

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.40524

李翔, 侯璐, 李双喜, 李颖岳. 濒危树种庙台槭种群数量特征及动态分析[J]. 植物科学学报, 2018, 36(4): 524~533

Li X, Hou L, Li SX, Li YY. Population quantitative characteristics and dynamic analysis of the endangered plant *Acer miaotaiense*[J].

Plant Science Journal, 2018, 36(4): 523~533

濒危树种庙台槭种群数量特征及动态分析

李翔¹, 侯璐¹, 李双喜², 李颖岳^{1*}

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 林木育种国家工程实验室, 林木与花卉育种教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 陕西太白山国家级自然保护区管理局, 陕西杨陵 712100)

摘要: 庙台槭(*Acer miaotaiense* Tsoong)为我国三级保护植物, 是秦岭特有的濒危树种, 具有重要的经济价值和观赏价值。通过对庙台槭主要分布区野生资源进行调查, 研究其种群的年龄结构、静态生命表、存活曲线和死亡曲线, 用动态指数(V_{pi} 、 V_{pi}')和时间序列模型预测其种群发展趋势。结果显示, 庙台槭种群幼龄个体多, 中龄和老龄个体少, 其生存曲线呈Deevey-Ⅲ型; 静态生命表及相关曲线分析显示, 庙台槭种群的存活率与径级表现出显著负相关, 而种群死亡率曲线总体呈先下降后增加的趋势; 种群数量动态分析显示, 庙台槭种群整体结构处于增长型, 在缺乏成年个体的情况下, 种群对外部环境的抗干扰能力下降; 时间序列预测发现, 经过幼苗、幼树阶段, 同一时间曲线的庙台槭种群数量在高径级所占比例略有增加, 但高龄级个体相对较少; 庙台槭分布地区的主要植被类型为落叶阔叶林和常绿阔叶林, 但庙台槭个体受保护较少, 人为活动及病虫害影响较大, 天然更新困难, 生存和保护状况不容乐观。

关键词: 庙台槭; 种群; 生命表; 径级结构; 数量特征

中图分类号: Q948.12¹

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2018)04-0524-10

Population quantitative characteristics and dynamic analysis of the endangered plant *Acer miaotaiense*

Li Xiang¹, Hou Lu¹, Li Shuang-Xi², Li Ying-Yue^{1*}

(1. Beijing Forestry University, College of Biological Sciences and Biotechnology, National Engineering Laboratory for Tree Breeding, Key Laboratory of Genetics and Breeding in Forest Trees and Ornamental Plant, Ministry of Education, Beijing 100083, China;

2. Administrative Bureau of Shanxi Taibaishan National Nature Reserve, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: As a third-class nationally protected plant, *Acer miaotaiense* Tsoong is a rare and endangered species in the Qinling Mountains of China, with important economic and ornamental value. Through investigation of the wild resources of the main distribution area of *Acer miaotaiense*, we studied the age structure, static life table and survival curve of the populations. Furthermore, dynamic index (V_{pi} , V_{pi}') and time series model was used to predict the development trend of the populations, thus providing the basis for formulating feasible protection strategies. To understand the growth performance of *A. miaotaiense*, corresponding protection measures were taken. Results showed that the survival curve of the *A. miaotaiense* population was Deevey-Ⅲ type, with more young individuals and fewer middle-aged and aging individuals; the static life table and correlative curve analysis demonstrated that the survival rate of the *A. miaotaiense* populations was significantly

收稿日期: 2018-01-15, 退修日期: 2018-03-12。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2016ZCQ05); 国家林业局珍稀濒危物种野外救护与繁育项目。

This work was supported by grants from the Special Funds for Basic Scientific Research Operations in Central Universities (2016ZCQ05) and Field Rescue and Breeding Program for Rare and Endangered Species of State Forestry Bureau.

作者简介: 李翔(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为经济林良种繁育(E-mail: lx2016bjfu@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: yingyueli@bjfu.edu.cn)。

negatively correlated with diameter, while the population mortality curve showed an initially decreasing then increasing trend; dynamic analysis of the population quantity showed that the overall structure of the *A. miaotaiense* population was increasing, but the ability of the population to resist disturbance from the external environment decreased in the absence of adult individuals; time series prediction showed that the *A. miaotaiense* populations at the same time curve increased slightly at the high-level, and the number of older-aged individuals was relatively small. The main vegetation types were deciduous broad-leaved forest and evergreen broad-leaved forest. In the wild *A. miaotaiense* populations, the number of protected trees was very small, and they were greatly impacted by human activities, diseases, and insect pests. Few seedlings and natural regeneration were discovered, and the outlook is not good.

Key words: *Acer miaotaiense*; Population; Life table; Diameter class structure; Quantitative characteristics

庙台槭(*Acer miaotaiense* Tsoong)又名留坝槭,为槭树科(Aceraceae)槭属(*Acer*)植物,是我国秦岭特有落叶乔木,具有重要的经济价值,其树皮、叶子和果实均可作为栲胶的原料^[1]。庙台槭不仅可以作为化工原料,而且是重要的现代园林绿化树种,具有树形大、叶形优美、果形奇特的特点。在我国主要分布于陕西、甘肃两省的秦岭地区,大巴山北坡海拔1000~2000 m的山坡和河谷丛林中。庙台槭对研究槭树科植物的起源和演化历史具有重要意义^[1]。

庙台槭自被列为我国第一批三级保护植物以来,对其研究已陆续展开,但对庙台槭种群特征的研究报道较少。狄维忠等^[2]对庙台槭的形态特征、分布范围和保护价值进行了研究,发现其模式标本原产地唯一的大树被洪水冲走,表明该树种在原产地已不复存在。通过调查发现,陕西省留坝镇大坝沟内存在零星分布的庙台槭^[3]。随后,在佛坪自然保护区的白马沟中段海拔1200 m处^[4]和河南伏牛山区栾川县相继发现庙台槭野生种群^[5],这些发现对庙台槭的保护、研究和开发具有重要意义。另外,有学者将GPS与ArcView GIS相结合,通过种群调查、空间分析等方法,对秦岭小陇山林区庙台槭的主要分布点^[6]和种群分布^[7]进行了调查研究,发现庙台槭作为群落中的优势种,占据了较大的生态位宽度,但庙台槭幼苗、幼树在林下的更新比较困难^[8]。

分析种群的年龄结构、绘制生命表和存活曲线,对研究种群数量动态变化具有重要意义。种群的年龄结构不仅可以了解种群的存在状态、受干扰

情况,而且还可以预测种群未来的发展趋势^[9]。生命表和生存曲线分析是种群统计中最常用的方法,种群的生命表可直接反映出生率、死亡率等重要参数,为探索种群动态特征、发展趋势提供重要信息^[10]。因此,研究不同分布区野生植物种群特征,有助于了解物种的生存状况和环境适应性,进而提出有效的保护措施。本研究以分布于秦岭的庙台槭为对象,通过对其8个主要天然分布种群的287株单株进行调查,分析庙台槭现有种群的生态学特征和种群结构特征,绘制生命表和生存曲线,采用动态指数(V_{pi} 、 V_{pi}')和时间序列模型预测种群的发展趋势,以期了解野生庙台槭种群的生存繁殖状况、种群结构和种群数量动态,为野生庙台槭种群资源的修复、保护和利用提供参考。

1 研究区自然概况

本研究调查对象为8个庙台槭天然种群。研究区位于秦岭沿线的陕西省宝鸡市太白山国家级自然保护区、陕西省汉中市佛坪自然保护区和甘肃省天水市小陇山国家级自然保护区。

太白山国家级自然保护区位于陕西省太白、眉县、周至3县交界处,秦岭山脉中段,地理坐标为33°49'30"~34°05'35"N、107°22'25"~107°51'30"E,主峰拔仙台海拔3767.2 m。平均温度12.9℃,最高温42℃,最低温-17.2℃,7~9月降水量最多,约占全年降水量的50%,属于内陆季风气候。主要植被类型为常绿阔叶林,主要树种为水青树(*Tetracentron sinense* Oliv.)、连香树(*Cercidiphyllum japonicum* Sieb. et Zucc.)、五

角枫 (*Acer oliverianum* Pax)、杜仲 (*Eucommia ulmoides* Oliv.) 等, 草本有星叶草 (*Circaeaster agristis* Maxim.)、铁筷子 (*Helleborus thibetanus* Franch.)、车前草 (*Plantago asiatica* Linn.) 等。土壤类型为褐土壤和棕土壤。

佛坪国家级自然保护区位于陕西省佛坪县, 秦岭中段南坡, 调查地点位于 $33^{\circ}33'882''N$ 、 $107^{\circ}48'699''E$, 保护区地势为西北高东南低, 海拔 $980 \sim 2904$ m。保护区内有高等植物 1580 种, 野生动物 265 种, 有“天然动植物基因库”之称。年平均温度 $11.5^{\circ}C$, 极端高温 $37^{\circ}C$, 极端低温 $-12.9^{\circ}C$, 年均降水量 924 mm, 年最大降水量 1382.3 mm, 年最小降水量 603.8 mm, 属于山地暖温带气候。植被类型为落叶阔叶林和高山针叶林, 主要树种有鹅耳栎 (*Carpinus turczaninowii* Hance)、栓皮栎 (*Quercus variabilis* Blume)、水曲柳 (*Fraxinus mandschurica* Rupr.)、山核桃 (*Carya cathayensis* Sarg.)、太白红杉 (*Larix chinensis* Beissn.)、秦岭冷杉 (*Abies chensiensis* Tiegh.) 和红豆杉 (*Taxus chinensis* Rehd.) 等。土壤类型为黄棕壤、棕壤和暗棕壤。

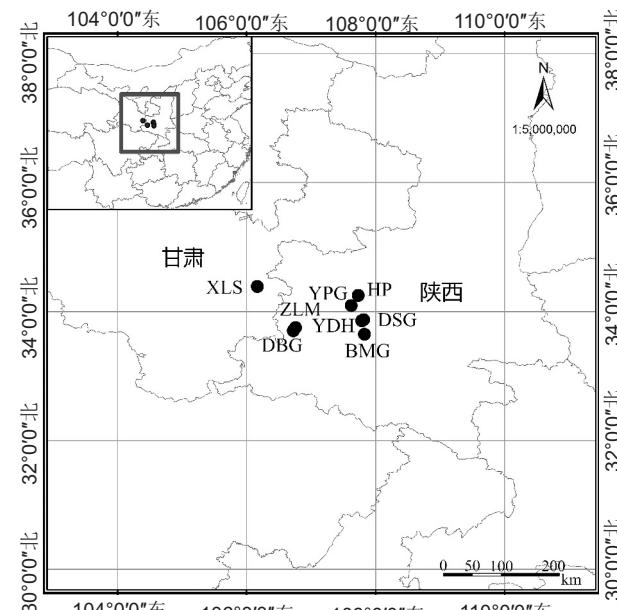
小陇山国家级自然保护区位于甘肃省东南部, 秦岭山脉西段, 地理坐标为 $33^{\circ}35'12'' \sim 33^{\circ}45'11''N$ 、 $106^{\circ}13'10'' \sim 106^{\circ}33'06''E$, 海拔 $700 \sim 2500$ m。年平均气温 $7^{\circ}C \sim 12^{\circ}C$, 枯丰年降水量差别较大, 相对湿度 $68\% \sim 78\%$, 无霜期 120 ~ 218 d, 属暖温带大陆性季风气候。植被类型为温带落叶阔叶林, 主要树种有千金榆 (*Carpinus cor data* Bl.)、桑树 (*Morus alba* Linn.)、悬钩子 (*Rubus corchorifolius* Linn. f.)、山白树 (*Sinowilsonia henryi* Hemsl.)、胡桃 (*Juglans regia* Linn.) 和银杏 (*Ginkgo biloba* Linn.) 等。土壤类型为褐土壤。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

通过查阅文献、中国数字植物标本馆 (CVH) 和全球生物多样性信息网络 (GBIF), 在庙台槭主要分布区内选取秦岭中段南坡的 8 个天然种群 (图 1), 即: 陕西留坝县留侯镇张良庙 (ZLM)、留坝县留侯镇大坝沟 (DBG)、陕西佛坪自然保护区白马沟 (BMG)、陕西省周至县厚畛子镇大树沟 (DSG)、厚畛子镇鱼肚河 (YDH)、秦岭中段北坡

的太白县鹦鸽镇羊皮沟 (YPG)、眉县太白山蒿坪 (HP) 和秦岭西段的甘肃天水市小陇山林区 (XLS), 于 2017 年 6 月至 7 月进行野外调查。在对庙台槭进行实地考察的基础上, 选择 8 个具有代表性的样地, 每个样地面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$, 进行逐木调查并记录植物名称、树高、胸径、冠幅、盖度、个体数等。利用 GPS 定位系统记录植株经纬度和海拔高度, 测定叶长、叶宽、叶厚和结实情况, 并记录坡向、坡度、林分郁闭度、植被群落和土壤类型等生境因子。



XLS: 小陇山; DBG: 大坝沟; ZLM: 张良庙; YPG: 羊皮沟; YDH: 鱼肚河; HP: 蒿坪; DSG: 大树沟; BMG: 白马沟。
下同。

图 1 野生庙台槭种群
Fig. 1 Populations of wild *Acer miaotaiense*

2.2 径级结构分析

径级结构是探讨种群动态、植物群落稳定性和群落空间结构的重要指标^[11]。庙台槭属国家重点保护植物, 野生资源数量有限, 不宜用生长锥或解析木测定年龄。因此, 通过计算野生庙台槭的径级结构, 对其种群动态和群落结构进行分析。根据庙台槭种群结构和生活史特征, 按不同的胸径将庙台槭划分为 10 个龄级: 第 1 龄级为幼苗 ($DBH < 1.5$ cm); 第 2 龄级 ($1.5\text{ cm} \leq DBH < 2.5\text{ cm}$); 第 3 龄级为幼树 ($2.5\text{ cm} \leq DBH < 7.5\text{ cm}$); 第 4 龄级 ($7.5\text{ cm} \leq DBH < 12.5\text{ cm}$); 第 5 龄级 ($12.5\text{ cm} \leq DBH < 17.5\text{ cm}$); 第 6 龄级 ($17.5\text{ cm} \leq DBH < 22.5\text{ cm}$); 第 7 龄级

($22.5 \text{ cm} \leq DBH < 27.5 \text{ cm}$) ; 第 8 龄级 ($27.5 \text{ cm} \leq DBH < 32.5 \text{ cm}$) ; 第 9 龄级 ($32.5 \text{ cm} \leq DBH < 37.5 \text{ cm}$) ; 第 10 龄级 ($37.5 \text{ cm} \leq DBH < 42.5 \text{ cm}$)。统计各龄级个体株数比例, 绘制径级分布图。利用 Excel、ArcGIS 和 SPSS 对原始数据进行统计和分析。

2.3 静态生命表编制

生命表是判定种群趋势, 反映种群实际状况的重要指标, 对于多年生植物, 可以利用静态生命表来分析种群动态。本研究对原始数据进行方程拟合并做匀滑处理, 利用多种群综合数据, 参考易雪梅等^[12]和张维等^[13]的方法, 编制庙台槭种群静态生命表, 绘制种群存活曲线。根据生命表, 采用生存率函数 $S(n)$ 、累计死亡率函数 $F(n)$ 、死亡密度函数 $f(n)$ 和危险率函数 $\lambda(t)$ ^[14] 进一步分析庙台槭种群动态。

2.4 时间序列预测

在实地调查庙台槭种群径级存活数的基础上, 利用时间序列分析法, 通过移动平均法预测野生庙台槭不同种群的年龄结构^[15]。其计算公式为:

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

式中, t 代表龄级; (1) 表示一次移动平均; n 为需要预测的时间(本文为 2、3、4 个龄级时间); 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。

2.5 种群动态数量化方法

为了客观、准确地评价庙台槭的种群动态特征, 采用常规定量方法对种群动态进行研究^[16, 17]。种群内每个龄级个体数量的动态指数(V_n), 表示从 n 到 $n+1$ 龄级的个体数量的动态。其计算公式为:

$$V_n = \frac{S_n - S_{n+1}}{\max(S_n, S_{n+1})} \times 100\% \quad (2)$$

式中, S_n 、 S_{n+1} 分别代表第 n 、第 $n+1$ 龄级的个体数量。

种群整体的年龄结构动态变化指数(V_{pi})的计算公式为:

$$V_{pi} = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} (S_n \times V_n)}{\sum_{n=1}^{k-1} S_n} \quad (3)$$

式中, k 为最大年龄级。

种群年龄结构动态变化指数(V_{pi})与年龄级数

量(k)及各龄级个体数(S_n)两个因素相关, 这两个因素的值越大, 说明对外界干扰的缓冲作用越强。因此, 考虑到外部干扰因素, 将 V_{pi} 变换为 V_{pi}' 。其计算公式为:

$$V_{pi}' = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} (S_n \times V_n)}{k \times \min(S_1, S_2, \dots, S_k) \times \sum_{n=1}^{k-1} S_n} \quad (4)$$

3 结果与分析

3.1 种群生长状况

在调查的 8 个野生庙台槭种群共 287 株个体中, 胸径为 $0.6 \sim 42 \text{ cm}$, 高度为 $0.35 \sim 20.4 \text{ m}$, 其中胸径最大的个体在白马沟种群, 可达 42 cm , 高度最大的个体在小陇山种群, 为 20.4 m 。8 个野生种群的叶长为 $6.6 \sim 12.2 \text{ cm}$, 其中羊皮沟种群叶长最大, 其叶宽也最大, 为 13.4 cm , 鱼肚河种群叶长最小。庙台槭主要分布在距河流约 50 m 范围内的沟谷和林缘较平坦区, 受病虫害和人为砍伐影响较大(表 1)。

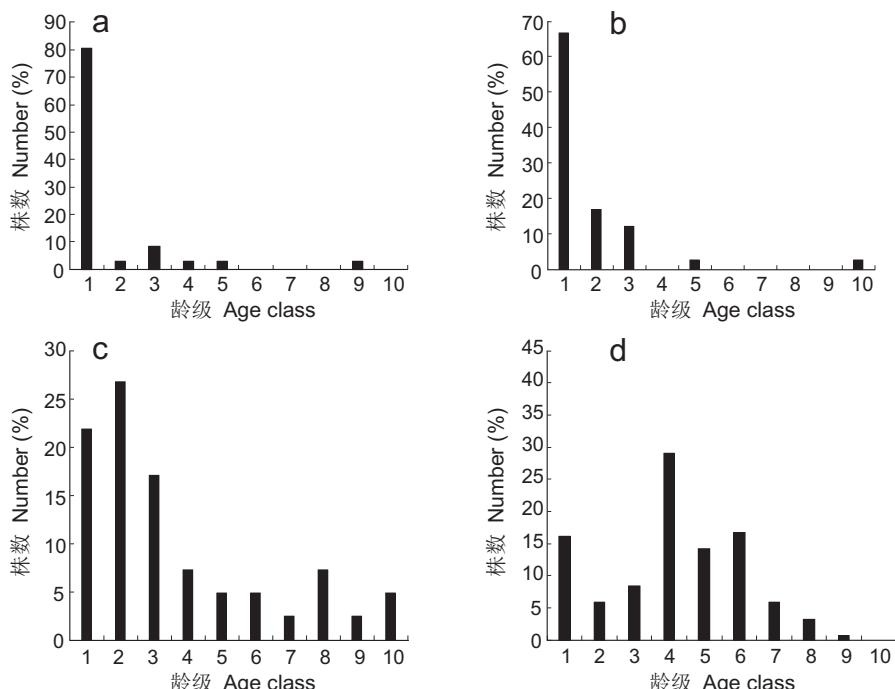
3.2 种群结构特征

调查发现, 8 个野生庙台槭种群中, 张良庙、大坝沟、羊皮沟和蒿坪等地的庙台槭数量较少, 因此, 仅对白马沟、大树沟、鱼肚河和小陇山 4 个种群的胸径和树高分布状况进行研究。从这 4 个群落龄级分布来看(图 2), 树龄总体偏小, 只有白马沟种群树龄相对较大。在调查的 8 个种群中, 白马沟庙台槭平均胸径最大, 达 17.8 cm , 该种群中幼树较多, 树龄较大的个体较少, 且各龄级均有个体存在, 以第 2 龄级为主(表 1, 图 2)。大树沟和鱼肚河庙台槭种群主要分布在第 1 龄级, 以幼苗为主。小陇山种群的径级主要在 $7.5 \sim 12.5 \text{ cm}$ 之间, 没有发现胸径大于 37.5 cm 的单株。大坝沟、羊皮沟、蒿坪野生庙台槭种群均只有 1 棵大树有结实, 其中大坝沟的胸径最大, 为 34.2 cm , 但仅发现 1 株天然更新的幼树。张良庙种群平均胸径为 15.1 cm , 最大胸径为 17.2 cm 。

种群年龄结构动态变化指数 V_n 、 V_{pi} 、 V_{pi}' 分别取正值、负值和零值时, 可反映种群个体数量的增长、衰退和结构稳定的动态关系。从庙台槭种群龄级结构的动态指数来看(表 2), V_3 在所有龄级中小于 0, 表明种群中的幼树个体呈现衰减趋势。其它各龄级 V_n 为正数, 其中第 1 龄级的动态指数值 V_1 最大, 达 55.4%, 表明该龄级幼苗数量多, V_4 最

表 1 野生庙台槭的生长状况
Table 1 Growth performance of wild *Acer miaotaiense*

调查地点 Investigation site	海拔 Altitude (m)	经纬度 Latitude and longitude	株数 Number (株)	平均胸径 Mean diameter (min-max) (cm)	平均树高 Mean height (min-max) (m)	平均叶长 Mean leaf length (cm)	平均叶宽 Mean leaf width (cm)	平均叶厚 Mean leaf thickness (mm)	结果株数 Number (株)	主要威胁因素 Threat factors
陕西留侯张良庙 (ZLM)	1280	33°40.683'N, 106°50.164'E	3	15.1(13.5-17.2)	8.1(7.6-9.8)	7.4	6.5	0.2	3	病虫害
陕西留侯大坝沟 (DBG)	1389	33°38.979'N, 106°48.226'E	2	17.6(1-34.2)	9.35(0.6-18.1)	7.8	5.5	0.1	1	病虫害
陕西鹦鸽羊皮沟 (YPG)	1520	34°01.519'N, 107°41.059'E	3	6(4.1-10)	7(3.2-15.4)	12.2	13.4	0.3	1	病虫害、砍伐
陕西太白山箭坪 (HP)	1097	34°05.314'N, 107°42.717'E	3	9.8(6.2-17.5)	4.4(4-6.2)	8	9.8	0.1	1	砍伐
陕西厚畛子大树沟 (DSG)	1502	33°50.680'N, 107°48.068'E	65	3.6(1.4-37.2)	2.5(0.45-20.3)	8.1	8.7	0.2	1	病虫害
陕西厚畛子鱼肚河 (YDH)	1500	33°50.057'N, 107°47.395'E	46	4.6(1.2-40)	2.5(0.45-18.5)	6.6	7.2	0.1	0	病虫害
陕西佛坪保护区白马沟 (BMG)	1260	33°33.882'N, 107°48.699'E	38	17.8(1.4-42)	7.5(0.38-20.2)	7.9	9	0.2	16	修路威胁
甘肃天水市小陇山 (XLS)	1486	34°18.405'N, 106°08.323'E	155	16.2(0.6-36.1)	10(0.35-20.4)	9.6	7.8	0.2	46	病虫害



a: 大树沟种群龄级分布; b: 鱼肚河种群龄级分布; c: 白马沟种群龄级分布; d: 小陇山种群龄级分布。

图中横坐标上的 1 ~ 10 分别表示种群 1 ~ 10 个龄级, 龄级范围分别为: 1 龄级($DBH < 1.5$ cm); 2 龄级(1.5 cm $\leq DBH < 2.5$ cm); 3 龄级(2.5 cm $\leq DBH < 7.5$ cm); 4 龄级(7.5 cm $\leq DBH < 12.5$ cm); 5 龄级(12.5 cm $\leq DBH < 17.5$ cm); 6 龄级(17.5 cm $\leq DBH < 22.5$ cm); 7 龄级(22.5 cm $\leq DBH < 27.5$ cm); 8 龄级(27.5 cm $\leq DBH < 32.5$ cm); 9 龄级(32.5 cm $\leq DBH < 37.5$ cm); 10 龄级(37.5 cm $\leq DBH < 42.5$ cm)。下同。

a: Population age class distribution in DSG; b: Population age class distribution in YDH; c: Population age class distribution in BMG; d: Population age class distribution in XLS.

Numbers from 1 to 10 in the horizontal coordinates represent the age class of the populations from 1 to 10, respectively, and the diameter ranges are as follows: 1 age class ($DBH < 1.5$ cm); 2 age class (1.5 cm $\leq DBH < 2.5$ cm); 3 age class (2.5 cm $\leq DBH < 7.5$ cm); 4 age class (7.5 cm $\leq DBH < 12.5$ cm); 5 age class (12.5 cm $\leq DBH < 17.5$ cm); 6 age class (17.5 cm $\leq DBH < 22.5$ cm); 7 age class (22.5 cm $\leq DBH < 27.5$ cm); 8 age class (27.5 cm $\leq DBH < 32.5$ cm); 9 age class (32.5 cm $\leq DBH < 37.5$ cm); 10 age class(37.5 cm $\leq DBH < 42.5$ cm). Same below.

图 2 各种群龄级分布

Fig. 2 Age class distribution of each population

表2 庙台槭种群龄级结构的动态指数

Table 2 Dynamic index of the age structure of *Acer miaotaiense*

种群动态指数级 Population dynamic exponential level	动态指数值 (%) Dynamic value	种群年龄结构动态指数 Dynamic indices of population age-class structure	
		V_{pi}	V_{pi}'
V_1	55.4		
V_2	37.8		
V_3	-22.2		
V_4	19.4		
V_5	20.7	34.80%	1.20%
V_6	56.52		
V_7	20		
V_8	50		
V_9	25		
V_{10}	100		

小, 为 19.4%, 说明种群中小树、中龄树和成年树不足。种群年龄结构动态指数 $V_{pi} = 34.8\% > 0$, 表明庙台槭种群整体结构处于增长型, 而 V_3 小于 0, 表明庙台槭种群结构呈缓慢增长或是衰退型状态。当考虑外部干扰时, 种群龄级结构动态指数 V_{pi}' 为 1.2%, 远远小于 V_{pi} 值, 表明庙台槭种群对环境变化比较敏感, 在缺乏大树的情况下, 种群对外部环境的抗干扰能力下降, 可能导致了种群数量下降。

3.3 种群静态生命表与存活曲线分析

根据静态生命表的编制方法和本研究调查数

据, 采用径级结构代替年龄结构, 用空间代替时间的方法, 编制庙台槭种群特定时间生命表(将径级从小到大的顺序作为时间顺序关系)(表3)。从各龄级个体数量(A_x)来看, 庙台槭幼苗数量占资源总量的 35.2%, 而进入 10 龄级的仅有 1.0%。庙台槭种群死亡率一直很高, 种群死亡率有 2 个高峰: 第一个高峰出现在第 1 龄级, 死亡率高达 55.45%; 另一个高峰出现在第 7 龄级, 死亡率为 41.67%。种群生命期望寿命的波动性较大, 其中第 2 龄级生命期望寿命最大, 为 4.13a, 第 2 龄级个体生命期望寿命较高, 说明庙台槭的幼苗耐荫性较强。自第 2 龄级开始, 生命期望寿命随年龄的增长而下降, 表明这些龄级的植株平均生存能力很强, 可以达到理论生命值。

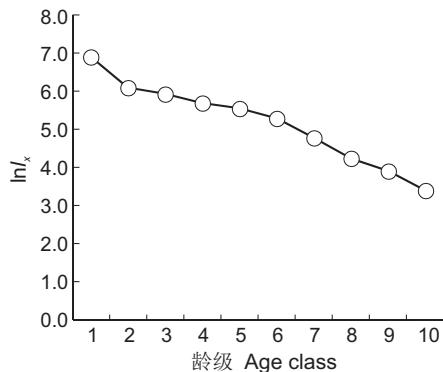
以径级相对应的龄级为横坐标, 以 $\ln(I_x)$ 为纵坐标, 绘制调查区域庙台槭野生种群的存活曲线(图3)。从图3可看出, 庙台槭的生存曲线大致呈 Deevy-III型。曲线早期斜率较大, 说明对环境的自然选择强度大, 因此死亡率较高, 随着龄级增大, 死亡率逐渐降低。庙台槭种群的存活率与龄级表现出显著的负相关, 随着龄级增大存活率降低, 特别是在第 6、7、8 龄级更加明显, 其他龄级变化则较平稳。

表3 庙台槭种群静态生命表
Table 3 Static life table of the *Acer miaotaiense* populations

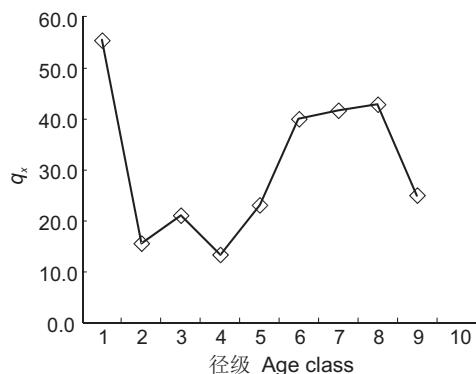
龄级 Age class	径级(cm) DBH	A_x	a_x	I_x	$\ln(I_x)$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x
1	0 ~ 1.5	101	101	1000	6.91	554	55.45	723	2842	2.84	0.81
2	1.5 ~ 2.5	45	45	446	6.10	69	15.56	411	1842	4.13	0.17
3	2.5 ~ 7.5	28	38	376	5.93	79	21.05	337	1396	3.71	0.24
4	7.5 ~ 12.5	36	30	297	5.69	40	13.33	277	1020	3.43	0.14
5	12.5 ~ 17.5	29	26	257	5.55	59	23.08	228	723	2.81	0.26
6	17.5 ~ 22.5	23	20	198	5.29	79	40.00	158	465	2.35	0.51
7	22.5 ~ 27.5	10	12	119	4.78	50	41.67	94	267	2.25	0.54
8	27.5 ~ 32.5	8	7	69	4.24	20	28.57	59	149	2.14	0.34
9	32.5 ~ 37.5	4	5	50	3.90	20	40.00	40	79	1.60	0.51
10	37.5 ~ 42.5	3	3	30	3.39	—	—	15	30	1.00	—

注: A_x 为相应龄级的个体数; a_x 为匀滑处理后的个体数; I_x 为 x 龄级标准化存活个体数(通常基数为 1000), $I_x = a_x/a_0 \times 1000$; d_x 为从 x 到 $x+1$ 龄级间标准化的死亡数, $d_x = a_x - a_{x+1}$; q_x 为从 x 到 $x+1$ 龄级间的个体死亡率, $q_x = d_x/I_x$; L_x 为从 x 到 $x+1$ 龄级的平均存活个体数, $L_x = (I_x + I_{x+1})/2$; T_x 为大于等于 x 龄级的各龄级存活数, $T_x = \sum L_x$; e_x 为 x 龄级平均期望寿命, $e_x = T_x/I_x$; K_x 为致死率, $K_x = \ln(I_x) - \ln(I_{x+1})$ 。

Notes: A_x represents the number of individuals of corresponding age class; a_x represents the number of individuals after smoothing; I_x is the number of standardized surviving individuals of x age class (usually base 1000), $I_x = a_x/a_0 \times 1000$; d_x represents the standardized death number from x age class to $x+1$, $d_x = a_x - a_{x+1}$; q_x represents the mortality rates from x age class to $x+1$, $q_x = d_x/I_x$; L_x represents the average number of surviving individuals from x age class to $x+1$, $L_x = (I_x + I_{x+1})/2$; T_x is the number of survivors of all ages greater than or equal to the x age class, $T_x = \sum L_x$; e_x represents the average life expectancy of the x age class, $e_x = T_x/I_x$; K_x represents the death rate, $K_x = \ln(I_x) - \ln(I_{x+1})$.

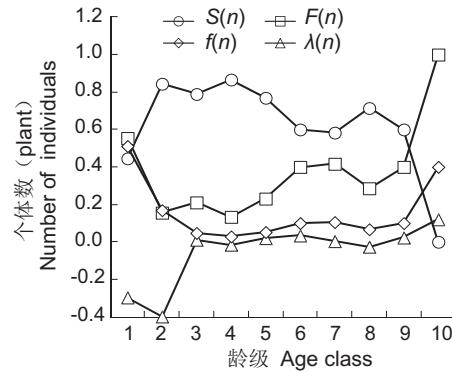
图3 种群存活曲线(I_x)Fig. 3 Population survival curve (I_x)

庙台槭种群死亡率曲线总体呈先下降后增加的趋势(图4),两次死亡高峰分别出现在第1和第8龄级。庙台槭早期死亡率较高,从第1龄级开始,出现55.45%的死亡高峰,幼苗生长和竞争能力不强,仅有少量个体能发育成幼树。进入第3龄级时,再次出现较大死亡率(21.05%),随着径级增大,进入第8龄级,又出现42.86%的死亡高峰。

图4 种群死亡率曲线(q_x)Fig. 4 Population mortality rate (q_x) curve

3.4 种群生存函数分析

从图5可以看出,生存率函数 $S(n)$ 从1龄级到2龄级呈上升趋势,在2到7龄级呈下降趋势,到10龄级时生存率下降到最低。累计死亡率函数 $F(n)$ 从1龄级到2龄级呈下降趋势,在10龄级时累计死亡率达到高峰。庙台槭种群死亡密度 $f(n)$ 曲线波动较大,但危险率 $\lambda(n)$ 曲线从1龄级到3龄级持续下降,随后逐渐平缓变化,最后稳步上升。庙台槭种群具有早期下降、中期波动、后期下降的特点,与种群存活曲线、死亡率曲线分析结果一致。



$S(n)$ 为生存率函数; $F(n)$ 为累计死亡率函数; $f(n)$ 为死亡密度函数; $\lambda(n)$ 为危险率函数。

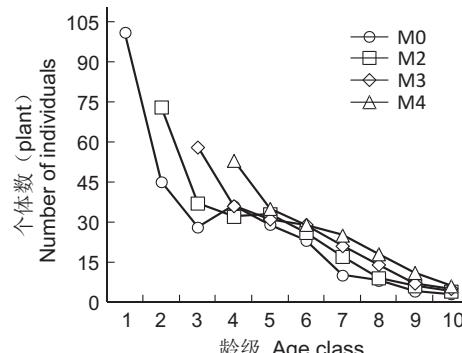
$S(n)$ is the function of the available survival rate; $F(n)$ is the cumulative mortality function; $f(n)$ is the death density function; $\lambda(n)$ is the risk function.

图5 庙台槭种群生存函数

Fig. 5 Survival functional rate of the *Acer miaotaiense* populations

3.5 种群时间序列预测

时间序列分析显示,各种群经过两个龄级时间后,4龄级个体数量有所下降,2~3龄级和5~10龄级个体数量有所增多;经过3个龄级时间后,除4龄级个体数量没有变化外,3龄级和5~10龄级个体数量均比现有种群有所增加;经过4个龄级时间后,所有种群4~10龄级个体数量均比现有种群有所增加;经过2、3、4个龄级时间,在2、3、4龄级阶段,个体数量明显增加,而8、9、10龄级个体数量略有增加(图6)。表明庙台槭种群经过幼苗、幼树阶段后,同一时间曲线的个体数量在高径级所占比例略有增加,但大树数量较少,自然繁殖相对困难,呈衰退趋势。



M_0 表示种群目前的年龄结构; M_2 、 M_3 、 M_4 分别表示经过2、3、4个龄级时间后现有种群的剩余年龄结构。

M_0 is the current age structure of the populations; M_2 , M_3 , and M_4 are the age structures after 2, 3, and 4 age class time, respectively.

图6 庙台槭种群时间序列分析

Fig. 6 Time series analysis on age composition of the main *Acer miaotaiense* populations

4 讨论

庙台槭是我国秦岭地区特有的树种, 是极小种群珍稀濒危植物。了解庙台槭资源现状、种群数量和种群结构, 对保存庙台槭种质资源, 研究槭树科植物的演化和分类具有重要科学价值^[7]。本研究通过对濒危植物庙台槭进行野外调查, 以种群生态学方法分析庙台槭种群数量特征与动态。结果显示, 庙台槭种群幼龄个体占优势, 中龄和老龄个体缺乏, 群落结构呈不稳定状态, 其种群数量总体呈衰减趋势。

种群数量是种群生态学的核心, 它代表种群个体数量的分布状况, 可以揭示种群的形成机制和维持机制^[18]。径级结构能够反映种群的空间分布, 可作为种群龄级估计的重要参数^[19]。本研究中, 野生庙台槭数量受人为因素影响较大, 年龄特征显示群落不稳定。种群年龄结构动态指数 $V_{pi} = 34.8\% > 0$, 表明庙台槭种群处于增长型结构。而种群龄级结构动态指数 V_{pi}' 为 1.2%, 远小于 V_{pi} 值, 表明庙台槭种群对外部环境的抗干扰能力下降, 可能导致种群的数量下降。此外, 在实地调查中发现, 庙台槭大树数量少, 自然更新能力差, 这可能是庙台槭濒危的一个重要原因。静态生命表研究发现, 从第 2 龄级开始, 期望寿命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, 植株大规模死亡, 难以更新, 成为种群衰退加剧的主要原因。庙台槭种群死亡率曲线呈现先下降后上升的趋势, 而庙台槭种群存活率与径级呈显著负相关, 随着庙台槭径级的变大存活率降低, 反映出野生庙台槭种群高径级株数较少, 这与庙台槭生境密切相关, 受河水涨落及旅游开发的影响较大。李倩中等^[20]研究表明, 小河边或其斜坡上极湿润的混交林或灌木丛最适合槭树科植物生长。本研究也发现, 对生境的严苛要求在一定程度上也限制了庙台槭的自然分布, 导致其种群在生存竞争中处于劣势, 种群数量急剧减少。我们认为, 应优先保护其天然种群和生境, 只要保护得当, 其种群数量有可能逐步恢复。

植物种群动态是个体生存能力与外界环境相互作用的结果^[21]。生存函数分析表明, 生存率函数从 1 龄级到 2 龄级呈上升趋势, 在 2 到 7 龄级整体呈下降趋势, 当达到 10 龄级时下降到最低, 而累

计死亡率函数从 1 龄级到 2 龄级呈下降趋势, 在 10 龄级时达到高峰, 说明庙台槭种群具有前期增长、后期下降的特点。调查发现, 野生庙台槭种群基本处于自然状态, 天然更新困难, 大树相对较少, 较小的庙台槭几乎全被砍伐为柴火, 在森林抚育时, 庙台槭多次被砍伐, 导致现有的庙台槭主要是基部萌生株, 不能正常生长、结实, 在一定程度上影响了庙台槭种群的繁殖。从种群数量动态预测结果来看, 经过 2、3、4 个龄级时间后, 大龄级个体数量呈现减少趋势, 而幼龄级株数呈现增大的态势, 说明整个庙台槭种群主要集中在幼龄级, 种群繁殖相对困难, 种群结构不平衡。因此, 建立就地保护区, 保持其生境的完整性是防止或减缓种群结构继续衰退、有效保护这一珍稀濒危物种的关键措施。

植物的生长和种群数量不仅受自身生物学特性的影响, 还受环境气候等因素的影响。样地调查发现, 庙台槭生境地海拔在 1097 ~ 1520 m, 平均海拔为 1379 m, 研究区跨越了秦岭南坡和北坡, 无论是在生态环境还是植被类型方面, 都有显著不同之处。研究发现, 庙台槭海拔分布于 1000 ~ 2000 m^[22], 该海拔范围植被类型主要为落叶阔叶林和常绿阔叶林。此外, 由于秦岭北面属暖温带, 南面属亚热带, 造成南北坡景观高度不同^[23], 但秦岭南北坡植被相似, 只在垂直分布上有所不同, 这也使得野生庙台槭在秦岭南北坡均有分布。本研究中, 分布于秦岭中段南坡的张良庙种群、大坝沟种群、白马沟种群、大树沟种群和鱼肚河种群的数量总和明显比分布于秦岭中段北坡的羊皮沟种群和蒿坪种群数量总和大。这可能是由于秦岭南坡属亚热带, 热量充足, 降水丰富, 可以为庙台槭的生长带来一定养分。因此, 研究庙台槭不同地理种群间的年龄结构、种群数量和动态具有重要意义。

综上所述, 野生庙台槭种群结构不稳定, 结果树相对较少, 自然繁殖困难, 种群数量波动大, 种群自然更新能力差, 同时受生境及人为因素影响较大。因此, 应根据庙台槭种群的生长特点调整林分结构, 采取适当的保护措施, 避免人为活动的影响, 努力避免其野生资源被破坏。同时, 要开展就地保护, 研究其种群繁育技术, 增强种群自身繁殖能力, 扩大种群数量。

参考文献:

- [1] 周廷兰, 姚德生. 珍贵树种——庙台槭[J]. 甘肃林业, 2003 (3): 41-41.
- Zhou TL, Yao DS. Precious species—*Acer miaotaiense* [J]. *Forestry of Gansu*, 2003 (3): 41-41.
- [2] 狄维忠, 于兆英. 陕西省第一批国家珍稀濒危保护植物[M]. 西安: 西北大学出版社, 1989: 195-199.
- [3] 王东, 赵桦, 杨培君. 濒危植物庙台槭原产地再发现[J]. 汉中师范学院学报: 自然科学, 1998, 16(2): 64-64.
- Wang D, Zhao H, Yang PJ. Discovery of the origin of endangered plant *Acer miaotaiense* [J]. *Journal of hanzhong Teachers College: Natural Science*, 1998, 16 (2): 64-64.
- [4] 雍严格. 发现珍稀树种庙台槭群落[J]. 森林与人类, 1994 (2): 19.
- Yong YG. Discovery of rare species of *Acer miaotaiense* population[J]. *Forest & Humankind*, 1994(2): 19.
- [5] 孟庆法, 高红莉, 李红喜, 徐焕军. 珍稀濒危树种庙台槭的生物学及生态学特性研究[J]. 河南科学, 2016, 34(11): 1830-1834.
- Meng QF, Gao HL, Li HX, Xu HJ. Studies on the reproductive biology of a China rare plant—*Acer miaotaiense* [J]. *Henan Science*, 2016, 34(11): 1830-1834.
- [6] 赵建林. 基于 GIS 和 GPS 的秦岭西段庙台槭种群空间分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(6): 71-74.
- Zhao JL. Spatial analysis of *Acer miaotaiense* populations in the western Qinling mountains based on GIS and GPS [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2006, 41 (6): 71-74.
- [7] 路真荣. 珍稀濒危树种庙台槭在小陇山林区种群分布调查分析[J]. 吉林农业(C版), 2011(2): 165-166.
- Lu ZR. Rare and endangered species of *Acer miaotaiense* investigation and analysis in Xiaolongshan forest population distribution[J]. *Jilin Agriculture (C edition)*, 2011(2): 165-166.
- [8] 雷曙光, 马建伟, 张宋智, 胡卫兵, 郭小龙, 杜彦昌, 李安民. 小陇山林区庙台槭群落结构初步研究[J]. 甘肃林业科技, 2009, 34(1): 1-5.
- Lei SG, Ma JW, Zhang SZ, Hu WB, Guo XL, Du YC, Li AM. Preliminary research on community structure of *Acer miaotaiense* in the Xiaolongshan forest area[J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2009, 34 (1): 1-5.
- [9] 矢佳昱, 韩海荣, 程小琴, 董玲玲, 田慧霞, 蔡锰柯, 康峰峰. 河北辽河源自然保护区油松种群年龄结构和种群动态[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1808-1814.
- Shi JY, Han HR, Cheng XQ, Dong LL, Tian HX, Cai MK, Kang FF. Age structure and dynamics of *Pinus tabuliformis* population in the Liaoheyuan Nature Reserve of Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(7): 1808-1814.
- [10] 刘璐, 罗小菊, 刘映良, 王帅, 胥晏. 青桐种群生命表分析[J]. 分子植物育种, 2017, 15(2): 781-784.
- Liu L, Luo XJ, Liu YL, Wang S, Xu Y. Life table analysis of *Firmiana platanifolia* population [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(2): 781-784.
- [11] 刘万德, 苏建荣, 徐崇华, 王发忠, 郎学东, 李智宏, 李帅锋. 濒危植物藤枣的生境与种群结构特征[J]. 林业科学研究, 2017, 30(1): 137-144.
- Liu WD, Su JR, Xu CH, Wang FZ, Lang XD, Li ZH, Li SF. Habitat and population structure characteristics of *Eleutherococcus macrocarpa* [J]. *Forest Research*, 2017, 30(1): 137-144.
- [12] 易雪梅, 张悦, 王远遐, 姬兰柱, 吴培莉. 长白山水曲柳种群动态[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 91-97.
- Yi XM, Zhang Y, Wang YX, Ji LZ, Wu PL. Population structure and dynamics of *Fraxinus mandshurica* in Changbai Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (1): 91-97.
- [13] 张维, 焦子伟, 任艳利, 杨允菲, 李建东. 新疆野核桃自然保护区不同坡向野核桃种群生命表与波动周期[J]. 西北植物学报, 2015, 35(6): 1229-1237.
- Zhang W, Jiao ZW, Ren YL, Yang YF, Li JD. Life tables and fluctuation cycle of *Juglans cathayensis* populations on different slope aspects in Wild Walnut Natural Conservation Area of Xinjiang, China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(6): 1229-1237.
- [14] 丁巧玲, 刘忠成, 王蕾, 蔡松辰, 石祥刚, 曾茂生, 廖文波. 湖南桃源洞国家级自然保护区南方铁杉种群结构与生存分析[J]. 西北植物学报, 2016, 36(6): 1233-1244.
- Ding QL, Liu ZC, Wang L, Cai SC, Shi XG, Zeng MS, Liao WB. Structure and survival analysis of *Tsuga chinensis* populations in Taoyuandong National Nature Reserve, Hunan Province [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(6): 1233-1244.
- [15] 刘丹, 刘士玲, 郭忠玲, 崔晓阳, 范春楠. 水冬瓜赤杨种群生命表与时间序列分析[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39 (10): 62-69.
- Liu D, Liu SL, Guo ZL, Cui XY, Fan CN. Population life table and time sequence prediction of *Alnus sibirica* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(10): 62-69.
- [16] 周玉泉, 苏群, 张颖, 李树发, 唐开学, 蹇洪英. 极危植物中甸刺玫的分布及种群数量动态[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(4): 649-654.
- Zhou YQ, Su Q, Zhang H, Li SF, Tang KX, Jian HY. Distribution and population quantitative dynamics of critically risked *Rosa praelucens* Byhouwer[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(4): 649-654.

- [17] 刘海燕, 杨乃坤, 李媛媛, 洪江, 邹天才. 稀有濒危植物长柱红山茶种群特征及数量动态研究[J]. 植物科学学报, 2016, 34(1): 89-98.
- Liu HY, Yang NK, Li YY, Hong J, Zou TC. Population structure and dynamic analysis of the rare and endangered plant *Camellia longistyla*[J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(1): 89-98.
- [18] 金慧, 赵莹, 尹航, 秦立武, 刘丽杰, 王超, 贾翔, 李冰岩. 长白山濒危植物牛皮杜鹃种群数量特征与动态分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3123-3130.
- Jin H, Zhao Y, Yin H, Qin LW, Liu LJ, Wang C, Jia X, Li BY. Quantitative characteristics and dynamic analysis of the endangered species *Rhododendron chrysanthum* population in Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(11): 3123-3130.
- [19] 张亚芳, 李登武, 王梅, 刘盼. 黄土高原不同地区杜松种群结构与动态[J]. 林业科学, 2015, 51(2): 1-10.
- Zhang YF, Li DW, Wang M, Liu P. Population structure and dynamics of *Juniperus rigida* in different regions of loess plateau[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(2): 1-10.
- [20] 李倩中, 刘晓宏, 苏家乐. 我国槭树科植物研究进展[J]. 江苏农业科学, 2008(6): 184-186.
- Li QZ, Liu XH, Su JL. Study progress of Aceraceae plants in China[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2008 (6): 184-186.
- [21] 李奎, 郑宝强, 王雁, 卜文圣. 滇牡丹自然种群数量动态[J]. 植物生态学报, 2012, 36(6): 522-529.
- Li K, Zheng BQ, Wang Y, Bu WS. Numeric dynamics of natural populations of *Paeonia delavayi* (Paeoniaceae)[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36 (6): 522-529.
- [22] 李鸿杰, 崔卫, 吕志鹏. 珍稀树种庙台槭的扦插繁殖及观赏特性研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(1): 78-81.
- Li HJ, Cui W, Lü ZP. Cutting propagation and ornamental features of rare species *Acer miaotaiense*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(1): 78-81.
- [23] 李英杰, 延军平, 刘永林. 秦岭南北气候干湿变化与降水非均匀性的关系[J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 619-627.
- Li YJ, Yan JP, Liu YL. Relationship between dryness/wetness and precipitation heterogeneity in the north and south of the Qinling Mountains[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(3): 619-627.

(责任编辑: 张平)