

DOI: 10.5846/stxb202003300743

王泳腾, 黄治昊, 王俊, 张童, 崔国发. 燕山山脉黄檗种群结构与动态特征. 生态学报, 2021, 41(7): 2826-2834.

Wang Y T, Huang Z H, Wang J, Zhang T, Cui G F. The population structure and dynamic characteristics of *Phellodendron amurense* in Yanshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2826-2834.

燕山山脉黄檗种群结构与动态特征

王泳腾, 黄治昊, 王俊, 张童, 崔国发*

北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

摘要: 黄檗 (*Phellodendron amurense*) 为我国珍稀濒危物种, 具有较高的药用价值。以燕山地区野生黄檗种群为研究对象, 采用典型抽样对 8 个保护区内的黄檗进行全面调查, 通过编制静态生命表并绘制存活曲线, 分析种群年龄结构和种群变化规律, 并通过种群动态量化和时间序列预测分析种群未来数量变化。结果表明: (1) 黄檗种群结构总体上呈倒“J”型, 但存在外部干扰时, 种群结构数量变化动态指数为 1.017%, 表明该种群趋于稳定型; (2) 静态生命表及相关曲线分析显示, 黄檗种群存活数量整体上随着径级增大, 个体数量逐渐下降; 黄檗种群的生存期望在不同径级间存在波动, 而第 VII 径级的生存期望最高, 种群存活曲线符合 Deevey-II 型, 黄檗种群具有前期减少、中期稳定、后期衰退的特点; (3) 时间序列预测分析表明, 在未来 2、4、6、8 个径级之后, 黄檗中老年个体数量将逐渐增加。黄檗种群濒危的主要因素是幼苗数量少, 且呈现散生分布状态, 建议加强幼苗抚育工作, 提高幼苗的存活率, 保护和改善生境, 从而促进黄檗种群的更新和恢复。

关键词: 黄檗; 种群结构; 存活曲线; 时间序列预测

The population structure and dynamic characteristics of *Phellodendron amurense* in Yanshan Mountains

WANG Yongteng, HUANG Zhihao, WANG Jun, ZHANG Tong, CUI Guofa*

School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Amur corktree (*Phellodendron amurense*) is a rare and endangered species in China. This paper takes the wild *Phellodendron amurense* population in Yanshan Mountains as the research object. We conduct comprehensive survey on *Phellodendron amurense* in eight reserves through typical sampling, establish a static life table and draw a population survival curve to analyze the age structure of the population, and use its population dynamic quantization and time series analysis to predict potential population changes. The results show that (1) the *P. amurense* population is by a large of an inverted J type. The dynamic change index under external interference is 1.017%, indicating that the population tends to be stable. (2) Analysis on the static life table and the population survival curve shows that the survival number of the *P. amurense* population increases along with the diameter scales as the individual number decreases, with the VII group at the top. The population survival rate belongs to the typical type of Deevey-II. The *P. amurense* population grows poorly in early age, stably in medium age period, and declines in old age. (3) Time series analysis indicates that, after more trees grow in the 2, 4, 6, 8 diameter scales in the future, the number of medium and old-aged trees in the population may increase gradually. The major factor for the endangering of the *P. amurense* population is its insufficient seedling regeneration and scattered tree distribution. Therefore, the paper concludes that seedling raising should be strengthened to increase the survival rate of the seedlings, and the living environment be protected and improved to enhance natural

基金项目: 东部典型区域陆地生物多样性保护目标设定与评估示范 (2018YFC0507203)

收稿日期: 2020-03-30; 网络出版日期: 2021-01-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fa6716@163.com

regeneration and restoration of the *P. amurense* population.

Key Words: *Phellodendron amurense*; population structure; survival curve; time series analysis

种群生态学的核心是种群动态研究^[1-2],它涉及物种种群的动态以及这些种群如何与环境相互作用,是一项关于物种数量随时间和空间变化的研究^[3-4]。通过研究生物种群结构,可以评估历史干扰,并对种群未来发展趋势进行预测^[5-6]。

黄檗(*Phellodendron amurense*)为芸香科(Rutaceae)黄檗属(*Phellodendron*)落叶乔木,是古老的孑遗植物。由于黄檗具有抗炎、降血糖血压等重要的药用价值,在20世纪末受到了严重的人为破坏,野生种群数量日益减少,世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)将其列为易危(Vulnerable, VU)物种^[7]。目前我国黄檗研究主要集中在药用机理分析^[8-11]、人工栽培繁育^[12]、潜在适宜分布区预测^[13]等方面。而对某一局部地区黄檗的种群生态学研究相对较少^[14-15],对燕山山脉这一地理尺度上黄檗种群的研究还未见报道。为探究黄檗生态学特性,深入分析黄檗的受威胁状况、濒危程度,阐明黄檗野生种群的濒危机制^[16-17],为野生黄檗种群保护和利用提供科学理论依据^[18],需要对现存黄檗的种群结构和数量特征开展调查与研究。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

燕山位于东经115°—119°47',北纬39°40'—41°20',东西长约420km,南北200km左右,东猴顶为其最高峰,海拔2392m。燕山植被类型丰富,既有蒙古栎(*Quercus mongolica*)、槲栎(*Quercus aliena*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、槲树(*Quercus dentata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、硕桦(*Betula costata*)等落叶阔叶树,又有臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等针叶树种。燕山属暖温带大陆性季风气候区,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。年均温6—10℃,10℃以上持续期195—205d,活动积温2600—3800℃,降水季节分配不均匀,全年降水的80%集中在夏季6、7、8三个月,年降水量700mm左右,土地类型以棕壤、褐土为主。

1.2 调查方法

由于黄檗分布稀少且在野外多呈现散生状态,在大量文献调查的基础上,于2019年7—8月,选择了燕山范围内8个国家级自然保护区中黄檗分布较集中且自然林木保存完好的地点作为调查区域,对保护区内几乎所有的黄檗都进行了详细样方调查(图1、表1),设置样地共计33块,每个样地面积为20m×20m,对样地中的乔木进行每木检尺,记录植物的名称、胸径、树高、冠幅、数量等等,同时记录样地的海拔、经纬度、坡度、坡向、坡位、郁闭度等生境条件。

表1 黄檗调查样地的基本概况

Table 1 Basic Information of sample plots of *Phellodendron amurense*

编号 No.	调查地点 Survey sites	坡位 Slope positions	坡度 Slope angles	坡向 Directions	海拔/m Altitudes
1	北京百花山国家级自然保护区	上坡位	17—22°	322°NW	1295
2		上坡位	10—16°	328°NW	1293
3		上坡位	3—8°	2°N	1179
4		沟谷	—	—	1174
5	北京松山国家级自然保护区	沟谷	—	—	962
6		上坡位	16—22°	56°NE	1174
7		上坡位	15—21°	13°W	906
8	河北大海坨国家级自然保护区	下坡位	30—34°	30°N	1008

续表

编号 No.	调查地点 Survey sites	坡位 Slope positions	坡度 Slope angles	坡向 Directions	海拔/m Altitudes
9	河北茅荆坝国家级自然保护区	中坡位	13—19°	133°SE	984
10		中坡位	3—7°	132°SE	1081
11		中坡位	28—33°	3°N	836
12		中坡位	8—13°	66°NE	890
13		上坡位	12—17°	188°S	1055
14	河北雾灵山国家级自然保护区	中坡位	7—12°	14°N	837
15		中坡位	23—28°	26°NE	964
16		中坡位	18—23°	30°NW	332
17		中坡位	11—16°	30°NW	281
18		下坡位	23—28°	195°S	410
19		下坡位	48—53°	17°N	715
20	辽宁白狼山国家级自然保护区	中坡位	24—29°	52°NE	690
21		上坡位	3—8°	114°SE	701
22		沟谷	—	—	707
23		中坡位	4—9°	133°SE	671
24		沟谷	—	—	578
25	辽宁虹螺山国家级自然保护区	沟谷	—	—	331
26		下坡位	17—22°	355°N	341
27		下坡位	29—34°	332°NW	413
28	天津八仙山国家级自然保护区	下坡位	28—35°	9°N	385
29		上坡位	33—39°	59°NE	915
30		上坡位	38—43°	135°SE	897
31		上坡位	18—23°	83°E	910
32		上坡位	28—34°	355°N	850
33		中坡位	17—22°	5°N	535



图1 自然保护区位置分布图

Fig.1 Location map of Nature Reserves

1.3 数据分析

1.3.1 年龄结构划分

黄檗作为濒危物种,种群数量有限。选择径级结构代替年龄结构,参考相关林木径级划分方法^{[15][19]},根据黄檗的生长规律和生活史特征,将其划分为 11 个径级:第 I 径级为幼苗 (DBH ≤ 4cm);第 II 径级 (4cm < DBH ≤ 8cm)、第 III 径级 (8cm < DBH ≤ 12cm)、第 IV 径级 (12cm < DBH ≤ 16cm) 为小树;第 V 径级 (16cm < DBH ≤ 20cm)、第 VI 径级 (20cm < DBH ≤ 24cm)、第 VII 径级 (24cm < DBH ≤ 28cm)、第 VIII 径级 (28cm < DBH ≤ 32cm) 为中树;第 IX 径级 (32cm < DBH ≤ 36cm)、第 X 径级 (36cm < DBH ≤ 40cm)、第 XI 径级 (40cm < DBH ≤ 44cm) 为大树阶段。

1.3.2 种群动态数量化方法

参考陈晓德^[20]的数量化方法,利用动态指数进行分析,具体公式如下:

$$v_n = \frac{S_n - S_{n+1}}{\max S_n S_{n+1}} \times 100\%$$

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

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

$$P = \frac{1}{k \times \min S_1 S_2 \dots S_k}$$

式中, V_n 为从 n 到 $n+1$ 级的个体数量变化; V_{pi} 为不考虑未来外部环境干扰时,整个种群结构的数量变化动态指数; V'_{pi} 为考虑未来的外部干扰时,整个种群结构的数量变化动态指数; S_n 、 S_{n+1} 分别是第 n 、第 $n+1$ 级的种群个体数; k 为种群大小级数量。

1.3.3 种群静态生命表及存活曲线

参考姜在民、赵阳^[21-22]的方法,编制黄檗种群静态生命表,由于静态生命表是根据某一特定时刻种群所有个体的径级编制而成^[23],且此次调查中幼苗个体数量较少,会出现死亡率为负的情况,因此对 A_x 采用方程拟合并做匀滑处理,得到修正后的数据 a_x ,拟合时以径级为自变量,存活数量为因变量,得到的拟合方程为 $y = 182.06e^{-0.103x}$, $R^2 = 0.8746$ 生命表主要包括以下参数,计算公式分别为:

$$l_x = (a_x/a_0) \times 1000;$$

$$d_x = l_x - l_{x+1};$$

$$q_x = (d_x/l_x) \times 100\%;$$

$$L_x = (l_x + l_{x+1})/2;$$

$$T_x = L_x + L_{x+1} + L_{x+2} \dots + L_{x+n};$$

$$e_x = T_x/l_x;$$

$$K_x = \ln l_x - \ln l_{x+1};$$

$$S_x = l_{x+1}/l_x;$$

式中, l_x 为第 x 径级的标准化存活个体数; d_x 为从 x 到 $x+1$ 径级间的标准化死亡数; q_x 为第 x 到 $x+1$ 径级间隔期间死亡率; L_x 为第 x 到 $x+1$ 径级间隔期间仍存活的个体数; T_x 为大于等于 x 径级的存活个体总数; e_x 为进入第 x 径级个体的生命期望或平均期望寿命; K_x 为消失率; S_x 为存活率。

此外,依据 Helt 与 Loucks 的数学模型描述黄檗种群存活曲线,即运用指数方程式 $N_x = N_0 e^{-bx}$ 和幂函数 $N_x = N_0 x^{-b}$ 分别描述 Deevey-II 型和 Deevey-III 型存活曲线^[24]。

式中, N_x 、 N_0 分别代 x 径级内存活数和种群形成初期的个体数, N_x 、 N_0 为经匀滑后的个体存活数, b 为死亡率。

1.3.4 生存分析曲线

+为了更好地分析黄槿种群动态, 本文引入 4 个生存函数, 分别是种群生存函数 $S_{(i)}$ 、累计死亡率函数 $F_{(i)}$ 、死亡密度函数 $f_{(i)}$ 和危险率函数 $\lambda_{(i)}$ [25-26], 计算公式为:

$$S_{(i)} = S_1 \times S_2 \times S_3 \times \dots \times S_i$$

$$F_{(i)} = 1 - S_{(i)}$$

$$f_{(i)} = (S_{(i-1)} - S_{(i)}) / h_i$$

$$\lambda_{(i)} = 2(1 - S_{(i)}) / [h_i(1 + S_{(i)})]$$

式中, S_i 为存活率; h_i 为径级宽度。

根据上述 4 个生存函数的估算值, 绘制生存率曲线、累计死亡率曲线、死亡密度曲线和危险率曲线。

1.3.5 种群数量动态的时间序列预测

采用一次移动平均法 [27] 预测黄槿种群年龄结构, 其计算公式为:

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

式中, t 为径级; n 为需要预测的时间; X_k 为当前 k 径级的个体数量; M_t 为 t 径级黄槿在 n 年之后的种群存活数。本文 t 分别取 2、4、6、8 径级, 对种群数量进行预测。

2 结果与分析

2.1 黄槿种群分布现状及结构特征

本次调查到黄槿共计 334 株, 其中第 II、III、IV 径级个体数量较多, 分别占总数量的 27.25%、19.76%、15.57%, 说明小树数量充足; 第 I 径级个体数量占总数量的 11.34%, 可能是由于 21 世纪初期, 人类砍伐、盗伐现象严重, 黄槿种群通过根蘖萌生, 由此产生一定数量的幼苗, 但由于更新能力不足, 导致数量不断减少; 第 X、XI 径级数量也较少, 仅占总数量的 0.87%, 说明黄槿种群老龄和幼龄个体数量匮乏; 第 II—VIII 径级的种群数量随径级的增大而减小。黄槿种群径级结构总体上呈倒“J”型(图 2), 为增长型种群。

根据表 2 可知, $V_1 < 0$, 说明第 I—II 径级生长过程中黄槿种群个体数量减少, 呈现衰退的结构动态; V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 、 V_6 、 V_7 、 V_9 、 V_{10} 均大于 0, 说明第 II—III、III—IV、IV—V、V—VI、VI—VII、VII—VIII、IX—X、X—XI 径级呈现出增长的动态结构关系; $V_8 = 0$, 表明第 VIII—IX 径级呈现稳定的结构动态关系, 种群总体上呈现增长趋势。但种群年龄结构动态指数 $V_{pi} = 20.333\%$, 大于存在外部干扰时的年龄结构动态变化指数 $V'_{pi} = 1.017\%$, 两者均趋近于 0, $P_{max} = 0.05$, 表明种群结构对随机干扰的敏感性指数为 0.05, 说明黄槿种群抗干扰能力较低, 对环境的敏感性较强, 虽有增长波动, 但趋于稳定型种群。

表 2 黄槿种群动态变化指数

Table 2 Dynamic index of *Phellodendron amurense* population

径级 Diameter scale	种群动态指数 Dynamic index	动态指数值 Dynamic index value/%	径级 Diameter scale	种群动态指数 Dynamic index	动态指数值 Dynamic index value/%
I	V_1	-57.14	VIII	V_8	0
II	V_2	27.47	IX	V_9	71.43
III	V_3	21.21	X	V_{10}	50
IV	V_4	38.46	XI	V_{11}	100
V	V_5	25		V_{pi}	20.333
VI	V_6	45.83		V'_{pi}	1.017
VII	V_7	46.15		P_{max}	0.05

2.2 黄檗种群静态生命表

从表 3 和图 4 可知,黄檗种群存活数量(l_x)整体情况为随着径级增大,个体数量逐渐下降,而死亡率(q_x)和消失率(K_x)在第 VI 径级后波动浮动剧烈(图 3),说明种群易受外界环境干扰,种群状态不稳定。生命期望(e_x)在第 VII 径级达到峰值,说明此时黄檗正值生命力旺盛的壮年时期,此后进入老龄时期,生理活动减弱,生命期望值迅速降低,这种趋势符合生物学特征。

2.3 黄檗种群存活曲线

以径级(x)为自变量,以标准化存活数(l_x)为因变量,绘制黄檗种群存活曲线(图 4),并拟合回归得到黄檗种群相应存活曲线模型: $N_x = 1309.2e^{-0.353x}$, $R^2 = 0.987$, $P < 0.001$ 。

$$N_x = 1749.3x^{-1.514} \quad (R^2 = 0.915, P < 0.001)$$

结果表明,指数函数模型的 R^2 最大,表明黄檗种群的存活曲线更趋近于各径级死亡率相似的 Deevy-II 型。

表 3 黄檗种群静态生命表

Table 3 Static life table of *Phellodendron amurense* population

径级 Diameter scale	胸径 DBH/cm	A_x	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x	S_x
I	≤4	39	121	1000.000	6.908	314.050	0.314	842.975	2607.438	2.607	0.377	0.686
II	4—8	91	83	685.950	6.531	223.140	0.325	574.380	1764.463	2.572	0.393	0.675
III	8—12	66	56	462.810	6.137	157.025	0.339	384.298	1190.083	2.571	0.414	0.661
IV	12—16	52	37	305.785	5.723	99.174	0.324	256.198	805.785	2.635	0.392	0.676
V	16—20	32	25	206.612	5.331	66.116	0.320	173.554	549.587	2.660	0.386	0.680
VI	20—24	24	17	140.496	4.945	49.587	0.353	115.702	376.033	2.676	0.435	0.647
VII	24—28	13	11	90.909	4.510	16.529	0.182	82.645	260.331	2.864	0.201	0.818
VIII	28—32	7	9	74.380	4.309	0.000	0.000	74.380	177.686	2.389	0.000	1.000
IX	32—36	7	9	74.380	4.309	33.058	0.444	57.851	103.306	1.389	0.588	0.556
X	36—40	2	5	41.322	3.721	16.529	0.400	33.058	45.455	1.100	0.511	0.600
XI	40—44	1	3	24.793	3.211	24.793	1.000	12.397	12.397	0.500	3.211	0.000

A_x : 存活数 individual number of diameter scale x ; a_x : 修正后存活数 the revised data of A_x ; l_x : 第 x 径级的标准化存活数 the standardized number of surviving individuals of diameter scale x ; $\ln l_x$: 标准化存活数的自然对数 the natural logarithm of l_x ; d_x : 从 x 到 $x+1$ 径级间的标准化死亡数 the standardized number of death individuals from diameter scale x to diameter scale $x+1$; q_x : 第 x 到 $x+1$ 径级间隔期间死亡率 mortality from diameter scale x to diameter scale $x+1$; L_x : 第 x 到 $x+1$ 径级间隔期间仍存活的个体数 the number of surviving individuals from diameter scale x to diameter scale $x+1$; T_x : 大于等于 x 径级的存活个体总数 the total individuals number of diameter scale x and diameter scale elder than x ; e_x : 进入第 x 径级个体的生命期望或平均期望寿命 life expectancy or average life expectancy of individuals in the diameter scale x ; K_x : 消失率 Vanish rate; S_x : 存活率 Survival rate

2.4 黄檗种群生存变化规律

黄檗种群累计死亡率 $F_{(i)}$ 随径级增大而上升,生存率 $S_{(i)}$ 随径级增大而下降,两者趋势相反。第 I—VI 径级之间,两者升降变化剧烈,说明黄檗幼龄种群存活率低,自然更新受阻。在第 VI 径级之后,两条曲线的变化趋于缓和(图 5)。

黄檗种群危险率函数 $\lambda_{(i)}$ 整体呈单调递增,死亡密度函数 $f_{(i)}$ 在第 I—II 径级间急剧下降(图 6),在第 VIII 径级出现最小值(0),这说明黄檗种群开始进入生理衰老期,种群开始衰退。4 个生存函数曲线表明,黄檗种

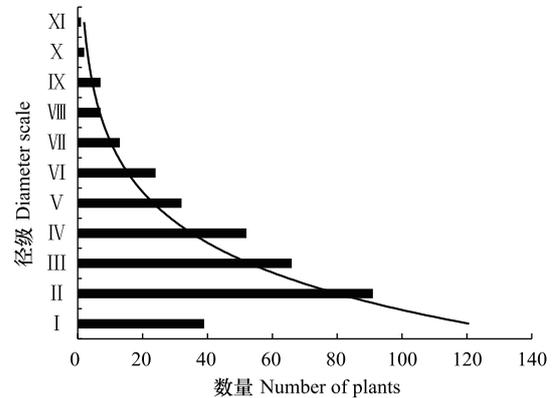


图 2 黄檗种群径级结构

Fig.2 Size structure of *Phellodendron amurense* population

群动态表现为前期减少、中期稳定、后期衰退。

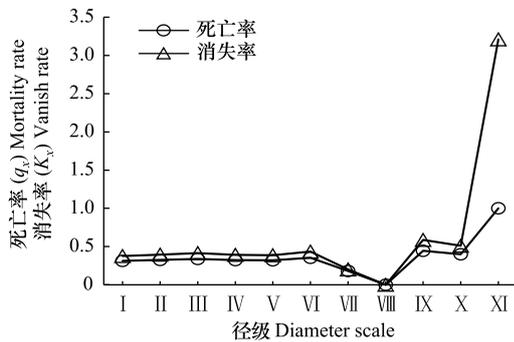


图3 黄檗种群死亡率 q_x 和消失率 K_x 曲线

Fig.3 Mortality q_x and killing K_x curves of *Phellodendron amurense*

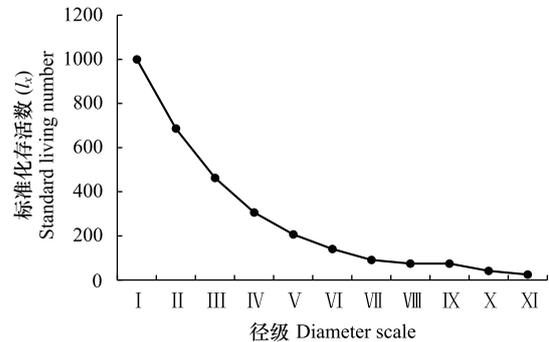


图4 黄檗种群标准化存活曲线

Fig.4 Survival curve of *Phellodendron amurense*

表4 黄檗种群的生存函数估算值

Table 4 Survival functional rate of *Phellodendron amurense* population

径级 Diameter scale	$S_{(i)}$	$F_{(i)}$	$f_{(i)}$	$\lambda_{(i)}$
I	0.6860	0.3140	0.1715	0.6281
II	0.4628	0.5372	0.0558	1.0744
III	0.3058	0.6942	0.0393	1.3884
IV	0.2066	0.7934	0.0248	1.5868
V	0.1405	0.8595	0.0165	1.7190
VI	0.0909	0.9091	0.0124	1.8182
VII	0.0744	0.9256	0.0041	1.8512
VIII	0.0744	0.9256	0.0000	1.8512
IX	0.0413	0.9587	0.0083	1.9174
X	0.0248	0.9752	0.0041	1.9504
XI	0.0000	1.0000	0.0062	2.0000

$S_{(i)}$: 生存率 Survival rate; $F_{(i)}$: 累计死亡率 Cumulative mortality rate; $f_{(i)}$: 死亡密度 Mortality density; $\lambda_{(i)}$: 危险率 Hazard rate

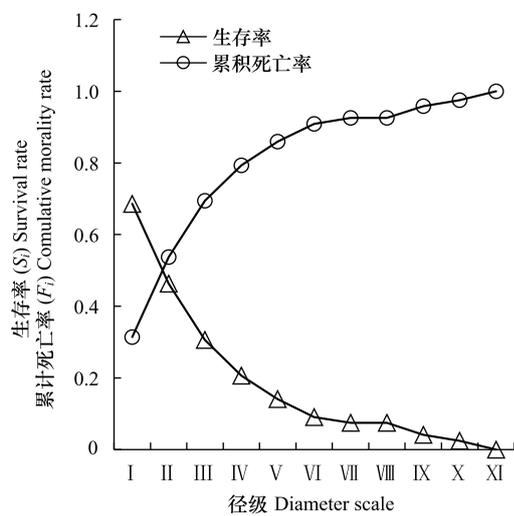


图5 黄檗种群生存率 $S_{(i)}$ 和累积死亡率 $F_{(i)}$ 曲线

Fig.5 Survival Rate $S_{(i)}$ and Cumulative Mortality Rate $F_{(i)}$ Functional Curve of *Phellodendron amurense*

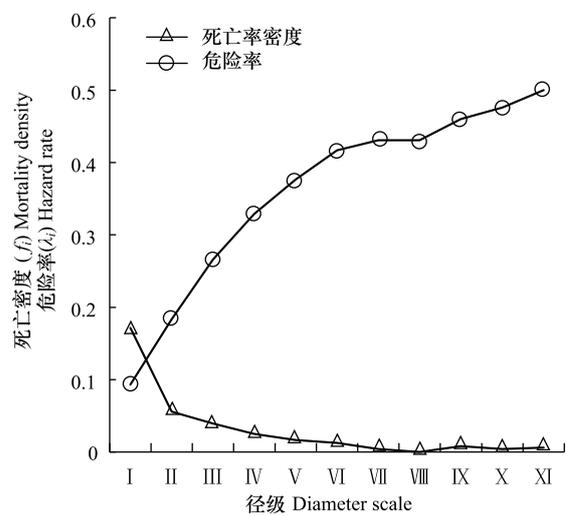


图6 黄檗种群死亡密度 $f_{(i)}$ 和危险率 $\lambda_{(i)}$ 曲线

Fig.6 Mortality Density $f_{(i)}$ and Hazard Rate $\lambda_{(i)}$ Functional Curve of *Phellodendron amurense*

2.5 黄檗种群时间序列预测

以黄檗种群各径级株数为原始数据,按照一次移动平均法预测各径级在未来 2、4、6、8 个径级时间后的个体数(表 6、图 7)。经历 2 个径级时间后,第 II 径级的数量减少,表明黄檗幼苗数量少,自我更新能力较差;其他径级在 2、4、6、8 个径级之后的数量均有不同幅度的增加,表明黄檗种群的增长趋势主要依靠中年和老年树木,在外界环境保持良好的前提下,黄檗种群会呈现增长趋势。

表 6 黄檗种群数量动态时间序列预测

Table 6 Time sequence prediction of *Phellodendron amurense* population

径级 Diameter scale	原始数据 Primary data	$M_2^{(1)}$	$M_4^{(1)}$	$M_6^{(1)}$	$M_8^{(1)}$
I	39				
II	91	65			
III	66	79			
IV	52	59	62		
V	32	42	60		
VI	24	28	44	51	
VII	13	19	30	46	
VIII	7	10	19	32	41
IX	7	7	13	23	37
X	2	5	7	14	25
XI	1	2	4	9	17

$M_t^{(1)}$: 经过 2、4、6 和 8 径级时间后 t 径级的种群大小 the population size of diameter scale t after the time of 2, 4, 6, 8 diameter scale; (1): 移动平均法中的一次移动平均法标识 the mark of one-time moving average in moving average method

3 结论和讨论

燕山地区野生黄檗种群幼苗数量较少,低龄树木和中龄树木数量较多,推测这可能与人类砍伐、盗伐有关,被砍伐后的黄檗开始出现一定数量的幼苗萌蘖,但现存小树(第 II-IV 径级)数目较多,伴随着树木生长,个体对水分、光照、空间等资源需求增加,种内和种间竞争加剧,使得小树部分死亡,具有较强生存力的中龄个体得以存活,数量减少的趋势变缓,种群趋于稳定状态,黄檗种群径级结构总体上呈倒“J”型,是增长型种群,这与宋超^[9]等对北京地区黄檗种群的研究结果相似。但 $V'_{pi} = 1.017$ 趋近于 0,表明黄檗种群对外界的抗干扰能力较弱,在生长过程中具有一定的波动性,但由于低龄树和中龄树木较充分,可以保持其稳定状态。

本研究黄檗种群的存活曲线为 Deevey-II 型,这与张强^[28]对辽宁省黄檗种群特征研究中黄檗存活曲线类型一致,但与易雪梅等^[8]对长白山地区黄檗种群存活曲线为 Deevey-III 不一致,推测这与长白山地区红松、白桦等针阔叶树的数量居多,且树高冠密,较强地抑制了黄檗幼苗的生长有关。种群死亡率和消失率曲线变化基本一致,都呈现先减少后增加的趋势。黄檗种群前 4 个径级的累积死亡率增长趋势显著高于后 7 个径级,这可能是由于黄檗幼龄和低龄个体在生长发育过程中对光照、水分等资源的竞争力不足,说明此时是造成黄檗种群生长波动的重要时期。植物种群的发展不仅涉及到种内种间竞争,种群与环境之间的相互适应过程对其发展也有着重要影响^[29]。生存期望表现为先下降后上升再下降的趋势,推测黄檗种群在中龄时对环境的适应和生存能力最强,而进入衰老期,个体对资源不能进

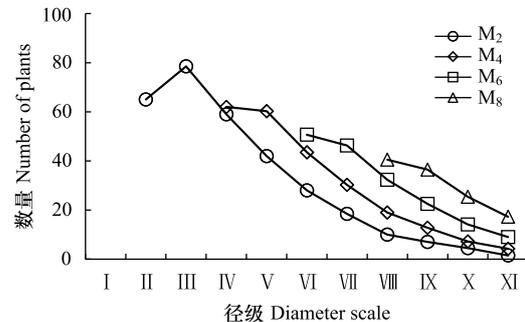


图 7 黄檗种群数量动态的时间序列预测

Fig.7 Time sequence prediction of *Phellodendron amurense* population

$M_t^{(1)}$: 经过 2、4、6 和 8 径级时间后 t 径级的种群大小 the population size of diameter scale t after the time of 2, 4, 6, 8 diameter scale

行充分利用,数量减少,种群衰退。这与其种群前期减少、中期稳定、后期衰退的结构特征相一致。

黄檗具有一定的萌蘖能力,种子繁殖也是其种群更新的方式之一。燕山地区黄檗种群低龄数量丰富,年龄结构相对完整,短期内不会出现毁灭性的衰退^[30]。但是,在本次调查的某些保护区内,仍存在黄檗的盗伐(剥皮)现象,将砍伐后的黄檗树干用来制作枕头治疗颈椎。目前我国采取就地保护、迁地保护、回归自然等措施开展珍稀濒危野生植物保护,鉴于黄檗当前现状,建议重点保护和改善现存黄檗周围环境种群的生境条件,一定程度上限制人类进入黄檗生境区域,从而降低人为破坏;其次,黄檗为阳性树种,对光照要求较高,因此可进行适度的人工修枝,对一些竞争力较强的树种,如胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)进行修枝或者择伐,改善林内光照^[31];此外,黄檗幼苗数量不够乐观,应及时清除幼苗周围的杂草、灌木等,为幼苗生长提供充足的空间和资源,提高幼苗的存活率,使更小的植株能够进入林冠层,提高中、成年树的比例。

本文从燕山这一大区域来对黄檗进行了整体研究和分析,但由于每个保护区存在生境异质性,不同保护区内黄檗所处的群落也未尽相同,而海拔、坡度、坡向等也是影响黄檗群落动态的主要因素,下一步将开展影响黄檗种群生长的微生境因子研究,探讨其濒危机制和致危因素,为黄檗种群的快速恢复和保育提供重要的理论依据。

参考文献 (References):

- [1] 杨彪, 张全建, 龚旭, 段晨松, 张远彬. 雅砻江冬麻豆 (*Salweenia bouffordiana*) 种群结构与动态特征. 生态学报, 2020, 40(4): 1184-1194.
- [2] 张志祥, 刘鹏, 蔡妙珍, 康华靖, 廖承川, 刘春生, 楼中华. 九龙山珍稀濒危植物南方铁杉种群数量动态. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1146-1156.
- [3] Omelko A, Ukhvatkina O, Zhmerenetsky A, Sibirina L, Petrenko T, Bobrovsky M. From young to adult trees: how spatial patterns of plants with different life strategies change during age development in an old-growth Korean pine-broadleaved forest. *Forest Ecology and Management*, 2018, 411: 46-66.
- [4] 吉也, 曹孟岩, 白楚锋, 金林琦, 李畅, 李萍. 峨眉山桫欏种群结构与动态特征. 西北植物学报, 2019, 39(3): 543-551.
- [5] 朱贵珍, 丁彦芬, 卓启苗, 余慧, 董丽娜. 南京紫金山红桧种群结构与动态特征. 东北林业大学学报, 2020, 48(1): 29-33.
- [6] Harper J L. *Population Biology of Plants*. London: Academic Press, 1977.
- [7] IUCN. IUCN Red List Categories and Criteria, Version 3.1. Switzerland and Cambridge, UK: IUCN, 2001.
- [8] 秦彦杰. 黄檗主要药用成分的分布规律研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [9] 祖元刚, 王延兵, 王慧梅, 孙莲慧. 黄檗 (*Phellodendron amurense*) 叶片总 RNA 提取方法研究. 植物研究, 2007, 27(5): 593-595.
- [10] 高杨, 刘铭, 张洪文. 珍稀植物黄檗的药用价值及可持续利用. 中国保健营养, 2012, 22(3): 22-24.
- [11] Lis A, Boczek E, Góra J. Chemical composition of the essential oils from fruits, leaves and flowers of the Amur cork tree (*Phellodendron amurense* Rupr.). *Flavour and Fragrance Journal*, 2004, 19(6): 549-553.
- [12] 刘琰璐, 戴灵超, 张昭. 黄檗繁殖技术研究进展. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2011, 20(2): 84-87.
- [13] 黄治昊, 周鑫, 张孝然, 蒲真, 邢韶华. 我国大陆黄檗潜在分布区及分布适宜性评价. 生态学报, 2018, 38(20): 7469-7476.
- [14] 易雪梅, 张悦, 姬兰柱. 长白山黄檗种群结构. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2257-2262.
- [15] 宋超, 余琦殷, 于梦凡, 邢韶华, 刘润泽, 曲宏, 黄三祥. 北京地区黄檗种群数量结构及空间分布特征. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3040-3049.
- [16] Rozas V. Structural heterogeneity and tree spatial patterns in an old-growth deciduous lowland forest in Cantabria, northern Spain. *Plant Ecology*, 2006, 185(1): 57-72.
- [17] 秦彦杰, 王洋, 阎秀峰. 中国黄檗资源现状及可持续利用对策. 中草药, 2006, 37(7): 1104-1107.
- [18] 李翔, 侯璐, 李双喜, 李颖岳. 濒危树种庙台榭种群数量特征及动态分析. 植物科学学报, 2018, 36(4): 524-533.
- [19] 何亚平, 费世民, 蒋俊明, 陈秀明, 张旭东, 何飞. 不同龄级划分方法对种群存活分析的影响——以水灾迹地油松和华山松种群生存分析为例. 植物生态学报, 2008, 32(2): 448-455.
- [20] 陈晓德. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究. 生态学报, 1998, 18(2): 214-217.
- [21] 姜在民, 和子森, 宿昊, 赵涵, 蔡靖. 濒危植物羽叶丁香种群结构与动态特征. 生态学报, 2018, 38(7): 2471-2480.
- [22] 赵阳, 齐瑞, 焦健, 陈学龙, 曹家豪, 冯宜明, 杨萌萌. 琼海-则岔地区紫果云杉种群结构与动态特征. 生态学报, 2018, 38(20): 7447-7457.
- [23] 李俊清. 森林生态学. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] Hett J M, Loucks O L. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock. *Journal of Ecology*, 1976, 64(3): 1029-1044.
- [25] 冯士雅. 生存分析(I). 数学的实践与认识, 1982, (3): 72-80.
- [26] 杨凤翔, 王顺庆, 徐海根, 李邦庆. 生存分析理论及其在研究生命表中的应用. 生态学报, 1991, 11(2): 153-158.
- [27] 王飞, 霍怀成, 赵阳, 曹秀文, 刘锦乾, 杨永红, 张涛, 齐昊, 王若鉴. 甘南高山林线岷江冷杉——杜鹃种群结构与动态. 植物研究, 2019, 39(5): 664-672.
- [28] 张强. 辽宁省黄檗种群特征研究. 防护林科技, 2019, (1): 21-22.
- [29] 王进, 姚兰, 艾训儒, 朱江, 刘松柏. 鄂西南不同区域亮叶桦种群结构与动态特征. 应用生态学报, 2020, 31(2): 357-365.
- [30] 肖书礼, 付梦媛, 杨科, 陈小红. 极小种群野生植物峨眉含笑种群结构与数量动态. 西北植物学报, 2019, 39(7): 1279-1288.
- [31] 朱强, 艾训儒, 姚兰, 朱江, 吴漫玲, 黄小, 王进, 洪建峰. 鄂西南川陕鹅耳枥种群结构与动态. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(8): 93-100.