



文章编号: 1000-4025(2018)12-2303-11

doi: 10.7606/j. issn. 1000-4025. 2018. 12. 2303

冀北山地不同海拔天然山杏种群的结构与动态

程子敏, 王南, 穆枫, 徐学华*, 李晓刚, 李玉灵

(河北农业大学 林学院, 河北保定 071000)

摘要:为了阐明冀北山地天然山杏种群的现存状态、预测种群未来的发展趋势,该研究在冀北山地不同海拔分别设置样地进行调查,以径级结构代替年龄结构,采用匀滑技术编制不同海拔天然山杏种群静态生命表,并应用谱分析方法分析不同海拔山杏种群的波动周期,进而揭示海拔因素对天然山杏种群数量动态的影响以及种群更新和维持机制,为山杏种群的保护和管理提供科学依据。结果表明:(1)不同海拔山杏种群的基径随海拔的升高逐渐变小,海拔 872 m(H1)为 15 个径级,最大径级为 12.47 cm,海拔 1 131 m(H2)为 17 个径级,对应最大径级为 14.10 cm,海拔 1 328 m(H3)山杏种群为 11 个径级,对应最大径级为 8.76 cm;不同海拔山杏种群数量随海拔上升呈减少的趋势,依次为:H1(2 158 株)>H2(1 262 株)>H3(133 株)。(2)不同海拔天然山杏种群结构动态均属于增长型, V'_{pi} 均大于 0,表现出 H2(57.51%、3.38%)>H1(47.42%、3.16%)>H3(27.57%、2.51%) 的变化动态。(3)不同海拔梯度同一径级以及同一海拔梯度不同径级山杏种群的期望寿命均存在波动,3 个海拔山杏种群存活曲线均趋于 Deevey-II 型,各径级阶段死亡率变化不明显,趋于稳定。(4)海拔 H1、H2 和 H3 样地的山杏种群死亡率分别出现 7 次、6 次和 3 次死亡高峰,表明随海拔的增高山杏种群经历死亡波动的次数在逐渐减小。(5)种群动态谱分析表明,不同海拔天然山杏种群除受基波的影响外,还存在着明显的小周期波动,海拔 H1、H2、H3 样地的山杏种群谐波分别在 A_2 和 A_8 、 A_7 、 A_5 处出现波动。研究认为,冀北山地天然山杏种群自然更新良好,若无强烈的人为干扰或严重的自然灾害,将在群落中长期保持优势种地位。

关键词:冀北山地;天然山杏种群;海拔;静态生命表;存活曲线;谱分析

中图分类号: Q948.15⁺7 **文献标志码:** A

Structure and Dynamic of Natural *Armeniaca sibirica* Populations at Different Altitudes in Mountain Areas of Northern Hebei

CHENG Zimin, WANG Nan, MU Feng, XU Xuehua*, LI Xiaogang, LI Yuling

(School of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: In order to explicate the current state of natural *Armeniaca sibirica* population and predict the population dynamics in the future, were investigated three populations along altitude gradients in mountain areas of northern Hebei Province. According to the diameter at breast height (DBH) class of the tree, the age class structures of three *A. sibirica* populations were analyzed, static life tables were constructed by smoothing out technique, and comparative fluctuations cycles of the populations were carried out by spectral analysis. In addition, more analysis were performed to reveal the effects of altitude factors on population dynamics of natural *A. sibirica* and the mechanism of population renewal and maintenance. Further-

收稿日期: 2018-09-18; 修改稿收到日期: 2018-11-11

基金项目: 京津冀风沙源区沙化土地治理关键技术研究与示范基金(2016YFC0500802-07); 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室项目

作者简介: 程子敏(1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事退化生态系统恢复研究。E-mail: 614532635@qq.com

* 通信作者: 徐学华, 副教授, 主要从事森林生态系统结构与功能研究。E-mail: xuehuaxu2001@163.com

more, we provide the scientific basis for the protection and management of *A. sibirica* populations. The results showed as follows: (1) DBH decreased gradually with the increasing altitude. There were 15 age classes with the maximum DBH of 12.47 cm in the low-altitude habitat of 872 m (H1), 17 age classes with the maximum DBH of 14.10 cm in the middle-altitude habitat of 1131 m (H2), and 11 age classes with the maximum DBH of 8.76 cm in the high-altitude habitat of 1328 m (H3). The individuals of each population showed H1(2 158) > H2(1 262) > H3(133). (2) The population structure dynamics of *A. sibirica* at different altitudes all belonged to the increasing type. V'_{pi} of each population was greater than 0, with the dynamic change of H2(57.51%, 3.38%) > H1(47.42%, 3.16%) > H3(27.57%, 2.51%). (3) Life expectancies of *A. sibirica* populations were fluctuant for the same age class in different altitudes and for different age classes in the same altitude. In the three altitudes, the survival curves of the populations trended toward Deevey-II type, and the mortality rate of each diameter stage had little change and tended to be stable. (4) The mortality rate of *A. sibirica* population showed 7 (H1), 6 (H2) and 3 (H3) peaks along altitude gradients, indicating that the number of death fluctuations in the life cycle of the *A. sibirica* population decreased gradually with the increase of altitude. (5) Population dynamic spectrum analysis showed that, there were obvious small periodic fluctuations in the population harmonics of *A. sibirica* as well as the effect of fundamental wave at different altitudes, the harmonics of *A. sibirica* population in H1, H2 and H3 altitude fluctuated at A2 and A8, A7, A5, respectively. The natural regeneration of its current populations is good. If not strong anthropogenic disturbances or severe natural disasters, *A. sibirica* would maintain the dominant position in the community.

Key words: mountains area of northern Hebei; *Armeniaca sibirica* populations; altitude; static life table; survival curve; spectrum analysis

植物种群结构与动态是种群生态学研究的重要内容^[1],树木生长对气候的响应是沿海拔梯度发生变化的,研究不同海拔种群的结构和动态不仅可以反映种群的生存现状,而且能够揭示植物与外界环境相互作用的结果,对植物资源的保护以及利用有着重要的意义^[2-3]。种群的径级结构不仅可以了解种群现在的结构动态,而且还可以分析种群过去的结构以及预测未来种群结构的动态变化,有助于揭示种子散布以及幼苗建立等特征在时间尺度上对植物种群动态变化的影响^[4]。数量动态指数、静态生命表、存活曲线和谱分析是研究种群结构与动态的重要方法。其中数量动态指数能够弥补植物种群结构动态评价中较为粗放的等级归类划分的缺陷^[5]。种群数量动态变化特征往往通过编制其生命表来予以定量化^[6],通过生命表的编制得出种群的死亡率、消失率等重要参数值,同时绘制其存活曲线,从而为种群数量统计和种群生态学研究提供更多的信息^[7]。谱分析是描述由不同的振幅和相应的谐波组成复杂的周期现象,种群天然更新的波动性和年龄更替过程的周期性可以通过种群不同龄级的株数分布波动来表现^[8]。近年来已有学者对不同地区^[9-10]、不同生境^[11-14,4]、不同干扰^[15-16]下的种群结构与动态进行过研究,但针对不同海拔种群结构与动态的研究相对较少。

山杏(*Armeniaca sibirica*)为蔷薇科植物,通常为落叶乔木或灌木,具有喜光、抗旱、抗低温、耐贫瘠、耐盐碱和根系发达的特点,是冀北山地春季开花植物和山地造林的重要树种,具有一定的生态、景观和观赏价值,以及明显的防风固沙和水土保持效益^[17]。其形成的天然山杏种群在该地区沿海拔梯度有较大面积的分布,但目前针对山杏的研究多集中在山杏的遗传变异^[18-21]、栽培、嫁接技术^[22]、光合、蒸腾速率^[23-24]和持水性能^[25-26]等方面。但该地区山杏种群的数量动态规律沿海拔梯度如何发生变化?以及山杏种群对冀北山地天然灌木群落稳定性的维持机制尚不明确。因此本文以冀北山地3个海拔区域的天然山杏种群为研究对象,从种群的径级结构、静态生命表、存活曲线、死亡曲线以及谱分析等方面进行研究,旨在阐明不同海拔天然山杏种群的结构及数量动态特征,进而揭示海拔对山杏种群数量动态的影响以及山杏种群对群落稳定性的维持机制,以期为该地区天然山杏种群及群落的保护和管理提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省承德市丰宁县。地势由东南向西北呈阶梯状增高,海拔800~1 500 m。气候属

于中温带半湿润半干旱大陆性季风型高原山地气候，年均温 $0.9\sim6.2^{\circ}\text{C}$ ，年降水量 $350\sim550\text{ mm}$ 。土壤以砂石土为主。植被类型主要有针叶林、针阔混交林、落叶阔叶林、灌丛和灌草丛等。典型乔木树种以油松(*Pinus tabuliformis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、华北落叶松(*Larix principis-ruprechtii*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)为主；灌木主要有山杏、绒毛绣线菊(*Spiraea velutina*)、木香薷(*Elsholtzia stauntoni*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)等；草本植物以细叶苔草(*Carex rigescens*)、细裂叶蒿(*Artemisia tanacetifolia*)、丛生隐子草(*Cleistogenes caespitosa*)、牛尾蒿(*Artemisia dubia*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)和披碱草(*Elymus dahuricus*)等为主。以天然山杏为优势种的灌木群落在该地区有较大面积的分布。

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查 在全面踏查的基础上,采用样地调查法于2017年7~8月对丰宁县山地进行实地调查,选取山杏种群相对集中、林分保持良好且无人为干扰的典型阳坡地段,沿海拔700 m~1 400 m设置3块50 m×50 m的标准样地,按海拔梯度划分为3个生境:872 m(H1)、1 131 m(H2)、1 328 m(H3)。不同海拔天然山杏种群的树高、胸径、密度和盖度等均具有较大的差异。采取相邻网格样方分割法将每个样地划分成25个10 m×10 m的样方,利用游标卡尺和钢卷尺对样方内所有山杏及其幼苗进行每木检尺,记录每株山杏的地径、树高以及幼苗的地径与苗高等,同时测定样地的海拔、坡度和植被盖度等。样地基本概况见表1。

1.2.2 种群径级结构的划分 由于受环境因素的影响,该地区天然山杏常呈簇状生长,因此,调查时以基株为单位进行统计,若一个树桩上有多个分株,则按径级最大的一株为准。本研究采用空间替代时间的方法,以种群立木径级结构代替年龄结构来分析种群动态的变化^[27-28]。根据山杏生物学特性与年轮的变化规律,以及梭梭(*Haloxylon ammodendron*)

dron)^[11]种群径级的划分方法进行山杏种群径级的划分,基径≤2 cm时,基径按每0.5 cm划分为一个等级,0 cm<Ⅰ≤0.5 cm,0.5 cm<Ⅱ≤1 cm,1 cm<Ⅲ≤1.5 cm,1.5 cm<Ⅳ≤2 cm;基径>2 cm时,基径按每1 cm划分为一个等级,2 cm<Ⅴ≤3 cm,3 cm<Ⅵ≤4 cm,4 cm<Ⅶ≤5 cm,...,13 cm<Ⅷ≤14 cm,14 cm<Ⅸ≤15 cm。H1、H2和H3海拔山杏种群分别划分为15、17和11个径级。

1.2.3 种群动态量化方法 采用陈晓德^[29]量化方法对种群动态进行定量描述,具体计算方法如下:

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

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

式中: V_n 为种群从 n 到 $n+1$ 级的个体数量变化, 取正、负、零时分别反映种群两相邻年龄级个体数量的增长、衰退和稳定的结构动态关系; V_{pi} 为整个种群结构的数量变化动态指数; S_n 、 S_{n+1} 分别为第 n 和 $n+1$ 级种群个体数; K 为种群大小级数量; 式(2)仅适用于不考虑未来外部环境干扰的种群结构动态的比较, 若要考虑外部干扰时, 则种群结构动态还与大小级数量(K)及各大小级个体数(S)两因素相关, 因此将式(2)修正为:

$$V'_{pi} = - \frac{\sum_{n=1}^{K-1} S_n V_n}{\min(S_1, S_2, S_3, \dots, S_K) K \sum_{n=1}^{K-1} S_n} \quad (2')$$

$$P_{\text{极大}} = \frac{1}{K^{\min}(S_1, S_2, S_3, \dots, S_K)} \quad (3)$$

1.2.4 种群静态生命表编制 以冀北山地不同海拔天然山杏种群各径级的株数为依据, 编制其静态生命表。生命表中: x 为径级; a_x 为 x 径级的个体数; 因本研究中各径级的个体数相差较大, 生命表中会出现死亡率为负值的情况, 因此, 采用匀滑技术^[30]对数据进行处理, 得出存活数 a_x^* , 存活量 $l_x = a_x^*/a_0 \times 1000$, 标准化存活数的对数为 $\ln l_x$, 死亡量 $d_x = l_x - l_{x+1}$, 死亡率 $q_x = d_x/l_x$, 区间寿命 L_x

表 1 冀北山地天然山杏样地基本概况

Table 1 Basic survey of the sample plots in mountain areas of northern Hebei Province

样地 sample plot	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/ $^{\circ}$	植被盖度 Vegetation coverage/%	经度/纬度 Latitude/Longitude
H1	872	27	75	116°28'05"/41°05'16"
H2	1 131	30	68	116°34'13"/41°33'07"
H3	1 328	36	43	116°33'52"/41°35'11"

$= (l_x + l_{x+1})/2$, 总寿命 $T_x = \sum l_x$, 期望寿命 $e_x = T_x/l_x$, 消失率 $K_x = \ln l_x - \ln l_{x+1}$ 。

1.2.5 谱分析方法 谱分析方法能够揭示种群数量的周期性波动, 山杏种群的天然更新过程可以通过不同径级株数分布的波动从而得以体现。谱分析是 Fourier 级数的展开, 复杂的周期现象可以由不同振幅和相对应的谐波组成, 因此, 写成正弦波形式^[31]:

$$N_t = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \theta_k) \quad (1)$$

式中: A_0 为周期变化的均值; $A_k (k = 1, 2, 3, \dots, P)$ 为各谐波的振幅, 标志各个周期的作用大小, 其值的差异, 反应了各周期作用大小的差别; θ_k 为各谐波的相角, ω_k 为各谐波的频率; N_t 为 t 时刻的种群大小, n 为时间系列总长度。

将山杏种群各年龄个体分布视为一个时间系列 t , 以 X_t 表示 t 年龄序列时的个体数; n 同样为时间序列总长度; $P = n/2$ 为谐波的总个体数为已知; T 为正弦波的基本周期, 即时间系列 t 的最长周期, 则可以用下式来估计 Fourier 分解中的各个参数, 即:

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \quad (2)$$

$$A_k^2 = a_k^2 + b_k^2 \quad (3)$$

$$\omega_k = 2\pi k/T \quad (4)$$

$$\theta_k = \arctg(a_k/b_k) \quad (5)$$

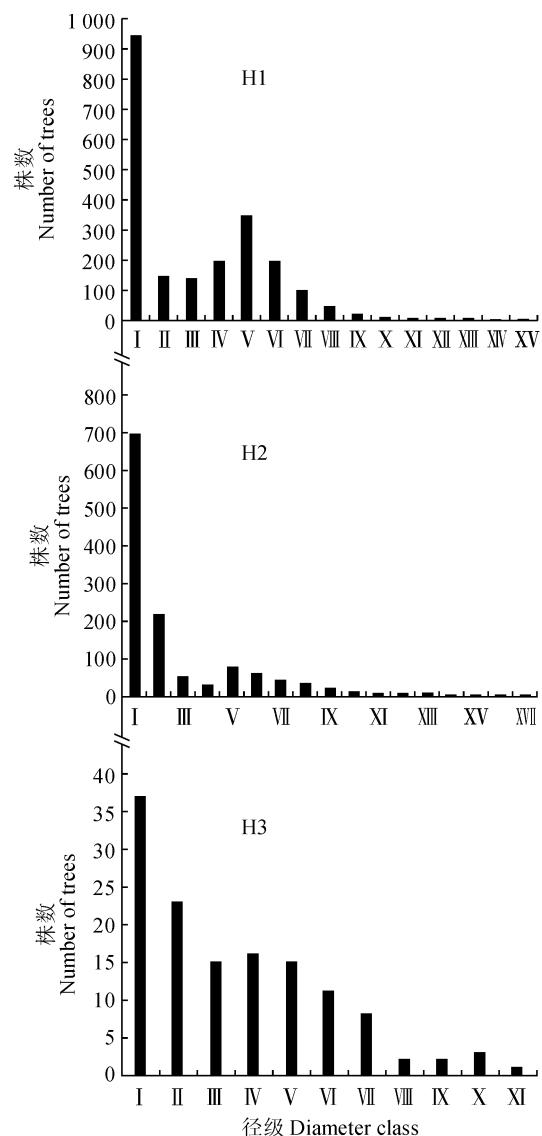
$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n X_t \cos \frac{2\pi k(t-1)}{n} \quad (6)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n X_t \sin \frac{2\pi k(t-1)}{n} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 不同海拔天然山杏种群的径级结构及动态

种群的径级结构可以代替年龄结构来反映种群的生存状况。冀北山地不同海拔天然山杏种群的径级结构见图 1。由图 1 可知, 各海拔山杏种群径级结构大致呈倒“J”型分布, 3 个海拔山杏种群发展均趋于稳定态势。H1(872 m)、H2(1 131 m)、H3(1 328 m) 山杏种群的 I 径级和 II 径级所占比例分别为 50.37%、72.19% 和 45.11%, 其后随径级的增大个体数呈下降的趋势。虽然不同海拔梯度各径级个体比率差异较大, 但总体上, H1、H2、H3 山杏种群径级结构相似, 个体数集中于小中径级, 表明 3 个海拔山杏种群均以幼年和青壮年植株为主, 种群有充足的中小个体作为储备资源, 为增长型的年龄结



H1、H2、H3 分别表示海拔高度为 872 m、1 131 m、1 328 m。径级划分标准为, 当基径 ≤ 2 cm 时, 基径按每 0.5 cm 划分为一个等级, $0 \text{ cm} < \text{I} \leq 0.5 \text{ cm}, 0.5 \text{ cm} < \text{II} \leq 1 \text{ cm}$, $1 \text{ cm} < \text{III} \leq 1.5 \text{ cm}, 1.5 \text{ cm} < \text{IV} \leq 2 \text{ cm}$; 基径 > 2 cm 时, 基径按每 1 cm 划分为一个等级, $2 \text{ cm} < \text{V} \leq 3 \text{ cm}, 3 \text{ cm} < \text{VI} \leq 4 \text{ cm}, 4 \text{ cm} < \text{VII} \leq 5 \text{ cm}, \dots, 13 \text{ cm} < \text{XVI} \leq 14 \text{ cm}, 14 \text{ cm} < \text{XVII} \leq 15 \text{ cm}$ 。下同。

图 1 冀北山地不同海拔天然山杏种群的径级结构 H1, H2 和 H3 show the altitude of 872 m, 1 131 m and 1 328 m, respectively. The diameter divided standard is, when the diameter ≤ 2 cm, diameters are divided into one grade per 0.5 cm, $0 \text{ cm} < \text{I} \leq 0.5 \text{ cm}, 0.5 \text{ cm} < \text{II} \leq 1 \text{ cm}, 1 \text{ cm} < \text{III} \leq 1.5 \text{ cm}, 1.5 \text{ cm} < \text{IV} \leq 2 \text{ cm}$; when the diameter > 2 cm, diameters are divided into one grade per 1 cm, $2 \text{ cm} < \text{V} \leq 3 \text{ cm}, 3 \text{ cm} < \text{VI} \leq 4 \text{ cm}, 4 \text{ cm} < \text{VII} \leq 5 \text{ cm}, \dots, 13 \text{ cm} < \text{XVI} \leq 14 \text{ cm}, 14 \text{ cm} < \text{XVII} \leq 15 \text{ cm}$. The same as blow Fig. 1 Diameter structure of natural *Armeniaca sibirica* populations at different altitudes in mountain areas of northern Hebei Province

构。H1、H2 和 H3 山杏种群各径级株数总和分别为 2158 株、1262 株和 133 株,株数总和随海拔的增高呈减少趋势,这与该地区特殊的地形起伏变化以及海拔升高温度降低和山杏自身的生物学特性、生态学习性有关。不同海拔天然山杏种群径级结构分布模式各不相同,H1 最大为 XV 径级,对应基径大小为 12.47 cm,H2 最大为 VIII 径级,对应基径大小为 14.10 cm,H3 海拔山杏种群有 11 个径级,对应最大的基径大小为 8.76 cm,表明海拔越高,天然山杏种群径级分布范围越小,种群密度也越小。但最大径级呈现出 $H2 > H1 > H3$ 的特征,可能与海拔变化所引起的种群密度的差异有关。

根据种群的动态量化方法,可对种群的动态特征进行更加客观精确地分析。各海拔天然山杏种群的结构动态关系表现出衰退与增长交替出现的现象,但种群年龄结构的数量变化动态 V_{pi} 、 V'_{pi} 均大

于 0,且呈现出 $H2(57.51\%、3.38\%) > H1(47.42\%、3.16\%) > H3(27.57\%、2.51\%)$ 的变化动态,说明各海拔山杏种群均为增长型种群,但增长速率不同。从随机干扰风险极大值即种群结构对随机干扰的敏感性指数可以看出(表 2),H1、H2 和 H3 种群分别为 0.067、0.059、0.091,均大于 0,表明各海拔天然山杏种群均对外界干扰较为明显,但由于 H3 山杏种群地处接坝、坝上交接地带,海拔较高,环境变化更为复杂,因此,该海拔山杏种群生长受外界干扰较 H1 和 H2 山杏种群更为明显。

2.2 不同海拔天然山杏种群的静态生命表

静态生命表是利用特定的时间段所调查的种群所有的个体编制而成的。根据表 3 可知,H1、H2 和 H3 海拔天然山杏种群的总寿命均呈现随径级的增大不断减小的趋势,显示逐步达到其生理寿命。不同海拔同一径级以及同一海拔不同径级山杏种群的

表 2 冀北山地不同海拔天然山杏种群径级结构的动态变化指数

Table 2 Dynamic change index of diameter class structure of natural *A. sibirica* population at different altitudes in mountain areas of northern Hebei Province

H1		H2		H3	
种群动态指数级 Dynamic index	动态指数值 Dynamic index value/%	种群动态指数级 Dynamic index	动态指数值 Dynamic index value/%	种群动态指数级 Dynamic index	动态指数值 Dynamic index value/%
V_1	84.48	V_1	69.30	V_1	37.84
V_2	4.79	V_2	77.10	V_2	34.78
V_3	-28.72	V_3	38.78	V_3	-6.25
V_4	-43.80	V_4	-61.04	V_4	6.25
V_5	43.80	V_5	22.08	V_5	26.67
V_6	49.74	V_6	28.33	V_6	27.27
V_7	54.08	V_7	23.26	V_7	75.00
V_8	55.56	V_8	39.39	V_8	0.00
V_9	55.00	V_9	35.00	V_9	-33.33
V_{10}	22.22	V_{10}	30.77	V_{10}	66.67
V_{11}	-12.50	V_{11}	33.33	V_{pi}	27.57
V_{12}	37.50	V_{12}	16.67	V'_{pi}	2.51
V_{13}	60.00	V_{13}	80.00	P	0.091
V_{14}	50.00	V_{14}	-50.00		
V_{pi}	47.42	V_{15}	0.00		
V'_{pi}	3.16	V_{16}	50.00		
P	0.067	V_{pi}	57.51		
		V'_{pi}	3.38		
		P	0.059		

注: V_{pi} :种群年龄结构的数量变化动态指数; V'_{pi} :考虑种群年龄级数量及种群年龄个体数因素的种群结构动态指数

Note: V_{pi} :Dynamic index of quantitative change in population age structure; V'_{pi} :Population structure dynamic index considering population age class number and individual number in each population age class

表3 冀北山地不同海拔天然山杏种群静态生命表
Table 3 Static life table of natural *A. sibirica* population at different altitudes
in mountain areas of northern Hebei Province

海拔 Altitude	X	a_x	a_x^*	l_x	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	$\ln a_x^*$	$\ln l_x$	k_x
H1	I	941	941	1000.00	693.94	0.69	653.03	1785.87	1.79	6.85	6.91	1.18
	II	146	288	306.06	44.63	0.15	283.74	1132.84	3.70	5.66	5.72	0.16
	III	139	246	261.42	44.63	0.17	239.11	849.10	3.25	5.51	5.57	0.19
	IV	195	204	216.79	44.63	0.21	194.47	609.99	2.81	5.32	5.38	0.23
	V	347	162	172.16	44.63	0.26	149.84	415.52	2.41	5.09	5.15	0.30
	VI	195	120	127.52	23.38	0.18	115.83	265.67	2.08	4.79	4.85	0.20
	VII	98	98	104.14	56.32	0.54	75.98	149.84	1.44	4.58	4.65	0.78
	VIII	45	45	47.82	26.57	0.56	34.54	73.86	1.54	3.81	3.87	0.81
	IX	20	20	21.25	12.75	0.60	14.88	39.32	1.85	3.00	3.06	0.92
	X	9	8	8.50	1.06	0.13	7.97	24.44	2.88	2.08	2.14	0.13
	XI	7	7	7.44	2.13	0.29	6.38	16.47	2.21	1.95	2.01	0.34
	XII	8	5	5.31	1.06	0.20	4.78	10.10	1.90	1.61	1.67	0.22
	XIII	5	4	4.25	2.13	0.50	3.19	5.31	1.25	1.39	1.45	0.69
	XIV	2	2	2.13	1.06	0.50	1.59	2.13	1.00	0.69	0.75	0.69
	XV	1	1	1.06	1.06	1.00	0.53	0.53	0.50	0.00	0.06	0.06
H2	I	697	697	1000.00	692.97	0.69	653.52	1314.92	1.31	6.55	6.91	1.18
	II	214	214	307.03	206.60	0.67	203.73	661.41	2.15	5.37	5.73	1.12
	III	49	70	100.43	12.91	0.13	93.97	457.68	4.56	4.25	4.61	0.14
	IV	30	61	87.52	12.91	0.15	81.06	363.70	4.16	4.11	4.47	0.16
	V	77	52	74.61	12.91	0.17	68.15	282.64	3.79	3.95	4.31	0.19
	VI	60	43	61.69	12.91	0.21	55.24	214.49	3.48	3.76	4.12	0.23
	VII	43	34	48.78	1.43	0.03	48.06	159.25	3.26	3.53	3.89	0.03
	VIII	33	33	47.35	18.65	0.39	38.02	111.19	2.35	3.50	3.86	0.50
	IX	20	20	28.69	10.04	0.35	23.67	73.17	2.55	3.00	3.36	0.43
	X	13	13	18.65	5.74	0.31	15.78	49.50	2.65	2.56	2.93	0.37
	XI	9	9	12.91	4.30	0.33	10.76	33.72	2.61	2.20	2.56	0.41
	XII	6	6	8.61	1.43	0.17	7.89	22.96	2.67	1.79	2.15	0.18
	XIII	5	5	7.17	2.87	0.40	5.74	15.06	2.10	1.61	1.97	0.51
	XIV	1	3	4.30	1.43	0.33	3.59	9.33	2.17	1.10	1.46	0.41
	XV	2	2	2.87	0.00	0.00	2.87	5.74	2.00	0.69	1.05	0.00
	XVI	2	2	2.87	1.43	0.50	2.15	2.87	1.00	0.69	1.05	0.69
	XVII	1	1	1.43	1.43	1.00	0.72	0.72	0.50	0.00	0.36	0.36
H3	I	37	37	1000.00	459.46	0.46	770.27	3067.57	3.07	3.61	6.91	0.62
	II	23	20	540.54	54.05	0.10	513.51	2297.30	4.25	3.00	6.29	0.11
	III	15	18	486.49	54.05	0.11	459.46	1783.78	3.67	2.89	6.19	0.12
	IV	16	16	432.43	54.05	0.13	405.41	1324.32	3.06	2.77	6.07	0.13
	V	15	14	378.38	54.05	0.14	351.35	918.92	2.43	2.64	5.94	0.15
	VI	11	12	324.32	189.19	0.58	229.73	567.57	1.75	2.48	5.78	0.88
	VII	8	5	135.14	27.03	0.20	121.62	337.84	2.50	1.61	4.91	0.22
	VIII	2	4	108.11	27.03	0.25	94.59	216.22	2.00	1.39	4.68	0.29
	IX	2	3	81.08	27.03	0.33	67.57	121.62	1.50	1.10	4.40	0.41
	X	3	2	54.05	27.03	0.50	40.54	54.05	1.00	0.69	3.99	0.69
	XI	1	1	27.03	27.03	1.00	13.51	13.51	0.50	0.00	3.30	3.30

期望寿命均存在波动。不同海拔天然山杏种群Ⅰ径级期望寿命均小于Ⅱ和Ⅲ径级,表明山杏种群在Ⅰ径级受到环境筛选的影响较大,到Ⅱ和Ⅲ径级种群个体适应性逐渐增强。随着山杏种群个体的生长,种群种内和种间竞争增加,期望寿命开始降低。但H1、H2和H3海拔山杏种群分别在Ⅹ径级、Ⅺ径级和Ⅷ径级期望寿命再次出现峰值,分别为2.88、2.67和2.50,说明山杏种群在经过中期激烈的种内种间竞争之后生存能力逐渐增强。此后,由于种群个体生理衰老等因素的影响,各海拔山杏种群期望寿命随径级的增加呈现下降的趋势,显示种群逐步到达生理寿命。

2.3 不同海拔天然山杏种群的存活曲线

存活曲线能够更为直观地表达种群个体在各径级的存活过程^[32]。根据生命表所示数据,以径级为横坐标,标准存活量的对数 $\ln l_x$ 为纵坐标绘制存活曲线。结合图2,采用2种数学模型:指数方程 $N_x = N_0 e^{-bx}$ 和幂函数 $N_x = N_0 x^{-b}$ 对Deevey-II型和Deevey-III型进行检验,运用SPSS统计软件建立相应的模型,通过对比F检验值和相关系数R²值得出,3个海拔山杏种群的指数模型R²以及F值均大于幂函数模型的相应值(表4),因此认为,3个海拔

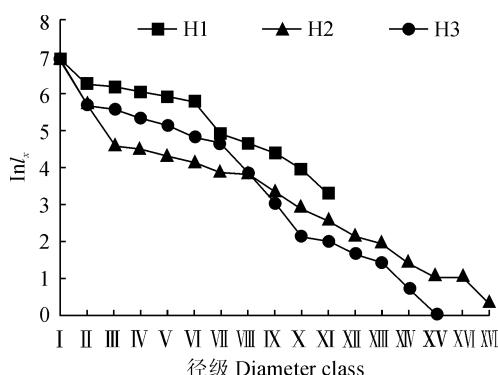


图2 冀北山地不同海拔天然山杏种群的存活曲线

Fig. 2 Survival curves of natural *A. sibirica* population at different altitudes in mountain areas of northern Hebei Province

天然山杏种群存活曲线均趋于Deevey-II型,说明山杏种群在各自生命过程中死亡率大致均衡,种群趋于相对稳定的状态。

2.4 不同海拔天然山杏种群的死亡率和消失率曲线

以不同海拔天然山杏种群的各径级为横坐标,静态生命表中死亡率(q_x)和消失率(K_x)的值为纵坐标,绘制不同海拔天然山杏种群的死亡率及消失率曲线(图3)。由图3看出,随径级的增大不同海拔天然山杏种群的死亡率和消失率曲线呈波动型变化趋势且基本保持一致。H1、H2和H3海拔山杏种群在Ⅰ径级存在资源竞争和环境筛选,种群个体大量死亡,表现出较高的死亡率。随着种群个体的生长,对环境的适应能力增强,出现了相对稳定的时期。H1、H2和H3海拔山杏种群死亡率分别在Ⅸ径级、Ⅷ径级和Ⅵ径级出现二次峰值,且呈现出 $H1(0.60) > H3(0.58) > H2(0.39)$ 的趋势,表明H1和H3海拔山杏种群中期种内种间竞争较为激烈。后期由于生理衰老等因素的影响,造成了各海拔山杏种群死亡高峰期的出现。从整体上看,除Ⅰ径级外,3个海拔梯度天然山杏种群死亡率波动峰值处于不同径级。

2.5 不同海拔天然山杏种群的谱分析

不同海拔山杏种群的天然更新动态是通过不同径级的株数分布波动表现的,为了计算方便,本研究采用生命表的径级划分作为波谱分析的极差,由于H1、H2和H3山杏种群分别分为15、17、11个径级,所以采用内插法分别补充为16级、18级和12级,因此各海拔总波序($K=n/2$)分别为8、9、6。由于各径级的个体数存在一定的差异,因而先对数据进行处理,以 $X_t' = \ln(a_x + 1)$ 来代替公式中的 X_t 。利用波谱分析计算公式计算各个波形的振幅 A_K 值($K=1, 2, 3, \dots, P$)(表5)。 A_1 为基波, $A_2 \sim A_8, A_2 \sim A_9, A_2 \sim A_6$ 为不同海拔各个谐波,且每个谐波的周期为基本周期的 $1/2, 1/3, \dots, 1/P$)。

表4 不同海拔天然山杏种群存活曲线的拟合方程

Table 4 Survival curve fitting equation of natural *A. sibirica* population at different altitudes

海拔 Altitude	$N_x = N_0 e^{-bx}$	$N_x = N_0 x^{-b}$	类型 Type
H1	$N_x = 14.381e^{-0.220x}$ $R^2 = 0.666 \quad F = 25.921$	$N_x = 15.556x^{-1.024}$ $R^2 = 0.439 \quad F = 10.185$	Deevey-II
H2	$N_x = 9.069e^{-0.138x}$ $R^2 = 0.853 \quad F = 87.309$	$N_x = 11.614x^{-0.754}$ $R^2 = 0.636 \quad F = 26.192$	Deevey-II
H3	$N_x = 7.718e^{-0.066x}$ $R^2 = 0.920 \quad F = 103.465$	$N_x = 7.864x^{-0.260}$ $R^2 = 0.724 \quad F = 23.667$	Deevey-II

表 5 冀北山地不同海拔天然山杏种群的周期性波动

Table 5 Periodic fluctuations of natural *Armeniaca sibirica* population at different altitudes
in mountain areas of northern Hebei Province

海拔 Altitude	谐波 Resonance spectra								
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
H1	2.161	0.577	0.947	0.796	0.431	0.344	0.141	0.273	
H2	1.755	0.970	0.874	0.594	0.420	0.277	0.360	0.198	0.082
H3	1.086	0.525	0.310	0.224	0.293	0.190			

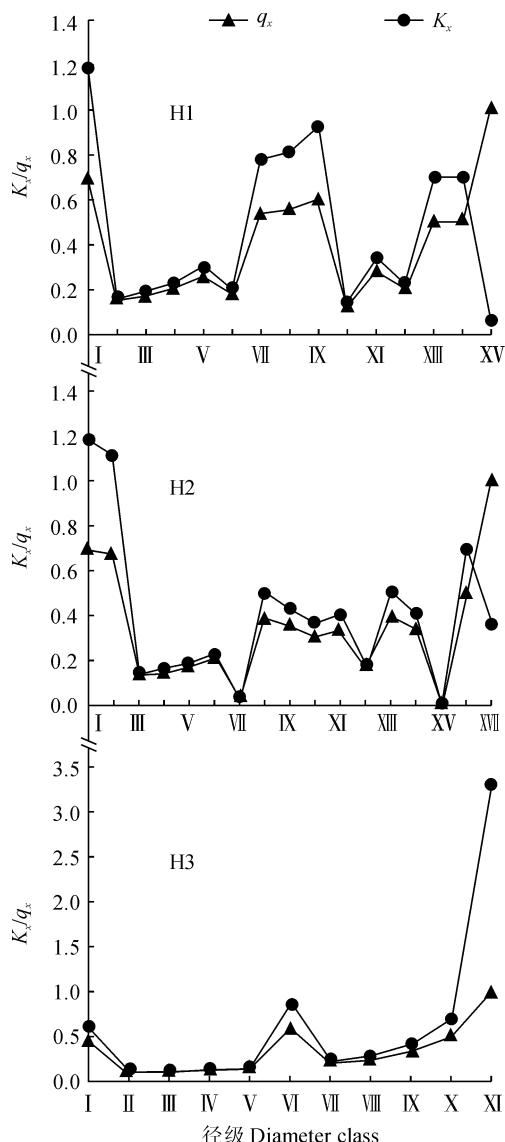


图 3 冀北山地不同海拔天然山杏种群的死亡率(q_x)和消失率(K_x)曲线

Fig. 3 Death rate and disappearance rate of natural *A. sibirica* populations at different altitudes
in mountain areas of northern Hebei Province

从表 5 看出, 不同海拔天然山杏种群天然更新波动明显, 各海拔天然山杏种群的基波 A_1 最大, 分别为 2.161、1.755 和 1.086, 呈现出随海拔的增高

不断减小的现象。基波表现了种群基本周期的波动状态, 其周期长度是种群本身所固有的, 由种群自身特性所决定的, 这表明不同海拔天然山杏种群的数量动态变化受其整个生命周期过程自身特有的生物学特性的控制趋向较为明显。但由于所调查 3 个山杏种群的径级结构分布差异较大, 因此无法对 3 个海拔的周期波动进行对比分析。但 3 个海拔天然山杏种群除受到基波的影响外, 还表现出明显的小周期波动, H1 海拔山杏种群分别在 A_2 和 A_8 出现波动, H2 和 H3 海拔山杏种群分别在 A_7 和 A_5 处出现波动, 但小周期的波动并不明显, 说明各海拔山杏种群的发展过程较为平稳。

3 讨论

3.1 不同海拔天然山杏种群结构及生存现状

植物种群数量动态不仅反映不同个体的组配情况, 同时也反映了种群的结构、发展趋势以及与环境之间的相互关系, 是揭示种群结构现状和更新策略的重要途径之一。经过对 3 个海拔天然山杏径级结构的对比分析, 显示 3 个海拔山杏种群的整体数量呈现出 $H1 > H2 > H3$ 的数量动态特征, 且径级分布表现出一定的差异性, 主要是由于海拔升高, 致使山杏种群对周围气候变化更加敏感, 所承受的非生物环境压力增大, 低温大风、土壤贫瘠以及生长期缩短等限制因子增多, 因此天然山杏种群数量随海拔增高不断减少, 同时说明山杏种群在海拔梯度上的径级分布与种群发育历史、物种特性以及环境因素有关^[33]。

种群若缺乏可更新的幼龄个体将导致种群趋于衰退^[34]。从天然山杏种群的幼苗更新数量来看, 天然山杏的幼苗萌发更新能力极强, 种群密度相对较大且具有一定的幼苗储备, 种群表现出一定的更新发展潜力。但由于 H3 海拔天然山杏种群地处丰宁接坝和坝上交接地带, 温度骤降, 环境变化较为复杂, 植被类型开始由灌丛向草原植被转变。虽无人

为干扰,但幼苗难以承受低温和适应复杂多变的生存环境,成活率较低,且缺乏大径级植株,种群虽暂时处于稳定的状态,但未来的增长潜力较为不足。结合不同海拔天然山杏种群数量动态规律以及样地实地调查,表明海拔的高低是影响山杏生长与数量动态的重要因素。此外,本研究采用径级划分和种群结构动态指数两种方式来综合分析不同海拔山杏种群的结构,比仅用单一的年龄结构分析可能更为准确。

3.2 不同海拔天然山杏种群动态趋势

植物种群的发展是一个漫长而复杂的过程,不仅涉及到种内和种间的竞争,同样涉及到物种和无机环境之间的适应过程。静态生命表分析结果显示,3个海拔天然山杏种群I径级期望寿命值较低,死亡率较高,这可能是由于幼苗存活能力较低,在营养竞争和环境筛选的过程中,部分幼苗被淘汰。此后成为II径级以上的植株,山杏种群呈现相对稳定的发展态势,但随着植株个体以及树冠的增大,生存需要的光照、水分、养分和空间已不能满足植株个体的需求,种间竞争强烈,种群内的自疏和它疏作用增强,死亡率开始增加,期望寿命开始下降。随着种群个体的生长,存活植株开始进入自身数量调节后的稳定生活期,生存空间和养分、水分等相对充足。此后随着山杏种群逐渐步入衰老期,期望寿命值降到最低,死亡率达到峰值。

研究表明,3个海拔天然山杏的存活曲线呈Deevey-II稳定性,这与新疆西天山峡谷不同海拔梯度上野核桃种群^[4]以及河西走廊荒漠绿洲过渡区沙拐枣^[35]的存活曲线研究结果相一致,原因可能与山杏种群经受的环境阻力和种内种间竞争有关,但存在交叉现象。H1、H2和H3海拔山杏种群在各自的生活史上分别出现7次、6次和3次死亡高峰,这可能与海拔升高生境变化引起山杏自身的生物学或生

态学习性变化等有关,但有待于进一步研究,这对阐述山地植物在不同海拔梯度上的种群数量动态有重要的意义。

3.3 不同海拔天然山杏种群谱分析

山杏种群个体的增长和生活空间的不断扩展使得种群各径级植株的组配情况在不断发生变化,此后种群自身所创造的环境条件又反过来调节和控制种群的植株数量,产生波动的过程,这是稳定植物群落中优势种群的特征^[36]。不同海拔天然山杏种群的谱分析结果显示,天然山杏种群数量动态是存在周期性波动的,而且所表现出来的波动并非单一周期,具有大周期内有小周期的谐波迭加特征,这与多数学者利用谱分析对种群数量动态的研究结果相一致^[37-39]。研究发现,不同海拔山杏种群的基波随海拔的增高呈减小的趋势,这可能是与各海拔山杏种群的密度相关。由于所研究不同海拔天然山杏种群年龄不够大,其时间系列长度不足以表现出其基本周期和固定的周期长度,但其存在性是肯定的。在长白山臭冷杉^[40](*Abies nephrolepis*)种群研究中也有过类似的报道。除此之外,H1山杏种群分别在A₂和A₈处存在小周期波动,H2和H3山杏种群则分别在A₇、A₅处出现小周期波动。A₂对应阶段,山杏种群幼苗经过高强度的环境筛选,在较高死亡率的基础上,一部分个体进入中龄阶段,种群密度开始下降,种群发展趋于稳定。A₈、A₇和A₅处周期的波动与种群自身的生物学特性有关,经过一定的生长过程,此径级的山杏种群数量出现小波动现象。但由于各海拔山杏种群小周期的波动并不明显,表明山杏种群的发展过程较为平稳,仍能保持相对的稳定性。揭示冀北山地不同海拔天然山杏种群结构的动态变化规律及其天然更新过程的周期性,对该地区天然山杏种群和群落的保护和管理具有指导意义。

参考文献:

- [1] 卢杰,郭其强,郑维列,等.藏东南高山松种群结构及动态特征[J].林业科学,2013,49(8):154-160.
LU J, GUO Q Q, ZHENG W L, et al. Population structure and dynamic characteristics of *Pinus densata* in southeast Tibet [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(8): 154-160.
- [2] 罗亚皇.滇西北玉龙雪山海拔梯度森林群落构建和转换机制研究[D].昆明:中国科学院昆明植物研究所,2016.
- [3] REES M, CONDIT R, CRAWLEY M. Long-term studies of vegetation dynamics [J]. *Science*, 2001, 293 (5 530): 650-655.
- [4] 张维,焦子伟,尚天翠,等.新疆西天山峡谷海拔梯度上野核桃种群统计与谱分析[J].应用生态学报,2015,26(4):1 091-1 098.
ZHANG W, JIAO Z W, SHANG T C, et al. Demography and spectrum analysis of *Juglans cathayensis* populations at different altitudes in the west tianshan valley in Xinjiang, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, Apr. 2015, 26(4): 1 091-1 098.
- [5] 周资行,李毅,焦健.兰州市南北两山不同生境红砂种群数量动态研究[J].自然资源学报,2011,26(10):1 726-1 737.
ZHOU Z X, LI Y, JIAO J. Quantity dynamics of *Reaumuria soongorica* populations from different habitats in the south-north hills in Lanzhou [J]. *Journal of Natural Resources*,

- 2011, **26**(10): 1 726-1 737.
- [6] 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.
- [7] HARCOMBE P A. Tree life tables[J]. *Bioscience*, 1987, **37**(8): 557-567.
- [8] 张志鹏, 刘鹏, 蔡妙珍, 等. 九龙山珍稀濒危植物南方铁杉种群数量动态[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(5): 1 146-1 156.
ZHANG Z P, LIU P, CAI M Z, et al. Population quantitative characteristics and dynamics of rare and endangered *Tsuga tchekiangensis* in Jiulongshan Nature Reserve of China[J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, **32**(5): 1 146-1 156.
- [9] 张明月, 刘楠楠, 刘佳, 等. 湖南大围山和八面山香果树种群的年龄结构和演替动态比较[J]. 西北植物学报, 2017, **37**(8): 1 603-1 615.
ZHANG M Y, LIU N N, LIU J, et al. Age structure and succession dynamic comparison of *Emmenopteris henryi* populations in Dawei Mountain and Bamian Mountain, Hunan Province[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2017, **37**(8): 1 603-1 615.
- [10] 张亚芳, 李登武, 王梅, 等. 黄土高原不同地区杜松种群结构和动态[J]. 林业科学, 2015, **51**(2): 1-10.
ZHANG Y F, LI D W, WANG M, et al. Population structure and dynamics of *Juniperus rigida* in different regions of Loess Plateau[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(2): 1-10.
- [11] 曾嘉庆, 祝佳杏, 王微, 等. 重庆喀斯特地区不同干扰生境中山麻杆种群的结构与格局[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(9): 2 313-2 320.
ZENG J Q, ZHU J X, WANG W, et al. Population structure and spatial pattern of *Alchornea davidii* in different disturbed Karst habitats in Chongqing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(9): 2 313-2 320.
- [12] 王立龙, 王亮, 张丽芳, 等. 不同生境下濒危植物裸果木种群结构及动态研究[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(10): 980-989.
WANG L L, WANG L, ZHANG L F, et al. Structure and dynamic characteristics of *Gymnocarpos Prezewalskii* in different habitats[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(10): 980-989.
- [13] 宋于洋, 刘长青, 赵自玉. 石河子地区不同生境梭梭种群数量动态分析[J]. 西北植物学报, 2008, **34**(1): 2 118-2 124.
SONG Y Y, LIU C Q, ZHAO Z Y. Quantity dynamics of *Haloxylon ammodendron* population in different habitats in Shihezi region[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2008, **34**(1): 2 118-2 124.
- [14] 张文辉, 郭连金, 刘国彬. 黄土丘陵区不同生境沙棘种群数量动态分析[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(4): 641-647.
ZHANG W H, GUO L J, LIU G B. Quantity dynamics of *Hippophae rhamnoides* population in different habitats standing in hilly loess regions[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2005, **25**(4): 641-647.
- [15] 韩照祥, 张文辉, 李军乔, 等. 陕西不同地区栓皮栎种群年齡结构动态模型的研究[J]. 西北植物学报, 2004, **24**(2): 254-258.
HAN Z X, ZHANG W H, LI J Q, et al. Study on dynamics model of age structure of *Quercus variabilis* in different region in Shaanxi[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2004, **24**(2): 254-258.
- [16] 张文辉, 卢彦昌, 周建云, 等. 巴山北坡不同干扰条件小栓皮栎种群结构与动态[J]. 林业科学, 2008, **44**(7): 11-16.
ZHANG W H, LU Y C, ZHOU J Y, et al. Population structure and dynamics of *Quercus variabilis* in different habitats on northern slope of Bashan Mountain[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, **44**(7): 11-16.
- [17] 尹明宇, 姜仲茂, 朱绪春, 等. 内蒙古山杏种群表型变异[J]. 植物生态学报, 2016, **40**(10): 1 090-1 099.
YIN M Y, JIANG Z M, ZHU X C, et al. High-level phenotypic variations in populations of *Armeniaca sibirica* in Nei momgol, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, **40**(10): 1 090-1 099.
- [18] 包文泉, 乌云塔娜, 王淋. 内蒙古野生山杏优良单株核仁成分的遗传变异分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, **36**(4): 25-29.
BAO W Q, WU Y T N, WANG L. Genetic variation of fine Apricot individual's kernel composition characters in Inner Mongolia[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, **36**(4): 25-29.
- [19] 李明, 赵忠, 杨吉安, 等. 黄土高原不同县域山杏种质遗传多样性研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2011, **39**(2): 143-149.
LI M, ZHAO Z, YANG J A, et al. Genetic diversity analysis on germplasm of *Armeniaca sibirica* in different counties in loess plateau[J]. *Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2011, **39**(2): 143-149.
- [20] 万东梅, 吴月亮, 王明辉, 等. 山杏种质资源遗传多样性的SRAP分析[J]. 分子植物育种, 2015, **13**(11): 2 537-2 541.
WAN D M, WU Y L, WANG M H, et al. Genetic diversity of *Armeniaca sibirica* germplasm resources revealed by SRAP analysis[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2015, **13**(11): 2 537-2 541.
- [21] 包文泉, 乌云塔娜, 王淋, 等. 野山杏和栽培杏的遗传多样性和遗传结构分析[J]. 植物遗传资源学报, 2017, **18**(2): 201-209.
BAO W Q, WU Y T N, WANG L, et al. Genetic diversity and population structure of the wild apricot and cultivation apricot[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, **18**(2): 201-209.
- [22] 魏菊, 董胜君, 刘明国, 等. 山杏良种嫁接愈合过程中生理生化特性研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, **48**(3): 304-310.
WEI J, DONG S J, LIU M G, et al. Physiological and biochemical characteristics in grafted healing process of *Armeniaca sibirica* seed[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, **48**(3): 304-310.

- [23] 吴 芹, 张光灿, 裴 斌, 等. 不同土壤水分下山杏光合作用 CO₂ 响应过程及其模拟[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1 517-1 524.
- WU Q, ZHANG G C, PEI B, et al. CO₂ response process and its simulation of *Prunus sibirica* photosynthesis under different soil moisture condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(6): 1 517-1 524.
- [24] 郎 莹, 张光灿, 张征坤, 等. 不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及模拟[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4 499-4 808.
- LANG Y, ZHANG G C, ZHANG Z K, et al. Light respond of photosynthesis and its simulation in leaves of *Prunus sibirica* L. under different soil water conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4 499-4 808.
- [25] 李广德, 章岳涛, 翟明普, 等. 华北片麻岩石质山地山杏幼林集水保墒措施选择[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 71-77.
- LI G D, ZHANG Y T, ZHAI M P, et al. Study on selection of water-harvesting and moisture-conserving measures in young plantations of *Prunus sibirica* L. in Gneiss mountainous area of north China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(6): 71-77.
- [26] 杨 荣, 杨宏伟, 刘丽英, 等. 不同林分山杏灌木林枯落物持水性能研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2017, 45(2): 96-103.
- YANG R, YANG H W, LIU L Y, Water-holding capacity of litters in different *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forests [J]. *Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2017, 45(2): 96-103.
- [27] 张 婕, 上官铁梁, 段毅豪, 等. 灵空山辽东栎种群年龄结构与动态[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3 125-3 130.
- ZHANG J, SHANGLUAN T L, DUAN Y H, et al. Age structure and dynamics of *Quercus wutaishanica* population in Lingkong Mountain of Shanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11): 3 125-3 130.
- [28] HARPER J L. *Population Biology of Plants*[M]. London: Academic Press, 1977.
- [29] 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 X D. A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structural dynamics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2): 214-217.
- [30] 江 洪. 云杉种群生态学[D]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [31] 伍业钢, 韩进轩. 阔叶红松林红松种群动态的谱分析[J]. 生态学杂志, 1988, 7(1): 19-23.
- WU Y G, HAN J X. A spectral analysis of the population dynamics of korean pine in the mixed broad-leaved *Pinus koraiensis* forest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1988, 7(1): 19-23.
- [32] BLOCK J, TRETER U. The limiting factors at the upper and lower forest limits in the mountain-woodland steppe of Northwest Mongolia Joachim Block and Uwe Treter[C]// Kaenel Dobbertin, M., Braker O. U.. Proceedings of the international conference on tree rings and people. Davos, 2001: 22-26.
- [33] 任青山, 杨小林, 崔国发, 等. 西藏色季拉山林线冷杉种群结构与动态[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2 669-2 677.
- REN Q S, YANG X L, CUI G F, et al. Smith fir population structure and dynamics in the timberline ectone of the Sejila Mountain, Tibet, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2 669-2 677.
- [34] 杨立荣, 张治礼, 云 勇, 等. 濒危植物海南龙血树的种群结构与动态[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 1-14.
- YANG L R, ZHANG Z L, YUN Y, et al. The population structure and dynamics of *Dracaena cambodiana*, an endangered tree on Hainan Island[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 1-14.
- [35] 解婷婷, 苏培玺, 周紫娟, 等. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4 272-4 279.
- XIE T T, SU P X, ZHOU Z J, et al. structure and dynamic characteristics of *Calligonum mongolicum* population in the desert-oasis ecotone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4 272-4 279.
- [36] 张 维, 焦子伟, 任艳丽, 等. 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): 1 229-1 237.
- ZHANG W, JIAO Z W, REN Y L, et al. Life tables and fluctuation cycle of *Juglans cathayensis* population on different slope aspects in wild walnut natural conservation area of Xinjiang, China[J]. *Acta Bot. Boreal-Occident. Sin.*, 2015, 35(6): 1 229-1 237.
- [37] 向悟生, 王 斌, 丁 涛, 等. 喀斯特季节性雨林蚬木种群结构和数量动态[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 825-831.
- XIANG W S, WANG B, DING T, et al. Age structure and quantitative dynamics of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rain forest in south China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(4): 825-831.
- [38] 陈远征, 马祥庆, 冯丽贞, 等. 濒危植物沉水樟的种群生命表和谱分析[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4 266-4 272.
- CHEN Y Z, MA X Q, FENG L Z, et al. The population life table and periodic fluctuation of *Cinnamomum micranthum*, an endangered plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4 266-4 272.
- [39] 刘任涛, 毕润成, 闫桂琴. 山西稀有濒危植物山核桃种群动态与谱分析[J]. 武汉植物学研究, 2007, 25(3): 255-260.
- LIU R T, BI R C, YAN G Q. Population dynamics and spectral analysis of rare-endangered plant *Juglans mandshurica* in Shanxi Province[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2007, 25(3): 255-260.
- [40] 腾 穗, 张 青, 亢新刚, 等. 长白山臭冷杉种群结构与动态[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(3): 49-56.
- TENG Y, ZHANG Q, KANG X G, et al. Population structures and dynamics of *Abies nephrolepis* in Changbai Mountain[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, 37(3): 49-56.