plot No.	位置 Location	地理坐标 Geographical coordinates	海拔 Altitude /m	坡向 Aspect	坡度 Slope /(°)	坡位 Slope position	土壤类型 Soil type	土壤有机质 Soil organic matter /(g·kg^{-1})	pH 值 pH value
1、2	舟曲插岗乡	104°24′04″ ～ 104°24′08″E 33°34′01″ ～ 33°34′06″N	1 755	南	45	中	褐土	171.91	8.00
3、4	舟曲插岗乡	104°24′12″ ～ 104°24′18″E 33°34′45″ ～ 33°34′51″N	1 730	东北	30	下	褐土	132.93	8.35
5、6	舟曲插岗乡	104°23′52″ ～ 104°23′57″E 33°34′01″ ～ 33°34′07″N	1 715	北	45	谷底	褐土	56.48	8.02
7 ～ 12	天水麦积镇	106°02′43″ ～ 106°02′50″E 34°23′45″ ～ 34°23′50″N	1 510	东	36	上	棕壤土	111.98	6.49

1.2 研究方法

在野外实地踏查的基础上，选择大果青杆分布比较集中、群落保存比较完整的地点设置样地，根据地形和坡度，每个样地面积均为 400 m^2（20 m×20 m）。在舟曲和天水 2 个分布区的典型地段共布设 12 个样地，其中天水麦积区 6 个，舟曲插岗乡 6 个。于 2024 年 6—9 月对大果青杆植物种群进行生态学调查。将每个样地划分为 4 个 10 m×10 m 的乔木样方 [21]，对样方内胸径≥ 5 cm 的大果青杆进行每木调查，调查内容包括数量、高度、胸径、冠幅等，对胸径＜ 5 cm 和高度＜ 0.5 m 的幼树和幼苗只统计数量。

1.3 数据处理

1.3.1 种群年龄结构的划分

采用径级结构代替年龄结构的方法 [22-23]，结合调查区大果青杆生活史以及径级分布特点，参照同为松科的江南油杉 *Keteleeria fortunei*[7]、南方铁杉 *Tsuga chinensis*[24] 等濒危物种的分级标准，将大果青杆划分为 6 个龄级（表 2）。

表 2 甘肃濒危植物大果青杆种群龄级和径级结构划分
Table 2 Age class and diameter class structure classification for the endangered plant species *Picea neoveitchii* in Gansu Province

龄级 Age class	径级 Diameter class	高度 H（m）/ 胸径 DBH（cm）
幼苗 Seedling	Ⅰ级	H ＜ 0.5
幼树 Sapling	Ⅱ级	DBH ＜ 5
小树 Young Tree	Ⅲ级	5 ≤ DBH ＜ 10
中树 Medium tree	Ⅳ级	10 ≤ DBH ＜ 20
	Ⅴ级	20 ≤ DBH ＜ 30
大树 Large tree	Ⅵ级	30 ≤ DBH ＜ 40
	Ⅶ级	40 ≤ DBH ＜ 50
老树 Old tree	Ⅷ级	DBH ≥ 50

1.3.2 种群动态量化分析

大果青杆种群结构动态量化分析的具体参数和方法参照桂慧颖等 [4] 和陈晓德 [25] 的方法。数量动态变化指数 V_n、忽略和考虑外部环境随机性干扰时整个种群数量动态变化指数 V_{pi}、V_{pi}' 的取值＞ 0、=0 和＜ 0 时，分别反映种群相邻径级间个体数量增长、稳定和衰退的动态关系；种群对外界随机干扰所承担的最大风险概率 P_{max} 取值表示的动态关系与 V_n 一致；当考虑未来外部干扰时，V_{pi}' 也可作为衡量种群结构动态对随机干扰的敏感性指标。

1.3.3 种群静态生命表及存活曲线

根据种群统计学方法 [1-2]，按照大果青杆各径级的存活或死亡数编制静态生命表，并绘制存活曲线、死亡率和消失率曲线，分析种群动态变化过程。具体参数及计算参考赵阳等 [26] 的方法，种群死亡率出现负值时，需采用匀滑技术 [27-28] 对不同径级个体数进行修正。

1.3.4 种群生存力分析

采用种群生存函数 $S_{(i)}$、累计死亡率函数 $F_{(i)}$、死亡密度 $f_{(ti)}$ 和危险率函数 $\lambda_{(ti)}$ 等 4 个生存分析函数对大果青杆种群结构动态变化情况进行分析。其计算参照桂慧颖等 [4] 的方法。

1.3.5 种群时间序列模型预测

采用平滑预测法中的移动平均法对大果青杆种群年龄结构进行模拟和预测，其计算参照王世彤等 [5]、林春惠等 [21] 的方法。

2 结果与分析

2.1 种群年龄结构

通过抽样调查记录到舟曲种群 121 株，整体预估种群数量 5 000 株以上，为大种群。种群龄级结构完整，幼苗、幼树、小树、中树、大树和老树分别占总数的 21.43%、19.64%、13.39%、37.50%、6.25% 和 1.78%（图 1）。中树个体数量最多，幼苗和幼树个体相对丰富，种群年龄结构近似钟形，表明该种群处于稳定或缓慢增长状态。

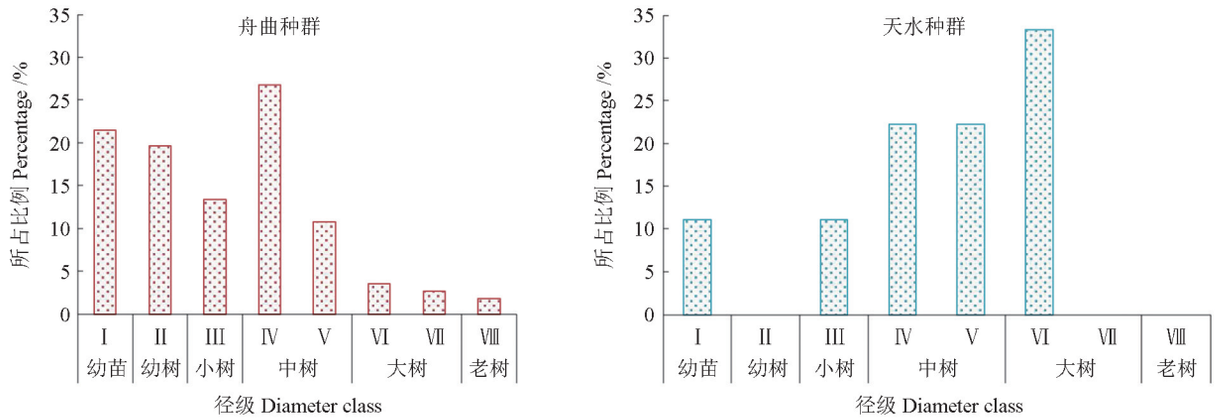


图 1　甘肃濒危植物大果青杆种群年龄结构

Fig. 1　Age structure of the endangered plant *P. neoveitchii* populations in Gansu Province

调查中实测到天水种群共有 9 株，为小种群。种群龄级结构不完整，幼树和老树缺失，幼苗、小树、中树和大树分别占总数的 11.11%、11.11%、44.44% 和 33.33%，中树和大树个体最多，幼龄个体较少，幼苗和小树的总和仅占总数的 22.22%，年龄结构呈倒金字塔型，表明该种群有明显的衰退趋势。天水种群因年龄结构不完整，幼苗数量较少，幼树缺失，导致种群潜在自然更新能力严重不足，随着演替的进行，种群将不断衰退。

2.2　种群数量动态

种群数量动态分析结果（表 3）显示，舟曲种群 V_3 小于 0，其余各径级间的动态指数均大于 0，说明种群在Ⅲ～Ⅳ龄级转化过程中个体数呈减少的结构动态，而其余径级间则表现为增长的结构动态。忽略外部环境的随机性干扰时整个种群数量动态变化指数 V_{pi} 大于 0（V_{pi}=26.82%），表明该种群为增长型种群；当考虑外部环境的随机性干扰时，整个种群数量动态变化指数 V_{pi}' 趋近于 0（V_{pi}'=1.68%），表明该种群增长趋势很小，在一定时期内种群趋于稳定状态。

天水种群 V_1 大于 0，V_4 等于 0，其余径级间的动态指数均小于 0，种群结构动态关系表现为波动的“增长 - 衰退 - 稳定 - 衰退”。忽略和考虑外部环境的随机性干扰时整体数量变化动态指数 V_{pi} 和 V_{pi}' 均小于 0（V_{pi}=-19.44%，V_{pi}'=-2.16%），说明该种群在当前阶段总体呈衰退趋势。随机干扰风险极大值 P_{max}=0.13%，说明天水种群受外界干扰的影响较大。

表 3　甘肃濒危植物大果青杆种群数量结构动态变化指数 †

Table 3　Dynamic index of the endangered plant *Picea neoveitchii* population in Gansu Province　%

种群 Population	相邻径级间动态指数 Dynamic index class							V_{pi}	V_{pi}'	P_{max}
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7			
舟曲种群 Zhouqu population	8.33	31.82	-50.00	60.00	66.67	25.00	33.33	26.82	1.68	0.06
天水种群 Tianshui population	100.00	-100.00	-50.00	0.00	-33.33	—	—	-19.44	-2.16	0.13

† V_n：种群径级间的数量变化动态指数；V_{pi}、V_{pi}'：忽略和考虑外部干扰影响时种群的数量变化动态指数；P_{max}：随机干扰风险极大值；“—”：表示空值。V_n: dynamic indices of the population between diameter classes; V_{pi}, V_{pi}': dynamic index of the population without considering the external disturbance and considering external disturbance; P_{max}: maximum risk with random disturbance; “—”, means null values.

2.3　静态生命表和存活曲线

由于天水种群数量较少，龄级结构不完整，故未分别编制生命表，而以所有种群为对象编制了大果青杆种群静态生命表（表 4）。由表 4 和图 2 可知，随着径级的增加，大果青杆种群现有个体数（A_x）和标准化存活数（l_x）持续降低，生命期望（e_x）也呈现出相同的趋势，在径级Ⅰ最高，在径级Ⅷ最低，分别为 3.794 和 0.506。

存活曲线模型检验结果（表 5）显示，指数函数模型和幂函数模型的拟合结果均达到极显著水平（$P < 0.01$），但指数方程的 R^2 值和 F 值均大于幂方程，表明指数方程拟合效果更优。因此，确定大果青杆种群存活曲线符合 Deevey- Ⅱ型，表现为各径级死亡率基本相同，反映出稳定型种群的动态特征。

大果青杆种群死亡率（q_x）和消失率（k_x）的变化趋势基本一致（图 3），呈波动递增趋势，分别在径级Ⅱ、Ⅵ出现 2 个消亡高峰，其中径级Ⅵ

的死亡率和消失率最高，分别为 0.572 和 0.848，明显高于整个径级的平均死亡率（0.270）和消失率（0.356）。第 1 个消亡高峰可能是由于大果青杆在幼龄阶段适应性差，生存竞争能力不强，随着生长过程中对环境资源需求的增加，种内和种间激烈的竞争，强烈的环境筛选导致其个体大量死亡。在大果青杆野生分布区，林冠层郁闭度较高，透光率极小，这个环境筛可能是光因素；在第Ⅵ级达到消亡最高峰，与生物学特性不符，该阶段是大果青杆生长旺盛期，在群落具有较强的竞争优势，消亡高峰出现不可能是种间竞争压力所致。大果青杆的材质优良，用途广泛，其该阶段经济价值较大，极易成为砍伐对象，可能是人类过度开发利用造成中树（径级Ⅵ）大量消亡。

表 4 甘肃濒危植物大果青杆种群静态生命表 †

Table 4 Static life table of the endangered plant *P. wilsonii* populations in Gansu Province

径级 Diameter class	高度 H（胸径 DBH）	A_x	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	e_x	k_x	S_x
Ⅰ	H < 0.5 m	24	24	1000	6.908	83	0.083	3.794	0.087	0.917
Ⅱ	DBH < 5 cm	22	22	917	6.821	250	0.273	3.092	0.318	0.727
Ⅲ	5 cm ≤ DBH < 10 cm	16	16	667	6.503	42	0.063	3.063	0.065	0.937
Ⅳ	10 cm ≤ DBH < 20 cm	32	15	625	6.438	42	0.067	2.235	0.070	0.933
Ⅴ	20 cm ≤ DBH < 30 cm	14	14	583	6.368	291	0.499	1.360	0.691	0.501
Ⅵ	30 cm ≤ DBH < 40 cm	7	7	292	5.677	167	0.572	1.216	0.848	0.428
Ⅶ	40 cm ≤ DBH < 50 cm	3	3	125	4.828	42	0.336	1.168	0.409	0.664
Ⅷ	DBH ≥ 50 cm	2	2	83	4.419	41	0.494	0.759	0.681	0.506

† a_x：匀滑修正后的存活数；l_x：标准化存活数，d_x：标准化死亡数；q_x：死亡率；e_x：生命期望；S_x：存活率；K_x：消失率。
a_x: the correction value of A_x; l_x: standardized survival; d_x: standardized deaths, q_x: mortality rate; e_x: life expectancy; S_x: survival rate; K_x: killing rate.

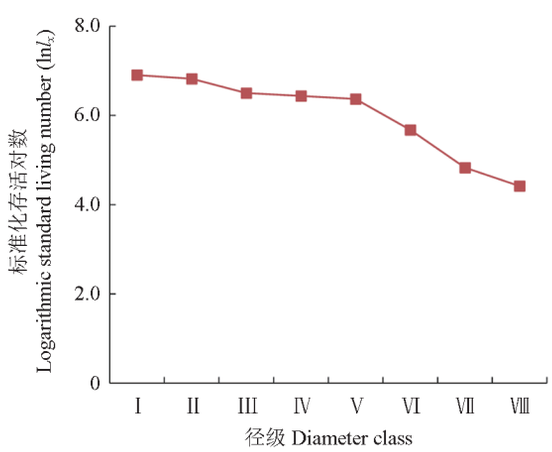


图 2 甘肃濒危植物大果青杆种群存活曲线

Fig. 2 Survival curve（lnl_x） of the endangered plant *P. neoveitchii* populations in Gansu Province

2.4 种群生存力分析

大果青杆种群的生存力分析结果显示（图 4 和图 5），随着径级的增加，生存率（S_t）整体呈下降趋势，累计死亡率（F_t）整体呈上升趋势，在Ⅳ～Ⅴ径级之间，大果青杆种群的生存率和累计死亡率达到平衡点，表明Ⅳ径级之后种群开始逐渐向衰退方向发展。死亡密度曲线（f_{ti}）和危险率曲线（λ_{ti}）的变化趋势也基本一致，总体呈上升趋势，也在Ⅱ～Ⅳ径级上升幅度有所放缓，在Ⅳ径级之后，增幅较为明显，4 个生存力函数分析结果表明，大果青杆表现出在幼树期锐减，中期波动，后期衰退的特征。

表 5 甘肃濒危植物大果青杆种群存活曲线的检验模型 †

Table 5 Test models of survival curves of the endangered plant *P. neoveitchii* populations in Gansu Province

存活曲线 Survival curve	拟合模型 Fitting model	拟合结果 Fitting results	R^2	F	P
Deevey- Ⅱ	$N_x=N_0\,e^{-bx}$	$y = 7.990\,6e^{-0.076x}$	0.932 9	21.35	0.000
Deevey- Ⅲ	$N_x=N_0x^{-b}$	$y = 7.764\,1x^{-0.237}$	0.744 3	37.89	0.000

† N_x 为匀滑后 x 径级内存活数；N_0 为种群形成初期的个体存活数。
N_x is survival within diameter class after smooth sliding; N_0 is the number of individuals surviving in the early stages of population formations.

2.5 种群时间序列预测

以野外实地调查到大果青杆各径级实际存活数为基础，采用时间序列分析中移动平均法，对大果青杆未来种群数量和种群的结构进行预测，其结果如表 5 所示，第Ⅱ、Ⅲ径级在经历 2 ～ 3 个径级后，种群的个体数量增加了 4.54% 和 29.17%；第Ⅳ径级在经历 4 个径级后，种群个体数量下降了 25%；第Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ和Ⅷ径级分别在经历 5、6 和 7 个径级后种群个体数量达到峰值，分别增长了 54.29%、173.81%、461.90% 和 585.71%。

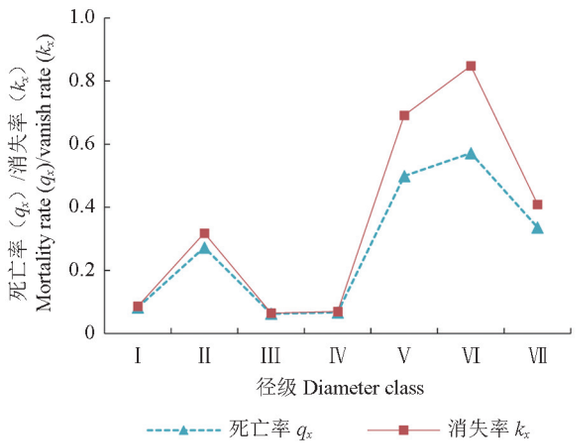


图 3　甘肃濒危植物大果青杆种群死亡率和消失率曲线

Fig. 3　Mortality rate（q_x）and vanish rate（k_x） curves of the endangered plant *P. neoveitchii* populations in Gansu Province

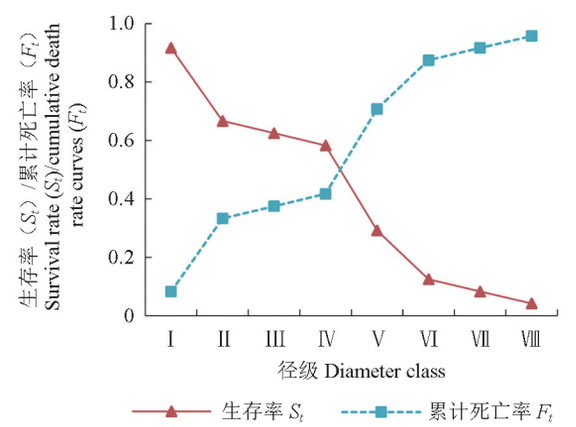


图 4　甘肃濒危植物大果青杆种群生存率函数和累积死亡率函数曲线

Fig. 4　Survival rate (S_t) and cumulative death rate curves (F_t) of the endangered plant *P. neoveitchii* populations in Gansu Province

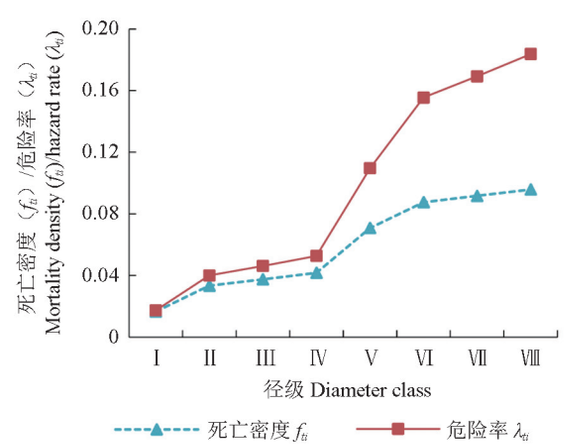


图 5　甘肃濒危植物大果青杆种群死亡密度和危险率函数曲线

Fig. 5　Mortality density（f_{ti}）and hazard rate（λ_{ti}）curves of the endangered plant *P. neoveitchii* populations in Gansu Province

预测结果显示（表 6），大果青杆种群在未来 2 ～ 7 个径级时间序列内，各径级的个体数量总体呈增长的趋势，且同一径级经历时间越长个体数增加越明显，表明大果青杆种群的结构主要依靠成龄个体维系，短时间内呈一定的增长趋势，但中树（Ⅳ径级）阶段更新不充分以及老树在一定时期达到的生理年龄，都会导致种群走向衰退。综合其整个发展趋势来看，在不考虑外界因素的条件下，大果青杆种群为缓慢增长型种群，但正常更新难以长期维持，如果不加以保护，种群未来会逐渐趋向衰退。

表 6　甘肃濒危植物大果青杆种群数量动态时间序列预测 †

Table 6　Time sequence analysis of number dynamics of the endangered plant *P. wilsonii* populations in Gansu Province

径级 Diameter class	实际存活数 Survival number	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7
Ⅰ	24						
Ⅱ	22	23					
Ⅲ	16	19	21				
Ⅳ	32	24	23	24			
Ⅴ	14	23	21	21	22		
Ⅵ	7	11	18	17	18	19	
Ⅶ	3	5	8	14	14	16	17
Ⅷ	2	3	4	7	12	12	14

† M_2、M_3、M_4、M_5、M_6、M_7 分别表示经过 2、3、4、5、6、7 径级时间后种群存活数的预测值。
M_2, M_3, M_4, M_5, M_6 and M_7 represent predicted population size after 2, 3, 4, 5, 6, and 7 diameter class times, respectively.

3　讨　论

Zhang 等 [29] 采用 RADP 技术对秦岭地区大果青杆的种质资源进行研究，从遗传多样性的角度得出大果青杆已经处于极危（CR）状态；王明亮等 [9,12] 在对河南、湖北、陕西和甘肃等地大果青杆种群野外样方调查的基础上，估算现存种群数量不足 5 000 株，参照濒危等级划分标准，认为大果青杆已经处于极其濒危的状态。本次大量的野外调查发现，甘肃境内许多文献记载的大果青杆历史分布范围已经消失，仅在舟曲和天水两地有少量分布，其中天水种群呈残存状态，种群数量不足 10 株，处于灭绝的边缘；舟曲种群岛屿化分布在白龙江支流拱坝河沿岸长度不足 8 km 的狭窄区域，分布范围不超过 5 km^2。虽然研究显示在不考虑外界干扰的情况下，大果青杆种群的结构和动态目前处于稳定或缓慢增长状态，但存在种群稳定性差、对环境敏感性高、抗外界干扰能力弱等问题，其濒危形势仍然十分严重，迫切需要加强保护。

生境丧失和破碎化是物种受威胁的主要原因和普遍原因，由于研究区历史上长期大面积森林

采伐，造成植物群落逆向演替和生境条件的恶化，破坏了大果青杆赖以生存的栖息地丧失，这可能是造成大果青杆濒危的主要原因。同时大果青杆对生境要求特殊，主要零散分布在常绿落叶阔叶混交林中，偏好山地沟谷河岸带生境。群落交错的沟谷河岸带生境物种丰富，种间竞争激烈，常伴随着强烈的干扰，限制了大果青杆种群的扩散。实地调查显示，研究区大果青杆种群的分布均位于村庄、道路的周边或景区内，2 个种群的更新均受到一定程度的人为干扰和生存空间的限制。特别是舟曲种群，主要分布在村庄、农田周边和道路两侧，强烈的人为干扰可能会导致大量的幼苗死亡，仅有少数的幼苗成长为幼树，种群整体的稳定性恐将难以维持，种群发展也不容乐观。大果青杆种群受外部环境影响的压力较大，对外界干扰敏感度高，抗干扰能力弱，可能是导致大果青杆濒危的主要原因。

植物种群的年龄结构是其自身特性、外部环境因素和种群间相互关系长期综合作用的结果[30]，通过分析种群的年龄结构可以了解种群的现状、与环境的相互关系以及在生态系统中的作用和地位，还可以掌握种群在过去的结构和受干扰情况。大果青杆在研究区内的森林类型是常绿落叶阔叶混交林，偏好沟谷河岸带生境，沿拱坝河表现出“一带多岛”的现象，这是大果青杆分布范围收缩的表现，也是种群衰退的标志。天水种群的随机干扰风险极大值 P_{max}（0.13%）大于舟曲种群 P_{max}（0.006%），从定量的角度说明天水种群受外界干扰的影响较大，对环境的变化更敏感，种群抗干扰能力更弱，这可能与天水种群数量小有关。

基于对甘肃濒危植物大果青杆种群动态的分析和文献统计，我国特有大果青杆分布范围极度狭窄，长期受外界因素干扰导致生境破碎化严重，目前种群个体和数量都极小，面临着很高的野外灭绝风险。建议将其纳入全国极小种群野生植物拯救保护工程，建立专门的珍稀濒危植物保护小区进行保护。针对甘肃境内大果青杆资源分布现状，结合种群的结构和动态特征，提出以下几点保护措施：1）增加科研力量的投入，对种群动态进行长期、系统的监测和评估，深入开展大果青杆生活史、保护遗传学、繁殖生物学、种群和群落生态学等方面的深入研究，明晰其致濒机制，研编大果青杆种质资源保存、扩繁、就地保护、迁地保护、生境修复与野外回归等技术标准，为大果青杆的保护和管理等提供科技支撑。2）探索人工促进种群的快速恢复和生境修复的方法，开展人工改造和干预适用技术，构建符合大果青杆特性的适宜生境。如采取围栏封育、退耕还林、建立保护小区等措施防止过度的人为干扰，改善生存环境，提高幼苗和幼树的生存率；结合透光疏伐、割灌、施肥等抚育措施，加强幼苗期的抚育和管理，通过减少生态位重叠度高的竞争物种，引入互利共生的保育植物，恢复适宜其特性的生境条件。3）建立大果青杆持续生存的就地保护示范区，开展大果青杆野生植物回归关键技术研究和示范，在大力开展扩繁技术研究的基础上，对现有种群结构不完整的区域积极开展增强回归。在历史分布区域适当开展重建回归，通过野外回归扩大大果青杆种群的个体数量和遗传多样性，最终建立能够适应环境变化并自我维持的新种群。

4 结 论

研究表明，舟曲自然分布的大果青杆数量较多，种群结构完整，近似钟形，种群处于稳定或缓慢增长状态。从数量动态来看，舟曲种群的个体结构仅在径级Ⅲ～Ⅳ转化过程中呈衰退趋势，其余各径级均表现出波动的增长趋势。整个种群数量动态变化指数 V_{pi} 为 26.82%，当考虑到未来外部环境的随机性干扰时，整个种群数量动态变化指数 V_{pi}' 趋近于 0（V_{pi}'=1.68%），表明种群增长趋势很小，在一定时期内种群趋于稳定状态，同时在外界随机性干扰的情况下具有较高的敏感性。

天水自然分布的大果青杆种群呈残存状态，种群个体数量不足 10 株，为小种群，种群结构缺失，中树和大树居多，缺乏幼龄个体，种群潜在自然更新能力严重不足，呈明显的衰退趋势。种群数量动态表现为波动的“增长 - 衰退 - 稳定 - 衰退”。忽略和考虑外部环境的随机性干扰时整体数量变化动态指数 V_{pi} 和 V_{pi}' 均小于 0（V_{pi}=-19.44%，V_{pi}'=-2.16%），说明该种群在当前阶段结构极不稳定，对外界干扰同样具有较高的敏感性，种群抗干扰能力弱。随机干扰风险极大值 P_{max} 为 0.13%，表明天水种群受外界干扰影响较大。

生命表是描述植物种群死亡过程的一种非常有用的工具，通过静态生命表、存活曲线、生存力分析和时间序列分析可以反映种群的生长现状、动态特点以及预测未来的趋势[31]。从大果青杆静态生命表及相关的曲线来看，标准存活数和生命期望值随着径级的增加而持续降低，最大值均出现在径级Ⅰ，低龄期相对较高个体数量和生命期望值能够保证大果青杆种群更新的持续；种群的存活曲线趋向 Deevey- Ⅱ型，表明各径级死亡率相

对较为稳定，种群处于相对稳定状态，但存活曲线存在波动性，在径级Ⅱ和径级Ⅵ出现 2 次消亡高峰，推测可能与大果青杆自身的生物学特性、种间竞争以及人为过度干扰有关，有待进一步研究。

在生存力分析中，大果青杆符合生存率单调下降、累计死亡率单调上升的生长规律 [32]，死亡密度曲线和危险率曲线变化基本一致，具有前期锐减、中期动态稳定、后期衰退的特征。从时间序列预测分析结果来看，在未来 2 ～ 7 个径级时间内，各径级的个体数量总体呈增长趋势，但大果青杆种群的结构主要依靠成龄个体维系，未来一段时间会呈现一定的增长趋势，但难以长期维持，如不对幼龄植株加强抚育和管理，种群仍可能在未来一段时间走向衰退。

参考文献：

[1] 李博 , 杨持 , 林鹏 . 生态学 [M]. 北京 : 高等教育出版社 ,2004: 120-147.
LI B, YANG C, LIN P. Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press,2004:120-147.

[2] 孙儒泳 . 基础生态学 [M]. 北京 : 高等教育出版社 ,2002:136.
SUN R Y. Basic ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:136.

[3] 董鸣 . 生态学透视 : 种群生态学 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2016: 143-144.
DONG M. Ecological perspective: population ecology[M]. Beijing: Science Press,2016:143-144.

[4] 桂慧颖 , 方发之 , 黎肇家 , 等 . 海南吊罗山濒危植物美丽火桐种群结构与动态特征 [J]. 广西植物 ,2025,45(1):197-206.
GUI H Y, FANG F Z, LI Z J, et al. Population structure and dynamic characteristics of endangered plant *Firmiana pulcherrima* in Diaoluo mountain of Hainan Province[]. Guihaia, 2025,45(1):197-206.

[5] 王世彤 , 李玲丽 , 徐耀粘 , 等 . 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 S T, LI L L, XU Y Z, et al. Population structure and dynamic characteristics of extremely small populations of *Changiostyrax dolichocarpa* C. J. Qi[J]. Plant Science Journal, 2022,40(5):627-636.

[6] 马丹丹 , 库伟鹏 , 夏国华 , 等 . 珍稀濒危植物堇叶紫金牛种群结构及动态分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2021,45(3):159-164.
MA D D, KU W P, XIA G H, et al. Structure and dynamics of rare and endangered plant *Ardisia violacea* natural population[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021,45(3):159-164.

[7] 林碧华 , 陈绪辉 , 罗敏贤 , 等 . 珍稀濒危植物江南油杉群落区系与种群动态分析 [J]. 西北林学院学报 ,2024,39(4):71-78.
LIN B H, CHEN X H, LUO M X, et al. Flora characteristics and population dynamics of rare and endangered plant of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(4):71-78.

[8] 国家林业和草原局农业农村部公告 (2021 年第 15 号)(国家重点保护野生植物名录)[EB/OL].[2021-09-08]. http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210908/162515850572900.html.
Announcement of the National Forestry and Grassland Administration and the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (No. 15 of 2021) (List of Key Protected Wild Plants of the People's Republic of China)[EB/OL].[2021-09-08]. http://www.forestry.gov.cn/main/ 5461/20210908/162515850572900.html.

[9] 王明亮 , 张德顺 , 马其侠 , 等 . 濒危植物大果青扦地理分布和群落特性研究 [J]. 安徽农业科学 ,2010,38(22):12040-12043,12075.
WANG M L, ZHANG D S, MA Q X, et al. Geographical distribution and communities characteristics of an endangered plant *Picea neoveitchii*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010,38(22):12040-12043,12075.

[10] 郭星 , 杨帆 , 李兴明 , 等 . 我国特有植物大果青杆濒危机制的探讨 [J]. 林业科技通讯 ,2017(1):32-36.
GUO X, YANG F, LI X M, et al. Discussion on the endangered mechanism of *Picea neoveitchii*, a unique plant in our country[J]. Forest Science and Technology,2017(1):32-36.

[11] 梁茂厂 , 费永俊 , 孙兵 , 等 . 鄂西山区大果青杆群落生长调查与比较研究 [J]. 长江大学学报 (自科版),2018,15(6):10-12.
LIANG M C, FEI Y J, SUN B, et al. Investigation and comparation on the growth of *Picea neoveitchii* communities in the western Hubei mountainous area[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition),2018,15(6):10-12.

[12] 王明亮 . 濒危植物大果青扦的残存分布、群落特性和种群动态研究 [D]. 上海 : 华东师范大学 ,2010.
WANG M L. Study on remain geographic distribution, community characteristics and population ecology of endangered species *Picea neoveitchii*[D]. Shanghai: East China Normal University,2010.

[13] 马建伟 , 郭小龙 , 杜彦昌 , 等 . 小陇山林区 16 种珍稀濒危树种优先保护序列研究 [J]. 甘肃林业科技 ,2009,34(2):25-30.
MA J W, GUO X L, DU Y C, et al. Study on priority conservation sequence of 16 rare and endangered tree species in Xiaolongshan forest area[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology,2009,34(2):25-30.

[14] 陈杰君 , 赵文杰 . 小陇山林区珍稀濒危树种资源保护与开发 [J]. 甘肃科技 ,2006,22(8):222-223.
CHEN J J, ZHAO W J. Protection and development of rare and endangered tree species resources in Xiaolongshan forest area[J]. Gansu Forestry Science and Technology,2006,22(8):222-223.

[15] 闫倩倩 , 郭星 , 杨帆 , 等 . 甘肃南部大果青杆群落特征研究 [J]. 陕西林业科技 ,2016(6):1-4.
YAN Q Q, GUO X, YANG F, et al. Study on the community

characteristics of *Picea neoveitchii* Mast. in southern Gansu Province[J]. Shaanxi Forest Science and Technology,2016(6):1-4.

[16] 谢飞 , 郭星 , 闫倩倩 , 等 . 白龙江濒危树种大果青杆优势种群种间关系 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(6):105-115.
XIE F, GUO X, YAN Q Q, et al. Interspecific correlations among dominant populations of the natural forest of *Picea neoveitchii* in the Bailongjiang river[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,46(3):105-115.

[17] 张继强 , 芦娟 , 王三英 , 等 . 濒危植物大果青杆群落生态位特征及群落稳定性 [J]. 植物研究 ,2024,44(6):863-869.
ZHANG J Q, LU J, WANG S Y, et al. Niches characteristics and community stability of endangered plant, *Picea neoveitchii*[J]. Bulletin of Botanical Research,2024,44(6):863-869.

[18] 朱耀宝 , 寇德荣 . 甘肃省第二次全国重点保护野生植物资源调查 [M]. 北京 : 中国林业出版社 ,2020:28-29.
ZHU Y B, KOU D R. The second national key protection investigation of wild plant resources in Gansu Province[M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2020:28-29.

[19] 杨帆 . 珍稀濒危植物大果青杆种子萌发与种群动态特征 [D]. 兰州 : 甘肃农业大学 ,2018.
YANG F. Seed germination and population dynamic characters of an rare and endangered plant *Picea neoveitchii*[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University,2018.

[20] 鲍文中 , 张强 , 陶建红 , 等 . 甘肃气候 [M]. 北京 : 气象出版社 , 2018:417-418.
BAO W Z, ZHANG Q, TAO J H, et al. Gansu climate[M]. Beijing: China Meteorological Press,2018:417-418.

[21] 林春惠 , 顾惠怡 , 叶钦良 , 等 . 珍稀濒危植物大苞山茶种群结构与动态特征 [J]. 植物生态学报 ,2023,47(12):1684-1692.
LIN C H, GU H Y, YE Q L, et al. Characteristics of population structure and dynamics in endangered *Camellia granthamiana*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2023,47(12):1684-1692.

[22] 杨慧琴 , 刘圆缓 , 刘芳黎 , 等 . 西南特有濒危植物大王杜鹃种群结构及动态特征 [J]. 西北植物学报 ,2020,40(12):2148-2156.
YANG H Q, LIU Y H, LIU F L, et al. Population structure and dynamic characteristics of an endangered and endemic species *Rhododendron rex* subsp. *rex* in southwest, China[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2020,40(12):2148-2156.

[23] 江波 , 周先容 , 尚进 , 等 . 中国特有植物巴山榧树的种群结构与动态 [J]. 生态学报 ,2018,38(3):1016-1027.
JIANG B, ZHOU X R, SHANG J, et al. Population structure and dynamics of *Torreya fargesii* Franch., a plant endemic to China[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):1016-1027.

[24] 赵家豪 , 叶钰倩 , 孙晓丹 , 等 . 江西武夷山珍稀濒危植物南方铁杉种群动态与空间分布 [J]. 生态学报 ,2022,42(10):4032-4040.
ZHAO J H, YE Y Q, SUN X D, et al. Population dynamics and spatial distribution of the rare and endangered plant *Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis* in Wuyishan, Jiangxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(10):4032-4040.

[25] 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):104-107.
CHEN X D. A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structural dynamics[J]. Acta Ecologica Sinica,1998,18(2):104-107.

[26] 赵阳 , 齐瑞 , 焦健 , 等 . 尕海 - 则岔地区紫果云杉种群结构与动态特征 [J]. 生态学报 ,2018,38(20):7447-7457.
ZHAOY, QI R, JIAO J, et al. The population structure and dynamic characteristics of *Picea purpurea* at the Gahai-zecha area[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(20):7447-7457.

[27] 韩路 , 王家强 , 王海珍 , 等 . 塔里木河上游胡杨种群结构与动态 [J]. 生态学报 ,2014,34(16):4640-4651.
HAN L, WANG J Q, WANG H Z, et al. The population structure and dynamics of *Populus euphratica* at the upper reaches of the Tarim river[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(16):4640-4651.

[28] 李金昕 , 吴定军 , 章世鹏 , 等 . 四川米仓山自然保护区台湾水青冈种群生命表及动态分析 [J]. 植物研究 ,2016,36(1):68-74.
LI J X, WU D J, ZHANG S P, et al. Life table and dynamic analysis of *Fagus hayatae* population in Micangshan nature reserve, Sichuan Province, China[J]. Bulletin of Botanical Research, 2016,36(1):68-74.

[29] ZHANG D S, YONGSHIK K, MAUNDER M, et al. The conservation status and conservation strategy of *Picea neoveitchii*[J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2006,4(3):58-64.

[30] 张晓鹏 , 于立忠 , 杨晓燕 , 等 . 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 X P, YU L Z, YANG X Y, et al. 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.

[31] 吉也 , 曹孟岩 , 白楚锋 , 等 . 峨眉山桫椤种群结构与动态特征 [J]. 西北植物学报 ,2019,39(3):543-551.
JI Y, CAO M Y, BAI C F, et al. Population structure and dynamics of *Alsophila spinulosa* in Mount Emei[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2019,39(3):543-551.

[32] 罗西 , 郭秋菊 , 姚兰 , 等 . 濒危植物鹅掌楸的天然种群结构特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021,41(7):115-123.
LUO X, GUO Q J, YAO L, et al. Characteristics of natural population structure of endangered plant *Liriodendron chinense*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021,41(7):115-123.

[本文编校：吴　彬]