

黄龙山白桦种群结构及其时间序列预测分析

薛瑶芹^a, 张文辉^b, 何景峰^b

(西北农林科技大学 a. 生命科学学院, b. 林学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 **【目的】** 阐明黄土高原南部地区白桦种群未来的发展趋势, 为其合理经营利用提供依据。 **【方法】** 以群落物种重要值为依据, 通过聚类分析, 将黄龙山地区的白桦林划分为 4 个群落类型, 每个类型中的全部白桦个体为一个种群, 分析白桦不同种群的年龄结构、存活曲线及静态生命表, 并应用时间序列模型预测了种群的发展趋势。 **【结果】** 黄龙山地区白桦种群幼龄个体较少, 中老龄个体较多, 基本呈衰退趋势; 种群 A 幼龄株数相对较多, 有一定更新能力; 种群 C、D 衰退特征较为明显, 其中种群 D 只在 III、IV 龄级具有一定数量个体, 几乎没有更新幼苗。种群 A、B、C、D 的生命表和存活曲线表现出相似的特征, 即 I、V、VI 龄级死亡率高, 除种群 A 外, 标准化最高存活量均出现在 III 或 IV 龄级。时间序列预测分析表明, 在未来 20、30、40 和 50 年中, 多数种群均呈现幼龄个体减少而老龄个体增加的态势, 老化趋势较为明显。 **【结论】** 黄龙山白桦种群表现出明显的衰退特征, 属于该地区的过渡种群, 逐渐会被更加稳定的松栎混交林所取代, 应根据各种群的特点采取不同的经营措施, 以促进群落演替。

【关键词】 白桦; 年龄结构; 存活曲线; 时间序列预测

【中图分类号】 Q948

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2008)12-0121-08

Study on the population structure and time sequence prediction of *Betula platyphylla* in Huanglong Mountain

XUE Yao-qin^a, ZHANG Wen-hui^b, HE Jing-feng^b

(a. College of Life Sciences, b. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** *Betula. platyphylla* forest is the general forest type distributed in the south Loess Plateau. In order to characterize the age structure and dynamics of the *B. platyphylla* population and to provide some scientific basis for reasonable exploitation and utilization, 18 sample fields in Huanglong Mount were investigated and studied. **【Method】** Using Statistic software, cluster analysis was made based on the importance value of every species in different sample fields, and then these sample fields were segmented into 4 community types when the linkage distance was 0.8, and all *B. platyphylla* individuals of every type were regarded as a population. The age structure, static life table, survival curve and the time sequence prediction of number dynamics of different *B. platyphylla* populations were studied based on the investigation. **【Result】** Most *B. platyphylla* populations had relatively small young individuals but relatively rich old ones, so they presented declining tendency. Only population A, which had comparatively rich young individuals, had limited ability of regeneration. Population C and population D both showed more obvious declining tendency, and the latter just had individuals on III and IV class. Even under different environmental conditions, static life table and survival curves of 4 different populations showed similar fea-

* [收稿日期] 2008-01-02

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2006BAD09B03)

[作者简介] 薛瑶芹(1982-), 女, 陕西府谷人, 硕士, 主要从事生物多样性保护与利用研究。E-mail: yaoqinxue @126.com

[通讯作者] 张文辉(1955-), 男, 陕西岐山人, 教授, 博士生导师, 主要从事植物生态学与植物保护生物学研究。

E-mail: zwhckh @163.com

tures; relatively high mortality rate was displayed in age class I, V and VI, and except population A, the maximum standard living number was found on age class III or IV of the other populations. Time sequence prediction models for different populations after 20, 30, 40 and 50 years indicated that the number of old individuals would increase and that young individuals would decrease, all 4 populations showed apparently aging tendency. 【Conclusion】 *B. platyphylla* population would be substituted gradually by *Pinus tabulaeformis* and *Quercus wutaishanica* forest which is more stable, and all the analyses indicate that *B. platyphylla* is transient population in this area. And in order to promote the community succession, various management measures should be taken according to the features of different *B. platyphylla* populations in Huanglong Mountain.

Key words: *Betula platyphylla*; age structure; survival curve; time sequence prediction

种群年龄结构是种群生物学特性与环境因素相互作用的结果。研究群落优势乔木种群的结构状态,分析其生命表和存活曲线,不仅可以了解优势种群现在的状态,也可以对群落的未来发展作出预测^[1]。

白桦(*Betula platyphylla*)喜光、耐寒、耐贫瘠、生长较快、适应性强,是次生裸地的先锋树种,在我国东北、华北地区及黄土高原南部地区形成大面积纯林或以白桦为主的混交林。有关白桦林群落的特征、地理分布以及个体的生理生态、生长规律等方面已有不少研究^[2-9],且一般研究认为,白桦在分布区内属于过渡种群,随着演替的进行会被更稳定的松栎林取代^[2,10-11]。

黄龙山林区为白桦林在黄土高原地区发育最充分的地区^[12],但尚未见到对该地区白桦种群动态的系统研究。白桦林能否持续发育的关键是其种群能否正常更新,因此本研究通过对黄龙山地区白桦纯林和以白桦为主混交林的调查,系统分析了白桦种群的年龄结构、生命表和存活曲线,并应用时间序列模型对种群的未来发展进行了预测,旨在阐明该地区天然白桦种群的基本特性,分析不同群落类型和生境条件下白桦种群的动态,以揭示不同群落的发展趋势,为黄土高原白桦林的合理经营利用提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黄龙山林区位于陕西北部,黄土高原东南部,属陕北黄土高原沟壑区,处于暖温带半湿润与半干旱气候的过渡区,海拔 1 000~1 300 m,年平均气温 8.6 °C,最高气温 36.7 °C,最低气温 -22.5 °C,年均降水量 611.8 mm。森林土壤以褐土为主,pH 为 7.5~8.0。地带性植被是暖温带落叶阔叶林。主要

森林群落为:油松林、松栎混交林、辽东栎林、桦木林、山杨林、沙棘林和山桃林。不同群落类型依据生境条件呈镶嵌性分布,约有植物 580 种,其中乔木 100 种,藤本 30 种,灌木 130 种,草本 320 种。主要乔木有白桦(*B. platyphylla*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、山杨(*Populus davidiana*)、茶条槭(*Acer ginnala*);主要灌木有华北绣线菊(*Spiraea fritschiana*)、栓翅卫矛(*Euonymus phellomanus*)、胡颓子(*Elaeagnus pungens*)、榛(*Corylus heterophylla*)、葱皮忍冬(*Lonicera ferdinandii*)、冻绿(*Rhamnus utilis*)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*);主要的草本植物为苔草(*Carex* sp.)、羊茅(*Festuca ovina*)、野棉花(*Anemone upehensis*)等^[12]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查 充分踏查后,在白桦纯林和以白桦为主的混交林内共布设 18 块面积为 400 m² 的样地,在每块样地内沿对角线设置 3 个 5 m×5 m 的灌木样方和 3 个 1 m×1 m 的草本样方。调查内容包括:(1)生境:地形地貌、人为干扰强度、土壤、气象、坡向、坡位;(2)群落学特征:包括群落组成、高度、盖度等,方法见文献[13];(3)在灌木和草本样方内,按物种计测灌木和草本植物的平均高度、基径、盖度、多度、频度和生长势;(4)乔木树种测定:以样地一边为 X 轴,其垂直边作为 Y 轴建立平面直角坐标系,记录每一株乔木的名称、坐标值、胸径(幼苗测量基径)、树高和冠幅;(5)白桦年龄确定:选择各样地的平均木 1 或 2 株,分别量其胸径(DBH),并用生长锥钻取年轮条,室内显微镜下检查年轮数,求出不同年龄个体的平均胸径,利用 SPSS12.0 求得拟和曲线(图 1),得到二者的关系方程:

$$y = 2.184 + 1.035x + 0.013x^2,$$

$$(R^2 = 0.9997, F = 99942.19).$$

式中: y 为个体年龄, x 为胸径, F 检验表明该方程达到极显著水平 ($P < 0.01$)。所调查样地中白桦个体的年龄依据上式确定。

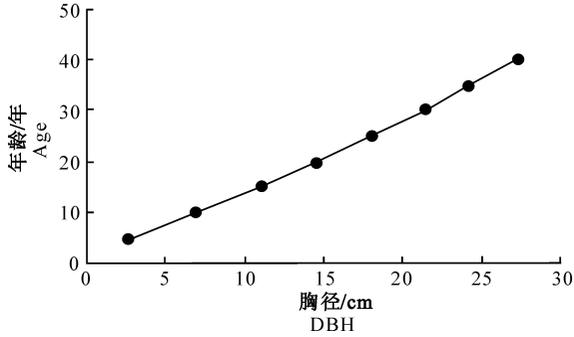


图1 黄龙山地区白桦年龄与胸径的拟合曲线

Fig.1 Fitting curve of age and DBH of *B. platyphylla* in Huanglong Mt.

1.2.2 群落类型划分 以样地内各物种重要值为依据,应用 Statistic 软件进行聚类分析,划分群落类型^[9,14-15]。

1.2.3 年龄结构 以10年为一个龄级,统计每一块样地内各龄级的白桦株数;将同一种群中不同样地的白桦个体数分龄级合并,组成各种群年龄结构

的基本数据。以龄级为横坐标,以株数为纵坐标绘制种群年龄结构图^[16-17]。

1.2.4 静态生命表和存活曲线 根据静态时间生命表的编制原理和方法^[18-19],以10年为一个龄级单位,计算生命表各项参数,并将各种群相对应龄级的株数合并,编制黄龙山地区白桦种群总体的静态生命表。以各种群及种群总体的不同龄级标准化存活量(l_x)为纵坐标,以龄级为横坐标绘制存活曲线,具体方法见文献^[20-21]。

1.2.5 时间序列预测模型 该预测模型如下:

$$M_t^{(1)} = M_{t-1}^{(1)} + (x_t - x_{t-n})/n.$$

式中: $M_t^{(1)}$ 为近期 n 个观测值在 t 时刻的平均值,也称为第 n 周期的移动平均; t 为龄级; x_t 为 t 龄级单位面积存活株数; $n = \text{预测时间}/10$ 。根据现有的白桦种群的年龄结构数据,应用上式进行计算,预测未来20,30,40和50年的种群发展趋势,具体原理和方法见文献^[14,21-22]。

2 结果与分析

2.1 黄龙山地区白桦群落类型的划分

图2为黄龙山地区18块白桦样地的聚类分析结果。

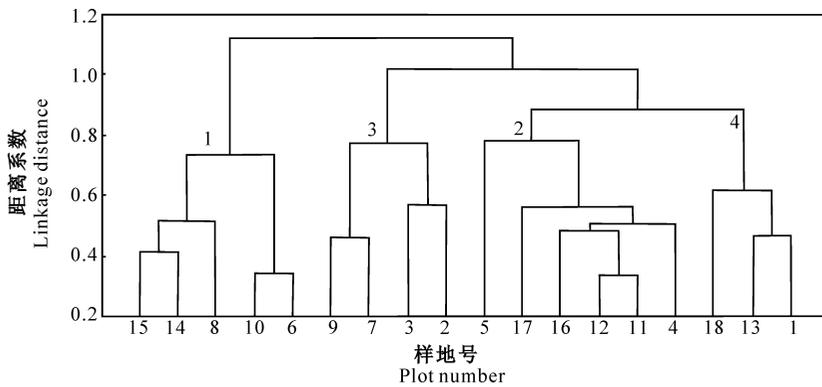


图2 黄龙山地区18块白桦样地的聚类分析树状图

1. 白桦-榛+华北绣线菊-苔草群落;2. 白桦-栓翅卫矛-苔草群落;3. 白桦+辽东栎-冻绿-羊茅群落;4. 白桦+油松-陕西荚蒾-羊茅群落

Fig.2 Tree diagram of cluster analysis for 18 plots of *B. platyphylla* forest in Huanglong Mt.

1. *B. platyphylla*-*Corylus heterophylla*+*Spiraea fritschiana*-*Carex* sp. community;2. *B. platyphylla*-*Euonymus phellomanus*-*Carex* sp. community;3. *B. platyphylla*+*Quercus wutaishanica*-*Rhamnus utilis*-*Festuca ovina* community;4. *B. platyphylla*+*Pinus tabulae formis*-*Viburnum schensianum*-*Festuca ovina* community

图2表明,当距离系数为0.8时,可将该地区的白桦林划分为4个群落类型:(1)白桦-榛+华北绣线菊-苔草群落(群落1)。包括样地6、8、10、14和15,分布于海拔1160~1300m的阴坡下部,坡度27°~30°。乔木层盖度20%~50%,以白桦为主;灌木层盖度30%~70%,植物种类较多,优势种为榛

和华北绣线菊,其他伴生种主要有栓翅卫矛和胡颓子;草本层盖度35%,优势种为苔草。

(2)白桦-栓翅卫矛-苔草群落(群落2)。包括样地4、5、11、12、16和17,位于海拔1140~1170m阴坡、半阴坡中下部,坡度一般为20°。林相较为整齐,乔木层以白桦占优势,但有少量油松个体侵入;

灌木层盖度 20%~40%，密度较高的栓翅卫矛占优势地位，其他伴生种有华北绣线菊和虎榛子；草本层盖度 30%~40%，以苔草为主。

(3)白桦+辽东栎-冻绿-羊茅群落(群落 3)。包括 2、3、7 和 9 号样地，分布在海拔 1 160~1 350 m 的阴坡中部。群落内光照不足，较为阴湿。乔木层盖度 50%左右，以白桦和辽东栎为主；灌木种类较多，盖度 60%左右；草本层盖度 60%~75%，主要植物为羊茅，混生有较多苔草。

(4)白桦+油松-陕西莨苳-羊茅群落(群落 4)。包括 1、13 和 18 号样地，位于海拔 1 180~1 460 m 的阴坡中上部，坡度 17°~28°。乔木层盖度 40%~70%，以白桦、油松为优势树种，其他主要伴生树种有辽东栎和山杨；灌木种类少且较为稀疏，以陕西莨苳为主；草本层盖度 20%~30%，优势种为羊茅。

本研究以每个群落类型中的所有白桦个体为一个种群，并将群落 1 至群落 4 中对应的白桦种群分

别命名为种群 A、种群 B、种群 C 和种群 D。

2.2 黄龙山地区不同白桦种群的年龄结构

从黄龙山 4 个白桦种群的年龄结构图(图 3)可以看出，该地区白桦种群幼苗量不足，其年龄结构呈现出不同程度的衰退特征。种群 A 各龄级个体密度相对较大，低龄级个体较多，其中 I、II 龄级个体数占总株数的 44.1%；种群 B 的年龄结构与种群 A 相似，但各龄级单位面积株数仅为种群 A 的 1/2，I、II 龄级在种群中所占比例也有所下降；种群 C 的 II、III、IV 龄级为优势龄级，其个体数占总株数的比例之和达 81.82%；种群 D 各龄级株数波动很大，出现断代现象，只有 III、IV 龄级有存活个体，且更新幼苗严重缺乏。白桦种群更新不良的主要原因是林下光照不足，而且混交林中混生有大量辽东栎幼苗(34 株/dam²)或油松幼苗，幼苗之间不仅有种内竞争，也存在激烈的种间竞争，因此白桦幼苗生长困难，种群呈现衰退趋势。

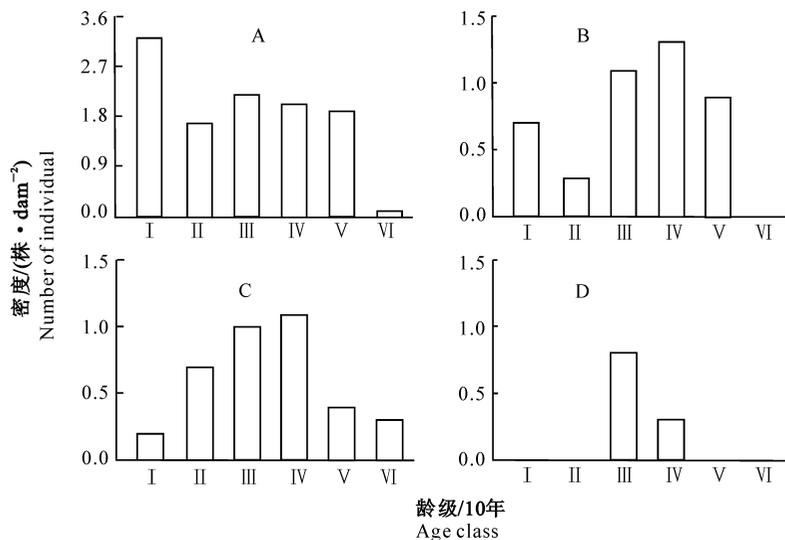


图 3 黄龙山地区不同群落中白桦种群的年龄结构图

A. 种群 A; B. 种群 B; C. 种群 C; D. 种群 D; 下同

Fig. 3 Age structure of different *B. platyphylla* populations in Huanglong Mt.

A. Population A; B. Population B; C. Population C; D. Population D; The same below

2.3 黄龙山地区不同白桦种群的生命表与存活曲线

表 1 为黄龙山地区 4 个白桦种群及种群总和的静态生命表，种群总和基本代表了该地区白桦种群的基本属性。从表 1 可以看出，种群死亡率(q_x)和消失率(K_x)均较高的龄级是 I 龄级和 V、VI 龄级，不同种群因所处环境条件的差异而出现一定的分化，但基本趋势一致，说明在这 3 个阶段，白桦个体生活力和适应能力较差，幼龄级的高死亡率表明其所处环境不利于幼苗生长发育，而进入 V、VI 龄级

后，由于个体开始生理衰老，种群进入第二个死亡高峰期。4 个种群中，除种群 A 的标准化存活量(L_x)最高值(1 000)在 I 龄级外，种群 B、C、D 均在 III 或 IV 龄级，并且在此龄级之前出现了死亡率为负的现象，说明以上 3 个种群至少需要这些幼苗(负值数量)才能维持种群平衡，这也表征了种群的衰退程度。

存活曲线是研究种群动态的主要手段之一，通过分析存活曲线，可以深刻了解种群动态的本质及其内在规律^[23]。图 4 为黄龙山 4 个白桦种群及种

群总体的存活曲线。

表 1 黄龙山地区白桦种群的静态生命表

Table 1 Static life table of *B. platyphylla* population in Huanglong Mt.

种群 Population type	x	a_x	l_x	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	$\ln(a_x)$	$\ln(l_x)$	K_x
A	I	12.8	1 000.0	468.8	468.8	87.3	2 028.5	2.0	2.5	6.9	0.6
	II	6.8	531.3	-156.3	-294.1	-101.6	1 941.2	3.7	1.9	6.3	-0.3
	III	8.8	687.5	62.5	90.9	70.5	2 042.8	3.0	2.2	6.5	0.1
	IV	8.0	625.0	31.3	50.0	498.7	1 972.4	3.2	2.1	6.4	0.1
	V	7.6	593.8	562.5	947.4	973.7	1 473.7	2.5	2.0	6.4	2.9
	VI	0.4	31.3	31.3	1 000.0	500.0	500.0	16.0	-0.9	3.4	3.4
B	I	3.0	566.0	345.9	611.1	-1 123.0	-1 567.6	-2.8	1.1	6.3	0.9
	II	1.2	220.1	-628.9	-2 857.1	-1 517.5	-444.6	-2.0	0.2	5.4	-1.3
	III	4.5	849.1	-150.9	-177.8	65.2	1 072.8	1.3	1.5	6.7	-0.2
	IV	5.3	1 000.0	308.2	308.2	654.1	1 007.6	1.0	1.7	6.9	0.4
	V	3.7	691.8	691.8	1 000.0	500.0	353.5	0.5	1.3	6.5	6.5
	VI	0.0	0.0	-181.8	0.0	0.0	-146.5	0.0	0.0	0.0	0.0
C	I	0.8	181.8	-454.5	-2 500.0	-1 464.3	107.8	0.6	-0.2	5.2	-1.3
	II	2.8	636.4	-272.7	-428.6	-264.3	1 572.1	2.5	1.0	6.5	-0.4
	III	4.0	909.1	-90.9	-100.0	268.2	1 836.4	2.0	1.4	6.8	-0.1
	IV	4.4	1 000.0	636.4	636.4	443.2	1 568.2	1.6	1.5	6.9	1.1
	V	1.6	363.6	90.9	250.0	625.0	1 125.0	3.1	0.5	5.9	0.4
	VI	1.2	272.7	272.7	1 000.0	500.0	500.0	1.8	0.2	5.6	5.4
D	I	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1 444.4	-	-	-	0.0
	II	0.0	0.0	-1 000.0	0.0	500.0	1 444.4	-	-	-	-6.9
	III	3.0	1 000.0	555.6	555.6	722.2	944.4	0.9	1.1	6.9	0.8
	IV	1.3	444.4	444.4	1 000.0	222.2	222.2	0.5	0.3	6.1	6.1
	V	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	VI	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
种群总和 Overall population	I	16.6	817.7	287.4	351.4	-267.0	1 551.8	1.9	2.8	6.7	0.4
	II	10.8	530.4	-469.6	-885.4	-412.3	1 818.9	3.4	2.4	6.3	-0.6
	III	20.3	1 000.0	60.8	60.8	193.0	2 231.2	2.2	3.0	6.9	0.1
	IV	19.1	939.2	305.4	325.2	600.4	2 038.2	2.2	2.9	6.8	0.4
	V	12.9	633.8	555.0	875.6	937.8	1 437.8	2.3	2.6	6.5	2.1
	VI	1.6	78.8	78.8	1 000.0	500.0	500.0	6.3	0.5	4.4	4.4

注: x . 龄级; a_x . 单位面积存活株数; l_x . x 龄级开始时的标准化存活量; d_x . 从 x 到 $x+1$ 龄级的标准化死亡株数; q_x . 各龄级的个体死亡率; L_x . x 到 $x+1$ 级平均存活的个体数; T_x . x 及其以上龄级的存活个体总数; e_x . 进入 x 龄级个体的平均生命期望; K_x . 消失率。

Note: x . Age class; a_x . Survival individuals in the age class; l_x . Standard survival number in beginning of x period; d_x . Dead individuals from x to $x+1$ period; q_x . Mortality rate per age class; L_x . Average survival individuals during x to $x+1$ period; T_x . Individuals from x to more than x period; e_x . Mean expected life of survival individuals from beginning of x period; K_x . Killing power.

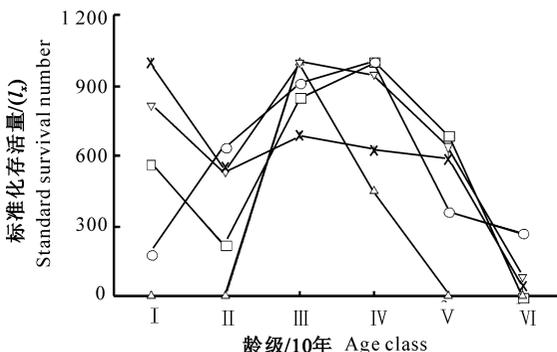


图 4 黄龙山地区白桦种群的存活曲线

-x-x, A; -□-□, B; -○-○, C; -△-△, D; -▽-▽, 种群总体 Overall

Fig. 4 Survival curves of different *B. platyphylla* populations in Huanglong Mt.

从图 4 可以发现,各种群存活曲线及种群总体存活曲线均不同程度地偏离 Deevey III 型曲线,偏离的程度与种群中幼苗的缺乏程度有关,表明该地区白桦种群更新不足,这与年龄结构的分析结果一致。比较不同种群的存活曲线可发现,种群 A 的存活曲线较接近 Deevey III 型,表示其有一定更新能力;各种群死亡率高峰期出现分化,种群 A、B 幼龄级死亡率均较高,种群 C、D 分别在 IV~VI 龄级和 III~IV 龄级出现高死亡率。4 个种群缺少幼龄个体的具体原因不同,种群 A 因为白桦幼苗密度较大,随着年龄增长,种内竞争加剧,产生了自然稀疏;种群 B 则是因为油松个体的侵入影响了白桦幼苗、幼树对营养

空间的利用,导致部分个体死亡;种群 C 的幼苗、幼树因受辽东栎等上层乔木、灌木的遮蔽,得不到充足的光照而难以发展;种群 D 所处林分郁闭度大,加之辽东栎、油松幼苗的营养竞争,导致白桦幼苗存活率低。

2.4 黄龙山地区不同白桦种群数量动态的时间序列预测

黄龙山 4 个白桦种群数量动态的时间序列预测

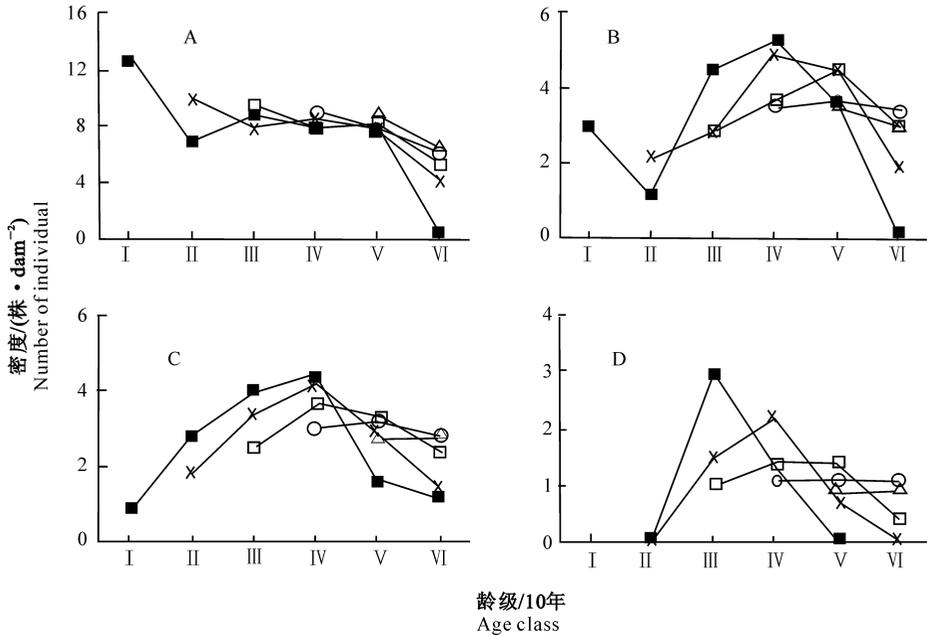


图 5 黄龙山地区不同白桦种群数量动态的时间序列预测

—■—, 原始数据; —×—, 20 年; —□—, 30 年; —○—, 40 年; —△—, 50 年

Fig. 5 Time sequence prediction of number dynamics of different *B. platyphylla* populations in Huanglong Mt.

—■—, Original data; —×—, 20 years later; —□—, 30 years later; —○—, 40 years later; —△—, 50 years later

3 讨论

本研究根据群落物种组成的数量特征,定量地将黄龙山地区的白桦林划分为 4 个类型,并以乔木层、灌木层和草本层各自的优势物种命名,结果与郭其强等^[9]根据群落树种组成、结构以及生境条件定性划分群落类型的结果基本一致,但由于样地数量及重要值计算方法的差异,导致了灌木层、草本层的优势物种有所不同。

本研究中的白桦纯林(种群 A)由于处于演替初期,缺乏有利的竞争者,因此幼龄级个体较多,种群能维持一定更新。但诸多研究结果均表明,白桦林在整个群落演替过程中往往暂时处于相对稳定状态,随着演替的进行及其他优势种的侵入,林内光照条件将逐渐减弱,导致白桦个体逐渐减少,种群将很快开始衰退(种群 B),白桦将被其他针阔叶树种取代,从而表现为不稳定的次生林型^[2,10-11]。本研究

图(图 5)显示,各种群的株数峰值在预测序列中依次向后推移,多数种群的幼龄个体数随着时间推移逐渐减少,老龄个体所占比例逐渐上升,幼树更显不足,最终,老龄个体也急剧减少,呈衰退趋势。种群 A、B 的 II 龄级个体在未来 20 年虽有一定程度的增加,但也不能补充 III、IV 龄级由于个体发育或死亡造成的缺失,所以随着年龄的增加,种群数量将不可避免地逐渐衰减。

结果也证明,一旦有油松或辽东栎大量侵入种群(种群 C、种群 D),白桦便被逐渐排挤出主林层,而这种竞争上的不利地位导致了其幼龄及老龄个体死亡率上升,从而加速了种群的衰退。

因此在黄龙山林区,白桦种群的经营管理应以生态效益为主,尽量保持其所处群落的稳定性。根据不同种群的特点及其所处的不同演替阶段,采取不同的管理措施:对于处于演替初期的种群 A 和种群 B 而言,应在林间空地和林窗补植油松、辽东栎,使群落逐渐向混交林的方向发展,以增加整体的稳定性;对于种群 C 和种群 D 而言,恰当的经营措施应当是将白桦作为非目的树种,适当间伐其成、过熟个体,并进行一定的人为干扰,以促进群落向松栎混交群落演替。

4 结论

黄龙山地区不同白桦林群落组成及所处环境条

件有所不同,因此白桦种群年龄结构、存活曲线及时间序列预测均呈现出各自的特点,但总体而言,该地区白桦种群幼苗贮备严重不足,老化严重,更新困难,呈现不同程度的衰退趋势,当有其他优势树种侵入时,种群衰退更为明显和迅速,表明白桦是黄龙山地区的过渡种群,其所在群落正在向该地区的气候顶级群落演替。

[参考文献]

[1] Stewart G H. The dynamics of old-growth *Pseudotsuga* forest in the western Cascade Range, Oregon [J]. USA Vegetation, 1989, 82(1): 79-94.

[2] 关文彬. 中国东北地区白桦林植被生态学的研究——桦属植物与中国白桦林 [J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(4): 106-107. Guan W B. Vegetation ecology on communities dominated by *Betula platyphylla* in Northeast of China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(4): 106-107. (in Chinese)

[3] 邱扬, 李湛东, 于汝元. 白桦种群的稳定性与火干扰关系的研究 [J]. 植物研究, 1998, 18(3): 321-327. Qiu Y, Li Z D, Yu R Y. Study on the relation between the stability of *Betula platyphylla* population and the fire disturbance [J]. Bulletin of botanical research, 1998, 18(3): 321-327. (in Chinese)

[4] 王庆锁, 罗菊春, 张希和. 坝上、坝下白桦林林分结构和生长规律 [J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(3): 96-98. Wang Q S, Luo J C, Zhang X H. Stand structure and growth of *Betula platyphylla* forests in Bashang plateau and Baxia Mountain [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22(3): 96-98. (in Chinese)

[5] 王爱民, 祖元刚. 以光合效率度量天然白桦种群生态位初探 [J]. 生态学杂志, 2000, 21(1): 65-67. Wang A M, Zu Y G. Primary probing into niche of natural *Betula platyphylla* population by means of photosynthetic efficiency [J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, 21(1): 65-67. (in Chinese)

[6] 王爱民, 祖元刚. 大兴安岭不同演替阶段白桦种群光合生理生态特征 [J]. 吉林农业大学学报, 2005, 27(2): 190-193. Wang A M, Zu Y G. Photosynthetic characteristics of birch during different succession stages in Great Xingan Mountain [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2005, 27(2): 190-193. (in Chinese)

[7] 杨传平, 刘桂丰, 魏志刚, 等. 白桦强化促进提早开花结实技术的研究 [J]. 林业科学, 2004, 40(6): 75-78. Yang C P, Liu G F, Wei Z G, et al. Study on intensive breeding technique of accelerating *Betula platyphylla* flowering and seeding early [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(6): 75-78. (in Chinese)

[8] 罗大庆, 郑维列, 王景生, 等. 西藏米拉山白桦种群生物量和生长量研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1329-1333. Luo D Q, Zheng W L, Wang J S, et al. Biomass and yield of *Betula platyphylla* population in Mila Mount of Tibet [J].

Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1329-1333. (in Chinese)

[9] 郭其强, 张文辉, 何景峰, 等. 黄龙山不同白桦林群落结构特征研究 [J]. 西北植物学报, 2007, 27(1): 132-138. Guo Q Q, Zhang W H, He J F, et al. Structural characteristics of different *Betula platyphylla* communities in Huanglong Mountain [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(1): 132-138. (in Chinese)

[10] 朱志诚. 陕北黄土高原白桦林的初步研究 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1994, 24(5): 455-459. Zhu Z C. Preliminary studies on the *Betula Platyphylla* forests in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1994, 24(5): 455-459. (in Chinese)

[11] 孙冰, 杨国亭, 李弘, 等. 白桦种群的年龄结构及其群落演替 [J]. 东北林业大学学报, 1994, 22(3): 43-47. Sun B, Yang G T, Li H, et al. Study on the age structure of *Betula platyphylla* population and the succession of its community [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1994, 22(3): 43-47. (in Chinese)

[12] 张仰渠. 陕西森林 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社; 北京: 中国林业出版社, 1986. Zhang Y Q. Shaanxi forest [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press; Beijing: China Forestry Press, 1986. (in Chinese)

[13] 董鸣, 王义凤, 孔繁志. 陆地生物群落调查观测与分析——中国生态系统研究网络观测与分析标准方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 20-81. Dong M, Wang Y F, Kong F Z. Standard methods for observation and analysis in Chinese ecosystem research network, survey, observation and analysis of terrestrial biocommunities [M]. Beijing: China Standards Press, 1996: 20-81. (in Chinese)

[14] 张文辉, 王延平, 康永祥, 等. 濒危植物太白红杉种群年龄结构及其时间序列预测分析 [J]. 生物多样性, 2004, 12(3): 361-369. Zhang W H, Wang Y P, Kang Y X, et al. Age structure and time sequence prediction of populations of an endangered plant, *Larix potaninii* var. *chinensis* [J]. Chinese Biodiversity, 2004, 12(3): 361-369. (in Chinese)

[15] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数 [J]. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277. Ma K P, Huang J H, Yu S L, et al. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. Species richness, evenness and species diversity [J]. Acta Ecologica Sinica, 1995, 15(3): 268-277. (in Chinese)

[16] Wretten S D. Field and laboratory exercise in ecology [M]. New York: Edward Arnod, 1980.

[17] 江洪. 云杉种群生态学研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 33-78. Jiang H. Study on population ecology of *Picea asperata* [M].

- Beijing, China Forestry Press, 1992; 33-78. (in Chinese)
- [18] Harcombe P A. Tree life tables [J]. Bio Science, 1987, 37: 557-567.
- [19] Zou C J, Han S J, Zhou Y M, et al. Population dynamics of *Pice mongolica* in sandy forest steppe ecotone [J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 2001, 7(6): 517-522.
- [20] Crawley M J. Plant ecology [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1986; 97-185.
- [21] 张文辉. 裂叶沙参种群生态学研究 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1998; 44-54.
- Zhang W H. The population ecology on *Adenophora lobophylla* [M]. Haerbin: Northeast Forestry University Press, 1998; 44-54. (in Chinese)
- [22] 谢衷洁. 时间序列分析 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990; 88-145.
- Xie Z J. Time sequence analysis [M]. Beijing: Beijing University Press, 1990; 88-145. (in Chinese)
- [23] 蒋志刚, 马克平. 保护生物学 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1997; 40-41.
- Jiang Z G, Ma K P. Conservation biology [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1997; 40-41. (in Chinese)

(上接第 120 页)

- [11] 史晓楠, 王全九, 苏莹. 微咸水水质对土壤水盐运移特征的影响 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 516-519.
- Shi X N, Wang Q J, Su Y. Effects of slight saltwater quality on the characteristics of soil water and salt transference [J]. Arid Land Geography, 2005, 28(4): 516-519. (in Chinese)
- [12] 日本土壤物理性测定委员会. 土壤物理性测定法 [M]. 翁德衡, 译. 重庆: 科学技术文献出版社, 1979.
- Japanese Committee for Soil Physical Property Determination. Determination method of soil physical property [M]. Translated by Weng D H. Chongqing: Science and Technology Literature Press, 1979. (in Chinese)
- [13] 徐绍辉, 张佳宝, 刘建立, 等. 表征土壤水分持留曲线的几种模型的适应性研究 [J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 498-504.
- Xu S H, Zhang J B, Liu J L, et al. Effect of spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity on water drainage at field scale [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 39(4): 498-504. (in Chinese)
- [14] 夏卫生, 雷廷武, 潘英华, 等. 土壤水动力学参数研究与评价 [J]. 灌溉排水, 2002, 21(1): 72-75.
- Xia W S, Lei T W, Pan Y H, et al. Present situation of soil water dynamic parameters research [J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(1): 72-75. (in Chinese)
- [15] 王盛萍, 张志强, 武军. 坡面林地土壤水分特征函数空间变异性初探 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 28-35.
- Wang S P, Zhang Z Q, Wu J. Preliminary study on spatial variability of soil water retention function in a Chinese pine (*Pinus Tablifirms*) Plantation [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(2): 28-35. (in Chinese)
- [16] 张玉珍. 土壤入渗性能和水分特征曲线的测定 [J]. 福建工程学院学报, 2006, 4(6): 759-762.
- Zhang Y Z. Determination of soil infiltration capability and water characteristic curves of sandy loam soil [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2006, 4(6): 759-762. (in Chinese)
- [17] 科诺诺娃 M M. 土壤有机质 [M]. 周礼恺, 译. 北京: 科学出版社, 1966.
- Kenenewa M M. Soil organic matter [M]. Translated by Zhou L K. Beijing: Science and Technology Publishing House, 1966. (in Chinese)