应用生态学报 2019年5月 第30卷 第5期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, May 2019, **30**(5): 1563-1570 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201905.019

长白山区濒危植物朝鲜崖柏种群数量特征及动态

金 慧 赵 莹 刘丽杰 贾 翔 代玉红 秦立武 王 超 尹 航*
(长白山科学研究院, 长白山生物群落与生物多样性吉林省联合重点实验室, 吉林延边 133613)

摘 要 朝鲜崖柏为国家二级重点保护植物,是长白山区特有的濒危树种,具有重要的经济价值和观赏价值.在对朝鲜崖柏主要分布区野生资源进行调查基础上,首次利用个体基径和年龄数据建立不同群落朝鲜崖柏种群的龄级结构、静态生命表和生存函数,用动态指数和时间序列分析预测其种群发展趋势.结果表明: 朝鲜崖柏种群的龄级结构呈"∩"型,属衰退型;分布于暗针叶林下的朝鲜崖柏种群存活曲线趋向于Deevey-Ⅲ型,纯林群落种群趋向于Deevey-Ⅱ型;种群生存分析显示,暗针叶林下朝鲜崖柏种群的生存函数呈现不规则的波动状态,种群分布表现为早期锐减、中期稳定、后期衰退的动态特征,纯林群落中,种群分布表现为早期稳定、中期增长、后期缓慢衰退的特点;动态指数和时间序列分析显示,暗针叶林下朝鲜崖柏种群的衰退速度略高于纯林群落.综合分析表明,朝鲜崖柏种群具有一定的恢复能力,应适当采取人工抚育,促进其种群正常更新.

关键词 朝鲜崖柏; 濒危植物; 种群结构; 生存分析; 动态指数

Quantitative characteristics and population dynamics of the endangered plant *Thuja koraiensis* in Changbai Mountain, China.

JIN Hui, ZHAO Ying, LIU Li-jie, JIA Xiang, DAI Yu-hong, QIN Li-wu, WANG Chao, YIN Hang* (*Jilin Provincial Joint Key Laboratory of Changbai Mountain Biocoenosie an Biodiversity, Changbaishan Academy of Science, Yanbian* 133613, *Jilin, China*).

Abstract: *Thuja koraiensis*, a second-class nationally protected plant species, is a unique endangered tree species in Changbai Mountain, with important economic and ornamental value. In this study, the age structure, static life table, and survival function of *T. koraiensis* were established by using individual root diameter and age data based on investigation of wild resources in the main distribution areas of *T. koraiensis*. The population development trend was predicted by dynamic index and time series analysis. The results showed that the age-class structure of *T. koraiensis* population was in the shape of "∩", which was a decline type. The survival curve of *T. koraiensis* population under the dark coniferous forest was the Deevey-Ⅲ type, and was Deevey-Ⅱ type in pure forest community. Population survival analysis showed that the survival function of *T. koraiensis* appeared irregular fluctuation under the dark coniferous forest. The population distribution showed dynamic features of sharp drop in early age period, stable in middle age period, and decline in old age period. In the pure forest community, the dynamic pattern was characterized by the stability in early age period, growth in middle age period, and recession in old age period. Dynamic index and time series analysis showed that the decline rate of dark coniferous forest community was slightly higher than that of pure forest community. Our results showed that *T. koraiensis* had some recovery ability and that artificial tending should be used to promote its normal regeneration.

Key words: *Thuja koraiensis*; endangered species; population structure; survival analysis; dynamic index.

本文由吉林省科技发展计划项目(20180101017JC)资助 This work was supported by the Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (20180101017JC).
2018-12-27 Received, 2019-03-06 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fivecl10jinhui@163.com

植物种群的结构特征和种群动态是植物生态学研究的核心内容之一[1].种群动态是研究种群数量在时间和空间上的变动规律,种群年龄结构可以深入了解种群现在的结构状态,重建种群的干扰历史,分析种群过去的结构和预测未来种群结构的变化动态[2].种群生命表和存活曲线不仅反映种群目前的存活状态,还反映植物与环境之间的适合度.因此,采用种群结构分析和生命表方法揭示种群数量特征及变化规律,预测其演化趋势,对于珍稀濒危植物的保护、更新和生态恢复具有重要意义.

朝鲜崖柏(*Thuja koraiensis*)为柏科崖柏属常绿乔木,是长白山植物区系的特有树种,国家二级重点保护植物,主要分布于我国长白山及朝鲜半岛北部[3].朝鲜崖柏不仅具有较高的观赏价值,同时也是良好的药用植物和材用植物,具有较大的研究价值和保护价值.近年来,随着四川崖柏被市场的广泛认可,朝鲜崖柏的市场需求量也随之增加,这导致对野生朝鲜崖柏乱砍乱伐的现象日趋严重,野生种群数量锐减,物种濒临绝迹,2004 年被《中国物种红色名录》[4]定为濒危种 ENA2c.因此,加强朝鲜崖柏种群生态学研究,明晰其更新存活规律,促进对该种群的保护和恢复迫在眉睫.

朝鲜崖柏自然分布区异常狭窄,种群数量稀少.目前,对朝鲜崖柏的研究主要集中于对其器官的化学成分分析及苗木繁育技术等方面.杨智蕴等[5]、戚继忠等[6]对其枝叶精油化学成分进行分析,探讨了其资源开发潜力和价值;尹航等[7]、孟繁华[8]对其野生资源进行了详细调查,掌握了其野生资源分布及生长规律;尹航等[9-10]对其无性繁育技术进行了试验,为朝鲜崖柏的繁育提供了技术支撑.但朝鲜崖柏的种群繁衍规律、物种濒危机理等科学问题目前尚不清晰,其物种生态学方面的详细资料还很缺乏,仅尹航等[11]对朝鲜崖柏克隆种群可塑性及其对土壤条件的响应进行研究,关于朝鲜崖柏种群结构和动态的研究还未见报道,这极大限制了人们对朝鲜崖柏种群生命过程的认知和种群保护策略的制定.鉴于此,本研究以朝鲜崖柏天然种群为对象,通过样地调查和对比分析,阐明了朝鲜崖柏天然种群年龄结构特征,分析其生存现状,利用种群数量变化动态指数及生存分析,预测其种群未来发展趋势,以期为朝鲜崖柏天然种群保护和恢复提出合理的适应性策略,为揭示朝鲜崖柏物种濒危机制奠定理论基础.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处吉林长白山国家级自然保护区南坡(41°24′—41°47′ N,127°55′—128°11′ E).朝鲜崖柏主要分布于海拔 1400~2000 m.在土壤条件良好的地方,朝鲜崖柏零星分布于暗针叶林中,处于亚林层;在土壤脊薄而其他树种难以生长的地方,朝鲜崖柏可以成片生长并形成纯林,偶有岳桦(*Betula ermanii*)和花楷槭(*Acer ukurunduense*)等分布.

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查 根据朝鲜崖柏天然种群分布群落特点,2016 年 7 月,在长白山南坡海拔 1476~1850 m之间分别选取朝鲜崖柏纯林和有崖柏散生暗针叶林中开展种群结构调查(表 1).

在两个样点中设置 30 m×30 m 调查样方各 1 块.由于朝鲜崖柏属于典型的木本匍匐茎型克隆植物,基株判定困难.因此,实际调查时,以地上部分作为独立的植株个体,调查样地内朝鲜崖柏株数、高度、地径等形态特征指标,同时记载海拔、坡度、坡向、人为干扰等因子.

1.2.2 生长模型的确定 采取抽样调查方法,每个样地选择 15 株朝鲜崖柏植株,实测植株地径,并利用生长椎在离地面 50 cm 高度处钻取木芯(通过髓心),带回实验室经过打磨、抛光处理,在显微镜下判读年轮.建立朝鲜崖柏地径-年龄生长模型,然后根据相关系数(r)最大的原则进行检验,选择出诠释朝鲜崖柏年龄的最优模型.

表 1 调查样地描述
Table 1 Description of sampling plots

分布类型 Distribution type	样地 Sampling plot	海拔 Elevation (m)	经度 Longitude	纬度 Latitude	郁闭度 Crown density (%)	乔木层优势种 Dominant species
散生 Scattered forest	P1	1512	127°55′	41°44′	70	臭冷杉、花楸树、髭脉槭、青楷槭、色木槭、鱼鳞云杉、岳桦 *Abies nephrolepis*, *Sorbus pohuashanensis*, *Acer barbinerve*, *Acer tegmentosum*, *Acer mono*, *Picea jezoensis* var. *microsperma*, *Betula ermanii*
纯林 Pure forest	P2	1853	127°56′	41°45′	5	岳桦、花楸树 *Betula ermanii*, *Sorbus pohuashanensis*

根据调查得到的朝鲜崖柏种群资料，把种群按照 5 年一个龄级划分为 11 个龄级.如此一一对应，统计各龄级个体株数，并计算其所占比例，绘制朝鲜崖柏种群龄级结构图.

1.2.3 静态生命表和存活曲线　静态生命表和存活曲线是研究种群结构和动态特征的重要工具，能直观地展现种群在不同龄级的实际生存个数、死亡数量及其存活趋势[12-14].表中的相关指标统计方法参照文献[15-17].实际野外调查的数据会存在前一个龄级存活个体数量小于后一个龄级个体数量的情况，使得在编制生命表中会出现死亡率为负值，故采用方程拟合方法进行匀滑处理来掩盖种群数量波动的某些生态现象.

引入生存函数 $S(t)$、积累死亡率函数 $F(t)$、死亡密度函数 $f(t)$、危险率函数 $\lambda(t)$，辅助静态生命表对朝鲜崖柏种群动态和生存规律进行分析，具体方法参照文献[18-19].

1.2.4 种群年龄结构的数量变化动态　采用种群年龄结构数量变化动态指数的计算方法进行分析.计算相邻龄级间种群个体数量变化动态指数(V_n)、种群年龄结构的数量动态指数(V_{pi})、考虑到种群年龄级数量及种群龄级个体数因素的种群年龄结构动态指数(V_{pi}')、非完全随机干扰下的植物种群结构动态指数(V_{pi}'')，具体方法参照文献[20-21].

1.2.5 种群个体数量动态预测　在实地调查朝鲜崖柏种群存活数的基础上，利用时间序列分析，选用一次移动平均的计算方法对种群未来经历 1、3、5、7、9 个龄级后，各龄级种群数量和种群结构动态进行预测.计算公式见文献[19-22].

2　结果与分析

2.1　朝鲜崖柏地径-年龄关系

为探究朝鲜崖柏的林木生长规律、更好地保护朝鲜崖柏这一珍稀物种，采取抽样调查方法，利用实测 15 株树木的年龄、地径数据，选用常见的树木生长模型进行拟合[23].由表 2 可以看出，在朝鲜崖柏种群集中分布的纯林群落内，地径-年龄间的 7 种回归模型均达到极显著水平.说明纯林群落内朝鲜崖柏地径与年龄的相关性较好.地径-年龄的相关曲线拟合结果中，幂函数曲线模型 $y=11.295x^{0.764}$ 的相关系数(r)最大，为 0.868，最符合朝鲜崖柏生长趋势，可以用来拟合纯林群落内朝鲜崖柏地径与年龄的关系.

朝鲜崖柏散生的群落内，地径-年龄间 7 种回归模型均达到极显著水平.地径-年龄的相关曲线拟合结果中，幂函数曲线模型 $y=10.848x^{0.818}$ 的 r 值最大，为 0.781，最符合朝鲜崖柏生长趋势，是拟合散生群落内朝鲜崖柏地径与年龄关系的最优模型(表 3).

2.2　朝鲜崖柏种群的龄级结构

龄级结构是种群的重要特征，以龄级作为横坐标，不同龄级所占的株数百分比作为纵坐标，绘制两个群落朝鲜崖柏种群的龄级结构图.由图 1 可以看出，不同群落朝鲜崖柏天然种群龄级结构均呈“∩”型，树龄总体偏小，分布在纯林群落的种群树龄比散生群落大.散生群落中，朝鲜崖柏种群Ⅲ龄级个体数量比重最大，占 22.7%，其次为Ⅳ和Ⅱ龄级，分别为 19.6%、17.4%，Ⅵ龄级以后个体数量逐渐减少，低于 5.0%，Ⅰ龄级个体占有一定比例，为 13.5%；纯林群落内，朝鲜崖柏种群表现为中低龄和幼龄比例小，Ⅰ~Ⅴ龄级个体数量所占比例逐渐增多并达到最大(28.8%)，此后随着龄级增加，各龄级株数逐渐减少.

2.3　种群年龄结构的动态变化

基于种群动态量化分析方法，对朝鲜崖柏种群相邻龄级间个体数量变化动态及各种群整体数量变化动态进行分析.由表 4 可以看出，不同群落朝鲜崖柏种群相邻各龄级间个体数量均有明显波动，且存在差异.散生群落内，种群各龄级增长性大小排序为 $V_2>V_1>V_9=0>V_3>V_6>V_4>V_8>V_{10}>V_7>V_5$，Ⅲ~Ⅷ龄级

表 2　朝鲜崖柏纯林群落地径与年龄的相关曲线拟合结果

Table 2　Fitting results of correlation curve between the root diameter and age of *Thuja koraiensis* in the pure community

模型类型 Model type	相关系数 Correlation coefficient (r)	参数 Parameter				F	P
		a	b	c	d		
线性回归 Linear regression	0.833	9.432	5.866			45.198	0.000
对数回归 Logarithm regression	0.833	1.308	25.177			45.219	0.000
二次曲线回归 Quadratic curve regression	0.837	2.932	8.961	−0.304		22.213	0.000
三次曲线回归 Cubic curve regression	0.844	−13.778	22.009	−3.135	0.183	14.819	0.000
幂函数曲线 Power function curve	0.868	11.295	0.764			60.984	0.000
指数曲线 Exponent curve	0.833	15.043	0.171			45.230	0.000
Logistic 生长曲线 Logistic growth curve	0.833	0.066	0.843			45.230	0.000

表 3 朝鲜崖柏散生群落地径与年龄的相关曲线拟合结果

Table 3 Fitting results of correlation curve between the root diameter and age of *Thuja koraiensis* in the scattered community

模型类型 Model type	相关系数 Correlation coefficient (r)	参数 Parameter				F	P
		a	b	c	d		
线性回归 Linear regression	0.760	5.274	7.260			19.194	0.001
对数回归 Logarithm regression	0.763	4.725	21.376			19.450	0.001
二次曲线回归 Quadratic curve regression	0.767	−3.325	13.219	−0.932		9.274	0.003
三次曲线回归 Cubic curve regression	0.779	41.830	−35.275	15.182	−1.669	6.179	0.009
幂函数曲线 Power function curve	0.781	10.848	0.818			21.949	0.000
指数曲线 Exponent curve	0.768	11.211	0.274			20.123	0.001
Logistic 生长曲线 Logistic growth curve	0.768	0.089	0.761			20.123	0.001

表 4 朝鲜崖柏种群年龄结构动态指数

Table 4 Dynamic index of age structure of *Thuja koraiensis* populations

分布类型 Distribution type	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{pi}	V_{pi}'	V_{pi}''
散生 Scattered forest	0.225	0.237	−0.140	−0.263	−0.678	−0.211	−0.533	−0.429	0.000	−0.500	−0.025	−0.001	−0.006
纯林 Pure forest	0.458	0.429	0.611	0.763	−0.211	−0.417	−0.429	0.000	−0.250	−0.533	−0.188	−0.003	−0.005

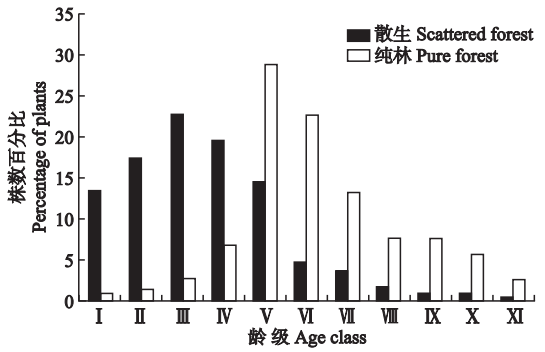


图 1 朝鲜崖柏天然种群的龄级结构

Fig.1 Age structure of natural *Thuja koraiensis* populations.

的动态指数为负值,说明该组龄级间个体数量呈衰退趋势,种群扩张受限.纯林群落内,种群各龄级增长性大小排序为 $V_4>V_3>V_1>V_2>V_8=0>V_5>V_9>V_6>V_7>V_{10}$,Ⅴ~Ⅹ龄级(除Ⅷ龄级)的动态指数为负值,朝鲜崖柏在此龄级段内种群扩张受限.种群年龄结构的数量变化动态指数 V_{pi}、V_{pi}'、V_{pi}''小于零,种群为衰退型.当考虑种群的外部干扰时,散生群落和纯林群落的种群年龄结构动态指数分别为 −0.006 和 −0.005,说明散生群落朝鲜崖柏种群衰退速度略高于纯林群落.

2.4 种群静态生命表与生存分析

由于野外调查存在系统抽样误差,死亡量、死亡率及消失率均有负值出现,Wratten 等[15]认为,静态生命表出现负值会与数据假设技术造成冲突,所以对朝鲜崖柏种群的调查数据采用方程拟合方法进行匀滑技术处理.将龄级作为自变量,存活数作为因变量,得到散生群落(式 1)和纯林群落(式 2)朝鲜崖柏种群拟合方程:

$$y=208.09x^{-1.508}\ (R^2=0.6402) \quad (1)$$

$$y=23630x^{-2.844}\ (R^2=0.6457) \quad (2)$$

经匀滑修正后得出朝鲜崖柏种群特定时间静态生命表(表 5).从致死力(K_x)和死亡率(q_x)来看,最高值出现在第Ⅰ龄级,幼苗在种间竞争中处于劣势地位,生长与竞争能力弱,难以通过强烈的环境筛选而死亡,出现幼龄个体不足现象,种群结构有向衰退型演变的趋势.

期望寿命(e_x)反映 x 龄级内植株个体的平均生存能力.散生群落种群在Ⅴ龄级达到高峰值,纯林群落种群在Ⅵ龄级达到高峰值,说明散生群落Ⅴ龄级前、纯林群落Ⅵ龄级前种群的生存质量较好,经过第Ⅰ龄级存活下来的种群个体对环境有了较强的适应能力,生理活动分别在Ⅴ龄级、Ⅵ龄级达到了旺盛期,种群在此龄级段具有较高的生命期望,随后由于种内竞争和个体衰老,使得 e_x 开始下降,直到Ⅺ龄级的生命期望值为 0.50.

2.5 朝鲜崖柏种群存活曲线

存活曲线反映朝鲜崖柏种群在各龄级的存活状况,以龄级为横轴,存活量的对数值 $\ln l_X$ 为纵轴,绘制出朝鲜崖柏种群的存活曲线(图 2).散生群落内幼龄个体数量较少,种群前期死亡量低,随着个体生长,种群密度增加,种内竞争加强,致使单位面积承载力增长缓慢,死亡率趋势平缓;纯林群落朝鲜崖柏

表 5　朝鲜崖柏种群静态生命表

Table 5　Static life table of *Thuja koraiensis* populations

分布类型 Distribution type	龄级 Age class	a_x	a_x^*	l_x	d_x	L_x	T_x	e_x	q_x	$\ln l_x$	K_x
散生	Ⅰ	55	208	1000	649	676	1513	1.52	0.65	6.91	1.05
Scattered	Ⅱ	71	73	352	161	271	837	2.38	0.46	5.86	0.61
forest	Ⅲ	93	40	191	67	157	566	2.97	0.35	5.25	0.43
	Ⅳ	80	26	124	35	106	408	3.30	0.29	4.82	0.34
	Ⅴ	59	18	88	21	78	302	3.42	0.24	4.48	0.28
	Ⅵ	19	14	67	14	60	225	3.35	0.21	4.21	0.23
	Ⅶ	15	11	53	10	48	164	3.09	0.18	3.97	0.20
	Ⅷ	7	9	43	7	40	116	2.67	0.16	3.77	0.18
	Ⅸ	4	8	36	5	34	76	2.09	0.15	3.60	0.16
	Ⅹ	4	6	31	4	29	42	1.37	0.13	3.44	0.14
	Ⅺ	2	6	27	–	13	13	0.50	–	3.29	–
纯林	Ⅰ	6	23630	1000	861	570	730	0.73	0.86	6.91	1.97
Pure	Ⅱ	11	3291	139	95	92	161	1.15	0.68	4.94	1.15
forest	Ⅲ	19	1039	44	25	32	69	1.57	0.56	3.78	0.82
	Ⅳ	50	458	19	9	15	37	1.92	0.47	2.97	0.64
	Ⅴ	210	243	10	4	8	22	2.18	0.41	2.33	0.52
	Ⅵ	166	145	6	2	5	14	2.31	0.36	1.81	0.44
	Ⅶ	97	93	4	1	3	9	2.31	0.32	1.37	0.38
	Ⅷ	55	64	3	1	2	6	2.15	0.29	0.99	0.34
	Ⅸ	55	46	2	1	2	3	1.81	0.26	0.66	0.30
	Ⅹ	42	34	1	0	1	2	1.26	0.24	0.36	0.27
	Ⅺ	19	26	1	–	1	1	0.50	–	0.09	–

a_x：在 x 龄级内现存个体数 Existing number of x age grade；a_x^*：a_x 修正值 Correction value of a_x；l_x：在 x 龄级开始时标准化存活个体数 Standardized number of surivors at the beginning of x age grade；d_x：从 x 到 x+1 龄级间隔期内标准化死亡数 Standardized number of mortality from x to x+1 age grade；L_x：从 x 到 x+1 龄级间隔期内存活的个体数 Number of survivors from x to x+1 age grade；T_x：≥x 龄级的个体总数 Individual number ≥x age grade；e_x：进入 x 龄级个体的生命期望或平均期望寿命 Life expectation of individual in x age grade；q_x：从 x 到 x+1 龄级间隔期内死亡率 Mortality from x to x+1 age grade；ln l_x：l_x 对数 Natural logarithm of l_x；K_x：消失率 Disappearance rate.

承受的环境压力大，在环境压迫下，出现大量的幼株死亡，前期受环境强烈筛选，存活下来的种群个体对环境有较强的适应能力，种群趋于稳定，种群衰退减缓.

依据 Deevey 的划分，在验证估算的存活状况与 Deevey Ⅱ型、Ⅲ型曲线的符合程度时，采用 2 种数学模型进行检验，即指数方程式 $N_x = N_0 e^{-bx}$ 描述 Deevey Ⅱ型存活曲线，幂函数式 $N_x = N_0 x^{-b}$ 描述 Deevey Ⅲ型存活曲线，式中，N_x、N_0 分别代表 x 龄级内存活数和种群形成初期的个体数，b 代表死亡率[18].

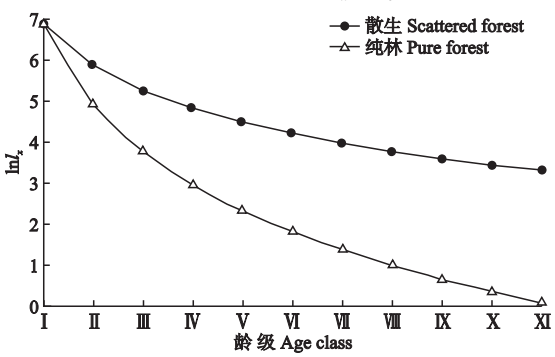


图 2　朝鲜崖柏种群存活曲线

Fig.2　Survival curve of *Thuja koraiensis* populations.

朝鲜崖柏存活曲线检验模型（表 6）显示，散生群落中指数模型的 R^2 值稍低于幂函数模型的 R^2 值，种群存活曲线更趋于 Deevey Ⅲ型，即早期死亡率高，而后死亡率逐渐降低趋于稳定.纯林群落中指数模型的 R^2 值高于幂函数模型的 R^2 值，种群存活曲线更趋于 Deevey Ⅱ型，即纯林群落中朝鲜崖柏种群有一个较为稳定的死亡率.

2.6　朝鲜崖柏种群生存函数

由表 7 可以看出，朝鲜崖柏种群的生存率函数 $S(t)$ 随龄级增加逐渐降低，积累死亡率 $F(t)$ 则与其

表 6　不同群落朝鲜崖柏种群存活曲线检验模型

Table 6　Test models of survival curves of *Thuja koraiensis* populations

分布类型 Distribution type	曲线方程 Curvilinear equation	R^2
散生	$y = 6.6466e^{-0.069x}$	0.9557
Scattered forest	$y = 7.2209x^{-0.313}$	0.9880
纯林	$y = 12.723e^{-0.366x}$	0.9093
Pure forest	$y = 14.363x^{-1.456}$	0.7267

表 7 朝鲜崖柏种群生存函数估算值

Table 7 Estimation of the survival function of *Thuja koraiensis* populations

分布类型 Distribution type	龄级 Age class	生存函数 Survival function $S(t)$	积累死亡率 Cumulative mortality $F(t)$	死亡密度函数 Death density function $f(t)$	危险率函数 Hazard rate function $\lambda(t)$
散生	Ⅰ	0.87	0.13	0.13	0.14
Scattered	Ⅱ	0.69	0.31	0.17	0.22
forest	Ⅲ	0.46	0.54	0.23	0.39
	Ⅳ	0.27	0.73	0.20	0.53
	Ⅴ	0.12	0.88	0.14	0.73
	Ⅵ	0.08	0.92	0.05	0.46
	Ⅶ	0.04	0.96	0.04	0.61
	Ⅷ	0.02	0.98	0.02	0.52
	Ⅸ	0.01	0.99	0.01	0.50
	Ⅹ	0.00	1.00	0.01	1.00
	Ⅺ	–	–	–	–
纯林	Ⅰ	0.99	0.01	0.01	0.01
Pure forest	Ⅱ	0.98	0.02	0.02	0.02
	Ⅲ	0.95	0.05	0.03	0.03
	Ⅳ	0.88	0.12	0.07	0.08
	Ⅴ	0.60	0.41	0.29	0.39
	Ⅵ	0.37	0.63	0.23	0.47
	Ⅶ	0.23	0.77	0.13	0.44
	Ⅷ	0.16	0.84	0.08	0.38
	Ⅸ	0.08	0.92	0.08	0.62
	Ⅹ	0.03	0.97	0.06	1.05
	Ⅺ	–	–	–	–

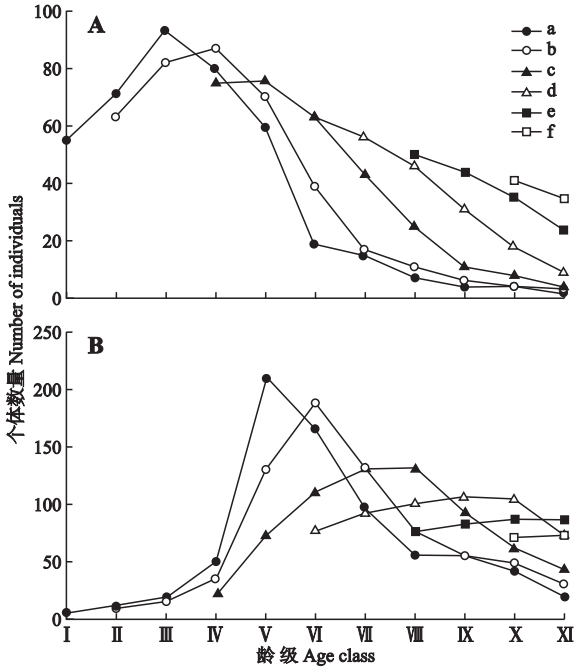


图 3 散生群落(A)和纯林群落(B)朝鲜崖柏种群数量动态的时间序列预测

Fig.3 Time sequence prediction in quantitative dynamics of *Thuja koraiensis* population of scattered (A) and pure forest community (B).

a) 原始数据 Original data; b) 1 个龄级后 After one age class; c) 3 个龄级后 After three age classes; d) 5 个龄级后 After five age classes; e) 7 个龄级后 After seven age classes; f) 9 个龄级后 After nine age classes.

相反,二者互补.散生群落中生存率函数在第Ⅴ龄级前变化幅度明显,之后趋于平缓;死亡密度函数 $f(t)$ 在Ⅲ龄级后递减,危险率函数 $\lambda(t)$ 在第Ⅴ龄级前递增,而后呈现不规则的波动状态,说明,种群在第Ⅴ龄级具有绝灭的风险.

纯林群落中生存率函数在Ⅳ龄级前下降平缓,之后变化明显,死亡密度函数 $f(t)$ 在Ⅴ龄级前增加,之后递减,危险率函数 $\lambda(t)$ 在Ⅰ~Ⅵ龄级呈增加趋势,之后表现不规则的波动,说明种群在第Ⅵ龄级具有绝灭的风险.

2.7 朝鲜崖柏种群数量动态的时间序列预测

以实际调查样地内朝鲜崖柏种群各龄级个体数为原始数据,按照一次移动平均方法预测经历 1、3、5、7、9 个龄级后种群数量动态变化趋势(图 3).两个群落中朝鲜崖柏种群各龄级个体数量峰值在预测序列中依次向后推移.随着时间推移,老龄个体逐渐增多,幼龄个体更显不足.

散生群落中,种群经历 1 个龄级后,Ⅱ、Ⅲ龄级个体减少,Ⅳ龄级以后个体数量得到补充而增加;经历3个龄级后,Ⅳ龄级的个体数量减少,Ⅴ龄级以后数量增加;经历 5、7、9 个龄级后,个体数量明显增加,向大龄级个体集中,种群呈明显的衰退趋势.

纯林群落中,种群经历 1 个龄级后,Ⅱ~Ⅴ龄级个体数量减少,Ⅵ龄级个体数量增多;经历 3、5 个龄级后Ⅵ龄级以前数量减少,老龄个体数量增多;经历 7、9 个龄级后,老龄个体数量继续增多.纯林群落在未来如果没有人为干扰,能够维持一定的种群更新能力.

3 讨 论

3.1 朝鲜崖柏种群的结构特征及生存现状

朝鲜崖柏的种群年龄结构及动态变化与其自身生物学特性及环境因素密切相关."∩"型的龄级结构表明朝鲜崖柏种群属衰退型.散生群落朝鲜崖柏种群幼龄阶段的个体数量明显高于后几个阶段,由于强烈的环境筛选,朝鲜崖柏幼年个体很难进入种群更替层,朝鲜崖柏种群成龄个体造成一定程度的缺失,未能成功完成整个生活史,限制了该物种在群落内的生存和繁衍,最终走向衰退.纯林群落内中老龄个体数量充足,可能种群会在一定时期内稳定,但

幼苗和幼树是树种成功再生的先决条件，特别是濒危物种，幼苗和幼树不能成功进入中年个体可能最终导致种群减少[24]．纯林群落相对稳定的朝鲜崖柏种群可能已处于衰退早期阶段．

自然条件下，朝鲜崖柏种群结籽率、自然萌发率都很低，种群数量主要靠自身的克隆繁殖来维持．有研究表明，对于林下以克隆繁殖方式为主产生的幼苗，由于对环境变迁的适应能力弱且很容易遭到食草动物的采食和破坏，幼龄个体无法补充中老龄个体的发展，种群整体的长期稳定难以维持[25]，这在一定程度上限制了朝鲜崖柏种群的自然更新，形成该种群更新和发展的瓶颈．

3.2　朝鲜崖柏种群的动态趋势

静态生命表是判断朝鲜崖柏种群发展趋势的重要指标，展示了一个种群的年龄结构．濒危植物存活曲线的表现形式多样．在保护较好的天然群落中，如长蕊木兰（*Alcimandra cathcartii*）、岷江柏（*Cupressus chengiana*）等濒危植物属于稳定增长型种群[26-27]，但多数濒危植物属于衰退型植物种群，如羽叶丁香（*Syringa pinnatifolia*）、珙桐（*Davidia involucrata*）等[28]．本研究分布于暗针叶林下的朝鲜崖柏种群存活曲线趋向于 Deevey Ⅲ型，纯林群落朝崖柏种群趋向于 Deevey Ⅱ型．纯林群落朝鲜崖柏种群表现为早期稳定、中期增长、后期缓慢衰退的动态特征；暗针叶林下的朝鲜崖柏种群幼年阶段薄弱，第Ⅴ龄级后较为稳定，但是在Ⅹ龄级具有绝灭的风险，表现为早期锐减、中期稳定、后期衰退的动态特征．时间序列预测显示，随着时间推移，各龄级株数的峰值在预测序列中依次向后推移，呈现大龄级个体逐渐增多、小龄级株数不足的态势，但朝鲜崖柏种群具有一定的恢复能力，克隆繁殖作为朝鲜崖柏的主要更新方式，纯林群落的集群分布比散生群落中的单独个体更有利于抵抗不良的环境．如果能够维持纯林群落中朝鲜崖柏种群现有的环境状况，没有人为干扰，种群将在一定时期内保持相对稳定的种群数量，而加强朝鲜崖柏封育保护，将更有利于种群生长发育，能够促进种群恢复发展．

3.3　朝鲜崖柏种群的保护和恢复

影响濒危植物种群繁衍的因素主要有两方面，一是由于濒危植物内在的遗传因素、适应力、生活力等方面的缺陷导致生活史中某一环节极为脆弱，使得其生存受到限制从而导致种群数量减少、分布区面积逐步缩小；另一方面则是外部环境条件的剧烈变化，使物种本身不能适应变化的环境而导致灭绝[29]．人类对朝鲜崖柏野生资源的掠夺性采挖和对其生境的破坏造成了朝鲜崖柏天然种群分布范围缩减，加速朝鲜崖柏种群濒危进程，已被列入中国珍稀濒危保护植物名录．2013 年，笔者调查长白山五十岗对子沟隧道附近朝鲜崖柏分布的群落时，样地内朝鲜崖柏数量共有 2000 余株；2015 年再次调查此群落，发现只剩下不足 200 株，资源数量急剧下降．

针对朝鲜崖柏种群的濒危现状，从朝鲜崖柏自身生物学特性考虑，应尽可能地采集优良种子，人工散播于朝鲜崖柏原生境内，并加以管护，提高朝鲜崖柏实生幼苗的数量，以扩大种群分布范围；目前，朝鲜崖柏扦插繁殖技术已经成熟[9-10]，应进行高效繁殖技术推广，扩大其种群生态位等．加强对朝鲜崖柏遗传多样性研究，明确其濒危的内在原因，对朝鲜崖柏种群的保护极其重要．同时，应继续加强朝鲜崖柏种群的保护和宣传力度，建立保护小区，禁止砍伐，适当进行人工抚育，降低局部种群的灭绝风险．

参考文献

[1] Gurevitch J, Scheiner SM, Fox GA. The Ecology of Plants. 2nd ed. Sunderlan, MA, USA: Sinauer Associates, Inc., 2002

[2] Zhang W（张　维）, Jiao Z-W（焦子伟）, Shang T-C（尚天翠）, *et al.* Demography and spectrum analysis of *Juglans cathayensis* populations at different altitudes in the west Tianshan valley in Xinjiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*（应用生态学报）, 2015, **26**(4): 1091-1098 (in Chinese)

[3] Wang G-R（王戈戎）, Xia F-C（夏富才）, Liu B-D（刘宝东）, *et al.* Habitat and height growth rythm of *Thuja koraiensis*. *Journal of Beihua University*（北华大学学报）, 2017, **18**(3): 312-314 (in Chinese)

[4] Wang S（汪　松）, Xie Y（解　焱）. China Species Red List (Vol.Ⅰ). Beijing: Higher Education Press, 2004 (in Chinese)

[5] Yang Z-Y（杨智蕴）, Tian Z-L（田作霖）, Liu Q（刘群）, *et al.* Studies on the chemical constituents of the volatile oil from leaves of *Thuja Koraiensis* Nakai Maxim. *Journal of Northeast Normal University* (Natural Science)（东北师范大学学报：自然科学版）, 1994, **26**(1): 136-140 (in Chinese)

[6] Qi J-Z（戚继忠）, Sun G-R（孙广仁）, Yang W-S（杨文胜）, *et al.* Analysis on the chemical constituents of essential oil from branches and leaves of *Thuja koraiensis* Nakai. *Journal of Plant Resources and Environment*（植物资源与环境）, 1995, **4**(2): 61-62 (in Chinese)

[7] Yin H（尹　航）, Jin H（金　慧）, Zhao Y（赵莹）, *et al*. Present situation and conservation strategy of rare and endangered species *Thuja koraiensis* in Changbai mountain. *Journal of Beihua University* (Natural Science)（北华大学学报：自然科学版）, 2016, **17**(1): 40-42 (in Chinese)

[8] Meng F-H（孟繁华）. Ecological condition an growth regularity of *Thuja koraiensis*. *Journal of Northeast*

Forestry University (东北林业大学学报), 1997, **25**(5): 50-52 (in Chinese)
[9] Yin H (尹 航), Zhao Y (赵 莹), Cui K-F (崔凯峰), *et al*. Asexual reproducition technique of *Thuja koraiensis* Nakai. *Chinese Wild Plant Resources* (中国野生植物资源), 2013, **32**(1): 68-69 (in Chinese)
[10] Yin H (尹 航), Zhao Y (赵 莹), Jin H (金 慧), *et al*. The experiment of preventing *Thuja koraiensis* cutting seedling frost heaving damage in Changbai Mountain. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology* (吉林林业科技), 2017, **46**(3): 1-2 (in Chinese)
[11] Yin H (尹 航), Jin H (金 慧), Zhao Y (赵 莹), *et al*. Clonal population characteristics and plasticity to soil factors of endangered plant *Thuja koraiensis*. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2019, **38**(3): 672-679 (in Chinese)
[12] Lin Y (林 勇), Ai X-R (艾训儒), Yao L (姚 兰), *et al*. Population structure and dynamics of *Metasequoia glyptostroboides* parent trees. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2017, **36**(6): 1531-1538 (in Chinese)
[13] Hong W (洪 伟), Wang X-G (王新功), Wu C-Z (吴承祯), *et al*. Life table and spectral analysis of endangered plant *Taxus chinensis* var. *mairei* population. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(6): 1109-1112 (in Chinese)
[14] Sara D, Carmen M, Sergio AC. Structure and population dynamics of *Pinus lagunae* MF Passini. *Forest Ecology and Management*, 2000, **13**: 249-256
[15] Wratten SD, Fry GL. Field and Laboratory Exercises in Ecology. London: Edward Arnold, 1980
[16] Xie Z-Q (谢宗强), Chen W-L (陈伟烈), Lu P (路鹏), *et al*. The demography and age structure of the endangered plant population of *Cathaya argyrophylla*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1999, **19**(4): 521-528 (in Chinese)
[17] Wang M-L (王明亮). Study On Remain Geographic Distribution, Community Characteristics and Population Ecology of Endangered Species *Picea Neoveitchii*. PhD Thesis. Shanghai: East China Normal University, 2010 (in Chinese)
[18] Li Y-L (李艳丽), Yang H (杨 华), Kang X-G (亢新刚), *et al*. Population structures and dynamics of *Abiesnephrolepis* and *Picea koraiensis* in the Changbai Mountains of northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2014, **36**(3): 18-25 (in Chinese)
[19] Jin H (金 慧), Zhao Y (赵 莹), Yin H (尹航), *et al*. Quantitative characteristics and dynamic analysis of the endangered species *Rhododendron chrysanthum* population in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2017, **36**(11): 3123-3130 (in Chinese)
[20] Chen X-D (陈晓德). A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structural dynamics. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1998, **18**(2): 214-217 (in Chinese)
[21] Yang L-R (杨立荣), Zhang Z-L (张治礼), Yun Y (云 勇), *et al*. The population structure and dynamics of *Dracaena cambodiana*, an endangered tree on Hainan Islan. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2018, **38**(8): 2802-2815 (in Chinese)
[22] Liu D (刘 丹), Liu S-L (刘士玲), Guo Z-L (郭忠玲), *et al*. Population life table and time sequence prediction of *Alnus sibirica*. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2017, **39**(10): 62-69 (in Chinese)
[23] Xiong B-M (熊斌梅), Wang Z-X (汪正祥), Li Z-Q (李中强), *et al*. Study on the correlation among age, DBH and tree height of the *Pseudotsuga sinensis* in Qizimei Mountain Nature Reserve. *Forest Resource Management* (林业资源管理), 2016(4): 41-46 (in Chinese)
[24] Li W-Y (李文英), Li X (李 欣), Gan X-X (甘小洪). Population structure and dynamics of endangered plant *Tetracentron sinense*. *Subtropical Plant Science* (亚热带植物科学), 2018, **47**(3): 222-228 (in Chinese)
[25] Jiang Z-M (姜在民), He Z-S (和子森), Su H (宿昊), *et al*. Population structure and dynamic characteristics of endangered *Syringa pinnatifolia* Hemsl. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2018, **38**(7): 2471-2480 (in Chinese)
[26] Yuan C-M (袁春明), Meng G-T (孟广涛), Fang X-J (方向京), *et al*. Age structure and spatial distribution of the rare and endangered plant *Alcimandra cathcartii*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(12): 3866-3872 (in Chinese)
[27] Yuan Z-Z (袁志忠), Bao W-K (包维楷), He B-H (何丙辉). Dynamic analysis on age structure of *Cupressus chengiana* populations in four geographical areas. *Journal of Plant Resouces And Environment* (植物资源与环境学报), 2004, **13**(3): 25-30 (in Chinese)
[28] Liu H-Y (刘海洋), Jin X-L (金晓玲), Shen S-Y (沈守云), *et al*. Population quantitative characteristics and dynamics of rare and endangered plant *Davidia involucrata* in Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(24): 7738-7746 (in Chinese)
[29] Wang K-P (王克鹏), Dongoing B (董 博), Wang Y-W (王彦武), *et al*. Analysis of reproductive ecological factors of endangered *Rhodiola gannanica*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(7): 2205-2211 (in Chinese)

作者简介 金 慧,女,1979 年生,硕士,副研究员. 主要从事森林生态和土壤化学研究. E-mail: fivecl10jinhui@163.com

责任编辑 杨 弘

金慧, 赵莹, 刘丽杰, 等. 长白山区濒危植物朝鲜崖柏种群数量特征及动态. 应用生态学报, 2019, **30**(5): 1563-1570
Jin H, Zhao Y, Liu L-J, *et al*. Quantitative characteristics and population dynamics of the endangered plant *Thuja koraiensis* in Changbai Mountain, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(5): 1563-1570 (in Chinese)